UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

GEOVANNA RAFAELA PASUCH HAUENSTEIN

AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES DO RESÍDUO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA

Ribeirão Preto
2024

GEOVANNA RAFAELA PASUCH HAUENSTEIN

AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES DO RESÍDUO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA

Dissertação apresentada à Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, como requisito de avaliação para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Profa. Dra. Isadora Alves Lovo Ismail
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Bortoletto Santos

Ribeirão Preto
2024

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

HAUENSTEIN, Geovanna Rafaela Pasuch, 2000-

H368a

Coorientador: Prof.° Dr.° Ricardo Bortoletto Santos.

Dissertacao (Mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental, 2024.

1. RESÍDUOS SÓLIDOS. 2. ADENSAMENTO POR GRAVIDADE. 3. POLÍMEROS. 4. ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO. 5. DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES. II. Título.

GEOVANNA RAFAELA PASUCH HAUENSTEIN

AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES DO RESÍDUO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA

Dissertação apresentada à Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, como requisito de avaliação para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental

Resultado: Aprovada

Aprovação: 02/12/2024

gov.br Documento assinado digitalmente ISADORA ALVES LOVO ISMAIL Data: 04/12/2024 07:39:21-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	gov.br Documento assinado digitalmente HEITOR BUZETTI SIMOES BENTO Data: 03/12/2024 15:19:18-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	gov.br Documento assinado digitalmente MARILIA VASCONCELLOS AGNESINI Data: 03/12/2024 19:29:03-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Profa. Dra. Isadora Alves Lovo Ismail ***Presidente/UNAERP***	Prof. Dr. Heitor Buzetti Simões Bento ***UNESP***	Profa. Dra. Marília Vasconcellos Agnesini ***UNAERP***

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela força e sabedoria para chegar até aqui.

Aos meus pais Neiva e Altamir e meu noivo Olavo que sempre estiveram ao meu lado, incentivando nos momentos difíceis e torcendo pelo meu sucesso.

Às pessoas especiais que passaram pelo meu caminho ao longo dessa jornada e dividiram comigo experiências.

Aos professores Dr[a]. Isadora Alves Lovo Ismail e Dr. Ricardo Bortoletto-Santos por todo conhecimento transmitido.

Aos estagiários e colaboradores do laboratório da UNAERP, pelo auxílio na execução desse projeto: Júlia e Daniel.

À UNAERP pela disponibilização do laboratório e recursos necessários.

RESUMO

A geração desordenada de resíduos reacende no mundo a preocupação com a preservação e saúde do meio ambiente e sociedade. Problemas ambientais, sociais e econômicos estão intimamente ligados aos elevados padrões de produção, comercialização, consumo e descarte de materiais. O tratamento e a destinação ambientalmente adequados dos resíduos sólidos industriais, bem como seu gerenciamento, são de extrema importância para que se alcance o desenvolvimento sustentável. O tratamento de efluentes em Estações de Tratamento é necessário para a diminuição dos riscos causados à saúde humana e ao meio ambiente, e o lodo gerado nesse processo deve ser destinado corretamente. A redução prévia do volume do lodo gerado por ETE's apresenta grande relevância em razão do elevado custo aplicado à destinação desse resíduo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a redução do volume e a concentração de sólidos secos do resíduo sólido proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria química localizada no município de Sertãozinho-SP através da tecnologia de desaguamento por blocos drenantes. Para isso, foram testados diferentes tipos de condicionantes químicos nos ensaios de adensamento do lodo por gravidade realizados em escala laboratorial, onde, a partir do cálculo do Índice Volumétrico de Lodo (IVL), foram escolhidos os polímeros que apresentaram melhores resultados de sedimentabilidade para realização dos ensaios de desaguamento por blocos drenantes. Nos ensaios de desaguamento, 20 L do resíduo foram depositados em um leito de secagem por blocos drenantes em escala laboratorial com a adição de coagulante, onde foram coletadas amostras de líquido drenado para verificação da redução de volume e de lodo para determinação do teor de sólidos secos. Os resultados mostraram que o uso de polímeros catiônicos foi mais eficiente quando comparado com os polímeros aniônico e natural. O uso de dosagens maiores também apresentou resultados melhores. A utilização do leito de secagem por blocos drenantes se mostrou uma excelente alternativa para a redução de volume e secagem do lodo, tendo o polímero de melhor performance alcançado a redução de 93,6% do volume de lodo no período de dois dias e com teor de sólidos secos de, aproximadamente, 96% após 23 dias de secagem, proporcionando uma diminuição de cerca de 64% nos custos de destinação para a empresa.

Palavras-chave: RESÍDUOS SÓLIDOS; ADENSAMENTO POR GRAVIDADE; POLÍMEROS; ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO; DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES.

ABSTRACT

The disorderly generation of waste rekindles worldwide concern about the preservation and health of the environment and society. Environmental, social and economic problems are closely linked to high standards of production, commercialization, consumption and disposal of materials. The environmentally appropriate treatment and disposal of industrial solid waste, as well as its management, are extremely important to achieve sustainable development. The treatment of effluents in Treatment Stations is necessary to reduce the risks caused to human health and the environment, and the sludge generated in this process must be disposed of correctly. The prior reduction in the volume of sludge generated by ETPs is of great importance due to the high cost applied to the disposal of this waste. The present work aimed to evaluate the reduction in the volume and concentration of dry solids of solid waste from the effluent treatment station of a chemical industry located in the municipality of Sertãozinho-SP through dewatering technology using drainage blocks. To this end, different types of chemical conditioning factors were tested in gravity sludge thickening tests carried out on a laboratory scale, where, based on the calculation of the Sludge Volumetric Index (SVI), the polymers that presented the best sedimentability results were chosen for carrying out of dewatering tests using drainage blocks. In the dewatering tests, 20 L of the residue was deposited in a drying bed using drain blocks on a laboratory scale with the addition of coagulant, where samples of the drained liquid were collected to verify the reduction in volume and of sludge to determine the solids content. dry. The results showed that the use of cationic polymers was more efficient when compared to anionic and natural polymers. The use of higher dosages also showed better results. The use of the drying bed using drainage blocks proved to be an excellent alternative for reducing the volume and drying of sludge, with the best performing polymer achieving a 93.6% reduction in sludge volume over a period of two days and with a content of dry solids of approximately 96% after 23 days of drying, providing a reduction of approximately 64% in disposal costs for the company.

Keywords: SOLID WASTE; GRAVITY DENSION; POLYMERS; SLUDGE VOLUMETRIC INDEX; DEWATERING BY DRAINING BLOCKS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Classificação de Resíduos Sólidos. 21
Figura 2 - Os 5 P’s da Sustentabilidade. 27
Figura 3 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 31
Figura 4 – Recursos disponíveis para a implementação dos ODS’s no Brasil em 2024. 32
Figura 5 – Destinações mais utilizadas de Resíduos Sólidos. 36
Figura 6 – Adensador por gravidade. 37
Figura 7 – Método de ensaio de sedimentação em proveta. 38
Figura 8 – Ensaio de sedimentabilidade do lodo. 39
Figura 9 – Formas de associação da água com o lodo. 40
Figura 10 – Esquema de leito de secagem. 44
Figura 11 – Bloco drenante de polipropileno. 45
Figura 12- Montagem de leito de secagem por blocos drenantes. 45
Figura 13 – Leito de secagem por blocos drenantes. 46
Figura 14 – Limpeza do leito de secagem por blocos drenantes. 46
Figura 15 – Potencial Zeta. 50
Figura 16 – Fluxograma de avaliação econômica. 51
Figura 17 – Fluxograma geral para a realização do trabalho. 52
Figura 18 – Localização da área de estudo. 53
Figura 19 – Local de coleta da amostra. 54
Figura 20 – Preparo das soluções de polímeros. 58
Figura 21 – Leito de secagem por blocos drenantes. 61
Figura 22 – Sistema de drenagem leito de secagem por blocos drenantes. 62
Figura 23 – Estação de tratamento de efluentes. 66
Figura 24 – Fluxograma de origem do lodo industrial. 67
Figura 25 – Amostra do resíduo sólido industrial estudado. 67
Figura 26 – Sólidos totais presentes no resíduo. 68
Figura 27 – Influência do pH no Potencial Zeta. 69
Figura 28 – Sedimentabilidade do resíduo para os diferentes coagulantes utilizados 70
Figura 29 – Início do ensaio de desaguamento por blocos drenantes. 72
Figura 30 – Fim do ensaio de desaguamento por blocos drenantes. 72
Figura 31 – Redução do volume durante o desaguamento do resíduo com o polímero L-32. . 73

Figura 32 - Redução do volume durante o desaguamento do resíduo com polímero CAT-2170. 73
Figura 33 – Curva de secagem para o ensaio de desaguamento de resíduo com polímero L-32. 74
Figura 34 – Curva de secagem para o ensaio de desaguamento do resíduo com o polímero CAT-2170. 75
Figura 35 – Mínimas e máximas de temperatura durante a realização dos ensaios de desaguamento. 76
Figura 36 – Duração do dia durante a realização dos ensaios de desaguamento. 76
Figura 37 – Amostra de lodo seco após ensaios de desaguamento por blocos drenantes. 77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Operações de desaguamento. 41
Quadro 2 – Algumas das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de desaguamento. ... 41
Quadro 3 – Equipamentos utilizados na pesquisa. 55
Quadro 4 – Produtos químicos utilizados. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidades geradas e destinadas de resíduos sólidos no Brasil em 2023. 22
Tabela 2 – Indicação de processos com aderência à Agenda 2030 no STF em 2024. 32
Tabela 3 – Estabilidade de sistemas dispersos de acordo com Potencial Zeta. 51
Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos, unidades, metodologias e limites de detecção. 55
Tabela 5 – Classificação da sedimentabilidade do lodo de acordo com Von Sperling. 61
Tabela 6 – Caracterização físico-química do resíduo estudado. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

AIDS – Síndrome da Imunodeficiência Adquirida

AOD – Assistência Oficial ao Desenvolvimento

ECOSOC – Conselho Econômico e Social

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

ETR – Estação de Tratamento de Resíduos

g – Gramas

HIV – Vírus da Imunodeficiência Humana

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

IVL – Índice Volumétrico de Lodo

kg - Quilogramas

L – Litros

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RNB – Renda Nacional Bruta

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SINIMA – Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos

SINISA – Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico

SST – Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

STF – Superior Tribunal Federal

t – Toneladas

TAS – Taxa de Aplicação de Sólidos

UNAERP – Universidade de Ribeirão Preto

UNICEF – Fundo das Nações Unidas para a Infância

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVOS 16
1.1.1 Objetivo Geral 16
1.1.2 Objetivos Específicos 17
2 REFERENCIAL TEÓRICO 18
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA CLASSIFICAÇÃO 18
2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS 21
2.3 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 23
2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 25
2.5 TRATAMENTOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS 34
2.6.1 Adensamento por Gravidade 36
2.6.1.1 Determinação do Índice Volumétrico de Lodo (IVL) 38
2.6.2 Desaguamento por Blocos Drenantes 39
2.6.2.1 Taxa de Aplicação de Sólidos 47
2.7 POLÍMEROS ORGÂNICOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS 47
2.7.1 Polímeros Orgânicos Sintéticos Catiônicos 49
2.7.2 Polímeros Orgânicos Sintéticos Aniônicos 49
2.7.3 Polímeros Orgânicos Naturais 49
2.7.4 Potencial Zeta 50
2.8 AVALIAÇÃO ECONÔMICA 51
3 MATERIAL E MÉTODOS 52
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO 53
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL 54
3.2.1 Determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH) 55
3.2.2 Sólidos Totais (ST) 55
3.2.3 Sólidos Suspensos Totais (SST) 56
3.2.4 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) 56
3.2.5 Densidade 57
3.2.6 Potencial Zeta 57
3.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES QUÍMICOS UTILIZADOS 57
3.3.1 Definição das Dosagens de Coagulantes Utilizadas 58

3.4 ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE 60
3.4.1 Ensaios de Sedimentação em Provetas 60
3.4.2 Determinação do Índice Volumétrico de Lodo 60
3.5 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES 61
3.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA 63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 66
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO 66
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL 67
4.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES QUÍMICOS UTILIZADOS 69
4.4 RESULTADOS OBTIDOS PARA ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE 70
4.5 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES 71
4.5.1 Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) 71
4.5.2 Resultados Obtidos para Redução de Volume do Lodo 71
4.5.3 Resultados Obtidos para Secagem do Lodo 74
4.5.4 Avaliação Econômica do Uso de Blocos Drenantes na Destinação Final do Resíduo 77
5 CONCLUSÃO 79
REFERÊNCIAS 80
ANEXOS 89

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente e a sua preservação vem aumentando gradativamente em diversos países, assim como no Brasil. A produção de resíduos industriais está crescendo de modo acelerado, com variadas indústrias que os produzem em maior ou menor escala, e nem sempre conseguem fazer o reaproveitamento dos mesmos ou destiná-los corretamente. No ano de 2019, foram geradas 30.753 t de resíduos industriais, sendo destes, 93% de resíduos industriais perigosos (Sá, 2014; Baptista *et al.*, 2019; ABREMA, 2023).

O desenvolvimento sustentável teve seu conceito subdividido em três pilares, conhecidos como “The Tripple Bottom Line”, por John Elkington no ano de 1997, e são denominados como: o pilar ambiental, o pilar social e o pilar econômico, devendo os três concomitar entre si e promover práticas organizacionais para que uma instituição alcance o desenvolvimento sustentável. No ano de 2015, a ONU (Organização das Nações Unidas) elaborou os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável com o intuito de serem aplicados por todo o mundo, até 2030, com ações que abrangem os desenvolvimentos econômico, social, político e educacional (Scarin, 2017).

No contexto de resíduos sólidos, eles são resíduos que se encontram na forma sólida ou semissólida e são provenientes desde atividades domésticas e hospitalares, até processos industriais, comerciais e da agricultura, incluindo também o lodo gerado por estações de tratamento de água (ETA) e estações de tratamento de efluentes (ETE), cujo lançamento sem fiscalização e de forma desarranjada é prejudicial devido à sua composição química, física e biológica (Oliveira *et al.*, 2018, Scarin, 2017).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os geradores de resíduos industriais têm total responsabilidade pela destinação adequada deles, assim como seu gerenciamento e monitoramento até que sejam completamente destruídos. No entanto, muitos são os desafios políticos, sociais, econômicos e técnicos que precisam ser superados para solucionar os problemas de geração, coleta, transporte e tratamento de resíduos. Poluição ambiental, desvio de recursos e perdas econômicas estão sendo relacionadas como consequências da geração exacerbada de resíduos. Conciliar os aspectos ambientais dos produtos com o modelo de conservação ambiental será um requisito fundamental para as empresas se manterem competitivas dentro do mercado atual (Santos *et al.*, 2014; Scarin, 2017; Souza; Silva, 2020).

Para as indústrias, a disposição pode ocorrer nas formas de reciclagem, incineração, compostagem ou aterro sanitário. Essa destinação gera elevados e indesejáveis custos para as

instituições, que cada vez mais investem em pesquisas e projetos voltados à diminuição dos desperdícios nos processos produtivos e maneiras de aplicar-se a logística reversa. Além disso, uma das formas de minimizar esses custos está na realização do tratamento dos efluentes produzidos pela própria indústria através de estações de tratamento de efluentes (ETE's) *in loco* ou externas (Scarin, 2017).

A partir da publicação da Agenda 21, o tratamento e a disposição final do resíduo sólido gerado nas estações de tratamento de efluentes têm ganhado grandes investimentos por parte das ETE's. Isso se deve ao fato do desafio encontrado pelas concessionárias de saneamento em atingir o gerenciamento sustentável desse lodo, levando em consideração os aspectos ambientais e sociais do tratamento de resíduos (Silva *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2017).

A gestão adequada de resíduos sólidos gerados por processos industriais é de extrema importância para driblar problemas ambientais e os impactos causados à saúde e meio ambiente. Quando se trata de um lodo proveniente de indústrias, é imprescindível que se conheça seu processo produtivo, bem como seus desperdícios e rejeitos (Sá, 2014; Scarin, 2017).

Dessa forma, a empresa onde o estudo foi realizado possui uma alta geração de resíduos sólidos, provenientes da estação de tratamento de efluentes localizada em sua planta; que são posteriormente destinados a uma empresa terceirizada que faz a coleta e disposição ambientalmente adequadas desses resíduos, o que gera um custo considerável para a empresa.

A redução prévia do volume do lodo gerado na ETE é um aliado para a diminuição dos custos de destinação final. O desaguamento, uma operação unitária de redução de volume a partir da perda de umidade, é uma das técnicas mais utilizadas e, as evoluções na pesquisa trazem o leito de secagem por blocos drenantes como uma vantajosa tecnologia a ser aplicada (Silva, 2017; Silva; Silva; Moruzzi, 2024).

Através da problemática na geração e no gerenciamento de resíduos sólidos, bem como o elevado custo para sua disposição final ambientalmente adequada, é necessário que se crie uma gestão sobre o assunto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a redução do volume e concentração de sólidos secos do resíduo sólido resultante do processo de tratamento de efluentes de uma indústria química

que atende o setor sucroalcooleiro a partir da utilização da tecnologia de desaguamento por blocos drenantes.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar o local de estudo;
- Caracterizar o resíduo sólido industrial;
- Definir os condicionantes químicos a serem utilizados e realizar os ensaios de adensamento por gravidade em provetas do resíduo sólido industrial;
- Calcular o Índice Volumétrico de Lodo para a escolha dos melhores condicionantes químicos;
- Realizar e avaliar os ensaios de desaguamento por blocos drenantes;
- Avaliar economicamente a utilização do desaguamento por blocos drenantes para o melhor condicionante químico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os tópicos do referencial teórico estão dispostos na sequência.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA CLASSIFICAÇÃO

Resíduos sólidos são categorizados como resíduos no estado sólido ou semissólido originários de atividades domésticas, comerciais, urbanas, hospitalares, processos industriais e da agricultura, que devem ter uma destinação ambientalmente adequada (CGIRS-VJ, 2021; Oliveira *et al.*, 2018). Na Instrução Normativa 13, de 18 de dezembro de 2012, o IBAMA publicou a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos, considerando a necessidade de organizar a prestação de informações sobre o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil e definiu o resíduo sólido em seu Artigo 2°:

> I – resíduos sólidos: todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2012).

Eles podem ser divididos, quanto sua origem, entre: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transporte e resíduos de mineração (SINIR, 2023).

- Resíduos domiciliares: de acordo com o SINIR (2023), "os resíduos domiciliares são definidos como os originários de atividades domésticas em residências urbanas." Segundo dados do Panorama 2021 da ABRELPE, a geração de resíduos sólidos urbanos em 2020 foi de 82,5 milhões de toneladas (SINIR, 2023);
- Resíduos de limpeza urbana: os resíduos de limpeza urbana são aqueles gerados por atividades de coleta, transbordo e transporte de resíduos; triagem, para fins de reciclagem e reuso, tratamento e disposição final dos resíduos e varrição, capina e poda de árvores (SINIR, 2023);

- Resíduos sólidos urbanos: são aqueles provenientes de atividades domésticas (resíduos domiciliares), e os resíduos de limpeza urbana, que incluem a varrição e limpeza de vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (SINIR, 2023);
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: são os resíduos originários em estabelecimentos comerciais e de prestação de serviço (SINIR, 2023);
- Resíduos de serviços de saneamento básico: os resíduos de serviços de saneamento básico são aqueles gerados a partir do abastecimento de água potável, no esgoto sanitário e no manejo das águas pluviais (SINIR, 2023);
- Resíduos industriais: correspondem aos resíduos gerados através de processos e instalações industriais, que devem ser classificados de acordo com sua periculosidade (Schalch *et al.*, 2002);
- Resíduos de serviços de saúde: resíduos gerados a partir de atividades médicas, odontológicas, farmacêuticas, laboratoriais ou de instituições de ensino e pesquisa que apresentam grande potencial de risco à saúde pública, como materiais biológicos com capacidade infectante, objetos cortantes contaminados, entre outros. Atualmente, os resíduos de saúde são classificados pela RDC 222 de 28 de março de 2018 em 5 grupos: Grupo A (resíduos que apresentam agentes biológicos infectantes); Grupo B (resíduos que possam conter produtos químicos); Grupo C (rejeitos radiativos); Grupo D (resíduos que podem ser igualados aos resíduos domiciliares por não apresentarem riscos químicos, radiológicos ou biológicos); e Grupo E (resíduos perfurocortantes) (FIOCRUZ, 2023; Meu Resíduo, 2023);
- Resíduos sólidos da construção civil: segundo a Lei 12.305/2010, os resíduos da construção civil são “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os restantes de preparação e escavação de terrenos para obras civis.”
- Resíduos agrossilvopastoris: são aqueles provenientes de atividades agropecuárias e silvilculturais (serragem e seus resíduos), bem como embalagens de fertilizantes (SINIR, 2023);
- Resíduos de serviços de transporte: os resíduos de serviços de transporte são aqueles gerados por portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviárias e ferroviárias (SINIR, 2023); e

- Resíduos de mineração: são originários de atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (SINIR, 2023).

A classificação dos resíduos sólidos no Brasil é feita pela NBR 10.004/2004 e, segundo a mesma

> envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem (ABNT, 2004).

Os resíduos são classificados entre:

- Resíduos Classe I – Perigosos: quando apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, devido às suas propriedades químicas, físicas ou infecto-contagiosas. São classificados como perigosos quando apresentam características como corrosividade, inflamabilidade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade (Brasil, 2004);
- Resíduos Classe II A – Não Perigosos e Não Inertes: apresentam características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (Brasil, 2004); e
- Resíduos Classe II B – Não Perigosos e Inertes: quando as características do resíduo, em contato com a água, não ultrapassam as concentrações estabelecidas para o padrão de potabilidade da água, com exceção de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (Brasil, 2004).

Na Figura 1 estão apresentados exemplos de classificação de resíduos sólidos.

Figura 1– Classificação de Resíduos Sólidos.

Fonte: Adaptado de Embragea, 2023.

Além disso, o lodo gerado em estações de tratamento de efluentes pode ser classificado como lodo primário, lodo ativado e lodo digerido:

- Lodo primário: lodo bruto, composto por sólidos suspensos – normalmente orgânicos (Portal Tratamento de Água, 2021);
- Lodo ativado: lodo que passa pelo processo de tratamento biológico, onde ar é introduzido nos tanques ou lagoas de tratamento através de sopradores de aeração (Atlas Copco, 2024); e
- Lodo digerido: lodo que passa pelo processo de estabilização biológica anaeróbia ou aeróbia (Portal Tratamento de Água, 2021).

