



**unifaema**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAEMA – UNIFAEMA**

**RAYSSA ALMEIDA DA ROCHA SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO E PROPOSTA DE TRATAMENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE UM  
MUNICÍPIO DE RONDÔNIA**

**ARIQUEMES - RO  
2024**

**RAYSSA ALMEIDA DA ROCHA SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO E PROPOSTA DE TRATAMENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE UM  
MUNICÍPIO DE RONDÔNIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador (a): Prof. Me. Felipe Cordeiro de Lima

**ARIQUEMES - RO  
2024**

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

S719c Souza, Rayssa Almeida da Rocha.

Caracterização e proposta de tratamento de lodos provenientes de estação de tratamento de água de um município de Rondônia. / Rayssa Almeida da Rocha Souza. Ariquemes, RO: Centro Universitário Faema – UNIFAEMA, 2024.

56 f. ; il.

Orientador: Prof. Me. Felipe Cordeiro de Lima.

Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária. – Centro Universitário Faema – UNIFAEMA, Ariquemes/RO, 2024.

1. Lodo. 2. caracterização. 3. tratamento e disposição. 4. Legislações.  
I. Título. II. Lima, Felipe Cordeiro de.

CDD 628

**Bibliotecária Responsável**  
Isabelle da Silva Souza  
CRB 1148/11

**RAYSSA ALMEIDA DA ROCHA SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO E PROPOSTA DE TRATAMENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE UM  
MUNICÍPIO DE RONDÔNIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador (a): Prof. Me. Felipe Cordeiro de Lima

**BANCA EXAMINADORA**

Assinado digitalmente por: FELIPE CORDEIRO DE LIMA  
Razão: Sou responsável pelo documento  
Localização: UNIFAEMA - Ariquemes/RO

---

Prof. Me. Felipe Cordeiro de Lima  
Centro Universidade FAEMA - UNIFAEMA

Documento assinado digitalmente  
 MATHEUS MARTINS FERREIRA  
Data: 28/11/2024 00:30:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Matheus Martins Ferreira  
Centro Universidade FAEMA - UNIFAEMA

Assinado digitalmente por: JOCIEL HONORATO DE JESUS  
Razão: Sou responsável por esse documento  
Localização: UNIFAEMA - Ariquemes/RO  
O tempo: 25-11-2024 21:18:06

---

Prof. Me. Jociel Honorato de Jesus  
Centro Universidade FAEMA - UNIFAEMA

**ARIQUEMES – RO  
2024**

*Dedico este trabalho aos meus pais, amigos e familiares, cujo apoio e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse alcançar meus objetivos e realizar os meus sonhos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de concluir este curso tão sonhado. Dedico esta conquista à minha mãe, Alcinéia e à memória do meu pai, Nazareno, que desempenharam um papel essencial me apoiando.

Expresso minha gratidão a todos professores, que contribuíram para minha trajetória. Ao meu orientador, Felipe Cordeiro, que foi uma fonte constante de motivação e orientação, oferecendo contribuições valiosas mesmo diante das minhas dúvidas iniciais sobre o curso.

Um agradecimento especial às minhas melhores amigas Poliana e Gabrielly, que, desde o ensino médio, esteve ao meu lado, ajudando em tantas áreas da minha vida.

Por fim, sou imensamente grata a todos os meus amigos, familiares e colegas de trabalho que, de forma direta ou indireta, me ajudaram a transformar este sonho em realidade. Cada um de vocês teve um papel importante nesta jornada, e serei eternamente grata por todo o apoio e carinho.

*“Na natureza nada se cria, nada se  
perde, tudo se transforma”.*

***Antoine Lavoisier***

## RESUMO

As Estações de Tratamento de Água são essenciais para o fornecimento de água de qualidade à população. Contudo, muitos estados brasileiros enfrentam desafios quanto a gestão de lodos, um resíduo sólido inevitável dessas operações. A correta gestão desses resíduos é prevista por legislações com a finalidade de prevenir impactos. Não obstante, o manejo do lodo envolve a redução do volume de água e aumento da concentração de sólidos suspensos, através da conjunção de técnicas de adensamento e desidratação de processos mecanizados ou naturais. Mediante a este cenário, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar e quantificar a produção de lodo gerado em uma ETA localizada em um município de Rondônia, bem como apresentar a soluções mais viáveis para o tratamento e disposição final desses resíduos. A metodologia trata-se de uma pesquisa descritiva e exploratória, através de coleta de dados da ETA, revisão bibliográfica afim de sugerir as melhorias operacionais do lodo. Com base nos resultados obtidos por meio das análises físico-químicas, observa-se que os lodos do decantador possui concentrações significativamente mais altas de sólidos suspensos e turbidez em comparação com o lodo dos filtros. Além disso, foi possível estimar o volume diário de lodo seco produzido 1.176,12 kg/dia. técnica de tratamento proposta para o lodo do decantador foi adensamento gravitacional e desidratação por centrifuga, com disposição em aterro sanitário, enquanto o lodo do filtro foi destinado a tanques de equalização para reaproveitamento na etapa inicial do tratamento. Assim, este estudo fornece subsídios que podem auxiliar na gestão dos resíduos gerados nas ETA e apoiar a tomada de decisão em municípios que enfrentam desafios semelhantes em relação à disposição do lodo.

**Palavras-chave:** Lodo; caracterização; tratamento e disposição; legislações.

## ABSTRACT

Water Treatment Plants (WTPs) are essential for providing high-quality water to the population. However, many Brazilian states face challenges in managing sludge, an unavoidable solid waste generated during these operations. Proper management of this waste is mandated by legislation aimed at preventing environmental impacts. Nonetheless, sludge management involves reducing the water content and increasing the concentration of suspended solids through the combination of thickening and dewatering techniques, whether mechanized or natural. In this context, the present study aims to characterize and quantify the sludge production in a WTP located in a municipality in Rondônia, as well as to propose the most viable solutions for its treatment and final disposal. The methodology consists of descriptive and exploratory research, including data collection from the WTP and a literature review to suggest operational improvements for sludge management. Based on the results obtained from physicochemical analyses, it was observed that the sludge from the clarifier has significantly higher concentrations of suspended solids and turbidity compared to the sludge from the filters. Furthermore, it was possible to estimate the daily production of dry sludge, which amounts to 1,176.12 kg/day. The proposed treatment technique for the clarifier sludge was gravitational thickening followed by centrifuge dewatering, with final disposal in a sanitary landfill. Meanwhile, the filter sludge was directed to equalization tanks for reuse in the initial treatment stage. Thus, this study provides valuable insights to assist in the management of sludge generated in WTPs and supports decision-making in municipalities facing similar challenges regarding sludge disposal.

**Keywords:** Sludge; characterization; treatment and disposal; legislation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Etapas do tratamento convencional na ETA.....	17
<b>Figura 2.</b> Pontos de geração de resíduos na ETA convencional.....	19
<b>Figura 3.</b> Distribuição da água na partícula de lodo.....	21
<b>Figura 4.</b> Sólidos associados ao cálculo de produção de lodo.....	26
<b>Figura 5.</b> Estrutura do adensador por gravidade de forma circular.....	29
<b>Figura 6.</b> Adensadores por gravidade. (a) Vazio. (b) Em operação.....	29
<b>Figura 7.</b> Estrutura do adensador mecânico de esteira.....	30
<b>Figura 8.</b> Adensador por flotação por ar dissolvido de forma circular.....	31
<b>Figura 9.</b> Meios de desidratação do lodo de ETAs.....	32
<b>Figura 10.</b> Esquema do leito de secagem.....	32
<b>Figura 11.</b> Esquema de lagoas de lodo.....	34
<b>Figura 12.</b> Bags do tipo membrana filtrantes.....	35
<b>Figura 13.</b> Centrífuga decantadora de eixo horizontal.....	36
<b>Figura 14.</b> Princípio de Funcionamento de filtro-prensa de placa.....	36
<b>Figura 15.</b> Amostras de lodo provenientes da lavagem dos filtros.....	43
<b>Figura 16.</b> Amostras de lodo provenientes da descarga dos decantadores.....	43
<b>Figura 17.</b> Proposta de tratamento de lodos da ETA de estudo.....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Consistência dos resíduos em função da concentração de sólidos. ....	23
<b>Tabela 2.</b> Características dos lodos das ETAs. ....	23
<b>Tabela 3.</b> Características dos lodos dos decantadores. ....	24
<b>Tabela 4.</b> Características das águas da lavagem dos filtros. ....	24
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros e metodologia aplicada para análise do lodo. ....	44
<b>Tabela 6.</b> Dados físicos e operacionais da ETA. ....	45
<b>Tabela 7.</b> Análise de lodo proveniente do decantador. ....	45
<b>Tabela 8.</b> Análise de lodo proveniente do filtro. ....	46
<b>Tabela 9.</b> Dados para cálculo dos SST da água bruta. ....	48

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALF – Água da Lavagem dos Filtros

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETA – Estação de Tratamento de Água

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

SS – Sólidos Suspensos

SST – Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

SV – Sólidos Voláteis

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	16
1.2. OBJETIVOS .....	16
1.2.1. <b>Objetivo Geral</b> .....	16
1.2.2. <b>Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS .....	17
2.2. LEGISLAÇÃO VIGENTE .....	19
2.3. CARACTERÍSTICAS DO LODO .....	21
2.4. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE LODO .....	24
2.5. TRATAMENTOS DO LODO .....	28
<b>2.5.1. Adensamento</b> .....	28
2.5.1.1. Adensadores por gravidade.....	29
2.5.1.2. Adensadores mecanizados .....	30
2.5.1.3. Flotação por ar dissolvido.....	31
<b>2.5.2. Desidratação ou Desaguamento</b> .....	32
2.5.2.1. Leitões de Secagem .....	32
2.5.2.2. Lagoas de lodo .....	34
2.5.2.3. Bags.....	35
2.5.2.4. Centrífugas.....	35
2.5.2.5. Filtro-prensa de placas .....	36
2.5.2.6. Filtro a vácuo .....	37
<b>2.5.3. Análise Comparativa dos Métodos de Tratamento</b> .....	37
2.5.3.1. Análise técnica e financeira .....	37
2.6. DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL .....	40
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>42</b>
3.1. PROCEDIMENTOS TÉCNICOS .....	42
<b>3.1.1. Da coleta de dados</b> .....	42
<b>3.1.2. Da análise de dados</b> .....	44
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA .....</b>	<b>44</b>
4.1. DADOS FÍSICOS E OPERACIONAIS .....	44
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO LODO .....	45

4.3. ESTIMATIVA DE LODO GERADO .....	47
4.4. PROPOSTA DE TRATAMENTO .....	49
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da evolução da humanidade, o sistema de abastecimento de água se tornou uma das grandes prioridades da civilização, afinal através do transporte de água entre localidades permite diversos benefícios para a saúde pública, visto que é essencial para sustentar as necessidades do homem. Assim sendo, os serviços relacionados ao tratamento de água desempenham um papel crucial na melhoria da qualidade de vida, proporcionando maior segurança e praticidade (Angelakis *et al.*, 2021).

Entretanto, o crescimento populacional atrelado à alta demanda por água potável, têm exigido maior capacidade de produções e operações das estações de tratamento de água. Segundo Lin *et al.* (2018), essa expansão resulta em um aumento significativo na geração de resíduos, especialmente o lodo, que é um subproduto inevitável dos processos de tratamento. Nesse sentido, o descarte inadequado desse lodo pode causar graves impactos ambientais, afetando a fauna, a flora e a saúde pública.

Por conseguinte, os principais resíduos gerados nas ETAs são os lodos provenientes dos decantadores e a água da lavagem dos filtros. As suas produções dependem intrinsecamente das características físicas da água bruta como turbidez e cor, o percentual de dosagem de produtos químicos e cronogramas de limpeza dos equipamentos (Reali, 1999). Desse modo, esses fatores influenciam diretamente a quantidade de resíduos gerados, impactando as estratégias de tratamento e disposição final.

De acordo com a legislação brasileira, por meio de leis, resoluções e normas, estabelece diretrizes no que diz respeito à gestão dos resíduos. A Lei 12.305/2010 e a NBR 10.004/2004 enquadram e classificam o lodo como resíduos sólidos, e, portanto, exigem que seja realizado os manejos, tratamentos e disposição adequada para a prevenção de danos ambientais e a saúde pública. Além disso, a Lei 9.605/1998 configura o lançamento indevido como crime ambiental com penalidades e multas.

A vista disso, o tratamento do lodo proveniente das estações, consiste na combinação de processos de adensamento e desidratação com a finalidade de aumentar a concentração de sólidos e reduzir o volume de água. Dessa forma, o lodo tratado poderá ser depositado de forma segura em aterros sanitários, recuperação de áreas degradadas, incineração e na fabricação de materiais da construção civil, e dentre outras soluções.

Apesar das diretrizes legais que regulamentam o tratamento de resíduos, a implementação dessas práticas enfrenta dificuldades devido às limitações econômicas e operacionais (Frota; Gehling, 2021). Neste sentido, diversos municípios, especialmente de

menor porte, não possuem os meios necessários para cumprir integralmente as normas estabelecidas, resultando no descarte inadequado dos resíduos.

