

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

VICTOR MATHEUS BONIFACIO ALVES

Desaguamento do lodo de Estação de Tratamento de Água através do
uso de Blocos Drenantes

VITÓRIA – ES
2017

VICTOR MATHEUS BONIFACIO ALVES

**Desaguamento do lodo de Estação de Tratamento de Água
através do uso de Blocos Drenantes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dra. Cristiane Pereira Zdradek.

VITÓRIA – ES
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

A474d Alves, Victor Matheus Bonifacio, 1985-
Desaguamento do lodo de estação de tratamento de água
através do uso de blocos drenantes / Victor Matheus Bonifacio
Alves. – 2017.
139 f. : il.

Orientador: Cristiane Pereira Zdradek.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento
Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro
Tecnológico.

1. Lodo residual. 2. Polímeros. 3. Água – Estações de
tratamento. 4. Teste de inversão. 5. Ensaio de resistência
específica. 6. Blocos drenantes. I. Zdradek, Cristiane Pereira. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 628

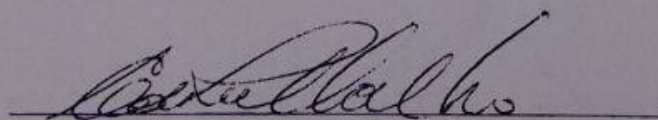
VICTOR MATHEUS BONIFÁCIO ALVES

**“DESAGUAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DO USO DE BLOCOS
DRENANTES”**

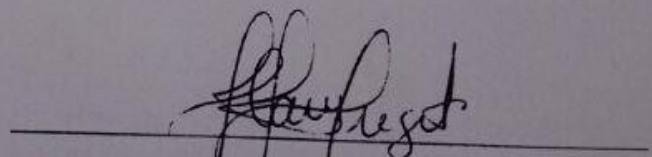
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2017.

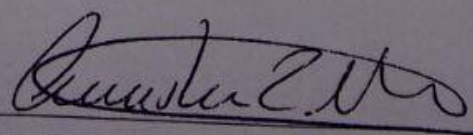
COMISSÃO EXAMINADORA



Profa. DSc. Edumar Ramos Cabral
Coelho
Examinador Interno - PPGES / UFES



Profa. DSc. Flávia Pereira Puget
Examinadora Externa – IFES



Profa. DSc. Cristiane Pereira Zdradek
Orientadora – PPGES / UFES

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a execução desse trabalho, especialmente:

À minha esposa Cintia Nascimento dos Santos Bonifacio pelo seu companheirismo, paciência sempre incentivando e contribuindo nessa conquista;

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Aracruz-ES (SAAE) através da parceria firmada, possibilitando a realização dessa pesquisa;

À Professora Cristina Pereira Zdradek, pela orientação, apoio e por ampliar minha visão da vida e da Ciência;

Aos demais professores do Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável: Edumar Ramos Cabral Coelho, Ricardo Franci Gonçalves, Renato Simam e Gilson Silva Filho, por todos os conhecimentos transmitidos e apoio no desenvolvimento da pesquisa;

A todos os colegas de Mestrado, pelo companheirismo em todos os momentos que compartilhamos e que ainda compartilharemos;

Aos meus pais, irmãos e parentes pelo apoio e para concretização do sonho;

A Deus, por estar sempre me encorajando e iluminando meu caminho para realização dos meus sonhos.

RESUMO

O processo de desaguamento é uma das técnicas utilizadas na separação sólido líquido que busca, a redução do volume e conseqüentemente facilita o transporte e disposição final dos resíduos do tratamento. O desaguamento pode ser feito por uso de sistemas, naturais ou mecanizados. Este trabalho tem como objetivo estudar o desaguamento do lodo da unidade de flotação da Estação de Tratamento Água localizada no distrito de Coqueiral em Aracruz ES. Foram realizadas caracterizações do lodo gerado no processo de tratamento e do lodo seco nos ensaios de desaguamento, segundo ABNT NBR 10.004, 10.005 e 10.006 que tratam da obtenção de extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos sólidos e da sua devida classificação. Não obstante, foi realizada avaliação da qualidade da água da lagoa Santur a jusante, montante e no ponto de lançamento do lodo. Foram avaliados nove polímeros entre aniônicos, não iônicos e catiônicos através dos ensaios de resistência específica e teste de inversão. A partir do melhor polímero identificado, foi realizada a secagem do lodo com o uso de leito de secagem modificado por blocos drenantes. Foram utilizados modelos empíricos para realizar a estimativa do volume de lodo produzido pela Estação de Tratamento de Água e comparado com os valores obtidos experimentalmente. Com os dados mensurados foi realizado o dimensionamento do leito de secagem composto por blocos drenantes e foi feita a análise de custo para implantação. O lodo bruto e o lodo seco foram classificados como Classe II A - Não Inerte, fato que viabiliza a destinação do resíduo. O ensaio de resistência específica e o teste de inversão apontaram o polímero FO 4290 SH da SNF na dosagem de 2,0 mg pol./g ST como sendo o polímero mais indicado para realização do desaguamento do lodo. Os ensaios de desaguamento alcançaram eficiências de 93% na remoção de água com 30 dias de secagem. A área estimada do leito de secagem por blocos drenantes foi de 968 m². A partir da análise de custo foi identificado um investimento na ordem de R\$ 753.684,80 para a construção do leito de secagem com cobertura e custo operacional anual do sistema no valor de R\$ 42.290,15.

Palavras-chaves: polímero, bloco drenante, desaguamento.

ABSTRACT

The dewatering process is one of the techniques used in the separation of liquid solid that seeks, the reduction of the volume and consequently facilitate the transport and final disposal of treatment residues. The dewatering can be by use of natural or mechanized systems for water removal. This work aims to study the dewatering of sludge from the flotation unit of the Water Treatment Station located in the district of Coqueiral in Aracruz ES. Characterization of the sludge generated in the treatment process and the dry sludge were carried out in the dewatering tests, according to ABNT NBR 10.004, 10.005 and 10.006, which deal with obtaining leached extract and solubilized solid wastes and their classification. Nevertheless, water quality evaluation of the Santur lagoon downstream, amount and at the point of release of the sludge according to CONAMA 357/2005 was carried out. In order to perform the dewatering, nine polymers were tested between anionic, nonionic and cationic by conditioning and performing the specific resistance tests and inversion test. From the best polymer identified, the sludge was dried using a drainage block modified drying bed. Empirical models were used to estimate the volume of sludge produced by the Water Treatment Plant and compared to the values obtained experimentally. With the measured data, it was carried out the dimensioning of the drying bed composed of draining blocks and economic feasibility analysis for implantation. The crude sludge and the dry sludge were classified as Class II A - Non Inert, which makes it possible to dispose of the residue. The specific strength test and the inversion test indicated the FO 4290 SH polymer of the SNF at the dosage of 2.0 mg in./g ST as the most suitable conditioner for performing the sludge dewatering. The dewatering tests showed efficiencies in the order of 93% in the content of dry solids with 30 days of drying. The estimated area of the draining block drying bed was 968 m². From the feasibility analysis, an investment in the order of R\$ 753.684,80 was identified for the construction of the drying bed with coverage and annual operating cost of the system in the amount of R\$ 42.290,15.

Key-words: Polymer, drainage block, dewatering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da água presente no lodo	24
Figura 2 – Layout de um sistema de tratamento de lodo.....	29
Figura 3 – Filtro prensa de placas	30
Figura 4 – Detalhes da filtração em filtro prensa de placas	30
Figura 5 – Detalhes da prensa desaguadora.....	32
Figura 6 – Detalhes do leito de secagem de areia	33
Figura 7 – Leito de secagem por blocos drenantes aberto.....	36
Figura 8 – Leito de secagem por blocos drenantes coberto	36
Figura 9 – Método de limpeza do leito de secagem na cidade de Bay Minette, Alabama (EUA).	38
Figura 10 – Detalhes do leito de secagem pavimentado	40
Figura 11 – Detalhes da Lagoa de Lodo	41
Figura 12 – Detalhes da molécula de poliacrilamida	45
Figura 13 – Carga dos polímeros e suas aplicações.....	47
Figura 14 – Caracterização do local de estudo e lodo da ETA.....	57
Figura 15 – Realização dos ensaios de desaguamento do lodo	57
Figura 16 – Realização da quantificação dos resíduos	58
Figura 17 – Localização da área de estudo,.....	59
Figura 18 – ETA de Coqueiral	59
Figura 19 – Lodo da ETA de Coqueiral	60
Figura 20 – Polímeros testados.....	61
Figura 21 – Etapas da preparação de polímero	62
Figura 22 – Aparelho de Jar Test	63
Figura 23 – Aparato Experimental para ensaio de resistência específica	63
Figura 24 – Etapas do ensaio de resistência específica.....	64
Figura 25 – Modelo gráfico da análise de resistência específica.....	65
Figura 26 – Configuração experimental do teste de inversão.....	65
Figura 27 – Fluxograma do Teste de Inversão	66
Figura 28 – Ilustração para identificar melhor polímero para floculação	66
Figura 29 – Configuração experimental para o condicionamento do lodo.....	68

Figura 30	– Protótipo do sistema de desaguamento por blocos drenantes	69
Figura 31	– Aparato experimental do desaguamento por blocos drenantes	70
Figura 32	– Desenho dos blocos drenantes	70
Figura 33	– Resultados do teste de Inversão	89
Figura 34	– Identificação dos pontos de amostragem de lodo	92
Figura 35	– Amostrador de lodo	93
Figura 36	– Layout do sistema de leitos de secagem por blocos drenantes	115
Figura 37	– Detalhes de 01 leito de secagem	116
Figura 38	– Layout da cobertura para o leito secagem por blocos drenantes ...	117

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação dos resultados de resistência específica na dosagem média de 10 a 30 mg/L.....	84
Gráfico 2 – Comparação dos resultados de resistência específica na dosagem média de 40 a 60 mg/L.....	84
Gráfico 3 – Relação entre sólidos totais e sólidos suspensos totais para o lodo da ETA de Coqueiral	91
Gráfico 4 – Variação do volume drenado para o 1º ensaio	93
Gráfico 5 – Variação do volume drenado para o 2º ensaio	94
Gráfico 6 – Variação do volume drenado para o 3º ensaio	94
Gráfico 7 – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 1º ensaio.....	96
Gráfico 8 – Variação da altura da camada de lodo no 1º ensaio.....	97
Gráfico 9 – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 2º ensaio.....	97
Gráfico 10 – Variação da altura da camada de lodo no 2º ensaio.....	97
Gráfico 11 – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 3º ensaio.....	98
Gráfico 12 – Variação da altura da camada de lodo no 3º ensaio.....	98
Gráfico 13 – Média do teor de sólidos do lodo nos ensaios	101
Gráfico 14 – Condicionamento com Polímero AN 910 SH	132
Gráfico 15 – Condicionamento com Polímero AN 923 SH	132
Gráfico 16 – Condicionamento com Polímero FA 920 SH	133
Gráfico 17 – Condicionamento com Polímero FO 4115 SH	133
Gráfico 18 – Condicionamento com Polímero FO 4140 SH	134
Gráfico 19 – Condicionamento com Polímero FO 4190 SH	134
Gráfico 20 – Condicionamento com Polímero FO 4290 SH	135
Gráfico 21 – Condicionamento com Polímero FO 4440 SH	135
Gráfico 22 – Condicionamento com Polímero FO 4700 SH	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores obtidos no ensaio de resistência específica	82
Quadro 2 – Valores Obtidos no teste de inversão	87
Quadro 3 – Valores Obtidos no teste de Inversão	88
Quadro 4 – Aspecto do lodo ao fim de cada ensaio	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Físico-Químicas do lodo de ETA.....	22
Tabela 2 – Parâmetros que afetam o manuseio do lodo de ETA.....	23
Tabela 3 – Classificação do desaguamento de lodo.....	26
Tabela 4 – Eficiência de equipamentos utilizados no desaguamento de lodo	28
Tabela 5 – Etapas operacionais do desaguamento de lodo em prensa desaguadora	31
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de secagem convencional	34
Tabela 7 – Dados operacionais e as capacidades de instalações típicas que empreguem blocos drenantes	37
Tabela 8 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de secagem com Blocos Drenantes.....	38
Tabela 9 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de lagoas de secagem ..	41
Tabela 10 – Estabilidade dos Polímeros a base de Poliacrilamida.....	45
Tabela 11 – Tempos de estabilidade para as soluções de polímero Poliacrilamida	46
Tabela 12 – Categorias de peso molecular	47
Tabela 13 – Características dos polímeros testados	61
Tabela 14 – Classificação utilizada para determinar a eficiência do polímero em relação a floculação	66
Tabela 15 – Determinação da massa de sólidos secos por volume de água tratada	72
Tabela 16 – Equações para determinação da massa de lodo e volume de lodo .	73
Tabela 17 – Resultado dos ensaios de Lixiviação segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Lixiviado	76
Tabela 18 – Resultado dos ensaios de Solubilização do lodo bruto segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Solubilizado	77
Tabela 19 – Resultado do ensaio de massa bruta do lodo bruto.....	78
Tabela 20 – Características do lodo bruto, segundo a Resolução CONAMA 430/2011.	79

Tabela 21 – Qualidade da água da lagoa Santur.....	80
Tabela 22 – Monitoramento de alumínio no ponto de captação	81
Tabela 23 – Avaliação dos sólidos no lodo.....	90
Tabela 24 – Condições de desaguamento do lodo.....	91
Tabela 25 – Teor de Sólido Totais do 1º ensaio	100
Tabela 26 – Teor de Sólido Totais do 2º ensaio	100
Tabela 27 – Teor de Sólido Totais do 3º ensaio	100
Tabela 28 – Dados de precipitação durante os ensaios	101
Tabela 29 – Temperatura e umidade durante os ensaios.....	101
Tabela 30 – Caracterização das amostras de água drenada	106
Tabela 31 – Resultado dos ensaios de Lixiviação do lodo desaguado em leito de secagem por bloco drenante segundo ABNT NBR 10005:2004 – Extrato Lixiviado	107
Tabela 32 – Resultado dos ensaios de Solubilização do lodo desaguado em leito de secagem por bloco drenante segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Solubilizado.....	109
Tabela 33 – Resultado do ensaio de massa bruta do lodo desaguado em bloco drenante	110
Tabela 34 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 1º ensaio de desaguamento.....	111
Tabela 35 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 2º ensaio de desaguamento.....	111
Tabela 36 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 3º ensaio de desaguamento.....	111
Tabela 37 – Variáveis utilizadas para estimativa da quantidade de lodo e dimensionamento do leito de secagem	112
Tabela 38 – Estimativa do quantitativo de lodo produzido na ETA Coqueiral....	113
Tabela 39 – Estimativa da área do leito de secagem	113
Tabela 40 – Análise de custo para o desaguamento de lodo da ETA de Coqueiral	117
Tabela 41 – Custo para implantação do leito de secagem convencional e por blocos drenantes	118

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO.....	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1. RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA	20
3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA	20
3.3. DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA PRESENTE EM LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	23
3.3.1. Água Livre.....	24
3.3.2. Água Intersticial	25
3.3.3. Água vicinal ou superficial	25
3.3.4. Água de hidratação.....	25
3.4. DESAGUAMENTO E SECAGEM DO LODO	25
3.4.1. Desaguamento Mecanizado	27
3.4.1.1. Centrífuga	28
3.4.1.2. Filtro prensa	29
3.4.2. Sistemas de Desaguamento Natural	32
3.4.2.1. Leitões de Secagem de Areia	33
3.4.2.2. Sistema de Desaguamento por blocos drenantes (wedgewater filter bed).....	35
3.4.2.3. Leitões de Secagem Pavimentado.....	39
3.4.2.4. Lagoas de Secagem	40
3.5. COAGULANTES	41
3.6. POLÍMEROS	42
3.6.1. Polímeros não iônicos.....	43
3.6.2. Polímeros Aniônicos	43
3.6.3. Polímeros Catiônicos	44
3.6.4. Polímeros de poliacrilamida.....	44
3.6.5. Peso molecular	46
3.6.6. Densidade de carga.....	47
3.7. CONDICIONAMENTO.....	48

3.7.1. Mecanismo de reação dos polímeros com as partículas	49
3.7.1.1. Adsorção inicial do polímero	49
3.7.1.2. Formação do floco.....	50
3.7.1.3. Adsorção secundária do polímero.....	50
3.7.1.4. Adsorção inicial com excesso de polímero	51
3.7.1.5. Ruptura do floco.....	51
3.7.1.6. Readsorção secundária do polímero.....	52
3.7.2. Fatores que afetam o condicionamento.....	52
3.7.2.1. Fonte Geradora.....	52
3.7.2.2. Concentração de Sólidos	53
3.7.2.3. Distribuição do tamanho de partícula	53
3.7.2.4. Fatores Físicos.....	53
3.7.2.5. Superfície de carga e grau de hidratação	54
3.7.2.6. Tipo de Polímero	54
3.7.2.7. Determinação da melhor dosagem	54
3.8. MÉTODOS RELACIONADOS A FILTRABILIDADE DE LODOS	55
4. METODOLOGIA	57
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	58
4.2. COLETA DA AMOSTRA DE LODO	60
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO LODO BRUTO E DOS LANÇAMENTOS	60
4.4. TESTES DE DESAGUAMENTO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICA.....	61
4.4.1. Polímeros utilizados nos ensaios.....	61
4.4.1.1. Preparo da solução de polímero para ensaio de resistência específica e teste de inversão.....	62
4.4.2. Condicionamento Químico.....	62
4.4.3. Ensaio de Resistência Específica.....	63
4.4.3.1. Cálculo da Resistencia Específica	64
4.5. TESTE DE INVERSÃO	65
4.6. ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DESAGUAMENTO NATURAL	67
4.6.1. Avaliação das características do lodo bruto e determinação da taxa de aplicação.....	67
4.6.2. Preparo da solução de polímero para desaguamento natural	68

4.6.3. Condicionamento do lodo para desaguamento natural.....	68
4.6.4. Leito de Secagem por Blocos Drenantes.....	69
4.6.5. Premissas do ensaio de desaguamento natural	71
4.7. QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS E DIMENSIONAMENTO DO LEITO DE SECAGEM	72
4.7.1. Determinação da massa de sólidos secos, massa de lodo e volume de lodo.....	72
4.7.2. Dimensionamento da área do leito de secagem.....	74
4.7.2.1. Área do Leito de Secagem Convencional (ALSC) e por Blocos Drenantes (ALSBD)	74
4.8. ANÁLISE DE CUSTO DO PROJETO COM USO DE BLOCOS DRENANTES	75
4.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA	75
5. RESULTADOS.....	76
5.1. RESULTADO DAS ANÁLISES FÍSICO QUÍMICAS DO LODO DA ETA DE COQUEIRAL E DA LAGOA SANTUR.....	76
5.2. ENSAIO DE RESISTENCIA ESPECÍFICA.....	82
5.3. RESULTADOS DO TESTE DE INVERSÃO.....	86
5.4. RESULTADOS DO ENSAIO DE DESAGUAMENTO.....	90
5.4.1. Caracterização da amostra de lodo e determinação da taxa aplicada ...	90
5.4.2. Drenagem de água livre.....	93
5.4.3. Análise da altura da camada de lodo.....	96
5.4.4. Análise do teor de sólidos secos	99
5.4.5. Caracterização da amostra de água drenada.....	106
5.4.6. Análise estatística.....	110
5.4.7. Estimativa da produção de Lodo da ETA de Coqueiral – Aracruz ES ..	112
5.4.8. Análise de custo	117
6. CONCLUSÕES.....	120
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

1. INTRODUÇÃO

A água presente nos mananciais, seja ela superficial ou subterrâneo apresenta impurezas que podem causar uma série de problemas a saúde humana. Com a necessidade de distribuir uma água potável para o consumo humano, dentro dos padrões da Portaria 2.914/11 do Ministério da Saúde, as estações de tratamento de água (ETA), transformam água bruta em tratada, e como em todo processo, os resíduos gerados precisam ser tratados, pois apresentam em sua matriz uma série de contaminantes que são prejudiciais ao homem e ao meio ambiente.

Contudo, na prática, não é bem este o procedimento que acontece. Comumente os resíduos do processo de tratamento são lançados *in natura* nos cursos d'água ou ainda nas redes pluviais e de esgotamento sanitário. Estas tubulações transportam estes resíduos para um ponto mais distante da estação de tratamento de água, lançando-os diretamente nos corpos d'água, sem nenhum tratamento prévio (COSTA, 2011).

No Brasil, é muito comum as ETA's lançarem de forma inadequada seus resíduos indiscriminadamente nos corpos d'água. Contudo, essa prática não é mais aceita pelo órgão ambiental, e estudos direcionados ao desaguamento de lodos tem sido a opção para minimizar ou mesmo eliminar esses impactos ao meio ambiente.

No desenvolvimento das tecnologias para desaguamento do lodo de ETA, a maior parte dos esforços tem sido focada na criação e melhoria dos processos de separação sólido-líquido (OLIVEIRA; RUBIO, 2012).

O processo de desaguamento é uma das técnicas utilizadas na separação sólido-líquido que busca, se não resolver, mitigar os problemas do lançamento do lodo sem nenhum tipo de tratamento. O desaguamento pode ser feito por uso de sistemas naturais ou mecanizados para remoção de água. O desaguamento mecanizado pode ser feito através do uso das técnicas de centrifugação, filtração sob vácuo e filtração por pressão, já o sistema de desaguamento natural pode ser através de leitos de drenagem e secagem e lagoas de lodo (QI; THAPA; HOADLEY, 2011; SILVEIRA, 2012).

Quando avaliadas as principais variáveis que compõem o desaguamento natural, o Brasil apresenta um clima favorável e na grande maioria das cidades, espaço para instalação, quando alinhado com o baixo custo de instalação e operação,

torna-se uma técnica vantajosa, especialmente quando apresentam altas eficiências no teor de sólidos, como os leitos de secagem. Em específico, o desaguamento do lodo por processo de blocos drenantes pode ser uma prática adequada para lodo de ETA's que operam com sistemas de flotação, desde que os testes de filtrabilidade demonstrem que o lodo tende a desaguar.

O processo de desaguamento por blocos drenantes tem se mostrado ser um método econômico e eficaz na modernização de leitos de secagem existentes, devido à sua capacidade de adaptação a variadas configurações. Quando comparado o leito de secagem por blocos drenantes com os leitos de secagem convencionais, o ganho para os blocos drenantes fica por conta da melhoria operacional, facilidade de manejo do lodo, limpeza, maior velocidade de secagem. Como nos leitos de secagem por blocos drenantes existe a presença de um pavimento falso, em leitos de secagem convencionais esta área precisa ser compensada de 10 a 20% da área necessária para remoção de água (GROVER, 1979). Para realizar o desaguamento do lodo, a etapa de condicionamento químico tem se tornado pré-requisito em tratamento de lodos de ETA's que apresentam resistência específica a filtração elevada, mas tendem a desaguar. O uso de polímeros para realizar o condicionamento do lodo é uma opção para se obter melhores resultados no teor de sólidos, sendo comumente utilizado os polímeros de poliacrilamida com ampla aplicação na área de tratamento de água, petróleo, fabricação de papel, inclusive na área de tratamento de lodo (AL-HASHMI et al. 2014).

A busca por novas tecnologias de tratamento de águas de abastecimento e resíduos provenientes dos sistemas de tratamento, tem favorecido a descoberta de práticas inovadoras que visam à redução do custo de produção bem como a otimização dos processos, além da preservação ambiental que é mantida quando medidas técnicas são apontadas para melhoria dos processos (PIVELI; KATO, 2006). Entretanto poucos trabalhos têm adotado o uso de blocos drenantes, especialmente utilizando lodo químico de estação de tratamento de água, o que dificultou de certa forma uma comparação mais aguçada e rica em argumentos, no entanto foi possível verificar se o sistema de desaguamento por blocos drenantes é eficiente comparando de certa forma até com outras tecnologias inovadoras do setor.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do desaguamento de lodo químico de ETA através de leito de secagem por blocos drenantes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Caracterizar o lodo gerado no processo de tratamento de água;
- Determinar entre os polímeros aniônico, catiônico e não iônico qual é o mais eficiente para o desaguamento;
- Estudar a qualidade do processo de desaguamento natural do lodo em leito de secagem por blocos drenantes em condições pré-definidas;
- Realizar estudo de custo para implantação de um sistema de desaguamento por blocos drenantes.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RESÍDUOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Nos sistemas de tratamento de água ou de águas residuais, as etapas de coagulação e floculação são fundamentais para a remoção de partículas e matéria orgânica. Na etapa floculação, uma grande quantidade de lodo é formada, que normalmente é caracterizada por elevadas concentrações de substâncias inorgânica ou orgânica, assim como hidróxido de compostos inorgânicos a base de sais de alumínio e ferro (ZHOU et al. 2014).

Cordeiro (2002) relata que no Brasil são geradas mais de 2.000 toneladas por dia de resíduos provenientes de sistemas de tratamento de água descartados diretamente nos corpos de água, o que tem provocado diversas interferências na camada bentônica inibindo o crescimento de várias espécies de peixes e outros organismos aquáticos.

No Brasil, menos de 0,5% das ETA's possuem sistemas de remoção de água do lodo ou recuperação de água de lavagem de filtros e na maioria desses, quando operados, apresentam problemas de eficiência na operação (BARROSO, 2007).

Outro fator agravante e que tem somado aos problemas elencados, é o crescente aumento na geração de lodo dos sistemas tratamento água, devido as características das águas que tem se tornado cada vez mais poluídas e os mais restritos padrões de qualidade que as estações de tratamento precisam atender (NEYENS et al. 2004; KOULOUMBOS et al. 2008).

Entretanto a crescente preocupação e a regulamentação sobre a necessidade de preservação e recuperação do meio ambiente têm restringido aos municípios ou até mesmo proibido a disposição destes resíduos diretamente nos corpos de água (RICHTER, 2001).

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETA

Segundo a NBR-10.004 (ABNT, 2004), os lodos gerados em estações de tratamento de água são denominados como resíduos sólidos e podem ser classificados como Resíduo perigoso classe I ou Resíduo não perigoso classe II.

Na classificação de não perigoso, os resíduos de classe II são subdivididos em resíduos de classe II A (não inertes) e resíduos de classe II B (inertes).

Os resíduos perigosos podem ser definidos como sendo aqueles que constam nos anexos A (Resíduos perigosos de fontes não específicas) ou B (Resíduos perigosos de fontes específicas) ou ainda se possuem características de Inflamabilidade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

A NBR-10.004 (ABNT, 2004) tem como objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ser gerenciados de maneira correta.

Para realização da classificação do resíduo segundo parâmetros da NBR-10.004 é necessário a execução do ensaio de solubilização que é utilizado para diferenciar os resíduos de Classes IIA e IIB e o ensaio de Lixiviação tem o objetivo de determinar o comportamento de uma substância face aos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante a percolação, e caracteriza a periculosidade e toxicidade de um resíduo, para efeito de controle dos resíduos perigosos (Classe I). Outro ensaio relevante para classificação do resíduo é o ensaio de Massa Bruta, que é realizado para diferenciar os resíduos das Classes IIA e I (SAITO, 2013).

Considera-se como lodo de uma estação de tratamento de água o resíduo constituído principalmente de água e sólidos suspensos, originalmente contidos na fonte de água, somados aos produtos resultantes da aplicação de produtos químicos nos processos de tratamento (RICHTER, 2001).

Dulin e Knocke (1989) mencionam que a característica do lodo gerado no processo de tratamento está diretamente associada às características da água bruta a ser tratada na ETA.

De acordo com ASCE e AWWA (1996) os lodos das estações de tratamento de água podem ser provenientes das descargas de decantadores, removidos dos flutuadores, da lavagem de filtros e da remoção de ferro e manganês a partir do abrandamento da água bruta, sendo que mais de 90% dos sólidos são provenientes do processo de clarificação. O resíduo proveniente da etapa de clarificação apresenta um teor médio de sólidos entre 1% e 3% em peso (CASEY, 2006).

Os lodos provenientes do uso de coagulantes a base de sais de alumínio são denominados líquidos não newtonianos, de aspecto gelatinoso, cuja fração de sólidos é constituída de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, coloides,

resíduo orgânico além de bactérias e outros organismos patógenos removidos no processo de tratamento (RICHTER, 2001).

A decomposição do lodo pode acontecer se o lodo ficar em repouso em um tanque, sendo semelhante ao lodo primário, mas a uma taxa mais lenta. O resultado da decomposição do lodo químico é a emissão de gás, fazendo com que a densidade do lodo aumente ao longo do tempo de armazenagem (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL 2003).

Segundo Richter (2001) o lodo proveniente do sulfato de alumínio apresenta uma pequena proporção de biodegradabilidade e suas principais características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Físico-Químicas do lodo de ETA

ST (%)	Al ₂ O ₃ .5H ₂ O (%)	IN (%)	M.O (%)	pH	DBO	DQO
0,1 - 4	15 - 40	35 - 70	15 - 25	6 - 8	30 - 300	30 - 5.000

ST – Sólidos Totais, M.O – Matéria Orgânica, IN – Inorgânicos
 FONTE: RICHTER (2001)

Silveira (2012) destaca que as variações dos valores de concentração de sólidos nos lodos de ETA's podem ocorrer em função das características da água bruta, a tecnologia de tratamento adotada, a duração do intervalo de lavagem de decantadores e filtros, além do coagulante utilizado para realizar o tratamento.

Segundo Spavier (2003) o teor de umidade, o grau de estabilidade e o tipo de ligação da água com a partícula sólida influenciam de forma significativa as propriedades mecânicas do lodo.

A umidade e as propriedades mecânicas apresentam relação que induz ao seguinte conceito: na medida em que a percentagem de água diminui, o lodo se torna mais pastoso e abaixo de uma percentagem de 75% perde as características de um fluido e se transforma numa torta semi-sólida. Abaixo dos 65% o lodo se torna um sólido duro e abaixo dos 40% esse sólido se quebra em grânulos. Quando a percentagem de água se torna ainda mais baixa em torno de 15%, o sólido tende a desintegrar-se formando um pó fino (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Outro fator destacado por Spavier (2003) que demonstra a facilidade do lodo desaguar por processos naturais ou mecanizados, é referente a forma de ligação da água com a partícula sólida. Quando a água não está unida à partícula sólida, é

então considerada água livre, sua remoção ocorre predominantemente por processos naturais de desaguamento. Por outro lado, se a água está unida à partícula sólida, por forças predominantemente capilares por exemplo, é necessário a utilização de processos mecânicos de desaguamento para promover melhor a retirada desta água.

Segundo Haak (2011), dentre os principais parâmetros que afetam o manuseio, adensamento e desaguamento do lodo em uma estação de tratamento de água, são apontados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros que afetam o manuseio do lodo de ETA

Parâmetro	Parâmetros
Concentração de sólidos	Deve-se a resíduos sólidos orgânicos ou inorgânicos provenientes da água bruta.
Resistência específica	É o ensaio utilizado para determinar maior ou menor resistência à passagem do líquido através de uma massa sólida, o que mostra a facilidade ou não de desaguamento do lodo.
Compressibilidade	Os lodos dos decantadores são geralmente compressíveis de tal forma que quanto maior a pressão aplicada, maior é a resistência à desidratação.
Distribuição do tamanho das partículas do lodo	Com base na teoria da filtração, a resistência do lodo à filtração é função do tamanho da partícula do floco no lodo, existindo assim uma relação entre a resistência específica e o tamanho das partículas. A adição de condicionantes químicos favorece o aumento do tamanho das partículas, diminuindo a resistência específica à filtração, o que facilita o seu desaguamento.

Fonte: Adaptado de Haak, (2011)

3.3. DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA PRESENTE EM LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

A quantidade e o tipo de água presente no lodo se mostra como uma importante influência na escolha do processo de desaguamento (ROBINSON e KNOCKE, 1992).

Smollen (1988) destaca que a adequação de um método de desaguamento de lodo depende do tipo de ligação entre a água e o lodo, e que de acordo como o tipo de

ligação da água com a partícula sólida pode-se escolher entre processos naturais ou mecanizados.

Segundo Zhen et al. (2012), o lodo é composto da combinação de uma fase líquida e uma fase sólida sendo necessário o conhecimento de ambas as fases para disposição adequada. A ligação da água aos sólidos deve-se a forças intermoleculares de diferentes tipos, classificada em quatro categorias: água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação, conforme apresentado na Figura 1.

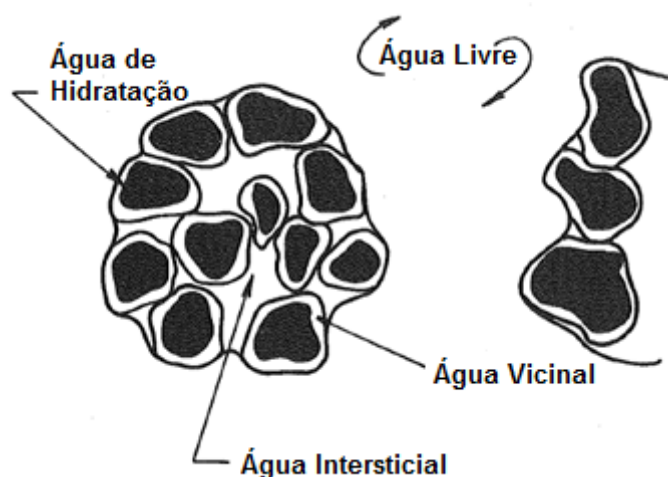


Figura 1 – Distribuição da água presente no lodo
Fonte:(VESILIND, 1990)

3.3.1. Água Livre

A distribuição sugerida também por Vesilind (1994, apud SILVEIRA, 2012) destaca que água livre é aquela não associada a partículas sólidas incluindo a água não afetada por forças capilares. Água livre representa a maior parte em lodos e não está unida a partículas sólidas (COLIN e GASBAR 1994). Esta fração de água não é influenciada pelas forças capilares e pode mover-se livremente entre as partículas individuais do lodo, não sendo adsorvida por elas (SPAVIER, 2003).

De acordo com Kopp e Dichtl (2000) a separação da água livre pode ser eliminada por processos de separação simples, através do uso de leitos de secagem ou por processos mecânicos como centrifugação. A água livre representa cerca de 75% do volume total (SANIN; VESILIND; CLARKSON, 2011).

3.3.2. Água Intersticial

Esta classificação representa a água que está presa dentro da estrutura floco sendo mantida por forças capilares entre as partículas, ou seja, é a água presente no interior de fendas e espaços intersticiais dos flocos e organismos (VESILIND; MARTEL, 1990). Esta água pode ser liberada quando ocorre desintegração de flocos mediante aplicação de força mecânica. A água intersticial representa cerca de 20% do volume total (SANIN, VESILIND, CLARKSON, 2011).

3.3.3. Água vicinal ou superficial

Água vicinal é aquela que está associada a superfície das partículas sólidas pelos mecanismos de adsorção e adesão. Associada as partículas sólidas devido a estrutura molecular da água o fenômeno causa pontes de hidrogênio (VESILIND; MARTEL, 1990). A água vicinal representa cerca de 2% do volume total (SANIN, VESILIND, CLARKSON, 2011).

3.3.4. Água de hidratação

A água de hidratação é aquela ligada quimicamente as partículas sólidas e pode ser liberada somente por destruição térmica das partículas. Esta parcela de água representa uma proporção da água total contida no lodo muito pequena, mas é geralmente maior em termos de massa do que a fase sólida (COLIN; GASBAR 1994). A água de hidratação representa cerca de 3% do volume total (SANIN, VESILIND, CLARKSON, 2011).

3.4. DESAGUAMENTO E SECAGEM DO LODO

A tecnologia de desaguamento de lodo consiste em processos de separação sólido-líquido, cuja eficiência quanto à maximização do teor de sólidos da torta e melhor qualidade da água recuperada no processo é dependente do adequado condicionamento químico, normalmente obtido pela ação de polímeros (HAAK, 2011).

O desaguamento de lodo desempenha um papel importante, tanto operacional quanto econômico, especialmente quando os métodos de disposição envolvem destinação em aterro ou tratamento térmico. O processo desaguamento aumenta significativamente o teor de sólidos e reduz o volume de lodo.

O *Water And Wastewater Treatment Technologies* destaca que o teor de sólidos de uma etapa de desaguamento do lodo é basicamente utilizado como indicador da eficiência do processo. O teor de sólidos secos é medido como a concentração de sólidos em base seca. Na Tabela 3 é apresentada a classificação geral para o desaguamento de lodo.

Tabela 3 – Classificação do desaguamento de lodo

Desaguabilidade	% de sólidos secos
Bom	26-30
Suficiente para médio	22-26
Ruim	8-22

Fonte: Vigneswaran e Kandasamy (2009)

O desaguamento pode ser realizado mecanicamente, através de filtro prensa, centrífuga ou ainda outros equipamentos mecânicos. Ele também pode ser realizado através de métodos manuais, usando leitos de secagem, onde o lodo é aplicado sobre o leito e deixado secar por meio de evaporação e drenagem do excesso de água durante um período de várias semanas, dependendo das condições climáticas. Neste período de secagem a decomposição bacteriana do lodo ocorre, enquanto o teor de humidade seja suficientemente elevado. Durante a estação chuvosa, o processo pode demorar mais tempo para ser concluído, e o dimensionamento da área dos leitos de secagem deve levar isso em conta.