2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração de resíduos sólidos é um dos problemas mais graves encarados pela sociedade atual, consequente de um grande e desalinhado crescimento populacional, aceleração do processo de ocupação do território urbano e pelo aumento da produção industrial. Dentre os problemas ambientais que avassalam a humanidade, a produção de resíduos industriais é uma das principais formas de degradação do meio ambiente (Valerio *et al.*, 2008; Orth *et al.*, 2014).

A geração dos resíduos sólidos se dá pelo descarte de materiais após seu uso e, quanto maior o consumo, maior é a geração deles. Segundo dados do Inventário Nacional de Resíduos

Sólidos de 2019 e do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2023, no Brasil foram geradas 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2023; 307 mil toneladas de resíduos de serviços de saúde em 2023; 45 milhões de toneladas de resíduos de construção civil em 2023 e, em relação aos resíduos industriais, os últimos dados são de 2019, onde foram gerados 28.587,01 toneladas de resíduos perigosos e 2.166,30 toneladas de resíduos não perigosos (SINIR, 2021; ABREMA, 2023).

Na Tabela 1 estão demonstradas as quantidades geradas e destinadas de resíduos sólidos no ano de 2023 no Brasil.

Tabela 1 – Quantidades geradas e destinadas de resíduos sólidos no Brasil em 2023.

Resíduo	**Quantidade Gerada**	**Quantidade Destinada**	**Porcentagem Destinada**
Resíduos sólidos urbanos	77,1 milhões t	54.042.554,50 t	63,99 %
Resíduos de serviços de saúde	307 mil t	889.013,10 t	8,4 %
Resíduos de construção civil	45 milhões t	8.278.775,00 t	14,26 %

Fonte: Adaptado de SINIR, 2021.

Muito se fala sobre os impactos provocados no meio ambiente por processos produtivos e a valorização de ações de cunho ambiental por parte das indústrias tem ganhado cada vez mais abertura através de novas formas de administração e produção, incluindo estratégias de gestão ambiental (Orth *et al.*, 2014; Araújo *et al.*, 2007; Machado *et al.*, 2012).

O gerenciamento adequado de resíduos sólidos gerados por processos industriais se tornou, nas últimas décadas, um tema ambiental complexo e essencial para a diminuição da poluição do meio ambiente e dos impactos ambientais e à saúde humana. O aumento no número de substâncias e materiais classificados como perigosos e a geração de seus resíduos em quantidades cada vez mais ascendentes têm reivindicado maiores investimentos e recursos mais eficazes por parte de seus geradores (Souza; Silva, 2020; Sá, 2014; Machado *et al.*, 2012).

A redução da geração de resíduos é fundamental, uma vez que para que se haja produção são necessários recursos naturais para supri-la. A má destinação de resíduos é um problema agravante e o gerenciamento dos resíduos sólidos é tão importante quanto apenas a diminuição da sua geração (Portal Resíduos Sólidos, 2023).

2.3 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Progressivamente, o setor produtivo de diferentes países vem compreendendo em seus custos àqueles relacionados a questão ambiental, o que ocasiona a necessidade de mudanças nos padrões de produção, comercialização e consumo a partir de normas e legislações rígidas de controle associados e um novo retrato consumidor, trazendo a importância de alternativas para a melhoria de sua performance ambiental. Com o aumento da concorrência global aliada a debates envolvendo a sustentabilidade, é possível observar que a busca por uma maior eficiência produtiva acontece simultaneamente a agregação de medidas para a redução dos impactos ambientais (Coelho *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2014). Pinsky *et al.* (2013) fala que

> o aumento da importância da sustentabilidade nos últimos anos tem levado algumas empresas a considerar, como parte integrante da estratégia de negócios, a inclusão de metas empresariais compatíveis com o desenvolvimento sustentável. As empresas podem exercer um papel importante na promoção de uma sociedade ecologicamente sustentável e socialmente justa, sem abrir mão de suas responsabilidades financeiras com os acionistas.

Até o início de 1990, o país necessitava de um ordenamento jurídico legal que estabelecesse princípios, instrumentos e metas que abordassem os resíduos sólidos e o seu gerenciamento. Diante da carência de um marco legal que orientasse os estados e os municípios na execução de processos de gerenciamento de resíduos sólidos ambientalmente adequados, o Congresso Nacional criou, em 1991, o Projeto de Lei n° 203, porém, foram necessárias quase duas décadas para que fosse sancionada uma lei de resíduos sólidos no Brasil (Arantes; Pereira, 2021; Aguiar; Veiga, 2020).

Em 02 de agosto de 2010, a Lei n° 12.305 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), constituída por princípios, objetivos e os instrumentos essenciais para o enfrentamento dos problemas ambientais, sociais e econômicos relacionados à gestão inadequada de resíduos sólidos. A PNRS emergiu para designar as responsabilidades para assegurar a proteção ambiental através da gestão integrada de resíduos sólidos, estabelecendo normas e regras que devem ser cumpridas pelos estados, municípios e empresas, públicas e privadas, levando em consideração as variáveis social, ambiental, tecnológica, econômica e de saúde pública (Arantes; Pereira, 2021; Aguiar; Veiga, 2020; Bezerra *et al.*, 2020; Jacinto; Zogahib, 2016; Onofre *et al.*, 2014).

> Art. 4° A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (Brasil, 2010).

Em seu Capítulo II, Artigo 6°, a PNRS traz os seus princípios e objetivos, que contam com a prevenção e precaução; o desenvolvimento sustentável; a ecoeficiência; e a responsabilidade compartilhada como alguns de seus princípios e a proteção da saúde pública; a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas; a redução do volume e periculosidade dos resíduos perigosos; o incentivo à indústria da reciclagem; e a gestão integrada de resíduos sólidos como alguns de seus objetivos (Brasil, 2010).

No Capítulo III da PNRS, são falados os instrumentos:

> Art. 8° São instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, entre outros:
> I – os planos de resíduos sólidos;
> II – os inventários e o sistema declaratório anual de resíduos sólidos;
> III – a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
> IV – o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;
> V – o monitoramento e a fiscalização ambiental, sanitária e agropecuária;
> VI – a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;
> VII – a pesquisa científica e tecnológica;
> VIII – a educação ambiental;
> IX – os incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
> X – o Fundo Nacional do Meio Ambiente e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
> XI – o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR);
> XII – o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA);
> XIII – os conselhos de meio ambiente e, no que couber, os de saúde;
> XIV – os órgãos colegiados municipais destinados ao controle social dos serviços de resíduos sólidos urbanos;
> XV – o Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos;
> XVI – os acordos setoriais;
> XVII – no que couber, os instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente, entre eles:
> a) os padrões de qualidade ambiental;
> b) o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
> c) o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
> d) a avaliação dos impactos ambientais;
> e) o Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA);
> f) o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras;
> XVIII – os termos de compromisso e os termos de ajustamento de conduta;
> XIX – o incentivo à adoção de consórcios ou de outras formas de cooperação entre os entes federados, com vistas à elevação das escalas de aproveitamento e à redução dos custos envolvidos (Brasil, 2010).

Foram elaborados os planos de resíduos sólidos para todos os níveis:

- Plano Nacional de Resíduos Sólidos: plano elaborado pela União, com vigência por prazo indeterminado e atualizado a cada 4 anos, que conta com o diagnóstico

da situação atual, proposição de cenários, metas de redução, reutilização e reciclagem, normas e diretrizes para a disposição de rejeitos, entre outros;

- Planos Estaduais de Resíduos Sólidos: para que tenham acesso a recursos da União, os Estados devem elaborar seus Planos Estaduais de Resíduos Sólidos. Neles devem conter o diagnóstico, a proposição de cenários, metas de redução, reutilização e reciclagem, metas para aproveitamento energético, normas e diretrizes para a disposição final de rejeitos, entre outros;
- Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: assim como os Estados, os municípios e o Distrito Federal devem elaborar seus Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para terem acesso aos recursos disponibilizados pela União. Informações como diagnóstico da situação dos resíduos gerados no município, identificação dos resíduos sólidos e de seus geradores, metas de redução, reutilização e reciclagem, assim como ações preventivas e corretivas e identificação de passivos ambientais devem estar presentes nos Planos Municipais;
- Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos: estão passíveis a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos os geradores de resíduos sólidos previstos, os estabelecimentos comerciais que geram resíduos perigosos e não perigosos que, por sua natureza ou volume, não se comparem com resíduos domiciliares, as empresas de construção civil, os responsáveis pelos terminais e por atividades agrossilvopastoris. Nele deve conter a descrição da atividade ou empreendimento, o diagnóstico dos resíduos sólidos gerados, as ações preventivas e corretivas e metas e procedimentos para a minimização da geração de resíduos, além de medidas saneadoras de passivos ambientais (Brasil, 2010).

> Art. 25° O poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade das ações voltadas para assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos e das diretrizes e demais determinações estabelecidas nesta Lei e em seu regulamento (Brasil, 2010).

2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

De acordo com a Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1987), o desenvolvimento sustentável é “aquele que atende as necessidades do presente sem

comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades.” Ele se dá a partir da interação entre os três princípios da sustentabilidade: social, econômico e ambiental – conhecidos como tripé da sustentabilidade (Instituto Saúde e Sustentabilidade, 2022).

O pilar social trata sobre a qualidade de vida das pessoas, através de políticas públicas e dos direitos humanos e investimentos sociais responsáveis para o acesso de todos à direitos básicos, como alimentação, lazer, moradia, trabalho, segurança, saúde, entre outros. Já no pilar econômico, são tratadas questões de produção, distribuição e consumo de bens e serviços, com eficiência e transparência trabalhando na redução de desperdícios. Por fim, o pilar ambiental trata diretamente de questões relacionadas à preservação e conservação do meio ambiente. Da união desses pilares, são promovidas ações organizacionais que levam ao desenvolvimento sustentável (Instituto Saúde e Sustentabilidade, 2022).

Conferências ambientais são realizadas a fim de fortalecer o conhecimento sobre os impactos ambientais simultaneamente a acordos e compromissos de chefes de Estado em relação ao desenvolvimento sustentável. A Conferência de Estocolmo, como ficou conhecida a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, foi a primeira das maiores conferências ambientais realizadas, aconteceu na cidade de Estocolmo em 1972 e estabeleceu 26 princípios sobre meio ambiente e desenvolvimento – com princípios como desenvolvimento social e econômico, políticas ambientais e controle da poluição de mares, dando início à uma série de conferências sobre o tema (Estadão Mobilidade, 2021; CETESB, 2016).

A partir de então, diversas conferências passaram a ser convocadas a fim de estudar e diminuir os impactos ambientais causados. A Primeira Conferência Mundial do Clima, que aconteceu em 1979, em Genebra, a Conferência Rio 92, realizada em 1992 no Rio de Janeiro e a COP21 e Acordo de Paris, em 2015 na cidade de Paris, são alguns exemplos de conferências ambientais onde países, chefes de Estado, ONGs e ativistas estabeleceram acordos e firmaram compromissos em prol do desenvolvimento sustentável (Estadão Mobilidade, 2021).

Em setembro de 2015, foi aprovado por unanimidade pelos países-membros da Organização das Nações Unidas o documento “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”. Segundo a Nações Unidas Brasil (2015), a Agenda 2030 é um plano de ação que busca firmar a proteção dos recursos naturais e o clima, a promoção de vidas prósperas em harmonia com a natureza, sociedades pacíficas e a erradicação da pobreza e da fome através de uma parceria global sólida com atuação em cinco áreas importantes:

Planeta, Prosperidade, Paz, Pessoas e Parceria (Movimento Nacional ODS, 2021). Na Figura 2 estão ilustrados os 5 P's da sustentabilidade.

Figura 2 - Os 5 P's da Sustentabilidade.

Fonte: Movimento ODS Santa Catarina, 2023.

> 3. Nós resolvemos, entre agora e 2030 acabar com a pobreza e a fome em todos os lugares; combater as desigualdades dentro e entre países; construir sociedades pacíficas, justas e inclusivas; proteger os direitos humanos e promover a igualdade de gênero e o empoderamento das mulheres e meninas; e assegurar a proteção duradoura do planeta e seus recursos naturais. Resolvemos também criar condições para um crescimento sustentável, inclusivo e economicamente sustentado, prosperidade compartilhada e trabalho decente para todos, tendo em conta os diferentes níveis de desenvolvimento e capacidades nacionais.
> 5. Esta é uma agenda de alcance e significado sem precedentes. Ela é aceita por todos os países e é aplicável a todos, levando em conta diferentes realidades nacionais, capacidades e níveis de desenvolvimento e respeitando as políticas e prioridades nacionais. Estes são objetivos e metas universais que envolvem todo mundo, igualmente os países desenvolvidos e os em desenvolvimento. Eles são integrados e indivisíveis, e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável (Nações Unidas Brasil, 2015).

Em relação à Visão, a Agenda 2030 traz:

> 7. Nestes Objetivos e metas, estamos estabelecendo uma visão extremamente ambiciosa e transformadora. Prevemos um mundo livre da pobreza, da fome, doença, penúria, onde toda a vida pode prosperar. Prevemos um mundo livre do medo e da violência. Um mundo com alfabetização universal. Um mundo com acesso equitativo e universal à educação de qualidade em todos os níveis, aos cuidados de saúde e proteção social, onde o bem-estar físico, mental e social estão assegurados. Um mundo em que reafirmamos os nossos compromissos relativos ao direito humano à água potável e ao saneamento e onde há uma melhor higiene; e onde o alimento é suficiente, seguro, acessível e nutritivo. Um mundo onde habitats humanos são

> seguros, resilientes e sustentáveis, e onde existe acesso universal à energia acessível, confiável e sustentável.
> 8. Prevemos um mundo de respeito universal dos direitos humanos e da dignidade humana, do Estado de Direito, da justiça, da igualdade e da não discriminação; do respeito pela raça, etnia e diversidade cultural; e da igualdade de oportunidades que permita a plena realização do potencial humano e contribua para a prosperidade compartilhada. Um mundo que investe em suas crianças e que cada criança cresce livre da violência e da exploração. Um mundo em que cada mulher e menina desfruta da plena igualdade de gênero e no qual os entraves jurídicos, sociais e econômicos para seu empoderamento foram removidos. Um mundo justo, equitativo, tolerante, aberto e socialmente inclusivo em que sejam atendidas as necessidades das pessoas mais vulneráveis (Nações Unidas Brasil, 2015).

Reafirmando a importância da Declaração Universal dos Direitos Humanos, a igualdade de gênero e empoderamento feminino, a Organização das Nações Unidas ressalta a responsabilidade dos Estados em garantir o acesso de todos aos direitos e liberdades essenciais, sem qualquer distinção, seja por sexo, raça, religião, opinião política, deficiência, ou outra condição. Ainda na Agenda, a ONU demonstra grande preocupação com a erradicação da pobreza extrema e da fome, acesso à educação inclusiva de qualidade, saúde mental e física e bem-estar, além da necessidade de promover sociedades pacíficas (Nações Unidas Brasil, 2015).

> 21. Os novos Objetivos e metas entrarão em vigor no dia 1° de janeiro de 2016 e orientarão as decisões que tomamos ao longo dos próximos quinze anos. Todos nós vamos trabalhar para implementar a Agenda dentro de nossos próprios países e em nível regional global, tendo em conta as diferentes realidades nacionais, capacidades e níveis de desenvolvimento, e respeitando as políticas e prioridades nacionais. Vamos respeitar o espaço político nacional para um crescimento econômico sustentável, inclusivo e compatível com as regras e os compromissos internacionais relevantes. Também reconhecemos a importância das dimensões regionais e sub-regionais, a integração econômica regional e a interconexão no desenvolvimento sustentável. Quadros regionais e sub-regionais podem facilitar a tradução eficaz das políticas de desenvolvimento sustentável em ações concretas em nível nacional (Nações Unidas Brasil, 2015).

Em relação aos meios de implementação da nova Agenda, segundo a Nações Unidas Brasil (2015),

> 39. A escala e a ambição da nova Agenda exigem uma parceria global revitalizada para garantir a sua execução. Nós nos comprometeremos plenamente com isso. Esta parceria irá trabalhar em um espírito de solidariedade global, em especial a solidariedade com os mais pobres e com as pessoas em situações mais vulneráveis. Ele facilitará um engajamento global intensivo em apoio à implementação de todos os Objetivos e metas, reunindo governos, setor privado, sociedade civil, o Sistema das Nações Unidas e outros atores e mobilizando todos os recursos disponíveis.
> 41. Reconhecemos que cada país é responsável pelo seu próprio desenvolvimento econômico e social. A nova Agenda lida com os meios necessários para a implementação dos Objetivos e metas. Reconhecemos que estes incluem a mobilização de recursos financeiros, bem como o reforço das capacidades e a transferência de tecnologias ambientalmente adequadas para os países em desenvolvimento em condições favoráveis, incluindo em condições concessionais e preferenciais, nos termos mutuamente acordados. Finanças públicas, tanto nacionais como internacionais, desempenharão um papel vital na prestação de serviços essenciais e bens públicos e em catalisar outras fontes de financiamento.

> Reconhecemos o papel do setor privado diverso, desde as microempresas e cooperativas até as multinacionais, bem como o papel das organizações da sociedade civil e as organizações filantrópicas na implementação da nova Agenda.
> 43. Destacamos que o financiamento público internacional desempenha um papel importante como complemento dos esforços dos países para mobilizar os recursos públicos internamente, especialmente nos países mais pobres e vulneráveis com recursos internos limitados. Uma utilização importante do financiamento público internacional, incluindo a Assistência Oficial ao Desenvolvimento (AOD, ou ODA na sigla em inglês), é catalisar a mobilização de recursos adicionais de outras fontes, públicas e privadas. Prestadores de AOD reafirmam os respectivos compromissos, incluindo o compromisso de muitos países desenvolvidos, de alcançar o objetivo de 0,7% de AOD no total da Renda Nacional Bruta [RNB] para os países em desenvolvimento e de 0,15% a 0,2% de AOD/RNB para os países menos desenvolvidos (Nações Unidas Brasil, 2015).

Sobre o acompanhamento e a avaliação da implementação da nova Agenda:

> 47. Nossos governos têm a responsabilidade primária de acompanhamento e avaliação, nos níveis nacional, regional e global, em relação ao progresso alcançado na implementação dos Objetivos e metas para os próximos 15 anos. Para apoiar a prestação de contas aos nossos cidadãos, iremos fornecer um acompanhamento e avaliação sistemáticos em vários níveis, tal como estabelecido nesta Agenda e na Agenda de ação de Adis Abeba. O Fórum Político de Alto Nível, sob os auspícios da Assembleia Geral e do Conselho Econômico e Social [ECOSOC], terá o papel central na supervisão do acompanhamento e da avaliação em nível global.
> 48. Indicadores estão sendo desenvolvidos para ajudar neste trabalho. Dados desagregados de qualidade, acessíveis, atualizados e confiáveis serão necessários para ajudar na medição do progresso e para garantir que ninguém seja deixado para trás. Esses dados são a chave para a tomada de decisões. Dados e informações disponíveis em mecanismos de comunicação devem ser usados sempre que possível (Nações Unidas Brasil, 2015).

A Agenda 2030 trouxe consigo os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que contam com 169 metas e buscam consolidar os direitos humanos a todos, equilibrando os três pilares do desenvolvimento sustentável: o desenvolvimento social, o desenvolvimento econômico e o desenvolvimento ambiental. Eles descrevem ações que devem ser tomadas para os 15 anos subsequentes (Nações Unidas Brasil, 2015).

Segundo a Nações Unidas Brasil (2015), “os ODS e metas são integrados e indivisíveis, de natureza global e universalmente aplicáveis, tendo em conta as diferentes realidades, capacidades e níveis de desenvolvimento nacionais e respeitando as políticas e prioridades nacionais.” Abaixo são demonstrados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável:

- Objetivo 1: acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares;
- Objetivo 2: acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável;
- Objetivo 3: assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades;

- Objetivo 4: assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos;
- Objetivo 5: alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas;
- Objetivo 6: assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos;
- Objetivo 7: assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos;
- Objetivo 8: promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos;
- Objetivo 9: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;
- Objetivo 10: reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles;
- Objetivo 11: tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;
- Objetivo 12: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;
- Objetivo 13: tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos;
- Objetivo 14: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável;
- Objetivo 15: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda da biodiversidade;
- Objetivo 16: promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis; e
- Objetivo 17: fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável (Nações Unidas Brasil, 2015).

Na Figura 3 estão dispostos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

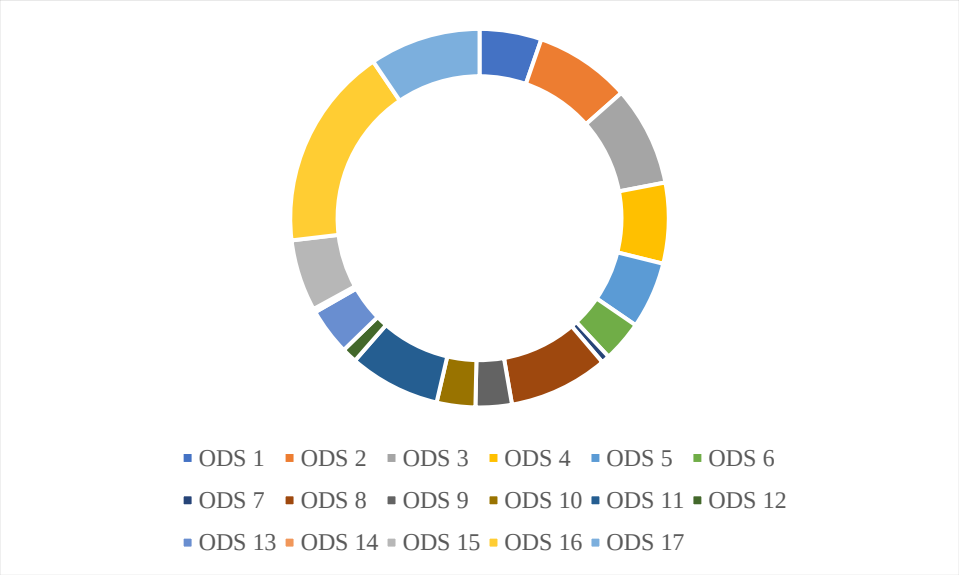
Figura 3 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Fonte: ONU, 2015.