Segundo Molina (2010), no Brasil a prática de lançamento de resíduos das ETAs é comum nos corpos hídricos sem os tratamentos preliminares ou completos. No estado de Rondônia, o tratamento do lodo torna-se ainda mais complexo e desafiador, pois muitos municípios sofrem com a infraestrutura limitada, além de baixos índices de adesão ao sistema de abastecimento, baixa densidade populacional e restrições de espaço para implantação das técnicas de manejo. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar e apresentar uma proposta de tratamento e disposição final para os lodos gerados na ETA que possui população inferior a 100 mil habitantes localizada em um município de Rondônia.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

A gestão dos resíduos produzidos em estações de tratamento de água tem desencadeado uma crescente preocupação ambiental em diversos municípios brasileiros, em função dos impactos decorrentes da disposição sem o tratamento prévio. No contexto de Rondônia, este estudo torna-se essencial, pois o estado em questão enfrenta desafios específicos tanto no sistema de abastecimento de água quanto no gerenciamento de resíduos sólidos da ETA devido à falta de infraestrutura adequada.

Por conseguinte, a relevância do trabalho reflete na necessidade de assegurar o adequado tratamento e a melhor alternativa para lançamento dos resíduos sólidos gerados pelas ETAs, visando atender as legislações brasileiras e minimizar os impactos ambientais. Portanto, a caracterização e o tratamento adequado dos lodos provenientes dessas estações são de extrema importância, pois influenciam diretamente a preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. **Objetivo Geral**

Caracterizar o lodo gerado nas estações de tratamento de água de um município de Rondônia e propor técnica adequada para seu tratamento e disposição final.

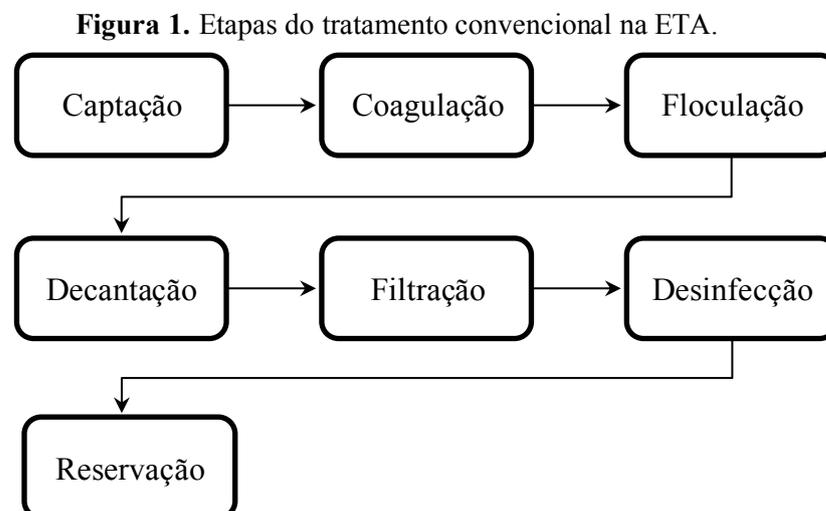
### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar legislações aplicáveis ao tratamento e disposição de lodo;
- Realizar um levantamento da geração de lodos na ETA, incluindo volume e características físico-químicas;
- Verificar técnica de tratamento de lodos mais adequada para a ETA considerando os dados físicos e operacionais.
- Desenvolver uma proposta de implementação da técnica de tratamento e disposição final selecionada, incluindo diretrizes para monitoramento e controle de qualidade do lodo tratado, visando minimizar os riscos ambientais e à saúde pública.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS

A Estação de Tratamento de Água (ETA) são instalações destinadas a remover contaminantes presentes na água bruta, tornando-a segura para o consumo humano, atendendo aos padrões de potabilidade. Os tipos de tratamento de água incluem o tratamento avançado, tratamento convencional e tratamento simplificado, que variam de acordo com a qualidade da água, conforme a classificação e enquadramento proposto pela Resolução Conama 357/2008. Hodiernamente, o sistema mais utilizado é o tratamento convencional, abrangendo etapas desde a captação até a desinfecção, sendo amplamente adotado devido à sua eficácia de garantir a qualidade da água. figura 1 ilustra as etapas desse processo.



Fonte: Sabesp (2016) adaptado.

A princípio, a captação constitui a etapa inicial do processo de tratamento, em que a água bruta é coletada de fontes superficiais ou subterrânea. A escolha da fonte, local e método de captação dependem de diversos fatores, incluindo a disponibilidade e qualidade da água, as necessidades da população a ser atendida e as condições ambientais locais.

Na sequência, a coagulação consiste em adicionar produtos químicos, como cloreto férrico ou sulfato de alumínio, à água bruta com a finalidade de desestabilizar as partículas suspensas. Esse procedimento facilita a aglomeração dessas impurezas em tamanhos maiores, que podem ser mais facilmente removidos nas etapas subsequentes do tratamento. Segundo Pereira (2011), a coagulação pode ser influenciada por fatores físico-químico como turbidez, cor, pH, temperatura, sólidos totais dissolvido, alcalinidade, tamanho de partículas e dentre outros.

Posteriormente, a floculação é o procedimento que favorece a unificação das partículas que foram anteriormente coaguladas, permitindo que interajam entre si por meio de uma agitação lenta na água em movimento. Isso resulta na formação de flocos de impurezas, o que facilita sua remoção posterior através da sedimentação, devido à ação da gravidade.

Em seguida, a decantação trata-se de um processo físico em que partículas coloidais são separadas da fase líquida por meio da sedimentação gravitacional (Ferreira Filho, 2017). Neste fenômeno, a força da gravidade atua sobre as partículas, promovendo a aglomeração e a subsequente deposição no fundo do recipiente.

Logo após, a filtração consiste na captura de partículas sólidas em suspensão na água que permanecem na água após as etapas anteriores. Sua finalidade baseia-se na remoção de microrganismos e substâncias orgânicas e inorgânicas contidas no meio líquido (Duarte, 2011).

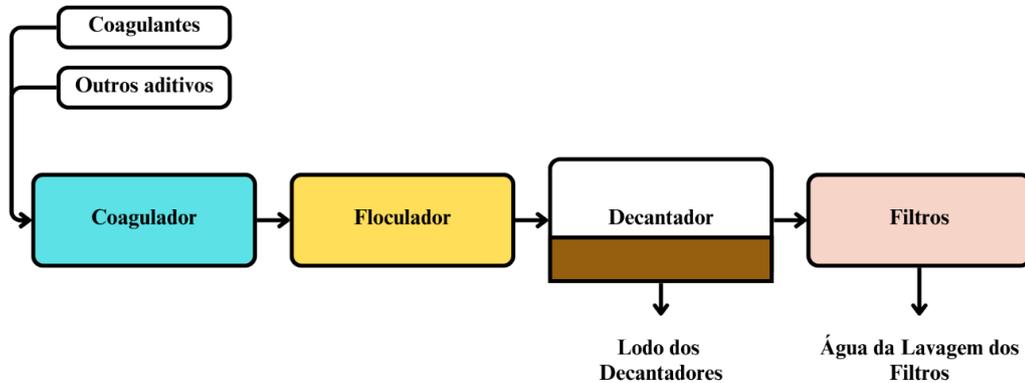
Ademais, a desinfecção é o processo de eliminar ou inativar organismos potencialmente patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários por meio de produtos químicos, para prevenir infecções e garantir a segurança na distribuição de água potável (Brasil, 2005). A fluoretação, por sua vez, consiste na adição controlada de compostos de flúor à água potável com o objetivo de prevenir cáries dentárias na população.

Por fim, a água tratada é destinada ao sistema de reservação da água, podendo ser cisternas, reservatórios apoiado, enterrado, semi-enterrado e elevado de modo a garantir uma boa qualidade e distribuição da água.

Diante desses processos, as ETAs inevitavelmente geram resíduos durante suas operações. Segundo Achon *et al.* (2013), os principais resíduos produzidos nas ETAs convencionais são o lodo e a água de lavagem de filtros - ALF, conforme ilustrado na Figura 2. A formação do lodo ocorre principalmente devido à presença de materiais particulados na água

bruta e à utilização de produtos químicos durante as etapas de coagulação e floculação (Reali, 1999).

**Figura 2.** Pontos de geração de resíduos na ETA convencional.



Fonte: Reali (1999) adaptado.

Dessa forma, durante o processo de tratamento da água, os coagulantes e outros aditivos adicionados na água bruta, contribui para a retenção do material sólido nos decantadores e nos filtros. Após o acúmulo desses resíduos, a remoção é realizada por meio sistema jateamento dos decantadores e limpeza de retrolavagem dos filtros, resultando, respectivamente, no descarte do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros.

## 2.2. LEGISLAÇÃO VIGENTE

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), representa um marco significativo na gestão de resíduos sólidos no Brasil. Essa legislação estabelece diretrizes para o manejo adequado dos resíduos, visando à proteção ambiental e à saúde pública, promovendo práticas sustentáveis e incentivando a reciclagem e o reaproveitamento de materiais.

No contexto dessa legislação, os lodos gerados nas ETAs são classificados como resíduos sólidos, conforme o art. 3º da PNRS, que os define como materiais ou substâncias resultantes de atividades humanas, cuja destinação ou disposição final é obrigatória a proceder. Esses resíduos podem estar nos estados sólido ou semissólido, além de gases contidos em recipientes e líquidos que, devido a suas características, não podem ser lançados na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, demandando soluções técnicas apropriadas para garantir a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica (Brasil, 2010).

A NBR 10.004 também enquadra os lodos das ETAs em sua definição de resíduos sólidos, sendo aqueles:

Resíduos sólidos: resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Dessa forma, os lodos provenientes das ETAs são classificados como resíduos sólidos Classe II A – não inertes (Aboy, 1999). Ou seja, embora o lodo não seja perigoso, a má gestão e disposição podem ocasionar impactos devido ao seu potencial de reações químicas.

A Resolução CONAMA nº 430/2011, por sua vez, regulamenta as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e estabelece a necessidade de tratamento adequado dos resíduos, bem como sua destinação final, de modo a minimizar impactos ambientais. Embora essa resolução não seja exclusivamente sobre lodo, suas diretrizes influenciam o manejo adequado desses resíduos, uma vez que os efluentes gerados durante o tratamento da água precisam atender a requisitos ambientais rigorosos.

Ademais, a resolução estabelece que o descarte inadequado de efluentes ou resíduos pode acarretar impactos ambientais, o que reforça a necessidade de tratamento eficiente e destinação final adequada dos lodos gerados pelas ETAs, prevenindo a poluição dos corpos hídricos. Dessa forma, os lodos devem ser geridos de acordo com os princípios e diretrizes estabelecidos pela lei, que incluem a destinação e a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, também conforme o art. 3 do PNSR:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (Brasil, 2010).

A Lei nº 9.605/1998 de Crimes Ambientais não menciona diretamente o lodo. No entanto, ela estabelece normas gerais para crimes ambientais, incluindo o lançamento irregular de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos no meio ambiente. Isso inclui qualquer tipo de resíduo, como o lodo de ETA, que se for descartado de forma inadequada ou sem tratamento, pode se

enquadrar nos crimes definidos pela lei, com penas que variam de reclusão de 1 a 5 anos, além de multas.

Portanto, as leis e normas vigentes enfatizam a importância da gestão integrada e do gerenciamento dos resíduos sólidos. No caso dos lodos de ETA, isso implica na necessidade de adoção de tecnologias e processos que permitam a redução, tratamento e destinação segura desses resíduos através do incentivo ao desenvolvimento e aplicação de soluções inovadoras, afirmando o compromisso com práticas de sustentabilidade ambiental e com a saúde pública.

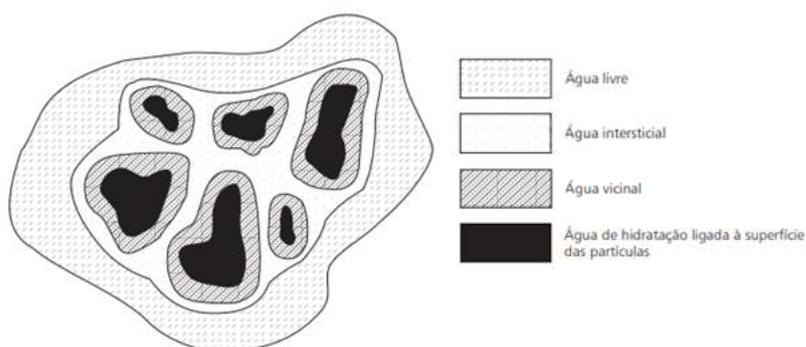
### 2.3. CARACTERÍSTICAS DO LODO

Costa e Oliveira (2020) definem o lodo como um resíduo de textura pastosa, com elevado teor de umidade, compostos orgânicos e inorgânicos. Para Richter (2001), o lodo da ETA é um subproduto da coagulação da água bruta, sendo caracterizado pela presença de produtos químicos, metais derivados dos coagulantes, partículas suspensas, partículas coloidais floculadas e outros.