A secagem do lodo inicia-se após etapa de desaguamento e depende principalmente, das condições climáticas, método de secagem e condições de operação aplicáveis (BENNAMOUN, 2012).

Na secagem do lodo em condições naturais, Bennamoun (2013), apresenta a seguinte classificação: secagem convectiva, secagem por condução de calor e a secagem solar por irradiação. Na secagem convectiva ocorrem três fases distintas sendo elas: adaptação da fase, secagem constante e decaimento da taxa de

secagem. Experiências demonstram que o tipo de lodo, seja ele biológico ou químico, apresenta um papel importante na duração da fase de secagem constante. Na etapa de secagem por condução, é possível observar três transformações do lodo, onde no início da secagem o lodo passa da forma pastosa para irregular seguindo para forma granular. As três transformações distinguem-se quando a taxa de secagem aumenta durante altas temperaturas e radiações, e reduz em condições desfavoráveis, como aumento do teor de humidade e redução de temperatura.

A secagem solar funciona sob condições climáticas e variáveis operacionais que nem sempre podem ser controladas, com isso a identificação de fases acaba não sendo identificada com certa precisão.

3.4.1. Desaguamento Mecanizado

O Desaguamento mecânico segundo autores é uma etapa crucial para a redução do volume de lodo, no entanto, sua operação é dispendiosa em termos de custo de instalação e operação, devendo sua otimização ser realizada (BERTANZA et al. 2014). Com um bom funcionamento dos mecanismos de desaguamento uma redução significativa do volume de lodo pode ser alcançada (QI; THAPA; HOADLEY, 2011).

Para a realização do desaguamento mecanizado, os sistemas mais comuns são o filtro prensa de placas paralelas, o filtro prensa de esteiras e a centrífuga do tipo decanter. A definição do processo mais adequado para realização do desaguamento do lodo irá depender do tipo e da quantidade do lodo a ser tratado e do método de disposição final ou ainda o uso benéfico do lodo (HAAK, 2011). Cada técnica possui suas peculiaridades, sendo necessário a realização de ensaios para poder determinar qual a melhor técnica a ser adotada (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

Segundo Wakeman (2007) os processos que utilizam o desaguamento mecanizado apresentam significativa vantagem, sobre os processos térmicos quando abordada questões econômicas. As centrífugas são usadas para desidratar mecanicamente lodos sendo umas das técnicas mais usadas, devido as elevadas forças aplicadas ao resíduo, além de proporcionar alta capacidade de alimentação com teor de

sólidos maiores. Na Tabela 4 é apresentado a eficiência de alguns equipamentos utilizados no desaguamento mecanizado do lodo.

Tabela 4 – Eficiência de equipamentos utilizados no desaguamento de lodo

Equipamento	Eficiência (%Teor de sólidos)
Decanter Centrífuga	18-30%
Centrífuga	15-25%
Filtro prensa de esteira	12-25%
Tambor rotativo	8-15%
Filtro Baleen	5-8%
Flotação por ar dissolvido	5-8%
Filtro Gravitacional	4-6%

Fonte: Adaptado de Batstone, Lu e Jensen (2015).

3.4.1.1. Centrífuga

O desaguamento mecanizado através de centrífuga é, essencialmente, um dispositivo de sedimentação, na qual ocorre a separação das fases sólido-líquido cujo princípio básico é semelhante a sedimentação de partículas submetidas a ação da gravidade. No entanto a intensidade das forças atuantes neste equipamento supera a força da gravidade e acelera o processo de separação em operação contínua (FONTANA, 2004).

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) o lodo adensado é conduzido para um tanque de estabilização, provido de misturador submersível ou agitador tipo turbina, a partir do qual é bombeado por meio de bombas helicoidais para uma câmara da centrífuga, recebendo solução de polímero na tubulação de recalque. Na Figura 2 é apresentado o layout do sistema de desaguamento por centrifuga.

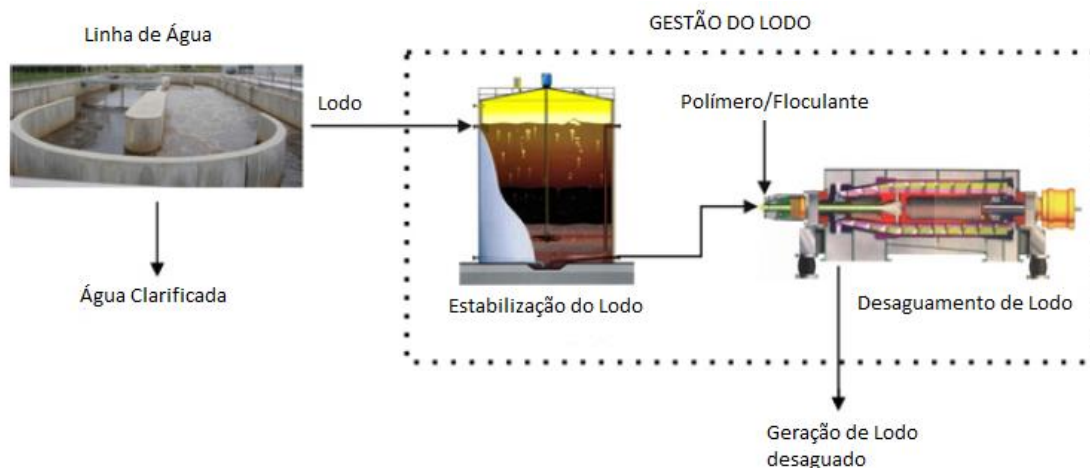


Figura 2 – Layout de um sistema de tratamento de lodo
 Fonte: (BORÁN; HOUDKOVÁ; ELSABER, 2010)

De acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) é desejável que se tenha um teor de SST no lodo adensado de no mínimo 2% e dosagem de polímeros entre 2 a 5 mg pol./g SST, sendo que as centrifugas funcionam entre 12 e 20 horas por dia, sendo produzido torta com massa específica de 1,1 a 1,3 kg/L e teor de SST podendo chegar a 30%.

3.4.1.2. Filtro prensa

3.4.1.2.1. Filtro prensa de placas

A remoção de água por filtro prensa de placas é um processo caracterizado como semicontínuo por batelada. São constituídos por uma estrutura metálica que tem como guia uma viga, onde as placas são colocadas. O lodo condicionado é encaminhado para as câmaras, onde as mantas ou telas filtrantes estão acondicionadas, até o enchimento. Existe a necessidade da aplicação de pressões diferenciais, de tal forma que o lodo é forçado sobre o meio filtrante fazendo com que a água seja removida. Na operação dos filtros prensa a aplicação de pressão sobre a massa de lodo é a condição requerida para realizar o desaguamento do lodo, sendo que a pressão pode variar de 2 a 20 MPa dependendo do tipo de lodo e da concentração de sólidos desejada na torta, sendo que o tempo de filtração pode variar de 3 a 5 horas, podendo efetuar até 6 ciclos por dia (FONTANA, 2004).

Neste tipo de filtro, o desagudamento é realizado, por uma bomba de alimentação que proporciona o aumento da pressão para retirar a água e obter maior concentração de sólidos. A utilização de filtro prensa de placas produz uma torta com concentração de sólidos de 30 a 40%, desde que devidamente condicionado (MENDES, 2001). Nas Figuras 3 e 4 são apresentados detalhes de um filtro prensa de placas.

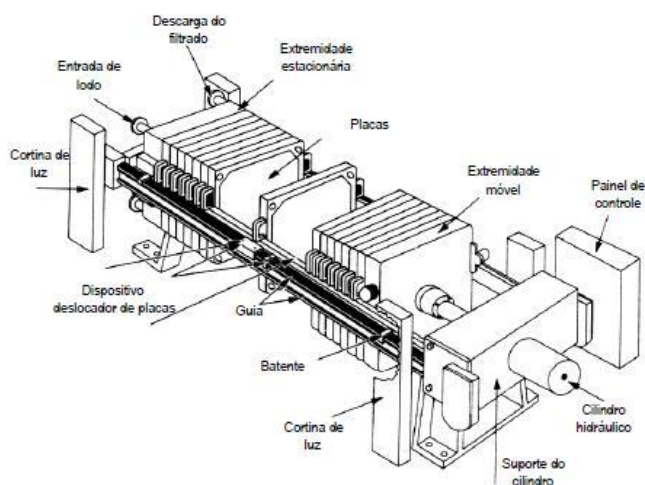


Figura 3 – Filtro prensa de placas
Fonte: (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL 2003).

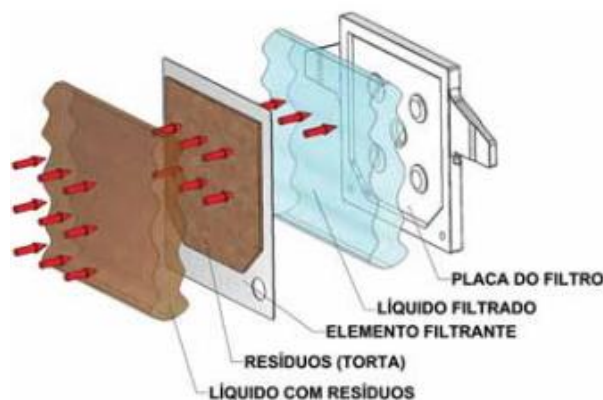


Figura 4 – Detalhes da filtração em filtro prensa de placas
Fonte: (Catalogo BOMAX DO BRASIL).

Mendes, Ferreira Filho e Scian (2001) avaliaram o desagudamento mecânico por filtro prensa de placas e conseguiram tortas de lodo com teores de sólidos próximos a 30%, compactas e secas, com boa soltura dos elementos de filtração e boa captura de sólidos.

Em um estudo desenvolvido por Yang, Chen e Yeh (2011) demonstraram que a aplicação de 1 e 4A de corrente elétrica em sistemas de desaguamento por filtro prensa de placas durante 45 minutos foi o suficiente para obter torta de lodo com teores de sólidos próximos a 35% e 46,8% respectivamente nas duas condições avaliadas. A redução do teor de umidade do lodo pode ser associada aos mecanismos de pressão mecânica e o aquecimento ôhmico realizado no sistema para remoção de água.

3.4.1.2.2. Prensa de Esteira

O processo de operação da prensa de esteira, ou prensa desaguadora pode ser definido como sendo um equipamento que funciona com o lodo sendo introduzidos entre duas correias, em que uma delas é o meio filtrante. Estas se deslocam entre roletes que promovem a compressão de uma esteira ou correia sobre a outra, provocando a drenagem do líquido (PROSAB, 2001). A operação da prensa desaguadora pode ser dividida em três etapas distintas conforme apresentado na Tabela 5. Na Figura 5 é apresentado um esquema do equipamento.

Tabela 5 – Etapas operacionais do desaguamento de lodo em prensa desaguadora

Etapas	Descrição
Zona de separação por peneiramento	O lodo é aplicado sobre a tela superior e a água livre percola sob ação da gravidade através dos furos existentes na tela.
Zona de baixa pressão	Após sair da etapa por peneiramento o restante da água livre é removido na zona de baixa pressão e o lodo, suavemente comprimido entre as telas superior e inferior.
Zona de alta pressão	O lodo é comprimido progressivamente entre as duas telas com o objetivo de liberar a água intersticial, tornando-o desaguado.

Fonte: Adaptado Prosab (2001)

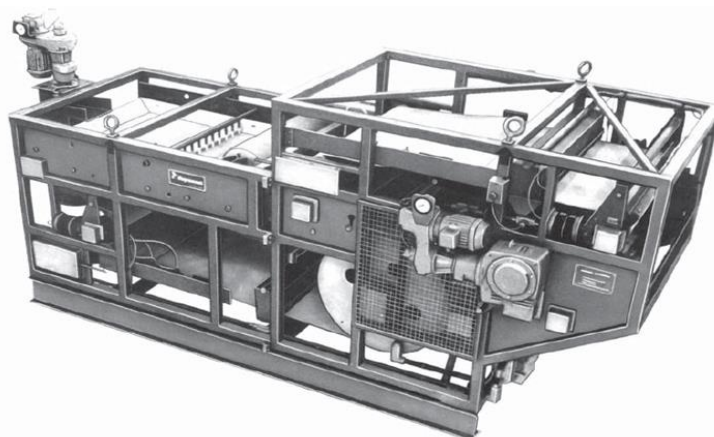


Figura 5 – Detalhes da prensa desaguadora

Fonte: (Catalogo BOMAX DO BRASI).

Segundo Fontana (2004), nos EUA, resíduos característicos de filtros e decantadores após desaguamento em filtro prensa de esteira apresentaram tortas de lodo com teores de sólidos próximos a 15%. Em Cubatão/SP em uma das unidades da SABESP os teores de sólidos atingiram 18 a 22% de sólidos na torta final utilizando filtro prensa de esteira.

Souza (2001) realizou ensaios de desaguamento nas ETA's Alto Boa Vista e Rio Grande utilizando lodo gerado nos decantadores, ao qual foram condicionados com polímero catiônico, sendo observado para a ETA Alto Boa Vista concentrações de SST na torta de até 19%, enquanto que com o polímero aniônico, a concentração variou de 14 a 16%. Para a ETA Rio Grande, os resultados apontaram que o uso do polímero catiônico conduziu à obtenção de concentrações de SST na torta maiores que 16% enquanto que para o aniônico as concentrações variaram de 12 a 16%.

3.4.2. Sistemas de Desaguamento Natural

Sistemas de desaguamento natural são menos complexos, mais fácil de operar e não requerem demanda de energia como os sistemas de desaguamento mecanizado. A drenagem natural da água ocorre livre por meio da ação da força gravitacional, seguido pela evaporação até atingir a concentração de sólidos desejada (USEPA, 1987).

O desaguamento natural requer uma grande área para remoção do lodo em condições favoráveis a destinação. A combinação de variados fatores sugere que o desaguamento natural é bem adequado para comunidades que produzam até 7,5 m³/dia de águas residuárias nos processos de tratamento, embora seja flexível a volumes maiores, entretanto necessitam de áreas maiores (USEPA, 1987).

Segundo Vicent et al. (2011) vários fatores podem influenciar a eficiência dos leitos de secagem, tais como qualidade do lodo, clima, número de leitos, taxas de aplicação e frequências de alimentação.

3.4.2.1. Leitos de Secagem de Areia

Sistemas de desaguamento em leitos de secagem de areia tem sido usado com sucesso desde o último século, sendo que nos EUA já foi a técnica mais utilizada. A eficiência dos sistemas de desaguamento natural, dependem da concentração desejada de sólidos no lodo desaguado, da concentração de sólidos no lodo aplicado ao leito de secagem bem como o tipo de lodo, se este é estabilizado ou condicionado, além das taxas de drenagem e evaporação da água (USEPA, 1987). Na Figura 6 é apresentado os detalhes típicos de um leito de secagem de areia.

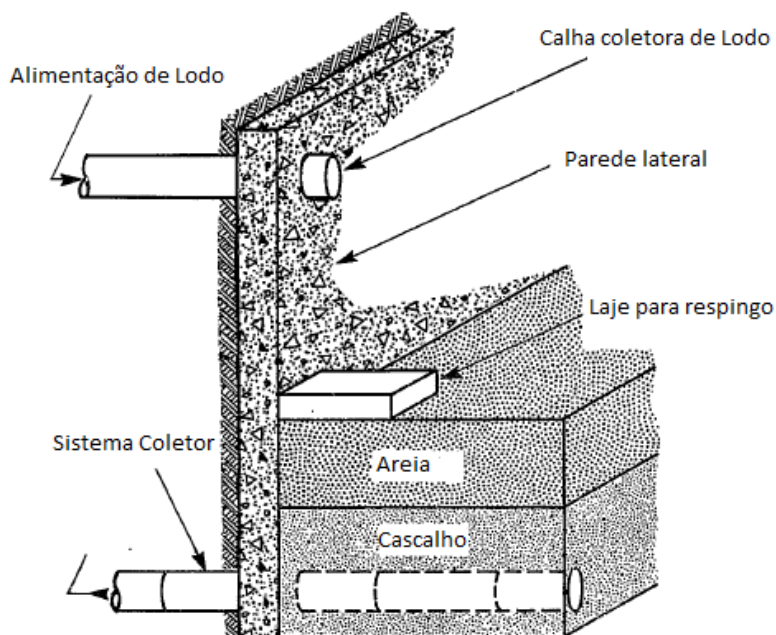


Figura 6 – Detalhes do leito de secagem de areia
Fonte: (USEPA, 1987)

Segundo Haseltine (1951, apud WEF, 1992) a carga ideal de sólidos a ser aplicado em leitos de secagem é de 10 a 15 kg SST/m². Em relação a profundidade de lodo aplicado, com 230 mm de lodo foram obtidos resultados satisfatórios. Os autores sugerem que dependendo do tipo de drenagem e do tipo de remoção, é recomendado a aplicação de 200 a 400 mm de profundidade.

Quon e Johnson (1966, apud WEF, 1992) destacam que a umidade e evaporação são mais longas do que a drenagem, mas que o tempo total que o lodo tem que permanecer no leito é controlado pela quantidade de água que é removida pela evaporação.

Leitos de secagem de areia podem facilmente produzir lodos com 25 a 40% de teor de sólidos, sendo que esta eficiência pode superar os 60% se for adicionado um tempo maior de secagem. Este processo de secagem consegue produzir tortas de lodo com eficiências superiores a maioria dos sistemas de desaguamento mecanizados (USEPA, 1987).

Cordeiro (1999) destaca que os sistemas naturais de desaguamento são amplamente utilizados no mundo. Achon e Cordeiro (2003), identificaram eficiência na remoção de água do lodo entre 75 e 85% em uma estação de tratamento de água com uso de leito de secagem. Na Tabela 6 são apresentadas as vantagens e desvantagens do leito de secagem de areia.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de secagem convencional

Vantagens	Desvantagens
Quando o terreno está prontamente disponível, este é normalmente, o menor custo de capital.	Requer mais área do que métodos totalmente mecânicos.
Pequena quantidade de atenção do operador e habilidade necessária.	Requer um lodo estabilizado.
Baixo consumo de energia.	Deve ser concebida com o planejamento dos efeitos climáticos.
Menos sensíveis a variabilidade do lodo.	

Vantagens	Desvantagens
Baixo ou nenhum consumo de produtos químicos.	Pode ser mais visível para o público em geral.
Maiores teores de sólidos secos comparado aos métodos mecânicos.	A remoção do lodo normalmente gera um trabalho intensivo.

Fonte: Adaptado USEPA (1987)

3.4.2.2. Sistema de Desaguamento por blocos drenantes (wedgewater filter bed)

Blocos drenantes são denominados como sendo um painel com ranhuras com conectores, quando interconectados estes painéis formam um leito. Estes são constituídos em polipropileno, apresentam ranhuras de 0,38 mm, área total aberta 11%, dimensões de cada peça 30,5 cm X 30,5 cm X 5 cm de altura. A estrutura integrada dos blocos suporta peso de até 500kg/bloco. Os orifícios filtrantes apresentam robustez e desenho anti-entupimento. Os blocos possuem encaixes tipo macho/fêmea, permitindo assim sua fixação. Este procedimento permite que qualquer módulo possa ser removido e substituído sem prejuízo dos módulos contíguos (KIM, 1992; Gravity Flow Systems Southwest, Inc).

O manual *Gravity Flow Systems Southwest, Inc.* destaca que a circulação de ar tanto por cima como por baixo da camada aumenta a velocidade de secagem do lodo.

A USEPA (1987) destaca que sistemas de desaguamento por blocos drenantes apresentam uma carga de sólidos que fica entre 2 e 5 kg/m² por ciclo operacional, sendo que a quantidade de ciclos operacionais por ano vão depender das condições do sistema e clima da região. Em uma rotina operacional de 24 horas, a geração anual de lodo pode exceder 1600 kg/m². Tchobanoglous, Burton, Stensel (2003) destacam que biosólidos podem secar 8 a 12% após 24 h de secagem em leitos de secagem por blocos drenantes.

Como existe a presença de um pavimento falso nos leitos de secagem por blocos drenantes, quando comparado aos leitos de secagem convencionais esta área precisa ser convertida de 10 a 20% da área necessária para remoção de água (GROVER, 1979).

Em relação a torta de lodo formada, esta pode ser facilmente removida por carregadores mecânicos, sendo que o filtrado extraído pelo processo apresenta alta qualidade, geralmente menos do que 50 mg/L sólidos em suspensão, com níveis de DQO e DBO baixos, quando comparados com outros sistemas de desaguamento.

Em se tratando da destinação dos sólidos, é exigências de alguns aterros sanitários que o teor de sólidos totais seja no mínimo 15%, sendo assim possível realizar a destinação. Os sistemas de leitos de secagem por blocos drenantes fornecem esse grau de desidratação em até 7 dias (KIM, 1992).

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados detalhes de leitos de secagem por blocos drenantes aberto e coberto, respectivamente.



Figura 7 – Leito de secagem por blocos drenantes aberto.
Fonte: Gravity Flow Systems Southwest, Inc.



Figura 8 – Leito de secagem por blocos drenantes coberto
Fonte: Gravity Flow Systems Southwest, Inc.

Na Tabela 7 são apresentados os dados operacionais para instalações que empreguem o sistema de blocos drenantes.

Tabela 7 – Dados operacionais e as capacidades de instalações típicas que empreguem blocos drenantes

Tipo de Lodo	Teor de Sólidos	Teor de Sólidos	Capacidade
	Secos Iniciais	Secos após 24 horas	
Lodo Primário	2-6%	18-24%	5-21 kgSS /m ²
Lodos Ativados	1-3%	8-14%	5-10 kgSS /m ²
Lodo Aeróbio	1-3%	8-14%	5-10 kgSS /m ²
Lodo Anaeróbio	2-8%	14-18%	5-28 kgSS /m ²
Clarificação por Cloro	0,75-1,5%	10-14%	2,5-5 kgSS /m ²
Clarificação por alumínio	1-4%	8-13%	5-12 kgSS /m ²
Clarificação por cal	8-12%	25-35%	20-40 kgSS /m ²
Papel e Celulose	1-3%	7-12%	5-10 kgSS /m ²
Curtume	1-3%	2-15%	5-10 kgSS /m ²

Fonte: Gravity Flow Systems Southwest, Inc.

Os dados de capacidade apresentados na Tabela 7, podem ser obtidos através das Equações 1 e 2.

$$Massa\ de\ Sólido\ Seco\ (kg) = \frac{Volume\ (m^3) \times Concentração(g/m^3)}{1000\ g/Kg} \quad (Equação\ 01)$$

$$Taxa\ de\ Aplicação\ KgSS/m^2 = \frac{Massa\ de\ Sólido\ Seco\ (kg)}{Área\ (m^2)} \quad (Equação\ 02)$$

Na Figura 9 é apresentado um método típico de limpeza de um leito de secagem localizado em uma planta de tratamento de água no Alabama com um sistema de desaguamento natural, não mecanizado. O sistema é constituído de três leitos de secagem por blocos drenantes com uma área de 120 m² preparados para desaguar três toneladas de sólidos secos por semana.



Figura 9 – Método de limpeza do leito de secagem na cidade de Bay Minette, Alabama (EUA).

Fonte: Gravity Flow Systems Southwest, Inc.

Na Tabela 8 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do leito de secagem com blocos drenantes.

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de secagem com Blocos Drenantes

Vantagens	Desvantagens
<p>A remoção dos sólidos é mais fácil de do que nos leitos de secagem convencionais;</p> <p>Não existe problemas de entupimento;</p> <p>A drenagem é constante e mais rápida;</p> <p>O rendimento é mais elevado do que leitos de areia;</p> <p>Filtrado contém baixo teor de sólidos suspensos;</p> <p>Resistentes a corrosão e abrasão;</p> <p>Não exige manutenção mecânica;</p> <p>A área ocupada é de 10 a 20% menor que a área de leitos de secagem de areia.</p>	<p>Os custos para implantação são mais elevados do que para os leitos de secagem convencionais.</p>

Fonte: USEPA (1979), Gravity Flow Systems Southwest, Inc.

Neste cenário novas pesquisas tem apontado com sucesso a utilização de blocos drenantes em substituição as camadas de areia, pedregulho e tijolos. Em uma pesquisa desenvolvida por Silva e Pohlmann (2014) o sistema de leito filtrante foi projetado em um tanque raso impermeável onde foram montados blocos diretamente sobre piso de concreto alisado. O leito com os blocos oferece grande capacidade de carga, permitindo o tráfego de máquinas até 1600kg, e os resultados apontaram eficiências na ordem de 96,24% em 22 dias de secagem.

Mesmo com o bom desempenho dos blocos drenantes, a maioria dos usuários insatisfeitos com o uso dos leitos de secagem modificados indicam que os problemas mais comuns, são devido ao projeto estrutural, que incluem a drenagem ineficiente, distribuição desigual do lodo sobre o leito e dificuldade de limpeza.

3.4.2.3. Leitos de Secagem Pavimentado

Leito de secagem pavimentado em sua maioria são retangulares e possuem de 6 a 15 m de largura e 20 a 45 m de comprimento, e em seu revestimento pode ser usado concreto, asfalto ou solo-cimento nos casos de leitos (QUEIROZ, 2012). Segundo Wang et al. (2009), as experiências indicam que leitos de secagem pavimentados podem resultar em tempos de secagem menores, assim como em operações mais econômicas, quando comparados com leitos de secagem convencionais de areia.

O parâmetro mais crítico em relação ao leito pavimentado é a área requerida para desaguamento do lodo para um determinado nível de sólidos desejado no menor tempo possível. A principal vantagem dessa abordagem é a capacidade de ser utilizado equipamentos relativamente pesados para a remoção de lodo. Leitos pavimentados podem ser usados em qualquer localização principalmente em regiões quentes, árido e semiárido, sendo que a evaporação é a principal via para perda de água (USEPA, 1987).

Na Figura 10 são apresentados os detalhes de um sistema de leito de secagem pavimentado para decantação e evaporação.

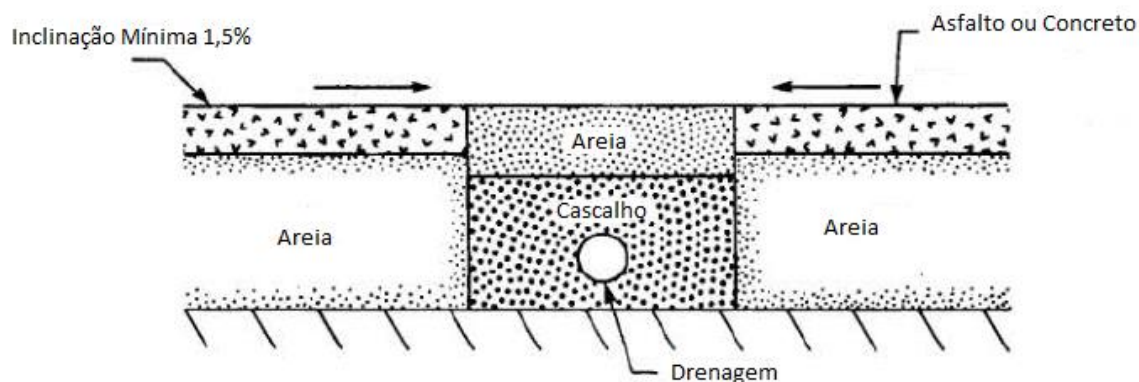


Figura 10 – Detalhes do leito de secagem pavimentado
Fonte: USEPA (1989).

3.4.2.4. Lagoas de Secagem

Lagoa de secagem de lodo é um método de desaguamento usado quando existe disponibilidade de área. É um método de secagem utilizado em áreas tropicais e subtropicais, devido aos baixos custos de construção e operação (PAN et al. 2016). Os sistemas de lagoas de secagem são semelhantes aos leitos de secagem. No entanto, o lodo é colocado a uma profundidade maior, aproximadamente três a quatro vezes do que seria num leito de secagem convencional (USEPA 1979).

Um ciclo de funcionamento típico de uma lagoa de secagem de lodos é geralmente de mais de um ano, dependendo do clima local, e consiste das principais fases: enchimento da lagoa com o lodo, secagem do lodo por processo de drenagem e evaporação e processo de remoção dos sedimentos (BUBBIS, 1962).

Segundo Qasim (1999), o tempo de secagem das lagoas geralmente são longos e os lodos são desaguados a concentrações de sólidos predeterminados e isto pode exigir um período de secagem de um a três anos. Para disposição do lodo nas lagoas é necessário que o lodo seja estabilizado para minimizar problemas de odor. Na Figura 11 é apresentado os detalhes de um sistema de lagoa de lodo.

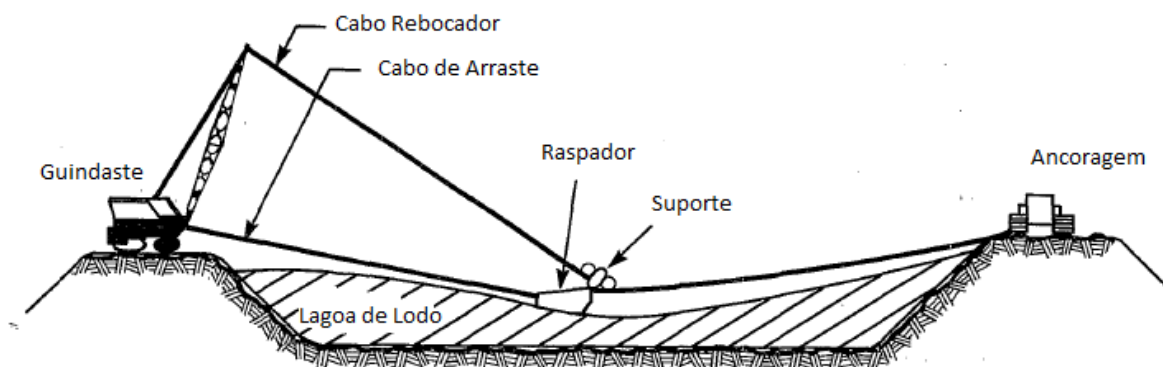


Figura 11 – Detalhes da Lagoa de Lodo
Fonte: USEPA (1978).

Na Tabela 9 são apresentadas vantagens e desvantagens para as lagoas de secagem de lodo.

Tabela 9 – Vantagens e desvantagens do uso de leito de lagoas de secagem

Vantagens	Desvantagens
De todos os sistemas de remoção de água disponíveis, lagoas exigem a menor habilidade e atenção quanto a operação.	Possuem potencial para a contaminação de águas subterrâneas ou das águas superficiais nas proximidades.
Não são sensíveis a variabilidade de lodos.	Podem criar problemas de vetor (para exemplo, moscas e mosquitos).
A matéria orgânica é mais estabilizada.	São mais visíveis para o público.
Não consomem produto químico.	Agridem mais o solo do que métodos mecânicos.
Baixo Consumo de energia.	Podem ser uma fonte de problemas periódicos de odor, e estes odores normalmente são de difícil controle.

Fonte: USEPA, 1979.

3.5. COAGULANTES

No processo de tratamento de água potável, a coagulação é um processo essencial para a remoção de partículas em que são utilizados sais inorgânicos para promover a remoção das partículas nos processos de separação (MATSUI, 2003).

Os coagulantes mais comuns para tratamento de água são os sais de Al (III) e Fe (III). O sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado, devido a sua eficácia no tratamento e dinâmica aplicação em vários tipos de água com um custo

relativamente baixo (WANG et al. 2009; NIU et al. 2013). No entanto, existem algumas desvantagens em seus usos que devem ser avaliados antes de realizar o efetivo uso como coagulante (WU et al. 2012).

Por outro lado um produto tem se destacado por suas vantagens tecnológicas, o policloreto de alumínio, conhecido como PAC. Este tem oferecido elevado padrão de qualidade à água tratada, além da redução de custos de produção (ALVES, 2012; WANG et al. 2009).

De acordo com Peeters et al. (2011), o policloreto de alumínio tem se destacado no desaguamento e secagem de lodo. Na estação de tratamento de Antuérpia, Bélgica um estudo identificou que a aplicação do PAC, sendo identificado aumento na capacidade de transferência de sólidos do lodo em aproximadamente 55% para um sistema de desaguamento com o uso de centrifuga e secagem mecanizada.

Matsui (2003) destaca que o policloreto de alumínio tem muitas vantagens sobre os coagulantes convencionais, incluindo: menor produção de lodo, insensível sobre a mudança de temperatura e pH e propriedades de neutralização de carga elevada. A aplicação do coagulante policloreto de alumínio em particular, está em ascensão, especialmente na China, Japão, Rússia e Europa Ocidental (WANG et al. 2009).

3.6. POLÍMEROS

Polímeros são substâncias que apresentam cadeias grandes, chamadas de macromoléculas, que são compostas por milhares unidades de repetição denominadas mero, ligadas por ligação covalente. As subunidades moleculares utilizadas para sintetizar os polímeros são denominadas de monômeros (SEBASTIÃO e CANEVAROLO, 2006; SOLOMONS & CRAIG, 2009; MCMURRY 2013).

Os polímeros solúveis em água têm sido utilizados há mais de 50 anos em várias aplicações, algumas delas, como a produção de água potável, com a mais elevados critérios de segurança (COUTURIER, 2011).

De acordo com o catálogo Preparation of Organic Polymers (2006), os polímeros são compostos orgânicos sintéticos de alto peso molecular e são baseados nas suas funções ou tipos de carga classificados como: aniônicos, catiônicos, anfóteros e não iônicos.

No processo de sintetização é possível conferir para um mesmo tipo de polímero variação na densidade da carga e peso molecular de acordo ao fim que se destina o polímero (ROBUSTI et al. 2015). Os polímeros orgânicos diferem dos coagulantes, pelos seguintes fatores:

- O peso molecular, é mais elevado: $3 \cdot 10^6$ a $2 \cdot 10^7$, isto permite que o polímero aglomere partículas já desestabilizadas;
- A carga iônica varia de 0 a 100% anionicidade (-) ou cationicidade (+), dependendo do tipo de efluente a ser tratado;
- Podem ser obtidos de várias formas físicas: líquido, em pó, grânulos e emulsão.

3.6.1. Polímeros não iônicos

Polímeros não iônicos não apresentam carga. Quando formam flocos são pequenos e fracos que normalmente são dispersos e não são resistentes às forças de cisalhamento. A poliacrilamida é um típico polímero não iônico, em sua maioria possuem alto peso molecular (ZETA METER. Inc, 1993).

3.6.2. Polímeros Aniônicos

Segundo a Mini Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry (2006) uma substância é considerada aniônica, se tiver uma carga líquida negativa. Quando este polímero é dissolvido em água, os íons de determinado cátion são parcialmente dissociados da cadeia do polímero. Embora haja um número igual de íons positivos e negativos na amostra como um todo, a superfície líquida negativa de uma partícula aniônica é equilibrada por contra íons em solução.

Polímeros aniônicos apresentam sítios de carga negativa e podem ser fabricados com uma variedade de densidades de carga. Eles são usados normalmente para flocular sólidos. Polímeros aniônicos a base de poliacrilamida com alto peso molecular são utilizados com frequência em sistemas de tratamento de águas (HENDRICKS, 2006).

3.6.3. Polímeros Catiônicos

Polímeros catiônicos quando dissolvido em água se ioniza, adquire carga positiva e atua como um autêntico cátion. As cargas catiônicas oferecem um elevado grau de afinidade para a superfície de partículas muito finas e coloidais (PREPARATION OF ORGANIC POLYMERS, 2006). São eficazes no desaguamento de lodo, sendo que usualmente as doses variam de 2 a 5 kg por tonelada de sólidos secos. A melhor condição de dosagem deve ser determinada empiricamente para cada lodo em particular.

Os polímeros catiônicos, dentre outras funcionalidades podem ser utilizados como coagulantes, reduzindo, ou até mesmo eliminando, o uso de sais de alumínio ou de ferro. Em relação a melhor dosagem dos polieletrólitos catiônicos, estas são sempre maiores do que as dosagens dos polímeros aniônicos ou não-iônicos (PACHECO, 2002).

3.6.4. Polímeros de poliacrilamida

A poliacrilamida é um copolímero, também conhecido como poliacrilamida parcialmente hidrolisada (PHPA). São geralmente encontradas na sua forma aniônicas, catiônicas ou não iônicas quando utilizadas como floculantes, desidratantes ou quando são utilizadas em outras aplicações no campo.

A poliacrilamida, geralmente, se apresenta na sua forma seca, como grânulos brancos e inodoros, de tamanhos diferentes dependendo do tipo de polimerização, secagem ou processos de moagem utilizado, que exibe uma toxicidade muito baixa (SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, 2007).

A principal característica das soluções aquosas de poliacrilamida é a viscosidade, sendo crescente com a concentração e peso molecular, e reduzida com o aumento da temperatura. (CHEREMISINOFF, 1997).