De acordo com dados publicados pela Nações Unidas Brasil (2024), no ano de 2024 foram disponíveis $ 187,5 milhões em recursos para a implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil, distribuídos em 5,30% para a erradicação da pobreza (ODS 1); 8,20% para fome zero e agricultura sustentável (ODS 2); 8,50% para saúde e bem-estar (ODS 3); 6,90% para educação de qualidade (ODS 4); 5,70% para igualdade de gênero (ODS 5); 3,50% para água potável e saneamento (ODS 6); 0,70% para energia limpa e acessível (ODS 7); 8,50% para trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8); 3,10% para indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9); 3,30% para redução das desigualdades (ODS 10); 7,80% para cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11); 1,30% para consumo e produção responsáveis (ODS 12); 4,00% para ação contra a mudança global do clima (ODS 13); 0,30% para vida na água (ODS 14); 6,10% para vida terrestre (ODS 15); 17,40% para paz, justiça e instituições responsáveis (ODS 16); e 9,50% em parcerias e meios de implementação (ODS 17). Ainda segundo a Nações Unidas Brasil (2024), o maior contribuinte para implementação dos ODS's no Brasil no ano de 2024 foi o Governo Brasileiro, com 60,6 milhões de dólares – aproximadamente 32%, distribuídos principalmente para ações no ODS 16.

A Figura 4 mostra a divisão dos recursos para a implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis no Brasil no ano de 2024.

Figura 4 – Recursos disponíveis para a implementação dos ODS's no Brasil em 2024.



Fonte: Adaptado de Nações Unidas Brasil, 2024.

Notavelmente, no Brasil, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes) é o que se apresenta como o ODS com maior atuação do governo no ano de 2024, tendo um investimento de 32,6 milhões de dólares e contando com 2.338 ocorrências (Nações Unidas Brasil, 2024; STF, 2024).

No Brasil, estão sendo monitorados no Painel de Dados do Superior Tribunal Federal, 3.434 processos e 5.388 ocorrências de ODS, sendo distribuídas conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Indicação de processos com aderência à Agenda 2030 no STF em 2024.

Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis	**Número de ocorrências monitoradas**
ODS 1	116
ODS 2	56
ODS 3	469
ODS 4	170
ODS 5	89
ODS 6	59
ODS 7	82
ODS 8	637
ODS 9	150
ODS 10	492
ODS 11	136
ODS 12	114
ODS 13	28
ODS 14	23
ODS 15	145
ODS 16	2.338
ODS 17	284

Fonte: STF, 2024.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura; e 12 - Consumo e Produção Responsáveis; trazem tópicos de grande importância para o presente trabalho. Com objetivos de “construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação” e “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”, eles possuem metas incisivas no comportamento que deve ser adotado pelas instituições para assegurar o Desenvolvimento Sustentável. Foram disponibilizados para isso, no ano de 2024, 5,8 milhões de dólares para o ODS 9 e 2,4 milhões de dólares para o ODS 12 (IPEA, 2012; Nações Unidas Brasil, 2024).

Algumas das metas assumidas pelo Governo Brasileiro, que apresentam evoluções positivas nesses ODS’s, são:

> ODS 9 – Meta 9.2 – Promover a industrialização inclusiva e sustentável e, até 2030, aumentar significativamente a participação da indústria no emprego e no produto interno bruto, de acordo com as circunstâncias nacionais, e dobrar sua participação nos países de menor desenvolvimento relativo.
>
> ODS 9 – Meta 9.3 – Aumentar o acesso das pequenas indústrias e outras empresas, particularmente em países em desenvolvimento, aos serviços financeiros, incluindo crédito acessível e propiciar sua integração em cadeias de valor e mercados.
>
> ODS 9 – Meta 9.4 – Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades.
>
> ODS 12 – Meta 12.1 – Implementar o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com todos os países tomando medidas, e os países desenvolvidos assumindo a liderança, tendo em conta o desenvolvimento e as capacidades dos países em desenvolvimento.
>
> ODS 12 – Meta 12.4 – Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.
>
> ODS 12 – Meta 12.6 – Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios.
>
> ODS 16 – Meta 16.1 – Reduzir significativamente todas as formas de violência e as taxas de mortalidade relacionada em todos os lugares.
>
> ODS 16 – Meta 16.3 – Promover o Estado de Direito, em nível nacional e internacional, e garantir a igualdade de acesso à justiça para todos (IPEA, 2024).

2.5 TRATAMENTOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A sociedade e os processos industriais produzem cada vez mais resíduos, muitas vezes descartados sem controle, causando impactos ambientais de graus variados. O lançamento indevido de resíduos sólidos, líquidos e gasosos pode ocasionar mudanças nas características da água, do solo e do ar, resultando na contaminação ou poluição do meio ambiente devido sua composição química, física e biológica, o que traz riscos à saúde humana, animal e vegetal e alterações no aspecto estético, na composição ou forma do meio. A manipulação incorreta de resíduos sólidos de qualquer origem gera desperdícios, ameaça a saúde pública e intensifica a degradação ambiental, comprometendo a qualidade de vida da população (Santos *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2002; Schalc *et al.*, 2002).

Com o intuito de promover a redução dos impactos ambientais e à saúde humana devido à má disposição de resíduos, surgiram as tecnologias de tratamento para resíduos sólidos. Existem no mercado variados tipos de tecnologias de tratamento, devendo haver uma avaliação, através de critérios econômicos, ambientais, técnicos e sociais, da área de aplicação, para que se possa definir a técnica mais adequada a ser aplicada (Baptista *et al.*, 2019).

Existem tecnologias de tratamento para resíduos sólidos de caráter físico (triagem e reciclagem), biológico (compostagem e digestão anaeróbia), físico-químico (incineração e combustíveis derivados de resíduos) e físico-químico-biológico (aterros sanitários) (Baptista *et al.*, 2019). Estão descritas abaixo:

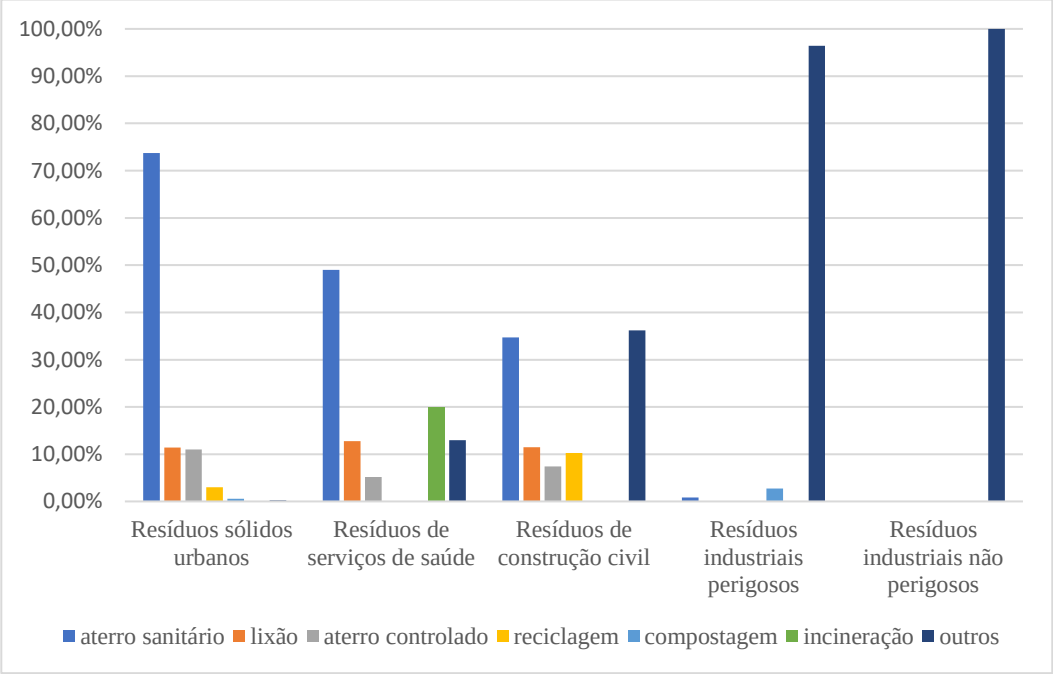
- Triagem e reciclagem: consiste na seleção preliminar dos materiais independente da tecnologia de tratamento que será aplicada posteriormente (Baptista *et al.*, 2019, *apud* Prates *et al.*, 2019);
- Compostagem: a compostagem é um processo biológico que propicia a decomposição da matéria orgânica presente no resíduo na presença de oxigênio. É importante que haja condições adequadas de temperatura, pressão e umidade para a efetiva ação da compostagem, e o seu produto gerado, conhecido como composto, pode ser aproveitado principalmente como adubo, ou, não obtendo a qualidade adequada para sua disposição no solo, pode ser utilizado como material de cobertura em aterros ou material energético. O processo de compostagem é uma das tecnologias mais simples para a implantação, exigindo baixa operação se comparada à outras. Seu processo completo de decomposição

dura de 3 a 4 meses se natural, ou seja, sem a presença de aeração forçada em seu sistema (Baptista *et al.*, 2019, *apud* Prates *et al.*, 2019);

- Digestão anaeróbia: a digestão anaeróbia, assim como a compostagem, se trata de um processo de decomposição biológica da matéria orgânica, neste caso, sem a presença de oxigênio – o que gera formação de biogás e um composto orgânico estabilizado. Essa tecnologia sofre influência de fatores como temperatura, pH, tempo de retenção, disponibilidade de nutrientes e presença de substâncias tóxicas, bem como da quantidade de matéria orgânica a ser digerida e seu processo pode ser tanto contínuo como em batelada, assim como ser uma digestão seca ou úmida (Baptista *et al.*, 2019, *apud* Prates *et al.*, 2019);
- Incineração com aproveitamento energético: a incineração é uma das tecnologias mais antigas para o tratamento de resíduos sólidos. Consiste na redução do volume dos resíduos com a queima dos mesmos em uma câmara primária para posterior disposição em aterros sanitários. Na câmara primária, existe a geração de gás, que é transferido para uma câmara secundária, onde sofre queima a uma temperatura mais elevada que leva a sua combustão completa. Esses gases são resfriados e tratados e a parte sólida restante (entre 4 a 10%) é esterilizado e inertizado (Baptista *et al.*, 2019, *apud* Prates *et al.*, 2019);
- Combustíveis derivados de resíduos (CDR): os combustíveis derivados de resíduos são originados de um processo de trituração de resíduos sólidos de alto potencial energético. O resíduo utilizado deve ser material orgânico de baixa umidade, livre de metais pesados ou substâncias orgânicas críticas, como medicamentos, resíduos infectados ou halogenados (Baptista *et al.*, 2019); e
- Aterros sanitários: os aterros sanitários são os locais estipulados para a disposição final ambientalmente correta de resíduos sólidos. Através de técnicas de engenharia, os resíduos são confinados em pequenos espaços, o que diminui o volume deles, e cobertos com terra ao final do dia. No entanto, é necessário que haja uma correta manutenção dos aterros a fim de evitar a poluição dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos (Baptista *et al.*, 2019, *apud* Colvero *et al.*, 2017).

A Figura 5 traz as destinações mais utilizadas para cada tipo de resíduo.

Figura 5 – Destinações mais utilizadas de Resíduos Sólidos.



Fonte: Adaptado de SINIR, 2021.

A partir da publicação da Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, houve uma preocupação quanto à gestão dos resíduos e sua destinação final ambientalmente correta. Porém, principalmente municípios de pequeno porte enfrentam dificuldades para se estruturar aos princípios estabelecidos pela PNRS devido à falta de recursos financeiros, administrativos e estruturais (Nações Unidas Brasil, 2015).

2.6 TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA REDUÇÃO DO VOLUME DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Algumas tecnologias aplicadas no tratamento de resíduos gerados em estações de tratamento de efluentes tem o objetivo de diminuir previamente seu volume. Na sequência, estão dispostas as tecnologias utilizadas no presente trabalho.

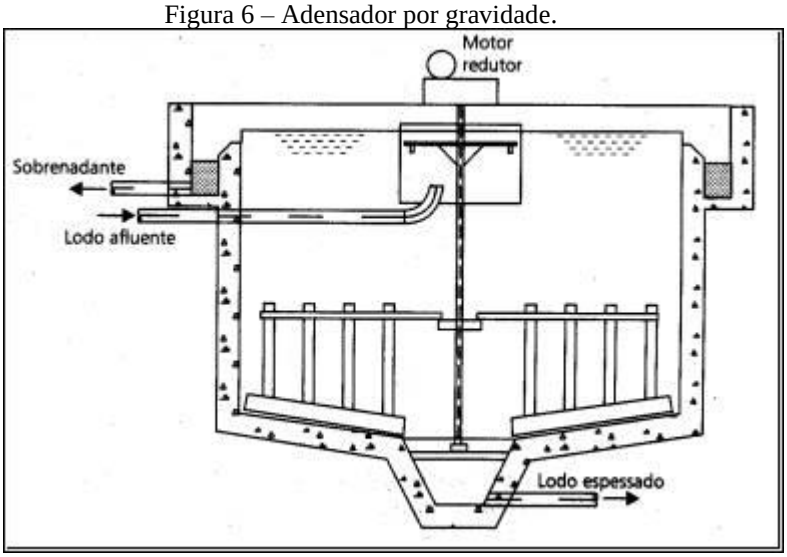
2.6.1 Adensamento por Gravidade

A sedimentação é uma operação unitária que tem como objetivo a concentração da parte sólida do resíduo, que se dá quando as partículas suspensas presentes no lodo são decantadas devido sua densidade e o efeito da gravidade. Ela propicia a clarificação do líquido e o adensamento das suspensões através da força da gravidade sobre as partículas, o que promove

a sedimentação delas no fundo da unidade decantadora (Lovo, 2016; Costa, 2024; Ismail; Di Bernardo, Dantas, 2021; Mello *et al.*, 2024).

A Figura 6 apresenta um modelo de adensador por gravidade.

Figura 6 – Adensador por gravidade.



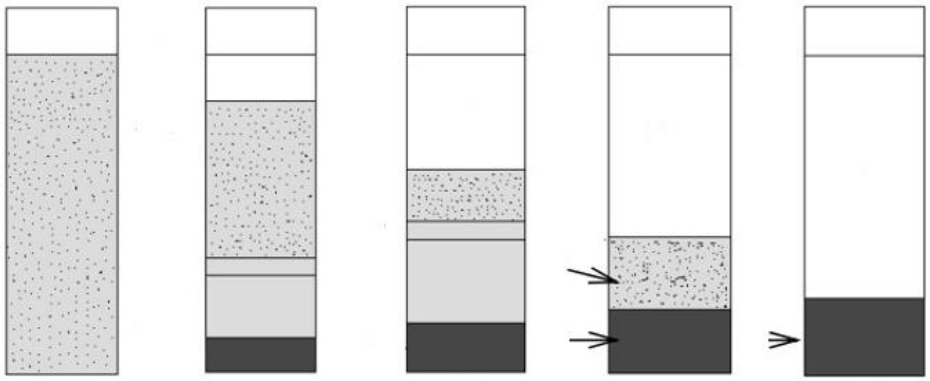
Fonte: Unicamp, 2024.

Para os resíduos gerados em estações de tratamento de efluentes (ETE's), são comumente utilizados tanques de adensamento por gravidade, onde a água é retirada até que se obtenha a concentração desejada de sólidos suspensos totais (SST). É importante realizar ensaios laboratoriais em colunas de sedimentação para se projetar um tanque de adensamento por gravidade, pois, a concentração de sólidos que se visa atingir no resíduo final influencia de forma direta na área destinada para a clarificação do lodo e na dosagem de polímero a ser utilizada (Di Bernardo *et al.*, 2012; Lovo 2016; Ismail; Di Bernardo; Dantas, 2021).

O ensaio de sedimentação em proveta é um processo de separação líquido-sólido que simula o que ocorre na prática. Ele tem o objetivo de identificar o comportamento das partículas em suspensão e o deslocamento da interface de sólidos ao longo do tempo, em uma proveta, com isso, verificando dados de velocidade de sedimentação e a concentração máxima dos sólidos. O ensaio deve ser acompanhado por um temporizador (cronômetro) e deve ser avaliada a altura do sedimento conforme a suspensão decanta. (França; Casqueira, 2024; Zanca, 2024).

A Figura 7 ilustra o método de ensaio de sedimentação em provetas.

Figura 7 – Método de ensaio de sedimentação em proveta.



Fonte: Kirschner, 2008.

2.6.1.1 Determinação do Índice Volumétrico de Lodo (IVL)

O Índice Volumétrico de Lodo se dá pelo volume em mililitros ocupado pelo lodo após o tempo de 30 minutos de sedimentação. Um resíduo sólido que apresenta boa eficiência em sedimentação possui um IVL em torno de 100 L/mg e, acima de 200 L/mg, já manifesta dificuldade no processo de decantação, conhecido também como *bulking* (Pinto *et al.*, 2024).

Na Equação 1, em sequência, está demonstrado o cálculo utilizado para a determinação do Índice Volumétrico de Lodo:

Equação 1 – Cálculo do Índice Volumétrico de Lodo

$$IVL = \frac{H_{30}}{(H_0 * SST)}$$

Onde:

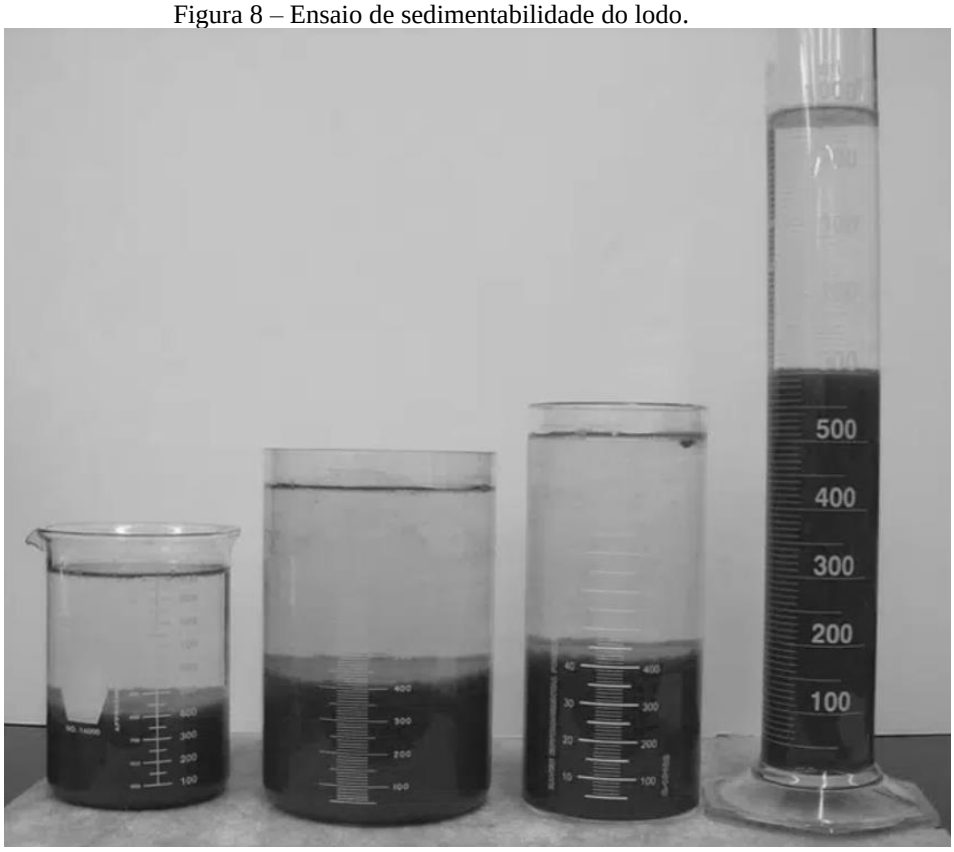
- IVL: Índice Volumétrico de Lodo (L/kg)
- H_{30}: Altura da interface após 30 minutos de sedimentação (cm)
- H_0: Altura da interface no instante inicial (cm)
- SST: Concentração de sólidos em suspensão (kg/L)

Para a determinação do Índice Volumétrico de Lodo (IVL), um ensaio de sedimentação em provetas pode ser realizado, acomodando-se o lodo em uma proveta, com a adição ou não

de um condicionante químico, anotando-se a altura inicial e a altura após 30 minutos de decantação ocupadas pelo lodo (Pinto *et al.*, 2024).

Na Figura 8 está demonstrado como é realizado um ensaio de sedimentação de lodo em escala laboratorial para a determinação do IVL.

Figura 8 – Ensaio de sedimentabilidade do lodo.



Fonte: Acquasolution, 2024.

2.6.2 Desaguamento por Blocos Drenantes

O desaguamento do lodo, também conhecido como desidratação, é uma operação unitária de separação sólido-líquido que busca reduzir seu volume a partir da perda de umidade. A capacidade de desidratação vai variar de acordo com o lodo, a depender do tipo de sólido e a forma de associação da água com ele (Silva, 2017).

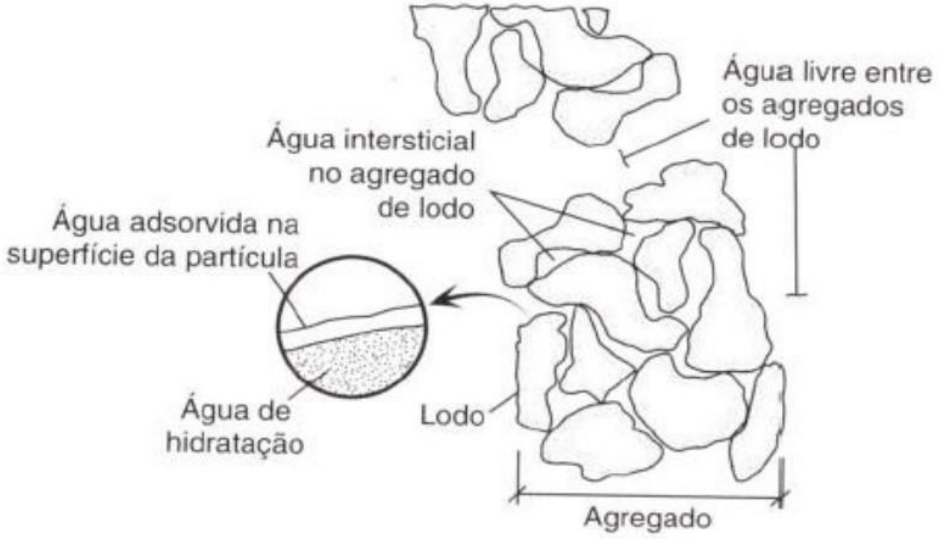
Existem 4 tipos de associação da água com as partículas de lodo:

- Água livre: a água livre é a quantidade de água que pode ser separada do resíduo sólido apenas pela força da gravidade – cerca de 70% do lodo;

- Água intersticial: a água intersticial é a água que está ligada por capilaridade entre os flocos de resíduo sólido, necessitando, geralmente, de condicionamento químico ou força mecânica para ser desaguada;
- Água adsorvida: a água adsorvida, ou água de superfície, está ligada por pontes de hidrogênio, também necessitando de condicionamento químico ou força mecânica para ser desaguada; e
- Água celular: a água celular, ou de hidratação, é a parcela que apresenta maior dificuldade para remoção pois está dentro das partículas. Corresponde a aproximadamente 10% do volume de lodo e só é retirada através de mudança de estado de agregação promovidos por força térmica – evaporação ou congelamento (Silva, 2017).