Nessa concepção, tanto as características quanto o volume do lodo gerado em ETAs convencionais estão diretamente relacionados à qualidade físico-química da água bruta, que pode variar sazonalmente. O nível de turbidez é um fator essencial, pois quanto mais turva ou contaminada for a água, maior será a produção de lodo. Além disso, deve-se considerar também a quantidade de produtos químicos utilizados no processo, como sulfato de alumínio e polímeros, e os procedimentos operacionais adotados para lavagem de filtros e decantadores.

De acordo com Smollen e Kafaar (1998, *apud* Reali, 1999), o lodo contém água em diferentes estados (Figura 3), os quais podem ser hierarquizados consoante a crescente dificuldade de separação, isto é, água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação.

**Figura 3.** Distribuição da água na partícula de lodo.



Fonte: (Smollen e Kafaar, 1998, *apud* Reali, 1999).

- **Água livre:** consiste na água que não está associada à partícula sólida, sendo removida por processos simples de gravidade como a decantação.
- **Água intersticial ou capilar:** refere-se à água ligada mecanicamente, presa nos interstícios ou vazios dos flocos. A remoção requer processos mais intensivos, como a aplicação de forças centrífugas e compressão.
- **Água Vicinal:** compreende múltiplas camadas de moléculas de água ligadas fisicamente à superfície das partículas sólidas através de pontes de hidrogênio. Devido às fortes interações físicas, a água vicinal necessita da utilização de técnicas intensas de desidratação, como a aplicação de polímeros ou tratamentos térmicos.
- **Água de Hidratação:** Água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas. Esta é a água mais difícil de separar, pois está quimicamente ligada às partículas. A remoção geralmente requer processos químicos ou térmicos específicos para quebrar essas ligações.

Dessa forma, cada uma das frações de água distribuídas no lodo influenciam as características de retenção de água e conseqüentemente a eficiência do processo de remoção. Nesse sentido, quanto mais eficiente o sistema de remoção dessas águas, melhor será o processo de transporte e disposição final dos lodos (Guimarães, 2007).

Em termos de proporção, o volume do lodo varia de 0,2 a 5% em relação ao volume de água (Costa; Oliveira, 2020). A partir desse percentual, 75 a 90% do lodo é composto de sólidos suspensos e 20 a 35% de compostos voláteis (Richter, 2009).

Neste sentido, o lodo é determinado pelo teor de sólidos (%), enquanto o lodo da água da lavagem dos filtros pela concentração de sólidos (mg/l) (Guimarães, 2007). Isso ocorre porque, em termos de massa, o lodo do decantador se destaca pela alta concentração de sólidos e baixa vazão de água. Por outro lado, do ponto de vista volumétrico, a água de lavagem dos filtros se sobressai devido à alta vazão e baixa concentração de sólidos (Cornwell; Roth, 2011).

Portanto, a consistência dos resíduos da ETA está diretamente relacionada com a concentração de sólidos. Com isso, essa consistência pode variar desde uma forma líquida nos pontos de geração até uma textura semelhante à de argilas utilizadas na produção de cerâmica, obtida em centrífugas, ou ainda como um material quebradiço, encontrado nos leitos de secagem. A Tabela 1 apresenta a correlação entre a concentração de sólidos e a consistência dos resíduos.

**Tabela 1.** Consistência dos resíduos em função da concentração de sólidos.

<b>Teor de Sólidos Totais</b>	<b>Consistência</b>
0 a 5%	Líquido
8 a 12%	Esponjoso, semi-sólido
18 a 25%	Argila mole
40 a 50%	Argila rígida

Fonte: (Russell e Peck, 1997, *apud* Guimarães, 2007).

Segundo Guimarães (2007), esses resíduos em geral são caracterizados por meio de parâmetros físicos-químicos como: turbidez, pH, sólidos, fósforo, nitrogênio, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), concentração de íons metálicos de manganês e alumínio. Considerando esse panorama, a tabela 2 evidencia as variações das características tradicionais do lodo com base na literatura.

**Tabela 2.** Características dos lodos das ETAs.

<b>Autor/Ano</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>ST (mg/L)</b>	<b>SV (mg/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15000	6,0 a 7,6	1100 a 16000	20% a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1100	7	4300 a 14000	25%	80%
Bugg (1970)	380	1162 a 15800	6,5 a 6,7	4380 a 28580	20%	-
Albreeht (1972)	30 a 100	500 a 10000	5,0 a 7,0	3000 a 15000	20%	75%
Culp (1974)	40 a 150	340 a 5000	7	-	-	-
Nilsen (1974)	100	2300	-	10000	30%	-
Singer (1974)	30 a 300	30 a 5000	-	-	-	-
Cordeiro (1981)	320	5150	6,5	81575	20,70%	-
Vidal (1990)	449	3487	6,0 a 7,4	21972	15%	-
Vidal (1990)	173	1776	6,7 a 7,1	6300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5600	6,4	30275	26,30%	-
Patrizze (1998)	-	-	5,55	6112	19%	-
Patrizze (1998)	-	-	6,8	6281	-	-

Fonte: Cordeiro (1993) adaptada.

No estudo levantado Kawamura (2000), as características usuais dos lodos do decantador e água da lavagem dos filtros de uma ETA convencional que utiliza sulfato de alumínio como coagulante, apresenta as seguintes propriedades apresentadas na Tabela 3 e 4, respectivamente.

**Tabela 3.** Características dos lodos dos decantadores.

DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Sólidos Totais (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% ST)	Material Inerte (%ST)	Orgânicos (% ST)
30 a 300	30 a 5000	6 a 8	0,1 a 4	15 a 40%ST	35 a 70%ST	15 a 25%ST

Fonte: (Kawamura, 2000).

**Tabela 4.** Características das águas da lavagem dos filtros.

Turbidez (UT)	DBO (mg/L)	DQO	pH	STD (%)
150 a 250	2 a 10	30 a 150	6,5 a 7,5	0,01 a 0,05

Fonte: (Kawamura, 2000).

Diante das informações apresentadas, é fundamental considerar as diferenças dos níveis de concentração de sólidos do lodo do decantador e da água da lavagem dos filtros, a fim de realizar a segregação completa entre esses sistemas de descarga. Caso ocorra a mistura dos resíduos, elevada concentração de sólidos do lodo impactará negativamente a qualidade da água de lavagem dos filtros, impossibilitando seu reaproveitamento integral (Cornwell; Roth, 2011).

#### 2.4. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE LODO

A determinação da produção diária de lodo da ETA é uma etapa fundamental para o dimensionamento das unidades de tratamento desses resíduos (Ferreira Filho, 2017). Ao longo dos anos, diversas formulações empíricas foram desenvolvidas para determinar a quantidade de lodo, como por exemplo de *American Water Work Association - AWWA (1978)*, *Cornwell (1987)*, e *Ferreira Filho (2017)*. De acordo com *Katayama (2012)*, todas as equações partem no mesmo princípio e se diferem apenas na escolha de variáveis independentes, conforme expresso a seguir.

- ***AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION - AWWA (1978):***

A equação proposta por AWWA determina a produção de sólido seco a partir da variável da turbidez e vazão da água, refletindo a quantidade de partículas em suspensão que precisam ser removidas durante o processo de tratamento. A fórmula é expressa como:

$$W = (86400 * Q * 3,5 * T^{0,66}) * 10^{-3}$$

(1)

Em que:

W = quantidade de sólido seco (kg/dia)

T = turbidez (uT)

Q = vazão da água bruta tratada (m<sup>3</sup>/s)

- **CORNWELL (1987)**

A equação de Cornwell possibilita estimar a geração de resíduos considerando uma série de parâmetros que influenciam diretamente a formação de lodo. As principais variáveis incluem a vazão de entrada de água na estação, a dureza (representada pela presença de cálcio e magnésio), a dosagem de coagulante, a concentração de sólidos suspensos totais (SST), além da adição de cal e outros aditivos (Katayama, 2012). A expressão é descrita a seguir:

$$W = Q * 86,4 (2 * Ca + 2,6 * Mg + 0,44 * DSAI + 2,9 * DFe + SST + A) * 10^{-3}$$

(2)

Em que:

W = produção de sólidos (kg/dia);

Q = vazão de água bruta (L/s);

Ca = dureza cálcica removida (mg/L CaCO<sub>3</sub>);

Mg = dureza do magnésio removida (mg/L CaCO<sub>3</sub>);

D<sub>SAI</sub> = dosagem de sulfato de alumínio com 17,17% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mgSAI/L);

D<sub>Fe</sub> = dosagem de cloreto férrico, medido em Fe (mgFe/L);

SST = sólidos em suspensão na água bruta (mgSST/L);

A = outros aditivos (mg/L);

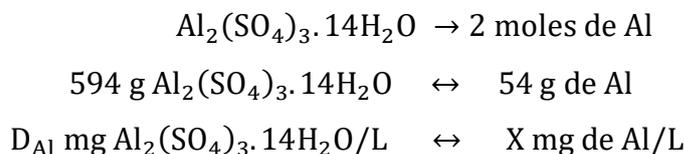
D<sub>cal</sub> = Dosagem de cal (mg/L).

- **FERREIRA FILHO (2017)**

A equação adaptada por Ferreira Filho (2017), assim como a equação de Cornwell, oferece uma abordagem detalhada e flexível para estimar a quantidade de sólidos gerados no processo de tratamento. No entanto, Ferreira Filho considera variáveis como a vazão de água bruta, os sólidos suspensos totais (SST), a dosagem de coagulantes, a turbidez da água e outros aditivos do processo (Figura 4), proporcionando uma estimativa ajustada às condições operacionais específicas.



determinar a dosagem adequada do coagulante em termos de íons de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) em mg/L, utiliza-se o seguinte princípio de estequiometria:



Portanto, ao aplicar a regra de 3, obtém-se a seguinte equação:

$$D_{\text{Al}} = \frac{D * 54}{594}$$

(4)

Em que:

$D_{\text{Al}}$  = dosagem de coagulante em mg Al/L;

D = dosagem utilizada da ETA.

### c. Sólidos decorrente do uso de coagulante

Durante o processo de coagulação, os produtos químicos reagem com os sólidos suspensos na água bruta, formando flocos que se depositam e contribuem para a geração de lodo. Desse modo, a quantidade de sólidos produzidos por coagulantes é diretamente proporcional à dosagem aplicada e à eficiência da reação do coagulante com os sólidos presentes na água (Ferreira Filho, 2017). Assim sendo, a determinação desses sólidos pode ser realizada utilizando a seguinte equação:

$$P_{L2} = Q * K_{\text{Al}} * D_{\text{Al}} * 86,4$$

(5)

Em que:

$P_{L2}$  = produção de lodo em (kg/dia);

Q = vazão em ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$D_{\text{Al}}$  = dosagem de coagulante em ( $\text{mg Al}^{+3}/\text{L}$ );

K = 4,22.

### d. Equação geral

Além das equações específicas, o autor propõe uma equação geral, expressa abaixo, que inclui a influência de outros produtos químicos ou aditivos utilizados durante o processo de tratamento, conforme apresentado abaixo:

$$P_{Ltotal} = Q * (4,22 * D_{Al} + k * Turb + OA) * 10^{-3}$$

(6)

Em que:

PL = produção de lodo seco em (kg/dia);

Q = vazão em (m<sup>3</sup>/s);

D<sub>Al</sub> = dosagem de coagulante expressa em (mg Al<sup>3+</sup>/L);

Turb = turbidez da água bruta em (NTU);

K = constante (varia de 1,0 a 2,0);

CAP = concentração de carvão ativado em (mg/L);

OA = outros aditivos em (mg/L);

## 2.5. TRATAMENTOS DO LODO

O tratamento do lodo refere-se a um conjunto de técnicas destinadas a remover o percentual de água presentes nos lodos. Neste contexto, diversos métodos tradicionais e consolidados no tratamento de resíduos sólidos de estações de tratamento de esgoto (ETE) estão sendo aplicados nos lodos de ETA (Reali, 1999).

Segundo Ferreira Filho (2017), os tratamentos englobam fases de adensamento e desidratação, cuja principal função dessas fases é elevar os teores de sólidos a níveis que permitam o manuseio adequado do lodo, visando sua destinação final. Dessa forma, avaliação do tratamento é um processo complexo, devido à interação de fatores técnicos, econômicos, ambientais e aspectos legais (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007). Portanto, a escolha do sistema de operação e tratamento é essencial para garantir a eficiência da remoção da água.

