



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

GILSON MESQUITA VIEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DE LODO ORIUNDO DE
RECICLAGEM DE PLÁSTICO PET

JOÃO PESSOA-PB

2024

GILSON MESQUITA VIEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DE LODO ORIUNDO DE RECICLAGEM
DE PLÁSTICO PET

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do curso de
Química Industrial da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento aos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Química Industrial

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Pollyana
Caetano Ribeiro Fernandes

JOÃO PESSOA-PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V657e Vieira, Gilson Mesquita.

Estudo da viabilidade energética de lodo oriundo de reciclagem de plástico PET / Gilson Mesquita Vieira. - João Pessoa, 2024.

50 f. : il.

Orientação: Pollyana Fernandes.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Filtro prensa. 2. Caracterização. 3. Reciclagem de plástico PET. 4. Lodo industrial. I. Título. II. Fernandes, Pollyana. III. Título.

UFPB/CT

CDU 66(043.2)

GILSON MESQUITA VIEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DE LODO ORIUNDO DE RECICLAGEM
DE PLÁSTICO PET

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à coordenação do curso de
Química Industrial da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento aos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Química Industrial

Aprovado em 25 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES**
Data: 29/10/2024 18:59:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^{ta}. Dr^a. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

Orientadora – CEAR/UFPB

Documento assinado digitalmente
 **JOELDA DANTAS**
Data: 29/10/2024 19:58:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^{ta}. Dr^a. Joelda Dantas

Examinadora – CEAR/UFPB

Documento assinado digitalmente
 **ISLANNY LARISSA OURIQUES BRASILEIRO**
Data: 30/10/2024 08:01:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^{ta}. Dr^a. Islanny Larissa Ouriques Brasileiro

Examinadora – CT/UFPB

A Deus e à minha família,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Virgem Maria por estarem sempre comigo, me abençoando de me dando forças em diversos momentos.

Agradeço aos meus pais, por toda a educação que me proporcionaram, pelo ambiente familiar saudável, com muito amor, compreensão e sabedoria. Sempre me apoiando nas minhas decisões e acreditando no meu potencial.

Agradeço à minha companheira de vida e irmã, Larissa, por todos os nossos momentos, conversas e à nossa relação.

Agradeço a todos os meus amigos de Brasília, pelo apoio, motivação, conversas e visitas.

Agradeço a todos que eu tive a oportunidade de conviver em João Pessoa, em especial ao Evilásio Andrade, em sua grande sabedoria sempre me aconselhou em difíceis momentos e decisões, me apresentou pessoas incríveis e amizades saudáveis que eu pretendo levar para toda a vida.

A minha namorada Maria Eduarda, que sempre soube me tranquilizar e compreender nos momentos que não pude estar presente.

Agradeço à todas as amigas que eu fiz durante a graduação, por todas as risadas, momentos de estudo e perrengues.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Química (DQ) e Departamento de Engenharia Química (DEQ) pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço a minha orientadora Pollyana, à Joelda e ao técnico Jhonatas por toda a paciência e esforço me ajudando no desenvolvimento do TCC.

Agradeço a empresa onde atualmente eu trabalho, GreenPCR, priorizando o meu estudo e fornecendo as amostras para que este estudo pudesse acontecer.

RESUMO

Como em grande parte das indústrias, uma das principais problemáticas são voltadas para a destinação correta dos resíduos gerados no processo produtivo, e na indústria recicladora de plástico isto não é diferente. A caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de efluente oriundo do processo de reciclagem de plásticos PET (Polietileno Tereftalato) é de grande importância e necessária para buscar formas de aproveitamento atendendo às legislações ambientais e contribuir para a formulação de práticas de manejo que sejam seguras e sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o lodo compactado por filtro prensa na estação de tratamento de efluente e verificar a possibilidade de utilização do lodo da indústria de reciclagem de plástico PET como fonte de energia, adotando amostras em 3 dias diferentes de operação, para garantir a viabilidade do resíduo. Para viabilizar isto, foi estudado o comportamento através de análises imediatas e análises avançadas como a termogravimétrica (TG) e a análise derivada termogravimétrica (DTG), as quais são técnicas que permitem estudar como o material se comporta quando submetido a aquecimento em ampla faixa de temperatura, oferecendo respostas sobre a sua estabilidade térmica e indícios da composição química do lodo. As amostras apresentaram a média de cinzas de $38,44\% \pm 2,76$, média de teor de voláteis de $39,50\% \pm 0,31$, média de teor de carbono fixo de $22,10\% \pm 2,47$ e PCS de $17,41\% \pm 0,84$. Nas análises de TG e DTG obteve-se o teor de umidade média em 5,3% e 50,3 % de matéria orgânica. A partir dos resultados obtidos, o estudo permitiu concluir que o lodo oriundo da reciclagem de PET apresenta potencial para ser utilizado como fonte alternativa e renovável de energia.

Palavras-chave: Filtro prensa; Caracterização; Reciclagem de plástico PET; Lodo industrial.

ABSTRACT

As in many industries, one of the main issues is the proper disposal of waste generated during the production process, and this is no different in the plastic recycling industry. Characterizing the sludge generated in the wastewater treatment plant from the PET (Polyethylene Terephthalate) recycling process is of great importance and necessary to find ways to utilize it in compliance with environmental regulations, as well as to contribute to the formulation of safe and sustainable management practices. The objective of this work was to characterize the sludge compacted by a filter press in the wastewater treatment plant and to assess the potential for using the sludge from the PET plastic recycling industry as an energy source, collecting samples on three different operating days to ensure the viability of the waste. To achieve this, the behavior was studied through proximate analyses and advanced analyses such as thermogravimetric analysis (TG) and derivative thermogravimetric analysis (DTG), which are techniques that allow the study of how the material behaves when subjected to heating over a wide temperature range, providing insights into its thermal stability and indications of the chemical composition of the sludge. The samples showed an average ash content of $38.44\% \pm 2.76$, an average volatile matter content of $39.50\% \pm 0.31$, an average fixed carbon content of $22.10\% \pm 2.47$, and a calorific value of $17.41\% \pm 0.84$. In the TG and DTG analyses, an average moisture content of 5.3% and 50.3% organic matter was obtained. Based on the results, the study concluded that the sludge generated from PET recycling has the potential to be used as an alternative and renewable energy source.