Na Figura 9 estão demonstradas as formas de associação da água com o lodo.

Figura 9 – Formas de associação da água com o lodo.



Fonte: Metcalf; Eddy, 2014.

A escolha do sistema de desaguamento a ser utilizado é determinada através das características do lodo, o tipo de disposição final desejado e o espaço disponível, onde o desaguamento pode ocorrer de maneira natural ou mecanizada (Alves, 2017; Silva, 2017).

No Quadro 1 estão descritos os principais métodos de desaguamento e suas técnicas de separação.

Quadro 1 – Operações de desaguamento.

Método de desaguamento	Técnica de Separação	Tipo de Desaguamento
Leito de secagem	Filtração e evaporação	Natural
Lagoas de secagem	Evaporação	Natural
Filtros *bag*	Filtração	Natural
Centrífuga	Centrifugação	Mecânico
Filtro de esteira	Filtração	Mecânico
Filtro prensa	Filtração	Mecânico
Prensa de rosca	Filtração	Mecânico
Prensa giratória	Filtração	Mecânico
Desaguamento elétrico	Filtração	Mecânico
Secador rotativo	Evaporação	Mecânico

Fonte: Adaptado de Alves, 2017; Silva, 2017.

No Quadro 2 estão mencionadas as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de desaguamento.

Quadro 2 – Algumas das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de desaguamento.

Método de desaguamento	Vantagens	Desvantagens
Leito de secagem	• Apresenta o menor custo de investimento quando se possui área disponível; • Baixa habilidade requerida para o operador; • Baixo consumo de energia; • Baixo consumo de químicos; • Menos sensível a variação das características do lodo; • Maior teor de sólidos secos quando comparado aos métodos mecanizados.	• Requer grandes áreas; • Deve-se levar em consideração os efeitos climáticos; • Para a remoção do lodo, é exigida intensa mão de obra.
Lagoas de secagem	• Baixo consumo de energia; • Não exige consumo de químicos; • Baixo custo de investimento quando se possui área disponível;	• Apresenta um risco potencial de problemas com odor e vetores; • Possível contaminação do solo e das águas subterrâneas; • Requer grandes áreas;

	• É o método que exige menor habilidade operacional; • Matéria orgânica mais estabilizada.	• Possui uma aparência desagradável; • Deve-se levar em consideração os efeitos climáticos;
Filtros *bag*	• Alta capacidade de desaguamento; • Baixo consumo de energia; • Menor investimento quando comparado a desaguamentos mecânicos; • Podem ser instalados na vertical ou horizontal.	• Requer grandes áreas quando utilizado na horizontal; • Longos períodos de secagem; • Dificuldade no transporte de *bags* totalmente preenchidos.
Centrífuga	• Fácil instalação; • Baixo capital em relação ao custo x capacidade; • Não apresenta problemas com odor; • Rápido para ligar e desligar.	• Problemas com manutenção devido a desgastes no rolamento; • Requer mão de obra habilitada; • Requer triturador de lodo na alimentação; • Não é possível ver a zona de desaguamento para melhorar o desempenho.
Filtro de esteira	• Baixo consumo de energia; • Baixo custo de investimento e operação; • Menos complexo e mais fácil de manter.	• Possui hidráulica limitada; • Requer triturador de lodo na alimentação; • Sensível as características do lodo; • Baixa vida útil; • Emissão de aerossol; • Emissão de odor.
Filtro prensa	• Dos desaguamentos mecânicos, é o que gera lodo com maior concentração de sólidos; • Baixo teor de sólidos suspensos no filtrado; • Operação simples;	• Operação em batelada; • Alto custo de investimento e mão de obra; • Requer estrutura de suporte.

	• Baixo consumo de químicos.	
Prensa de rosca	• Requer baixa velocidade de rotação; • Apresenta pouco ruído; • Baixo consumo de energia.	• Limitação na capacidade; • Requer lavagem a cada ciclo de operação.
Prensa giratória	• Requer baixa velocidade de rotação; • Apresenta pouco ruído; • Baixo consumo de energia; • Não requer lavagem periódica.	• Requer grande espaço disponível; • Limitação na capacidade; • Não é possível ver a zona de desaguamento para melhorar o desempenho.
Desaguamento elétrico	• Operação automática; • Mecanismo simples e fácil de manter; • Flexível às características do lodo de entrada; • Possui mais eficiência do que os secadores.	• Operação por batelada; • Alto custo de investimento; • Requer tratamento de odor; • Requer um pré-desaguamento.
Secadores mecânicos	• Atinge altos teores de sólidos totais (acima de 90%); • Maior redução de volume; • Maior produtividade de secagem.	• Requer um pré-desaguamento; • Alto investimento; • Alto consumo de energia.

Fonte: Adaptado de Silva, 2017.

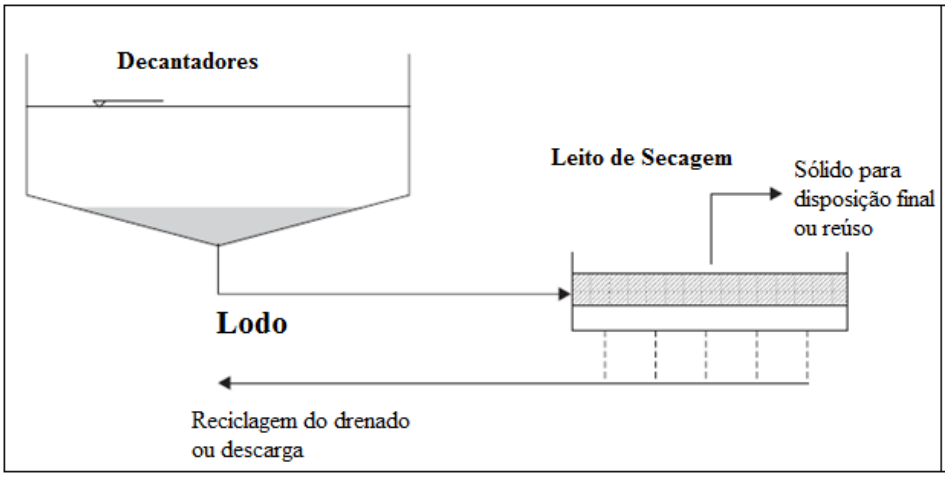
Uma das técnicas mais utilizadas para o desaguamento do lodo é o leito de secagem. Essa tecnologia natural é menos complexa, de operação simples e baixo consumo de energia. São utilizados para a redução da umidade presente no lodo pelo processo de drenagem que ocorre com o auxílio da força gravitacional e evaporação da superfície de lodo exposta ao ar, produzindo lodos mais secos, podendo atingir concentrações acima de 60% (Silva, 2017).

O leito de secagem, geralmente formado por um tanque retangular com fundo e paredes de concreto, é composto por uma camada filtrante de areia e brita e um suporte de tijolos. Seu procedimento operacional envolve o bombeamento do lodo para a superfície do leito, seguido da adição dos condicionantes químicos (quando utilizados). O desaguamento é realizado através

do meio filtrante, o filtrado retorna para o sistema e a parte sólida fica abaixo do suporte, onde ocorrerá a etapa de secagem do lodo até que se atinja a concentração de sólidos desejada. A remoção do lodo concentrado pode ocorrer de forma manual ou mecânica (Silva; Pohlmann, 2014; Silva; Silva; Ribeiro, 2016; Silva, 2017; Silva; Achon; Coimbra, 2017; Silva; Silva; Moruzzi, 2024).

A Figura 10 apresenta um esquema de leito de secagem.

Figura 10 – Esquema de leito de secagem.



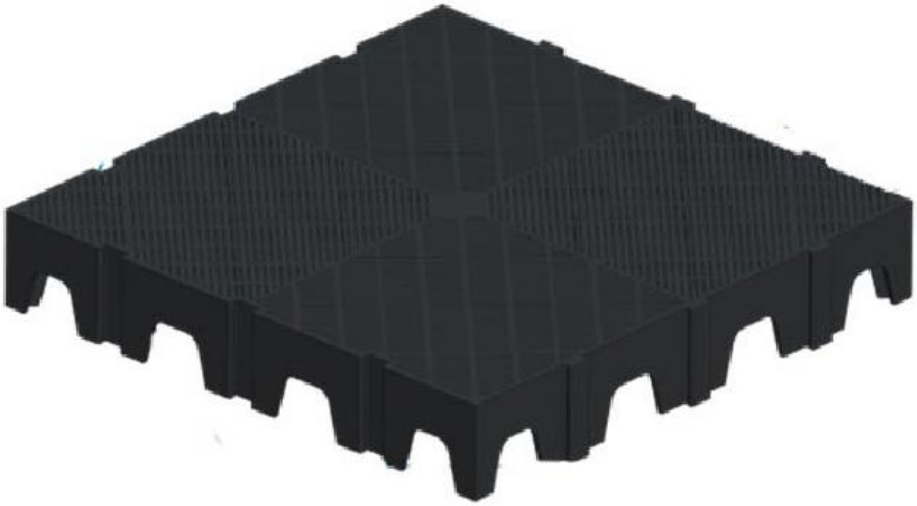
Fonte: Bau, 2016.

Apesar de ser o mais utilizado, o leito de secagem apresenta, hoje, algumas desvantagens que se evidenciam – como a necessidade de uma grande área, a influência do clima, a liberação de odores, a proliferação de vetores, o risco de contaminação do lençol freático, entre outros; e evoluções na técnica têm surgido com o objetivo de minimizá-las, como o leito com piso de blocos drenantes (Silva; Pohlmann, 2014; Silva; Silva; Ribeiro, 2016; Silva; Achon; Coimbra, 2017; Silva; Silva; Moruzzi, 2024).

O sistema de piso de blocos drenantes é um painel de poliuretano ou polipropileno com ranhuras em formato de cunha que substitui a areia e a brita do leito de secagem convencional e permite eficiente filtragem de lodo As ranhuras são de 0,38 mm e as dimensões de cada peça são de 30,5 cm x 30,5 cm x 5 cm de altura. A estrutura formada pela integração dos blocos drenantes formam leitos de secagem que suportam um peso de até 500 kg por bloco e podem secar 8 a 12% do resíduo sólido no período de 24 horas e chegar a uma eficiência de 96,24% em 22 dias de secagem (Silva; Pohlmann, 2014; Silva; Silva; Ribeiro, 2016; Alves, 2017 Silva; Achon; Coimbra, 2017; Silva; Silva; Moruzzi, 2024;).

A Figura 11 apresenta um modelo de bloco drenante e a Figura 12, a montagem de um leito de secagem por blocos drenantes.

Figura 11 – Bloco drenante de polipropileno.



Fonte: Silva; Pohlmann, 2014.

Figura 12- Montagem de leito de secagem por blocos drenantes.

Fonte: CISABES, 2021.

A Figura 13 apresenta um leito de secagem por blocos drenantes.

Figura 13 – Leito de secagem por blocos drenantes.

Fonte: CISABES, 2021.

O filtrado proveniente do desaguamento por blocos drenantes possui alta qualidade – normalmente uma concentração de sólidos em suspensão menor do que 50 mg/L e baixos níveis de DBO e DQO em comparação com outros sistemas de desaguamento. A torta formada é facilmente retirada por carregadores mecânicos e sua destinação final é comumente aterros sanitários (Alves, 2017).

Na Figura 14 é apresentado o método de limpeza do leito de secagem por blocos drenantes através de carregadores mecânicos.

Figura 14 – Limpeza do leito de secagem por blocos drenantes.

Fonte: Alves, 2017.

Possui como vantagens uma drenagem rápida e constante, de fácil manutenção e limpeza e não colmata o meio filtrante. A remoção dos sólidos ocorre de maneira mais fácil, apresentando um rendimento maior em relação ao leito de secagem convencional, não apresenta problemas de entupimento, é resistente à abrasão e corrosão, além de gerar um filtrado com baixo teor de sólidos suspensos. Como desvantagem, pode-se citar o custo de implementação mais alto comparado ao leito de secagem convencional (Silva; Pohlmann, 2014; Silva; Silva; Ribeiro, 2016; Alves, 2017; Silva; Achon; Coimbra, 2017; Silva; Silva; Moruzzi, 2024).

2.6.2.1 Taxa de Aplicação de Sólidos

A Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) é a relação entre a massa de sólidos presentes no lodo, introduzida em uma unidade de tratamento e a área sobre a qual é aplicada em $kgST/m^2$ (Iniciativa Saneamento Inclusivo, 2011). A Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) é uma das variáveis determinantes de projeto que influencia no desempenho dos leitos de secagem. Segundo Mortara (2011), quanto maior a TAS, maior a espessura da camada após a drenagem e, consequentemente, maior a dificuldade na perda de umidade.

2.7 POLÍMEROS ORGÂNICOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS

Os polímeros, também chamados de polieletrólitos por apresentar dissociação em cargas negativas ou positivas quando adicionados em água, são substâncias químicas obtidas pela formação de macromoléculas orgânicas a partir de unidades menores repetidas, conhecidas como monômeros. Essa formação se dá por meio de reações de polimerização, através de ligações químicas covalentes que originam compostos de elevada massa molar (Silva, 2017; Arruda, 2020).

As reações de polimerização podem ocorrer por adição ou por condensação:

- Polimerização por adição ou poliadição: os polímeros são formados pela combinação de monômeros iguais ou diferentes através da quebra da ligação π que existe entre os carbonos, sem que ocorra a liberação de moléculas ou átomos. Como exemplos de polímeros formados a partir de reações de adição ou poliadição podemos citar o teflon (utilizado principalmente como revestimento antiaderente de panelas), o polietileno (utilizado em garrafas plásticas, brinquedos, etc) e o PVC (utilizado em tubulações, mangueiras, etc).

- Polimerização por condensação ou policondensação: os polímeros são obtidos pela combinação de monômeros iguais ou diferentes através da liberação de átomos e moléculas - geralmente água. Nesse caso, os monômeros devem possuir pelo menos dois grupos funcionais diferentes. Um exemplo de polímero formado por reações de condensação ou policondensação é o nylon (Arruda, 2020).

A estrutura dos polímeros pode possuir cadeias poliméricas lineares (polietileno, nylon), ramificadas (polietileno de baixa densidade), com ligações cruzadas (borrachas, elásticos) ou reticuladas (epóxis). Quanto mais ramificações possuir a cadeia polimérica, menor será sua densidade, enquanto estruturas lineares apresentam uma maior densidade e capacidade de acoplamento, além de maior temperatura de fusão e ebulição (Arruda, 2020).

Em estações de tratamento de efluentes, os polímeros são utilizados no tratamento de resíduos para proporcionar o condicionamento do lodo e aprimorar o processo de remoção da água presente nele. O condicionamento que antecede a etapa de desaguamento envolve as etapas de coagulação com a adição de polímeros que facilitam a aproximação das partículas do lodo, e floculação, onde os flocos formados na coagulação se agregam quando em baixa agitação. Eles podem ser tanto sintéticos como naturais e, enquanto os polímeros sintéticos auxiliam na coagulação e podem ser utilizados como coagulantes primários, os polímeros naturais são utilizados como auxiliares da floculação e da filtração. São classificados principalmente de acordo com sua carga elétrica em catiônicos, aniônicos e não-iônicos e seu peso molecular – que pode ser baixo, médio, alto ou muito alto (Lovo, 2016; Silva, 2017).

Como vantagens do uso de polímeros no condicionamento do lodo, pode-se citar o manuseio seguro, a redução de problemas na operação e manutenção, não aumento da massa de resíduo sólido e, os polímeros não reduzem a propensão do resíduo desidratado à combustão, o que propicia a incineração como disposição final, se for o caso (Silva, 2017). Atualmente, a utilização de coagulantes orgânicos tem aumentado, devido aos problemas ambientais causados pelo uso de condicionantes inorgânicos. Além disso, a utilização de polímeros orgânicos favorece a disposição final dos resíduos formados, visto que não possuem a presença de metais potencialmente tóxicos – o que não ocorre com o uso dos demais polímeros (Lovo, 2016).

A escolha do tipo de polímero e dosagem a serem utilizadas dependem das características do lodo, a tecnologia de desaguamento que será empregada e as condições de mistura entre o lodo e o produto. As dosagens requeridas podem ser estimadas baseando-se na fonte do lodo – primário, ativado ou digerido; e pode-se determinar a melhor dosagem através

de ensaios experimentais de adensamento por gravidade seguido do cálculo do Índice Volumétrico de Lodo (IVL) (Alves, 2017; Silva, 2017).

2.7.1 Polímeros Orgânicos Sintéticos Catiônicos

Os polímeros catiônicos são macromoléculas que apresentam cargas positivas em sua estrutura, distribuídas de maneira uniforme e que interagem com os íons presentes em seu meio, se ligando com partículas ou outras substâncias carregadas negativamente (PG Química, 2024). Sua principal característica é a presença de cargas positivas, devido, principalmente, ao grupo de aminas quaternárias, que interagem intensamente com substâncias carregadas por cargas negativas. Podem apresentar um peso molecular de baixo até alto, e sua solubilidade e viscosidade variam de acordo com ele (Lovo, 2016).

Os polímeros catiônicos aglomeram as partículas em suspensão que estão presentes nos efluentes, criando flocos maiores e facilitando a separação sólido-líquido (Acqua Nobilis, 2024).

2.7.2 Polímeros Orgânicos Sintéticos Aniônicos

Os polímeros aniônicos são formados a partir da adição de monômeros que possuem cargas negativas, conhecidos como ânions. Se ligam com partículas ou outras substâncias carregadas positivamente, porém, ao contrário dos polímeros catiônicos, são extremamente sensíveis a impurezas e contaminantes, como ácidos e cloretos, que podem proporcionar o fim prematuro do processo de floculação (Lovo, 2016).

Os polímeros aniônicos são responsáveis pelo processo de floculação em estações de tratamento de efluentes. Eles têm como característica a atração de partículas de impurezas, aumentando sua densidade. Auxilia no processo de condicionamento do lodo (Acqua System, 2024; Acqua Nobilis, 2024).

2.7.3 Polímeros Orgânicos Naturais

Os polímeros naturais, conhecidos também como biopolímeros, são substâncias macromoleculares encontradas na natureza, produzidos por organismos vivos que estão presentes em proteínas, lipídios, na celulose, quitina e no látex (borracha natural) (Arruda, 2020).

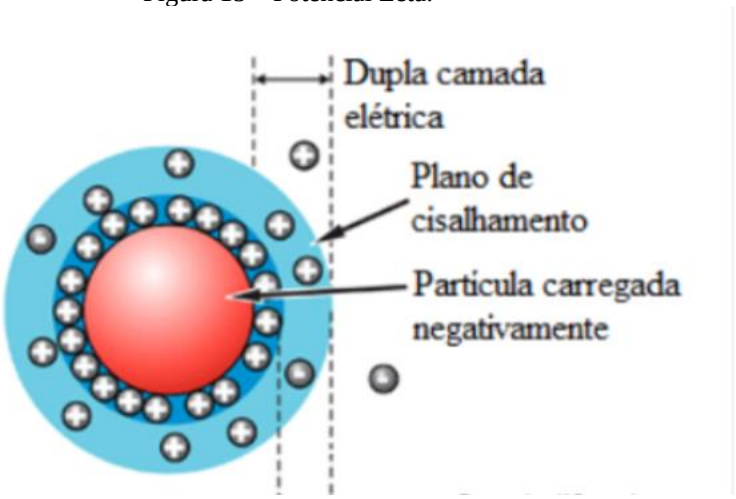
A quitosana é um polímero natural advindo do processo de desacetilação química da quitina – um biopolímero abundante encontrado, em sua maioria, em carapaças de crustáceos (caranguejo, lagosta e camarão), em insetos, na parede celular de fungos e em moluscos (Bezerra, 2011). Esse biopolímero apresenta ampla versatilidade, baixo custo, não-toxicidade e é renovável, biodegradável e biocompatível (Bezerra, 2011).

2.7.4 Potencial Zeta

O Potencial Zeta, também conhecido como potencial eletrocinético, "é a medida do potencial elétrico na interface entre uma partícula em suspensão e o fluido ao seu redor." Ele apresenta a atração/repulsão eletrostática entre as partículas e exerce um papel importante na determinação da estabilidade de uma suspensão (Dafratec, 2024; Malvern Panalytical, 2024).

A Figura 15 demonstra o Potencial Zeta:

Figura 15 – Potencial Zeta.



Fonte: Malvern Panalytical, 2024.

O Potencial Zeta é uma propriedade da partícula e, também, do meio em que ela se encontra. Fatores como pH, concentração, tipo de íons e a presença de aditivos, como surfactantes por exemplo, afetam o Potencial Zeta, que deve ser medido a partir de equipamentos especializados (Dafratec, 2024; Malvern Panalytical, 2024).

A Tabela 3 apresenta a estabilidade de sistemas dispersos de acordo com o Potencial Zeta.

Tabela 3 – Estabilidade de sistemas dispersos de acordo com Potencial Zeta.

Potencial Zeta (mV)	Estabilidade
0 a ± 10	Altamente instável – coagulação/floculação rápida
± 10 a 20	Estabilidade limitada
± 20 a 30	Moderadamente estável
> ± 30	Altamente estável

Fonte: Adaptado de Malvern Panalytical, 2024.

Utiliza-se o sinal ± pois o Potencial Zeta pode ser positivo ou negativo, não influenciando na estabilidade apresentada pela dispersão (Malvern Panalytical, 2024).