Devido a suas características peculiares, polímeros a base poliacrilamida são amplamente utilizados no tratamento de água, fabricação de papel, recuperação de compostos do petróleo e uma importante aplicação no condicionamento do lodo de sistemas de tratamento de água para facilitar seu desaguamento (AL-HASHMI et al. 2014). As cargas do polímero interagem com a superfície das partículas do lodo

e favorecem a formação de floco. A melhor carga e dosagem desse polímero devem ser selecionadas para um melhor resultado.

O peso molecular da poliacrilamida se situa entre 10^4 e 10^7 g/mol, apresenta uma densidade de $1,302 \text{ g/cm}^3$, sendo solúvel em água, morfina, formamida e etilenoglicol. Sua estrutura é composta de uma sequência de acrilamidas, como apresentado na Figura 12.

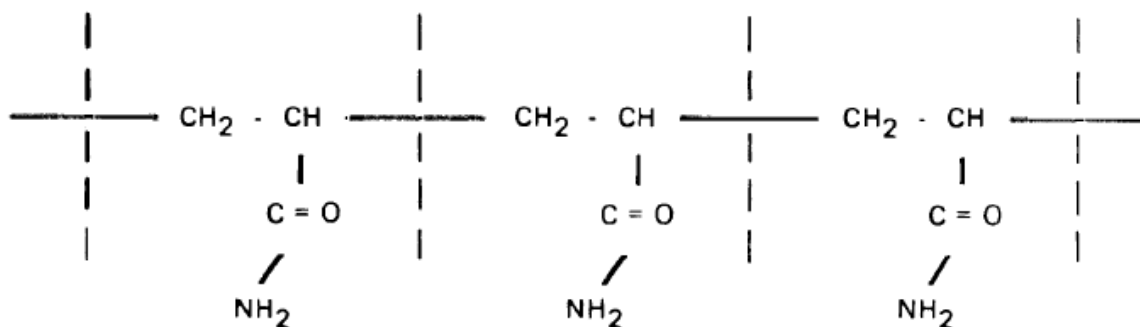


Figura 12 – Detalhes da molécula de poliacrilamida
Fonte: EPA (1979).

No que diz respeito à degradação hidrolítica, a estabilidade das poliacrilamidas depende do pH, de acordo com a sua natureza iônica, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Estabilidade dos Polímeros a base de Poliacrilamida

Natureza iônica	Estabilidade
Não iônico	de pH 1 a pH 12
Aniônico	entre pH 4 e pH 12
Catiônico	entre pH 4 e pH 6

Fonte: SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, (2007).

Em geral, os polímeros são estáveis ao longo do período, podendo chegar a meses. No entanto, em solução a degradação química, mecânica ou bacteriológica pode ocorrer rapidamente (AL-HASHM et al. 2014). Longas cadeias de polímeros são quebradas com mais facilidade por cisalhamento e para altas taxas de cisalhamento a viscosidade tende a diminuir. Por outro lado, para uma dada temperatura, se as taxas de cisalhamento são pequenas, o polímero estará emaranhado, pois a taxa de deformação é pequena e o produto apresenta boa

reatividade (SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, 2007; QGS – Química do Brasil LTDA; SANTANA, 2015).

A Tabela 11 mostra os tempos de estabilidade para as soluções de polímero preparadas em água desmineralizada.

Tabela 11 – Tempos de estabilidade para as soluções de polímero Poliacrilamida

Solução	Estabilidade
0,1%	Aniônico: 2 dias Catiônico: 4 horas
0,2%	*Não Iônicos: 4 dias
0,5%	Aniônico: 08 dias Catiônicos: 24 horas

Fonte: SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, (2007).

*Dados fornecidos por QGS – Química do Brasil LTDA

3.6.5. Peso molecular

Polímeros de diferentes pesos moleculares são extensivamente utilizados para diversos processos, tais como: fabricação de papel, drenagem, tratamento de resíduos e recuperação (WHIPPLE; MALTESH 2001).

Miki (1998) destaca que o peso molecular de um polímero corresponde ao comprimento da cadeia, inclusive as ramificações que contém os sítios de carga, sendo que, o peso molecular influencia diretamente outros fatores dos polímeros, tais como: solubilidade, viscosidade e densidade de carga. A combinação do peso molecular e o fator carga da molécula, são as variáveis mais utilizadas para avaliar a eficiência do polímero no processo de condicionamento (TUROVSKIY; MATHAI, 2006).

A melhor determinação da escolha do peso molecular, depende do tipo de equipamento utilizado para o desaguamento. O manual da SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, (2007) destaca que no desaguamento por centrífuga é indicado o uso de polímeros com peso molecular alto a muito alto, devido ao cisalhamento aplicado aos flocos. Para o desaguamento por filtração é indicado o uso de polímeros com peso molecular de baixo a médio para se obter uma boa drenagem.

Na Tabela 12 são apresentadas as variações do peso molecular dos polímeros.

Tabela 12 – Categorias de peso molecular

Termo	Faixa de peso molecular
Baixo	$10^4 - 10^5$
Médio	$10^5 - 10^6$
Alto	$10^6 - 5 \cdot 10^6$
Muito Alto	$6 \cdot 10^6 - 1,8 \cdot 10^7$

Fonte: Adaptado de (MANGRAVITE, 1983).

3.6.6. Densidade de carga

Densidade de carga de um polímero é a medida da quantidade de sítios de uma cadeia que possuem a carga associada ao polímero. Nos polímeros catiônicos todos os sítios carregados positivamente são passíveis de serem medidos. A densidade de carga depende do tipo de lodo que se pretende tratar.

Na Figura 13 é apresentado de forma genérica a aplicação dos polímeros a partir da densidade de carga.

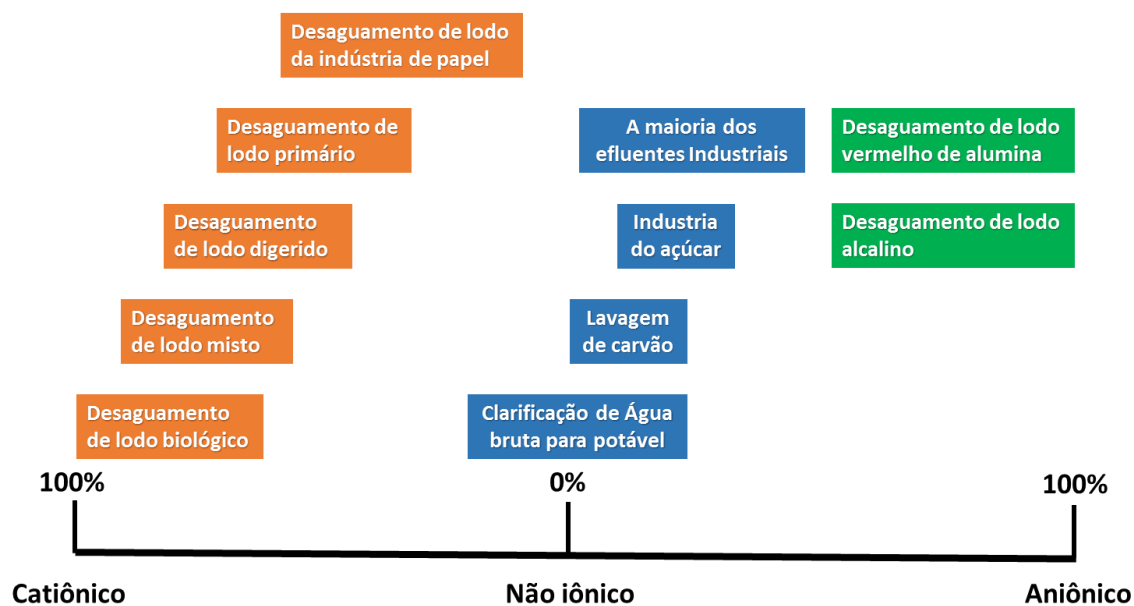


Figura 13 – Carga dos polímeros e suas aplicações

Fonte: (SNF FLOERGER SLUDGE DEWATERING, 2003).

3.7. CONDICIONAMENTO

Condicionamento de lodo refere-se a processos biológicos, físicos ou químicos aplicados quando se quer pretende remover água de lodos sólidos. Um dos objetivos do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas através da combinação das pequenas partículas em grandes agregados, favorecendo o desaguamento.

A característica de remoção da água de lodos geralmente é realizada através do condicionamento químico. Outros métodos de condicionamento que também são utilizados dependendo da característica do lodo são o tratamento térmico e o método de congelamento e descongelamento.

O condicionamento químico pode ser realizado por sais trivalentes de alumínio e de ferro, assim como polieletrólitos orgânicos. Eles efetuam a quebra das barreiras naturais da partícula promovendo agregação ou floculação (SANIN; VESILIND; CLARKSON, 2011).

O condicionamento químico pode reduzir o teor de umidade de 90 a 99% para 65 a 85%, dependendo da natureza dos sólidos a serem tratados. Tchobanoglous, Burton, Stensel (2003) destacam que o custo dos produtos químicos utilizados no condicionamento é o fator determinante para escolha de qual técnica utilizar.

No condicionamento térmico existem dois processos para tratamento térmico de lodos. O primeiro é a oxidação ao ar úmido, com temperaturas de 230 a 280°C e pressões próximas a 8,3MPa. O outro tipo, tratamento térmico, é semelhante, mas realizado a temperaturas de 176 a 204°C e pressões de 1 a 2MPa. A oxidação ao ar úmido reduz o lodo a uma cinza, melhorando o desaguamento do lodo. Em temperaturas mais baixas, o tratamento térmico a pressão é mais utilizado do que o processo de oxidação (TUROVSKIY; MATHAI, 2006).

Outra técnica utilizada com frequência em regiões de clima frio é o congelamento e posterior descongelamento do lodo. Turovskiy e Mathai (2006) destacam que a técnica resulta em uma alteração na estrutura e na conversão da água ligada a água livre. Isto aumenta o desaguamento do lodo de maneira significativa, o que leva a redução da resistência específica permitindo um desaguamento mecânico dos lodos sem o uso de polímero ou ainda reduzindo significativamente seu consumo.

Quando o lodo congela, a água livre começa a congelar em primeiro lugar e à medida que a água livre se liga por cristalização, desloca as partículas e flocos para a frente de gelo. Depois que a água livre é congelada, a água intersticial é extraída por difusão e adicionou-se a estrutura cristalina de crescimento (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003). A concentração inicial de sólidos no lodo, a velocidade e o tempo de congelamento, são apontados como variáveis importantes a serem consideradas na otimização do processo de congelamento e descongelamento.

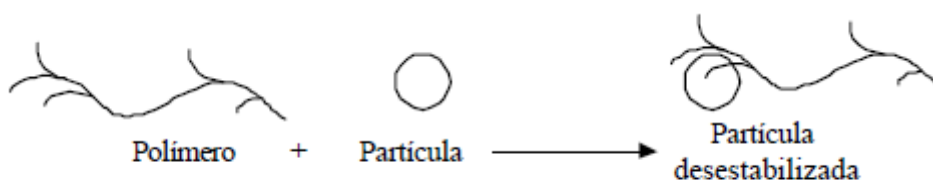
3.7.1. Mecanismo de reação dos polímeros com as partículas

Segundo Dentel (2001), Saveyn (2005) e United States Environmental Protection Agency-EPA (1979) seis mecanismos podem acontecer no condicionamento dos sólidos do lodo. Os dois primeiros casos são os desejáveis, enquanto os demais são indicativos de que algum parâmetro do processo pode ser melhorado através de ajustes:

3.7.1.1. Adsorção inicial do polímero

Ao entrar em contato com o polímero, os sólidos se dispersam e acontece uma atração entre os sítios carregados do polímero e a carga das partículas, se essa atração supera a força de repulsão entre as partículas de igual carga, e estas partículas são atraídas em conjunto.

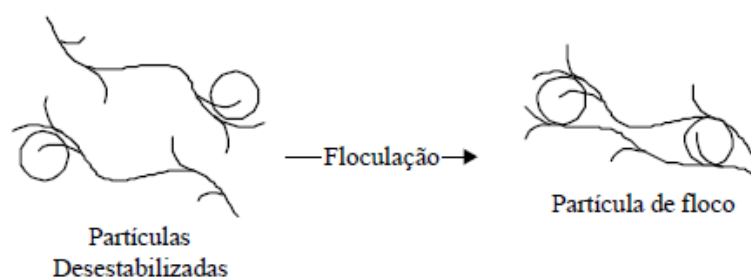
Reação 1 – Adsorção inicial na dosagem ótima de polímero



3.7.1.2. Formação do floco

Nesta fase, as cargas eletrostáticas estão desestabilizadas e as partículas estão atraídas de maneira fraca, sendo necessário um certo grau de mistura para que as partículas desestabilizadas entrem em contato.

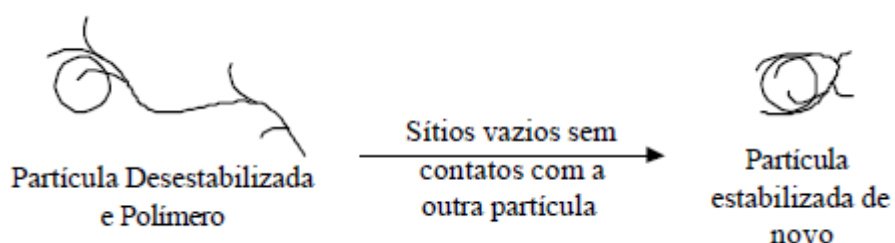
Reação 2 – Formação do floco



3.7.1.3. Adsorção secundária do polímero

Esta condição geralmente ocorre quando a quantidade de polímero é insuficiente e resulta da absorção parcial do polímero com as partículas do lodo, o polímero se volta para a mesma partícula ao invés de se ligar com outras partículas. Essa situação não pode ser revertida com a adição de mais polímero, pois essas partículas dificilmente se desestabilizarão para a formação de flocos.

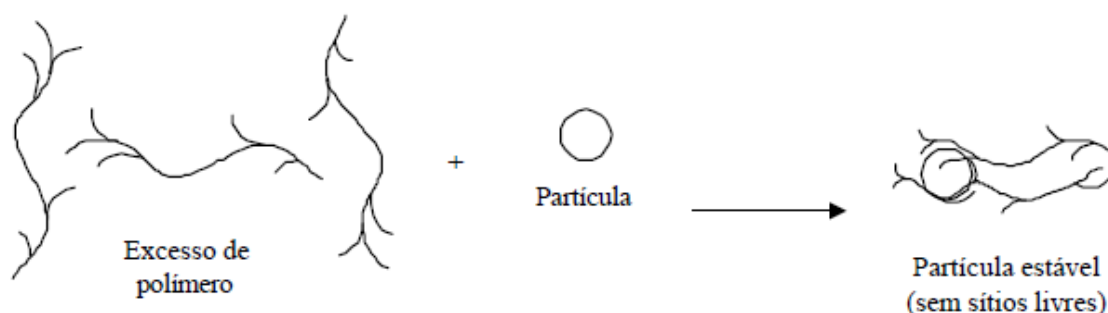
Reação 3 – Adsorção secundária do polímero



3.7.1.4. Adsorção inicial com excesso de polímero

O excesso de polímero faz com que as partículas se estabilizam sem a formação dos flocos, e assim como na reação 3, a partícula estabilizada com excesso de polímero, dificilmente se desestabilizará para a formação de flocos, é necessário interromper a dosagem e aumentar a concentração de água.

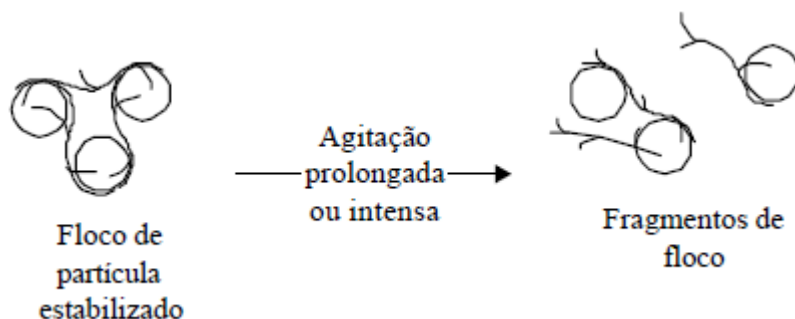
Reação 4 – Adsorção inicial com excesso de polímero



3.7.1.5. Ruptura do floco

No caso de uma mistura ser exposta a uma agitação prolongada ou intensa, a reação não é eficiente pois acontece uma sobrecarga no lodo menos condicionado no lugar do lodo bem condicionado. A solução para esse caso é um controle da agitação ou a substituição do polímero.

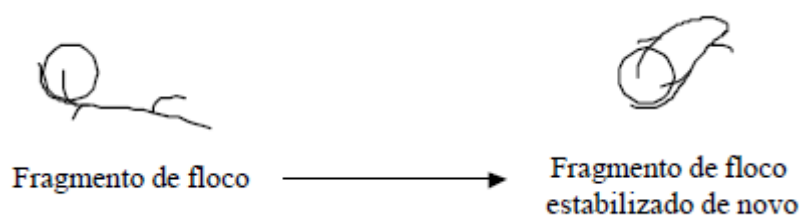
Reação 5 – Ruptura do floco



3.7.1.6. Readsorção secundária do polímero

Esse caso pode ser observado no material efluente de filtro prensa e centrífugas, em que acontece uma nova formação de flocos a partir dos sólidos remanescentes, durante a sedimentação dos sólidos.

Reação 6 – Readsorção secundária do polímero



3.7.2. Fatores que afetam o condicionamento

Lodo de águas residuais são formados por sólidos primários, secundários, e / ou químicos com partículas orgânicas e inorgânicas de vários formatos. Dependendo da fonte geradora do lodo, as partículas podem apresentar conteúdo significativo de água livre e ainda água vicinal, intersticial e de hidratação (TUROVSKIY; MATHAI, 2006). As principais características que afetam o lodo condicionado são: a fonte geradora, concentração de sólidos, distribuição do tamanho de partículas, fatores físicos, carga de superfície, grau de hidratação e outros.

3.7.2.1. Fonte Geradora

Segundo Turovskiy e Mathai (2006) lodo primário, resíduo de lodo ativado, lodo químico e biosólidos digeridos são bons indicadores de fontes, que requerem quantidades significativas de doses de condicionantes para realização do desaguamento. Como regra geral, lodo primário exige doses mais baixas de condicionante do que as exigidas pelo lodo biológico, já lodo químico é difícil de classificar como uma única fonte para as quantidades requeridas de condicionante, porque diferentes tipos de lodos químicos exigem diferentes doses e tipos de

condicionantes. Deve-se notar que estas são regras gerais e que os requisitos de condicionamento para a mesma fonte de lodo, pode variar de planta para planta.

3.7.2.2. Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos em lodos de águas residuárias contém um número significativo de partículas coloidais, que apresentam grande área de superfície específica. Se o lodo apresenta baixa concentração de sólidos, estas partículas comportam-se de forma discreta com pouca interação.

Em muitas aplicações o condicionamento é a neutralização da carga superficial das partículas do lodo pela adsorção da carga oposta de polieletrólitos orgânicos ou inorgânicos (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL 2003).

Com a pequena interação da baixa concentração de sólidos, maior o volume condicionante é necessário para ultrapassar a carga de superfície. À medida que a concentração de sólidos aumenta, a interação também aumenta, isto sugere que quanto maior for a concentração de sólidos menos susceptível ocorre o processo de superdosagem, enquanto que, quanto maior for a concentração de sólidos mais difícil de realizar uma mistura efetiva do lodo com polímero (TUROVSKIY; MATHAI, 2006; MIKI, 1998).

3.7.2.3. Distribuição do tamanho de partícula

A distribuição e o tamanho das partículas são fatores importantes que influenciam o desaguamento do lodo. Quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a área superficial que implica maior capacidade de hidratação, maior consumo de produtos químicos e um aumento na resistência ao desaguamento. (TCHOBANOGLIOUS, BURTON, STENSEL 2003; MIKI, SOBRINHO, HAANDEL, 2006).

3.7.2.4. Fatores Físicos

Os fatores físicos, como armazenamento, bombeamento, mistura e processos de tratamento de lodos, incluindo adensamento e desaguamento, podem afetar as

características dos lodos desaguados. O lodo quando armazenado durante um longo período, necessita de mais condicionantes do que o lodo fresco, por causa de um aumento no grau de hidratação e no conteúdo de sólidos finos (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL 2003).

3.7.2.5. Superfície de carga e grau de hidratação

Na maior parte dos casos, os sólidos do lodo tendem a repelir-se em vez de se atraírem, muito embora os sólidos dos lodos sejam carregados negativamente e assim, tendem a ser mutuamente repulsivos. Esta repulsão ocorre devido à hidratação ou efeitos elétricos. Com a hidratação, uma camada de água se liga à superfície do sólido, que impede a interação entre as partículas de sólidos. Mediante a estas dificuldades de interação, o condicionamento é utilizado para ultrapassar estes efeitos de hidratação e repulsão elétrica (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL 2003).

3.7.2.6. Tipo de Polímero

O uso de polímeros é de fundamental importância para superar os efeitos de hidratação e repulsão eletrostática e como os lodos são carregados negativamente o uso de polímeros catiônicos acabam sendo os mais apropriados para o condicionamento do lodo.

Segundo Cole e Singer (1985) os polímeros catiônicos com peso molecular superior a 10^6 foram eficazes no condicionamento de lodo.

3.7.2.7. Determinação da melhor dosagem

A dosagem ótima de polímeros é definida como a dose que produz resistência mínima à filtração de acordo com o tipo de ensaio utilizado (WU; LEE; HUANG, 2000).

Para determinar a melhor dosagem de polímeros, ensaios de experimentais são essenciais para se determinar a dosagem ideal. Testes de resistência específica, tempo de sucção capilar, além de outros propostos por diversos autores, são

utilizados para obter, se não a melhor dosagem, o range de dosagem que melhor representa a eficiência no desaguamento do lodo.

Para identificar a melhor dosagem de polímeros alguns fatores devem ser levados em consideração. Segundo Mortara (2011) o consumo de produtos químicos depende essencialmente da quantidade de sólidos presentes num certo volume de lodo. Como a dosagem de polímero depende diretamente do teor de sólidos presentes no lodo, a determinação desta variável é de fundamental importância para se identificar a dosagem ideal.

Niu et al. (2013) destacam que é improvável que exista um índice universal para determinação da dose ótima. A dosagem ótima e consequente o consumo de produtos químicos poderá ser muito diferente dependendo da capacidade de desaguamento e da origem do lodo estudado.

A dosagem dos condicionantes químicos deve ser avaliada levando em consideração não apenas a eficiência no desaguamento, mais o custo do agente químico condicionador (ZHAI et al. 2012).

As condições ideais para processo desaguamento, como a dosagem de polímero, pH do lodo e origem do lodo, devem ser investigados usando experimento jar-test (AMUDA; AMOO, 2007).

Andreolli, Von Sperling e Fernandes (2007) apontam que as dosagens de polímeros orgânicos são menores que polímeros inorgânicos podendo varia de 1 a 10 g/kg. Abu-Orf e Ormerci (2005) identificaram uma dose ótima de polímero na ordem de 20-22 g/kg podendo ser considerada o melhor range de dosagem, para lodos com menor afinidade ao desaguamento.

3.8. MÉTODOS RELACIONADOS A FILTRABILIDADE DE LODOS

Tradicionalmente os testes de laboratório apresentam boa aceitabilidade e proporcionam bons resultados quando o assunto é avaliar a facilidade do lodo desaguar. Nestes termos o ensaio de resistência específica à filtração é utilizado para definir as dosagens de produtos químicos no condicionamento de lodos a serem desaguados.

Segundo Christensen (1983, apud SCALIZE e DI BERNARDO, 1999) o ensaio de resistência específica é utilizado como sendo um parâmetro para determinar a

filtrabilidade de lodos de estações de tratamento de água e de outros resíduos. O ensaio possibilita a escolha apropriada de polímeros e a seleção de dispositivos para desaguamento.

O procedimento experimental é simples e reproduzível, o teste compreende a utilização de um funil de Buchner com membrana filtrante acoplado a um sistema de geração de vácuo. O teste é conduzido pela colocação de um volume conhecido de lodo dentro de um funil de Buchner contendo um papel filtro e impondo um vácuo para o tempo zero. A quantidade de filtrado coletado para vários tempos é registrada até que um volume determinado de filtrado seja alcançado. Realizado cálculos e determinado os coeficientes a resistência específica é identificada (SPAVIER, 2003).

Segundo Scalize e Di Bernardo (1999) lodos adensados apresentam valores de resistência específica à filtração entre 1×10^{12} e 1×10^{13} m/kg, sendo que quando devidamente condicionados com polímeros, estes valores são reduzidos para 1×10^{10} e 1×10^{11} m/kg. Os autores ainda sugerem o valor 1×10^{11} m/kg como limite para que se obtenha economia no desaguamento, principalmente quando utilizado desaguamento mecanizado. Quando os lodos são adensados sem o uso de condicionante químico, e são provenientes de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário, estes lodos tendem a apresentar valores de resistência específica superiores a 5×10^{12} m/kg, sendo considerados, portanto, de difícil desaguamento.

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida em uma unidade experimental da Estação de Tratamento de Água de Coqueiral em Aracruz em três etapas distintas conforme apresentado nas Figuras 14, 15 e 16.

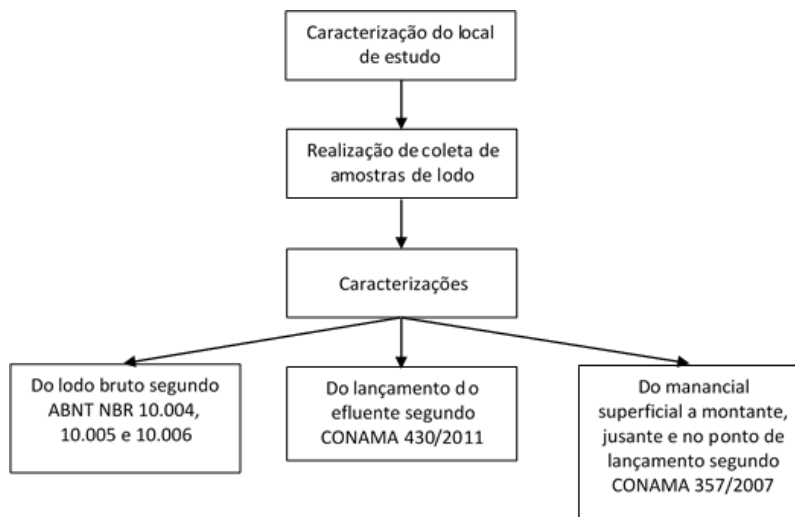


Figura 14 – Caracterização do local de estudo e lodo da ETA

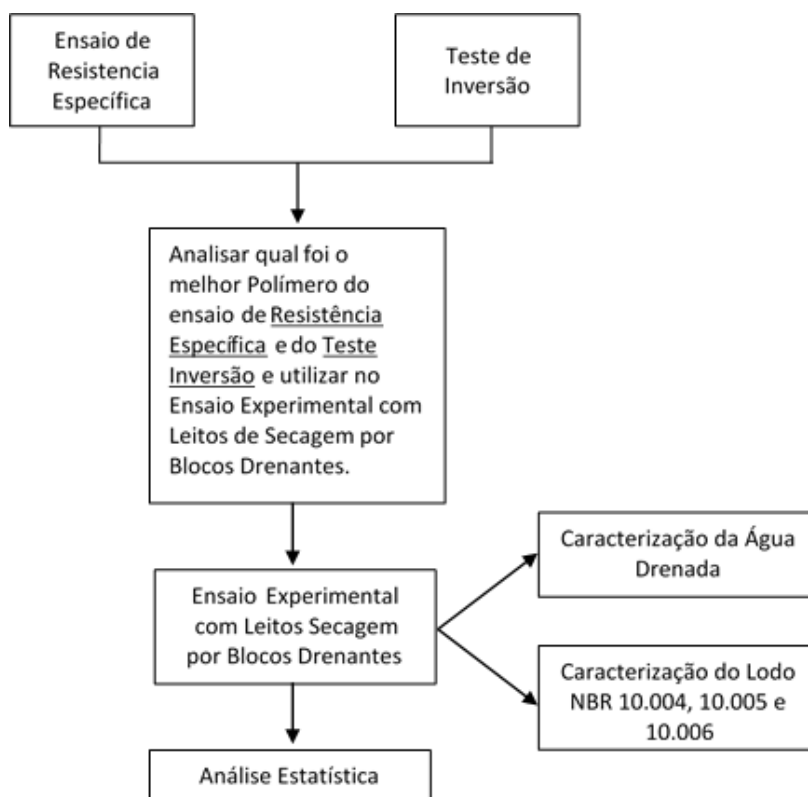


Figura 15 – Realização dos ensaios de desaguamento do lodo

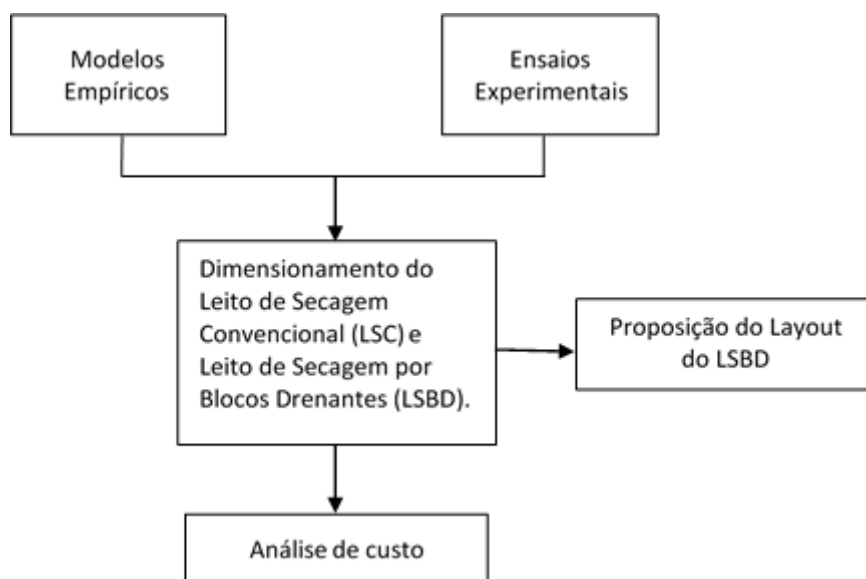


Figura 16 – Realização da quantificação dos resíduos

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O trabalho foi executado no município de Aracruz, localizado no norte do estado do Espírito Santo, em específico nas instalações do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Aracruz que é uma autarquia municipal, criada pela Lei Municipal N.º 10 de 20 de Abril de 1967, responsável por manter os serviços públicos de água potável e de esgoto sanitário em todo município de Aracruz.

Os procedimentos operacionais foram executados em uma das localidades da autarquia, localizada no distrito de Coqueiral, onde a fonte de captação de água bruta é um manancial superficial, denominado Barragem da Santur.

A estação de tratamento de Coqueiral opera, em média, 24h/d, sobre uma estrutura de tratamento composta por 01 calha Paschall, 06 floculadores do tipo Alabama, 01 flotador, 03 filtros sendo 02 ascendentes e 01 descente. A estação de tratamento de água produz cerca de 2.764,8 m³ de água tratada por dia, com vazão média de 32 L/s. Os produtos químicos utilizados no processo são: Policloreto de Alumínio, com a função de agente coagulante, Hidróxido de Sódio com a função de alcalinizante e cloro liquefeito como desinfetante.

Na Figura 17 é apresentada a localização da Estação de Tratamento de Água de Coqueiral, bem como o ponto de captação e os pontos de descarga da água de

lavagem de filtro (ALF) e água de descarga de flotador (ADF) e na Figura 18 o flotador da ETA.



Figura 17 – Localização da área de estudo,
Fonte: Geobases (2015)



Figura 18 – ETA de Coqueiral
Fonte: acervo do autor

4.2. COLETA DA AMOSTRA DE LODO

O lodo foi coletado diretamente no flotador, e para cada amostragem foram coletados 20 litros de lodo e armazenados em bambonas à temperatura ambiente de 25 ± 2 °C até no máximo 10 horas para ser realizado os ensaios de resistência específica e teste de inversão. Para o desaguamento em leito de secagem por blocos drenantes, foram coletados 200 litros de lodo para execução de cada ensaio. Na Figura 19 é apresentado o ponto de coleta do lodo na ETA Coqueiral.



Figura 19 – Lodo da ETA de Coqueiral

Fonte: acervo do autor

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO LODO BRUTO E DOS LANÇAMENTOS

A caracterização da amostra de lodo bruto foi realizada segundo parâmetros estabelecidos nas normas ABNT NBR 10.004, ABNT NBR 10.005 e ABNT NBR 10.006 que tratam da obtenção de extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos sólidos e sua devida classificação respectivamente. Antes da execução do ensaio de resistência específica, teste de inversão e desaguamento em blocos drenantes,

foram determinadas as características do lodo em termos de sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais, sendo os procedimentos determinados de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Foi realizado ainda, caracterização do efluente lançado na Lagoa Santur segundo CONAMA 430/2011, além de verificar as características da água da lagoa 100 metros a montante, 100 metros a jusante e no ponto de captação da ETA de Coqueiral.

4.4. TESTES DE DESAGUAMENTO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICA

4.4.1. Polímeros utilizados nos ensaios

Os polímeros utilizados foram os fornecidos pela empresa SNF Floerger conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Características dos polímeros testados

Polímero	Carga	Densidade de carga	Peso Molecular	Faixa Peso Molecular (x 10 ⁶ Daltons)	Valor U\$\$
FO 4115 SH	Catiônico	Muito baixa	Alto	6 a 8	4,65
FO 4140 SH	Catiônico	Baixa	Alto	6 a 8	4,65
FO 4190 SH	Catiônico	Baixa	Alto	6,5 a 8,5	4,87
FO 4290 SH	Catiônico	Baixa-média	Alto	5,5 a 9	4,87
FO 4440 SH	Catiônico	Média	Alto	5 a 7	5,21
FO 4700 SH	Catiônico	Alta	Alto	5 a 7	6,03
AN 910 SH	Aniônico	Baixa	Alto	10 a 13	4,56
AN 923 SH	Aniônico	Média	Alto	12 a 15	4,56
FA 920 SH	Não-iônico	Sem carga	Alto	6 a 9	4,56

Fonte: SNF Floerger



Figura 20 – Polímeros testados

Fonte: acervo do autor

4.4.1.1. Preparo da solução de polímero para ensaio de resistência específica e teste de inversão

O procedimento para preparação dos polímeros foi o adaptado de (LAMONTAGNE 2006).

Para realização do procedimento de preparação de polímeros foram utilizados nove tipos de polímeros, destes dois eram aniônicos, um não-iônico e seis catiônicos. Por possuírem característica altamente higroscópica estes foram mantidos em local ventilado, de baixa umidade e longe da luz solar.

Os polímeros foram adquiridos sob a forma de um sólido granular branco, e, para utilização nos testes, foram preparadas soluções a 0,2% m/v. Na Figura 21 é apresentado o procedimento para preparação dos polímeros.



Figura 21 – Etapas da preparação de polímero

4.4.2. Condicionamento Químico

Para execução do condicionamento químico, a metodologia foi adaptada de (MIKI, 1998; LAMONTAGNE, 2006; NIU et al. 2013).

Foram extraídas 200 mL da amostra de lodo coletada do flotor da estação de tratamento de água de Coqueiral em Aracruz/ES, e levado para agitação em jar test por 5 minutos para homogeneização. Depois da adição do polímero, a amostra foi agitada a 100 rpm por 30 segundos, para promover efetivo condicionamento do polímero para posterior ensaio de resistência específica. Este procedimento foi executado para cada um dos 9 polímeros testados (catiônico, aniônico e não iônico), nas dosagens de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mg/L. Na Figura 22 é

apresentado o aparelho jar test utilizado para execução do condicionamento químico.

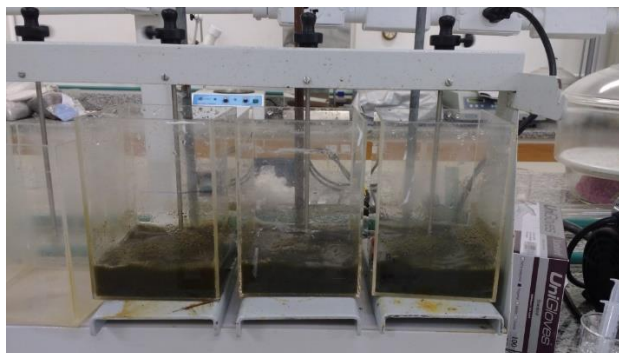


Figura 22 – Aparelho de Jar Test
Fonte: acervo do autor

4.4.3. Ensaio de Resistência Específica

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), o teste de resistência específica tem por finalidade avaliar a passagem do líquido através de uma massa sólida influenciada pela dosagem de polímero tanto no adensamento quanto no desaguamento.

Para o ensaio de resistência específica o procedimento adotado foi o mesmo realizado por Scalize (1997) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012). O aparato experimental utilizado no ensaio de resistência específica é o apresentado na Figura 23.