Keywords: Filter press; Characterization; PET plastic recycling; Industrial sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação do PET reciclado.....	16
Figura 2 - Leito filtrante (GRABE, 2024).....	23
Figura 3 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluente Industrial.	25
Figura 4 – Registro fotográfico da Torta no Filtro Prensa.....	26
Figura 5 – Registro fotográfico das amostras de lodo à luz solar.....	26
Figura 6 – Registro fotográfico das amostras secando em estufa.....	27
Figura 7 – Registro fotográfico da amostra seca.	27
Figura 8 - Peneiramento das amostras de lodo.	28
Figura 9 - Amostra preparada para análise térmica (A-1).	28
Figura 10 - Determinação de umidade das amostras de lodo.Fonte: Acervo do autor, 2024. ...	29
Figura 11 - Pesagem de amostra do lodo para análise do poder calorífico.	29
Figura 12 - Acondicionamento da amostra de lodo no calorímetro.	30
Figura 13 - Análise de material volátil contidos nas amostras de lodo.	31
Figura 14 - Massa residual pós análise de material volátil nas amostras de lodo.	31
Figura 15 - Análise de cinzas das amostras de lodo.	33
Figura 16 - Gráficos comparativos do teor voláteis, cinzas e carbono fixo das amostras de Lodo.	36
Figura 17 - TG/DTG amostra 1 de lodo.	37
Figura 18 - TG/DTG amostra 2 de lodo.	38
Figura 19 - TG/DTG amostra 3 de lodo.	38
Figura 20 - TG comparativo das 3 amostras de lodo.....	39
Figura 21 - DTG comparativo das 3 amostras de lodo.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CF – Carbono fixo

DTG – Derivada da Termogravimetria

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Efluente

NBR – Normas Brasileira de Regulamentação

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PCS – Poder Calorífico Superior

PE - Polietileno

PET – Polietileno Tereftalato

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de Vinila

TG – Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 Plásticos.....	15
3.2 Reciclagem	15
3.3 Subprodutos.....	17
3.4 Lodo.....	18
3.5 Lodos em processos energéticos.....	20
3.6 Filtro Prensa.....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Processo de obtenção do lodo.....	24
4.2 Coleta e preparação das amostras.....	25
4.3 Análise de umidade.....	28
4.4 Poder calorífico.....	29
4.5 Carbono fixo	30
4.6 Material volátil	31
4.7 Cinzas	33
4.8 Termogravimetria	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Análise imediata	35
5.1.1 Umidade	35
5.1.2 Teor de cinzas	35
5.1.3 Teor de voláteis.....	36

5.1.4 Carbono fixo	36
5.1.5 Poder calorífico.....	36
5.2 Termogravimetria	37
6 CONCLUSÃO.....	42
7 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O consumo de plásticos vem crescendo cada vez mais no decorrer dos anos. Segundo Zamora *et al.* (2020), em uma pesquisa realizada em 2020 pela Fundação Heinrich Böll Brasil, Atlas do plástico, trouxe uma visão geral da produção, consumo e reaproveitamento, apontando que mais de 407 milhões de toneladas de plásticos foram produzidos no ano de 2015, e cerca de 9% deste total foi exclusivamente de Polietileno Tereftalato (PET), usado amplamente em fibras de poliéster, filmes, embalagens de alimentos e garrafas de bebidas.

No contexto da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável realizado pela Organização das Nações Unidas (ONU), é realizado um apelo global para que os países caminhem juntos para proteger a sociedade, meio ambiente e o clima. Dentre os vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a ODS 12, que visa a padronização de consumo e produção sustentáveis, destaca a reciclagem e reutilização como meios para redução de resíduos. Neste contexto, a reciclagem PET minimiza o impacto ambiental na produção de novos plásticos e promove uma circularidade econômica, onde os recursos são reaproveitados e valorizados.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de PET (ABIPET) no 12º Censo de Reciclagem PET, havia mais de 140 indústrias envolvidas em toda a cadeia do processo de reciclagem de mais de 359 mil toneladas de PET no Brasil em 2021. Destas 140 indústrias, 26% representam os recicladores, ou seja, apenas reciclam o material PET, transformando garrafas PET em *flakes* descontaminados e PET-PCR (Pós Consumo Reutilizado). A tendência do crescimento é verdadeira, uma vez que a comissão da União Europeia (UE), através da diretiva 2019/904, definiu como obrigatório que 25% de todo PET fabricado ser oriundo da reciclagem até ano de 2025, aumentando até os 30% em 2030. O Brasil também já tem aprovado pela Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara do Deputados o Projeto de Lei 418/11 que exige no mínimo 20% de PET reciclado em embalagens, sendo elevado a 30% em cinco anos após a entrada em vigor da referida lei.

No decorrer de todo o processo de lavagem e descontaminação na indústria de reciclagem PET são gerados diversos subprodutos, desde tampas e rótulos das próprias garrafas, até arames, fitas, papelão, materiais metálicos, outros plásticos, até o lodo, resultante das etapas de purificação e limpeza do material. Em um estudo conduzido em uma unidade produtiva de Polietileno Tereftalato Pós Consumo Reutilizado (PET-PCR) por Dos Santos (2005), foi verificado um consumo de 41% a mais de água frente à produção de resina PET virgem. Esta

água é usada em sua quase totalidade na lavagem e descontaminação das garrafas, onde o lodo gerado após a lavagem possui uma mistura complexa de compostos, incluindo metais pesados, contaminantes químicos e resíduos orgânicos. A ODS 6, nesse sentido, que busca garantir o saneamento para a sociedade e disponibilidade e gestão sustentável da água, é também relevante, uma vez que a destinação inadequada deste lodo possa vir a contaminar o solo e comprometer a qualidade da água.

Como grande parte das indústrias, uma das principais problemáticas e atenção são voltadas para a destinação correta dos resíduos gerados no processo produtivo. E na indústria recicladora de plástico isto não é diferente. O lodo gerado na estação de tratamento pode ter potencial para agricultura, pode também ser destinado para usinas de compostagem ou ser descartado em aterros sanitário como resíduos de classe II A conforme estabelece a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na NBR 10004:2004.

Contudo, vale destacar a necessidade de sanitização devido a presença de poluentes patogênicos e metais pesados, que tornam o lodo um sério passivo ambiental. Métodos de tratamento como estabilização alcalina prolongada, digestão anaeróbia e compostagem, são ineficientes para a sanitização completa desse tipo de resíduo, além de ser requerido várias e longas etapas processuais. Neste sentido, destaca-se então a pirólise, um método termoquímico rápido que promove a sanitização plena e a imobilização de metais pesados, abrindo assim os canais de destinação e ainda preservando a presença de matéria orgânica benéfica aos solos e meio ambiente, devido ao seu processo reacional peculiar que ocorre na ausência de oxigênio.

A caracterização do lodo gerado na estação de tratamento de efluente oriundo do processo de reciclagem PET é de suma importância e necessária. Para isto, as análises de umidade, cinzas, poder calorífico, carbono fixo e voláteis, são de grande relevância, além de análises avançadas como a termogravimétrica (TG) e a análise derivada termogravimétrica (DTG), que são técnicas que permitem estudar como o material se comporta quando submetido a aquecimento, oferecendo respostas sobre a sua estabilidade térmica e os indícios da composição química do lodo.