### 2.5.1. Adensamento

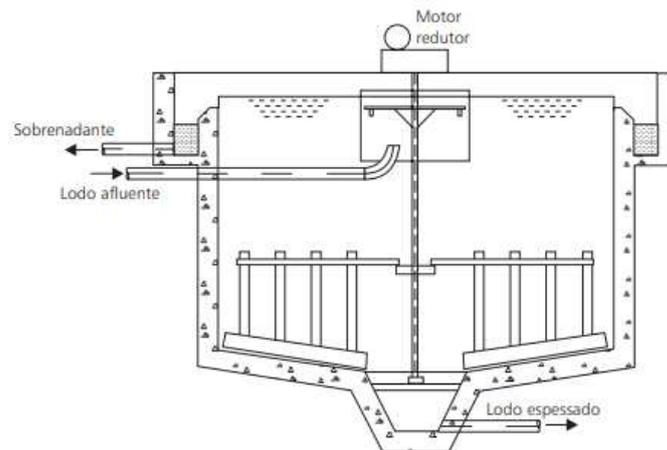
O adensamento, também conhecido como espessamento, é um processo físico que separa o volume de água do lodo e conseqüentemente aumentar a concentração de sólidos presentes. De acordo com Rodrigues (2015) o adensamento pode ser realizado antes ou após o processo de desidratação do lodo. Quando realizado previamente, este facilita a secagem devido a diminuição do volume de água e reduz a necessidade de equipamentos e espaço para a desidratação. Os principais métodos de adensamento são adensadores por gravidade, adensadores mecanizados ou flotação por ar dissolvido.

### 2.5.1.1. Adensadores por gravidade

Os adensadores por gravidade são utilizados há muitos anos e, por isso, sua aplicação é amplamente reconhecida, com parâmetros de projeto bem estabelecidos que permitem o dimensionamento correto das unidades (Ferreira Filho, 2017). De acordo com Richter (2001), o adensamento por gravidade é um processo contínuo, caracterizado por apresentar estruturas circulares conforme figura 5 e 6 e os seguintes componentes principais:

- Entrada central com um defletor de distribuição;
- Raspador de lodo;
- Paletas verticais fixadas no raspador;
- Vertedor e canalização de saída de água clarificada.

**Figura 5.** Estrutura do adensador por gravidade de forma circular.



Fonte: Reali (1999).

**Figura 6.** Adensadores por gravidade. (a) Vazio. (b) Em operação



Fonte: Ferreira Filho (2017).

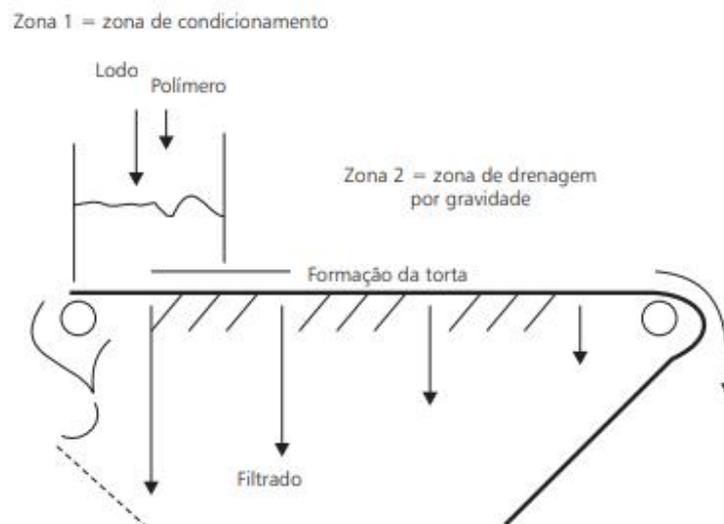
Nesse sistema, o lodo entra no centro do defletor e, devido à gravidade, os sólidos suspensos se acumulam no fundo do tanque, formando um manto de lodo. À medida que os sólidos se sedimentam, a água clarificada flui pelo vertedor, podendo ser destinada aos filtros ou ao início do tratamento. O processo de remoção dos lodos é realizado por meio de um raspador que agita o lodo suavemente, liberando a água intersticial e movendo o lodo para o centro do tanque, de onde é encaminhado para as etapas posteriores. A seguir, o quadro de vantagens e desvantagens do adensador por flotação.

#### 2.5.1.2. Adensadores mecanizados

O adensador mecânico é um equipamento simples, semelhante aos filtros-prensas de esteira, que representa uma tecnologia recente no tratamento de lodos de ETAs. Segundo Ferreira Filho (2017), o sucesso da aplicação desse sistema depende fundamentalmente da escolha de equipamentos de fabricantes íntegros e de boa reputação no mercado. Isso ocorre, pois do contrário, os equipamentos podem comprometer o desempenho do adensador, resultando em uma operação ineficiente e em custos adicionais devido à necessidade de manutenção frequente ou substituição. Portanto, a seleção criteriosa do equipamento não apenas garante a eficiência do tratamento, mas também assegura a durabilidade e a confiabilidade do sistema ao longo do tempo.

O funcionamento desse sistema baseia-se no bombeamento do lodo previamente tratado com polímero através de uma tela móvel, cuja porosidade é projetada para otimizar o sistema de drenagem da água. A figura 7 ilustra a estrutura do adensador mecânico de esteira.

**Figura 7.** Estrutura do adensador mecânico de esteira.



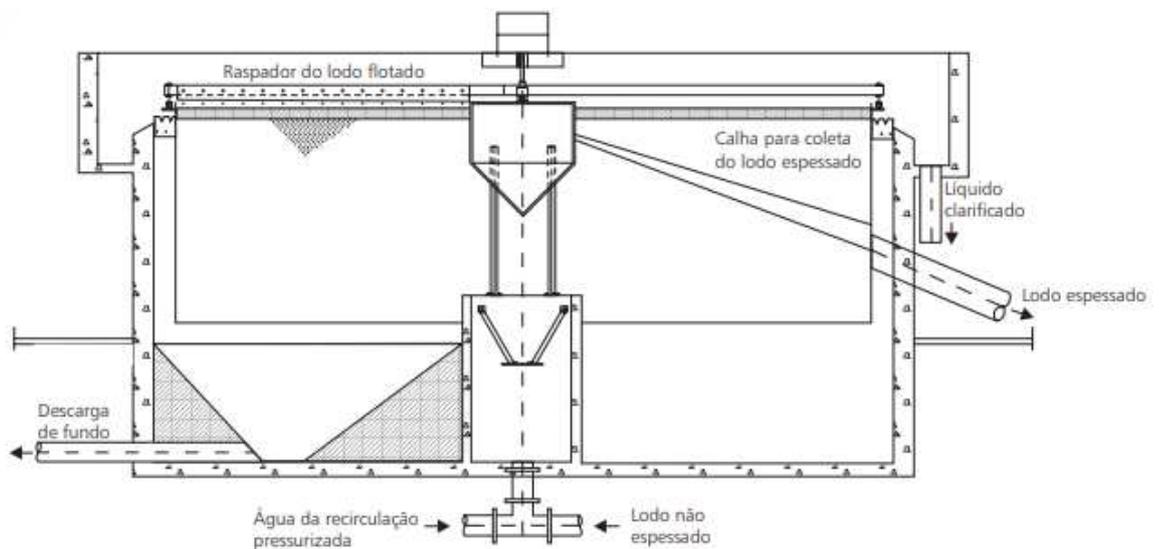
Fonte: Reali (1999).

No adensador mecânico, o lodo é tratado quimicamente com a adição de um polímero sintético para facilitar a aglutinação das partículas. Em seguida, na zona de drenagem por gravidade, a água é removida do lodo pela ação da gravidade, passando através dos espaços da esteira rolante e sendo coletada por dispositivos abaixo dela. O lodo espessado resultante é, então, descartado na extremidade da esteira.

### 2.5.1.3. Flotação por ar dissolvido

O adensamento por flotação consiste na captura de partículas sólidas através de microbolhas de ar, que reduzem sua densidade, facilitando sua separação e remoção, sendo considerado uma forma inversa de decantação (Richter, 2001). A figura 8 apresenta uma vista da estrutura do adensador por flotação de forma circular.

**Figura 8.** Adensador por flotação por ar dissolvido de forma circular.



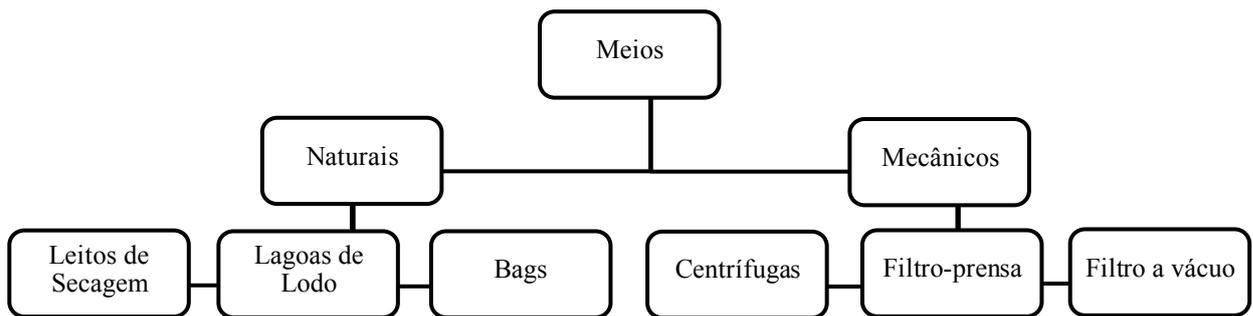
Fonte: Reali (1999).

No processo de flotação por ar dissolvido, a água de recirculação é saturada com ar sob pressão e ao reduzir rapidamente essa pressão, geram-se microbolhas de ar. Essa água, agora carregada de microbolhas, é misturada com o lodo na entrada inferior do flotador. Em seguida, as microbolhas se aderem às partículas de lodo, reduzindo sua densidade e permitindo que flutuem até a superfície do tanque. O lodo acumulado na superfície é periodicamente removido por raspadores, enquanto o lodo sedimentado no interior do flotador é descartado e enviado para tratamento (Richter, 2001).

### 2.5.2. Desidratação ou Desaguamento

A desidratação consiste na remoção da água do lodo, transformando-o em um material mais sólido e de fácil transporte. Segundo Andreoli (2001), os métodos mais utilizados para realizar a desidratação incluem meios naturais como lagoas e leitos de secagem e mecânicos como centrífugas, filtro-prensa e filtro a vácuo, conforme Figura 9.

**Figura 9.** Meios de desidratação do lodo de ETAs.



Fonte: Reali (1999).

A desidratação por meios naturais utiliza processos como gravidade e evaporação para remover a água do lodo, sendo os leitos de secagem e as lagoas de lodo as opções mais comuns (Frota; Gehling, 2019). No entanto, essas técnicas apresentam limitações, principalmente devido ao alto custo e à indisponibilidade de terrenos adequados para sua instalação, sendo mais indicadas para ETAs de baixa vazão (< 200 l/s).

Por outro lado, a desidratação por sistemas mecânicos requer o uso de energia para operar, além de demandar maior rigor nas operações e manutenções. Esses sistemas utilizam pressões diferentes da atmosférica para facilitar a remoção da água livre presente no lodo, o que implica custos adicionais de implantação. No entanto, a principal vantagem dos sistemas mecânicos é a necessidade de uma área significativamente menor para instalação.

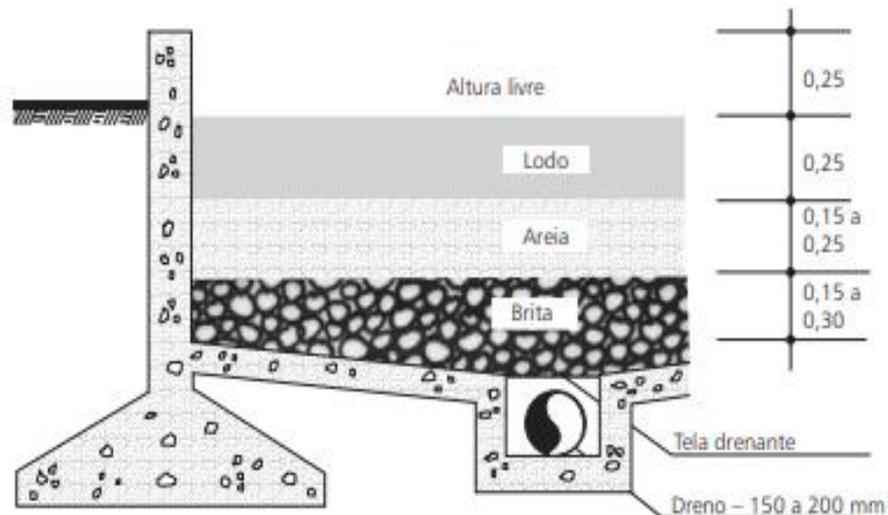
#### 2.5.2.1. Leitos de Secagem

Desde o século XX, os leitos de secagem têm sido amplamente aplicados no tratamento de águas residuais e de abastecimento, sendo tecnologias simples e eficazes para a desidratação dos lodos (Andreoli, 1999). Esse sistema promove a separação entre as frações líquida e sólida, utilizando materiais drenantes como areia, brita ou cascalho, para consequentemente facilitar a remoção da água por evaporação e drenagem.