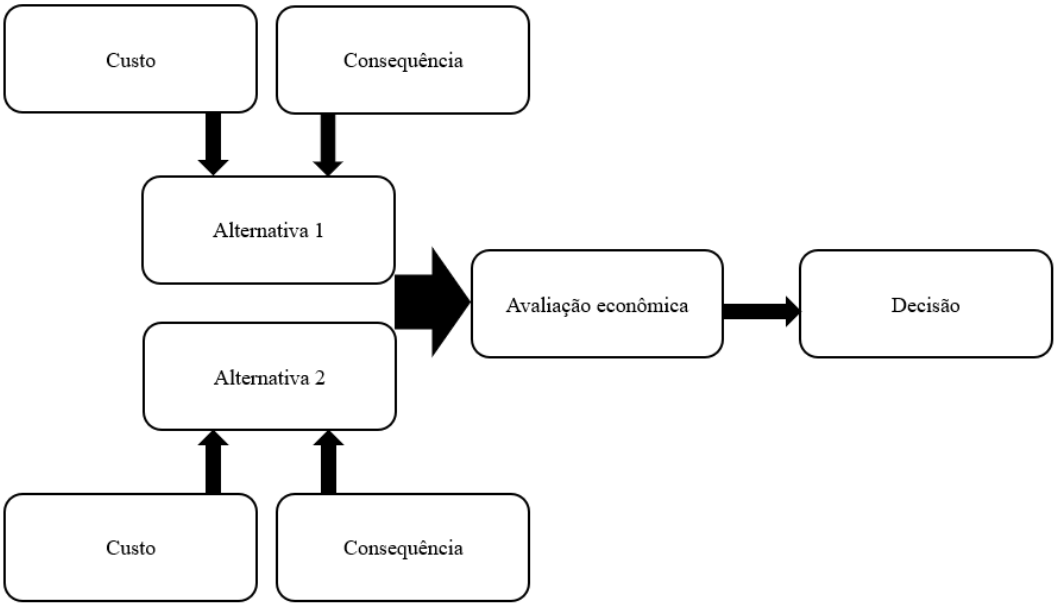
2.8 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica é uma análise comparativa de custos e deve preceder a tomada de decisões. Ela deve levar em consideração variáveis como a rentabilidade, o aproveitamento e a valorização da unidade (Calaes; Netto, 2012).

Em uma avaliação econômica, devem ser aplicadas técnicas analíticas para identificação, medição, avaliação e comparação entre os custos e consequências de duas ou mais alternativas propostas, originando um critério de decisão para aplicar os recursos de maneira eficiente (Global Health eLearning Center, 2024).

Na Figura 16 está apresentado um fluxograma de avaliação econômica.

Figura 16 – Fluxograma de avaliação econômica.

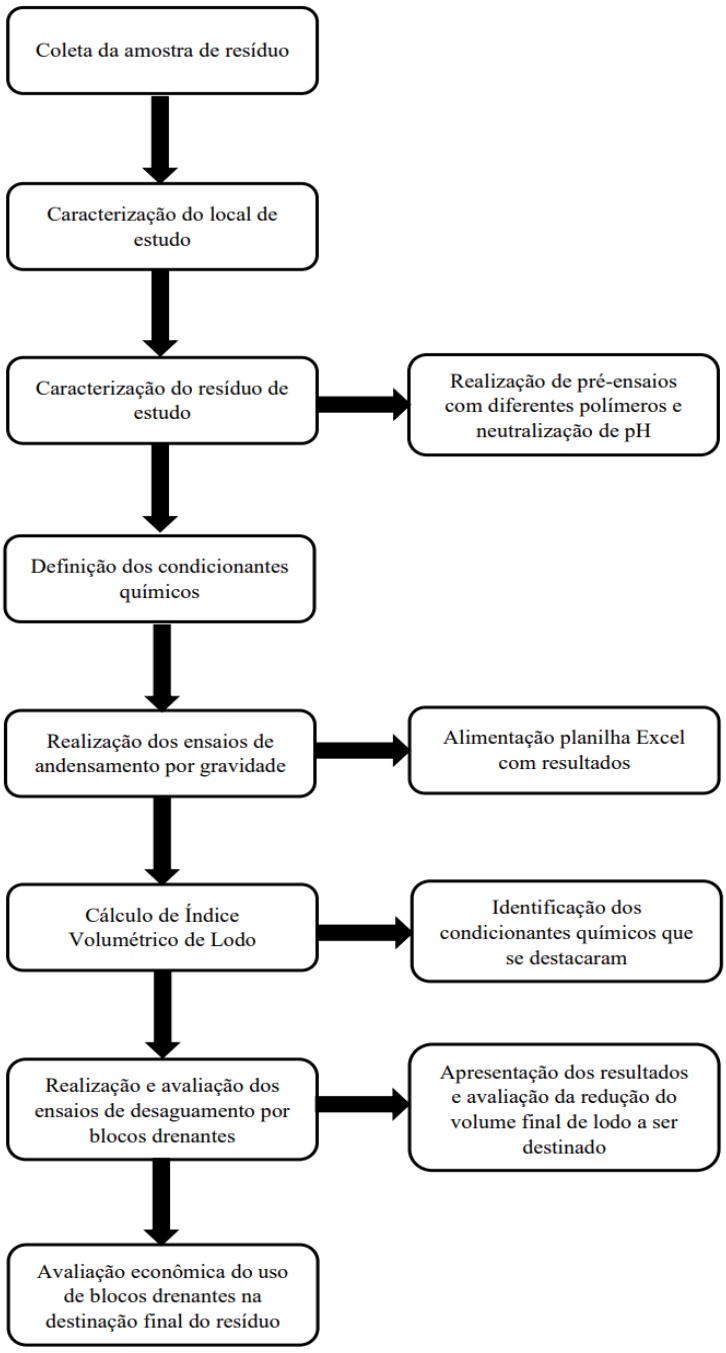


Fonte: Adaptado de Global Helath eLearning Center, 2024.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho trata-se de uma pesquisa exploratória de abordagem quali-quantitativa, com natureza aplicada, e utiliza a técnica de pesquisa experimental em um estudo longitudinal. As etapas relacionadas à metodologia do trabalho estão resumidamente expressas no fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma geral para a realização do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O trabalho foi realizado em uma indústria química do munícipio de Sertãozinho, região metropolitana de Ribeirão Preto, localizada no nordeste do estado de São Paulo, como demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Localização da área de estudo.

Fonte: Google fotos, 2024.

A empresa fornece produtos químicos que atendem o setor sucroalcooleiro, com produtos para moendas, tratamento de água para geração de vapor e energia, sistema de resfriamento de água de torres, clarificação de caldo e xarope, fermentação e destilaria e estações de tratamento de água, fabricados em tanques de mistura e agitação em um processo batelada. Na estação de tratamento de efluentes localizada em sua planta, são tratados os resíduos gerados pela atividade de higienização e lavagem dos contêineres que retornam dos clientes. Esses contêineres retornam à empresa após findar-se no consumidor e passam por uma avaliação preliminar de seu estado de conservação para posteriormente serem destinados ao descarte, quando não podem ser reutilizados, ou processo de higienização - a empresa adota o sistema de logística reversa fazendo o reaproveitamento dessas embalagens que apresentam boas condições.

Para a caracterização do local de estudo, foram feitas medições dos tanques que compõem o sistema de tratamento da ETE da empresa, anotou-se a sua capacidade total e como são realizadas as etapas de tratamento e geração do resíduo sólido utilizado no presente estudo. Foi elaborado um fluxograma para melhor entendimento.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL

Foi utilizado o resíduo sólido proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria química. A coleta da amostra foi realizada no dia 01 de abril de 2024, na estação de tratamento de efluentes da empresa. Em um balde, foi coletada uma amostra de 100 L na parte inferior do primeiro tanque, onde ocorre o processo de decantação e formação do resíduo sólido industrial. A amostra foi transferida, com o auxílio de um funil, para duas bombonas de 50 L, onde foram devidamente identificadas com a data e o horário da coleta. A amostra se apresentava com excesso de água, o que demonstra baixa efetividade na concentração do lodo resultante.

A Figura 19 apresenta o local de coleta da amostra.

Figura 19 – Local de coleta da amostra.

Fonte: Autor, 2024.

Foi realizada apenas uma coleta de resíduo pois o mesmo não apresenta variações em suas características.

Foram feitas análises físico-químicas para a caracterização do resíduo bruto em termos de pH, densidade, Potencial Zeta, sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais; e, após, definidos os parâmetros e condições para os respectivos ensaios. O Quadro 3 traz os equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização do resíduo.

Quadro 3 – Equipamentos utilizados na pesquisa.

Equipamentos	Finalidade
Balança eletrônica BL 210 S – marca Sartorius	Pesagem de condicionantes químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição de tempo
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – marca Orion	Leitura do pH
Zetasizer Advance Series, modelo Ultra – marca Malvern Instruments	Leitura do Potencial Zeta
Balão graduado 100 mL	Análise da densidade
Proveta graduada 250 mL	Ensaios de adensamento por gravidade
Caixa de blocos drenantes de polipropileno 20 L	Ensaios de desaguamento por blocos drenantes

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os parâmetros físico-químicos, suas unidades, metodologias e limites de detecção utilizados na pesquisa estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos, unidades, metodologias e limites de detecção.

Parâmetro	Unidade	Metodologia	Limite de detecção (LDM)
pH	Adimensional	Potenciométrico	0,01
Potencial Zeta	mV	Nefelométrico	0,1
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	1
Sólidos Suspensos Totais	mg/L		
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.2.1 Determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para a determinação do potencial hidrogeniônico do resíduo, inicialmente foi realizada a calibração do potenciômetro (pHmetro) com as soluções tampão de pH de 4,0 e 7,0. Em seguida, foi adicionado aproximadamente 100 mL de amostra em um béquer e os eletrodos foram posicionados na amostra. Foram realizadas medições em triplicata.

3.2.2 Sólidos Totais (ST)

Para a determinação da concentração de sólidos totais, inicialmente foi colocado um cadinho de porcelana vazio em uma estufa a 100 °C pelo período de 30 minutos, sendo resfriado à temperatura ambiente após o período. Em seguida, pesou-se o cadinho de porcelana vazio

(massa inicial) e adicionou-se 100 mL de amostra de resíduo, que foi encaminhado para etapa de evaporação na manta aquecedora, até que o mesmo evapore completamente. Após a etapa de evaporação, o cadinho foi colocado novamente na estufa a 100 °C até que estivesse completamente seco, quando foi retirado e deixado resfriar a temperatura ambiente, pesando novamente o cadinho (massa final). A determinação de sólidos totais no resíduo é obtida pela diferença entre a massa final e a massa inicial da amostra após o período de secagem.

3.2.3 Sólidos Suspensos Totais (SST)

A determinação do teor de sólidos suspensos totais foi feita pela filtração do resíduo em membrana de 0,45 micra. Inicialmente, a membrana foi levada para a estufa à temperatura de 100 °C por 30 minutos e resfriada à temperatura ambiente após esse tempo. A membrana já resfriada foi pesada e anotou-se a massa inicial. Com a massa da membrana seca, a mesma foi colocada em um sistema de filtração, onde foram filtrados 50 mL da amostra de resíduo e em seguida, foi repetido o processo de secagem em estufa e resfriamento à temperatura ambiente. Realizou-se a pesagem da membrana após o processo de filtração (massa final). A determinação de sólidos suspensos totais no resíduo é obtida pela diferença entre a massa final e a massa inicial da membrana após o período de secagem.

3.2.4 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Os sólidos dissolvidos totais são determinados pela subtração do teor de sólidos totais e sólidos suspensos totais, conforme Equação 2 abaixo:

Equação 2 – Cálculo dos Sólidos Dissolvidos Totais.

$$SDT = ST - SST$$

Onde:

- SDT: Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)
- ST: Sólidos Totais (mg/L)
- SST: Sólidos Suspensos Totais (mg/L)

3.2.5 Densidade

Para a análise da densidade, inicialmente pesou-se o balão volumétrico de 100 mL vazio, anotou-se a massa encontrada (m_1) e fez-se a tara da balança. Após a tara, foi adicionada cuidadosamente 100 mL da amostra do resíduo, ajustando o volume até o menisco e o balão foi novamente pesado e anotou-se a nova massa (m_2).

Para encontrar a massa do produto (m), subtraiu-se a massa do balão completado com a amostra (m_2) da massa do balão vazio (m_1).

Para definição da densidade, realizou-se o seguinte cálculo, de acordo com a Equação 3 abaixo:

Equação 3 – Cálculo da densidade.

$$D = \frac{m}{V}$$

Onde:

- D: densidade do resíduo (g/mL)
- M: massa do resíduo (g)
- V: volume do balão volumétrico (mL)

3.2.6 Potencial Zeta

A carga residual de cada um dos polímeros utilizados no trabalho foi analisada para o pH 3,0 e o pH 7,0 com o auxílio do equipamento Zetasizer Advance Series.

Para a análise do Potencial Zeta, foram adicionados 20 µL de amostra em uma cubeta e a leitura foi realizada no equipamento.

3.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES QUÍMICOS UTILIZADOS

Para os condicionantes químicos (polímeros) utilizados, foram preparadas soluções conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Preparo das soluções de polímeros.

Fonte: Autor, 2024.

Para a definição dos parâmetros e condições para a condução dos ensaios oficiais, foram realizados pré-ensaios, como a adição de hidróxido de sódio (NaOH) 0,01M para a neutralização do pH do resíduo, bem como ensaios sem o uso de polímeros (amostra bruta) e ensaios com o uso de diversos tipos de polímeros também foram feitos para selecionar os materiais que apresentaram melhores resultados.

Foram escolhidos quatro tipos de coagulantes a serem utilizados nos ensaios de adensamento por gravidade – esses condicionantes foram escolhidos devido ao seu desempenho nos pré-ensaios realizados, pois apresentaram maior capacidade de formação de flocos e sedimentação.

No Quadro 4 então demonstrados os coagulantes escolhidos.

Quadro 4 – Produtos químicos utilizados.

Produto Químico	**Nome Considerado**
Polímero orgânico sintético aniônico	Polímero AN-945
Polímero orgânico sintético catiônico	Polímero L-32
Polímero orgânico sintético catiônico	Polímero CAT-2170
Polímero orgânico natural	Quitosana

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para os ensaios de desaguamento, foram escolhidos, a partir dos cálculos de Índice Volumétrico de Lodo, os coagulantes que se destacaram na eficiência de sedimentação nos ensaios de adensamento por gravidade em provetas.

3.3.1 Definição das Dosagens de Coagulantes Utilizadas

A melhor dosagem de polímero é definida de acordo com a que proporciona menor resistência à filtração mediante o ensaio realizado. Alves (2017) *apud* Andreolli, Von Sperling e Fernandes (2007) indicam que o uso de polímeros orgânicos para condicionamento de lodo apresenta melhor eficiência do que os polímeros inorgânicos, apontando que as dosagens

podem variar entre 1 e 10 g/kg (Alves, 2017). Já para os ensaios de desaguamento, foi utilizada a dosagem recomendada pelo fabricante dos blocos drenantes.

A utilização de polímeros apresenta grande importância para galgar efeitos de repulsão eletrostática e hidratação do lodo. A escolha do polímero a ser utilizado é definida de acordo com o que proporciona menor resistência à filtração mediante o ensaio realizado (Alves, 2017).

As dosagens dos coagulantes utilizadas nos ensaios de adensamento por gravidade foram previamente estipuladas, baseadas no trabalho de Andreolli, Von Sperling e Fernandes (2007):

- 4 mg/L;
- 6 mg/L;
- 8 mg/L;
- 10 mg/L.

As dosagens de polímeros foram adicionadas da seguinte maneira:

- Dosagem de 4 mg/L: 1 mL de solução de polímero 1,0 g/L em 250 mL de resíduo bruto;
- Dosagem de 6 mg/L: 1,5 mL de solução de polímero 1,0 g/L em 250 mL de resíduo bruto;
- Dosagem de 8 mg/L: 2 mL de solução de polímero 1,0 g/L em 250 mL de resíduo bruto;
- Dosagem de 10 mg/L: 2,5 mL de solução de polímero 1,0 g/L em 250 mL de resíduo bruto.

Para os ensaios de desaguamento por blocos drenantes, foram utilizados os polímeros que se destacaram nos ensaios de sedimentação em provetas, na dosagem de 85 mg/L, recomendada pelo fabricante dos blocos drenantes, que foi preparada com a adição de 1,70 L de solução de polímero 1,0 g/L em 20 L de resíduo.

3.4 ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE

Os ensaios de adensamento por gravidade foram realizados para cada uma das dosagens escolhidas em uma coluna de sedimentação (proveta) graduada com capacidade de 250 mL, com altura de 23 cm e diâmetro igual a 3,5 cm.

3.4.1 Ensaios de Sedimentação em Provetas

O resíduo foi acomodado na coluna de sedimentação, onde foi agitado de forma manual por três vezes e posteriormente, deixado em repouso pelo tempo de 30 minutos – foi estipulado o tempo de repouso de 30 minutos devido ao cálculo do Índice Volumétrico de Lodo que seria aplicado com os resultados encontrados nos ensaios de adensamento por gravidade. Esse processo foi realizado em triplicata para cada uma das dosagens utilizadas. Após o tempo pré-estabelecido, os dados obtidos foram inseridos em uma planilha Excel para a elaboração dos cálculos de Índice Volumétrico de Lodo.

O procedimento foi repetido para cada um dos quatro condicionantes estudados.

O parâmetro de controle utilizado no adensamento por gravidade para a avaliação do efeito dos diferentes coagulantes pré-estabelecidos foi a altura da interface de lodo no tempo de 30 minutos. Já o parâmetro avaliado para escolha do melhor condicionante químico a seguir para os ensaios de desaguamento foi o cálculo IVL.

A determinação da altura de lodo para os cálculos do Índice Volumétrico de Lodo foi obtida no instante inicial (H_0) quando alocados na proveta graduada de 250 mL e após decantação por 30 minutos (H_{30}).

3.4.2 Determinação do Índice Volumétrico de Lodo

O Índice Volumétrico de Lodo foi calculado conforme Equação 1 mencionada acima e classificado de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação da sedimentabilidade do lodo de acordo com Von Sperling.

Índice Volumétrico de Lodo (L/kg)	Sedimentabilidade
0 – 50	Ótima
50 – 100	Boa
100 – 200	Média
200 – 900	Ruim

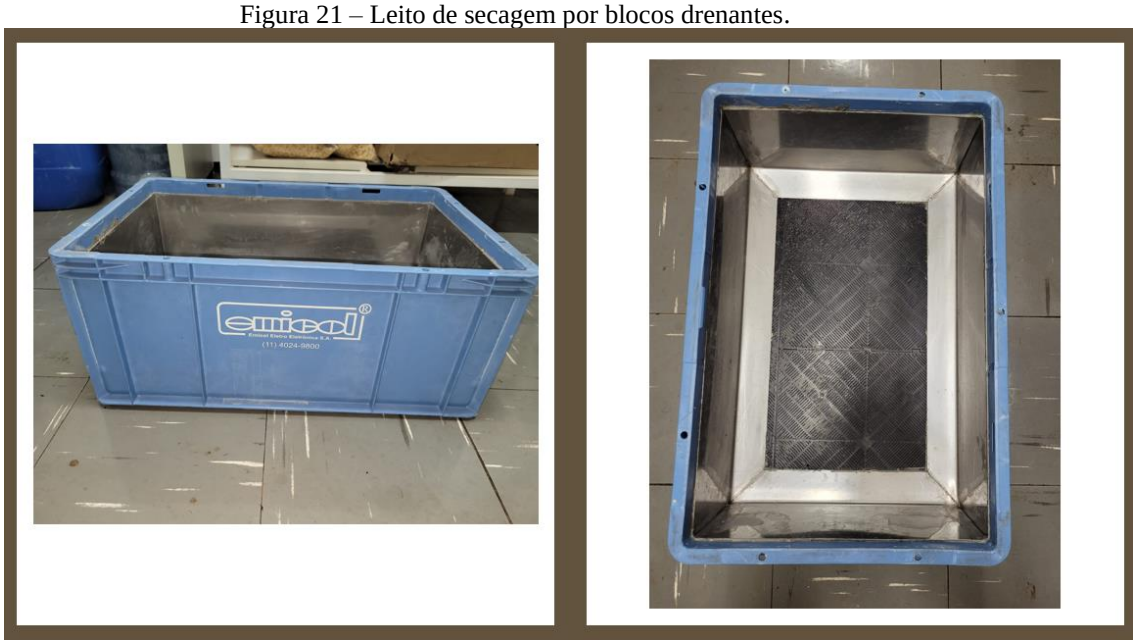
Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2002.

3.5 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES

A avaliação da eficiência do leito de secagem por blocos drenantes foi realizada em escala laboratorial por ensaios de desaguamento por blocos drenantes. O bloco drenante utilizado no teste é feito de polipropileno composto, cada um com medidas de 30 x 30 cm com 5 cm de altura, e, segundo o fabricante, possui 12% de área livre com aberturas cônicas de 0,07 mm (BRASWORLD, 2024).

O leito de secagem foi construído em caixas com fundos compostos por blocos drenantes. A caixa possui medidas de 15 cm de altura, 46 cm de comprimento e 26,5 cm de largura, totalizando uma área de 0,1219 m². Na Figura 21 é apresentado o leito de secagem por blocos drenantes utilizado nos ensaios de desaguamento em escala laboratorial.

Figura 21 – Leito de secagem por blocos drenantes.



Fonte: Autor, 2024.

O leito de secagem possui um sistema de drenagem para a saída do clarificado, que está apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Sistema de drenagem leito de secagem por blocos drenantes.

Fonte: Autor, 2024.

Nos ensaios de desaguamento por blocos drenantes foram utilizados os dois condicionantes químicos que se destacaram nos ensaios de sedimentação por provetas, encontrados a partir dos cálculos do Índice Volumétrico de Lodo e o único parâmetro de controle pré-definido foi o volume de lodo disposto no leito piloto: foi utilizado o volume de 20 L de resíduo com a dosagem de polímero estabelecida, recomendada pelo fabricante dos blocos drenantes.

Os ensaios de desaguamento por blocos drenantes foram realizados em partes dos meses de setembro e outubro, findando-se no início do verão. Foram depositados 20 L de resíduo no leito de desaguamento por blocos drenantes, deixados em repouso. O leito foi alocado na parte externa coberta do laboratório e foram coletadas amostras do drenado nos tempos definidos de 1 minuto, 11, 31, 51, 61, 71, 81, 91, 101, 1140 e 2880 minutos.

Para a coleta do drenado, inclinou-se o leito e abriu-se a torneira do sistema de drenagem pelo tempo de 1,5 minutos, e o mesmo era recebido em um béquer com capacidade de 4 L, para a medição do volume coletado. Com o volume coletado, foi possível definir o volume de lodo ainda retido na caixa.

A análise do teor de sólidos secos presente no resíduo ocorreu conforme mencionado no item 3.2.2. As coletas de lodo foram realizadas em dias intercalados, de 1 a 23 dias – período estipulado pelos autores Silva; Pohlmann (2014) em seus estudos.