A termogravimetria mensura a perda de massa do lodo com o aumento da temperatura, enquanto a sua derivada termogravimetria detalha as taxas de perdas, possibilitando ter indícios de diferentes componentes presentes no material estudado. Com estas análises é possível desenvolver estratégias de tratamento mais sustentáveis e eficazes, alinhados ao ODS 11, que visa tornar os assentamentos humanos e as cidades mais inclusivas, seguras e sustentáveis.

Sendo assim, a motivação principal deste trabalho foi caracterizar o lodo compactado por filtro prensa na estação de tratamento de efluente, estudando a sua viabilidade energética

através de análises imediatas e termogravimetria. Era esperado que os resultados contribuíssem para um entendimento sobre o material, auxiliando na formulação de práticas de manejo que sejam seguras e sustentáveis, pois atualmente o lodo é destinado para aterros sanitários, causando sobrecarga da área, e outras estações de tratamento de resíduos, gerando um alto custo na sua destinação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve por objetivo verificar a possibilidade de utilização do lodo da indústria de reciclagem de PET como fonte de energia, promovendo a caracterização físico-química e avaliando o potencial energético, além de investigar o padrão de comportamento do lodo em 3 dias diferentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar análise imediata (teor de cinzas, teor de voláteis e teor de carbono fixo);
- Avaliar o poder calorífico das amostras;
- Avaliar o potencial energético do lodo e a possibilidade de utilização em processos de combustão;
- Avaliar as características do lodo preparado em diferentes dias de operação do filtro prensa.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Plásticos

A produção de plástico tem crescido fortemente nas últimas décadas. Em 1950 eram produzidos 1,3 milhões de toneladas plásticas, enquanto que atualmente, são cerca de 370 milhões de plásticos fabricados anualmente. Isso representa um aumento de 350% em relação as estimativas de produção no século XX (Plastics Europe, 2021)

Os plásticos são materiais que, embora sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, quando aquecidos acima da temperatura de “amolecimento” tornam-se fluidos e passíveis de serem moldados por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Alguns exemplos de termoplásticos são o PP, o PE, o PET, o PVC e o poliestireno (PS) (Spinacé; Paoli, 2005).

De acordo com a Empresa Júnior de Engenharia Química PROPEQ (2020) os plásticos são caracterizados em 2 categorias, sendo elas:

- Termofixos: insolúveis e infusíveis, formam estruturas rígidas e duráveis, por terem ligações químicas cruzadas e, portanto, mais fortes. Não podem ser reciclados mecanicamente. Alguns exemplos são: silicone, resina epóxi, poliuretano (PU) e poliéster.
- Termoplásticos: correspondem a 80% dos plásticos consumidos, permitem fusão por aquecimento, podendo ser moldados repetidas vezes (e, portanto, reciclados mais facilmente), mas com perdas mecânicas a cada repetição do processo; são facilmente maleáveis, em geral utilizados para produção de filmes e embalagens. Exemplos: polipropileno (PP), o polietileno (como PET), o polimetil-metacrilato (ou acrílico) e o policloreto de vinila (PVC).

Os termoplásticos são moldáveis a quente e possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmico e elétrico, são resistentes ao impacto e possuem baixo custo, portanto, apresentam uma larga faixa de aplicações. Devido a estas propriedades o consumo dos polímeros vem crescendo no Brasil e no mundo. (Spinacé; Paoli, 2005).

3.2 Reciclagem

Pelo menos 1,5 milhão de toneladas de plástico são usadas na produção de garrafas PET. Dados da Associação Internacional de Águas Engarrafadas indicam que a demanda brasileira por esse tipo de produto cresce 7% ao ano. Sem reciclagem, o Brasil descarta por ano 4,7 bilhões de garrafas PET na natureza de forma indevida. (ATLAS, 2020)

A reciclagem de materiais é uma atividade de extrema importância em termos ambientais, sociais e econômicos, pois contribui para a geração de emprego e de renda e a preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, além de reduzir gastos com a disposição final dos resíduos, com limpeza e saúde pública. Ao mesmo tempo, a reciclagem contribui para o reaproveitamento das perdas de produção nas indústrias. (Spinacé; Paoli, 2005)

A indústria recicladora do PET no Brasil é economicamente viável, sustentável e funcional. Basta citar que mais de um terço do faturamento de todo o setor provém da reciclagem. Isso contribui para gerar impostos, empregos, renda e todos os demais benefícios de uma indústria de base sólida. Seu crescimento anual constante permite planejar novos investimentos – incrementados e incentivados pela criação de novos usos para o PET reciclado. (ABIPET, 2024)

Segundo o 12º censo da reciclagem do PET no Brasil pela Associação Brasileira de PET (ABIPET) em 2021 foram produzidas 359 mil toneladas de PET pós-consumo reciclado, que representam cerca de 56,4% de todas as embalagens descartadas pelos consumidores. Os principais destinos do PET pós-consumo reciclado são para pré-formas ou garrafas (29%), têxteis (24%), bobinas e termoformagem (17%), químico (13%), fitas de arquear (11%), lâminas e chapas (4%) e outros (2%). Assim representados na Figura 1.

Figura 1 - Aplicação do PET reciclado



Fonte: ABIPET, 2022

A reciclagem de polímeros é uma alternativa viável para minimizar o impacto ambiental causado pela disposição destes materiais em aterros sanitários. Este tema vem se tornando cada vez mais importante pois, além dos interesses ambientais e econômicos, começam a surgir

legislações cada vez mais rígidas no sentido de minimizar e/ou disciplinar o descarte dos resíduos sólidos. (Spinacé; Paoli, 2005).

3.3 Subprodutos

O sistema de reciclagem PET consiste em duas etapas. A primeira compreende a abertura dos fardos de PET, a remoção de rótulos e tampas de garrafas, moagem das garrafas em *flakes*, separando o PET de outros plásticos através de um sistema de flotação com diferença de densidade (rótulos e tampas de polipropileno), lavagem e finalmente secagem. (GILENO, 2020).

O processo de descontaminação de garrafas PET pós-consumo gera diversos subprodutos. Além do pó de PET – pequenas partículas de PET oriundas do processo de moagem e que devido a sua granulometria não têm aplicação desejada no processo de reciclagem em questão – destacam-se a separação de rótulos e tampas, bem como outros plásticos que são adquiridos involuntariamente como contaminantes dos fardos de garrafas PET comprados do mercado, metais, resíduos dos produtos contidos nas embalagens coletadas (restos de refrigerante, óleo, produtos de limpeza etc.), contaminantes agregados no trajeto entre o descarte do consumidor até a chegada à Recicladora (lixo doméstico, areia, terra etc.). (GILENO, 2020).