Figura 23 – Aparato Experimental para ensaio de resistência específica
Fonte: acervo do autor

Para cada ensaio de resistência específica, foram utilizadas as soluções condicionadas conforme descrito no item 4.4.2 nas concentrações de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mg/L. Foi realizado ainda, ensaio de resistência específica com o lodo sem o uso de polímeros. Na Figura 26 são apresentadas as etapas do ensaio de resistência específica.

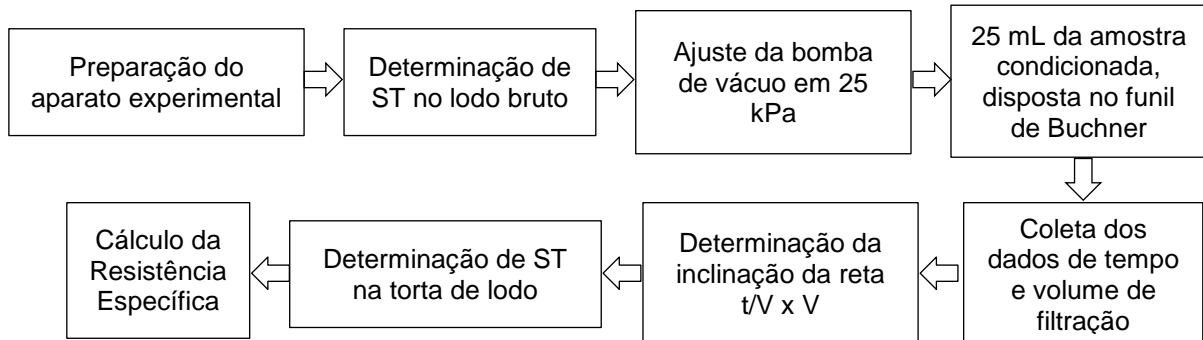


Figura 24 – Etapas do ensaio de resistência específica

4.4.3.1. Cálculo da Resistência Específica

O cálculo da resistência específica é expresso pela Equação 3:

$$r = \frac{2 \times b \times P \times A^2}{\mu \times C} \quad (\text{Equação 03})$$

em que:

r: resistência específica (cm/g);

P: pressão de filtração (g/cm.s²);

A: área filtrante (cm²);

μ : viscosidade do filtrado (g/cm.s), adotou-se 1000 g/cm.s;

C: massa de ST por unidade de volume filtrado (g/cm³);

b: coeficiente (s/cm⁶ ou s/mL²), dado pela Equação 4:

$$b = tg\alpha = \frac{\frac{t_2}{V_2} - \frac{t_1}{V_1}}{V_2 - V_1} \quad \text{Equação (04)}$$

Onde:

t_n: tempo de filtração (s)

V_n: volume filtrado (cm³)

A variável b , foi determinada plotando-se o gráfico t/V versus V . Em seguida foi identificado a reta média em seu trecho linear, desprezando-se os pontos finais e iniciais que não apresentaram comportamento linear. A Figura 25 exemplifica a obtenção do coeficiente.

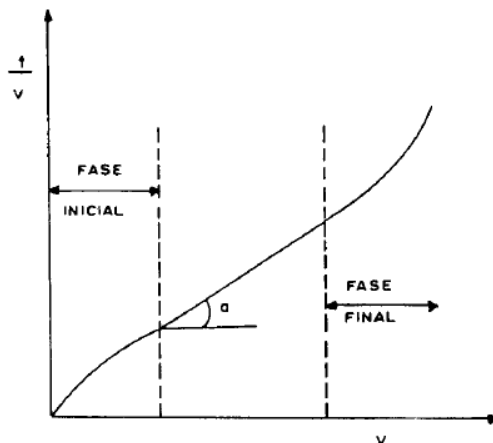


Figura 25 – Modelo gráfico da análise de resistência específica
Fonte: (ALMEIDA; GONÇALVES; GUIMARÃES, 1991).

4.5. TESTE DE INVERSÃO

Para execução do teste de inversão utilizou-se apenas os polímeros catiônicos, devido orientação do fabricante SNF Floerger.

Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas a configuração experimental e fluxograma do teste de inversão respectivamente.

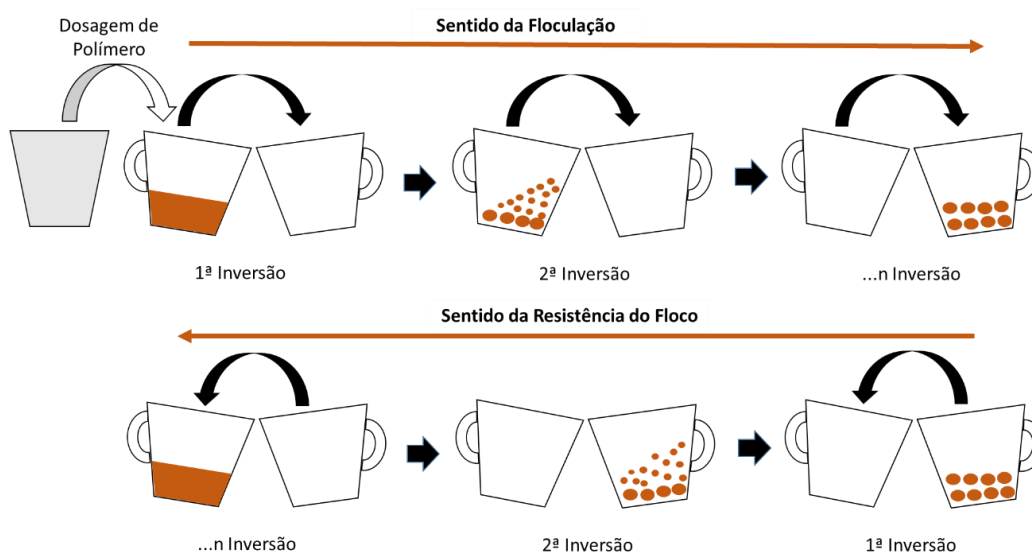


Figura 26 – Configuração experimental do teste de inversão

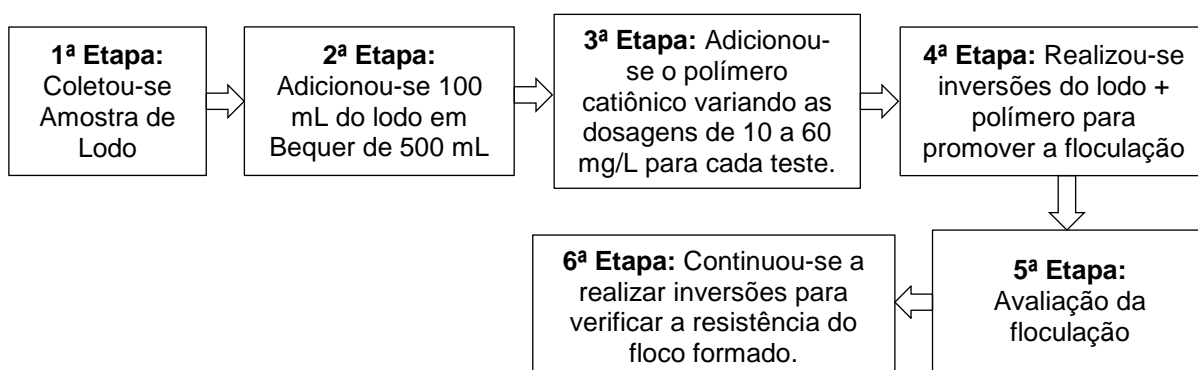


Figura 27 – Fluxograma do Teste de Inversão

Para execução da 5ª etapa foi necessário classificar o teste segundo parâmetros da Tabela 14, e ilustração da Figura 28.

Tabela 14 – Classificação utilizada para determinar a eficiência do polímero em relação a floculação

Identificação	Descrição	Resultado do Polímero
-	Não ocorre desaguamento	Sem Reatividade
+	Mínimo volume de água desaguado com arraste de floco	Ruim
++	Mínimo volume de água desaguado sem arraste de floco	Regular
+++	Maior volume de água desaguado com arraste de floco	Bom
++++	Maior volume de água desaguado sem arraste de floco	Excelente

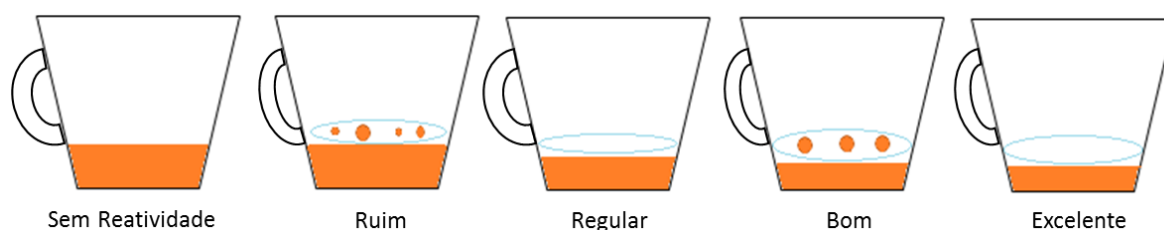


Figura 28 – Ilustração para identificar melhor polímero para floculação

Observações do teste de Inversão:

Antes de ser realizado a 1ª inversão, adiciona-se ao lodo bruto dosagem requerida de polímero, e realiza-se a 1ª inversão. Na sequência realiza-se a 2ª inversão sendo avaliado o início da floculação e conseqüentemente volume de água sendo desaguado, realizando quantas inversões necessárias até que se verifique a efetiva floculação e separação sólido-líquido. Para determinar a eficiência da etapa de floculação foi quantificado o número de inversões até que fosse identificado a separação sólido líquido e principalmente se ocorreu o arraste de micro flocos.

A resistência do floco é determinada no sentido inverso, com o sistema em processo de separação, realiza-se inversões até que se tenha um sistema homogêneo similar ao início do teste. Para se determinar a resistência do floco, foi quantificada o número de inversões necessária para que os flocos formados se tornassem menos consistentes, começando assim o arraste de sólidos para o clarificado.

O julgamento do melhor polímero, é uma avaliação qualitativa dos procedimentos de floculação, que proporcionam avaliar qual o polímero e dosagem foi mais eficiente no condicionamento químico realizado. A escolha do melhor polímero, além de levar em consideração sua eficiência na etapa de floculação, é maximizada pela busca do polímero que apresenta a melhor resistência a floculação.

4.6. ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DESAGUAMENTO NATURAL

4.6.1. Avaliação das características do lodo bruto e determinação da taxa de aplicação

Antes da execução dos ensaios de desaguamento, foram determinadas as características do lodo em termos de sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais (AWWA, 1996). A partir dos dados de teor de sólidos totais do lodo em cada ensaio, foi possível determinar a massa de sólidos de lodo aplicado nos leitos de acordo com as Equações 1 e 2, já apresentadas no item 3.4.2.2.

$$\text{Sólido Seco (kg)} = \frac{\text{Volume (m}^3\text{)} \times \text{Concentração (g/m}^3\text{)}}{1000 \text{ g/Kg}} \quad (\text{Equação 01})$$

$$\text{Taxa de Aplicação KgSS/m}^2 = \frac{\text{Massa de Sólido Seco (Kg)}}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (\text{Equação 02})$$

4.6.2. Preparo da solução de polímero para desaguamento natural

Após identificado o melhor polímero com os ensaios de resistência específica e teste de inversão o procedimento para preparação da solução de polímero foi o mesmo utilizado no item 4.4.1.1.

Para cada ensaio de desaguamento foi preparada solução do polímero FO 4290 a 0,2% e dosagem 2,0 mg pol./g ST (40 mg/L), conforme etapa do estudo que buscou avaliar a melhor opção entre 09 polímeros catiônicos, aniônicos e não iônicos, através do ensaio de resistência específica e teste de inversão.

4.6.3. Condicionamento do lodo para desaguamento natural

Para execução do condicionamento químico, foram extraídas amostra de lodo coletada do flotador da estação de tratamento de água de Coqueiral em Aracruz/ES, e na sequência foi realizado o condicionamento do lodo utilizando dois baldes de 20 litros cada, em que foi adicionado o polímero e realizado 03 inversões, conforme esquema ilustrativo constante na Figura 29.

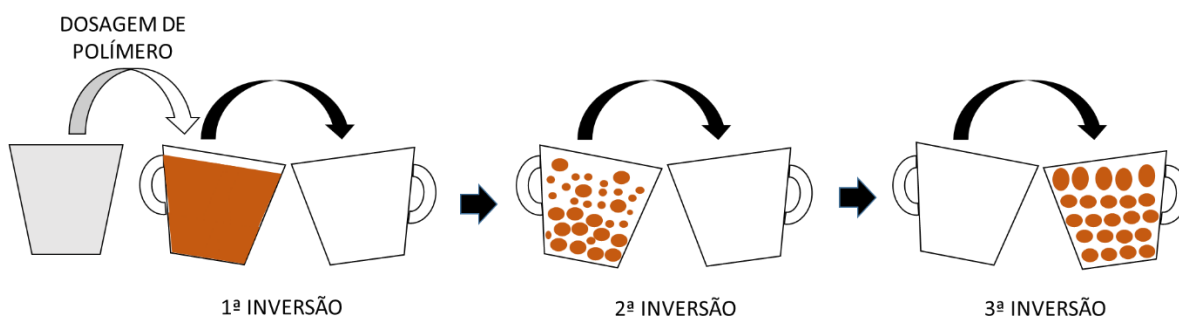


Figura 29 – Configuração experimental para o condicionamento do lodo

Após realizado o condicionamento, o lodo condicionado foi disposto nos leitos de secagem modificados por blocos drenantes para execução do desaguamento natural.

4.6.4. Leito de Secagem por Blocos Drenantes

O método utilizado para o desaguamento foi o mesmo utilizado por Silva e Pohlmann (2014) adaptado. O aparato experimental é constituído de três caixas de fibra, com dimensão (L x C x A) de 30,5 x 61 x 45 cm com capacidade de 74,42 litros. No fundo de cada caixa, foram dispostos dois painéis interconectados com as medidas (L x C x A) 30,5 x 30,5 x 5 formando um leito. Para acúmulo da água de drenagem, foram utilizados três reservatórios de 50 litros, sendo um reservatório para cada caixa. O protótipo do sistema de desaguamento, o aparato experimental e os blocos drenantes utilizados, são apresentados nas Figuras 30, 31 e 32 respectivamente.

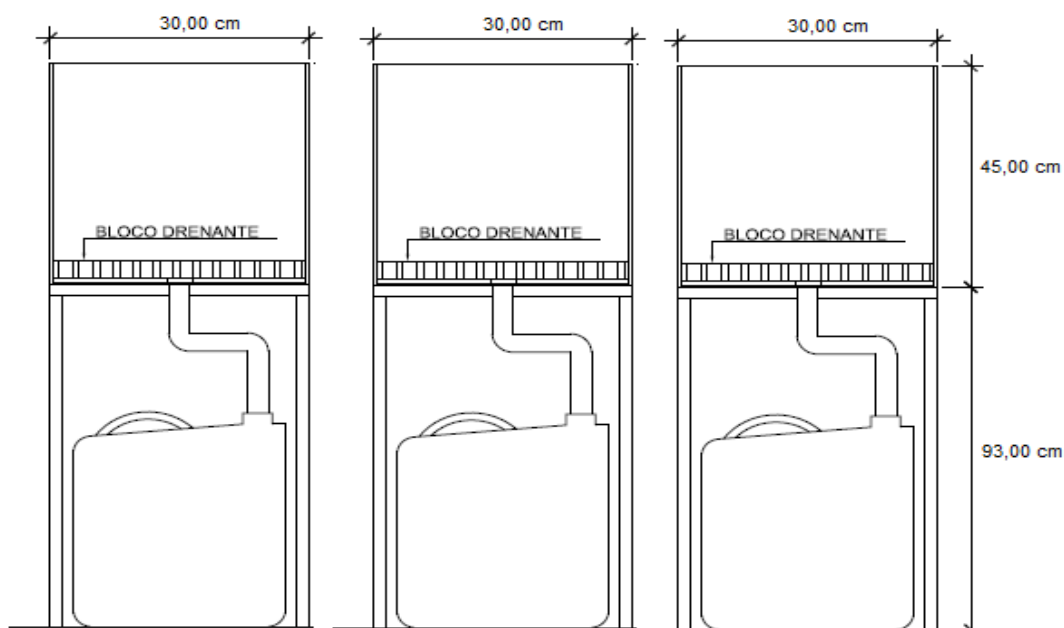


Figura 30 – Protótipo do sistema de desaguamento por blocos drenantes

Fonte: acervo do autor



Figura 31 – Aparato experimental do desaguento por blocos drenantes
Fonte: acervo do autor



Figura 32 – Desenho dos blocos drenantes
Fonte: Acervo do autor

4.6.5. Premissas do ensaio de desaguamento natural

A única variável de controle pré-definida foi o volume de lodo aplicado em cada leito, que é função da altura de lodo para cada ensaio de desaguamento.

Cada ensaio foi realizado em triplicata, com as seguintes datas de início e fim, além das alturas definidas para cada ensaio, tomando como base alturas menores do que as definidas por (SILVA, M.; SILVA, H.; MORUZZI, 2015).

- O 1º ensaio deu-se início em 15/03/2016 e término em 14/04/2016 (30 dias), sendo utilizado altura de 15 cm de lodo para cada leito;
- O 2º ensaio deu-se início em 16/04/2016 e término em 25/05/2016 (40 dias), sendo utilizado altura de 25 cm de lodo para cada leito;
- O 3º ensaio deu-se início em 26/05/2016 e término em 25/07/2016 (30 dias), sendo utilizado altura de 10 cm de lodo para cada leito.

As variáveis operacionais analisadas durante o período de desaguamento do lodo foram em partes as avaliadas por (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008; LOZER, 2012).

- Porcentagem de sólidos totais no lodo retido (%);
- Variação do volume de lodo ao longo do tempo;
- Volume drenado nas primeiras 24 horas;
- Temperatura ambiente (°C);
- Umidade relativa do ar (%)
- Tempo de secagem (dia);
- Análise das características físico químicas e bacteriológica da água drenada (Turbidez, pH, cor Aparente, Sólidos Totais, Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Suspensos Fixos, Sólidos Suspensos Voláteis, DQO (mg/L), Alumínio (mg/L), Zinco (mg/L), Chumbo (mg/L), Cádmio (mg/L), Níquel (mg/L), FerroTotal (mg/L), Manganês (mg/L), Cobre (mg/L), Cromo (mg/L), Nutrientes (N e P), Coliformes Totais (NMP/100mL), Escherichia coli (NMP/100mL);
- As análises do lodo seco, foram realizadas segundo a ABNT NBR 10.004, 10.005 e 10.006.

As análises relacionadas a água drenada foram realizadas apenas para um dos leitos em cada ensaio de desaguamento. Para análise do lodo após a secagem, foi juntada a massa de material seco dos três leitos, homogeneizado e encaminhado para caracterização. Foi necessário realizar o procedimento de juntar o material

dos leitos, pois a quantidade de lodo independente de cada leito não era o suficiente para execução da caracterização.

4.7. QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS E DIMENSIONAMENTO DO LEITO DE SECAGEM

4.7.1. Determinação da massa de sólidos secos, massa de lodo e volume de lodo

Através de modelos empíricos, em primeiro momento foi realizado a estimativa da geração de lodo utilizando dados referentes à qualidade da água bruta e aos produtos químicos adicionados no tratamento. Para o dimensionamento do sistema de leito de secagem por blocos drenantes foi realizado a estimativa da massa de sólidos secos utilizando todas as equações propostas na Tabela 15, conforme pode ser observado.

Tabela 15 – Determinação da massa de sólidos secos por volume de água tratada

Modelo	Equação
American Water Work Association - AWWA (1978)	$S = 3,5 \times 10^{-3} \times T^{0,66}$
Water Research Center - WCR (1979)	
Association Francaise Pour L' Etude Des Eaux – Afee (1982).	$S = \frac{K_1 T + 0,07C + K_2 D + A}{1000}$
CETESB	$S = \frac{K_1 T + K_2 2D}{1000}$
Kawamura (2000)	$S = K_1 T + K_2 D$
Cornwell (1987)	$S = K_1 T + K_2 D + A$
Richter (2001)	$S = \frac{0,2 C + K_1 T + K_2 D}{1000}$

Fonte: adaptado de Saron, (2001).

Legenda:

A: outros aditivos, tal como o polímero (mg/L)

S: Sólidos secos precipitados em Kg/m³

C: Cor da água bruta, °H

T: Turbidez da água bruta, UNT

D: Dosagem de coagulante, mg/L

K₁: Relação entre sólidos suspensos totais e turbidez, variando de 0,2 a 2,0 (valor usual: K₁=1,3)

K₂: coeficiente de relação estequiométrica na formação de precipitado de hidróxido.

Sendo:

Sulfato de alumínio: K₂ = 0,26

Cloreto Férrico: K₂ = 0,40

Sulfato Férrico: K₂ = 0,54

Segundo Ferreira Filho et al. (2009), para cada 1 mg de Al/L adicionado de PAC, obtém-se uma produção de lodo de aproximadamente 4,7498 mg de massa seca por litro. Logo, a constante utilizada nas fórmulas para estimar o lodo gerado na ETA utilizando como coagulante o Policloreto de Alumínio foi K₂ = 4,75.

Os dados de turbidez e cor da água bruta foram obtidos através dos dados de série histórica da ETA de Coqueiral. Foram utilizadas as médias das piores condições de qualidade de água bruta nos últimos 5 anos. Para determinação da massa de lodo e volume de lodo, foram utilizadas as equações propostas por Richter (2001) conforme apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Equações para determinação da massa de lodo e volume de lodo

Determinação	Equação
Massa de sólidos removida na flotação por unidade de tempo.	$M_S = \eta SQ$
Massa de lodo precipitada.	$M_L = \frac{M_S}{C}$
Densidade do lodo.	$\delta_L = \frac{1}{\frac{C}{\delta_S} + \frac{1-C}{\delta}}$
Volume de lodo produzido por unidade de tempo.	$V_L = \frac{C+(1-C)\frac{\delta_S}{\delta}}{\delta_S} \cdot M_L$ ou $V_L = \frac{M_L}{\delta_L}$

Fonte: Richter (2001)

Legenda:

M_s: Massa de sólidos por unidade de tempo removida na flotação, Kg/s;

η: Rendimento da unidade de processo;

Q: Vazão, m³/s.

M_L : Massa de Lodo, kg/s

C : Porcentagem de sólido seco no lodo, (foi adotado 3,14% sendo a média dos valores de Sólidos Totais determinado experimentalmente)

δ_L : Massa específica do lodo, kg/m³

δ_s : Massa específica do sólido, kg/m³

δ : Massa específica da água, kg/m³

Com os dados obtidos nos ensaios de desaguamento, foi estimado a massa de lodo, volume de lodo e massa de sólido seco produzido, a partir da média dos sólidos totais e massa específica do lodo dos três ensaios realizados, obtendo 0,0314 kg/m³, e 982 kg/m³ respectivamente. Admitiu-se ainda, a vazão de operação de 32 L/s e o tempo de duração da limpeza do flotor de 15 minutos, com frequência a cada 5 dias.

4.7.2. Dimensionamento da área do leito de secagem

4.7.2.1. Área do Leito de Secagem Convencional (ALSC) e por Blocos Drenantes (ALSBD)

Com os dados estimados da quantidade de lodo produzida na ETA de Coqueiral, através dos modelos propostos e condições operacionais do projeto de pesquisa, o dimensionamento do sistema de leito de secagem convencional e por blocos drenantes foi realizado a partir da equação proposta por Richter (2001), conforme destacado:

a) Determinação da área necessária:

$$A = \frac{V_L}{n \cdot H} \quad (\text{Equação 05})$$

A : Área total dos leitos de secagem, m²;

V_L : Volume anual de lodos gerados na estação, m³;

n : número de aplicações por ano;

H : Profundidade útil do leito, m;

4.8. ANÁLISE DE CUSTO DO PROJETO COM USO DE BLOCOS DRENANTES

Para análise dos custos envolvidos, foram utilizados os dados dos ensaios realizados na pesquisa que contemplam: a estimativa da geração de lodo na unidade de tratamento estudada, o teor de sólido médio observado nos ensaios, além do consumo de polímero no ensaio de desaguamento. Contemplou a análise de custos, os investimentos necessários para implantação de um leito de secagem por blocos drenantes coberto.

4.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados de secagem do lodo, referente ao parâmetro teor de sólidos totais foi tratado estatisticamente, com objetivo de avaliar a homogeneidade da variância, identificando o nível de significância na secagem entre os leitos I, II e III para todos os três ensaios realizados. Para análise estatística foi utilizado o software PAST versão 2.17c.

5. RESULTADOS

5.1. RESULTADO DAS ANÁLISES FÍSICO QUÍMICAS DO LODO DA ETA DE COQUEIRAL E DA LAGOA SANTUR

Os resultados obtidos do ensaio de lixiviação, solubilização e de massa bruta podem ser observados nas Tabelas 17, 18 e 19, demonstrando a caracterização do lodo da estação de coqueiral.

Tabela 17 – Resultado dos ensaios de Lixiviação segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Lixiviado

Parâmetros	Unidade	VMP	Resultado
Arsênio	mg/L	1	<0,005
Bário	mg/L	70	0,030 ± 0,00048
Cádmio	mg/L	0,5	<0,001
Chumbo	mg/L	1	<0,005
Cromo Total	mg/L	5	<0,025
Fluoreto	mg/L	150	0,455 ± 0,025
Mercúrio	mg/L	0,1	<0,005
Prata	mg/L	5	<0,005
Selênio	mg/L	1	<0,005
Aldrin + Dieldrin	µg/L	3	<0,00025
Clordano	µg/L	20	<0,00025
DDT	µg/L	200	<0,00025
2,4-D	µg/L	3000	<0,100
Endrin	µg/L	60	<0,00025
Heptacloro e seu Epóxido	µg/L	3	<0,00025
Lindano	µg/L	200	<0,00025
Metoxicloro	µg/L	2000	<0,00025
Pentaclorofenol	µg/L	900	<0,100
Toxafeno	µg/L	500	<0,0005
2,4,5-T	µg/L	200	<0,100
2,4,5-TP	µg/L	1000	<0,100
Benzeno	µg/L	500	<1,00
Benzo(a)pireno	µg/L	70	<0,010
Cloreto de vinila	µg/L	500	<0,500
Clorobenzeno	µg/L	100000	<1,00
Clorofórmio	µg/L	6000	<1,00
Cresol total	µg/L	200000	7,09 ± 0,61

o-Cresol	µg/L	200000	<0,100
m-Cresol	µg/L	200000	3,02 ± 0,087
p-Cresol	µg/L	200000	4,07 ± 0,13
1,4-Diclorobenzeno	µg/L	7500	<1,00
1,2-Dicloroetano	µg/L	1000	<1,00
1,1-Dicloroetileno	µg/L	3000	<1,00
2,4-Dinitrotolueno	µg/L	130	<0,100
Hexaclorobenzeno	µg/L	100	<0,00025
Hexaclorobutadieno	µg/L	500	<0,100
Hexacloroetano	µg/L	3000	<0,00025
Metiletilcetona	µg/L	200000	<30,0
Nitrobenzeno	µg/L	2000	<0,100
Piridina	µg/L	5000	<30,0
Tetracloroeto de Carbono	µg/L	200	<1,00
Tetracloroetileno	µg/L	4000	<1,00
Tricloroetileno	µg/L	7000	<1,00
2,4,5-Triclorofenol	µg/L	40000	<0,100
2,4,6-Triclorofenol	µg/L	20000	<0,100

Fonte: Relatório de Análises Controle Analítico

Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR-10.004 - ANEXO F (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados do estrato lixiviado, todos satisfazem os limites máximos permitidos.

Tabela 18 – Resultado dos ensaios de Solubilização do lodo bruto segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Solubilizado

Parâmetros	Unidade	VMP	Resultado
Alumínio	mg/L	0,2	0,190 ± 0,0033
Arsênio	mg/L	0,01	<0,005
Bário	mg/L	0,7	0,033 ± 0,00053
Cádmio	mg/L	0,005	<0,001
Chumbo	mg/L	0,01	<0,005
Cianeto	mg/L	0,07	<0,050
Cloretos	mg/L	250	<5,00
Cobre	mg/L	2	<0,005
Cromo Total	mg/L	0,05	<0,025
Ferro	mg/L	0,3	20,5 ± 0,23
Fluoreto	mg/L	1,5	<0,100
Manganês	mg/L	0,1	0,768 ± 0,0066
Mercúrio	mg/L	0,001	<0,0001
Nitratos (exp.em N)	mg/L	10	<1,00

Prata	mg/L	0,05	<0,005
Selênio	mg/L	0,01	<0,005
Sódio	mg/L	200	0,727 ± 0,011
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250	<10,00
Surfactantes	mg/L	0,5	<0,100
Zinco	mg/L	5	<0,025
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,413 ± 0,0099
Aldrin + Dieldrin	µg/L	0,03	<0,00025
Clordano	µg/L	0,2	<0,00025
2,4-D	µg/L	30	<0,100
DDT	µg/L	2	<0,00025
Endrin	µg/L	0,6	<0,00025
Lindano	µg/L	2	<0,00025
Metoxicloro	µg/L	20	<0,00025
Toxafeno	µg/L	5	<0,0005
Heptacloro e seu Epóxido	µg/L	0,03	<0,00025
Hexaclorobenzeno	µg/L	1	<0,00025
2,4,5-T	µg/L	2	<0,100
2,4,5-TP	µg/L	30	<0,100

Fonte: Relatório de Análises Controle Analítico

Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR-10.004 - ANEXO G (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados do extrato solubilizado, Ferro, Manganês e Fenol ultrapassaram o limite máximo permitido.

Tabela 19 – Resultado do ensaio de massa bruta do lodo bruto

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cor da amostra	-	Marrom
Cianeto	mg/kg	<1,00
pH(solução 1:1)	UpH	6,71 ± 0,02
Sulfeto	mg/kg	<1,00
Óleos e Graxas	%	2,47 ± 0,16
Fenol	mg/kg	18,1 ± 0,43
Inflamabilidade	- -	Ausente

Fonte: Relatório de Análises Controle Analítico

Avaliando os resultados obtidos e comprando com os Valores Máximos Permitidos pela NBR-10.004 (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados

da Massa Bruta, nenhum parâmetro ultrapassou o limite máximo permitido. Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo sólido é classificada como Classe II A - Não Inerte, fato que viabiliza a destinação do resíduo.

No que se refere o lançamento do efluente in natura, foi identificado que os parâmetros que regulamentam o lançamento do lodo estavam acima do limite aceitável pela a Resolução CONAMA 430/2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, conforme apontado na Tabela 20.

Tabela 20 – Características do lodo bruto, segundo a Resolução CONAMA 430/2011.

PARÂMETRO	UNIDADE	METODOLOGIA DE REFERÊNCIA	VMP	RESULTADO
Alumínio total	mg/L	EPA 200.7	0,1	< 0,01
Chumbo total	mg/L	EPA 200.7	0,01	< 0,004
Cobre total	mg/L	EPA 200.7	0,009	< 0,002
Coliformes totais	NMP/100mL	SM9221	1000	1,6x10 ⁴
Cor aparente	uH	SM2120B	75	900
Cromo total	mg/L	EPA 200.7	0,05	< 0,01
DQO	mg/L	SM5220D	-	359,2
Escherichia coli	NMP/100mL	SM9221	-	2,4x10 ³
Ferro total	mg/L	EPA 200.7	-	0,1438
Fósforo total	mg/L	EPA 200.7	-	0,0306
Manganês total	mg/L	EPA 200.7	1,0	0,298
Níquel total	mg/L	EPA 200.7	0,025	< 0,01
Nitrogênio total	mg/L	ME FQ 050	-	54,65
SSF	mg/L	SM2540E/G	-	14,00
SST	mg/L	SM2540E/G	-	3 x10 ⁴
SSV	mg/L	SM2540E/G	-	16,00
ST	mg/L	SM2540E/G	-	2,78 x10 ⁴
Zinco total	mg/L	EPA 200.7	0,18	< 0,02
pH	-	SM4500 H+	6 – 9	8,41
Cádmio total	mg/L	EPA 200.7	0,001	< 0,0006

Fonte: Relatório de Análises Controle Analítico

A partir do monitoramento do efluente, o lançamento desses lodos *in natura* em corpos de água doce classes II, com as características ora apresentadas, podem gerar impactos negativos ao corpo receptor, especialmente em relação aos parâmetros biológicos, demonstrando a necessidade de tratamento antes do descarte no corpo hídrico.

A verificação da qualidade da água da lagoa após lançamento do efluente na lagoa Santur foi realizada através do monitoramento físico químico da água 100 metros a montante do ponto de lançamento do efluente proveniente das descargas dos flotores e lavagem de filtros, 100 metros a jusante do ponto de captação e o último ponto exatamente no ponto de lançamento do efluente, todos os pontos a 0,20 metros de profundidade. Os resultados são apresentados na Tabela 21 e comparados com os limites para enquadramento do corpo receptor classe II, conforme CONAMA 357/2005.

Tabela 21 – Qualidade da água da lagoa Santur

Parâmetros	Unidade	Conama 357/2005	Jusante	Ponto de lançamento	Montante
Sólidos Totais	%	-	0,0086	0,0076	0,0066
pH	pH	6 a 9	6,97	6,94	6,66
Cor Real	mg/L Pt/Co	75	5,38	<5,00	<5,00
DQO	mg/L	-	<10,0	<10,0	<10,0
Sólidos Totais	mg/L	-	86,0	76,0	66,0
Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	-	<30,0	<30,0	<30,0
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	500	38,0	37,0	37,0
Alumínio Total	mg/L	0,1	<0,025	0,076	<0,025
Zinco Total	mg/L	0,18	<0,025	<0,025	<0,025
Chumbo Total	mg/L	0,01	<0,005	<0,005	<0,005
Cádmio Total	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Níquel Total	mg/L	0,025	<0,005	<0,005	<0,005
Ferro Dissolvido	mg/L	0,3	0,438	0,432	0,416
Manganês Total	mg/L	0,1	<0,025	<0,025	<0,025
Cobre Total	mg/L	0,0002	<0,005	<0,005	<0,005
Cromo Total	mg/L	0,05	<0,025	<0,025	<0,025
Coliformes Totais	NMP/100mL	200	33,0 ± 0,29 log	79,0 ± 0,29 log	46,0 ± 0,29 log
Escherichia coli	NMP/100mL	-	<1,1	<1,1	<1,1
Fósforo Total	mg/L	0,02	<0,005	<0,005	<0,005
Nitrogênio Total	mg/L	3,7	<2,00	<2,00	<2,00

Fonte: Relatório de Análises Controle Analítico

Observa-se que os valores da Tabela 21 não apresentaram desconformidade tendo como referência a Resolução Conama 357/2005, para águas superficiais classe II, com exceção do parâmetro ferro total, que apresentou valor acima do máximo permitido, porém este não é influenciado pelo lançamento do efluente, tendo em

vista que o mesmo se mostrou acima do VMP em todos os pontos monitorados. A partir da análise sobre a influência do lançamento do lodo, é possível inferir que devido ao ambiente lântico da lagoa, não ocorre arraste de lodo para o ponto de captação não alterando as propriedades da água bruta que é captada. Como o ponto de lançamento do efluente é localizado em uma “zona morta”, ou seja, de pouca influência da velocidade que promove arraste, o material lançado tende a depositar no fundo da lagoa, não alterando as características da água a jusante do lançamento, inibindo desta forma riscos imediatos quanto à possibilidade de alteração da qualidade da água superficial. Entretanto Reis et al. (2007) já identificaram que a longo prazo o lançamento in natura de resíduos de ETA pode impactar o meio ambiente em função das concentrações de alumínio. Na Tabela 22 é apresentado o comportamento do alumínio no ponto de captação da ETA de Coqueiral.

Tabela 22 – Monitoramento de alumínio no ponto de captação

Período	Unidade	Conama 357/2005	Resultado
Ago/13	mg/L	0,1	0,023
Mai/14	mg/L	0,1	0,023
Jun/15	mg/L	0,1	<0,025
Dez/15	mg/L	0,1	<0,025
Abr/16	mg/L	0,1	<0,02

Fonte: Dados fornecidos pelo SAAE de Aracruz.

Conforme pode ser observado, embora exista um lançamento de efluente a montante do ponto de captação da estação de tratamento de água, o parâmetro alumínio ainda não influencia a qualidade da água bruta captada pela ETA. Embora a descarga dos efluente no ponto de captação não altere a qualidade da água captada, medidas mitigadoras precisam ser aplicadas dentre elas destacam-se à utilização de sistemas desaguadores e consequente destinação do lodo em aterro sanitário, a fabricação de tijolos e a descarga em redes coletoras de esgotos (TSUTIYA, 2001). Porém, esta última deve ser evitada, pois algumas desvantagens podem ser observadas, sendo elas: o aumento da geração de lodo nos decantadores primários das ETE e uma possível inibição do processo biológico

devido às altas concentrações de sólidos dissolvidos provenientes do lodo das ETA's. (TSUTIYA, 2001; SCALIZE, 2003; LIBÂNIO, 2010).

5.2. ENSAIO DE RESISTENCIA ESPECÍFICA

No Quadro 1 é apresentado os valores obtidos com o ensaio de resistência específica para cada um dos polímeros estudados.