O procedimento foi repetido para os dois condicionantes químicos utilizados. Os dados obtidos foram inseridos em planilha Excel para plotar os gráficos.

Para a determinação da redução de volume pelo leito de secagem, o parâmetro de controle utilizado foi o volume retido após o tempo de 2880 minutos (2 dias) e para a curva de secagem do lodo, observou-se o teor de sólidos secos em um período de 23 dias.

3.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Para a realização da avaliação econômica, levou-se em consideração o custo real que a empresa possui para o transporte e destinação final dos resíduos gerados na estação de tratamento de efluentes localizada em sua na planta industrial. Com base na concentração de sólidos totais presente no resíduo e no valor pago por ano à empresa terceirizada por quilograma de resíduo destinado, após a realização dos ensaios de desaguamento por blocos drenantes e em posse dos resultados obtidos para a redução do volume e teor de sólidos secos presentes no lodo, é possível calcular qual será a redução aproximada de custos.

Para isso, é necessário conhecer qual a concentração de sólidos totais presente no resíduo bruto, a densidade do resíduo, a quantidade de resíduo destinada por ano, o custo por kg de destinação e a concentração de sólidos totais secos ao final do período de secagem. O custo de ambos é calculado a partir do custo por kg pago para a destinação do resíduo.

Inicialmente, conhecendo-se a densidade do resíduo a partir dos ensaios de caracterização e a quantidade, em quilograma, destinada por ano, encontrou-se o volume de resíduo destinado, através da Equação 4:

Equação 4 – Encontrando o volume de resíduo destinado.

$$V = \frac{mr}{D}$$

Onde:

- V: volume de resíduo destinado por ano (L)
- mr: massa de resíduo destinada por ano (kg)
- D: densidade do resíduo (kg/L)

Com o volume de resíduo destinado por ano (Equação 4) e conhecendo-se a concentração de sólidos totais presentes no resíduo, encontrada nos ensaios de caracterização,

encontrou-se a quantidade de sólidos, em quilograma, que são enviados para destinação. O cálculo foi realizado a partir da Equação 5:

Equação 5 – Massa de sólidos enviada para destinação por ano.

$$ms = ST * V$$

Onde:

- ms: massa de sólidos destinada por ano (kg)
- ST: Sólidos Totais presentes no resíduo (kg/L)
- V: volume de resíduo destinado por ano (L)

Após os ensaios de desaguamento por blocos drenantes, onde foi identificada a concentração de sólidos secos ao final dos 23 dias de secagem, e conhecendo-se a massa de sólidos destinada por ano (Equação 5), calculou-se a massa de sólidos que será destinada após a etapa de secagem promovida pelo desaguamento através da Equação 6.

Equação 6 – Massa de sólidos após desaguamento por blocos drenantes.

$$msd = \frac{(ms * 100)}{TSS}$$

Onde:

- msd: massa de sólidos que será enviada para destinação após o desaguamento (kg)
- ms: massa de sólidos destinada por ano (kg)
- 100: cem por cento (%)
- TSS: Teor de Sólidos Secos atingido após 23 dias de desaguamento (kg/L)

O custo de ambos foi calculado a partir das Equações 7 e 8.

Equação 7 – Custo de destinação antes do desaguamento por blocos drenantes.

$$Custo = mr * R\$$$

Equação 8 – Custo de destinação após o desaguamento por blocos drenantes.

$$Custo = msd * R\$$$

Onde:

- Custo: valor pago ao ano para empresa terceirizada realizar a destinação do resíduo (R$)
- mr: massa de resíduo destinada por ano (kg)
- msd: massa de sólidos que será enviada para destinação após o desaguamento (kg)
- R$: valor pago por quilograma de resíduo destinado (R$)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão apresentados separadamente para o adensamento de lodo por gravidade e desaguamento por blocos drenantes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A ETE da empresa é formada por três tanques de concreto com capacidade total de 20 m³. O primeiro tanque possui dimensões de 3,0 m de comprimento x 2,5 m de largura e os outros dois, 3,0 m de comprimento x 1,0 m de largura, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Estação de tratamento de efluentes.

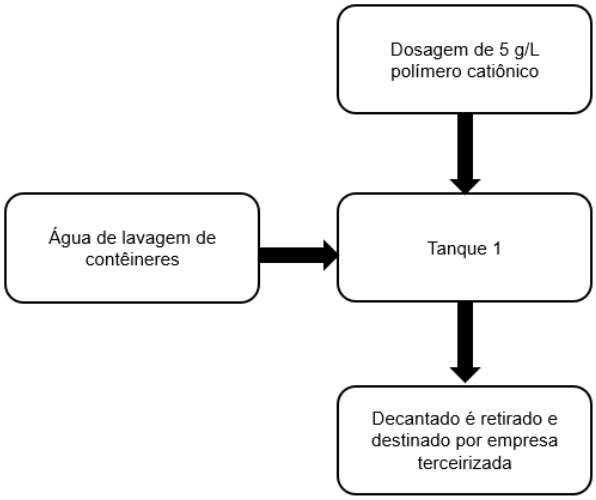
Fonte: Autor, 2024.

O primeiro tanque recebe a água de lavagem dos contêineres que retornam vazios dos clientes. Nele, é feita a dosagem de 5,0 g/L de polímero catiônico e ocorre a etapa de decantação, onde o sobrenadante é retirado por cima e enviado para o segundo tanque através de tubulação. No segundo tanque ocorre a separação óleo-água devido a presença de óleo na composição dos produtos, em que a parte do óleo fica na parte de cima e a parte líquida, que fica na parte de baixo, segue para o terceiro e último tanque. A água presente no terceiro tanque

é retirada e enviada para destinação ambientalmente adequada por empresa terceirizada, bem como o lodo contido no primeiro tanque proveniente do processo de decantação.

No fluxograma expresso na Figura 24 é apresentado o processo de origem do lodo industrial.

Figura 24 – Fluxograma de origem do lodo industrial.

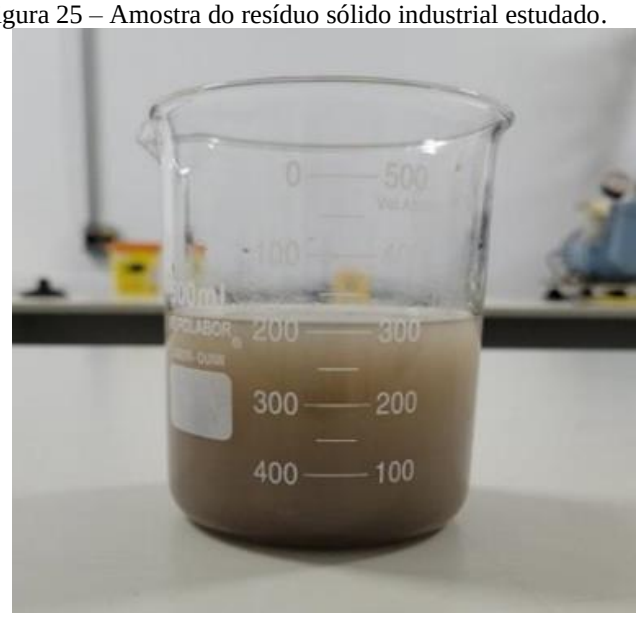


Fonte: Autor, 2024.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO INDUSTRIAL

A Figura 25 apresenta a amostra do resíduo sólido industrial (lodo primário). O resíduo apresenta um aspecto turvo e coloração escura, com grande presença de sólidos suspensos.

Figura 25 – Amostra do resíduo sólido industrial estudado.



Fonte: Autor, 2024.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados das análises de caracterização físico-química do resíduo sólido estudado.

Tabela 6 – Caracterização físico-química do resíduo estudado.

Parâmetro	Unidade	Resultado
pH	-	3,43
Densidade	g/mL	1,1434
Sólidos Totais (ST)	mg/L	39.350
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	28.133
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg/L	11.217

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Como pode-se observar, o resíduo sólido apresenta um pH ácido.

Nas ETE's, o pH geralmente é corrigido quando emprega-se tratamentos físico-químicos. Por isso, foram realizados pré-ensaios para verificar a influência do pH na formação dos flocos, onde foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) 0,01M para neutralizar a amostra. Os resultados obtidos para o resíduo neutralizado não apresentaram boa eficiência, uma vez que não manifestaram formação nos flocos, ao contrário da utilização da amostra bruta. Isso se deve ao fato da presença de óleo na composição do resíduo e, para quebra de emulsões oleosas, é recomendado um pH ácido durante o tratamento (Andrade, 2024).

Portanto, para os ensaios oficiais, foi utilizado o resíduo bruto sem alterações no seu pH.

Também é notável a elevada quantidade de sólidos totais. Por se tratar de um resíduo proveniente da limpeza de contêineres que retornam dos clientes, a composição do produto, formado principalmente por óleo e poliglicóis, explica o considerável teor de ST presente no resíduo.

Na Figura 26 está apresentada a quantidade de sólidos totais presentes no resíduo.

Figura 26 – Sólidos totais presentes no resíduo.

Fonte: Autor, 2024.

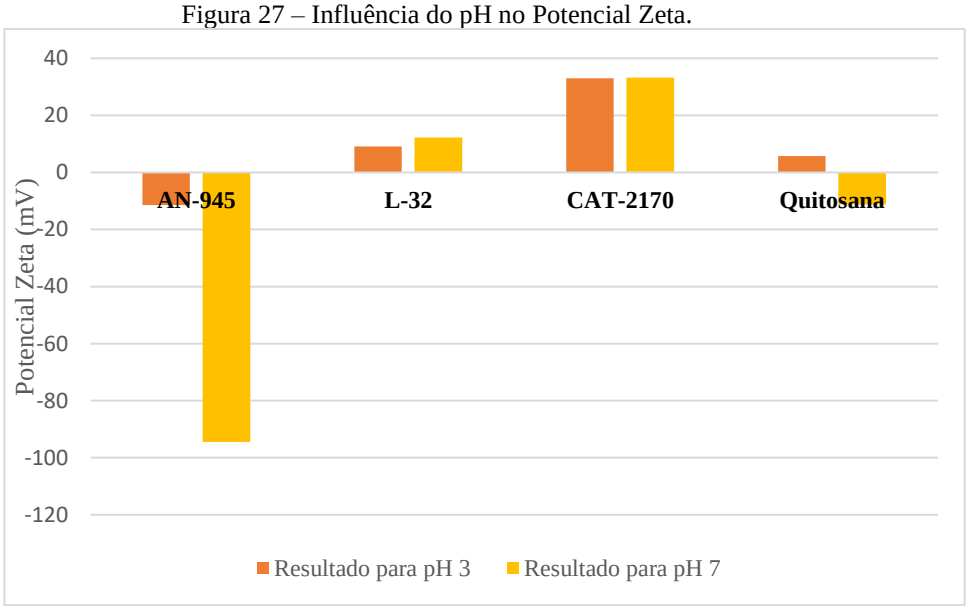
4.3 DEFINIÇÃO DOS CONDICIONANTES QUÍMICOS UTILIZADOS

Os condicionantes químicos e as dosagens utilizadas nos ensaios de adensamento por gravidade e desaguamento por blocos drenantes ocorreram conforme mencionado nos itens 3.3 e 3.3.1.

4.3.1 Potencial Zeta

Foi realizada a leitura do Potencial Zeta do lodo para verificar a influência do pH na sedimentação do lodo. Os resultados estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Influência do pH no Potencial Zeta.



Fonte: Autor, 2024.

Observa-se que os polímeros catiônicos L-32 e CAT-2170 foram os que menos sofreram alterações devido a mudança de pH do meio, indo de 9,094 a 12,250 mV e 32,980 a 33,270 mV, respectivamente, enquanto o polímero aniônico AN-945 foi o mais afetado pela variação de pH, partindo de -11,470 a -94,500 mV. A quitosana, polímero natural utilizado nos ensaios, também demonstrou uma variação de comportamento quando em pH de 3,0 e 7,0, apresentando resultados de 5,735 a -11,230 mV.

De acordo com Malvern Panalytical (2024), o polímero L-32 apresenta grande instabilidade em suas dispersões, o que proporcionará uma coagulação/floculação mais rápida quando comparada aos outros polímeros.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS PARA ENSAIOS DE ADENSAMENTO POR GRAVIDADE

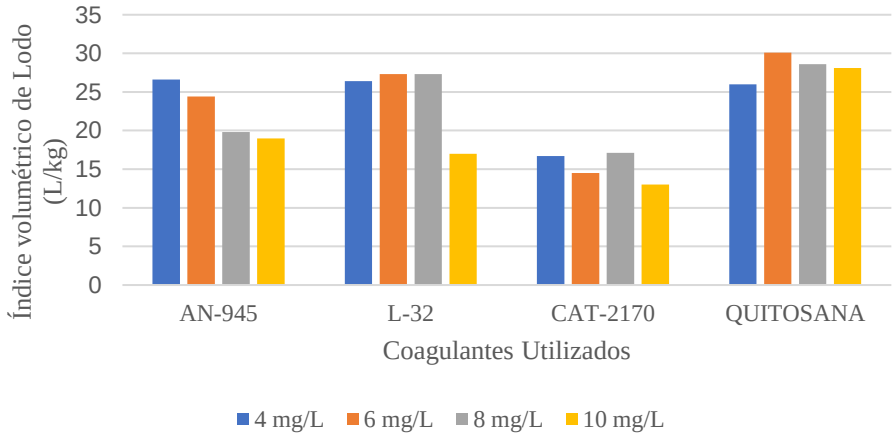
Os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação em provetas estão expressos na sequência.

Não foi possível realizar ensaios sem o uso de polímeros, pois durante a execução dos pré-ensaios foi verificado que os flocos da amostra não possuem tamanho suficiente para decantarem, não apresentando uma boa sedimentação sem o uso de coagulantes.

Os ensaios de adensamento por gravidade do resíduo sólido foram feitos de acordo com o mencionado na metodologia e os resultados obtidos para todos os polímeros estão apresentados na sequência.

Na Figura 28 pode-se observar a sedimentabilidade de cada polímero em cada dosagem utilizada.

Figura 28 – Sedimentabilidade do resíduo para os diferentes coagulantes utilizados.



Fonte: Autor, 2024.

É possível observar que nos ensaios de adensamento por gravidade realizados através dos estudos de sedimentação em provetas, todos os polímeros apresentaram boa eficiência de sedimentação, comprovados pelos cálculos do Índice Volumétrico de Lodo, que variaram entre 28,1 e 13 L/kg em todos os polímeros e diferentes dosagens utilizadas. Quanto menor o IVL, melhor a sedimentabilidade do resíduo (Von Sperling, 2002).

Com exceção do polímero natural quitosana, que apresentou um melhor resultado de sedimentação quando utilizado na menor dosagem – 4 mg/L; todos os outros polímeros demonstraram melhor desempenho quando utilizados na dosagem de 10 mg/L, ou seja, para se obter uma melhor sedimentação, o uso de maiores dosagens se mostrou mais eficiente. Além disso, apesar dos bons resultados de sedimentabilidade para todos os polímeros, é notável que

o uso dos polímeros catiônicos CAT-2170 e L-32 obteve melhores resultados em comparação ao polímero aniônico AN-945 e polímero natural quitosana, porque os resíduos industriais apresentam melhor afinidade com polímeros de carga positiva devido as suas características negativas, o que pode ser explicado, também, com o Potencial Zeta, que quase não sofreu alteração com a mudança do pH do meio (Alves, 2017; Silva, 2017).

Entre os polímeros catiônicos, o uso do polímero catiônico CAT-2170 comparado com o L-32, apresentou, em todas as dosagens analisadas, melhor eficiência na decantação, visto os melhores resultados de IVL (mais próximos de zero), pois o uso de polímeros catiônicos com alto peso molecular e a alta densidade de carga são mais satisfatórios para o condicionamento do lodo. Ainda, o CAT-2170 expressa menor sensibilidade a interferência do pH, trabalhando em uma ampla faixa (Alves, 2017; Silva, 2017).

Após os cálculos do Índice Volumétrico de Lodo, foram escolhidos os polímeros catiônicos CAT-2170 e L-32 para seguirem os ensaios de desaguamento por blocos drenantes.

4.5 RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO POR BLOCOS DRENANTES

Os resultados obtidos nos ensaios de desaguamento do lodo por blocos drenantes estão apresentados na sequência.

4.5.1 Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS)

A partir dos resultados da concentração de sólidos totais (0,03935 kgST/L), volume de resíduo adicionado (20 L) e a área do leito drenante (0,1219 m²), determinou-se que a TAS foi de 6,456 kgST/m². Segundo a sugestão do fabricante de piso wedge wire GRAVITY FLOW SYSTEM, a Taxa de Aplicação de Sólidos para lodo pode variar de 4,8 a 27,8 kgST/m², o que indica que o ensaio ocorreu de acordo com o estipulado para esse tipo de leito drenante.

4.5.2 Resultados Obtidos para Redução de Volume do Lodo

A seguir, nas Figuras 29 e 30 está apresentada a redução de volume e secagem do lodo após 23 dias de realização dos ensaios de desaguamento por blocos drenantes, sendo a Figura 29 o início do ensaio e a Figura 30, o final.

Figura 29 – Início do ensaio de desaguamento por blocos drenantes.

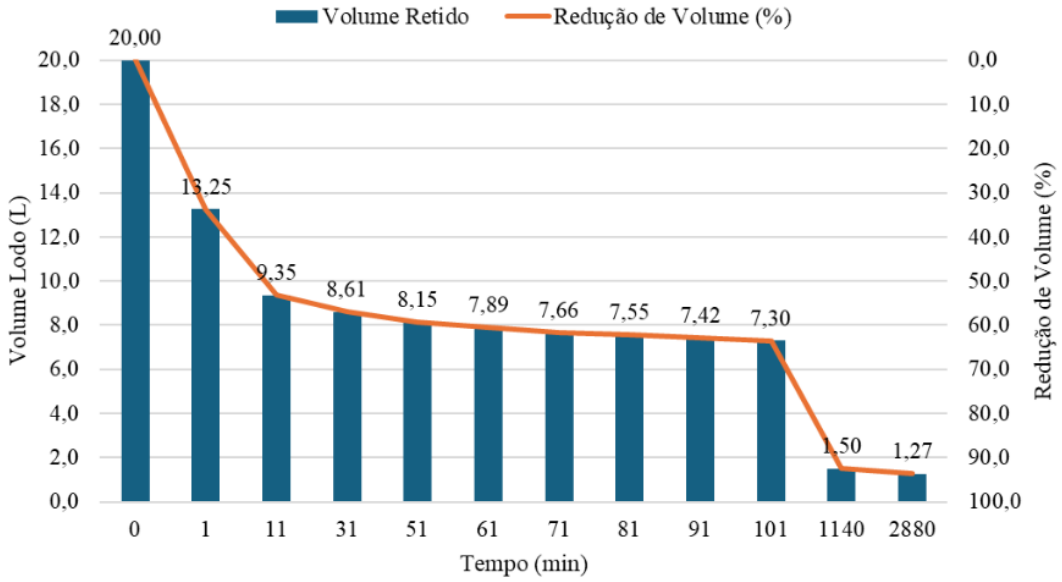
Fonte: Autor, 2024.

Figura 30 – Fim do ensaio de desaguamento por blocos drenantes.

Fonte: Autor, 2024.

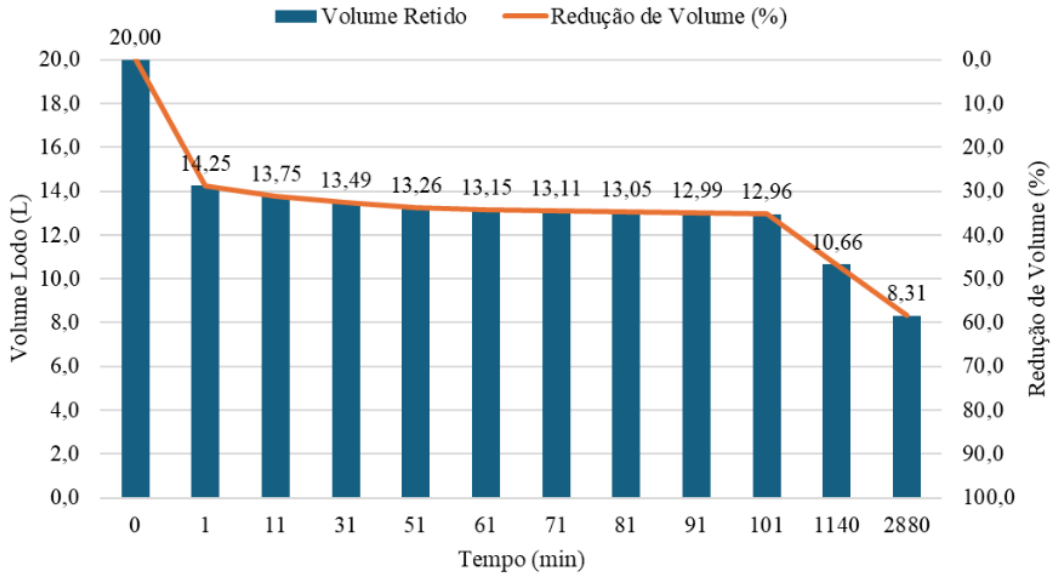
Conforme mencionado anteriormente, foi descartado o volume de 20 L de lodo em um leito de secagem por blocos drenantes. Isto representou uma altura de camada hidráulica de, aproximadamente, 15 cm acima do piso de blocos drenantes. Os resultados obtidos para a redução do volume de lodo nos ensaios de desaguamento por blocos drenantes com uso de polímeros catiônico L-32 e catiônico CAT-2170 estão apresentados nas Figuras 31 e 32, respectivamente.

Figura 31 – Redução do volume durante o desaguamento do resíduo com o polímero L-32.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 32 - Redução do volume durante o desaguamento do resíduo com polímero CAT-2170.



Fonte: Autor, 2024.

Ao fazer a comparação entre o desempenho na redução do volume de lodo por leito de secagem de blocos drenantes, utilizando-se os polímeros catiônicos L-32 e CAT-2170, percebe-se que há uma similaridade no volume coletado no tempo de 1 minuto, aproximadamente 34% para o L-32 e 29% para o CAT-2170. No entanto, o polímero CAT-2170 apresentou um baixo volume coletado de drenado e uma estabilização no processo de desaguamento já entre 1 e 11 minutos, apresentando uma redução de somente 2,50%, mantendo-se na faixa de redução entre 30 e 40% até o tempo de 101 minutos, quando alcançou a redução de aproximadamente 47% em 1140 minutos e finalmente, 58,5% de redução de volume no tempo de 2880 minutos.