Direta e indiretamente, a etapa responsável por ser a maior geradora de resíduos sólidos é a Linha de Lavagem. Os contaminantes dos fardos, como material de amarração e suportaço (arames, fitilhos, papelão, rafia etc.), materiais indevidos contidos no material comprado no mercado, como outros plásticos (PE, PP, PVC, PS etc.) e metais (alumínio, aço etc.), são segregados ao longo do processo de beneficiamento. Pó de PET e flakes de PET contendo contaminantes diminutos como madeira, borracha e outros materiais, também são rejeitos sólidos do processamento nessa etapa. (GILENO, 2020)

Para a produção de uma tonelada de *flakes* de PET, existe a geração paralela média de 333 kg de subprodutos diretamente no processo de Lavagem através da separação manual dos materiais que constituem a embalagem do fardo de garrafas PET prensadas (arames, fitas, rafia, papelão etc.), das separações automática e manual, já com a matéria-prima pré-lavada (materiais metálicos, outros plásticos, cores indesejadas etc.) e dos resíduos do processo de moagem, lavagem, peneiramento e despoeiramento. O processo de tratamento dos efluentes da Linha de Lavagem também gera resíduos sólidos, como: 1) a farinha fóssil contaminada no

processo de reaproveitamento de água do processo no Filtro a Vácuo (para retirada, principalmente, da cola contida nas embalagens e removida dos *flakes* no processo de lavagem); 2) os resíduos sólidos coletados no processo de filtração em membranas geotêxteis (Tratamento Preliminar) e 3) o lodo biológico descartado na ETE (GILENO, 2020)

3.4 Lodo

Sperling et al. (2001) em seu estudo sobre estações de tratamentos de efluente, aponta as principais etapas no gerenciamento de lodos como: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final.

O processo produtivo, na grande maioria das vezes, tem como consequência a geração de resíduos que necessitam de tratamento e destino adequados, pois diversas substâncias presentes nos resíduos industriais são tóxicas e algumas delas têm a capacidade de bioacumulação nos seres vivos, podendo entrar na cadeia alimentar e chegar até o homem. (SISINNO, 2003).

Enquanto as nações industrializadas buscam alternativas para equacionar seus 400 milhões de toneladas anuais de resíduos, as comunidades dos países em desenvolvimento como o Brasil convivem com depósitos desordenados de resíduos, os lixões, em aproximadamente 90% de suas cidades. As previsões de aumento populacional associada à crescente concentração urbana mundial determinou a necessidade imediata de definições tecnológicas e ações políticas para solucionar um trágico problema: há uma limitação técnica e econômica dos espaços apropriados para a destinação final dos resíduos (ANDREOLI, 1998).

De acordo com a ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - são considerados resíduos sólidos industriais todos os desperdícios ou perdas do processo fabril que se encontram em estado sólido e semissólido, incluindo-se os lodos das estações de tratamento de efluentes. Incluem-se também nessa classificação, quaisquer líquidos pastosos, cujas características os impeçam de serem considerados efluentes a tratar na ETE. (FOELKEL, 2010)

Os esgotos industriais, extremamente diversos, provêm de qualquer utilização da água para fins industriais, e adquirem características próprias em função do processo industrial empregado. Assim sendo, cada indústria deverá ser considerada separadamente, uma vez que seus efluentes diferem até mesmo em processos industriais similares (JORDÃO, 1995).

O lodo é uma importante fonte de matéria orgânica, contendo micro e macronutrientes, conferindo ao solo maior capacidade de retenção de água, maior resistência a erosão e, ao

mesmo tempo resolve de forma ambientalmente adequada e economicamente viável o problema da disposição final deste resíduo. (CHAGAS, 2000)

Na maior parte das etapas do seu manuseio, o lodo é constituído de mais de 95% de água, com uma concentração de sólidos, da ordem de 0,25 a 12% do lodo, em peso. Apenas por convenção, o lodo é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido que está sendo tratado (METCALF & EDDY, 1991).

A crescente demanda da sociedade pela adoção de práticas ambientais mais adequadas, se reflete também na ampliação dos níveis de tratamento de efluentes industriais e domésticos. Desta forma, verifica-se o crescimento da produção de lodo, um subproduto do tratamento de efluentes, de composição variável, contendo 40 a 80% de matéria orgânica e outros nutrientes de importância agrônômica. (CHAGAS, 2000). O processamento e a disposição final do lodo podem representar até 60% do custo operacional de uma ETE. Geralmente, para destinação final do lodo são utilizados os aterros sanitários, no entanto, alguns estudos vislumbram sua aplicação como insumo agrícola, fertilizante ou mesmo na construção civil. (IWAKI, 2018),

A busca de soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para o tratamento e disposição final de lodos de ETAs continua sendo um desafio em vários países, principalmente no Brasil, onde o assunto é mais recente. A caracterização adequada do lodo é o passo inicial para poder avançar nesse sentido. As legislações ambientais específicas devem ser analisadas para cada tipo de disposição final desejada. (IWAKI, 2018). Dentre todos os tipos de lodo, temos como os principais:

Lodo primário

O lodo bruto proveniente do processo de tratamento primário das Estações de Tratamento, é obtido por sedimentação ou flotação e possui coloração acinzentada, é pegajoso, de odor ofensivo e facilmente fermentável. (FERREIRA, 1999). São resultantes da separação ou perdas de cargas minerais utilizadas na fabricação (PIOTTO, 2003).

O lodo primário produzido na etapa primária do tratamento é bastante rico em sólidos, impurezas minerais com muita umidade, que são resultantes da separação ou perdas de cargas minerais utilizadas na fabricação (PIOTTO, 2003).

Lodo Secundário

A maneira mais comum de se tratar a poluição orgânica é através de tratamentos biológicos, onde microrganismos especializados àqueles tipos de compostos orgânicos presentes nos efluentes, alimentam-se dos mesmos. Com isso, esses organismos obtêm energia metabólica e fixam o carbono da poluição orgânica em seus próprios corpos, formando suas células. Quando essa população microbiológica alcança um certo nível de

crescimento em tamanho e número de indivíduos, esses microrganismos são separados na forma de lodos biológicos. Esse tipo de lodo é outro lodo nas indústrias e muitas vezes referido como Lodo Secundário Biológico (FOELKEL, 2010).

Lodo terciário ou químico

Formados no tratamento físico-químico de efluentes cuja separação da fase líquida é auxiliada por produtos químicos floculantes ou coagulantes auxiliados ou não por produtos que alteram a acidez ou alcalinidade do meio (AMBIENTAL, 2020)

Podem ser divididos em duas categorias: orgânico e inorgânico. A solução de tratamento mais adequada depende de diversos fatores como as características físicas, químicas e biológicas do material, espaço físico disponível, a tecnologia aplicada e disposição final (AMBIENTAL, 2020).