Os mecanismos de desidratação pelos leitos de secagem consistem principalmente na decantação, drenagem e evaporação (Richter, 2001). Inicialmente, a decantação ocorre com a

sedimentação das partículas sólidas do lodo, promovendo a separação entre as frações sólida e líquida. Em seguida, a drenagem permite que a água escoe através das camadas de areia e brita, sendo conduzida para fora do leito. Por fim, a evaporação da água ocorre na superfície do lodo, acelerada pelas condições atmosféricas, completando o processo de desidratação.

**Figura 10.** Esquema do leito de secagem.



Fonte: Reali (1999).

O lodo é aplicado na superfície do leito, com altura livre suficiente para acomodar a quantidade necessária. A primeira camada situada abaixo do lodo é composta por areia, cuja espessura varia entre 0,15 e 0,25 metros. Esta camada de areia atua como um meio filtrante, permitindo a passagem da água enquanto retém as partículas sólidas do lodo na superfície. A alta permeabilidade da areia facilita o escoamento da água, evitando o transporte de sólidos.

Abaixo da camada de areia, encontra-se uma camada de brita, com espessura entre 0,15 e 0,30 metros. A função da brita é proporcionar suporte estrutural ao leito, além de facilitar o fluxo da água drenada, evitando o entupimento do sistema de drenagem. Esse material também serve como um meio de dispersão da água infiltrada, garantindo que o fluxo para o sistema de drenagem seja uniforme.

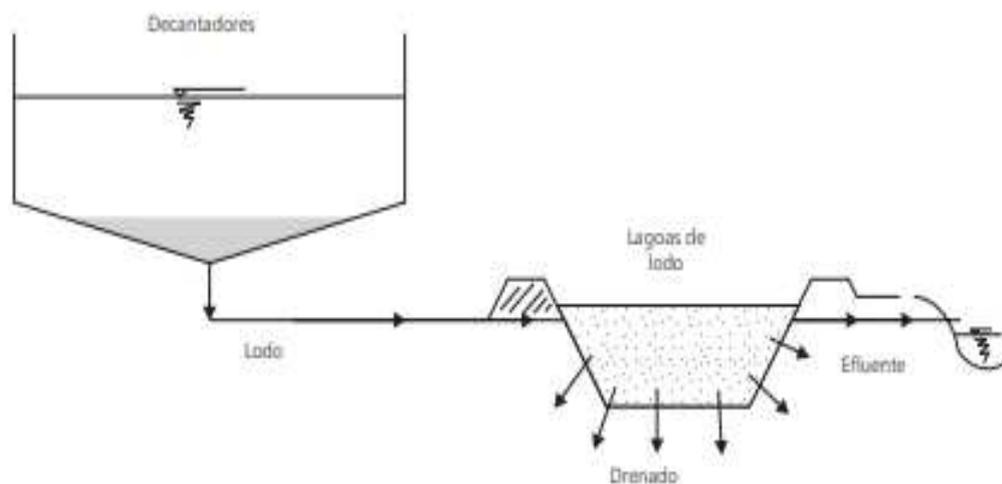
Por fim, na base do leito, localiza-se o sistema de drenagem, constituído por um dreno de diâmetro entre 150 e 200 mm, coberto por uma tela drenante. A tela atua como uma barreira para evitar que partículas de brita ou areia entrem no sistema de drenagem. O dreno é responsável por coletar e conduzir a água percolada para fora do leito, concluindo o processo de desidratação. O lodo seco, ao final, permanece na superfície, pronto para ser removido e destinado de acordo com o método de disposição final escolhido.

Nos três primeiros dias, a drenagem é responsável por reduzir o elevado percentual de líquido presente no lodo. Após esse período, o lodo assume uma consistência mais pastosa e a perda de água ocorre principalmente pela evaporação na superfície (Andreoli, 2001). A partir disso, o lodo atinge um estágio em que o processo de remoção de água se torna mais lento e depende, principalmente, das condições atmosféricas, como temperatura, umidade e ventilação. A evaporação, responsável pela maior parte da desidratação subsequente, continua até que o lodo atinja um teor de umidade adequado para o manuseio ou disposição final. Esse processo de secagem pode durar semanas, dependendo das condições climáticas e da estrutura do leito de secagem.

#### 2.5.2.2. Lagoas de lodo

As lagoas de lodo também são unidades de tratamento projetadas para o desaguamento do lodo, sendo semelhante aos leitos de secagem. De acordo com Reali (1999), o processo de desaguamento ocorre em três etapas: drenagem, evaporação e transpiração, conforme explícito na figura 11.

**Figura 11.** Esquema de lagoas de lodo.



Fonte: Reali (1999).

Inicialmente, a drenagem permite que o excesso de água escoe para o fundo da lagoa, reduzindo o volume de água livre. Na evaporação, a água superficial evapora devido à exposição ao calor e ao vento, acelerando a secagem. A transpiração, por sua vez, ocorre através da vegetação ao redor, que absorve e libera água para a atmosfera.

O período de desaguamento e o tempo de secagem pode variar significativamente, podendo levar até meses, dependendo das condições climáticas e operacionais Segundo Frota e Gehling

(2019), em áreas onde a evaporação é maior que a precipitação, essa técnica se torna uma opção viável, pois acelera o tempo necessário para a remoção do lodo seco. Além disso, o projeto das lagoas envolve a instalação de tubulações para a entrada de lodo e a saída do material decantado, além de sistemas de bombeamento e equipamentos para a remoção mecânica do lodo.

#### 2.5.2.3. Bags

A terceira opção para desidratação do lodo por meio de métodos naturais envolve a utilização de sistemas de contenção de lodo denominado bags (Guimarães; Urashima; Vidal, 2014). A desidratação por este meio usa tubos geotêxteis permeáveis para a separação sólido-líquido (Figura 12).

**Figura 12.** Bags do tipo membrana filtrantes.



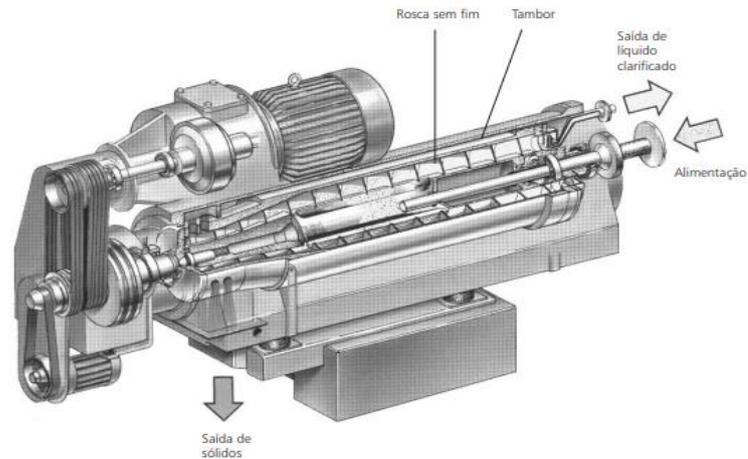
Fonte: Snatural Ambiente.

O lodo, previamente tratado com condicionantes químicos como polímeros floculantes, é bombeado para dentro dos bags. Em seguida, a água presente no lodo é drenada por meio dos poros do material geotêxtil, enquanto os sólidos são retidos no interior, promovendo a redução do volume do lodo. Ao atingir o limite dos bags, o bombeamento é interrompido mantendo o material em repouso por 30 dias, para em seguida ser retirado e destinado adequadamente (Ferreira Filho, 2017).

#### 2.5.2.4. Centrífugas

De acordo com Frota e Gehling (2019), as centrífugas são um exemplo de aplicação do princípio da separação por sedimentação em um campo de forças. Portanto, essa operação consiste em um tambor cilíndrico horizontal conforme figura 13, que ao rotacionar, promove a separação dos sólidos, acumulando-os nas paredes internas (REALI, 1999).

**Figura 13.** Centrífuga decantadora de eixo horizontal.



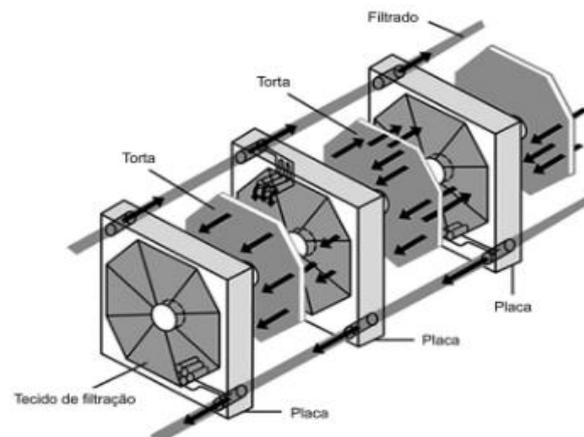
Fonte: Reali (1999).

Dessa forma, conforme ocorre à movimentação da rosca transportadora, os sólidos são arrastados continuamente para fora da camada de líquido presente no interior do tambor, para ser expelido para fora da centrífuga, isto é, sendo possível devido à forma cônica que o cilindro possui na região da descarga dos resíduos.

#### 2.5.2.5. Filtro-prensa de placas

O filtro-prensa é um equipamento utilizado para a separação intermitente de sólidos e líquidos, sendo considerado pioneiro na produção de lodo desaguado com alto teor de sólidos (Frota; Gehling, 2019). Neste sistema, o lodo é bombeado para o interior das câmaras formadas pelas placas, preenchendo os espaços entre elas (Figura 14). Em seguida, sob alta pressão, o líquido presente no lodo é forçado a atravessar um tecido filtrante que reveste as placas, enquanto os sólidos ficam retidos, formando a chamada torta de lodo.

**Figura 14.** Princípio de Funcionamento de filtro-prensa de placa.



Fonte: Ferreira Filho (2017).

Conforme o líquido é removido, os sólidos se acumulam e se compactam, resultando em uma torta cada vez mais densa. Ao final do processo de filtração, o equipamento é aberto, as placas são separadas, e a torta de lodo formada é removida manualmente ou por sistemas automatizados, facilitando o seu transporte e disposição final em aterros sanitários.

#### 2.5.2.6. Filtro a vácuo

O filtro a vácuo é um equipamento utilizado para a separação de sólidos e líquidos por meio da criação de uma pressão negativa (vácuo) que força o líquido a atravessar um meio filtrante, retendo os sólidos. O processo inicia-se com a alimentação do lodo, que é bombeado para o equipamento é distribuído sobre a superfície de um tambor, que por sua vez é dividida em setores de suporte para o meio filtrante (Reali, 1999).

Dessa forma, a pressão negativa gerada no interior do tambor promove a passagem do líquido através do meio filtrante, enquanto os sólidos ficam retidos, formando uma camada conhecida como torta de lodo. O filtrado, após atravessar o tecido filtrante, é coletado e removido do sistema por meio de bombas ou sistemas de drenagem. À medida que o tambor continua a girar, a torta de sólidos se acumula e é removida por raspadores ou jatos de água, permitindo a continuidade do ciclo de filtração de maneira ininterrupta.

O filtro a vácuo destaca-se pela sua operação contínua e alta eficiência na separação de líquidos e sólidos, sendo adequado para diferentes tipos de lodo. No entanto, seu uso pode implicar em maiores custos operacionais, devido à necessidade de manutenção frequente do sistema de vácuo e das partes móveis do equipamento, além do consumo de energia necessário para o funcionamento contínuo.

### **2.5.3. Análise Comparativa dos Métodos de Tratamento**

#### 2.5.3.1. Análise técnica e financeira

A escolha do método de tratamento de lodo em ETAs deve ser pautada por uma análise comparativa que considere tanto os aspectos técnicos quanto os financeiros. Para decidir a melhor alternativa deve considerar alguns fatores como, estudo preliminares dos processos e operações da ETA, bem como custo de investimento inicial, futuro e de reposição, despesas, condições socioeconômicas, dentre outros (Sabogal-Paz; Di Bernardo, 2005).

Segundo Oliveira e Queiroz (2023), a análise técnica pode ser aplicada para verificar viabilidade da implantação, manutenção e operações, enquanto a análise financeira geralmente

emprega-se o valor presente líquido (VPL). Essas análises contribuem para avaliar tanto a viabilidade operacional quanto a viabilidade econômica dos métodos de tratamento do lodo, colaborando para a tomada de decisões mais assertiva, considerando diversos aspectos e critérios. Elas integram diferentes critérios e aspectos, oferecendo uma visão abrangente que contribui para a escolha da solução mais eficiente e sustentável.

Os quadros 1 e 2, a seguir, apresentam um comparativo das análises técnica e financeira dos tipos de adensadores e desidratação, evidenciando suas vantagens e desvantagens.

**Quadro 1.** Análise comparativa dos tipos de adensadores.

<b>Critério</b>	<b>Adensador por Gravidade</b>	<b>Adensador Mecanizado</b>	<b>Flotador por Ar Dissolvido</b>
<b>Eficiência na Remoção de Sólidos</b>	Moderada	Alta	Alta
<b>Tempo de Processamento</b>	Lento	Rápido	Moderado
<b>Necessidade de Espaço</b>	Grande	Médio	Médio
<b>Dependência Energética</b>	Baixa	Alta	Alta
<b>Complexidade Operacional</b>	Baixa (simples)	Alta (complexa)	Alta (complexa)
<b>Custo Inicial</b>	Baixo	Alto	Alto
<b>Custo Operacional</b>	Baixo	Alto (energia e manutenção)	Alto (energia e insumos químicos)
<b>Custo de Manutenção</b>	Baixo (regular)	Alto (manutenção constante)	Alto (monitoramento regular)

Fonte: Reali (1999); Richter (2001); Sabogal Paz (2007); Ferreira Filho (2017) adaptado.