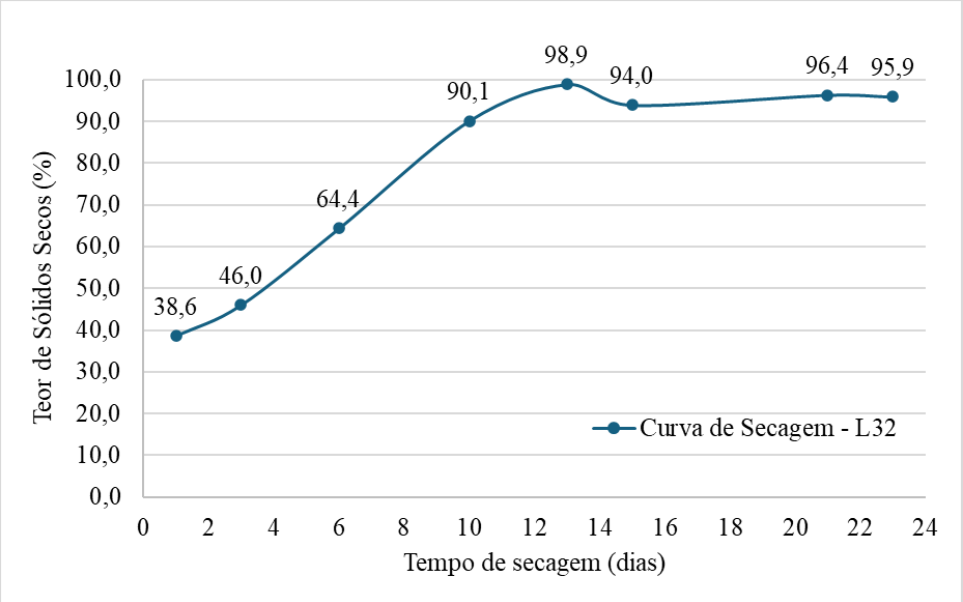
Em contrapartida, o polímero L-32 também apresentou uma estabilização no processo de redução, que aconteceu entre 31 e 101 minutos, onde permaneceu na faixa de aproximadamente 50 a 63% de redução do volume de lodo. A partir do tempo de 1140 minutos, apresentou uma redução de 92,5% e, finalmente, 93,6% de redução do volume de lodo em 2880 minutos.

Nota-se que o polímero L-32 teve melhor desempenho na redução do volume de lodo ao final dos dois dias quando comparado com o CAT-2170. De acordo com Malvern Panalytical (2024), um Potencial Zeta de 0 a 10 proporciona uma coagulação/floculação mais rápida, o que explica o fato de o polímero L-32 ter apresentado resultados melhores, tendo em vista que, para a amostra do resíduo estudado, obteve um Potencial de 9,094 mV, enquanto o CAT-2170 obteve 32,980 mV.

4.5.3 Resultados Obtidos para Secagem do Lodo

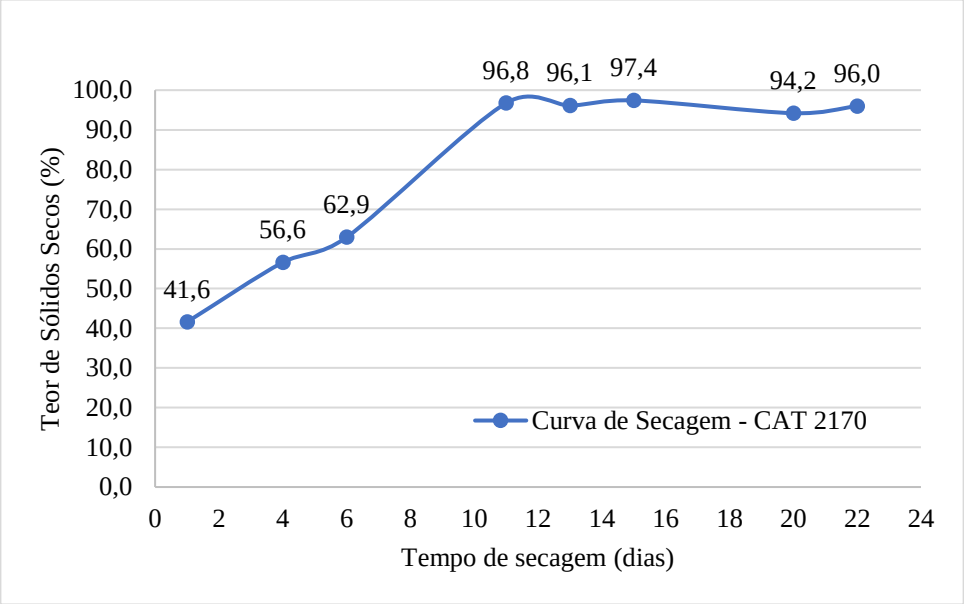
A partir dos dados de teor de sólidos e do tempo de secagem, foi possível plotar a curva de secagem para ambos os ensaios. Os resultados obtidos para a secagem de lodo nos ensaios de desaguamento por blocos drenantes com o uso de polímeros catiônico L-32 e catiônico CAT-2170 estão apresentados nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

Figura 33 – Curva de secagem para o ensaio de desaguamento de resíduo com polímero L-32.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 34 – Curva de secagem para o ensaio de desaguamento do resíduo com o polímero CAT-2170.



Fonte: Autor, 2024.

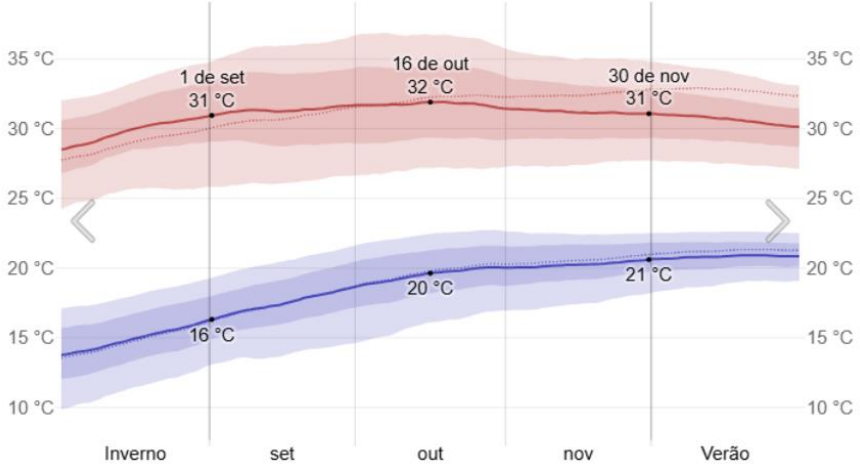
Um dia após o início do ensaio, praticamente toda a água livre já havia sido drenada, pois não foi observada a saída de água pela válvula de drenagem, restante apenas a torta do lodo. A partir daí, a água remanescente no lodo, chamada de água celular, corresponde a 10% e pode ser removida através da mudança de estado de agregação da água por evaporação ou congelamento (Silva, 2017). No dia seguinte do descarte, inicia-se então o processo de secagem.

É possível observar que, inicialmente, as curvas de secagem possuem formatos diferentes, principalmente até o 8° dia de secagem, onde o polímero CAT-2170 apresentou melhores resultados de secagem, alcançado 96,8% de teor de sólidos secos contra aproximadamente 75,0% do L-32. Após o primeiro dia de secagem, o polímero L-32 alcançou 38,6% de teor de ST e o CAT-2170 chegou à faixa de 41,6%. Já o resultado final alcançado por ambos os coagulantes após 23 dias foi praticamente o mesmo, 95,9% para L-32 e 96,0% para CAT-2170, muito próximo do que foi apresentado por Silva; Pohlmann (2014), 96,24%.

Como citado anteriormente, a etapa de secagem inicia-se após a etapa de desaguamento e depende, principalmente, das condições climáticas. Fatores como a radiação solar proporcionam a evaporação natural do lodo (Melo, 2006).

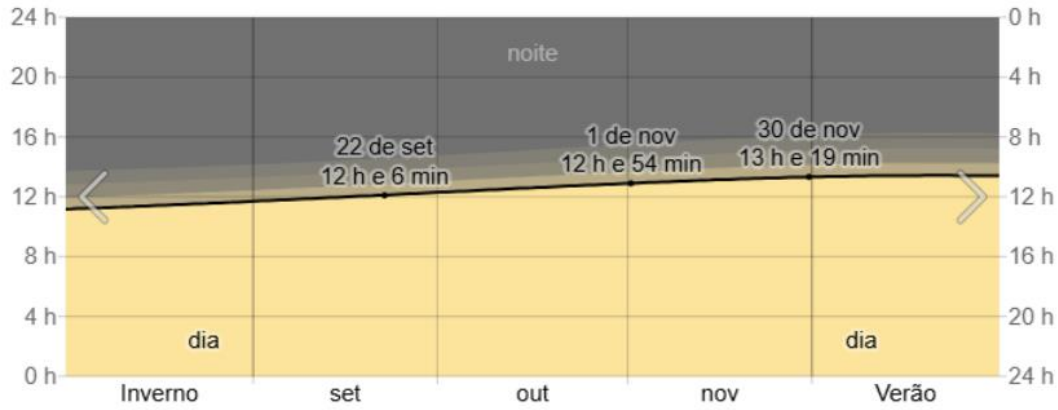
As Figuras 35 e 36 apresentam as condições climáticas durante o período de realização dos ensaios.

Figura 35 – Mínimas e máximas de temperatura durante a realização dos ensaios de desaguamento.



Fonte: Weather Spark, 2024.

Figura 36 – Duração do dia durante a realização dos ensaios de desaguamento.



Fonte: Weather Spark, 2024.

É válido mencionar que os ensaios de secagem do lodo para ambos os polímeros ocorreram em tempos diferentes. O ensaio com o polímero catiônico L-32 foi realizado no mês de setembro, enquanto o ensaio com o polímero catiônico CAT-2170 ocorreu no mês de outubro.

Observa-se que o ensaio com o L-32 demorou mais para secar ao se comparar com o CAT-2170. Isso pode ser explicado devido às temperaturas mais amenas ocorridas no mês de setembro (conforme Figura 35), além da duração do dia e consequente média de radiação de luz solar ter sido maior no mês de outubro (conforme Figura 36). Além disso, o CAT-2170 já havia apresentado melhores resultados de sedimentabilidade nos testes de adensamento por gravidade, o que não traz surpresa em manifestar uma concentração de sólidos mais rapidamente do que o uso do L-32.

Nota-se que, em ambos os ensaios, os polímeros alcançaram resultados superiores ao resultado obtido no final. O L-32 chegou a um teor de sólidos secos de 98,9% no 13° dia de

secagem e o CAT-2170 de 97,4% no mesmo dia. Isso, provavelmente, se aplica ao fato das condições climáticas apresentadas no decorrer dos ensaios. Apesar de ficarem sob abrigo de chuva, o leito ficou exposto a alterações de umidade consequentes da mudança de clima ao longo dos dias, o que afetou o desempenho da secagem do lodo.

Ao contrário do resultado observado para a redução do volume de lodo, os dois polímeros apresentaram o mesmo resultado na determinação do teor de sólidos secos, consequente diminuição da umidade do lodo.

Na Figura 37 é apresentada a amostra de lodo seco após o final dos ensaios.

Figura 37 – Amostra de lodo seco após ensaios de desaguamento por blocos drenantes.

Fonte: Autor, 2024.

4.5.4 Avaliação Econômica do Uso de Blocos Drenantes na Destinação Final do Resíduo

Após os resultados obtidos no desaguamento do lodo por blocos drenantes, é possível avaliar economicamente o uso de blocos drenantes na destinação final do resíduo estudado. É importante ressaltar que essa avaliação leva em conta somente a economia com a destinação final do resíduo, uma vez que não foram considerados os custos para implantação do leito de secagem por blocos drenantes na planta industrial.

Atualmente, paga-se o valor de R$ 1,98/kg de resíduo destinado à empresa terceirizada para disposição final. Como pode-se observar nos ensaios de caracterização do resíduo, o mesmo possui um teor sólidos totais de 39.350 mg/L.

Sabe-se que a empresa destina 20.000 kg de resíduo por ano, totalizando um valor de R$ 39.600,00/ano. Dos 20.000 kg destinados, aproximadamente 65% de sua composição é de água, ou seja, R$ 25.740,00 são gastos a mais devido ao elevado índice de umidade contido no lodo. Com a secagem de 96% do lodo nos ensaios de desaguamento por blocos drenantes alcançada por ambos os coagulantes utilizados, obteve-se a redução de 20.000 kg para 7.170 kg de resíduo a ser destinado, que tem um custo de R$ 14.196,60/ano para a empresa, uma diminuição de aproximadamente 64% nos custos de destinação final ambientalmente adequada.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que:

- O uso de polímeros orgânicos para o condicionamento do lodo apresentou bons resultados, com destaque aos polímeros orgânicos sintéticos catiônicos, que desempenharam os melhores resultados de sedimentabilidade nos ensaios de sedimentação em provetas.
- O uso de maiores dosagens de coagulantes pode ser mais eficiente na sedimentação do resíduo sólido estudado, como observado pelos melhores resultados de sedimentabilidade quando utilizado na maior dosagem empregada no estudo (10 mg/L). Pode ser que em uma dosagem maior, apresente resultados ainda mais satisfatórios.
- Nos ensaios de desaguamento por blocos drenantes, utilizando-se a dosagem indicada pelo fabricante dos blocos, o polímero catiônico L-32 obteve melhor resultado de redução de volume no período de 2 dias – 93,6% de redução, contra 58,5% para o polímero catiônico CAT-2170, porém, ambos os polímeros chegaram ao resultado de 96% de teor de sólidos secos após o período de 23 dias.
- A utilização de leito de secagem por blocos drenantes se mostrou como uma excelente alternativa para a secagem do lodo, trazendo uma redução de aproximadamente 64% nos custos de destinação para a empresa.
- Para os trabalhos futuros, é interessante identificar os custos de implantação de um leito de secagem por blocos drenantes e avaliar a viabilidade de implementação na planta industrial.

A utilização do leito de secagem por blocos drenantes trouxe uma redução considerável nos custos de destinação de resíduos para a empresa, gerando uma economia de R$ 25.403,40 ao ano. Para se alcançar esse resultado, o uso de polímeros orgânicos sintéticos catiônicos em altas dosagens é o mais recomendado, tendo em vista as características do resíduo estudado.

REFERÊNCIAS

ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. Disponível em <https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

ACQUA NOBILIS. **Polímero aniônico**. Disponível em <https://www.acquanobilis.com.br/produto/polimero-anionico/#:~:text=O%20Pol%C3%ADmero%20Ani%C3%B4nico%2C%20possui%20aspecto,antes%20do%20espessamento%20e%20desidrata%C3%A7%C3%A3o.>. Acesso em: 20 set. 2024.

ACQUA NOBILIS. **Polímero catiônico**. Disponível em <https://www.acquanobilis.com.br/produto/polimero-cationico/>. Acesso em: 20 set. 2024.

ACQUA SYSTEM. **Polímero aniônico**. Disponível em <https://www.acquasystemlaboratorio.com.br/polimero-anionico#:~:text=O%20pol%C3%ADmero%20ani%C3%B4nico%2C%20a%20exemplo,plantas%20de%20tratamento%20de%20esgoto.>. Acesso em: 20 set. 2024.

AGUIAR, L.S.; VEIGA, L.B.E. **Instrumentos de gestão ambiental como mecanismo de ação da PNRS em aterros sanitários: um estudo de caso no município de Nova Friburgo**. 3° Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. 2020.

ALVES, V.M.B. **Desaguamento do lodo de estação de tratamento de água através do uso de blocos drenantes.** Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2017.

ANDRADE, V. **pH: Saiba porque ele é tão importante no tratamento de águas e efluentes.** Disponível em < https://acquablog.acquasolution.com/ph-saiba-porque-ele-e-tao-importantes-no-tratamento-de-aguas-e-efluentes/#:~:text=No%20tratamento%20de%20efluentes%20(tratamentos,exigindo%2C%20em%20certas%20circunst%C3%A2ncias%2C%20a>. Acesso em: 03 dez. 2024.

ARANTES, M.V.C; PEREIRA, R.S. **Análise crítica dos 10 anos de criação e implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil**. R. Liceu On-Line, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 48-66, Jan./Jun. 2021.

ARAÚJO, F.F.; TIRITAN, C.S.; IAROSSI, F.P. **Reciclagem de lodo industrial, classe II, como substrato para produção de mudas**. Colloquium Agrarie, v. 3, n. 1, Jun 2007, p. 25-34. DOI 10.5747/ca.2007.v03.n1.a25.

ARRUDA, A.M. **Polímeros: Materiais que transformam o mundo.** Universidade Federal de Viçosa. Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Segunda edição. Disponível em < https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004- Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

ATLAS COPCO. **Processo de lodo ativado.** Disponível em <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/industry-solutions/wastewater-treatment/aeration-blowers-activated-sludge-process#:~:text=Qual%20%C3%A9%20o%20processo%20de,mais%20usado%20no%20mundo%20desenvolvido.>. Acesso em: 30 out. 2024.

BAPTISTA, M.; CARVALHO, R.V.; FAGUNDES, P.H.P.R.M.; NÓBREGA, M.J.R. **Análise de tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. TEC-USU, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 55-72, Jan/Jun 2019.

BEZERRA, A.K.L.; ROCHA, P.H.F.; NETO, J.M.M. **Resíduos sólidos: a má gestão pública como problema ambiental**. Veredas do Direito, Belo Horizonte, v. 17, n. 39, p. 39-66, Setembro/Dezembro de 2020.

BEZERRA, A.M. **Síntese e avaliações físico-químicas e biológicas de derivados de quitosana de alta e baixa massa molecular**. Universidade de São Paulo, 2011.

BRASIL. **Instrução Normativa 13, de 18 de dezembro de 2012**. Disponível em < https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=128945>. Acesso em: 30 jun. 2023.

BRASIL. **Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Disponível em < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%202%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAncias.>. Acesso em: 30 jun. 2023.

CALAES, G.D.; NETTO, B.P.C. **Manual dos agregados para a construção civil.** Capítulo 18 – Metodologia de avaliação econômica. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. P. 319-338.

CETESB. **Declaração da Conferência de ONU no Ambiente Humano**. 2016. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2016/09/Declara%C3%A7%C3%A3o-de-Estocolmo-5-16-de-junho-de-1972-Declara%C3%A7%C3%A3o-da-Confer%C3%AAncia-da-ONU-no-Ambiente-Humano.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

CGIRS-VJ. **Resíduos sólidos: o que são, legislação a respeito e como destinar e tratar corretamente**. Disponível em < https://cgirsvj.ce.gov.br/informa/124/residuos-solidos-o-que-sao-legislacao-a-respeito-e-como-destinar-e-tratar-corretamente#:~:text=O%20QUE%20S%C3%83O%20RES%C3%8DDUOS%20S%C3%93LIDOS,e%20instala%C3%A7%C3%B5es%20f%C3%ADsicas%20em%20geral.>. Acesso em: 27 jun. 2023.

COELHO, H.M.G.; LANGE, L.C.; JESUS, L.F.L.; SARTORI, M.R. **Proposta de um índice de destinação de resíduos sólidos industriais**. 2011. Eng Sanit Ambient, v. 16, n. 3, Jun/Set 2011.

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

COLVERO, D.A.; ALMEIDA, M.G.; GOMES, A.P.; PFEIFFER, S.C. **Aterro sanitário de Goiânia: uma identidade territorial e a vulnerabilidade e exclusão social da população do seu entorno**. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v. 14, n. 2, p. 03-20, jul./dez. 2017.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum. 1987**. Disponível em < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod_resource/content/3/Nosso%20Futuro%20Comum.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

COSTA, H.O. **Explorando o potencial agrícola do lodo de esgoto: uma revisão crítica**. Universidade Federal de Uberlândia, 2024.

DAFRATEC. **Potencial Zeta: O que é e por que é importante?** Disponível em < https://dafratec.com/potencial-zeta-o-que-e-e-por-que-e-importante>. Acesso em: 06 nov. 2024.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A.D.; VOLTAN, P.E.N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. 1° Edição. São Carlos: Editora LDiBe, 540 páginas, 2012.

ESTADÃO MOBILIDADE. **Conferências ambientais: quais foram as principais da história?** 2021. Disponível em < https://summitmobilidade.estadao.com.br/sustentabilidade/conferencias-ambientais-quais-foram-as-principais-da-historia/>. Acesso em: 08 ago. 2023.

FERNANDES, P.F. **Reaproveitamento do lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria cerâmica**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2002.

FIOCRUZ. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde**. Disponível em <https://fiocruz.br/biosseguranca hospitalar/dados/material5.htm#:~:text=S%C3%A3o%20res%C3%ADduos%20gerados%20por%20prestadores,biol%C3%B3gicos%20capazes%20de%20causar%20infec%C3%A7%C3%A3o%2C>. Acesso em: 27 jun. 2023.

FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. **Parte VI - Desaguamento. Capítulo 23 - Ensaios de sedimentação.** Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/1068/1/Cap%2023%20Sedimenta%C3%A7%C3%A3o%20final.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Ed. – São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

GLOBAL HEALTH ELEARNING CENTER. **Noções Básicas de Avaliação Econômica.** Disponível em < https://www.globalhealthlearning.org/sites/default/files/No%C3%A7%C3%B5es%20b%C3%A1sicas%20de%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20econ%C3%B3mica.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.

INICIATIVA SANEAMENTO INCLUSIVO. **Taxa de Aplicação de Sólidos.** Disponível em

< https://saneamentoinclusivo.org.br/termo/taxa-de-aplicacao-de-solidos/#:~:text=Rela%C3%A7%C3%A3o%20entre%20a%20massa%20de,expressa%20em%20kg%20SS%2Fm%C2%B2.>. Acesso em: 11 nov. 2024.

INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE. **Desenvolvimento sustentável: o que esse conceito pode nos ensinar?** 2022. Disponível em < https://saudeesustentabilidade.org.br/noticias/desenvolvimento-sustentavel-o-que-esse-conceito-ensina/>. Acesso em: 08 ago. 2023.