Diversas etapas de fabricação no processo industrial acabam se contaminando com sais minerais, terra, areia, compostos orgânicos, óleos e graxas, diversos tipos de sólidos que ficam nela suspensos etc. A conhecida poluição hídrica dos efluentes exige tratamento final para que o efluente a ser retornado ao corpo de água possa ter características compatíveis para ser recebido de volta. Sólidos suspensos acabam sendo separados por gradeamento, peneiramento ou decantação; enquanto a matéria orgânica dissolvida precisa ser convertida em uma fase sólida capaz de ser removida por decantação, filtração, flotação, centrifugação ou outra forma eficiente de separação das fases sólidas e líquidas (FOELKEL, 2010).

3.5 Lodos em processos energéticos

No Brasil ainda não é uma prática comum o uso de lodos em caldeiras de geração de energia devido à falta de conhecimento dos efeitos positivos e negativos. O uso da biomassa originária de lodos em processos de combustão tem grande vantagem devido à redução do uso de combustíveis fósseis, além de reduzir significativamente o volume dos resíduos. Poucos trabalhos aparentam trazer novas informações sobre uso do potencial energético do lodo (Rosa; Chernicharo; Melo, 2015).

A avaliação da distribuição das publicações dentro do uso industrial e aplicação no solo apontou que na aplicação industrial, foram constatadas que em 3,7% das publicações os autores avaliaram o uso do lodo com a finalidade de obtenção de energia térmica ou elétrica, 3,7% das publicações de utilização do lodo como componente de mistura na fabricação de artefatos cerâmicos e 1,0% das publicações com uso na construção civil. Quanto à aplicação no solo a distribuição foi de 65,8% dos artigos na agricultura, 13,6% na produção silvícola, 9,6% na

recuperação de áreas degradadas e 2,7% na produção de espécies ornamentais (Castro *et al.*, 2015).

Uma das formas de se aproveitar este lodo é o aproveitamento energético em caldeira de biomassas (Bastian; Rocco, 2009; Avelar *et al.*, 2016). A queima com recuperação de energia, denominada “*waste to energy*”, tem-se mostrado promissora no aproveitamento dos resíduos orgânicos (Psomopoulos; Bourka; Themelis, 2009).

A queima pode ser uma boa alternativa para a redução do volume de resíduos, contudo, deve-se levar em consideração a geração de novos resíduos, entre eles a geração de cinzas e as emissões atmosféricas. No entanto, por se tratar de um resíduo industrial, para determinar se a queima para geração de energia é uma alternativa ambientalmente segura e viável é importante conhecer mais um pouco de sua composição química em relação a alguns elementos (Draeger *et al.* 2021).

3.6 Filtro Prensa

Diversas etapas de fabricação no processo industrial acabam se contaminando com sais minerais, terra, areia, compostos orgânicos, óleos e graxas, diversos tipos de sólidos que ficam nela suspensos etc. A conhecida poluição hídrica dos efluentes exige tratamento final para que o efluente a ser retornado ao corpo de água possa ter características compatíveis para ser recebido de volta. Sólidos suspensos acabam sendo separados por gradeamento, peneiramento ou decantação; enquanto a matéria orgânica dissolvida precisa ser convertida em uma fase sólida capaz de ser removida por decantação, filtração, flotação, centrifugação ou outra forma eficiente de separação das fases sólidas e líquidas. (FOELKEL, 2010).

O filtro prensa para desidratação de lodos surgiu inicialmente para atender a indústria de açúcar na separação dos sucos através das telas de filtração. A primeira unidade para desidratação de lodo municipal em larga escala nos Estados Unidos surgiu no começo da década de 1920. (MIKI, 1998). Filtros prensa de placas estão entre os equipamentos de desaguamento de lodos mais antigos e são capazes de produzir tortas com concentração de sólidos maior que qualquer outro equipamento de desidratação (KEMP, 1997).

Os elementos constituintes do filtro prensa são as placas, que podem ser horizontais ou verticais, e o quadro onde são fixadas. Entre as placas encontra-se o elemento filtrante. As placas e os quadros são dispostos alternadamente formando um pacote que é prensado por um cilindro que pode ser hidráulico ou pneumático. (LEITE, 2011).

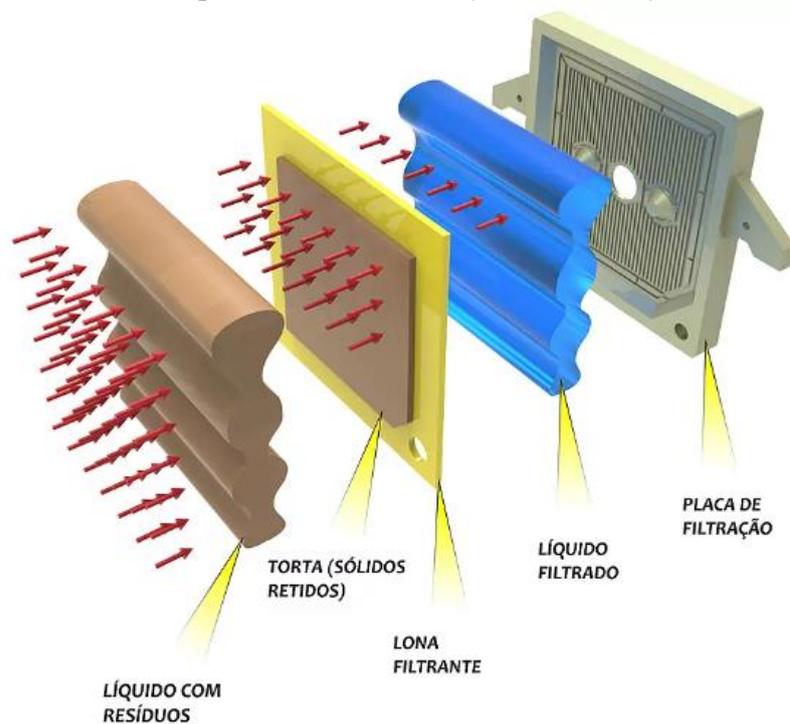
Alguns fatores são de altíssima relevância na hora do dimensionamento de um filtro prensa, como: Velocidade de sucção na filtração: a velocidade de sucção do fluido a ser filtrado proporciona o que chamamos de efeito de arraste dos sólidos. Desta forma quanto maior for a velocidade de sucção maior será o arraste e melhor será o processo de filtração. Velocidade de passagem pelo elemento filtrante: a velocidade de passagem do fluido a ser filtrado pelo elemento filtrante influencia na capacidade de retenção dos sólidos por parte do elemento filtrante. Desta forma quanto maior for a velocidade de passagem menor será a retenção de partículas sólidas. Área filtrante: Interfere diretamente na pressão e na velocidade. Quanto maior for a área filtrante menor será a velocidade de passagem e menor a pressão do sistema. Desta forma concluímos que quanto maior for a área de passagem melhor será o processo de filtração. (LEITE, 2011).