Quadro 1 – Valores obtidos no ensaio de resistência específica

Polímero	Dosagem [mg/L]	Coefficiente (b)	Massa (g)	Concentração g/cm ³	Resistência Específica (m/kg)
Sem Polímero	0	1,8032	0,3343	0,013372	1,705E+12
AN 910	10	7,1445	0,3561	0,014244	6,343E+12
	20	7,333	0,3114	0,012456	7,445E+12
	30	1,285	0,3771	0,015084	1,077E+12
	40	2,36	0,3425	0,0137	2,179E+12
	50	2,12	0,3368	0,013472	1,99E+12
	60	1,6268	0,3223	0,012892	1,596E+12
FA 920	10	6,163	0,4801	0,019204	4,059E+12
	20	5,967	0,3935	0,01574	4,794E+12
	30	9,3685	0,3526	0,014104	8,4E+12
	40	9,2687	0,4089	0,016356	7,167E+12
	50	4,6501	0,3679	0,014716	3,996E+12
	60	5,724	0,3351	0,013404	5,401E+12
AN 923	10	10,2	0,3415	0,01366	9,443E+12
	20	3,5517	0,3787	0,015148	2,965E+12
	30	0,9422	0,2973	0,011892	1,002E+12
	40	1,0221	0,2744	0,010976	1,178E+12
	50	1,8088	0,4236	0,016944	1,35E+12
	60	0,6183	0,343	0,01372	5,699E+11
FO 4115	10	0,1807	0,342	0,01368	1,67E+11
	20	0,1392	0,2744	0,010976	1,604E+11
	30	0,1878	0,2598	0,010392	2,285E+11
	40	0,7006	0,3378	0,013512	6,557E+11
	50	0,1616	0,3163	0,012652	1,615E+11
	60	0,1605	0,3266	0,013064	1,554E+11
FO 4140	10	4,3095	0,3812	0,015248	3,574E+12
	20	3,859	0,3012	0,012048	4,051E+12
	30	0,046	0,3151	0,012604	4,62E+10
	40	0,6695	0,3623	0,014492	5,842E+11
	50	0,1698	0,2957	0,011828	1,816E+11

Polímero	Dosagem [mg/L]	Coefficiente (b)	Massa (g)	Concentração g/cm ³	Resistência Específica (m/kg)
	60	0,0889	0,3186	0,012744	8,82E+10
FO 4190	10	7,1914	0,4393	0,017572	5,18E+12
	20	3,604	0,2182	0,008728	5,22E+12
	30	0,0639	0,4388	0,017552	4,60E+10
	40	0,0326	0,2211	0,008844	4,66E+10
	50	0,0363	0,2671	0,010684	4,30E+10
	60	0,0472	0,3594	0,014376	4,15E+10
FO 4290	10	15,914	0,3763	0,015052	1,337E+13
	20	3,5065	0,2625	0,0105	4,223E+12
	30	0,0248	0,287	0,01148	2,732E+10
	40	0,058	0,2999	0,011996	6,115E+10
	50	0,0165	0,4033	0,016132	1,294E+10
	60	0,0202	0,3242	0,012968	1,97E+10
FO 4440	10	2,8699	0,4142	0,016568	2,191E+12
	20	0,0341	0,4719	0,018876	2,285E+10
	30	0,029	0,2809	0,011236	3,264E+10
	40	0,0345	0,3321	0,013284	3,284E+10
	50	0,0921	0,3805	0,01522	7,653E+10
	60	0,1287	0,4049	0,016196	1,005E+11
FO 4700	10	1,1317	0,3905	0,01562	9,163E+11
	20	0,5624	0,5603	0,022412	3,174E+11
	30	0,0115	0,4014	0,016056	9,058E+09
	40	0,0083	0,4481	0,017924	5,856E+09
	50	0,0884	0,6124	0,024496	4,564E+10
	60	0,0956	0,3464	0,013856	8,726E+10

>Teor de sólidos totais 2,1.10⁴ mg/L

No Apêndice I, são apresentados os gráficos de condicionamento químico para cada polímero avaliado no ensaio de resistência específica, através da relação $t/V \times V$ para determinação da variável (b) que compõem o cálculo de resistência específica. Nos Gráficos 1 e 2 são apresentadas as médias dos resultados de resistência específica nas duas faixas de dosagem de polímeros que variaram de 10 a 30 mg/L e de 40 a 60 mg/L respectivamente. É possível identificar a diferença de comportamento dos polímeros aniônicos, não iônicos e catiônicos com ênfase nos catiônicos que apresentaram significativa eficiência em relação aos demais.

Gráfico 1 – Comparação dos resultados de resistência específica na dosagem média de 10 a 30 mg/L

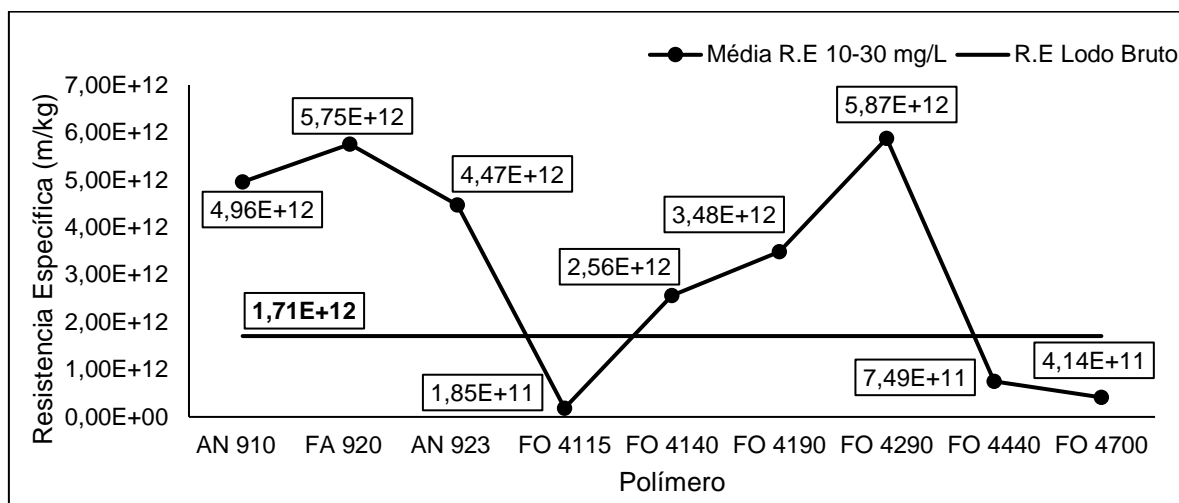
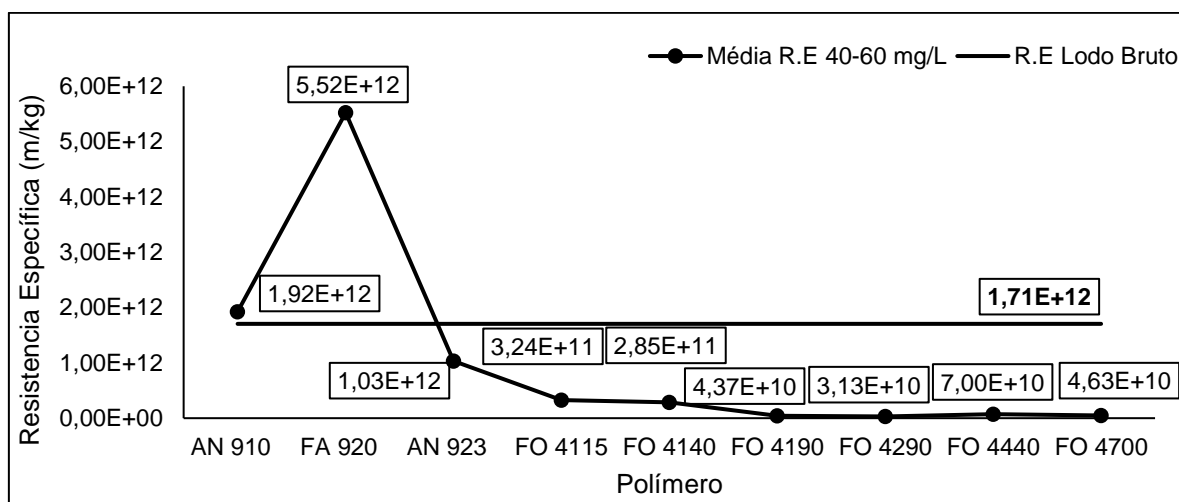


Gráfico 2 – Comparação dos resultados de resistência específica na dosagem média de 40 a 60 mg/L



O ensaio de resistência específica, apontou que os polímeros aniônicos e não iônico tiveram um efeito negativo, apresentando uma resistência maior do que a amostra sem polímero na maioria dos pontos, com valores de resistências superiores a 1×10^{12} m/kg. Segundo Silveira (2012) lodos com resistência específica menor que 1×10^{12} m/kg apresentam mais facilidade para desaguamento e a partir de 1×10^{12} m/kg demonstram grande resistência a filtração.

Barkey e Stuckey (1999) destacam que de acordo com o valor da resistência específica, os lodos podem desaguar mal quando a resistência específica for ($>$

10^{12} m/kg), desaguar em uma condição média 5×10^{11} - 9×10^{11} m/kg e apresentar um bom desaguamento quando a resistência específica for menor que 4×10^{11} m/kg. Os polímeros catiônicos, de maneira geral, tiveram um melhor aproveitamento na faixa de 30 a 60 mg/L, especialmente os de carga superior. Nesta faixa de dosagem, pode-se inferir que a conversão da água no lodo é maior do que a energia impulsionada no sistema, através da adição de polímero, observou-se visivelmente o aumento do volume de água livre da amostra. Isto resulta em uma redução das forças de ligações e conseqüente a determinação do range onde se determina a melhor dosagem do polímero.

Segundo Turovskiy e Mathai (2006) o teste de resistência específica é um dos melhores ensaios para comparar o condicionamento químico para diversos tipos de lodos, utilizando diversos polímeros em diferentes dosagens. Os autores destacam que em um estudo desenvolvido na Rússia, foi identificado que para um mesmo tipo de lodo (químico), proveniente de diferentes estações de tratamento de água, o desaguamento apresentou diferenças significativas nos resultados de resistência específica em cada uma delas, e que normalmente o lodo bruto apresenta maior resistência específica a filtração.

Segundo Zhang et al. (2014) após realizarem o condicionamento do lodo, os resultados de resistência específica foram reduzidos de $1,8 \times 10^{12}$ para $2,08 \times 10^{11}$ e $3,98 \times 10^{11}$ m/kg utilizando policloreto de alumínio na concentração de 10% Al_2O_3 e outro coagulante HPAC, produzido a base de PAC em condições especialmente controladas (TANG, 2006).

Em estudo desenvolvido por Murugesan et al. (2016), em uma estação de tratamento de esgoto em Hong Kong, identificaram que a resistência específica do lodo do sistema era $8,62 \times 10^{12}$ m/kg sendo difícil desaguar sem um condicionamento adequado, então foi realizado o condicionamento do lodo com *Acidithiobacillus ferrooxidans* (AF) na presença e ausência de Fe^{2+} como um substrato energético, e os valores diminuíram para $5,25 \times 10^{11}$ m/kg e $6,74 \times 10^{11}$ m/kg nos tratamentos com e sem substrato energético. No mesmo sistema de tratamento de esgoto de Hong Kong, Kurade (2016), utilizou o polímero FO 4290 SH da SNF para condicionar lodo com elevado teor de sólidos ($2,4 \pm 0,056\%$), e resistência específica de $(3,29 \times 10^{13} \pm 5,26 \times 10^{12})$ sendo classificado como um lodo difícil de desaguar. Após o desaguamento em ensaio de resistência específica

foram obtidos valores na ordem de 1×10^{13} m/kg demonstrando que o autor não obteve sucesso, já que os valores de resistência específica eram altos. O autor ainda utilizou outro polímero produzido a base de *Acidithiobacillus ferrooxidans* mas também não alcançou sucesso, obtendo valores de resistência específica na ordem de 1×10^{12} m/kg. Desta forma, quanto maior o valor resistência específica a filtração pior é a eficiência no desaguamento de lodo, independente se o lodo é biológico ou químico.

Dominiak et al. (2011) identificou que a resistência específica do lodo bruto tende a permanecer constante quando variado a concentração de sólidos suspensos. A afirmação tende a esclarecer que se o lodo não tiver tendência a desaguar ele não vai ter boa eficiência no desaguamento para qualquer concentração de sólidos, demonstrando que o desaguamento do lodo está ligado diretamente com as características e tipo de lodo, devendo nestes casos ser estudado variados tipos e classes de polímeros. Embora os ensaio de resistência específica tenham sido executado apenas na concentração de $2,1 \cdot 10^4$ mg/L de sólidos totais, foi possível comprovar que o lodo do estudo apresenta capacidade de desaguamento.

5.3. RESULTADOS DO TESTE DE INVERSÃO

Os resultados apontaram que os polímeros, com exceção do FO 4190 SH e FO 4290 SH não apresentaram boa eficiência nos procedimentos de floculação e resistência a floculação com dosagem de polímero abaixo de 30 mg/L. Esta eficiência trata da capacidade de formação do floco, e separação sólido líquido, avaliada de maneira sensitiva.

A explicação para melhor eficiência dos polímeros FO 4190 SH e FO 4290 SH pode ser explicado devido a diferença da densidade de carga, e da variação do peso molecular entre os polímeros. Segundo o manual da SNF FLOERGER WATER SOLUBLE POLYMERS, (2007) no desaguamento natural é indicado o uso de polímeros com peso molecular na ordem de 10^4 a 10^6 para se obter boa drenagem, estando na mesma ordem de grandeza dos polímeros utilizados na pesquisa.

A melhor eficiência dos polímeros catiônicos se deve a neutralização das cargas negativas sobre os flocos do lodo que reduz a força de repulsão entre duas partículas de lodo, promovendo melhor agregação das partículas do lodo para

formar maiores focos, resultando em maior liberação de água ligada (LI e YANG, 2009).

A aplicação do teste de inversão, foi importante para comprovar os resultados quantitativos do ensaio de resistência específica, que apontaram como os melhores polímeros para desaguar o lodo estudado, os polímeros catiônicos FO 4190 SH e FO 4290 SH. No Quadro 2 são apresentadas as avaliações do teste de Inversão.

Quadro 2 – Valores Obtidos no teste de inversão

Polímero	Dosagem [mg/L]	Floculação	Resistência	Aparência
FO 4115	10	9	2	+
	20	8	3	+
	30	4	4	++
	40	4	5	++
	50	3	6	+++
	60	3	8	+++
FO 4140	10	3	3	+
	20	3	7	++
	30	4	7	++
	40	6	8	+++
	50	5	10	+++
	60	5	8	+++
FO 4190	10	4	8	++
	20	5	13	+++
	30	5	14	+++
	40	5	14	+++
	50	4	14	++++
	60	4	15	+++
FO 4290	10	4	14	++
	20	4	18	+++
	30	5	18	+++
	40	3	17	++++
	50	3	17	+++
	60	3	17	+++
FO 4440	10	5	3	+
	20	4	4	++
	30	5	6	++
	40	4	6	++
	50	4	4	++
	60	4	4	++
FO 4700	10	4	3	+
	20	5	9	+

Polímero	Dosagem [mg/L]	Floculação	Resistência	Aparência
	30	4	10	++
	40	5	6	+++
	50	5	8	+++
	60	5	8	++

>Teor de sólidos totais $2,1 \cdot 10^4$ mg.L⁻¹.

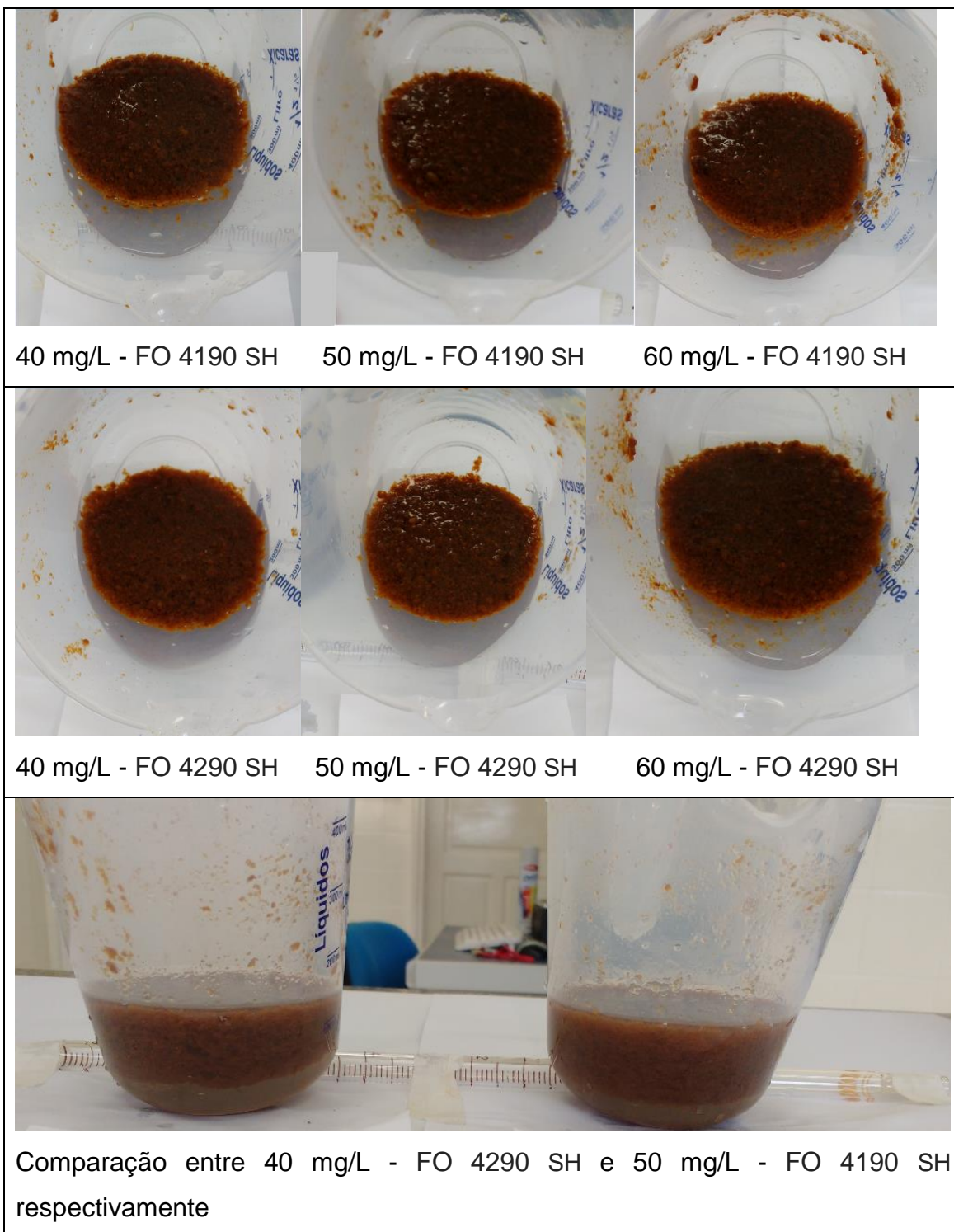
Após verificado que os polímeros FO 4190 e FO 4290 nas dosagens de 50 e 40 mg/L respectivamente tiveram comportamento semelhante, foi realizado novo ensaio nas referidas dosagens para identificar a melhor condição conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores Obtidos no teste de Inversão

Polímero	Dosagem (mg/L)	Floculação	Resistência	Aparência
4290	40	3	17	++++
4190	50	3	14	+++

>Teor de sólidos totais $2,1 \cdot 10^4$ mg.L⁻¹; F – número de inversões para se obter floculação; R – número de inversões para identificar a resistência do floco; A – Aparência identificada.

A análise demonstrou que o polímero FO 4290 SH foi o que apresentou melhor ensaio de resistência específica com dosagem entre 40 e 60 mg/L. Já no teste de inversão a melhor dosagem foi de 40 mg/L do polímero FO 4290 SH, corroborando com ensaio de resistência específica. O teste de inversão para o polímero FO 4290 SH apresentou excelente floculação, maior resistência ao cisalhamento, o floco tornou-se mais denso, grande e consistente, excelente para separação da água, características estas que poderão proporcionar bons resultados no desaguamento do lodo, conseqüente melhor eficiência na separação sólido – líquido. Nas demais dosagens testadas para os polímeros FO 4115 SH, FO 4140 SH, FO 4190 SH, FO 4440 SH e FO 4700 SH também apresentaram bons resultados, entretanto, os flocos formados eram menos consistentes ou havia arraste de sólidos para o clarificado. Na Figura 33 é apresentado a representação do teste de inversão para os dois melhores polímeros identificados.

Figura 33 – Resultados do teste de Inversão

5.4. RESULTADOS DO ENSAIO DE DESAGUAMENTO

Neste tópico do trabalho serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de desaguamento de lodo para cada taxa de lodo aplicado no leito de secagem com piso de blocos drenantes e suas respectivas variações de altura, volume de água drenada e teor de sólidos totais obtidos.

5.4.1. Caracterização da amostra de lodo e determinação da taxa aplicada

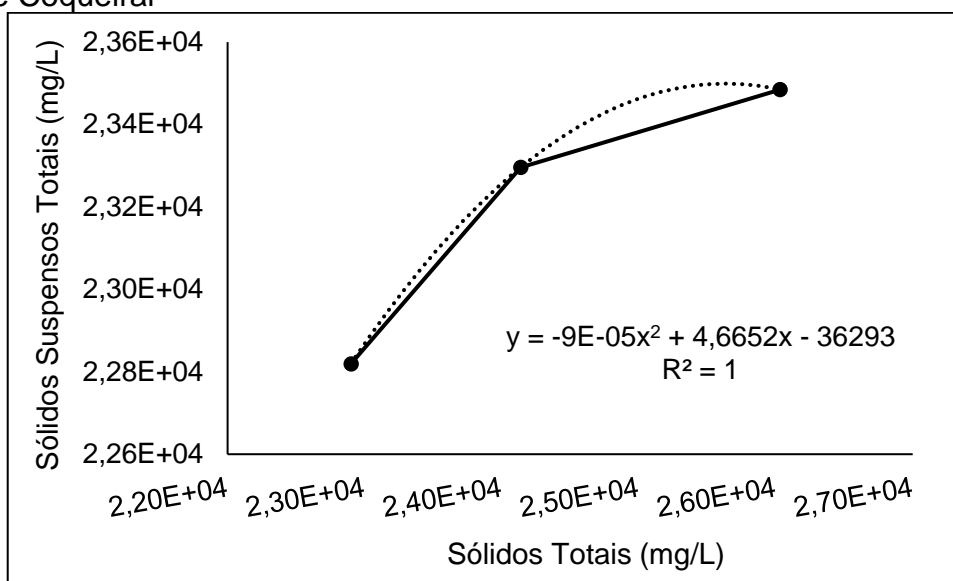
Para realização dos ensaios de desaguamento, foram coletadas amostras do lodo da Estação de Tratamento de Água, preservada por não mais que 10 horas para evitar qualquer tipo de digestão. Encaminhado para o laboratório de análises foi realizado os procedimentos para determinação de sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais do lodo. Preparado os polímeros, foi realizado os ensaios de desaguamento. Para cada ensaio de desaguamento foi preparada solução do polímero e utilizada até 2 horas após produzida para evitar qualquer tipo de perda de estabilidade do polímero. A dosagem determinada do polímero FO 4290 foi de 2,0 mg pol./g ST (40 mg/L). Adotou-se na pesquisa a quantificação de sólidos totais, uma vez que foi realizado a quantificação de sólidos suspensos totais e este não apresentou diferença significativa dos sólidos totais a um nível de 5% de significância, através da análise de variância, utilizando software PAST. Na Tabela 23 é apresentado os resultados da análise de sólidos referente ao lodo estudado.

Tabela 23 – Avaliação dos sólidos no lodo

Amostra	Sólidos Totais (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
1	$2,29 \cdot 10^4$	$2,28 \cdot 10^4$	$8,08 \cdot 10^1$
2	$2,41 \cdot 10^4$	$2,33 \cdot 10^4$	$8,44 \cdot 10^2$
3	$2,60 \cdot 10^4$	$2,35 \cdot 10^4$	$2,55 \cdot 10^3$
Média	$2,44 \cdot 10^4$	$2,32 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^3$

No Gráfico 3 é apresentado a relação entre os sólidos totais e sólidos suspensos totais, podendo assim serem correlacionados através da equação polinomial destacada.

Gráfico 3 – Relação entre sólidos totais e sólidos suspensos totais para o lodo da ETA de Coqueiral



Com o melhor polímero e dosagem determinada, foi identificado a quantidade de polímero a ser utilizado para cada taxa de aplicação em função da concentração de sólidos totais na amostra do lodo estudada para cada ensaio. Na Tabela 24 são apresentadas as condições utilizadas nos ensaios de desaguamento.

Tabela 24 – Condições de desaguamento do lodo

Variáveis	Taxa de Aplicação (kgST/m ²)	Volume de Polímero (L)*	Altura de Lodo (cm)	ST (mg/L)
1º Ensaio	4,30	0,760	15	2,87.10 ⁴
2º Ensaio	7,68	1,360	25	3,07.10 ⁴
3º Ensaio	3,50	1,860	10	3,50.10 ⁴

*Solução 0,2%, volume gasto para cada leito

Adotou-se variar a taxa de aplicação, visto que se trata de um parâmetro que pode ser utilizado para determinar a área de leitos de drenagem empiricamente, em substituição à espessura da camada de lodo, é a taxa de aplicação superficial de sólidos em kgSS/m².ciclo.

Com base nos dados apresentados, as taxas de aplicação utilizadas nos ensaios estão próximas as taxas recomendadas pelos fabricantes de blocos drenantes, que

compreende o range de 5-12 KgSS/m². Adotou-se realizar testes com taxas de aplicação menores do que as recomendadas, exclusivamente para avaliar as eficiências de acordo com as condições reais do lodo gerado na estação de tratamento de água.

Kamamura (2000) destaca que a taxa de aplicação por área em lagoas de secagem varia de 40 kgSS/m² em regiões úmidas, e 80 kgSS/m² para regiões áridas. O autor destaca ainda que lodo proveniente de sais de alumínio ou ferro quando adicionado 2 a 3 mg/L de polímero catiônico pode produzir lodo contendo de 3 a 5% de SST a uma taxa de aplicação (base peso seco) de 49 kg/m².dia.

Silva, M.; Silva, H., e Moruzzi (2015) realizaram aplicação de lodo aeróbio a taxa de aplicação de 3,5 kgSS/m² e 7,0 kgSS/m² em leitos de blocos drenantes obtendo resultado superior a 90% no teor de sólidos totais em 30 dias de secagem.

Santos et al. (2014) realizaram estudo de desagamento de lodo em leitos de drenagem, composto por manta geotêxtil e também aplicaram taxas distintas de sólidos totais, sendo 1,75 kg/m², 3,5 kg/m² e 7,0 kg/m², com intuito de identificar as melhores condições de dosagens.

Lopes et al. (2005) fizeram aplicação de carga de sólidos na ordem de 0,4 a 0,6 kgSS/m² em leito de secagem convencional coberto e descobertos com 30 e 60 cm de altura de lodo situada na região metropolitana do Belém em uma unidade de tratamento de água (ETA do Bolonha) e após 21 dias de secagem o experimento obteve teor de sólidos entre 17,1 e 28,3 %.

Na Figura 34 é apresentado a identificação dos pontos de amostragem de lodo nos leitos de secagem para avaliação do teor de sólidos e na Figura 35 é apresentado o amostrador de lodo utilizado.



Figura 34 – Identificação dos pontos de amostragem de lodo



Figura 35 – Amostrador de lodo

5.4.2. Drenagem de água livre

Nos Gráficos 4, 5 e 6 são apresentados o comportamento da drenagem da água livre no 1º, 2º e 3º ensaios.

Gráfico 4 – Variação do volume drenado para o 1º ensaio

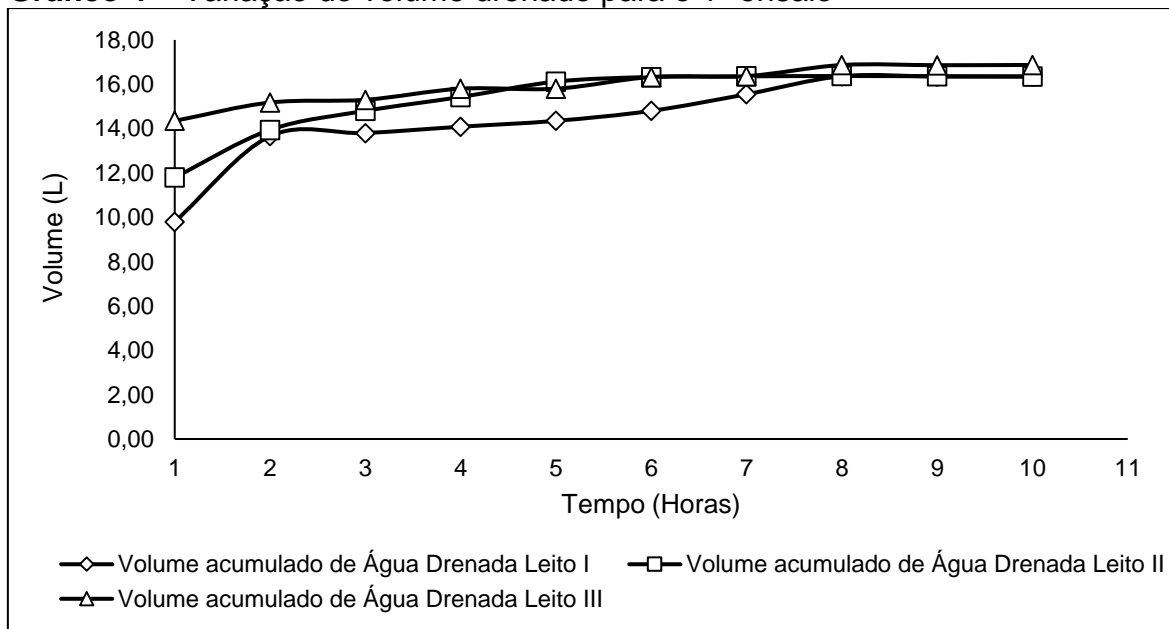
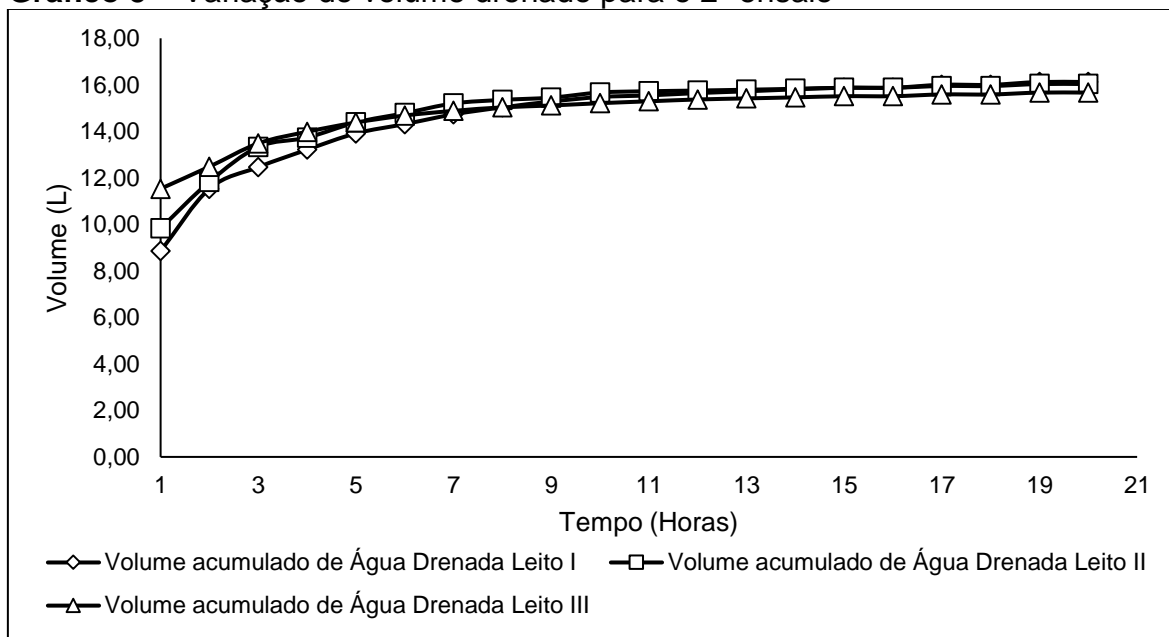
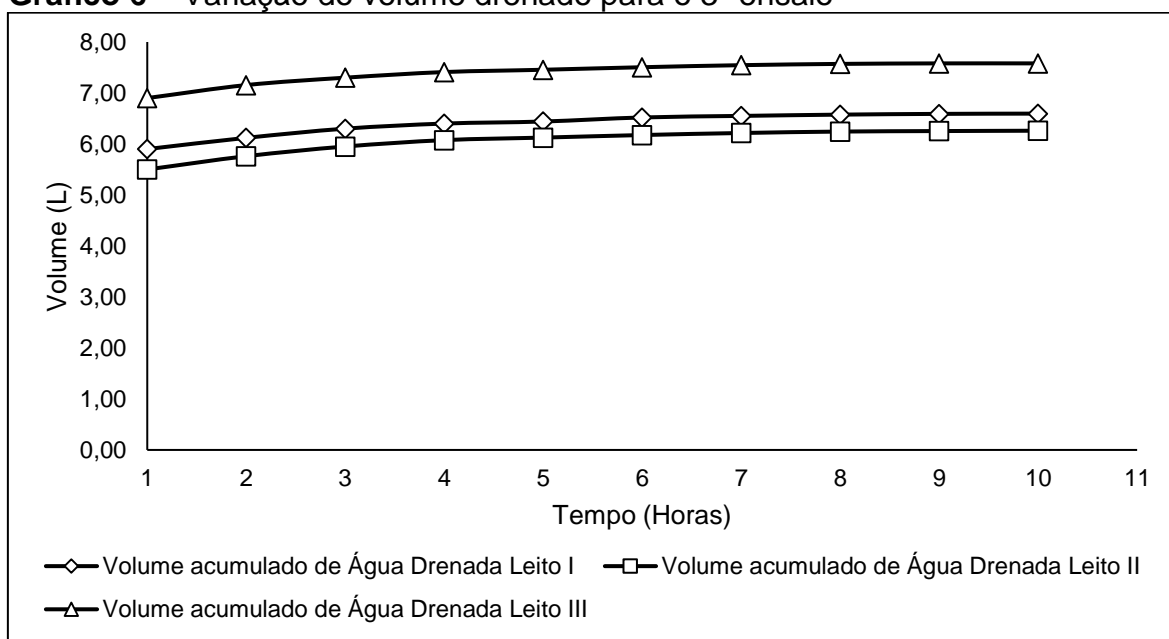


Gráfico 5 – Variação do volume drenado para o 2º ensaio**Gráfico 6 – Variação do volume drenado para o 3º ensaio**

Conforme indicado no 1º ensaio, os três leitões drenaram praticamente o mesmo volume de água durante as primeiras 10 horas de drenagem. A partir deste período foi verificado que os leitões não drenaram água livre, dando início à secagem por evaporação. Os leitões I, II e III drenaram ao término da primeira hora 35%, 42% e 51% do volume de lodo respectivamente, ao término das 10 horas de drenagem 58% para os leitões I e II e 60% para o leito III. Esta redução se processa em termos

de volume de água drenada pelo volume de lodo inicial (28 litros) a concentração de 2,87% de sólidos totais.

Já no 2º ensaio foi verificado um período maior para que toda água livre fosse drenada. Segundo van Haandel e Marais (1999) a água livre presente nos lodos compõe cerca de 70% e pode ser separada dos sólidos apenas pela força gravitacional. Foi evidenciado que os leitos I, II e III drenaram ao término da primeira hora 19%, 21% e 25% do volume de lodo respectivamente, ao término das 20 horas de drenagem, foi identificado que o volume de drenado correspondeu a 35% para os leitos I e II e 34% para o leito III. Esta redução se processa em termos de volume de água drenada pelo volume de lodo inicial (47 litros) a concentração de 3,08% de sólidos totais. No segundo ensaio foi identificado que o período de drenagem durou em torno 20 horas, onde foi comprovado que não ocorreu mais variação do volume drenado, momento em que a drenagem para de influir e a evaporação passa a ser o fenômeno dominante.

No 3º ensaio foi verificado que os leitos I, II e III drenaram ao término da primeira hora 32%, 30% e 38% do volume de lodo respectivamente, ao término das 10 horas de drenagem, foi identificado que o volume de drenado correspondeu a 36%, 35% e 42% respectivamente para os leitos I, II e III. Esta redução se processa em termos de volume de água drenada pelo volume de lodo inicial (19 litros) a concentração de 3,50% de sólidos totais. No 3º ensaio foi identificado que o período de drenagem durou em torno 10 horas. Esta fase de drenagem foi semelhante ao 1º ensaio, mas não melhor, visto que a eficiência de drenagem do 1º ensaio foi superior. O motivo da eficiência do 1º ensaio ser superior ao 3º ensaio, mesmo apresentando uma taxa de aplicação menor, pode estar relacionada com a carga de sólidos aplicada, com as variáveis climáticas e até mesmo com condicionamento químico que é realizado antes de desaguar o lodo.