IPEA. **ODS 1 – Acabar com a pobreza e todas as suas formas, em todos os lugares.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/1/Agenda_2030_ODS_1_Acabar_com_a_pobreza_em_todas_suas_formas.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/2/Agenda_2030_ODS_2_Fome_zero_e_agricultura.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 3 – Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todas e todos, em todas as idades.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/3/Agenda_2030_ODS_3_Assegurar_uma_vida_saudavel.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 4 – Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todas e todos.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/4/Agenda_2030_ODS_4_Assegurar_a_educacao_inclusiva.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024

IPEA. **ODS 5 – Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/5/Agenda_2030_ODS_5_Alcancar_a_igualdade_de_genero.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 6 – Assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todas e todos.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/6/Agenda_2030_ODS_6_Assegurar_a_disponibilidade_e_a_gestao.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 7 – Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/7/Agenda_2030_ODS_7_Assegurar_o_acesso_confiavel_sustentavel.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 8 – Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todas e todos.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/8/Agenda_2030_ODS_8_Promover_o_crescimento_economico.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 9 – Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.** Disponível em

<https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/9/Agenda_2030_ODS_9_Construir_infraestruturas_resilientes.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 10 – Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/10/Agenda_2030_ODS_10_Reduzir_a_desigualdade_dentro_paises.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 11 – Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/11/Agenda_2030_ODS_11_Tornar_as_cidades_e_os_assentamentos.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 12 – Consumo responsável – assegurar padrões de consumo e produção sustentável.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/12/Agenda_2030_ODS_12_Consumo_responsavel_assegurar_padroes.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 13 – Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/13/Agenda_2030_ODS_13_Tomar_medidas_urgentes_para_combater.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 14 – Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/14/Agenda_2030_ODS_14_Conservacao_e_uso_sustentavel_dos_oceanos.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 15 – Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda da biodiversidade.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/15/Agenda_2030_ODS_15_Proteger_recuperar_e_promover.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 16 – Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/16/Agenda_2030_ODS_16_Promover_sociedades_pacificas.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

IPEA. **ODS 17 – Meios de implementação.** Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/14124/17/Agenda_2030_ODS_17_Meios_de_implementacao.pdf>. Acesso em: 26 set. 2024.

ISMAIL, I.A.L.; DI BERNARDO, L.Y.; DANTAS, A.D.B. **Avaliação do adensamento por gravidade do lodo gerado pelo tratamento de água.** Revista AIDIS de *ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.* 15,2 (ago, 2022), 807 - 830. DOI: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79763.

JACINTO, A.C.; ZOGAHIB, A.L.N. **Política pública de resíduos sólidos: uma análise da Lei n° 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, por meio**

dos serviços executados pela secretaria municipal de limpeza pública – SEMULSP no município de Manaus/AM. Revista de Administração de Roraima – UFRR, Boa Vista, vol. 6, n. 2, p. 520-510, jul – dez. 2016.

LOVO, I.A. **Avaliação do adensamento por gravidade e do desaguamento por centrifugação do lodo gerado pelo tratamento de água**. Universidade de Ribeirão Preto, 2016.

MACHADO, H.H.S.; SGORLON, J.G.; ALTOÉ, S.P.S.; MENEGHETTI, K.S.; OLIVEIRA, J.C.D.; MARTINS, C.H.; TAVARES, C.R.G. **A gestão dos resíduos sólidos industriais aplicadas a países desenvolvidos e em desenvolvimento**. Universidade Estadual de Maringá, 2012.

MALVERN PANALYTICAL. **Potencial Zeta.** Disponível em < https://www.malvernpanalytical.com/br/products/measurement-type/zeta-potential>. Acesso em: 06 nov. 2024.

MELLO, M.; CHAVES, M.N.; LEONEL, M.; CANTAMISSA, R.C. **Uso do lodo de Estação de Tratamento de Água para produção de revestimentos cerâmicos.** Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – ETEC Trajano Camargo, 2024.

MELO, A.S. **Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo.** Dissertação Mestrado Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2006. 82p.

MEU RESÍDUO. **A Gestão de Resíduos Sólidos Hospitalares**. Disponível em < https://meuresiduo.com/categoria-1/a-gestao-de-residuos-solidos-hospitalares/>. Acesso em: 27 jun. 2023.

MOVIMENTO NACIONAL ODS. 2021. Disponível em <https://movimentoods.org.br/os-5-ps-da-sustentabilidade/#:~:text=Os%205%20P's%20da%20Sustentabilidade,%2C%20Planeta%2C%20Prosperidade%20e%20Parcerias.>. Acesso em: 14 ago. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 14 ago. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2024**. Disponível em < https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 set. 2024.

OLIVEIRA, G.; KIKKAWA, L.S.; SANTOS, A.M. **Reutilização de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) na região de Suzano, São Paulo, Brasil: alternativas e oportunidades**. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 2018.

ONOFRE, Y.S.; PEREIRA, M.P.; RUPHAEL, N.K.; SILVA, K.S.; OLIVEIRA, M.A. **Adequação dos municípios de pequeno porte à Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS): um estudo em cinco municípios mineiros (Barbacena, Antônio Carlos, Ibertioga, Juiz de Fora e Santos Dumont)**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.

2014.

ORTH, C.M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C.T. **A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução**. Gest. Prod., São Carlos, v. 21, n. 2, p. 447-460, 2014.

PEREIRA, J.A.R. **Geração de Resíduos Industriais e Controle Ambiental**. 2002. Disponível em < https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=GERA%C3%87%C3%83O+DE+RES%C3%8DDUOS+INDUSTRIAIS+E+CONTROLE+AMBIENTAL&btnG=>. Acesso em: 29 jun. 2023.

PINSKY, V.C.; DIAS, J.L.; KRUGLIANSKAS, I. **Gestão Estratégica da Sustentabilidade e Inovação**. 2013. Rev. Adm. UFSM, Santa Maria, v. 6, n. 3, p. 465-480, Set 2013.

PINTO, A.S.S.; THOMPSON JR, J.P.; COSTA, T.F.R.; CANOBRE, S.C.; AMARAL, F.A. **II – 216 – Determinação do Índice Volumétrico de Lodo (padrão diluído) como controle para o estabelecimento do processo de flotação por ar dissolvido para o tratamento de efluente de lavanderia industrial**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em < http://www.tgambiental.com.br/artigos/II216%20-%20AIDIS.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Redução na geração de resíduos sólidos**. 2023. Disponível em <https://portalresiduossolidos.com/reducao-na-geracao-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 05 jul. 2023.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. **Aproveitamento e destinação de lodo.** 2021. Disponível em <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/aproveitamento-destinacao-lodo/>. Acesso em: 30 out. 2024.

PRATES, L.F.S.; PIMENTA, C.F.; RIBEIRO, H.F. **Alternativas tecnológicas para tratamento de resíduos sólidos urbanos**. APPREHENDERE – Aprendizagem e Interdisciplinaridade, v. 1, n. 2, (Edição Especial), 2019.

SÁ, N.P. **Caracterização de lodos e efluentes industriais gerados por uma empresa de beneficiamento de argilas visando atendimento à PNRS**. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2014.

SANTOS, M.R.; TEIXEIRA, C.E.; KNIESS, C.T. **Avaliação de desempenho ambiental na valorização de resíduos sólidos de processos industriais**. Sistema de Informação Científica. Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal, 2014. DOI 10.5902/1983465912982.

SCARIN, P.B.R. **Avaliação de meios de destinação alternativos para lodo resultante de tratamento de efluentes industriais: estudo de caso em indústria química**. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2017.

SCHALCH, V.; LEITE, W.C.A.; JÚNIOR, J.L.F.; CASTRO, M.C.A.A. **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Universidade de São Paulo – USP, 2002.

SILVA, J.D.J.; INGUNZA, M.P.D.; ALBUQUERQUE, L.F.; SOUZA, P.A.B.F.;

MEDEIROS, L.G.G. **Utilização do lodo tratado de indústria de produtos de limpeza em matrizes cimentícias**. Revista Matéria, V.26N.03, 2021.

SILVA, S.M.C. **Avaliação do leito de secagem com piso de blocos drenantes para lodos gerados em estação de tratamento de esgoto sanitário.** Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2017.

SILVA, S.M.C.; ACHON, C.; COIMBRA, P.R.S. **Análise do desaguamento e secagem de lodo anaeróbio em leito com piso de blocos drenantes**. Congresso ABES FENASAN, 2017.

SILVA, S.M.C.; POHLMANN, M. **Avaliação de eficiência de leito de secagem modificado utilizando piso de blocos drenantes**. 4° Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de abril de 2014.

SILVA, S.M.C.; SILVA, G.H.R.; MORUZZI, R.B. **Avaliação de desempenho de leito com piso de blocos drenantes para desaguamento e secagem de lodo aeróbio**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru – SP. Disponível em <https://doc-08-68-apps-viewer.googleusercontent.com/viewer/secure/pdf/fjm964c15dir9kkjciq7ok9qgdjc5cbo/k6p4h8j8bqpaq05u7e7clg6r5t90rib4/1726845075000/gmail/18411106804794173328/ACFrOgAy47FbT5aqbQJHWj9ONNfpYUISW3Hlcjat_o3oGZ8BNER27BYd_bvCZ_1Etn4hfnlZSIh3jn3VoE9sd-E15WiPAEuRcMEpwXAFjcwbNWaPA8NXH5fCeEL4ezcuEb4IlsMc3-jsaLN7acrS?print=true>. Acesso em: 20 set. 2024.

SILVA, S.M.C.; SILVA, G.H.R.; RIBEIRO, J.C. **Avaliação do comportamento de secagem de lodo aeróbio em leito de secagem com piso de blocos drenantes durante as estações do ano no Brasil**. XVII SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2016.

SINIR. **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em <https://sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>. Acesso em: 05 jul. 2023.

SINIR. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos**. Disponível em < https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 08 ago. 2023.

SINIR. **Resíduos Agrossilvopastoris**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-agrossilvopastoris/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos Domiciliares**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-domiciliares/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-de-estabelecimentos-comerciais-e-prestadores-de-servicos/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos de Limpeza Urbana**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-de-limpeza-urbana/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos de Mineração**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-

residuos/residuos-de-mineracao/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos de Serviços de Transporte**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-de-transporte/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SINIR. **Tipos de Resíduos**. Disponível em < https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

SOUZA, M.R.; SILVA, R.J. **A geração de resíduos industriais e sua destinação final**. 1997. Disponível em < https://abepro.org.br/biblioteca/enegep1997_t6501.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2023.

SPERLING, M.V. **Lodos ativados.** 2.ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

SUPERIOR TRIBUNAL FEDERAL. **Agenda 2030**. Disponível em < https://portal.stf.jus.br/hotsites/agenda-2030/#:~:text=A%20Agenda%202030%20da%20ONU,17%20objetivos%20de%20desenvolvimento%20sustent%C3%A1vel.>. Acesso em: 20 set. 2024.

VALERIO, D.; SILVA, T.C.; COHEN, C. **Redução da geração de resíduos sólidos: uma abordagem econômica**. 2008. Disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/6357429.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2023.

VELHO, P.L.T.; BERNARDIN, A.M. **Reaproveitamento de lodo de ETE para produção industrial de engobes**. Cerâmica Industrial, 2011.

ZANCA, C. **Como funciona o teste de sedimentação.** Disponível em <https://progt.com.br/blog/4/como-funciona-o-teste-de-sedimentacao.html>. Acesso em: 29 out. 2024.

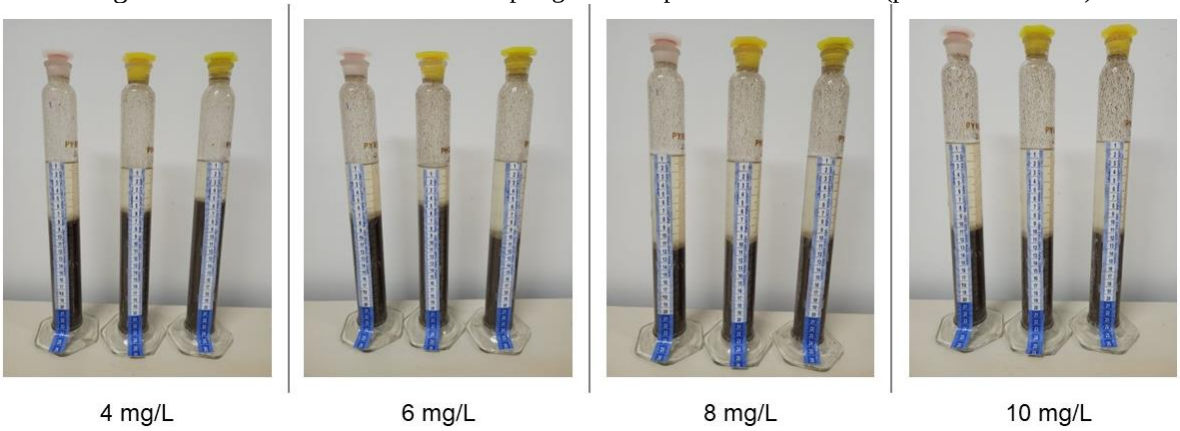
ANEXOS

Tabela A 1 – Resultados obtidos para o polímero AN-945.

Alíquota	Dosagens de coagulantes							
	4 mg/L		6 mg/L		8 mg/L		10 mg/L	
	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)
1	23,0	15,6	23,0	16,0	23,0	11,6	23,0	12,5
2	22,5	17,0	22,5	17,8	22,5	13,1	22,5	12,0
3	23,5	18,9	23,5	13,6	23,5	13,8	23,5	12,3
Média	23,0	17,2	23,0	15,8	23,0	12,8	23,0	12,3
Desvio Padrão	0,50	1,66	0,50	2,11	0,50	1,12	0,50	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura A 1 – Ensaios de adensamento por gravidade para cálculo do IVL (polímero AN-945)



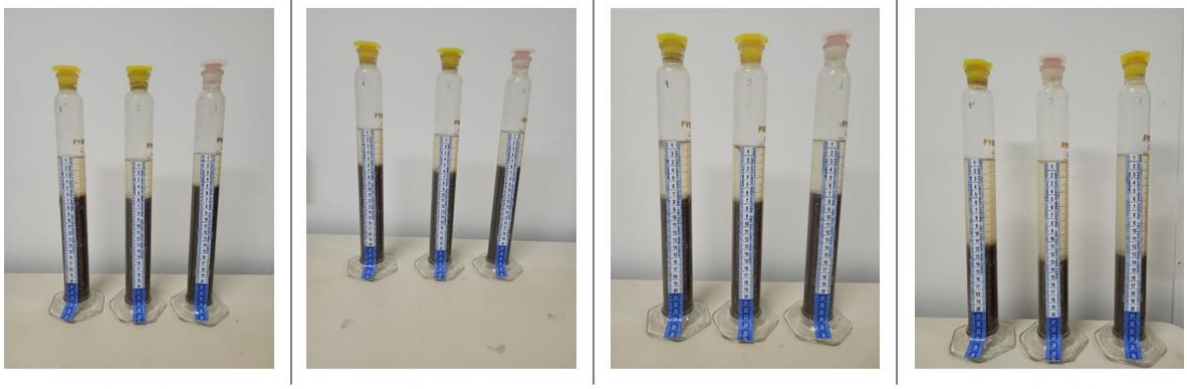
Fonte: Autor, 2024.

Tabela A 2 – Resultados obtidos para o polímero L-32.

Alíquota	Dosagens de coagulantes							
	4 mg/L		6 mg/L		8 mg/L		10 mg/L	
	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)
1	23,0	16,9	23,0	17,7	23,0	17,3	23,0	12,0
2	22,5	16,7	22,5	17,1	22,5	17,1	22,5	10,2
3	23,5	17,6	23,5	18,3	23,5	18,8	23,5	10,7
Média	23,0	17,1	23,0	17,7	23,0	17,7	23,0	11,0
Desvio Padrão	0,50	0,47	0,50	0,60	0,50	0,93	0,50	0,93

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura A 2 – Ensaios de adensamento por gravidade para cálculo do IVL (polímero L-32)



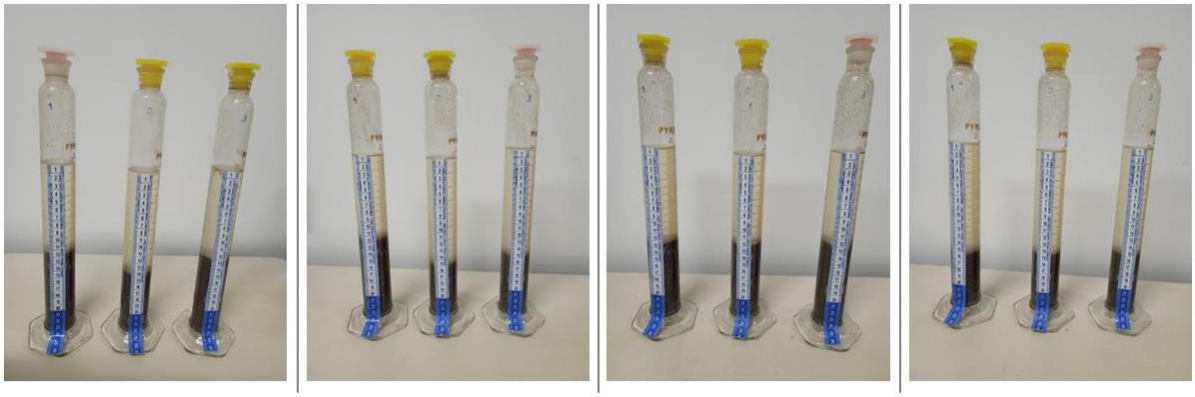
Fonte: Autor, 2024.

Tabela A 3 – Resultados obtidos para o polímero CAT-2170

Alíquota	Dosagens de coagulantes							
	4 mg/L		6 mg/L		8 mg/L		10 mg/L	
	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)
1	23,0	11,8	23,0	11,5	23,0	10,7	23,0	07,8
2	22,5	09,0	22,5	07,6	22,5	10,8	22,5	08,5
3	23,5	11,5	23,5	09,0	23,5	11,7	23,5	08,9
Média	23,0	10,8	23,0	09,4	23,0	11,1	23,0	08,4
Desvio Padrão	0,50	1,54	0,50	1,97	0,50	0,55	0,50	0,56

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura A 3 – Ensaios de adensamento por gravidade para cálculo do IVL (polímero CAT-2170)



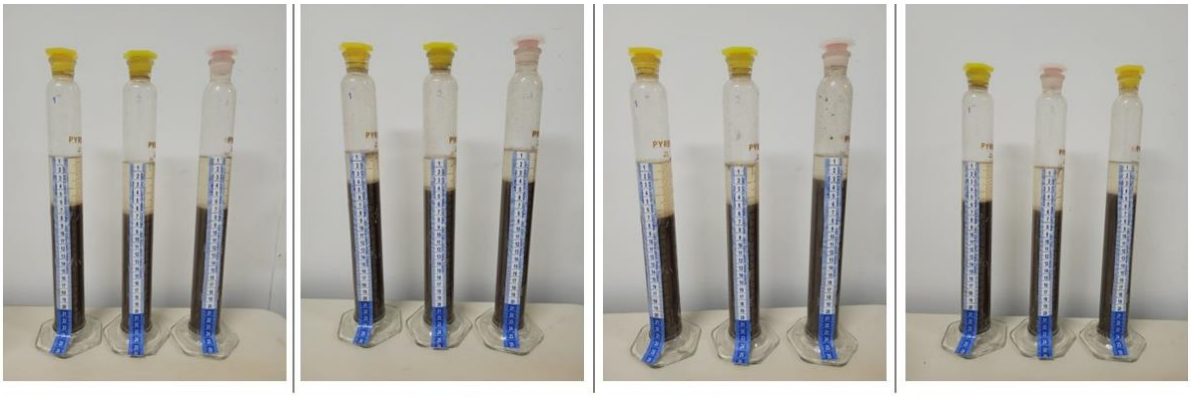
Fonte: Autor, 2024.

Tabela A 4 – Resultados obtidos para o polímero Quitosana

Alíquota	Dosagens de coagulantes							
	4 mg/L		6 mg/L		8 mg/L		10 mg/L	
	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)	H_0 (cm)	H_{30} (cm)
1	23,0	17,2	23,0	19,3	23,0	16,6	23,0	18,0
2	22,5	16,2	22,5	18,7	22,5	18,1	22,5	17,1
3	23,5	17,1	23,5	19,9	23,5	20,9	23,5	19,5
Média	23,0	16,8	23,0	19,3	23,0	18,5	23,0	18,2
Desvio Padrão	0,50	0,55	0,50	0,60	0,50	2,18	0,50	1,21

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura A 4 – Ensaios de adensamento por gravidade para cálculo do IVL (polímero Quitosana)



4 mg/L 6 mg/L 8 mg/L 10 mg/L

Fonte: Autor, 2024.

Tabela A 5 – Índice Volumétrico de Lodo para polímero AN-945

Dados de entrada	Dosagens aplicadas			
	4 mg/L	**6 mg/L**	**8 mg/L**	**10 mg/L**
H_0 (cm)	23,0	23,0	23,0	23,0
H_{30} (cm)	17,2	15,8	12,8	12,3
***SST (kg/L)**	0,028133			
IVL (L/kg)	26,6	24,4	19,8	19,0
Sedimentabilidade	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima

* O valor se referencia à concentração de sólidos suspensos totais encontrada nos ensaios de caracterização do resíduo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela A 6 – Índice Volumétrico de Lodo para polímero L-32

Dados de entrada	Dosagens aplicadas			
	4 mg/L	**6 mg/L**	**8 mg/L**	**10 mg/L**
H_0 (cm)	23,0	23,0	23,0	23,0
H_{30} (cm)	17,1	17,7	17,7	11,0
***SST (kg/L)**	0,028133			
IVL (L/kg)	26,4	27,3	27,3	17,0
Sedimentabilidade	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima

* O valor se referencia à concentração de sólidos suspensos totais encontrada nos ensaios de caracterização do resíduo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela A 7 – Índice Volumétrico de Lodo para polímero CAT-2170

Dados de entrada	Dosagens aplicadas			
	4 mg/L	**6 mg/L**	**8 mg/L**	**10 mg/L**
H_0 (cm)	23,0	23,0	23,0	23,0
H_{30} (cm)	10,8	09,4	11,1	08,4
***SST (kg/L)**	0,028133			
IVL (L/kg)	16,7	14,5	17,1	13,0
Sedimentabilidade	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima

* O valor se referencia à concentração de sólidos suspensos totais encontrada nos ensaios de caracterização do resíduo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela A 8 – Índice Volumétrico de Lodo para polímero Quitosana

Dados de entrada	Dosagens aplicadas			
	4 mg/L	**6 mg/L**	**8 mg/L**	**10 mg/L**
H_0 (cm)	23,0	23,0	23,0	23,0
H_{30} (cm)	16,8	19,3	18,5	18,2
***SST (kg/L)**	0,028133			
IVL (L/kg)	26,0	29,8	28,6	28,1
Sedimentabilidade	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima

* O valor se referencia à concentração de sólidos suspensos totais encontrada nos ensaios de caracterização do resíduo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.