A escolha do tipo de adensador dependerá exclusivamente das necessidades específicas de cada estação de tratamento e das características dos efluentes a serem tratados. Os adensadores por gravidade são uma opção econômica e de baixa manutenção, ideais para sistemas com espaço disponível e lodos com alta concentração de sólidos. No entanto, sua eficiência é limitada e o processo é mais lento, sendo mais adequado para aplicações de menor escala (Sabogal Paz; Di Bernardo, 2005).

Por outro lado, os adensadores mecanizados oferecem alta eficiência na remoção de sólidos, sendo capazes de lidar com uma ampla gama de concentrações de lodo. Eles são mais rápidos e ocupam menos espaço, mas exigem um investimento inicial mais alto e um consumo de energia considerável, além de necessitar de manutenção regular (Ferreira Filho, 2017).

Os flotores por ar dissolvido destacam-se pela eficiência na remoção de sólidos e óleos, utilizando bolhas de ar finas para flotar as partículas indesejadas. Embora tenham um custo inicial elevado, alta complexidade operacional um maior consumo de energia, podem ser aplicados em situações com elevadas concentrações de sólidos (Sabogal Paz, 2007).

Em resumo, se a prioridade for custo e simplicidade, os adensadores por gravidade podem ser mais adequados. Para eficiência e flexibilidade em diversos tipos de lodo, os adensadores mecanizados ou os flotores por ar dissolvido seriam escolhas mais apropriadas, dependendo das características específicas do sistema de tratamento e dos recursos disponíveis.

**Quadro 2.** Análise comparativa dos tipos de desidratação.

<b>Critério</b>	<b>Leito de Secagem</b>	<b>Lagoas de Lodo</b>	<b>Centrífugas</b>	<b>Filtro-Prensa</b>	<b>Bags</b>	<b>Filtro a Vácuo</b>
<b>Eficiência de Desidratação</b>	Moderada a Alta	Moderada	Alta	Alta	Baixa a Moderada	Alta
<b>Tempo de Processamento</b>	Lento	Muito Lento	Rápido	Moderado	Moderado	Rápido
<b>Necessidade de Espaço</b>	Grande	Muito Grande	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
<b>Dependência Energética</b>	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim
<b>Complexidade Operacional</b>	Baixa	Baixa	Alta	Moderada	Baixa	Alta
<b>Custo Inicial</b>	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Baixo	Alto
<b>Custo Operacional</b>	Baixo	Baixo	Alto (energia e manutenção)	Alto (manutenção e operação)	Baixo	Alto (energia e manutenção)
<b>Custo de Manutenção</b>	Baixo (eventual)	Baixo (eventual)	Moderado (requer manutenção regular)	Moderado a Alto	Baixo (pouca necessidade)	Alto (requer manutenção constante)

Fonte: Richter (2001); Ferreira Filho (2017) adaptado.

Para situações no qual o custo inicial é uma limitação e há grande disponibilidade de área, os leitos de secagem e lagoas de lodo se destacam. Ambos possuem baixo custo de implantação e operação, além de exigirem pouca manutenção. No entanto, esses métodos têm desvantagens, como a grande área necessária e a menor eficiência em relação a outros sistemas, sendo mais adequados para ETAs com menor produção de lodo. Já os bags, embora sejam uma solução de baixo custo e manutenção, apresentam menor eficiência, sendo mais indicados para volumes pequenos de lodo ou em locais com condições climáticas favoráveis à evaporação (Ferreira Filho, 2017).

Por outro lado, quando se busca maior eficiência na remoção de água e há disponibilidade de recursos para investimento, as centrífugas, os filtros-prensa de placas e filtro

a vácuo são as melhores opções. Esses métodos oferecem alta eficiência de desidratação e ocupam menos espaço, sendo indicados para operações que precisam de maior produtividade. No entanto, requerem maior custo inicial, possuem um elevado consumo de energia e demandam manutenção mais frequente (Richter, 2001).

Assim, a melhor escolha dependerá do balanço entre custo, área disponível e eficiência desejada. Para ETAs de grande porte ou com alta demanda de desidratação rápida, as centrífugas ou filtros-prensa são as opções mais recomendadas. Já para ETAs menores ou com restrição orçamentária, os leitos de secagem ou lagoas de lodo podem ser mais viáveis.

## 2.6. DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL

A disposição final dos lodos gerados nas ETAs representa um grande desafio para os gestores dos serviços de abastecimento de água. A busca por soluções adequadas deve considerar não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também a mitigação dos riscos à saúde pública e dos impactos ambientais. Entre os principais problemas associados ao manejo inadequado desses resíduos estão a contaminação do solo, o assoreamento dos corpos hídricos, a deterioração da qualidade da água, a mortalidade da fauna aquática, mudanças na biota aquática, o aumento na concentração de metais pesados e a contribuição para o processo de eutrofização (Achon; Soares; Megda, 2005).

Atualmente, diversas soluções têm sido estudadas e desenvolvidas para identificar a melhor alternativa de disposição final. De acordo com Smiderle (2016), as principais alternativas incluem: lançamento em cursos hídricos, disposição em aterro sanitário, aplicação no solo, lançamento em estação de tratamento de esgoto (ETE), e aplicação na indústria da construção civil.

No Brasil, aproximadamente 7.500 ETAs de tratamento convencional realizam o lançamento de seus resíduos diretamente em cursos hídricos (Andreoli, 2001). De acordo com Di Bernardo e Paz (2008), esse lançamento pode ser viabilizado desde que atenda à permissão das autoridades locais e ao enquadramento definido na Resolução CONAMA 430. Embora essa prática não seja a melhor solução, ela ocorre devido aos baixos custos envolvidos, especialmente relacionados ao transporte do lodo.

Segundo Di Bernardo e Paz (2008), a disposição em aterros sanitários é um dos métodos mais utilizados no Brasil. Dessa maneira, o lodo é disposto em camadas e coberto por solos preparados para armazenar o resíduo em menor área e volume, com a finalidade de mitigar os possíveis impactos ambientais (ABNT, 1992). Esse método é indicado quando não há

possibilidade de tratamento ou aproveitamento do lodo, e, mesmo sendo uma solução comum, sua viabilidade depende da disponibilidade de espaço e do custo de operação.

A aplicação no solo é regularmente utilizada para a disposição o lodo de ETE, devido a sua elevada concentração de nutrientes e matéria orgânica (Smiderle, 2016). Em contrapartida, a técnica tem sido pouco aplicada para os lodos das ETAs, pois, além de carecer de regulamentação específica, o lodo dessas estações apresenta baixas concentrações de nutrientes e altas concentrações de metais (Tsutiya e Hirata, 2001). Assim sendo, ao considerar essa alternativa de disposição, é essencial que o lodo passe por tratamentos preliminares para reduzir a presença de contaminantes. Além disso, a aplicação demandaria altos investimentos com transportes e o monitoramento contínuo da área para evitar contaminações do solo e do lençol freático (Di Bernardo e Paz, 2008).

A destinação do lodo da ETA para tratamento em ETE também tem sido uma opção altamente considerada pelas concessionárias (Smiderle, 2016). Neste processo, o lodo dos decantadores é direcionado inicialmente para um tanque de equalização, que mantém a vazão contínua dos resíduos, facilitando o transporte subsequente para através da linha de recalque ou rede coletora de esgoto. Dessa forma, as principais vantagens são o aproveitamento de instalações e redes existentes, reduzindo custos e a eliminação da necessidade da construção das unidades adensamento e desidratação, pois a responsabilidade dessas infraestruturas é transferida para as ETEs (Ferreira Filho, 2017). Vale destacar que, o lodo da ETA pode alternar as características físico-química dos sólidos da ETE, devido a presença dos metais e produtos químicos.

A utilização do lodo na indústria da construção civil é considerada uma alternativa promissora (Morita *et al.*, 2002). Essa prática surgiu como uma solução sustentável, possibilitando o aproveitamento dos componentes minerais do lodo na fabricação de materiais como tijolos, blocos, telhas e outros produtos cerâmicos. Isso é viável devido à presença de partículas finas no lodo da ETA, que se classificam como siltes e argilas (Pereira, 2011). Além de minimizar o impacto ambiental, essa técnica reduz o volume de resíduos destinados a aterros e corpos d'água e diminui a extração de recursos naturais e matérias-primas.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada neste trabalho é de caráter descritivo e explicativo. O caráter descritivo visa apresentar o contexto relacionado à gestão e à legislação de lodo em ETAs, enquanto o caráter explicativo busca, por meio da coleta de dados específicos da ETA em estudo, caracterizar e quantificar a produção de lodo, propondo uma técnica adequada para o tratamento e disposição final. Dessa forma, as etapas da pesquisa foram baseadas e adaptada da metodologia abordada por Anderle (2017) foram revisão bibliográfica, levantamento de dados físicos e operacionais da ETA de estudo, caracterização do lodo, estimativa de lodo gerado e proposta de tratamento e disposição final.

#### 3.1. PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

##### 3.1.1. Da coleta de dados

A obtenção de dados ocorreu entre o período de agosto e setembro de 2024 através das seguintes etapas:

- **Revisão Bibliográfica:** consistiu em uma análise da literatura existente sobre o tratamento de lodos. Foram revisados publicações acadêmicas, artigos científicos, livros e normativas que discutem os aspectos legais e técnicos relacionados à gestão de lodos gerados em ETAs.
- **Levantamento dos dados físicos e operacionais da ETA:** envolveu uma abordagem dos processos e produtos químicos utilizados no tratamento da água.
- **Caracterização do lodo:** foram realizadas análises físico-químicas para identificar a composição e a concentração de substâncias presentes. O procedimento de coleta do lodo foi baseado no método proposto por Araújo (2006), com adaptações, conforme descrito a seguir:

##### a. Resíduos provenientes dos Filtros

Durante a lavagem dos filtros, foram coletadas amostras na saída do tubo de descarga nos tempos 0, 1, 2, 3, 4 e 5 minutos, resultando em um volume total de 2 litros. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas a fim de melhorar a representativa do material coletado, e adicionadas em 4 recipientes (Figura 15) para posteriormente ser encaminhada ao laboratório para a caracterização detalhada dos resíduos.

**Figura 15.** Amostras de lodo provenientes da lavagem dos filtros.



Fonte: Autoria própria (2024).

#### **b. Resíduos provenientes dos Decantadores**

No caso da lavagem do decantador, as amostras foram coletadas ao longo dos primeiros 30 minutos de operação a cada 5 minutos de intervalo, totalizando 2 litros. As amostras foram colocadas em quatro recipientes distintos (Figura 16) e, em seguida, enviadas ao laboratório, onde também seriam caracterizadas.

**Figura 16.** Amostras de lodo provenientes da descarga dos decantadores.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.1.2. Da análise de dados

Após a coleta, as amostras foram destinadas para o laboratório terceiro no qual foram realizadas as análises do lodo gerado nos pontos de geração da ETA considerando os parâmetros e metodologia de ensaio apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Parâmetros e metodologia aplicada para análise do lodo.

Parâmetros	Metodologia	Und	L.Q./Faixa
Sólidos Suspensos Totais	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	5
Sólidos Totais	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	5
Sólidos Totais Fixos	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	5
Sólidos Totais Voláteis	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	5
Turbidez	SWMM 24° Edição, 2023	UNT	-
Fosforo Total	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	0
Nitrogênio Total	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	0,5
pH a 25°C	ABNT NBR 7353:2019	pH	2,0 - 13,0
Alumínio Total	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	0
Manganês Total	Fries, J. <i>et al.</i> , 1977	mg/L	0,1
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5)	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	2
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SWMM 24° Edição, 2023	mg/L	5

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir dos resultados, o trabalho procedeu com cálculo de produção de lodo por meio da equação empírica adaptada por Ferreira Filho (2017), que permite uma perspectiva detalhada, flexível e de fácil compreensão para estimar dos sólidos gerados no processo da ETA. Por fim, as conclusões extraídas dessa análise fundamentaram a proposta de tratamento de lodo, levando em consideração as características físicas e operacionais da ETA e específicas dos resíduos gerados.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

### 4.1. DADOS FÍSICOS E OPERACIONAIS

A concepção do sistema de tratamento dos resíduos gerados na ETA depende intrinsecamente das características físicas e operacionais do processo do tratamento da água. Os dados físicos incluem informações da água bruta, como turbidez e pH. Já os dados operacionais abrangem informações sobre a população, vazão de entrada água e a dosagem de produtos (Frota; Gehling, 2019).