Grover (1979) destaca que o ciclo normal de remoção de água para o sistema de drenagem natural varia de 24 a 72 horas, dependendo do tipo de lodo, das condições da planta e da concentração desejada de sólidos totais. Após este período de drenagem poderá ocorrer um desaguamento adicional devido à evaporação, no entanto, a taxa de evaporação poderá variar dependendo das condições climáticas e se as unidades de secagem estão ao ar livre ou cobertas. A evaporação é uma das variáveis mais importantes no desaguamento do lodo por

gravidade, sendo esta influenciada pelo aspecto do desenho básico da drenagem do leito. Em leitos de secagem convencionais, não somente a evaporação deve ocorrer a partir da água ligada ao lodo, mas os fenômenos de ação capilar da areia com a água elevando assim o tempo de secagem. No caso dos leitos de secagem modificados por blocos drenantes, como existe a presença de um pavimento falso, este fenômeno não é encontrado e a água evapora apenas a partir do lodo.

Em um estudo desenvolvido por Achon, Barroso e Cordeiro (2007) através da drenagem de lodo na concentração de 2,6% proveniente de ETA com uso de policloreto de alumínio, realizaram estudo em leito de secagem por manta geotêxtil e identificaram que o volume drenado na primeira hora foi aproximadamente 18 L, ou seja 36% do volume de lodo do início dos experimentos.

Stefanakis e Tsihrintzis (2012) identificaram que os processos de perda de água dependem principalmente do volume de lodo aplicado a ser desaguado. Parâmetros meteorológicos, tais como a temperatura, o nível de precipitação e a radiação solar, afetam o processo de evaporação e secagem do lodo.

5.4.3. Análise da altura da camada de lodo

Nos Gráficos de 7 a 12 são apresentados o comportamento da altura de lodo nas primeiras 24 horas, e até o momento que não foi possível avaliar a altura do lodo nos ensaios devido à quebra do lodo e a sua fragmentação em grânulos.

Gráfico 7 – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 1º ensaio

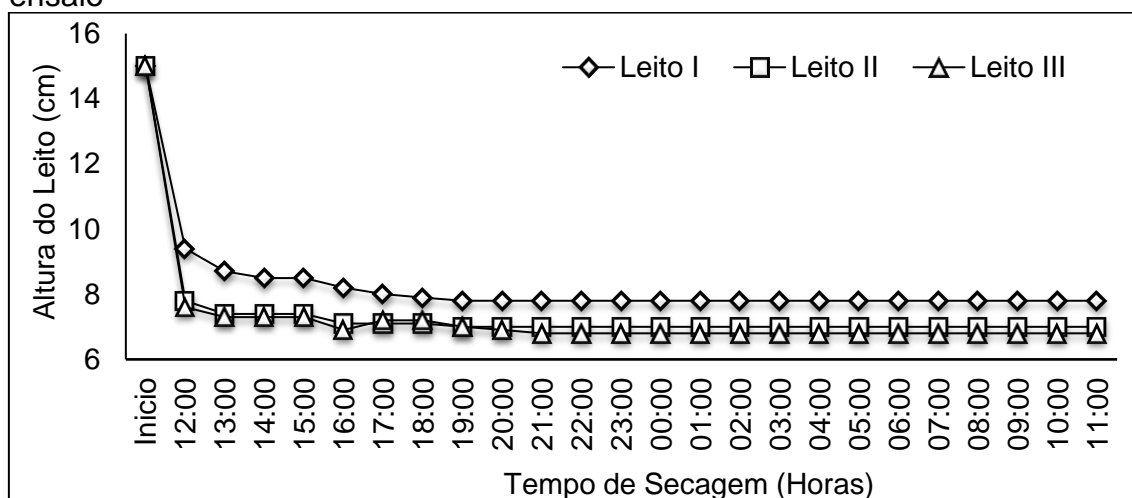


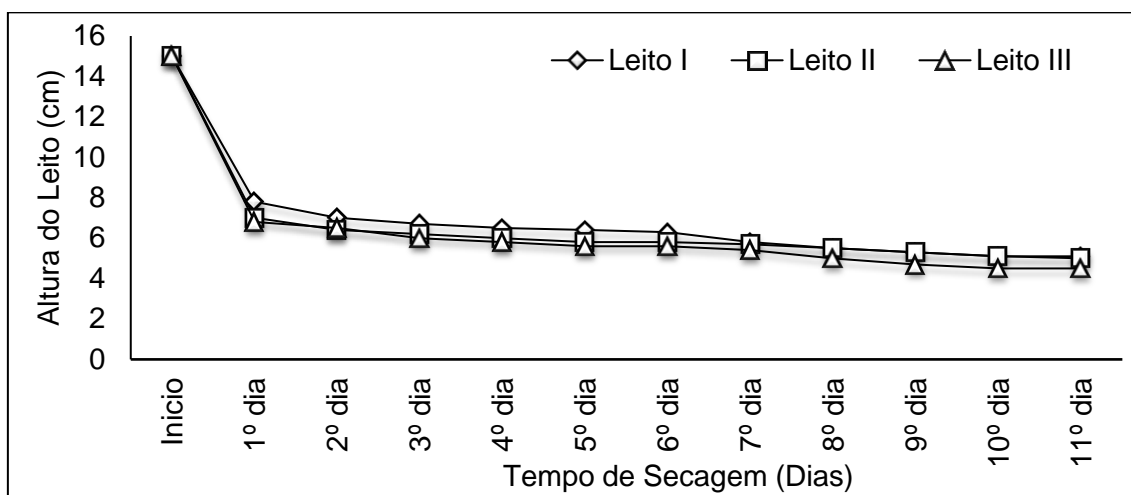
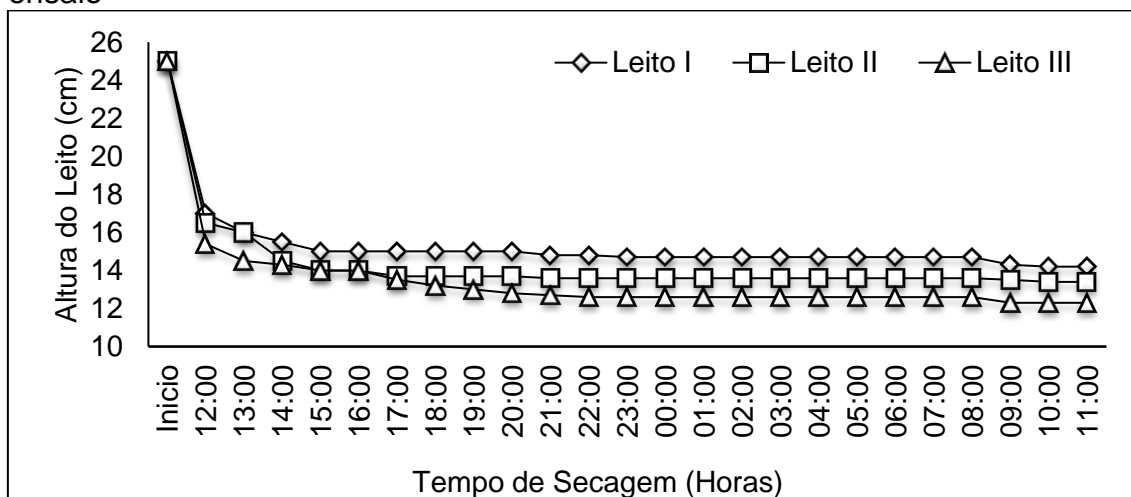
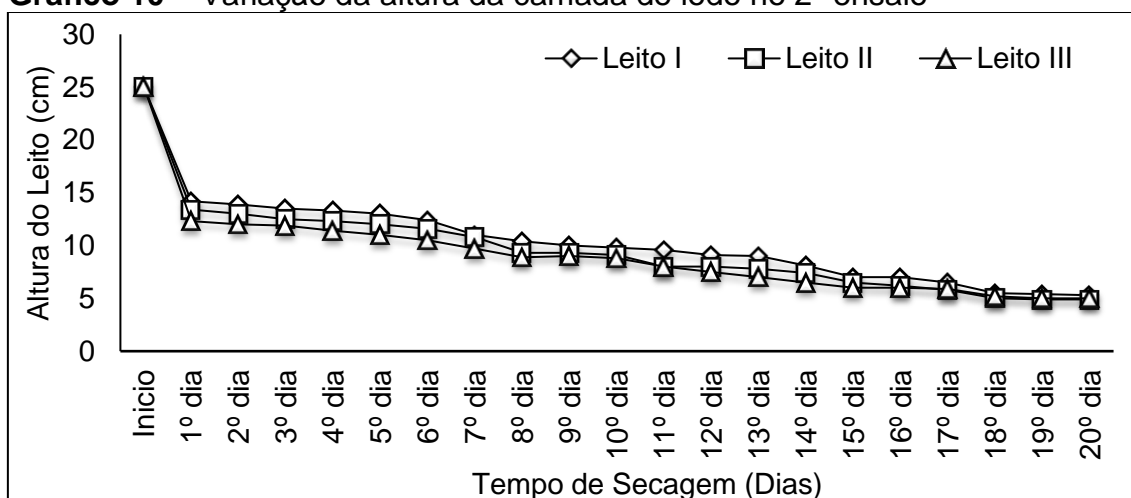
Gráfico 8 – Variação da altura da camada de lodo no 1º ensaio**Gráfico 9** – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 2º ensaio**Gráfico 10** – Variação da altura da camada de lodo no 2º ensaio

Gráfico 11 – Variação da altura da camada de lodo nas primeiras 24 horas do 3º ensaio

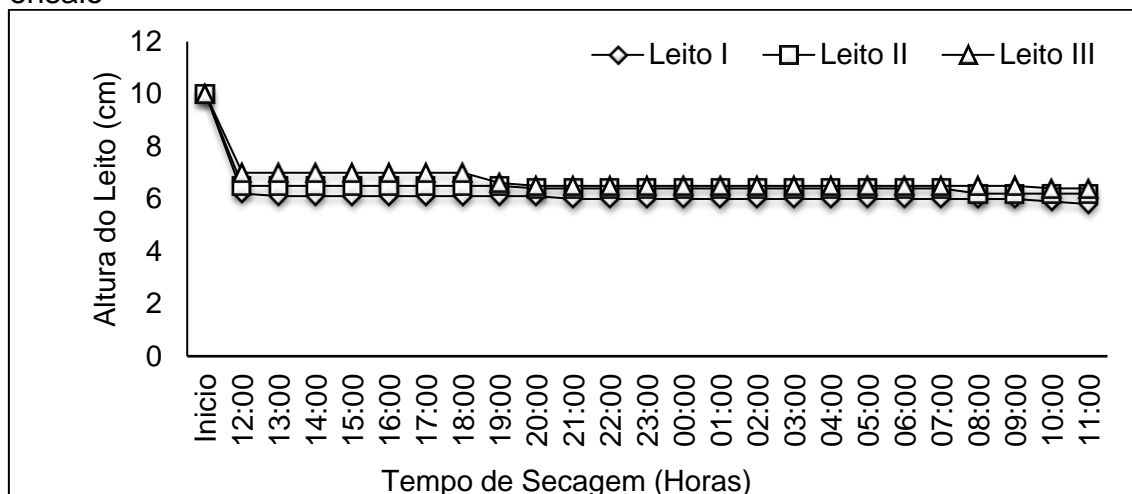
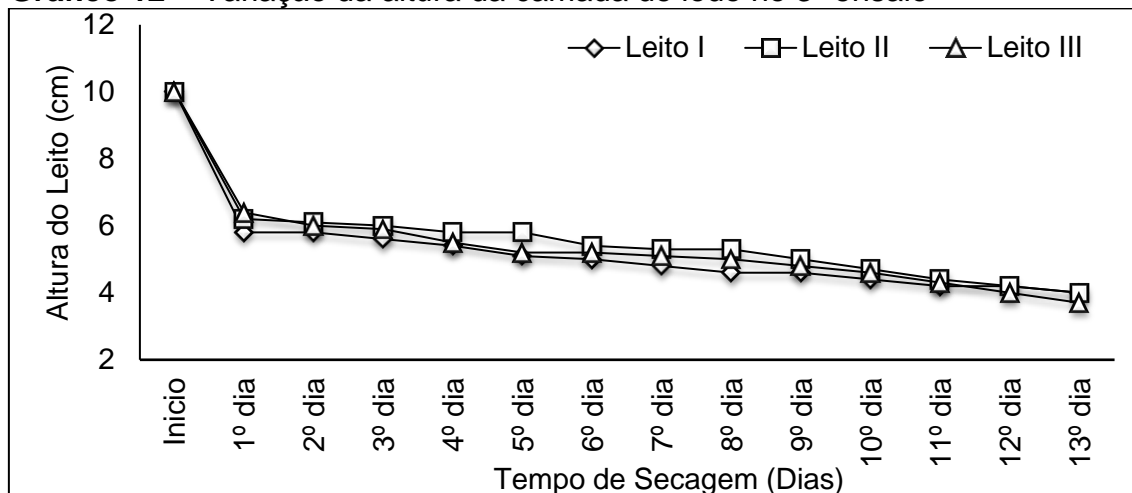


Gráfico 12 – Variação da altura da camada de lodo no 3º ensaio



Conforme pode ser observado, a redução da altura do lodo no 1º ensaio na primeira hora com a drenagem da água livre foi de 37%, 48% e 49% respectivamente para os leitos I, II e III. Após o 11º dia de secagem a altura do lodo foi reduzida em 66%, 67% e 70% para os leitos I, II e III.

Avaliando o 2º ensaio o processo de secagem ocorreu mais lentamente, porém pode ser observado a redução da altura do lodo de maneira expressiva, sendo que na primeira hora com a drenagem da água livre a redução da altura foi de 56%, 53% e 49%. Após o 20º dia de secagem a altura foi reduzida em 78% para o leito I e 80% para o leito II e III. Foi observado em específico no 2º ensaio, o surgimento de duas camadas distintas no leito de secagem, uma camada inferior úmida (com

umidade praticamente constante e próxima a 85%) e uma camada superior seca, que exposta à influência direta da radiação solar, apresentou teor de sólidos totais superior as camadas mais inferiores. Desta forma, a camada de lodo em contato direto com a atmosfera tende a funcionar como uma barreira que impede a penetração da radiação solar e conseqüentemente a redução das taxas de evaporação na camada do lodo inferior. Estas considerações foram expressivas no 2º ensaio, podendo ser atribuído à altura de lodo, taxa de aplicação, sólidos totais iniciais e as variáveis climáticas (temperatura média do ar e umidade relativa do ar) que foram diferentes para cada ensaio realizado. Aspecto semelhante foi observado por SOARES, MATOS e BERNADES (2001) através de estudos com lodo de reatores UASB, secos em leito de secagem modificado com camada de geotêxtil, e manta geotêxtil, identificaram dois teores de umidade distintos em um leito de secagem, 55% na camada seca superficial e 76% na camada úmida inferior, no fim da primeira semana de secagem, mas com o aparecimento das gretas verificou que a eficiência no processo de secagem melhorou até uma eficiência máxima de 90% no teor de sólidos totais a uma taxa de aplicação de 8,1kgSS/m² durante 15 dias de secagem, sem nenhum dado de precipitação observado.

O processo de secagem do 3º ensaio de desaguamento foi semelhante ao 1º ensaio. A redução da altura do lodo na primeira hora foi de 42%, 38% e 36% respectivamente para os leitos I, II e III. Após o 13º dia de secagem a altura do lodo foi reduzida em 60% para os leitos I e II, e 63% para o leito III.

Silva, M.; Silva, H., e Moruzzi (2015) avaliaram o desaguamento de lodo aeróbio em blocos drenantes a taxa de aplicação de 3,5 e 7 kgSS/m² e identificaram que a altura do lodo após 19 dias de secagem reduziu na ordem de 40 a 67%. A maior redução de altura foi para o experimento a maior taxa de aplicação, fato explicado devido às camadas terem maior concentração de água, pois quanto maior a umidade de lodo, maior ocorre a taxa de evaporação.

5.4.4. Análise do teor de sólidos secos

Nas Tabelas 25, 26 e 27 são apresentados os teores de sólidos para o 1º, 2º e 3º ensaio de desaguamento do lodo, e no Gráfico 12 o comportamento médio do teor de sólidos nos ensaios de desaguamento.

Tabela 25 – Teor de Sólido Totais do 1º ensaio

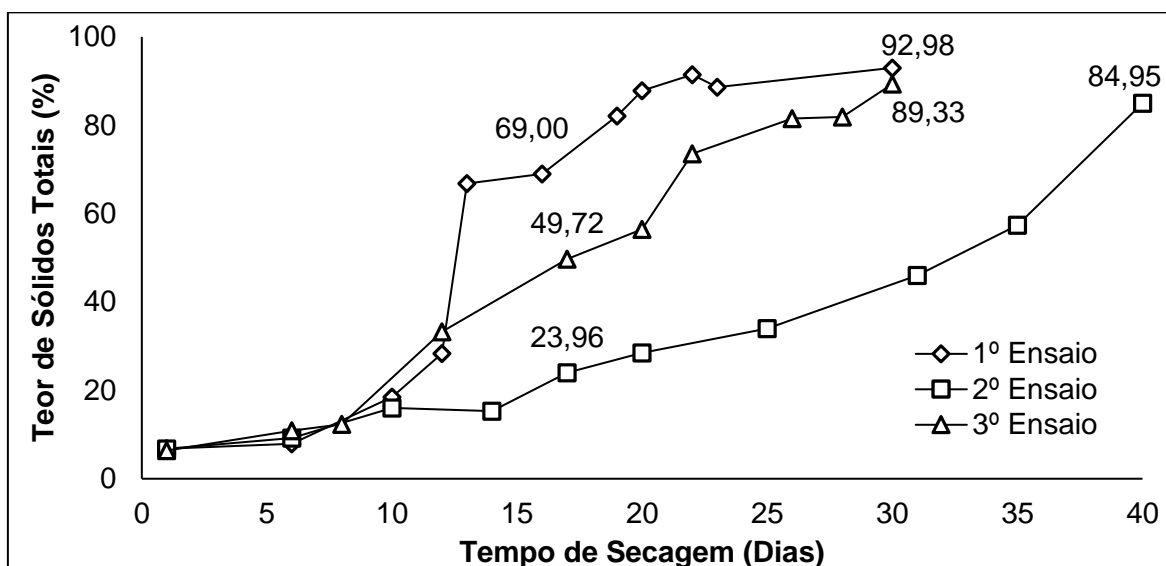
Dias de Secagem	Data	Leito I	Leito II	Leito III	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
1	15-mar	6,81	6,77	6,82	6,80	0,03	0,02
6	21-mar	8,29	7,69	7,70	7,89	0,34	0,20
10	25-mar	17,91	18,24	19,40	18,52	0,78	0,45
12	27-mar	37,27	24,98	22,83	28,36	7,79	4,50
13	28-mar	67,44	64,81	68,24	66,83	1,79	1,04
16	31-mar	65,36	71,31	70,33	69,00	3,19	1,84
19	3-abr	82,40	81,40	82,39	82,06	0,58	0,33
20	4-abr	90,11	86,89	86,51	87,84	1,98	1,14
22	6-abr	93,28	89,62	91,49	91,46	1,83	1,06
23	7-abr	90,22	87,63	88,01	88,62	1,40	0,81
30	14-abr	93,34	93,84	91,75	92,98	1,09	0,63

Tabela 26 – Teor de Sólido Totais do 2º ensaio

Dias de Secagem	Data	Leito I	Leito II	Leito III	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
1	16-abr	6,94	6,18	7,21	6,78	0,54	0,31
6	21-abr	8,48	9,45	9,75	9,23	0,66	0,38
10	25-abr	13,34	12,29	22,38	16,00	5,55	3,21
14	29-abr	16,65	16,60	12,67	15,31	2,28	1,32
17	2-mai	19,81	23,27	28,81	23,96	4,54	2,62
20	5-mai	27,64	29,24	28,58	28,48	0,80	0,46
25	10-mai	35,56	36,59	29,79	33,98	3,66	2,12
31	16-mai	54,66	31,45	51,86	45,99	12,67	7,31
35	20-mai	54,66	58,69	58,75	57,36	2,35	1,35
40	25-mai	80,02	86,88	87,96	84,95	4,30	2,49

Tabela 27 – Teor de Sólido Totais do 3º ensaio

Dias de Secagem	Data	Leito I	Leito II	Leito III	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão
1	26-mai	5,90	6,68	6,56	6,38	0,42	0,24
6	31-mai	10,35	9,22	13,17	10,91	2,03	1,17
8	2-jun	12,70	12,63	11,58	12,30	0,63	0,36
12	6-jun	36,98	31,70	31,22	33,30	3,19	1,84
17	11-jun	50,26	47,47	51,43	49,72	2,03	1,17
20	14-jun	52,80	55,69	60,76	56,41	4,03	2,33
22	16-jun	78,37	73,10	69,20	73,56	4,60	2,66
26	20-jun	82,20	78,08	84,19	81,49	3,11	1,80
28	22-jun	82,65	81,05	81,93	81,88	0,80	0,46
30	25-jun	89,70	89,64	88,65	89,33	0,59	0,34

Gráfico 13 – Média do teor de sólidos do lodo nos ensaios

Na Tabela 28 é apresentado os dados de precipitação durante a realização dos ensaios e na Tabela 29 são apresentados os dados de temperatura e umidade relativa do ar.

Tabela 28 – Dados de precipitação durante os ensaios

Ensaio	Período	Precipitação (mm)
1º	15/03/2016 – 14/04/2016	48,07
2º	16/04/2016 – 25/05/2016	29,77
3º	26/05/2016 – 25/06/2016	10,26

Fonte: Incaper

Tabela 29 – Temperatura e umidade durante os ensaios

TS	TM 1º Ensaio	UM 1º Ensaio	TM 2º Ensaio	UM 2º Ensaio	TM 3º Ensaio	UM 3º Ensaio
0	29,43	61,33	29,00	69,00	25,00	79,00
1	28,67	71,00	25,00	76,33	20,67	78,33
2	30,00	53,67	27,00	72,33	22,00	79,33
3	31,67	62,00	27,00	74,00	21,33	78,67
4	29,67	64,67	26,67	68,67	21,67	78,67
5	31,40	61,00	28,67	65,67	24,00	65,67
6	29,27	66,67	26,67	72,33	27,00	68,67
7	31,73	68,00	27,03	64,67	28,00	62,00
8	31,53	75,33	26,67	64,00	25,67	69,33
9	29,43	63,33	26,00	73,33	25,67	70,00
10	29,33	68,67	29,00	68,33	25,00	66,00
11	30,60	67,67	27,33	69,67	24,00	70,33
12	29,87	68,67	29,33	65,33	28,00	67,00

TS	TM 1º Ensaio	UM 1º Ensaio	TM 2º Ensaio	UM 2º Ensaio	TM 3º Ensaio	UM 3º Ensaio
13	28,33	61,33	24,67	76,67	27,67	67,67
14	28,33	66,67	22,67	78,67	22,00	74,00
15	27,67	70,67	24,33	69,33	20,33	79,67
16	30,67	72,33	22,33	77,33	22,00	69,33
17	27,33	72,33	25,00	69,00	21,00	82,00
18	28,33	62,67	22,67	80,67	21,67	73,33
19	28,53	67,00	23,33	77,00	21,33	77,33
20	29,33	60,67	24,67	71,00	21,33	76,67
21	29,67	61,00	24,33	78,67	21,00	72,00
22	28,33	66,33	25,00	71,00	23,33	66,00
23	26,33	77,33	27,33	69,33	22,67	72,67
24	27,67	79,00	27,67	70,00	23,00	69,67
25	29,00	68,67	26,00	68,33	23,00	66,67
26	28,00	70,67	28,67	73,00	21,33	81,33
27	28,00	68,00	26,00	71,67	24,00	69,33
28	29,33	75,33	27,00	73,33	20,67	75,00
29	25,67	80,67	22,67	71,33	23,00	64,00
30	27,67	64,33	24,00	72,67	22,33	66,00
31	28,67	67,67	24,67	68,33		
32			22,33	76,67		
33			24,00	76,33		
34			24,67	74,00		
35			23,67	77,33		
36			22,67	78,67		
37			25,00	71,00		
38			25,00	68,67		
39			23,33	77,00		
40			22,67	74,33		
Média	29,05	67,65	25,41	72,29	23,22	72,12

TS: Tempo de Secagem (dias), TM: Temperatura Média (°C), UM: Umidade Média (%)

A análise do 1º ensaio mostra que com 16 dias de secagem o lodo apresentou teor de sólidos totais próximo a 70% e em 30 dias aproximadamente 93%. A secagem do 2º ensaio não apresentou comportamento semelhante ao 1º ensaio. Com 17 dias de secagem o teor de sólidos totais atingiu aproximadamente 24% e com 40 dias atingiu 85%, inferior as eficiências obtidas com o 1º ensaio. O 3º ensaio apresentou com 17 dias de secagem 49% teor de sólidos totais e com 30 dias 89%. As principais razões da pequena diferença do 1º e 3º ensaios são referentes as temperaturas médias e umidade relativa do ar terem proporcionado melhores condições para o 1º ensaio, além da taxa de aplicação ser diferenciada.

Oerke e Fabisiak (2001) em um estudo desenvolvido na Estação de Tratamento de água de reuso da Williams em Monaco identificou que, com o uso de leitos de secagem modificados com blocos drenantes a capacidade de carga aumentou de três a quatro vezes em comparação com leitos de secagem convencionais, e que após realizado o desaguamento do lodo foram obtidas concentrações de sólidos totais na ordem de 45% durante um período de 5 a 10 dias de secagem.

Oliveira (2010) buscou identificar o teor de sólidos totais através da secagem em leito de secagem convencional (meio granular), leito de secagem alternativo composto por geotêxtil bidim e leitos de secagem alternativos composto de geotecido, obtendo resultados após 30 dias de secagem de até 40% para leitos de secagem convencionais, 17 à 27% para os leitos alternativos com bidim e 5 à 7% ST para leitos alternativos com geotecido. Embora tenha verificado predominância de baixas temperaturas, altos índices de umidade e grande volume de precipitação durante os ensaios, os resultados foram satisfatórios no que trata a qualidade do volume drenado e o potencial de clarificação.

Silveira et al. (2015) realizou a secagem de lodo de decantadores com teores de sólidos na ordem de 1,5% utilizando leitos de secagem composto por manta geotêxtil e obteve eficiências na ordem de 75% com aproximadamente 13 dias de secagem sob condições naturais, a temperatura de 30°C e umidade relativa de 80%.

Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) destacam que o teor de SST pode ser maior que 50% com o uso de polímeros, mesmo em leitos de secagem não cobertos. Quando o leito de secagem é coberto facilmente são obtidas teor de SST no lodo seco de 20 a 30% durante um período de 10 dias.

Achon, Barroso e Cordeiro (2008) realizaram o desaguamento do lodo da descarga de decantadores de duas ETAs, sendo uma com uso de sulfato de alumínio e a outra com policloreto de alumínio. Realizado o desaguamento em leito de secagem modificado com manta superficial de 600 g/m² identificaram que até 7 dias de secagem foi obtido lodo desaguado com 30% e 28% de SST e com 21 dias de secagem foram obtidos lodos com 80 e 88% de SST com uso de sulfato de alumínio e policloreto de alumínio respectivamente.

Em relação ao desvio padrão apresentado nas Tabelas 26, 27 e 28 pode-se perceber que ocorreu pouca variação dos teores de sólidos avaliados em relação

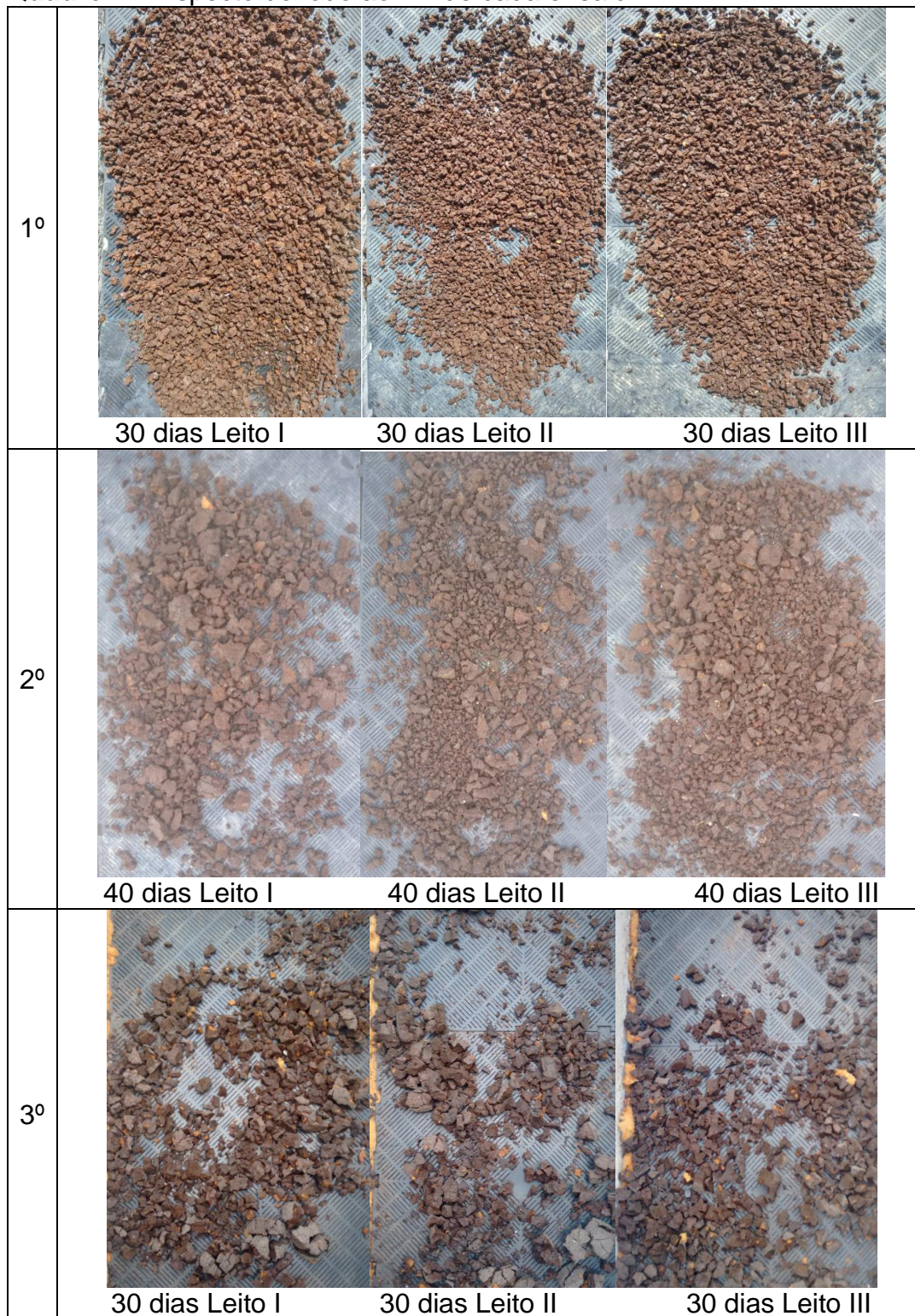
à média. Quanto ao erro padrão pode-se identificar que a variabilidade entre amostras foi pequena, indicando que os resultados tendem a ser significativos. No item 5.4.6 é apresentado a análise de variância para indicar o nível de significância do experimento.

Quanto as medições dos dados de precipitação, estes foram realizados através do monitoramento realizado pelo INCAPER referentes ao banco de dados agrometeorológico de uma estação localizada na sede de Aracruz nas coordenadas Longitude: -40,276 e Latitude: -19,82.

Os ensaios apresentaram condições climáticas e taxa de aplicação diferenciadas, fato que demonstra a diferença no comportamento da secagem.

Como pode ser observado, o motivo da eficiência do 2º ensaio ser menor e o tempo de secagem maior, pode ser atribuída a média da temperatura durante a realização do ensaio ser menor, a média da umidade relativa foi maior e o índice de precipitação superior ao 1º ensaio.

Segundo Bennamoun, (2012) de maneira geral, o aumento, da temperatura e índices de precipitação baixos podem conduzir ao aumento da velocidade de secagem. A operação de secagem, depende das condições climáticas e quando as alturas de lodo são altas o tempo de secagem pode ser relativamente longo dificultando o número de aplicações no leito de secagem. De maneira geral, o surgimento gretas durante a secagem do lodo promoveu um incremento da evaporação, sendo estas, possivelmente responsáveis pela rapidez e pelo completo desenvolvimento do processo de secagem. No Quadro 4 é apresentado o aspecto do lodo ao fim de cada ensaio realizado.

Quadro 4 – Aspecto do lodo ao fim de cada ensaio

Nota: No Apêndice 02 são apresentadas imagens do lodo durante a fase de secagem.

5.4.5. Caracterização da amostra de água drenada

Para cada ensaio de desaguamento foi realizado a caracterização da amostra de água drenada apenas do leito II. Na Tabela 30 é apresentado a caracterização das amostras de água drenada dos ensaios de desaguamento.

Tabela 30 – Caracterização das amostras de água drenada

PARÂMETRO	UNIDADE	RESULTADO 1º ENSAIO	RESULTADO 2º ENSAIO	RESULTADO 3º ENSAIO
Alumínio total	mg/L	12,01	10,45	10,67
Chumbo total	mg/L	< 0,004	< 0,004	< 0,004
Cobre total	mg/L	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Coliformes totais	NMP/100mL	3,3x10 ³	2,4x10 ⁴	1,6x10 ³
Cor aparente	uH	20,1	1508	253,5
Cromo total	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
DQO	mg/L	621,5	971,2	342,6
Escherichia Coli	NMP/100mL	2,3x10 ³	3,3x10 ³	2,3x10 ²
Ferro total	mg/L	0,41	12,07	0,18
Fósforo total	mg/L	1,02	2,71	0,06
Manganês total	mg/L	0,61	0,62	0,29
Níquel total	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nitrogênio total	mg/L	15,087	17,04	56,03
SSF	mg/L	32,00	200,00	16,00
SST	mg/L	122,00	80,00	44,00
SSV	mg/L	90,00	60,00	28,00
ST	mg/L	728,00	552,00	268,00
Zinco total	mg/L	< 0,02	0,04	< 0,02
pH	-	6,80	6,47	6,41
Turbidez	UNT	46,40	64,60	5,10
Cádmio total	mg/L	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006

Fonte: Relatório de Análises Ecosystem

Os valores detectados de Escherichia Coli apresentaram-se acima dos padrões de lançamento exigidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (Resolução 430/2011), determinando risco á agua liberada no sistema de desaguamento, conferindo a presença de organismos patogênicos que determinam a contaminação do volume desaguado.

No que se refere aos metais encontrados, o alumínio apresentou os maiores valores, devido ao uso do Policloreto de alumínio como coagulante no tratamento da água. Foi identificado também a presença de Ferro, Manganês e Zinco. Sendo os dois primeiros, acima dos padrões de lançamento.

Barroso e Cordeiro (2001) destacam que o alumínio nos resíduos do processo de tratamento de água, podem apresentar efeitos nas técnicas de tratamento, na disposição final do resíduo ou até mesmo quando é realizado a recuperação dos resíduos. No lodo estudado, o volume drenado apresentou valores expressivos no teor de alumínio, indicando assim um potencial a recuperação de coagulante.

Outra possibilidade apontada por Uggetti et al. (2009) é a recirculação do volume drenado para ETA, sendo a alternativa uma possível solução, embora a concentração de alguns parâmetros seja superior aos valores encontrados na caracterização do lodo, em específico no extrato lixiviado, estas circunstâncias não constituem um problema especial, porque a vazão de recirculação na ETA, gira em torno de 1/6 da vazão de água na entrada da ETA. Além disso, quando o tratamento apresenta bom desempenho para remoção de sólidos e matéria orgânica, a alternativa se torna ainda mais eficiente.

Em relação ao lodo seco, foi realizado o ensaio de lixiviação, solubilização e de massa bruta conforme apresentado nas Tabelas 31, 32 e 33.