O funcionamento do filtro prensa pode ser resumido pelo bombeamento do fluido para as partes internas do filtro e sua passagem pelos poros das lonas filtrantes que recobrem as placas de filtração. As lonas filtrantes permitem principalmente a passagem da fase líquida, retendo quase totalmente os sólidos da suspensão nas câmaras formadas pelo perfil rebaixado de placas. O líquido filtrado é drenado pelos canais presentes em cada face das placas de filtração e direcionado para uma saída na lateral. (GRABE, 2024).

O filtro prensa conduz à formação de tortas espessas, da ordem de 2,5 cm e o seu dimensionamento depende dos volumes exigidos de filtrados, a serem produzidos no tempo total de um ciclo completo de operação. (PEIXOTO, 2012). O lodo é submetido durante uma a duas horas à pressão de 6 a 8 atm, sendo depois removido manualmente em estado sólido. Durante a operação, o teor de água cai de 95 para 65%, com o que seu volume fica reduzido a um sétimo (IMHOFF, 1986). Apesar de sua operação ser um tanto trabalhosa, os filtros prensa produzem tortas de excelente qualidade, consequência de sua alta capacidade de concentrar os sólidos. (FERREIRA *et al*, 1999)

Na Figura 2 pode-se ver como ficam dispostos os elementos no leito filtrante de um filtro prensa.

Figura 2 - Leito filtrante (GRABE, 2024)



Uma vez concluída a capacidade de disposição da torta, a mesma é lavada, seguindo-se, então, a abertura do filtro e o descarregamento da torta, caracterizando-se, assim, um processo contínuo e tipicamente em batelada. (PEIXOTO, 2012).

Segundo Miki (1998), o filtro prensa pode ter também diversas aplicações em indústrias farmacêuticas, alimentícias, petroquímicas, de bebidas, cerâmicas, cimento, minérios, separação de cristais e filtração de carvão em pó. Geralmente, sendo usado em operações para clarificação, compactação e desidratação em geral.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Processo de obtenção do lodo

Na estação de tratamento da indústria de plásticos há a produção de lodo primário e lodo químico.

O tratamento é iniciado na galeria que vem do processo de moagem e lavagem da produção de *flake* de PET. O efluente ao chegar na galeria passa pelo gradeamento, em que uma tela colocada perpendicularmente ao fluxo é responsável por reter os sólidos maiores. O efluente segue para a calha Parshall, usada como medidor de vazão. Em seguida o efluente segue para o 1º tanque de captação com 3 bombas submersas, que são responsáveis por conduzir o efluente até a centrífuga, a qual retém os sólidos menores e *flakes* de garrafas. A centrífuga desagua no decantador desarenador, onde no fundo há uma esteira, chamada de transportadora de lama *redler* que leva a areia e sólidos decantados até uma caçamba. Sendo então o efluente transportado para outro tanque de captação antecedido por uma peneira estática. Neste segundo tanque de captação há uma bomba submersa que conduz o efluente até 3 decantadores dispostos em série.

Após a decantação, é iniciado então o tratamento físico-químico, onde no primeiro reator há a regulagem do pH com ácido clorídrico, seguido pelo reator onde há a adição do coagulante Policloreto de Alumínio e depois para o reator para adição do polímero aniônico. O efluente segue para o decantador lamelar onde há um tempo de detenção para a completa decantação dos flocos.

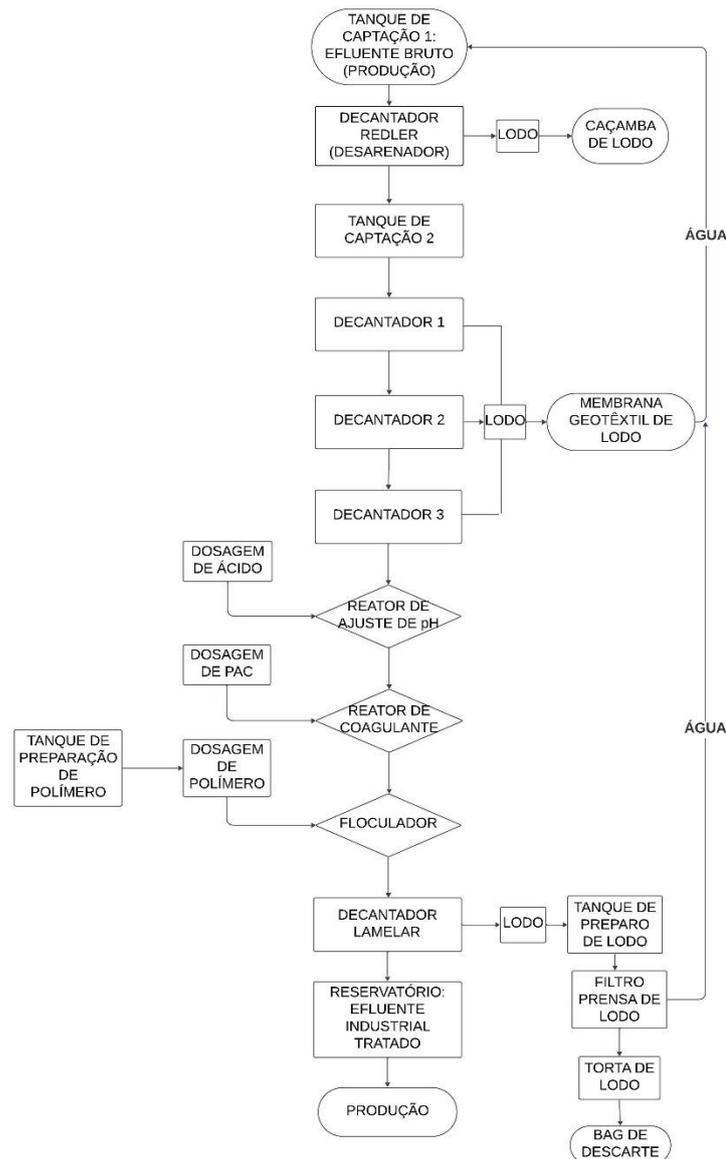
No decantador lamelar há 8 válvulas para purga de lodo, onde uma bomba pneumática conduz o lodo da calha de purga para um reator, onde 2 m³ de lodo são preparados com a adição de polímero aniônico. Após a completa mistura do lodo com o polímero, outra bomba pneumática conduz o lodo para o filtro prensa.

O filtro prensa possui 40 placas, onde são necessárias 5 bateladas de lodo para que o filtro fique cheio. O lodo filtrado é retirado das placas com uma pá e ar pneumático. O filtro prensa retém cerca de 175 Kg de lodo após uma batelada.

No ANEXO A pode-se ver imagens de todas as etapas do processo acima descrito.

A Figura 3 está ilustrado o fluxograma da rota do efluente e a geração de lodo.

Figura 3 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluente Industrial.