A ETA analisada neste estudo está situada no estado de Rondônia e realiza a captação de água de um manancial superficial, aplicando o tratamento convencional, que abrange etapas desde a coagulação até a desinfecção. Os detalhes operacionais específicos da ETA, estão apresentados na Tabela 6, permitindo uma compreensão mais abrangente da sua estrutura e desempenho.

**Tabela 6.** Dados físicos e operacionais da ETA.

<b>Dados operacionais</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Análise</b>
População atendida	Nº de habitantes	60.000 a 100.000
Vazão de operação	Vazão (m <sup>3</sup> /h) de água bruta	850
Turbidez	(NTU)	50
pH	6,79	6,70
Produtos químicos	Produtos utilizados no tratamento	Sulfato de Alumínio
Dosagem do coagulante	(mg/L)	20
Processos unitários	Tipo de tratamento de água aplicado	Ciclo completo

Fonte: Frota e Gehling (2019) adaptado.

Com base na literatura e nas informações previamente apresentadas, pode-se afirmar que esses dados influenciam na estimativa da quantidade de lodo gerado, sendo indispensável considerá-los no dimensionamento dos sistemas de tratamento. É importante destacar que esses parâmetros estão sujeitos a variações decorrentes de mudanças climáticas, uma vez que, durante os períodos de chuva, a turbidez tende a aumentar, enquanto nos períodos de estiagem, ocorre uma redução considerável nesse índice.

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO LODO

Os resultados dessas análises para o lodo do decantador e do filtro são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

**Tabela 7.** Análise de lodo proveniente do decantador.

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>Und</b>	<b>VMP</b>	<b>L.Q./Faixa</b>
Sólidos Suspensos Totais	2.070,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais	2.480,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais Fixos	1.680,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais Voláteis	800	mg/L	N. A	5,0
Turbidez	>1.000,00	UNT	N. A	-
Fosforo Total	1,9	mg/L	N. A	0,0
Nitrogênio Total	2,25	mg/L	N. A	0,5
pH a 25°C	6,75	pH	N. A	2,0 - 13,0
Alumínio Total	0,08	mg/L	N. A	0,0
Manganês Total	5,63	mg/L	N. A	0,1
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5)	92,3	mg/L	N. A	2,0

Demanda Química de Oxigênio (DQO)	183,5	mg/L	N. A	5,0
-----------------------------------	-------	------	------	-----

Fonte: Aatoria própria (2024).

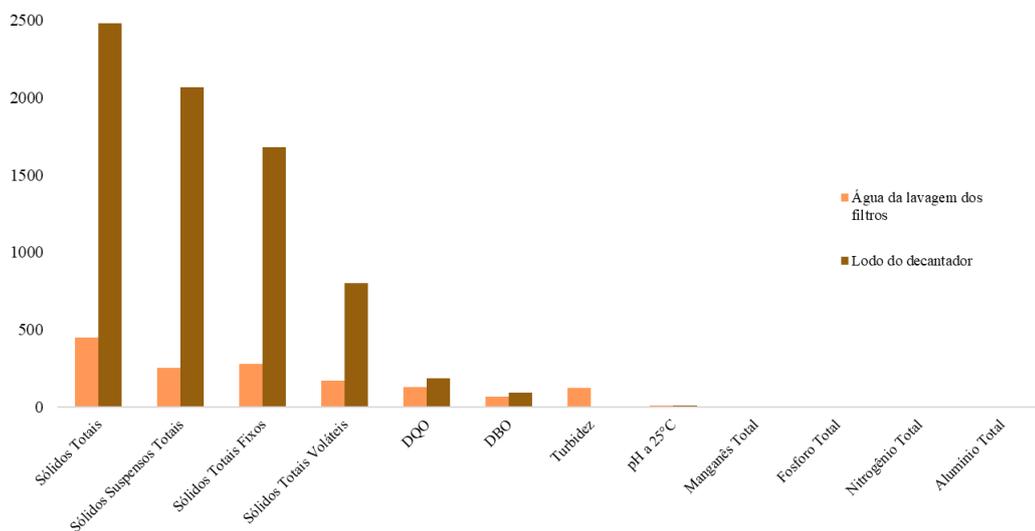
**Tabela 8.** Análise de lodo proveniente do filtro.

Parâmetros	Resultados Analíticos	Und	VMP	L.Q./Faixa
Sólidos Suspensos Totais	250,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais	450,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais Fixos	280,00	mg/L	N. A	5,0
Sólidos Totais Voláteis	170	mg/L	N. A	5,0
Turbidez	122	UNT	N. A	-
Fosforo Total	1,04	mg/L	N. A	0,01
Nitrogênio Total	0,53	mg/L	N. A	0,5
pH a 25°C	7,20	pH	N. A	2,0 - 13,0
Alumínio Total	0,79	mg/L	N. A	0,01
Manganês Total	0,92	mg/L	N. A	0,05
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5)	64,60	mg/L	N. A	2,0
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	128,90	mg/L	N. A	5,0

Fonte: Aatoria própria (2024).

O Gráfico 1 apresenta uma comparação dos parâmetros analisados entre os lodos provenientes do decantador e dos filtros da ETA, evidenciando as diferenças nos valores observados.

**Gráfico 1.** Comparação de parâmetros dos lodos do decantador e filtro



Fonte: Aatoria própria (2024).

A análise dos dados obtidos dos lodos provenientes dos decantadores e filtros permite compreender a qualidade e das características dos resíduos gerados durante o processo de tratamento de água. Os resultados analíticos das tabelas e gráfico indicam diferenças

considerável entre as amostras coletadas conforme apontado pelo autor Corwnell (1987), refletindo as distintas condições de operação e eficiência de remoção de contaminantes em cada etapa do processo.

Os lodos resultantes do decantador apresentaram concentrações elevadas de sólidos suspensos totais (2.070,00 mg/L) e sólidos totais (2.480,00 mg/L), além de uma turbidez superior a 1.000 UNT, indicando uma alta carga de partículas em suspensão. Por outro lado, os lodos coletados dos filtros mostraram valores significativamente menores em todos os parâmetros analisados, como sólidos suspensos totais (250,00 mg/L) e turbidez (122 UNT), sugerindo uma eficiência maior na remoção de partículas durante a filtração, resultando em um resíduo menos concentrado e problemático em termos de disposição final.

No entanto, as concentrações de nutrientes como fósforo total e nitrogênio total, embora menores em comparação aos lodos do decantador, ainda são relevantes e devem ser monitoradas. Além disso, a análise dos parâmetros químicos, como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), evidencia a presença de matéria orgânica nos lodos, com os valores do decantador (DBO 5: 92,3 mg/L e DQO: 183,5 mg/L) sendo superiores aos do filtro (DBO 5: 64,60 mg/L e DQO: 128,90 mg/L). Esses dados são essenciais para a avaliação da biodegradabilidade dos lodos e para o planejamento de estratégias de disposição que garantam a conformidade com as normas ambientais.

Em síntese, verificou-se que os lodos provenientes do decantador apresentam concentrações mais altas de sólidos suspensos e turbidez em relação aos lodos gerados nos filtros. Embora o lodo da ETA analisada não apresente elevadas concentrações de metais, o descarte contínuo desse resíduo em corpos hídricos, sem o devido tratamento, pode levar a impactos ambientais ao longo do tempo.

#### 4.3. ESTIMATIVA DE LODO GERADO

A estimativa da produção diária de lodo diária depende das características da água captada e da tecnologia utilizada no processo ETA (Oliveira; Queiroz, 2023). Desse modo, para determinar o volume de lodo, utilizou-se a equação empírica adaptada por Ferreira Filho (2017), cuja variáveis em destaque são SST da vazão de água bruta, a dosagem de coagulantes e a turbidez da água.

Dessa forma, inicialmente calculou-se os sólidos provenientes da água bruta. Para isso, será utilizado as informações de vazão, turbidez, dosagem e constante K da ETA de estudo, conforme apresentada na tabela 9.

**Tabela 9.** Dados para cálculo dos SST da água bruta.

Dados	Valor	Und
Vazão	0,236	m <sup>3</sup> /s
Turbidez	50	NTU
Dosagem	20	mg/L
K	1	-

Fonte: Autoria própria (2024).

A quantidade de sólidos provenientes da água bruta foi determinada pela equação 7, que substituindo os valores, tem-se:

$$P_{L1} = Q * (K * Turb) * 86,4$$

$$P_{L1} = 0,236 * 1,0 * 50 * 86,4$$

$$P_{L1} = \mathbf{1.019,52 \text{ Kg/dia}}$$

(7)

Portanto, a quantidade de sólidos provenientes da água bruta é 1019,52 Kg/dia.

Em seguida, aplicou-se o cálculo estequiométrico para determinar a dosagem de coagulante em termos de íons de alumínio (Al<sup>3+</sup>), expressa em mg/L. A reação química do sulfato de alumínio para formar hidróxido de alumínio gera sólidos, e a dosagem é calculada conforme mostrado abaixo:



Sabendo que 594 g de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·14H<sub>2</sub>O correspondem a 54 g de Al, 20 mg de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·14H<sub>2</sub>O corresponderá a 1,82mg Al/L (Equação 8):

$$594 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 54 \text{ g de Al}$$

$$20 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \frac{14\text{H}_2\text{O}}{\text{L}} \leftrightarrow \text{xmg de Al/L}$$

$$D_{\text{Al}} = \frac{20,0 * 54}{594}$$

$$D_{\text{Al}} = \frac{1,82 \text{ mg Al}}{\text{L}}$$

(8)

A produção de lodo proveniente do coagulante foi então calculada pela equação 9, que substituindo os valores equivale a:

$$P_{L2} = Q * K_{\text{Al}} * D_{\text{Al}} * 86,4$$

$$P_{L2} = 0,236 * 4,22 * 1,82 * 86,4$$

$$\mathbf{P_{L2} = 156,60 Kg/dia}$$

(9)

Dessa maneira, a quantidade de sólidos provenientes dos coagulantes é 156,60 Kg/dia. Por fim, para obter a produção total do lodo realiza-se o somatório de  $P_{L1}$  e  $P_{L2}$  ou utiliza-se a equação geral. Dessa forma, tem-se:

$$P_{Ltotal} = 0,236 \frac{m^3}{dia} * 86400 \frac{s}{dia} (4,22 * 1,82 + 1,0 * 50) * 10^{-3}$$

$$\mathbf{P_L = 1176,12Kg/dia}$$

(10)

Assim, a produção total de lodo seco ser equivalente a 1.176,12 kg/dia o que corresponde à massa de sólidos secos que será destinada para a disposição final.

#### 4.4. PROPOSTA DE TRATAMENTO

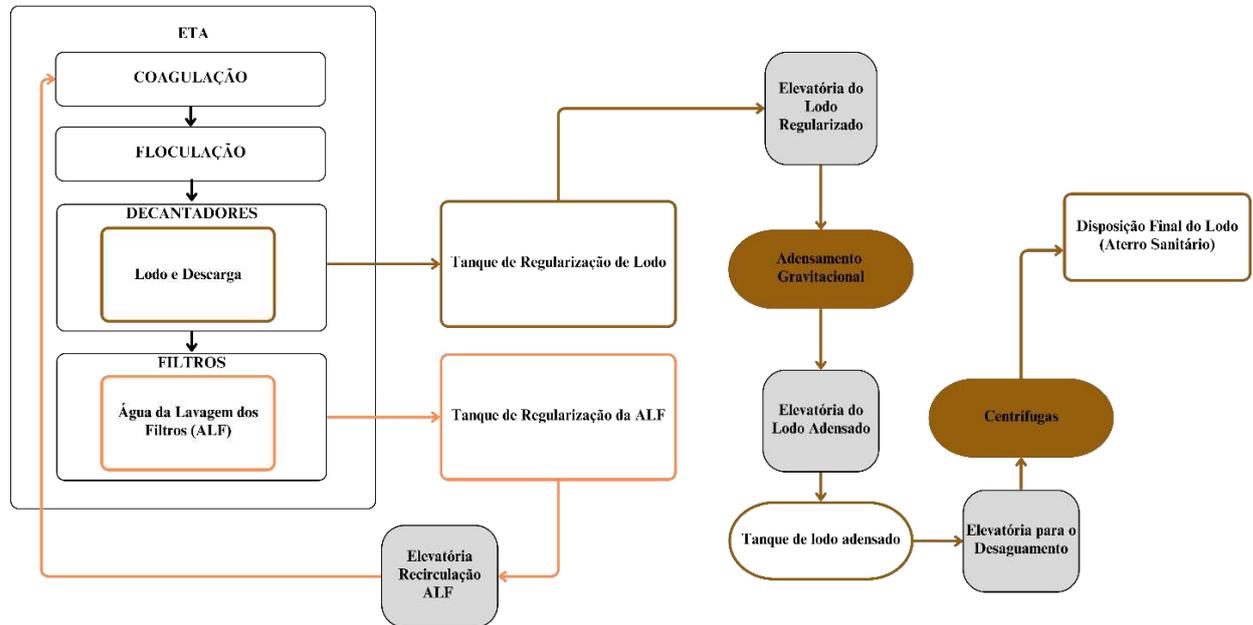
Os resíduos gerados nas diferentes etapas do processo de tratamento de água, os possuem características específicas, especialmente em relação a vazão e a concentração de sólidos presentes (Ferreira Filho, 2017). Dessa maneira, o tratamento dos resíduos da ETA precisa ser adaptado às particularidades de cada linha geradora de resíduos, levando em consideração as diferenças na composição e volume dos sólidos para garantir um tratamento eficiente.