Tabela 31 – Resultado dos ensaios de Lixiviação do lodo desaguado em leito de secagem por bloco drenante segundo ABNT NBR 10005:2004 – Extrato Lixiviado

Parâmetros	Unidade	VMP	Resultado 1º Ensaio	Resultado 2º Ensaio	Resultado 3º Ensaio
Arsênio	mg/L	1	<0,005	<0,005	<0,005
Bário	mg/L	70	0,68	0,15	0,11
Cádmio	mg/L	0,5	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Chumbo	mg/L	1	<0,004	<0,004	<0,004
Cromo Total	mg/L	5	<0,01	0,2	0,2
Fluoreto	mg/L	150	<0,2	<0,2	<0,2
Mercúrio	mg/L	0,1	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Prata	mg/L	5	<0,005	<0,005	<0,005
Selênio	mg/L	1	<0,002	<0,002	<0,002
Benzeno	mg/L	0,5	<0,002	<0,002	<0,002
Benzo(a)pireno	mg/L	0,07	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cloreto de vinila	mg/L	0,5	<0,002	<0,002	<0,002
Clorobenzeno	mg/L	100	<0,002	<0,002	<0,002

Clorofórmio	mg/L	6	<0,002	0,02	<0,002
Cresol total	mg/L	200	<0,1	<0,1	<0,1
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,1	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,5	<0,002	<0,002	<0,002
Hexacloroetano	mg/L	3	<0,01	<0,01	<0,01
m-Cresol	mg/L	200	<0,1	<0,1	<0,1
Metiletilcetona	mg/L	200	<0,05	<0,05	<0,05
Nitrobenzeno	mg/L	2	<0,01	<0,01	<0,01
o-Cresol	mg/L	200	<0,1	<0,1	<0,1
p-Cresol	mg/L	200	<0,1	<0,1	<0,1
Piridina	mg/L	5	<0,002	<0,002	<0,002
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,2	<0,002	<0,002	<0,002
Tetracloroetileno	mg/L	7	<0,002	<0,002	<0,002
Tricloroetileno	mg/L	7	<0,002	<0,002	<0,002
1,1-Dicloroetileno	mg/L	3	<0,002	<0,002	<0,002
1,2-Dicloroetano	mg/L	1	<0,002	<0,002	<0,002
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	7,5	<0,002	<0,002	<0,002
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,13	<0,05	<0,05	<0,05
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	400	<0,002	<0,002	<0,002
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	20	<0,002	<0,002	<0,002
Aldrin	mg/L	0,03	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Clordano (todos os isomeros)	mg/L	0,02	<0,00002	<0,00002	<0,00002
Dieldrin	mg/L	0,003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Endrin	mg/L	0,06	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Heptacloro e seu Epóxido	mg/L	0,003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Lindano	mg/L	0,2	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Metoxicloro	mg/L	2	<0,001	<0,001	<0,001
o-DDD	mg/L	0,2	<0,001	<0,001	<0,001
o-DDE	mg/L	0,2	<0,000001	<0,000001	<0,000001
o-DDT	mg/L	0,2	<0,001	<0,001	<0,001
Pentaclorofenol	mg/L	0,9	<0,005	<0,005	<0,005
Toxafeno	mg/L	0,5	<0,00001	<0,00001	<0,00001
2,4-D	mg/L	3	<0,000015	<0,000015	<0,000015
2,4,5-T	mg/L	0,2	<0,001	<0,001	<0,001
2,4,5-TP	mg/L	1	<0,001	<0,001	<0,001

Fonte: Relatório de Análises Ecosystem

Tabela 32 – Resultado dos ensaios de Solubilização do lodo desaguado em leito de secagem por bloco drenante segundo ABNT NBR 10006:2004 – Extrato Solubilizado.

Parâmetros	Unidade	VMP	Resultado 1º Ensaio	Resultado 2º Ensaio	Resultado 3º Ensaio
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Aluminio	mg/L	0,2	<0,01	<0,01	<0,01
Arsenio	mg/L	0,01	<0,005	<0,005	<0,005
Bário	mg/L	0,7	0,6	0,1	0,6
Cádmio	mg/L	0,005	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Chumbo	mg/L	0,01	<0,004	<0,004	<0,004
Cianeto	mg/L	0,07	0,05	0,05	0,05
Clordano (Todos os Isômeros)	mg/L	0,0002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
Cloreto	mg/L	250	69,8	68,9	89,7
Cobre	mg/L	2	<0,002	0,03	0,02
Cromo Total	mg/L	0,05	<0,01	0,03	0,02
Endrin	mg/L	0,0006	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Fenóis Totais	mg/L	0,01	<0,003	<0,003	<0,003
Ferro	mg/L	0,3	16,9	12,8	31,6
Fluoreto	mg/L	0,8	<0,2	<0,2	<0,2
Heptacloro	mg/L	0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Heptacloro e seu Epóxido	mg/L	0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,001	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Lindano	mg/L	0,002	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Manganês	mg/L	0,1	10,15	1,64	10,92
Mercúrio	mg/L	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Metoxicloro	mg/L	0,02	<0,001	<0,001	<0,001
Nitrato (Expresso em N)	mg/L	10	1,59	1,72	3,9
o-DDT	mg/L	0,002	<0,000001	<0,000001	<0,000001
pH final do solubilizado	-	-	6,2	7,1	6,8
Prata	mg/L	0,05	<0,005	<0,005	<0,005
Selenio	mg/L	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Sódio	mg/L	200	27	25,4	25,9
Sulfato (Expresso SO ₄)	mg/L	250	16,8	<10	<10
Sulfactantes	mg/L	0,5	0,2	0,1	0,2
Toxafeno	mg/L	0,005	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Zinco	mg/L	5	0,1	0,3	0,1
2,4 D	mg/L	0,03	<0,00015	<0,00015	<0,00015
2,4,5-T	mg/L	0,002	<0,001	<0,001	<0,001
2,4,5-TP	mg/L	0,03	<0,001	<0,001	<0,001

Fonte: Relatório de Análises Ecosystem

Tabela 33 – Resultado do ensaio de massa bruta do lodo desaguado em bloco drenante

Parâmetros	Unidade	Resultado 1º Ensaio	Resultado 2º Ensaio	Resultado 3º Ensaio
Cor da amostra	-	Marrom	Marrom	Marrom
pH	-	6,8	7,3	7,2
Ponto de fulgor	°C	70	70	70
Óleos e Graxas	%	<1	<1	<1
Teste de Líquido Livre	-	Ausente	Ausente	Ausente
Umidade	%	7	10	9
Coliformes Termotolerantes	P/A	Ausente	Ausente	Ausente
Ovos Viáveis de Helmintos	P/A	<0,025	<0,025	<0,025
Salmonella	P/A	Ausente	Ausente	Ausente
Cianeto	mg/kg	<2,0	<2,0	<2,0
Sulfeto	mg/kg	0,2	0,4	0
Cromo Hexavalente	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1

Fonte: Relatório de Análises Ecosystem

Avaliando os resultados das análises físico-químicas e comparando com os Valores Máximos Permitidos pela NBR-10.004 (ABNT, 2004), pode-se afirmar que os valores da amostra do Extrato Lixiviado, são inferiores aos limites estabelecidos. No que se refere o resultado do Extrato Solubilizado, observa-se que, os valores de concentração de poluentes apresentaram resultados inferiores aos limites estabelecidos, com exceção dos parâmetros Ferro e Manganês que estão acima dos especificados.

Em função dos limites impostos pela extração do Lixiviado, Solubilizado, e Massa Bruta, o resíduo foi classificado como Resíduo Não Perigoso - Classe II A Não Inerte.

Com a classificação do lodo, sendo identificado que não ocorreu diferença na sua referida classificação, este lodo apresenta potencial a ser utilizado na agricultura como insumo. Entretanto ainda devem ser elaborados novos estudos para identificar as frações a serem utilizadas, a forma de aplicação e se existe a necessidade de realizar algum tipo de tratamento antes da sua utilização.

5.4.6. Análise estatística

Os dados de secagem do lodo referente aos ensaios realizados, foram tratados estatisticamente, sendo identificado homogeneidade da variância em 0,9995 no 1º

ensaio, 0,9853 para o 2º ensaio e 0,9998 para o 3º ensaio, demonstrando que cada tratamento contribuiu de forma igual para a soma dos quadrados. A partir da análise de significância, ficou constatado que não existe diferença significativa na secagem dos leitões I, II e III, logo os tratamentos têm mesmo efeito ao nível de significância de 5%, conforme consta as análises estatísticas apresentadas nas Tabelas 34, 35 e 36.

Tabela 34 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 1º ensaio de desaguamento

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Leito I	11	652,43	59,31	1241,15		
Leito II	11	633,17	57,56	1259,28		
Leito III	11	635,47	57,77	1270,17		
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	20,13	2	10,06	0,01	0,99	3,32
Dentro dos grupos	37.705,94	30	1256,86			
Total	37.726,07	32				

Tabela 35 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 2º ensaio de desaguamento

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Leito I	10	317,74	31,77	586,43		
Leito II	10	310,64	31,06	624,65		
Leito III	10	337,76	33,78	645,74		
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	39,57	2	19,78	0,03	0,97	3,35
Dentro dos grupos	16.711,38	27	618,94			
Total	16.750,95	29				

Tabela 36 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para o 3º ensaio de desaguamento

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Leito I	10	501,90	50,19	1063,21		
Leito II	10	485,27	48,53	1016,25		
Leito III	10	498,68	49,87	1026,74		
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	15,57	2	7,78	0,01	0,99	3,35
Dentro dos grupos	27.955,79	27	1035,40			
Total	27.971,36	29				

5.4.7. Estimativa da produção de Lodo da ETA de Coqueiral – Aracruz ES

Na Tabela 37 são apresentadas as variáveis utilizadas para estimativa da quantidade de lodo e dimensionamento do leito de secagem. Na Tabela 38 é mostrado a produção estimada de lodo da ETA de Coqueiral em Aracruz ES, inclusive através dos dados obtidos com os dados do projeto de pesquisa.

Tabela 37 – Variáveis utilizadas para estimativa da quantidade de lodo e dimensionamento do leito de secagem

VARIÁVEIS	VALOR
Cor Água Bruta (°H)*	112
Turbidez Água Bruta (UNT)*	2,15
Dosagem Coagulante (mg/L)	15
K ₁	1,3
K ₂	4,75
Vazão (m ³ /s)*	0,032
Rendimento da Unidade de Flotação (%)	90
Porcentagem de Solido Seco (m/m)	2,5
Densidade da Água (kg/m ³)	1000
Densidade do Sólido (kg/m ³)	982
Aplicações por Ano (Leito de Secagem Convencional)	4
Aplicações por ano (Leito de Secagem Blocos Drenantes a taxa de aplicação de 3,50 kg ST/m ²)	20
Aplicações por ano (Leito de Secagem Blocos Drenantes a taxa de aplicação de 4,30 kg ST/m ²)	15
Aplicações por ano (Leito de Secagem Blocos Drenantes a taxa de aplicação de 7,68 kg ST/m ²)	10
Profundidade do Leito (m)	0,3
Concentração de Sólidos na torta (%)	70
Concentração de Sólidos na água drenada (%)	0,05
Consumo	1,25
Quantidade de Leito	16
Aditivos - Polímeros (mg/L)	40

*Valores fornecidos pelo SAAE.

Tabela 38 – Estimativa do quantitativo de lodo produzido na ETA Coqueiral

Modelo	Massa de Sólido (Kg/Ano)	Massa de Lodo (Kg/Ano)	Volume de Lodo (m ³ /Ano)
RICHTER	77.862,13	2.479.685,72	2.481,11
AWWA	4.683,00	149.140,07	149,23
WCR-AFEE	98.279,29	3.129.913,85	3.131,72
CETESB	117.299,79	3.735.662,16	3.737,81
KAWAMURA	59.778,13	1.903.762,03	1.904,86
CORNWELL	60.020,32	1.911.475,30	1.912,58
DADOS DO PROJETO	66.010,33	2.060.195,20	2.102,24
MÉDIA	79.875,00	2.536.782,38	2.545,05

Volume de água tratada – 807.321,60 m³/ano DADOS DO PROJETO: média ST 0,0314 Kg/m³; Vazão da ETA 32 l/s; Descarga do Flotador a cada 5 dias durante 15 minutos, densidade do lodo 982 Kg/m³.

A partir da estimativa do quantitativo de lodo, foi realizado a determinação da área do leito de secagem utilizando as equações propostas no item 4.7.2.1 para leito de secagem convencional e por blocos drenantes. Na Tabela 39 é mostrado a área do leito de secagem, tanto convencional quanto por blocos drenantes.

Tabela 39 – Estimativa da área do leito de secagem

MODELO	A _t LSC (m ²)	A _t LSBD (m ²) ¹	A _t LSBD (m ²) ²	A _t LSBD (m ²) ³
RICHTER	2.067,59	1.240,56	1.102,72	992,45
AWWA ⁴	124,35	74,61	66,32	59,69
WCR-AFEE	2.609,76	1.565,86	1.391,87	1.252,69
CETESB	3.114,84	1.868,91	1.661,25	1.495,12
KAWAMURA	1.587,38	952,43	846,60	761,94
CORNWELL	1.593,81	956,29	850,03	765,03
DADOS DO PROJETO	1.751,87	1.051,12	934,33	840,90
MÉDIA	2.120,88	1.272,53	1.131,13	1.018,02

LSC – Leito de secagem convencional; LSBD – Leito de secagem de blocos drenantes; ¹Altura de 10cm; ²Altura de 15cm; ³Altura de 25cm; ⁴Não foi levado em consideração para cálculo da média os valores propostos pelo modelo AWWA.

Com a determinação da área do leito de secagem, pode ser verificado que o modelo AWWA apresenta diferença na área estimada quando comparado aos outros modelos. Como o modelo AWWA leva em consideração apenas os valores de turbidez e os outros modelos levam em consideração o parâmetro turbidez e cor aparente, provoca uma divergência na área estimada quando comparado aos outros modelos. A água bruta da lagoa Santur em Coqueiral Aracruz ES, apresenta

baixos valores de turbidez, enquanto que os valores de cor aparente são mais expressivos, mas não maiores que 112 uH. Estas ponderações são características de lagoas, normalmente apresentam baixa turbidez, devido o ambiente lântico, já a cor aparente mais elevada, é devido a maior concentração de matéria orgânica e ácidos húmicos. Dalsasso (2006), destaca que a cor aparente de algumas lagoas pode ser devido a presença de fitoplâncton e pela matéria vegetal decomposta que integra o solo do fundo da lagoa.

Com a área estimada, foi proposto um layout do leito de secagem composto por duas carreiras de 8 leitos em paralelo, com área total de 968 m². Adotou-se como referência para dimensionamento do leito de secagem por blocos drenantes, a altura de 15 cm para aplicação de lodo. Como fez parte da metodologia cobrir os leitos em períodos de precipitação, tendo como premissa os estudos de Giordani et al. (2003) na qual avaliaram a opção do uso de leitos de secagem convencional cobertos e não cobertos no Estado do Paraná, tendo como parâmetro de avaliação a precipitação média anual, taxa de evaporação, umidade do ar, temperatura local e ação dos ventos, concluíram que a precipitação e a taxa de evaporação eram os fatores que mais influíam na opção pelo leito de secagem coberto pelo não coberto. Nestes termos nas Figuras 36, 37 e 38 são apresentados os layouts do sistema de leitos de secagem por bloco drenantes e a cobertura proposta.

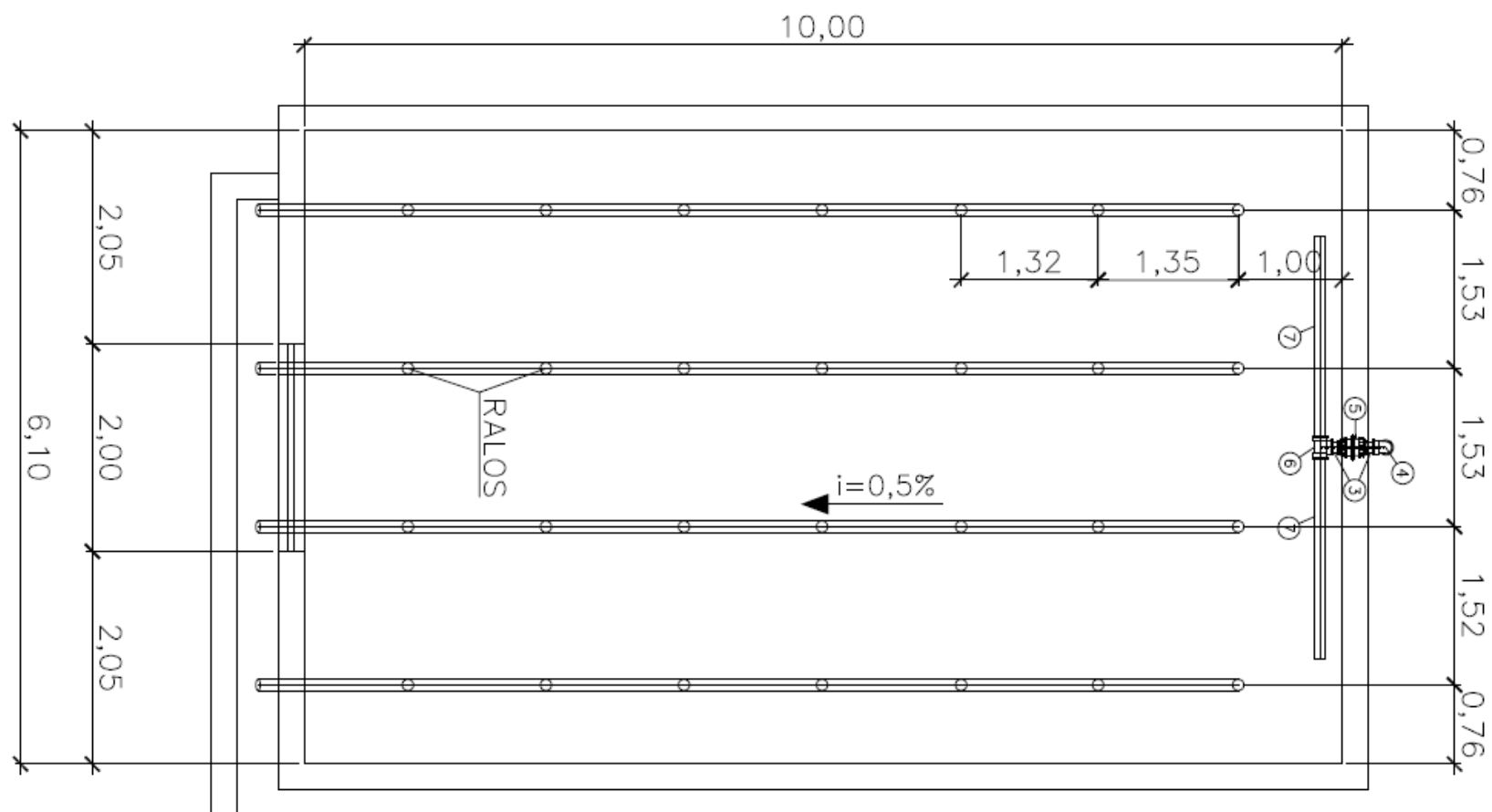


Figura 37 – Detalhes de 01 leito de secagem
Fonte: Adaptado de BRASWORD ENGENHARIA

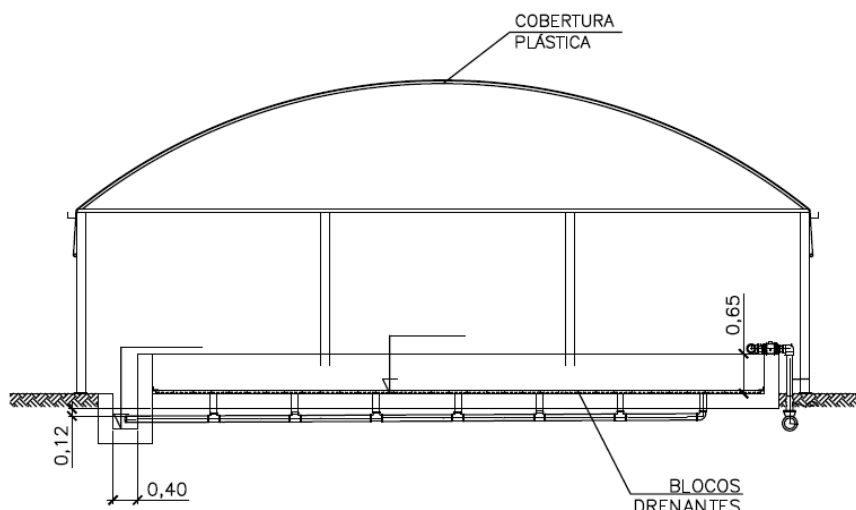


Figura 38 – Layout da cobertura para o leito de secagem por blocos drenantes
Fonte: Adaptado de BRASWORD ENGENHARIA

5.4.8. Análise de custo

A escolha de um polímero associada a dosagem não depende apenas do teor de matéria seca desejada na torta, mas principalmente, dos custos do polímero, tratamento e destinação da torta. Na Tabela 40 são apresentados os principais custos para implantação de um sistema de desaguamento por blocos drenantes, tomando como base os dados obtidos com os ensaios experimentais. Para análise dos custos envolvidos foi utilizado os dados do projeto na qual contemplam a estimativa de lodo e o teor de sólido médio observado nos ensaios.

Tabela 40 – Análise de custo para o desaguamento de lodo da ETA de Coqueiral

Variáveis	Resultado
Volume de Lodo (m ³ /a)	2.102,24
Massa de Sólido (kg/a)	66.010,33
Sólidos Totais (mg/L)*	35.000,00
Dosagem de Polímero (g de Polímero/kg.ST)	2,0
Polímero FO 4290 SH (U\$\$/kg)	4,87
Destinação (U\$\$/T)	50,00
Leito de Secagem com Blocos (U\$\$/m ²)**	200
Cobertura do leito de secagem (U\$\$/m ²)**	29

Fonte: Adaptado de SAVEYN, (2005), *Considerado a maior concentração de sólidos identificada nos ensaios, **Fornecido por BRASWORD ENGENHARIA, (considerando R\$ 3,40 = US\$1).

A partir da análise de custo apontou investimento na ordem de U\$\$ 221.672,00 com a construção do leito de secagem com cobertura e o custo operacional anual do sistema no valor de U\$\$ 12.438,28.

Os valores representam R\$ 42.290,15 e R\$ 753.684,80 respectivamente para operação e construção de 968 m² de leito de secagem, tendo como premissa investimento de R\$ 778,6 por m² em leito de secagem com cobertura.

Schneider e Kirchheim (2001) identificaram custo para leito de secagem convencional sem cobertura de R\$ 279,72 por m². Este valor corrigido segundo o Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado - INCC-M, resulta em R\$ 645,03 por m².

A Companhia de Saneamento de Alagoas, realizou em 2014 investimento em leito de secagem coberto a R\$ 697,97 por m², corrigido segundo INCC-M, resulta em R\$ 793,86 por m². Comparando os valores praticados pela companhia de saneamento de alagoas e os dados obtidos na pesquisa, os valores praticados podem ser equiparados a uma diferença aproximada de 2% entre os valores obtidos.

Na Tabela 41 é apresentado o custo para implantação do leito de secagem convencional e por blocos drenantes, tendo como referência para mensuração do investimento 793,86 e 778,6 R\$/m² respectivamente para leitos de secagem convencional e por blocos drenantes.

Tabela 41 – Custo para implantação do leito de secagem convencional e por blocos drenantes

MODELO	LSC	LSBD ¹	LSBD ²	LSBD ³
RICHTER	R\$ 1.641.380,26	R\$ 965.897,26	R\$ 858.575,35	R\$ 772.717,81
AWWA	R\$ 98.720,40	R\$ 58.093,65	R\$ 51.638,80	R\$ 46.474,92
WCR-AFEE	R\$ 2.071.786,26	R\$ 1.219.176,77	R\$ 1.083.712,68	R\$ 975.341,41
CETESB	R\$ 2.472.749,70	R\$ 1.455.130,31	R\$ 1.293.449,17	R\$ 1.164.104,25
KAWAMURA	R\$ 1.260.158,65	R\$ 741.561,13	R\$ 659.165,45	R\$ 593.248,90
CORNWELL	R\$ 1.265.264,30	R\$ 744.565,63	R\$ 661.836,11	R\$ 595.652,50
DADOS DO PROJETO	R\$ 1.390.736,87	R\$ 818.402,03	R\$ 727.468,47	R\$ 654.721,63
MÉDIA	R\$ 1.683.679,34	R\$ 990.788,86	R\$ 880.701,21	R\$ 792.631,08

LSC – Leito de secagem convencional; LSBD – Leito de secagem de blocos drenantes; ¹Altura de 10cm; ²Altura de 15cm; ³Altura de 25cm.

Conforme pode ser observado o investimento para leito de secagem por blocos drenantes nas diferentes taxas de aplicação é significativamente menor,

representando uma economia de aproximadamente 41, 47 e 53% quando comparado ao leito de secagem convencional, demonstrando dessa forma o custo para a instalação do leito de secagem por blocos drenantes. A opção do leito de secagem por blocos drenantes pode gerar uma economia de R\$ 736.015,25 com leito de secagem dimensionado para operar com altura de lodo de 25 cm, enquanto que para operação com 10 e 15 cm de lodo, a economia pode chegar a R\$ 572.334,84 e 663.268,40 respectivamente. Com a opção de se construir o leito de secagem de 968 m² conforme layout já apresentado, a economia será de R\$ 637.052,07 pela implementação do sistema proposto.

6. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo sólido foi classificada como Classe II A - Não Inerte, segundo ABNT NBR 10.004, fato que viabiliza a destinação do resíduo.

Quanto aos ensaios para determinação do polímero mais eficiente para os ensaios de desaguamento, o principal efeito da aplicação dos polímeros foi na mudança da resistência específica a filtração do lodo, sendo observado que para lodo estudado, os polímeros não iônico e iônico apresentaram o pior desempenho. Já os polímeros catiônicos FO 4190 SH e FO 4290 SH foram os polímeros que melhor se adequaram ao lodo estudado. O teste de inversão apontou o polímero FO 4290 SH na dosagem de 40 mg/L como sendo a melhor condição de desaguamento do lodo, corroborando em partes com o ensaio de resistência específica, onde foi observado que a melhor condição de dosagem foi no range de 40 a 60 mg/L do polímero FO 4290 SH, e não em específico na dosagem de 40 mg/L.

Com base nestes resultados não é recomendado o uso de polímeros não iônico e aniônico para condicionamento de lodo com as características do lodo deste estudo, pois os valores de resistência específica obtidos poderão ser maiores, dificultando o desaguamento. Importante destacar que cada resíduo possui características peculiares, devendo ser realizados novos ensaios.

Outra consideração pertinente na pesquisa trata da adoção do método de inversão que se mostrou bastante eficiente quando comparado ao ensaio de resistência específica. Um método quantitativo equiparado com um método qualitativo, relativamente simples e suficiente sensível para identificar o polímero e respectiva dosagem mais indicada para tratamento de lodo, de maneira rápida e eficaz.

Em se tratando do desempenho do desaguamento do lodo de ETA, através do uso de leitos de secagem modificados por blocos drenantes, os resultados apontaram que o desaguamento foi muito eficiente chegando a teores de sólidos totais na ordem de 93%.

Desta forma, comparando os resultados dos leitos de secagem por blocos drenantes com resultados teóricos da secagem em leitos de areia, é possível indicar que em leitos de blocos drenantes a secagem é mais rápida, o que favorece ciclos de desaguamento e secagem mais curtos, aumentando a produtividade do

leito, garantindo assim um maior número de aplicações por ano. Foi constatado através da análise estatística que não existiu diferença significativa na secagem dos leitos I, II e III para cada ensaio realizado, no que se refere as análises de teor de sólidos totais, demonstrando que o ensaio pode ser reproduzível.

A análise técnica e de custo apontou que a área requerida para leitos de secagem por blocos drenantes é menor que para leitos de secagem convencionais na ordem de 46 a 52%. Os estudos demonstraram investimento na ordem de R\$ 753.684,80 para construção de 968 m² de leito de secagem por blocos drenantes, resultando economia de aproximadamente R\$ 638.000,00 quando comparado aos leitos de secagem convencionais.

Nestes termos o leito de secagem modificado por blocos drenantes mostrou-se eficiente para o desaguamento e secagem do lodo condicionado com polímero FO 4290 SH, proveniente da estação de tratamento de água de Coqueiral em Aracruz ES, bem como viável para sua efetiva implantação quando comparado com leitos de secagem convencionais.

7. BIBLIOGRAFIA

ABU-ORF, M. M; ORMERCI, B. Measuring Sludge Network Strength Using Rheology and Relation to Dewaterability, Filtration, and Thickening— Laboratory and Full-Scale Experiments. **Journal of Environmental Engineering**, v.131(8), p.1139-1146, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.005 – Resíduos Sólidos – Ensaio de Lixiviação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10.006 – Resíduos Sólidos – Ensaio de Solubilização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12.209 – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estação de tratamento de esgoto sanitários**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 51p.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs – Remoção de água livre através de leitos de secagem e lagoas**. 2003. In:22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, 2003.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. (2008). **Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.13 n.1. 54-62.

AL-HASHMI, A. A.; AL-MAAMARI, R.; AL-SHABIBI, I.; MANSOOR, A.; AL-SHARJI, H.; ZAITOUN, A. Mechanical Stability of High-Molecular-Weight Polyacrylamides and an (acrylamido tert-butyl sulfonic acid)–Acrylamide Copolymer Used in Enhanced Oil Recovery. **Journal of applied polymer Science**, p.1–6, 2014.

ALMEIDA, G. N; GONÇALVES, M. C; GUIMARÃES, S. A. Z. Utilização do teste de Resistência específica na operação de filtro prensa. **Revista DAE**, São Paulo, v.160, p.20-26, 1991.

ALMEIDA, R. Q. **Análise de processo alternative Wedge-wire para desaguamento de lodo de estação de tratamento de esgotos domésticos**. 2012. 29p. Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Brasília, 2012.

ALVES, V. M. B. **Comparação entre sulfato de alumínio e policloreto de alumínio em estudo de caso**. 2012. 43ª Assembleia Nacional da Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento, Vitória, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE American Water Works Association – AWWA. (1996). **Technology Transfer Handbook: Management of Treatment Plant Residual**. New York. 294 p.

AMUDA, O. S., AMOO, I. A. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment, **Journal of Hazardous Materials**, v.141, p.778–783, 2007.

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Biological Wastewater treatment series: Sludge treatment and disposal, v.6, IWA Publishing, London, 2007.

ANDREOLI, C. V. (coordenador). Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos. 273p. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20ª edição, Washington, E.U.A. (1998).

AZIZ, A. A. A.; KRETZER, R. G.; DIXON, D. R.; SCALES, P. J. The characterisation of slurry dewatering. **Water Science and Technology** v.41 (8), p.9 – 16, 2000.

BARKEY D. J; STUCKEY D. C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems, **Water Research**, v.33 p.3063–3082, 1999.

BARROSO, M. M. **Influência das Micro e Macropropriedades dos Lodos de Estações de Tratamento de Água no Desaguamento por Leito de Drenagem**. 2007. 249p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. 2001. In:21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. Anais Eletrônicos I-065. ABES, 2001.

BATSTONE, J. D; LU, Y; JENSEN, P. D. Impact of dewatering technologies on specific methanogenic activity. **Water Research**, v.82, p.78 – 85, 2015

BENNAMOUN, L. Solar drying of wastewater sludge: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, p.1061–1073, 2012.

BENNAMOUN, L; ARLABOSSE, P; LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.28, p.29–43, 2013.

BERTANZA, G.; PAPA, M.; CANATO, M.; COLLIVIGNARELLI, M. C.; PEDRAZZANI, R. How can sludge dewatering devices be assessed Development of a new DSS and its application to real case studies. **Journal of Environmental Management**, v.137, p.86–92, 2014.

BOMAX DO BRASIL. **Filtros-Prensa Prensamax Modelo Manual**. Catálogo, 05/2014.4 p.

BORÁN, J.; HOUDKOVÁ, L.; ELSABER, T. Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant. **Resources, Conservation and Recycling**, v.54, p.278–282, 2010.

BRASIL. (2005) Ministério do desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente/CONAMA – Resolução nº 357 de 17 de Março de 2005.

BRASIL. (2005) Ministério do desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente/CONAMA – Resolução nº 430 de 13 de Maio de 2011.

BRASIL. Lei n.º 9605, de 12 de fevereiro de 1998. **Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.** Brasília, DF: Senado Federal.

BUBBIS, N. S. Sludge Drying Lagoons at Winnipeg. *J. Water Pollution Control Fed*, v.34 (8), p.830–832, 1962.

CASEY, J. Sludge processing and disposal. In: *Unit Treatment Processes in Water and Wastewater Engineering*, Chapter 16, p.169-183. Dublin: Aquavarra Research Limited, 2006.

CHEREMISINOFF, P.; **Handbook of Engineering Polymeric Materials**, CRC Press, 1997.

COLE, A.I.; SINGER, P.C. Conditioning of anaerobically digested sludge. *Journal of Environmental Engineering*, v.111, n.4, p.501-10, 1985.

COLIN, F.; GAZBAR, S. Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering. *Pergamon*, v.29 (8), p.2000–2005, 1994.

CORDEIRO, J. S. Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo. In: Reali, M.A.P. (coord.) **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água.** ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 125-141.1999.

CORDEIRO, J. S. **Micro propriedades de lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.** 2002. XXVIII Congresso internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, Mexico, 2002.

COSTA, C. J. A. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas: Estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP.** 2011. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

DALSASSO, R. L; SENS, M. L. **Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxocloreto de alumínio: Estudo com água de manancial eutrofizado.** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.2 n.3. 241-249, 2006.

DENTEL, S. K. Conditioning. In Spinosa, L. & Vesilind, P.A. (Eds.), *Sludge into biosolids.* London (UK), **IWA Publishing**, 278-314, 2001.

DI BERNARDO; L. DANTAS, A. D. B; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição do Resíduos Gerados em ETA's.** São Carlos: LDiBe, 2012.

DI BERNARDO; L. DANTAS, A. D. B; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e dos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: LDiBe, 2011.

DOMINIAC, D.; CHRISTENSEN, M.; KEIDING, K.; NIELSEN, P. H. Gravity drainage of activated sludge: New experimental method and considerations of settling velocity, specific cake resistance and cake compressibility. *Water Research*, v.45, 1941 – 1945, 2011.

DULIN, B. E.; KNOCH, W. R. The impact of incorporated organic matter on the dewatering characteristics of aluminium hydroxide sludge. **Journal American Water Works Association**. May. p. 74-79. 1989.

EPA – Environmental Protection Agency. **Process design manual for sludge treatment and disposal**, 1987.

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 14, n.3, p. 317-326, 2009.

FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantador e reúso de água de lavagem de filtros – Estudo de caso – ETA Cardoso**. 2004. 164p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia Urbana, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GEOBASES. Disponível: <http://www.geobases.es.gov.br/publico/AcessoNavegador.aspx?id=222&nome=SAAE_ARACRUZ>. Acesso: 07 de maio de 2015.

GIORDANI, S.; ABREU, B. P. **Avaliação da viabilidade de implantação de sistemas naturais de secagem de lodo de ETA através do estudo de variáveis meteorológicas: estudo de caso para o estado do Paraná**. 2003. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville SC. Anais Eletrônicos I-219. ABES, 2003.

GRAVITY FLOW SYSTEMS SOUTHWEST, INC. The Stainless Steel Wedgewater™ Filter Bed System.

GROVER, K. I. Design and application of static screen devices for Primary clarification, storm water treatment, and sludge dewatering. In: REYNOLDS, J. H; BAYN, K. E. Proceedings of the Utah water pollution control association, 1979 annual meeting. Logan, 1979, 55-58.

HAAK, W. **Condicionamento químico de lodo de estação de tratamento de água com monitoramento através de potencial redox**. 2011. 196p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2011.

HENDRICKS, D. Fundamentals of Water Treatment Unit Processes Physical, Chemical, and Biological, 2006.

KIM, B. J.; CARDENAS, R. R.; GEE, C. S.; BANDY, J. T. **Performance Evaluation of Existing Wedgewater and Vacuum-Assisted Bed Dewatering Systems**. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory (USACERL), 1992.

KOPP, J., DICHTL, N. Prediction of full-scale dewatering results by determining the water distribution of sewage sludges. **Proceedings of the IAWQ Specialised Conference on Disposal and Utilisation of Sewage Sludges: Treatment Methods and Application Modalities**. October, 13-15, Athens (Greece), p.233-240, 2000.

KOULOUMBOS, V. N.; SCHAFFER, A.; CORVINIB, P. F. X. Impact of sewage sludge conditioning and dewatering on the fate of nonylphenol in sludge-amended soils. **Water Research**, v.42, p.3941–3951, 2008.

KURADE, M. B.; MURUGESAN, K.; SELVAM, A.; YU, S.; WONG, J. W. C. Sludge conditioning using biogenic flocculant produced by *Acidithiobacillus ferrooxidans* for enhancement in dewaterability. **Bioresource Technology**. Article in press, p.1-7, 2016.

LAMONTAGNER, L. P. **Choosing Polymers for Centrifuges**, 2006.

LOPES, L. N. A.; MACHADO, L. C. G. T.; LIMA, R. F.; PEREIRA, J. A. R. Avaliação do desaguamento de lodo de ETA em leito de secagem. 2005. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande MS, Anais Eletrônicos I-176. ABES, 2005.

LOZER, G. J. **Desaguamento e higienização de lodo de esgoto utilizando estufa agrícola sobre leitos de secagem**. 2012. 111p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental, 2012.