Fonte: O Autor, 2024.

4.2 Coleta e preparação das amostras

As amostras de lodo foram fornecidas pela empresa Green PCR, localizada às margens da BR-101, no Conde-PB, oriundas do filtro prensa em 3 dias diferentes de operação. Com o auxílio de uma luva e um recipiente para armazenamento, foram coletadas dos *bags* de descarte do filtro prensa, aproximadamente 5 quilos de lodo, posteriormente, as amostras foram levadas à UFPB e colocadas para secar ao sol durante uma semana.

Nas Figuras 4 e 5 pode-se observar, respectivamente, a torta do filtro prensa e as amostras no processo de secagem à luz solar na UFPB.

Figura 4 – Registro fotográfico da Torta no Filtro Prensa.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 5 – Registro fotográfico das amostras de lodo à luz solar.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ) do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Cada amostra, após realizada a análise do teor de umidade, foi levada à estufa para retirar a umidade restante pelo período de 2 horas a 105 °C. Nas Figuras 6 e 7 pode-se observar as amostras antes e após o processo de secagem na estufa.

Foi utilizado um liquidificador industrial para reduzir o lodo em partículas menores. O material triturado foi passado por uma peneira em malha 100 *mesh* ($< 0,149$ mm), mostrado na Figura 8. Depois de trituradas e peneiradas, foram acondicionadas em potes de 10 mL, mostrado na Figura 9 e identificados como A-1, A-2 e A-3 para as posteriores análises de teor de umidade, matérias voláteis, carbono fixo, cinzas e termogravimetria (TG) e a sua derivada termogravimétrica (DTG).

Figura 6 – Registro fotográfico das amostras secando em estufa.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 7 – Registro fotográfico da amostra seca.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 8 - Peneiramento das amostras de lodo.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 9 - Amostra preparada para análise térmica (A-1).



Fonte: Acervo do autor, 2024.

4.3 Análise de umidade

Segundo KLAUTAU (2008), a umidade é um fator crucial para o uso de uma biomassa para fins energéticos, pois auxilia na determinação da qualidade e possibilidade de uso de uma biomassa, pois é um fator limitante. Uma biomassa com umidade acima de 50%, sem o auxílio de uma fonte externa, é incapaz de atingir a energia necessária para a combustão.

A análise de umidade foi realizada em triplicata em cada amostra, utilizando uma balança determinadora de umidade A&D MF-50, identificadas na Figura 10. Foi pesado aproximadamente 1 grama em cada análise a uma temperatura de 105 °C, com intervalo de 10 minutos entre as análises para diminuição do eventual erro.

Figura 10 - Determinação de umidade das amostras de lodo.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

4.4 Poder calorífico

A análise de poder calorífico refere-se à avaliação da quantidade de energia que o material pode liberar durante a sua combustão. Quanto maior o poder calorífico, mais alta será a energia nele contida.

A análise de poder calorífico superior foi realizada em duplicata com cada amostra, pesando aproximadamente 0,200 grama cada uma, assim como na Figura 11. Cada amostra foi colocada no equipamento calorímetro IKA® C 200 identificado na Figura 12, através da metodologia ASTM D5865M-19.

O poder calorífico superior foi determinado pela média das medições obtidas através do calorímetro.

Figura 11 - Pesagem de amostra do lodo para análise do poder calorífico.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 12 - Acondicionamento da amostra de lodo no calorímetro.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

O poder calorífico inferior foi determinado através da seguinte Eq. 1:

$$PCI = PCS - 432 \quad (1)$$

Onde:

PCI: Poder Calorífico Inferior;

PCS: Poder Calorífico Superior;

432 calculado pela expressão $600\left(\frac{9H}{100}\right)$;

H: Teor de Hidrogênio (em média 8%).

4.5 Carbono fixo

O carbono fixo, é o carbono que não foi liberado no aquecimento em decorrência da ausência de oxigênio, sendo assim determinado pelo total da massa da amostra de lodo seco subtraindo os teores de cinzas e de matéria volátil.

O teor de carbono fixo da amostra foi obtido por diferença, a partir da Eq. (2)

$$\%CF = 100 - (\%MV + \%Z) \quad (2)$$

Onde:

%CF: percentual de massa de carbono fixo;

%MV: percentual em massa de material volátil;

%Z: percentual em massa de cinzas.

4.6 Material volátil

O teor de voláteis é a parte do lodo que evapora como um gás por aquecimento, interferindo na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade, e conseqüentemente a ignição, ou seja, determinando a facilidade com que o lodo queima.

O teor do material volátil foi obtido através de uma amostra posta em um cadinho previamente pesado em uma mufla a 950 °C durante 7 minutos, de acordo com a norma ASTM E872-24. A amostra foi colocada na porta da mufla por 2 minutos e depois foi inserida no interior da mufla por 5 minutos. Em seguida, a porta foi aberta e o cadinho foi colocado para resfriar em cima de um bloco de tijolo à temperatura ambiente. Após resfriar, até deixar de ficar vermelho, o cadinho foi novamente pesado, e o teor de material volátil foi aferido e expressado em porcentagem. Nas Figuras 13 e 14 estão ilustradas as etapas executadas durante o processo da análise.

Figura 13 - Análise de material volátil contidos nas amostras de lodo.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

Figura 14 - Massa residual pós análise de material volátil nas amostras de lodo.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

A massa residual é calculada através da Eq. 3:

$$m_{residual} = m_{f(am+cap)} - m_{cap} \quad (3)$$

Onde:

$m_{residual}$ = massa residual;

$m_{f(am+cap)}$ = massa final;

m_{cap} = massa do cadinho;

A porcentagem de massa residual em relação à amostra inicial é através da Eq. 4:

$$X = \frac{m_{residual}}{m_{i(am)}} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

X: porcentagem de massa residual;

$m_{residual}$ = massa residual;

$m_{i(am)}$ = massa inicial da amostra;

E o percentual em massa de material volátil é calculado através da Eq. 5:

$$\%MV = 100 - X \quad (5)$$

Onde:

%MV: percentual em massa de material volátil;

4.7 Cinzas

O teor de cinzas é um importante parâmetro considerando a utilização do lodo para fins energéticos, pois uma menor geração de cinzas é importante para poupar trabalho com a disposição e/ou reutilização em processos subsequentes.

A análise do teor de cinzas foi realizado a partir de um cadinho previamente pesado, onde este cadinho vai para a mufla a 300°C para que seja feita a calcinação, então retira-se o cadinho e espera resfriar à temperatura ambiente, em seguida pesa-se cada amostra quantificada em aproximadamente 1,000g de massa de amostra do lodo, leva-se o cadinho novamente à mufla, agora à temperatura de 575°C por 2 horas, de acordo com a norma ASTM E1755-01. Na Figura 15 estão ilustradas algumas das etapas da análise de cinzas.