Nesse contexto, a seleção das técnicas envolve a aplicação de abordagens específicas para tratar os diferentes resíduos. Tal escolha foi fundamentada nas características de cada resíduo e na busca por eficiência operacional. O lodo do decantador apresenta uma alta concentração de sólidos, demandando etapas de adensamento e desidratação para reduzir o volume e facilitar sua disposição final. Por outro lado, a água da lavagem dos filtros (ALF), caracterizada por um baixo teor de sólidos suspensos e alto volume de água, requer uma abordagem que permita sua recirculação ao sistema de tratamento, conforme apontado nas análises físico-químicas e abordado por Cornwell e Roth (2011).

Dessa forma, o lodo proveniente da decantação passará pelo processo de adensamento gravitacional e desidratação por centrífugas, enquanto a ALF será encaminhada a tanques de

equalização ou regularização para reaproveitamento no sistema de tratamento, conforme a ilustração da Figura 17.

**Figura 17.** Proposta de tratamento de lodos da ETA de estudo.



Fonte: Autoria própria (2024).

O lodo gerado na decantação é encaminhado para um tanque de equalização ou regularização para armazenamento. Após a regularização, o lodo do decantador é direcionado para um adensador gravitacional, no qual a força gravitacional separa a fase líquida da sólida, aumentando a concentração de sólidos e reduzindo o volume a ser tratado, o que também diminui a quantidade de água a ser manejada, otimizando custos operacionais.

Durante o adensamento, as partículas sólidas presentes no lodo tendem a se acumular no fundo do tanque, formando uma massa mais densa. A água sobrenadante que se encontra acima da camada de lodo adensado é, então, removida, sendo encaminhada para o sistema de recirculação ou tratada separadamente, conforme as especificações do sistema da ETA.

Em seguida, o lodo adensado, é então transferido, por meio de uma elevatória, para uma unidade de desidratação, onde o processo é realizado por centrífugas. A desidratação por centrífuga utiliza a força centrífuga para separar a água residual dos sólidos, formando uma “torta” de lodo com umidade reduzida. Após a desidratação, o lodo desidratado, agora denominado torta de lodo, é então direcionado para disposição final em aterro sanitário, conforme as normas ambientais vigentes.

Após a lavagem dos filtros, a ALF é direcionada para um tanque de regularização, que além de permitir o armazenamento, também é responsável por garantir um fluxo de água mais constante e controlado para equilibrar possíveis flutuações no volume de água de lavagem,

otimizando o desempenho do sistema. Uma vez regularizada, a ALF é encaminhada para uma estação elevatória, que a transporta de volta ao início do processo de tratamento da ETA. Essa recirculação permite que a água de lavagem dos filtros seja reaproveitada no processo de coagulação e floculação, reduzindo o consumo de água bruta e promovendo uma operação mais sustentável.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão eficiente dos resíduos gerados nas ETAs é essencial para garantir a conformidade com as normas ambientais, além de contribuir para a sustentabilidade e preservação dos recursos naturais. O lodo produzido durante as operações dessas estações pode conter metais pesados, produtos químicos e compostos inorgânicos que, sem o devido tratamento e disposição, têm o potencial de contaminar o solo e os recursos hídricos, causando sérios impactos à saúde humana e aos ecossistemas. Nesse sentido, a caracterização física do lodo e a análise detalhada de sua quantidade e qualidade são etapas indispensáveis para a seleção das melhores alternativas de tratamento, como adensamento, desidratação e disposição final.

Neste estudo, foi proposta a combinação do adensamento gravitacional com a desidratação por centrífuga como solução para o tratamento de lodo em uma ETA localizada em Rondônia. A escolha das técnicas considerou a restrição espacial e a necessidade de eficiência no processo, mostrando-se viável para otimizar a redução do volume de lodo e diminuir os custos com transporte e disposição final. Embora as centrífugas apresentem custos iniciais elevados, o retorno sobre o investimento é compensador ao longo do tempo. No entanto, reforça-se a importância de monitorar continuamente o desempenho das técnicas aplicadas, bem como explorar novos métodos de tratamento e aproveitamento do lodo em estudos futuros, garantindo maior eficiência operacional e redução de impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ABOY, N. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 101p., 1999.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S.; **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v.18, 2013.
- ACHON, C. L.; SOARES, L. V.; MEGDA, C. R. **Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água.** Anais... In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. NBR 8.419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro: [s.n.], 1992.
- ANDRADE, C.F.; SILVA, C.M.; OLIVEIRA, F.C. **Gestão ambiental em saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de eta e seus impactos na qualidade das águas.** Belo Horizonte, 2014.
- ANDERLE, G.; SILVA, S. C. B.; SILVA, W. T. P. **Dimensionamento da estação de tratamento de resíduos da ETA Nobres-MT.** Congresso Abes, 2017. Disponível em: <[http://evoluedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2307\\_dimensionamento-da-estacao-de-tratamento-de-residuos-da-eta-de-nobres-mt](http://evoluedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2307_dimensionamento-da-estacao-de-tratamento-de-residuos-da-eta-de-nobres-mt)>. Acesso em: 24 set. 2024.
- ANDREOLI, C. V.; *et al.* **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro, RiMa, ABES, 2001.
- ANDREOLI, C. V.; *et al.* **Estação de tratamento de água e a geração de resíduos sólidos: estudo de caso.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 222-229, 2006.
- ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. VON; FERNANDES, F. **Sludge treatment and disposal.** IWA Publ, 2007.
- ARAÚJO, A. P. M. **Avaliação operacional e características do lodo gerado na indústria de água do litoral sul de Pernambuco.** Recife, 2006.
- BILLATTO, R. J. M.; CECCHINI JUNIOR, V. **Métodos para tratamento e potencial reutilização do lodo oriundo de estações de tratamento de água.** Revista Científica Multidisciplinar, v.3, n.10, 2022.
- BRAGA, R. M. **Dimensionamento e tratamento de lodo de ETA: revisão bibliográfica.** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

BRASIL. **Lei nº 9.605, 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, 2010. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 10 set. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010. Disponível em: <[L12305 \(planalto.gov.br\)](https://www.planalto.gov.br)>. Acesso em: 10 set. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: CONAMA, 2005.

BRASIL. **Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso: 18 out. 2024.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.** Escola de Engenharia de São Carlos, 1993.

CORDEIRO, J.S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In: REALI, M.A.P., coord. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro, ABES. Cap.1, p.1-19, 1999.

CORNWELL, D. A.; ROTH, D. K. **Water treatment plant residuals management.** In: EDZWALD JK, ed. Water quality & treatment: a handbook on drinking water. New York: McGraw-Hill; 2011.

COSTA, E. R. M.; OLIVEIRA, G. F. S. **Caracterização e destinação ambiental do lodo gerado pelas Estações de Tratamento de Água - ETAs.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 10, Vol. 24, pp. 25-38, 2020. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenhariaambiental/destinacao-ambiental>>. Acesso em: 20 de set. 2024.

CUNHA, G. D.; LIMA, J. S. V.; STACHIW, R; TRONCO, K. M. Q. **Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água.** Nature and Conservation, v.12, n.2, p.19-30, 2019.

DA COSTA, N. R. M. **Gestão do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) – Análise Crítica de uma Minuta em tramitação no Rio Grande do Sul a fim de propor uma resolução mais adequada.** UFRGS, 2022.

DI BERNARDO, Luiz. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** Rio de Janeiro: Abes, 1993.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** São Carlos: LDiBe Editora, 2008.

**DUARTE, M. A. C. Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração.** São Carlos, 2011.

**FARIAS, G. A. Caracterização dos resíduos da estação de tratamento de água da cidade de Lavras – MG.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

**FERREIRA FILHO, S. S. Tratamento de Água: Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento.** Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017.

**FROTA, T. B.; GEHLING, G. R. Proposta de metodologia para análise de projetos de tratamento de lodos de ETA.** LETA, 2021.

**FROTA, T. B.; GEHLING, G. R.; SILVA, S. W. Análise técnico-financeira de alternativas de processos de desidratação de lodos de ETA.** AUGM, 2019. Disponível em: <Microsoft Word - Thais Frota.odt (fing.edu.uy)>. Acesso em: 10 out. 2024.

**GUIMARÃES, G. C. Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-107/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

**GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. C.; VIDAL, D. M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems.** Geosynthetics International, 2014.

**KAWAMURA S. Integrated design and operation of water treatment facilities.** 2nd ed. New York: Wiley, 2000.

**MORAES, B. S. Utilização de lodos de Estações de Tratamento de Água como fonte alternativa de energia.** Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2017.

**MOLINA, T. Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata.** Revista de Engenharia e Tecnologia, 2010.

**MORITA, D.M.; SAMPAIO, A.O.; MIKI, M.K. e DAVID, A.C. Incorporação de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos.** In: X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, SILUBESA, Anais (CD-Rom), pp.1-15. Braga. PORTIGAL. 15-1, 2002.

**OLIVEIRA, L. O.; QUEIROZ, S. C. B. Estudo comparativo técnico e financeiro entre tecnologias de desaguamento de lodo de estação de tratamento de água.** Revistaft, 2023.

**PEREIRA, S. L. M. Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame.** João Pessoa, 2011.

**PEREIRA, T. M.; GOMES, M. H. R.; PEREIRA, R. O. Estimativa final da produção de lodo em estações de tratamento de água: estudo de caso.** UFJF, 2014.

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.** Disponível em: < L12305 (planalto.gov.br) >. Acesso: 07 out. 2024.

REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções Gerais de Tratamento de Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água.** Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999.

RIBEIRO, C. F. **Uso de sistemas de informações geográficas na gestão do lodo das estações de tratamento de água de uma bacia hidrográfica.** São Paulo: Campinas, 2008.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologias de tratamento.** São Paulo: Blücher, 2009.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** 1 ed. São Paulo: Blücher. 102 p., 2001.

RUSSELL, J.S. PECK, B.E. **Process Residuals.** In: Hager, L. (ed.) *Water Treatment Plant Design.* 3ª edição. American Water Works Association/American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 485-530p, 1997.

SABESP. **Tratamento de água.** Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/o-que-fazemos/fornecimento-agua/tratamento-agua>. Acesso em: 18 set. 2024.

SABOGAL-PAZ, L. P.; DI BERNARDO, L. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e de disposição dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água.** In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES: Campo Grande, 2005.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte.** 509 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, L. H. F.; ISAAC, R. L.; FONSECA, C. G. M. **Gerenciamento do lodo das estações de tratamento de água do município de Salto-SP: logística e transportes.** UNICAMP, 2023.

SMIDERLE, J. J. **Estudo de Viabilidade para Destinação Final do Lodo da ETA Laranjal/RJ.** Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2016.

SMOLLEN, M. KAFFAR, A. **Electroosmotically Enhanced Sludge Dewatering: Pilot-Plant Study.** *Water Science Technology – IAWQ.* V30, n.8, p.159-168. 1994.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo.** Trabalho Técnico apresentado no 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Drinking water treatment plant residual management technical report: Summary of residuals generation, treatment and disposal at large community water systems.** 2011.

## RELATÓRIO DE VERIFICAÇÃO DE PLÁGIO

**DISCENTE:** Rayssa Almeida da Rocha Souza

**CURSO:** Engenharia Ambiental e Sanitária

**DATA DE ANÁLISE:** 22.11.2024

### RESULTADO DA ANÁLISE

#### Estatísticas

Suspeitas na Internet: **0,66%**

Percentual do texto com expressões localizadas na internet [▲](#)

Suspeitas confirmadas: **0,44%**

Confirmada existência dos trechos suspeitos nos endereços encontrados [▲](#)

Texto analisado: **84,05%**

*Percentual do texto efetivamente analisado (frases curtas, caracteres especiais, texto quebrado não são analisados).*

Sucesso da análise: **100%**

*Percentual das pesquisas com sucesso, indica a qualidade da análise, quanto maior, melhor.*

Analisado por Plagius - Detector de Plágio 2.9.6  
sexta-feira, 22 de novembro de 2024

### PARECER FINAL

Declaro para devidos fins, que o trabalho da discente RAYSSA ALMEIDA DA ROCHA SOUZA n. de matrícula **44362**, do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, foi aprovado na verificação de plágio, com porcentagem conferida em 0,66%. Devendo a aluna realizar as correções necessárias.

Assinado digitalmente por: ISABELLE DA SILVA SOUZA  
Razão: Responsável pelo documento  
Localização: UNIFAEMA - Ariqueme/RO  
O tempo: 22-11-2024 20:26:12

**ISABELLE DA SILVA SOUZA**  
**Bibliotecária CRB 1148/11**  
Biblioteca Central Júlio Bordignon  
Centro Universitário Faema – UNIFAEMA