MANGRAVITE, F. J. Synthesis and properties of polymer used in water treatment. Research Division, AWWA National Conference. June 5, 1983.

MATSUI, Y. Virus inactivation in aluminum and polyaluminum coagulation. **Environmental Science & Technology**, v. 37, p.5175–5180, 2003.

MCMURRY, J. Química Orgânica; 7ª edição. Vol. 2. São Paulo: Cengage Learning, 2014. (Pag 769-776, 1125-1138).

MENDES, L. R. **Adensamento e desaguamento mecânico de lodos gerados em ETA**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2001.

MENDES, L. R.; FERREIRA FILHO, S. S.; SCIAN, J. B. **Desaguamento mecânico por filtro prensa de placas de lodos gerados em estações de tratamento de água**. 2001. In: 21º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. Anais Eletrônicos I-091. ABES, 2001.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos: Condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Curitiba: ABES, 2006. Cap. 4. p. 49-108.

MIKI, M. K. **Utilização de polímero para condicionamento de lodo de ETA para desidratação em filtros de placas**. 1998. 425p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 1998.

Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry: Opportunities in Wet-End Chemistry. Disponível em: < <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/MiniEncy.htm>>. Acesso: 20 de abril de 2016.

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. 2011. 242p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2011.

MURUGESAN, K.; RAVINDRAN, B.; SELVAM, A.; KURADE, M. B.; YU, S.; WONG, J. W. C. Fate of extracellular polymeric substances of anaerobically digested

sewage sludge during pre-dewatering conditioning with *Acidithiobacillus ferrooxidans* culture. **Bioresource Technology**, Article in press, p.1-6, 2016.

NEYENS, E.; BAEYENS, J.; DEWIL, R.; HEYDER, B. D. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering. **Journal of Hazardous Materials**, v.106B, p.83–92, 2004.

NIU, M.; ZHANG, W.; WANG, D.; CHEN, Y.; CHEN, R. Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants. **Bioresource Technology**, v.1440, p.337–343, 2013.

OERKE, D. W.; FABISIAK, G. A. Simple, effective, low cost and innovative biosolids drying bed dewatering/processing system. WEF/AWWA/CWEA Joint Residuals and Biosolids Management Conference Biosolids 2001: "Building Public Support". p.1-8, 2001.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. Kaolin aerated flocs formation assisted by polymer-coated microbubbles. **International Journal of Mineral Processing**, v.106–109, p.31–36, 2012.

OLIVEIRA, N. S. **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água**. 2010. 209p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2010.

PACHECO, L. A. M. Polieletrólitos como auxiliares de coagulação. **Revista DAE**, São Paulo, v.102, p.46-60, 1970.

PAN, Y.; YE, L.; AKKER, B. V.D.; PAGES, R. G.; MUSENZE, R. S.; YUAN, A. Z. Sludge-Drying Lagoons: a Potential Significant Methane Source in Wastewater Treatment Plants. **Environmental Science Technology**, v.50, p.1368–1375, 2016.

PEETERS, B.; DEWIL, R.; VAN IMPE, J. F.; VERNIMMEN, L.; SMETS, I.Y. Using a shear test-based lab protocol to map the sticky phase of activated sludge. **Environmental Engineering Science**, v.28, p.81-85, 2011.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade da água e poluição: aspectos físico-químicos**. ABES, 2006. p.18.

QASIM, S R. WASTEWATER TREATMENT PLANTS: Planning, Design and Operation. 2a ed., Texas: Crc, 1999. 1107 p.

QI, Y.; THAPA, B. K.; HOADLEY, A. F. A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review. **Chemical Engineering Journal**, v.171, p.373–384, 2011.

REALI, M. A. P.; CORDEIRO, J. S.; PATRIZZI, L. J. **Proposição de Método para ensaios de remoção de água de Lodos por Centrifugação**. 1999. In: 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Anais Eletrônicos II-028. Rio de Janeiro. ABES, 1999.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de águas**. 102p. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2001.

ROBINSON, J., KNOCKE, R. W. Use of dilatometric and drying techniques for assessing sludge dewatering characteristics. **Water Environment Research**, v.64, n.1, p.60-68, 1992.

ROBUSTI, C.; VIANA, E. F.; FERREIRA JUNIOR, F.; GOMES, I.; TOGNETTA, L.; SANTOS, O.; DRAGONI, P. **Papel**. São Paulo: Senai, 2014.

SAITO, R. H. **Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerada na ETE – Piracicamirim, Piracicaba – SP**. 2013. 147p. Trabalho de Graduação – Instituto de Aeronáutica ITA, Departamento de Engenharia Civil – Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

SANIN, F. D; CLARKSON, W. W; VESILIND, P. A. **Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges**. Chapter 2, Sludge Sources, Characteristics and Quantities, 2011.

SARON, A., LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de Água. 2001. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Anais Eletrônicos I-075. Belo Horizonte-MG. ABES, 2001.

SMOLLEN, M. Moisture retention characteristics and volume reduction of municipal sludges. **Water SA**, v. 14, n.1, p.25-28, 1988.

SNF FLOERGER. Preparation of organic Polymers: Catálogo. França, 2002. 10 p.

SNF FLOERGER. Sludge Dewatering: Catálogo. França, 2003. 36 p.

SNF FLOERGUE. Water Soluble Polymers: Catálogo. França, 2007. 57p.

SPAVIER, L. C. **Distribuição das Diferentes Frações de Água em Lodos de Estações de Tratamento de Águas Residuárias**. 2003. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental, Vitória, 2003.

SANIN, F. D.; CLARKSON, W. W.; VESILIND, P. A. **Sludge Engineering: the Treatment and Disposal of Wastewater Sludges**. First ed. Destech Publications Inc, Pennsylvania, 2011.

SANTANA, Ruth. Outros parâmetros que afetam as propriedades reológicas. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana>>. Acesso: 11 de agosto de 2015.

SANTOS, B.; OLIVEIRA, A. L.; SALLA, M. R.; FILHO, J. E. A.; PEREIRA, C. E. Avaliação de sistema de leito de drenagem no desaguamento do lodo de estação de tratamento de água com ênfase na influência dos agentes externos na fase de secagem. **Ciência & Engenharia**, v.23(1), p.65-71, 2014.

SAVEYN, H. Modelling and optimization of sludge conditioning and electric field assisted dewatering. 2005. 260f. Tese PhD – Universiteit Gent, Belgica, 2005.

SEBASTIÃO V.; CANEVAROLO Jr.; **Ciência dos polímeros**; 2ª edição; São Paulo, SP; Artliber, 2006. (pag 21-62)

SCALIZE, P. S. **Caracterização e Clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário**. 1997. 220f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SCALIZE, P. S., DI BERNARDO, L. Resistência específica de lodo obtido em ensaio de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtros rápidos de ETAs. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.4 n.1. 48-54, 1999.

SCALIZE, P.S. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estação de tratamento de esgoto**. 2003. 171p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SCHNEIDER, I. A. H.; KIRCHHEIM, A. P. **Secagem de um resíduo galvânico em uma câmara solar**. 2001. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. Anais Eletrônicos III-030. ABES, 2001.

SILVA, C. M. S.; POHLMANN, M. **Avaliação de eficiência de leito de secagem modificado utilizando piso de blocos drenantes**. In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves, RS. 2014.

SILVA, S. M. C., SILVA, G. H. R., MORUZZI (2015). **Avaliação de desempenho de leito com piso de blocos drenantes para desaguamento e secagem de lodo aeróbio**. SEMEAR. Semana de Estudos da Engenharia Ambiental, UNESP. Rio Claro, SP. 2015.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil**. 2012. 136p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia de Edificações e Saneamento, 2012.

SILVEIRA, C.; KIYOMI, K.; ABE, C. H.; YOSHIKI, L.; HIROOKA, E. Y. Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.20 n.2. 297-306, 2015.

SOARES, S. R. A.; MATOS, Z. M. R.; BERNADES, R. S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.313-319, 2001.

SOLOMONS, T.W.G.; CRAIG, B. F. **Química Orgânica**. Volume 1. 9ª edição; Tradução por Oliveira, M. L. G. Rio de Janeiro: LTC, 2009. p. 442-444.

SOUZA, C. A. **Adensamento mecânico e desidratação por filtro prensa de lodo gerado em estações de tratamento de água**. 2001. In: 21º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. Anais Eletrônicos I-090. João Pessoa. ABES, 2001.

STEFANAKIS A. I.; TSIHRINTZIS, V. A. Heavy metal fate in pilot-scale sludge drying reed beds under various design and operation conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v.213–214, p.393– 405, 2012.

TANG, H. X. Inorganic Polymer Flocculation Theory and Flocculants, China Architecture & Building Press, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

TUROVSKIY, I. S; MATHAI, P. K. Wastewater Sludge Processing. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2006.

USEPA – Environmental Protection Agency. **Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludge**. 1ª ed. Cincinnati: EPA, September, 1987.

USEPA – Environmental Protection Agency. **Sludge Treatment and disposal**. v.1 Cincinnati: EPA, October, 1978.

USEPA – Environmental Protection Agency. **Process Design Manual for Sludge Treatment and disposal**. EPA, September, 1979.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos - Um manual para regiões de clima quente, 1994.

VAN HAANDEL, A. C., MARAIS, G. O comportamento do Sistema de lodo ativado. 1999.

VESILIND P. A., MARTEL, C. J. Freezing of water and wastewater sludges. **Journal of Environmental Engineering**, V.116(5), p.854-862, 1990.

VIGNESWARAN, S., KANDASAMY, J. Water and Wastewater Treatment Technologies: Sludge Treatment Technologies, Encyclopedia of life support. Systems, p.1-6.

VICENTI, J.; MOLLE, O.; WISNIEWSKI, C.; LIENARD, A. Sludge drying reed beds for septage treatment: Towards design and operation recommendations. **Bioresource Technology**, v.102, p.8327–8330, 2011.

WAKEMAN, R. J. Separation technologies for sludge dewatering, **Journal of Hazardous Materials**, v.144, p.614–619, 2007.

WANG, Y.; GAO, B. Y.; XU, X. M.; XU, W. Y.; XU, G. Y. Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.332, p.354–359, 2009.

WEF - Water Environmental Federation. **DESIGN OF MUNICIPAL WASTE WATER TREATMENT PLANTS: WEF Manual of Practices**. VOLUME II Alexandria: WEF, (1992). 1592 p.

WHIPPLE, W. L.; MALTESH, C. Adsorption of Cationic Flocculants to Paper Slurries, **Journal of Colloid and Interface Science**, v.256, p.33–40, 2002.

WU, C.; WANG, Y.; GAO, B.; ZHAO, Y.; YUE, Q. Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate using sodium alginate as coagulant aid for synthetic dyeing wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v.95 p.180–187, 2012.

WU, C. C.; LEE, D. J.; HUANG, C. Determination of the optimal dose of polyelectrolyte sludge conditioner considering particle sedimentation effects, **Advances in Environmental Research**, v.4, p.245-249, 2000.

YANG, G. C. C.; CHEN, M. C.; YEH, C. F. Dewatering of a biological industrial sludge by electrokinetics-assisted filter press. **Separation and Purification Technology**, v.79, p.177–182, 2011.

YANG, S. F.; LI, X. Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions. **Process Biochemical**, v.44, p.91–96, 2009.

ZETA METER, Inc. Everything you want to know about: Coagulation & Flocculation, 4^a ed. Staunton, Virginia, 1993.

ZHAI, L. F.; SUN, M.; SONG, W.; WANG, G. An integrated approach to optimize the conditioning chemicals for enhanced sludge conditioning in a pilot-scale sludge dewatering process. **Bioresource Technology**, v.121, p.161–168, 2012.

ZHANG, W. Understanding the impact of chemical conditioning with inorganic polymer flocculants on soluble extracellular polymeric substances in relation to the sludge dewaterability. **Separation and Purification Technology**, v.132, p.430–437, 2014.

ZHEN, G.; LU, X.; LI, Y.; ZHAO, Y.; WANG, B.; SONG, Y.; CHAI, X.; NIU, D.; CAO, X. Novel insights into enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated persulfate oxidation. **Bioresource Technology**, v.119, p.7–14, 2012.

ZHOU, Z.; YANG, Y.; LI, X.; WANG, W.; WU, Y.; WANG, C.; LUO, J. Coagulation performance and flocs characteristics of recycling pre-sonicated condensate sludge for low-turbidity surface water treatment. **Separation and Purification Technology**, v.123, p.1–8, 2014.

APÊNDICES

Apêndice I - Gráficos da análise de resistência específica

Gráfico 14 – Condicionamento com Polímero AN 910 SH

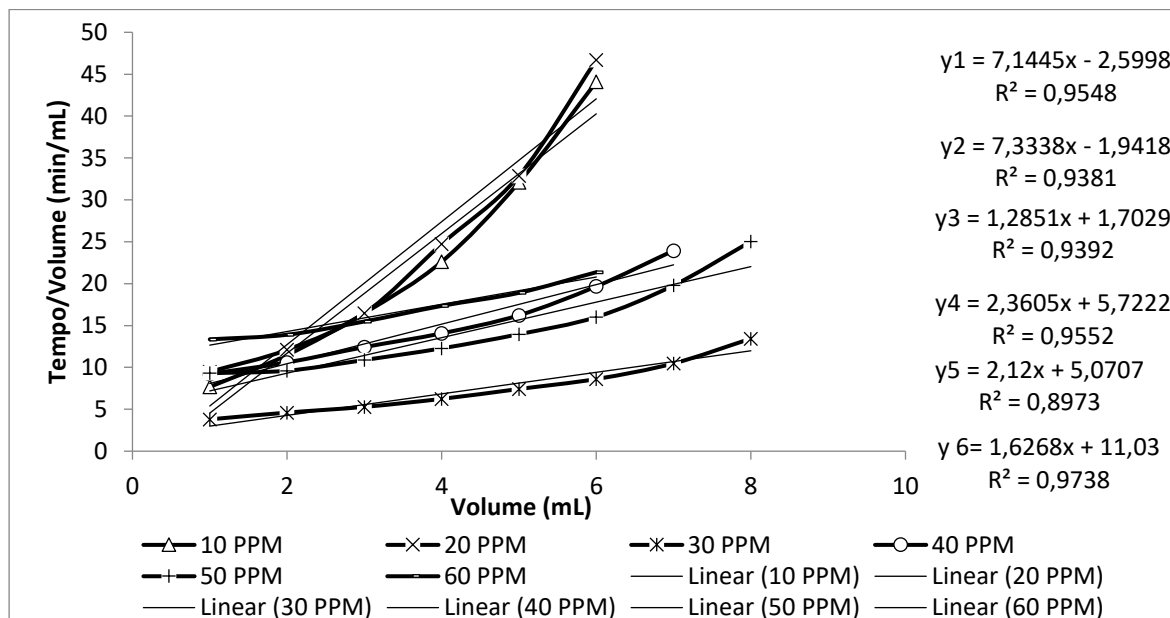


Gráfico 15 – Condicionamento com Polímero AN 923 SH

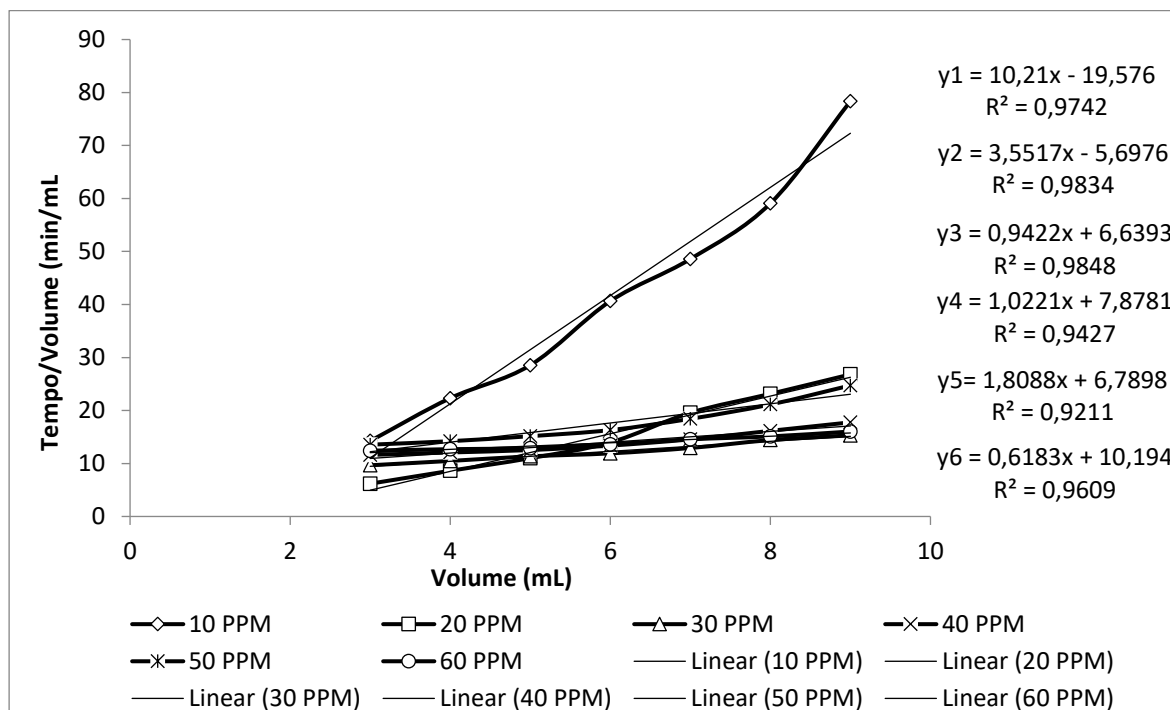


Gráfico 16 – Condicionamento com Polímero FA 920 SH

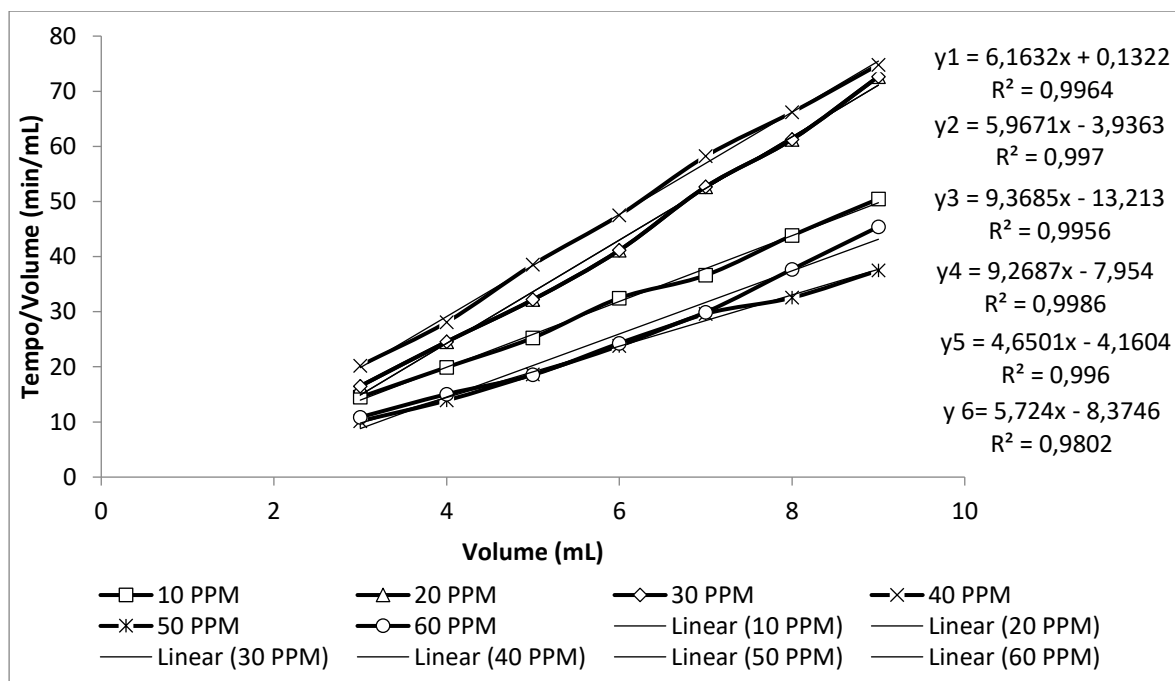


Gráfico 17 – Condicionamento com Polímero FO 4115 SH

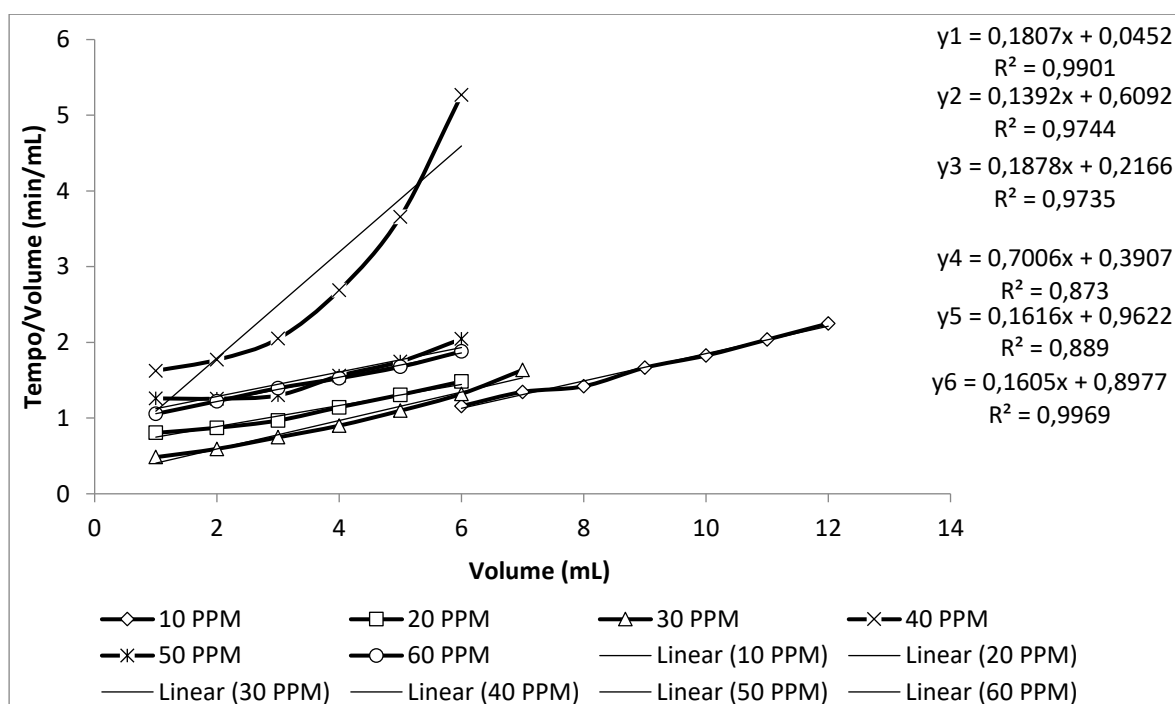


Gráfico 18 – Condicionamento com Polímero FO 4140 SH

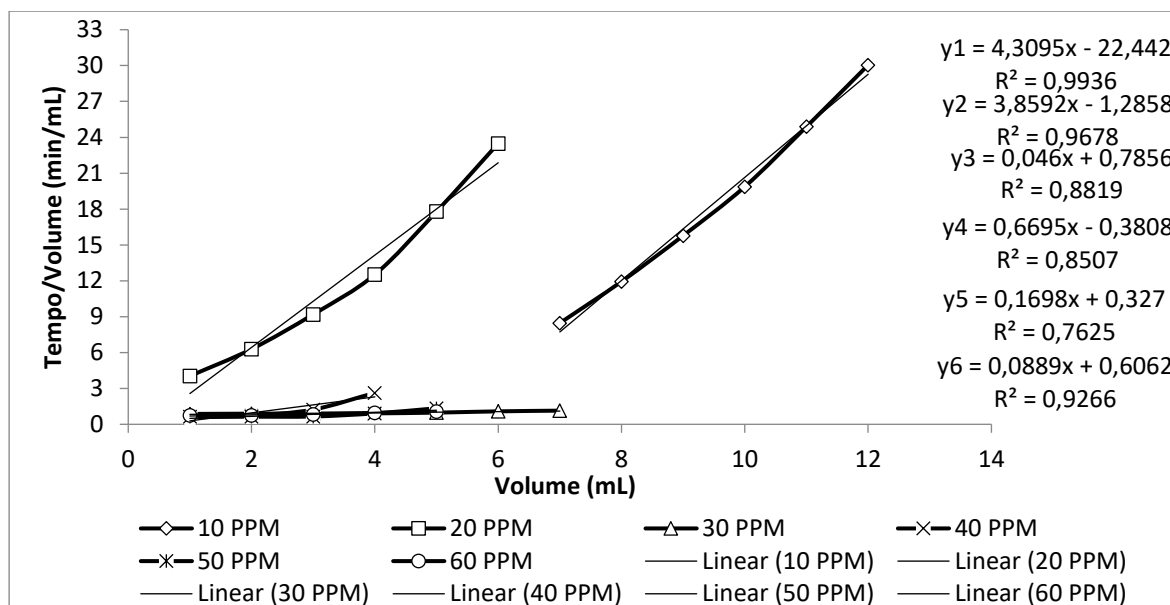


Gráfico 19 – Condicionamento com Polímero FO 4190 SH

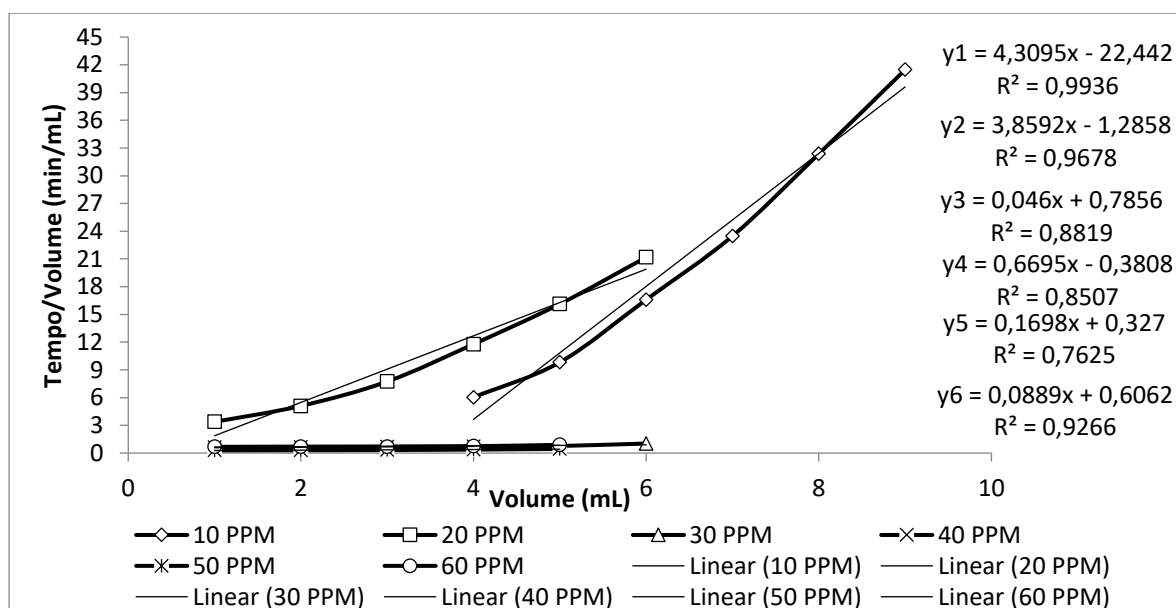


Gráfico 20 – Condicionamento com Polímero FO 4290 SH

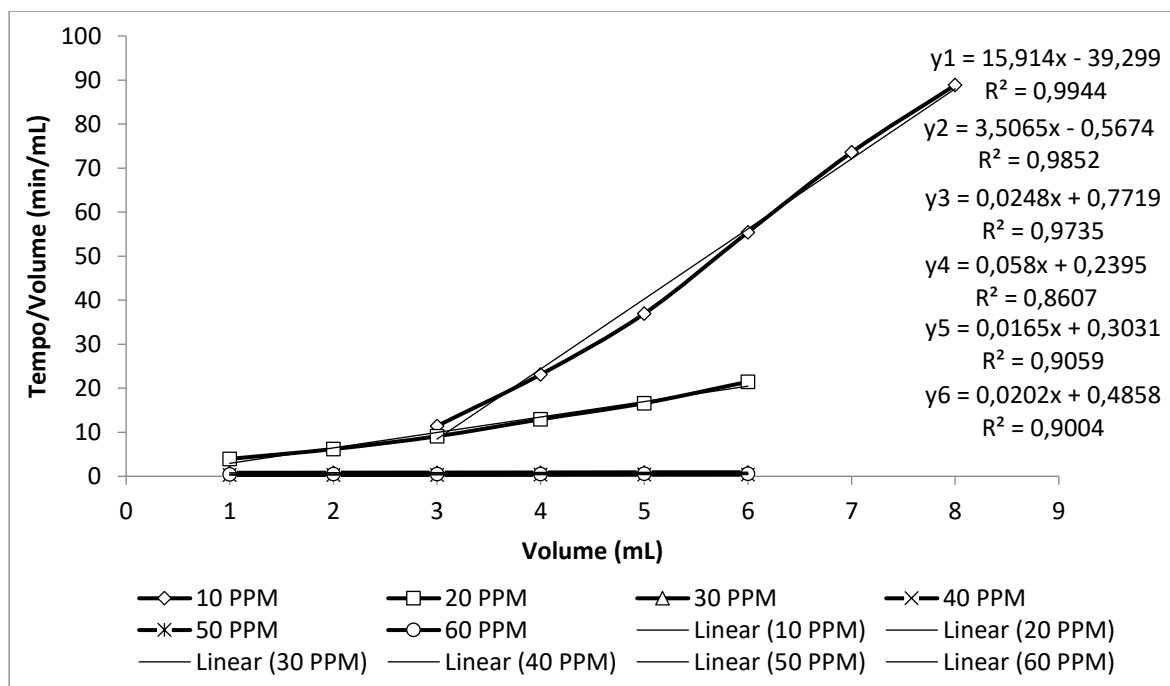


Gráfico 21 – Condicionamento com Polímero FO 4440 SH

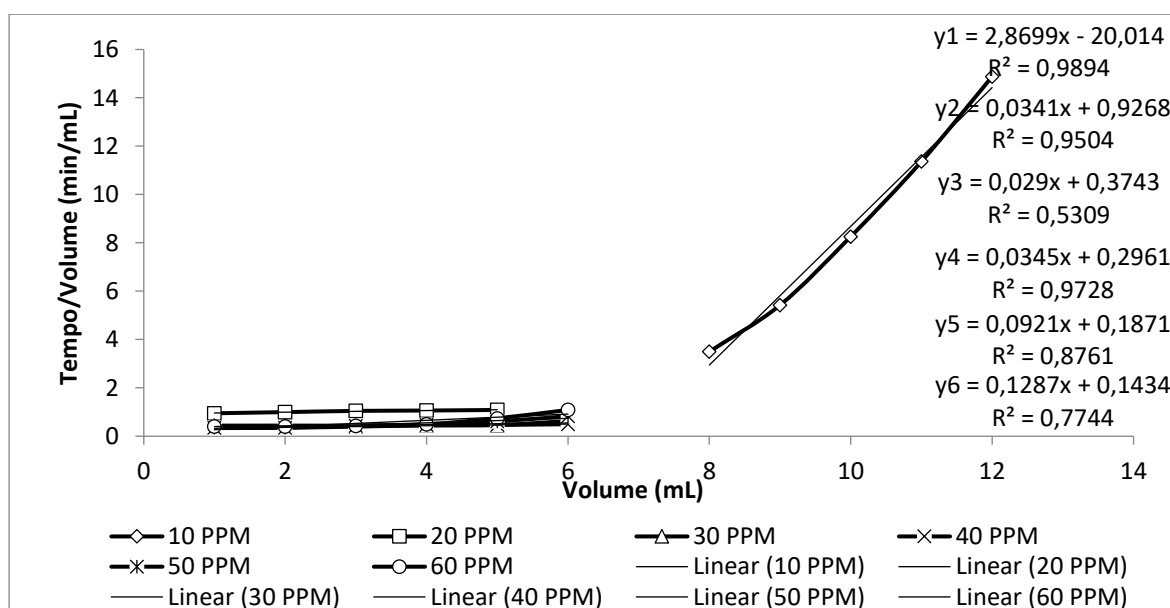
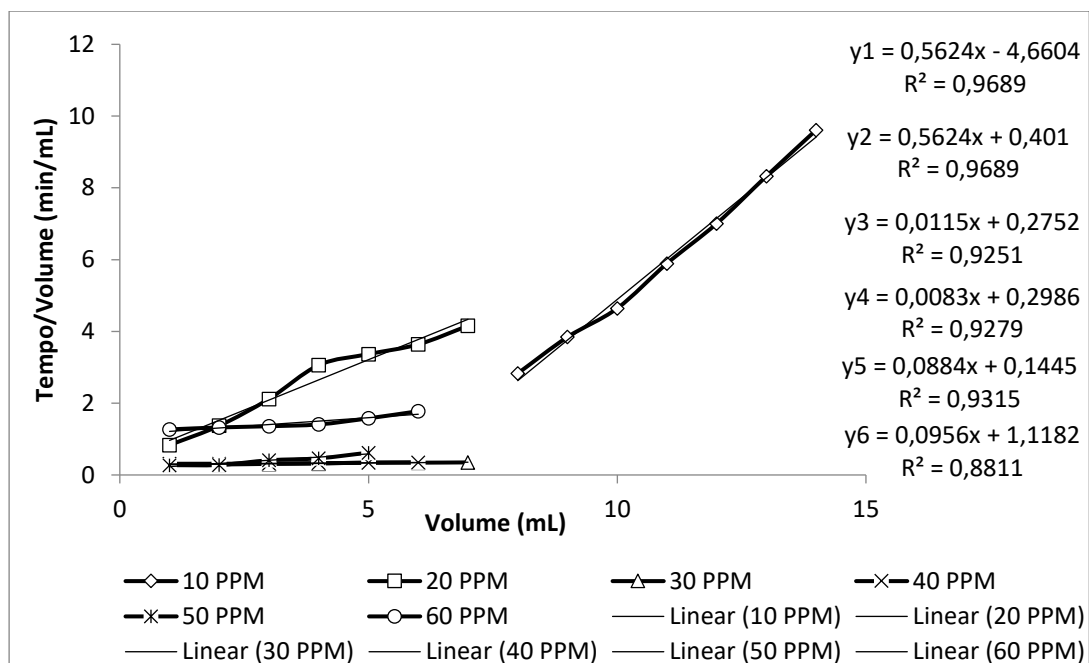























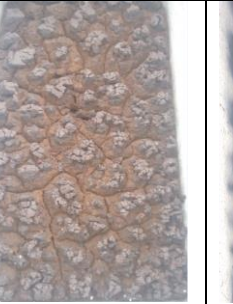

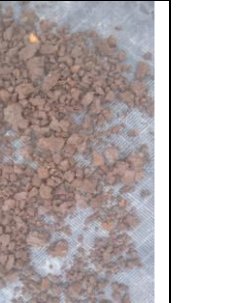




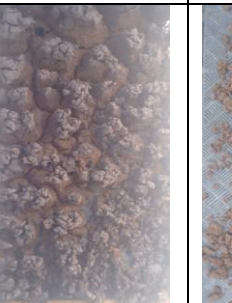
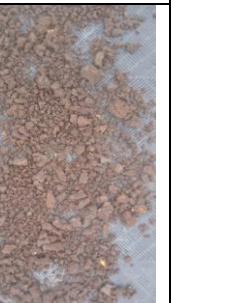



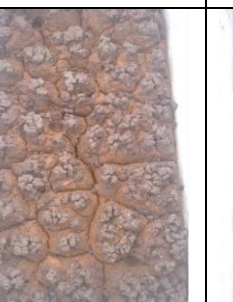
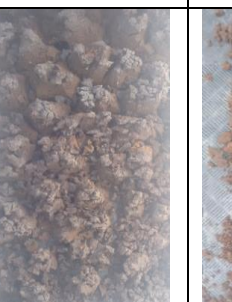
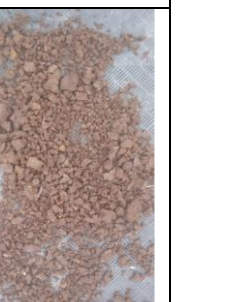
Gráfico 22 – Condicionamento com Polímero FO 4700 SH











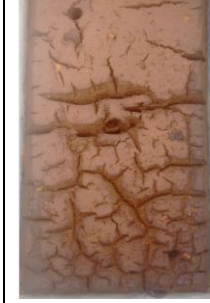



Apêndice II - Aspecto do lodo durante o período de secagem**1º Ensaio**

Leito	1º dia	3º dia	11º dia	12º dia	20º dia	30º dia
I						
II						
III						

2º Ensaio

Leito	1º dia	3º dia	6º dia	15º dia	30º dia	40º dia
I						
II						
III						

3º Ensaio

Leito	1º dia	2º dia	6º dia	12º dia	17º dia	30º dia
I						
II						
III	