Figura 15 - Análise de cinzas das amostras de lodo.



Fonte: Acervo do autor, 2024.

A massa de cinzas foi obtida através da Eq. 6:

$$m_{cinzas} = m_{f(am+cap)} - m_{cap} \quad (6)$$

Onde:

m_{cinzas} = massa de cinzas;

$m_{f(am+cap)}$ = massa da amostra adicionada ao cadinho;

m_{cap} = massa do cadinho;

Após conhecer a massa de cinzas de cada amostra, então foi calculado do teor de cinzas através da Eq. 7:

$$\%Z = \frac{m_{cinzas}}{m_{i(am)}} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

$\%Z$: porcentagem em massa de cinzas;

m_{cinzas} = massa de cinzas;

$m_{i(am)}$ = massa inicial da amostra.

4.8 Termogravimetria

A termogravimetria acompanha a variação da propriedade física “massa”, de uma amostra em função do tempo com a temperatura constante, ou em função da temperatura (CAVALHEIRO et al., 1995). Permitindo identificar as variações de massa que ocorrem no material devido à volatilização de componentes, decomposição, reação de oxidação e redução, entre outros processos (ALVES, 2019). Por outro lado, a termogravimetria derivada (DTG), é o arranjo matemático, no qual a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo (DENARI, 2012).

As análises de termogravimetria foram realizadas utilizando o equipamento Discovery SDT-650 (TA Instruments, EUA) usando cadinhos selados de alumina. As massas das amostras foram de aproximadamente 13 mg e utilizando de uma taxa de aquecimento de $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, fluxo de nitrogênio de $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e faixa de temperatura partindo da temperatura ambiente do laboratório até 1020°C .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise imediata

Na Tabela 1 encontram-se os resultados obtidos na análise imediata, poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

Tabela 1: Análise imediata e poder calorífico das amostras de lodo.

Amostra	Teor de Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Carbono Fixo (%)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
1	12,63	40,17	39,41	20,42	16,48	16,05
2	12,37	39,89	39,24	20,87	18,1	17,67
3	9,88	35,26	39,84	24,9	17,65	17,22

Fonte: O autor, 2024.

5.1.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado no lodo após uma semana de secagem à luz solar e antes da secagem na estufa.

Observando os valores representados na Tabela 1, a amostra 3 foi a que obteve a menor umidade dentre as 3 amostras, sendo 9,88% o teor de umidade, apresentando uma maior viabilidade para fins energéticos, pois são preferíveis para esta finalidade. Já as outras 2 amostras, 1 e 2, as umidades bem mais próximas, com apenas 0,26% de teor de umidade de diferença, ainda acima dos 12% em ambas as amostras. Esta menor umidade por ter sido causada devido à operação do filtro prensa, pois o operador do turno pode ter usado um tempo maior de secagem com ar comprimido antes de descarregar o filtro prensa.

5.1.2 Teor de cinzas

A partir dos resultados do teor de cinzas apresentados na Tabela 1, percebe-se que a amostra 3 também apresentou a menor percentagem, com apenas 35,26%, com as outras 2 amostras variando em menos de 1%. Segundo Borges *et al.* (2008) o teor de cinzas é um importante parâmetro considerando a utilização do lodo para fins energéticos, pois uma menor geração de cinzas é importante para poupar trabalho com a disposição e/ou reutilização em processos subsequentes. O lodo do filtro prensa apresentou um teor de cinzas maior que o lodo da indústria de reciclagem de papel e celulose encontrado na literatura de 28,75% (HARUMI, I. 2010).

5.1.3 Teor de voláteis

O teor de voláteis das 3 amostras foram valores próximos, com a percentagem de 39%, variando pouco mais de 0,5% entre todas as amostras. Apesar do valor ser elevado, próximo dos 40%, ainda assim ficou atrás do lodo sanitário e lodo proveniente de indústria têxtil, com respectivos valores de 43,3% e 46,8% apresentado na pesquisa de Borges *et al.* (2008).

5.1.4 Carbono fixo

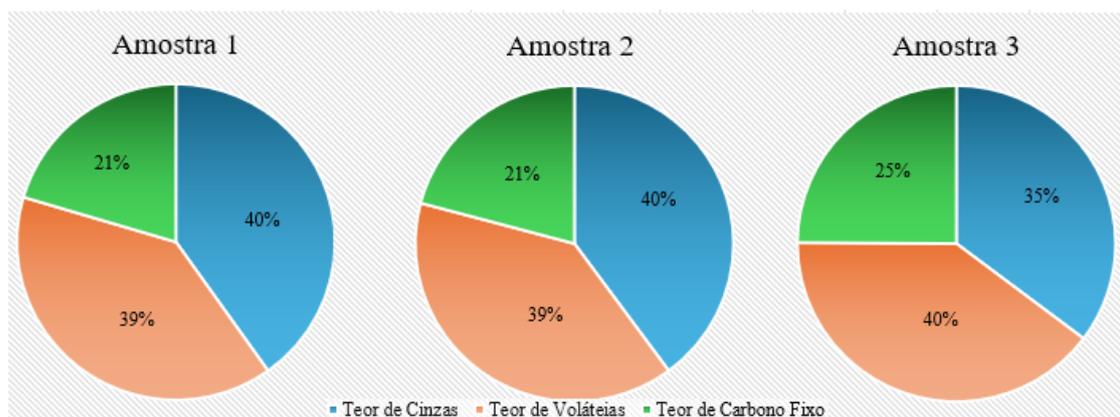
O carbono fixo, apresentado na Tabela 1, identifica a amostra 1 e 2 com valores próximos, com pouco mais de 20%. Por outro lado, o teor de carbono fixo observado na amostra 3 foi o maior, que é vantajoso, pois de acordo com De Sena (2005), um bom rendimento térmico na combustão está diretamente associado a uma elevada quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, visto que quanto maior o teor de hidrogênio e carbono, melhor será a sua eficiência combustão na liberação da energia.

5.1.5 Poder calorífico

Na análise de poder calorífico, a amostra 2, apresentou o PCS na ordem de 18,1 MJ/kg, já as outras amostras geraram um PCS menor quando comparado ao da amostra 1, sendo 16,48 MJ/kg da amostra 1 e 17,65 MJ/kg. O lodo da estação de tratamento possui poder calorífico maior que o lodo doméstico de 14,89 MJ/kg (Santos, 2011) e ligeiramente menor que o lodo proveniente da indústria de papel e celulose, com o poder calorífico de 19,5 MJ/kg (Borges *et al.*, 2008).

Na Figura 16 pode-se observar e comparar através de gráficos as diferenças percentuais entre as 3 amostras nos teores de voláteis, cinzas e carbono fixo.

Figura 16 - Gráficos comparativos do teor voláteis, cinzas e carbono fixo das amostras de Lodo.

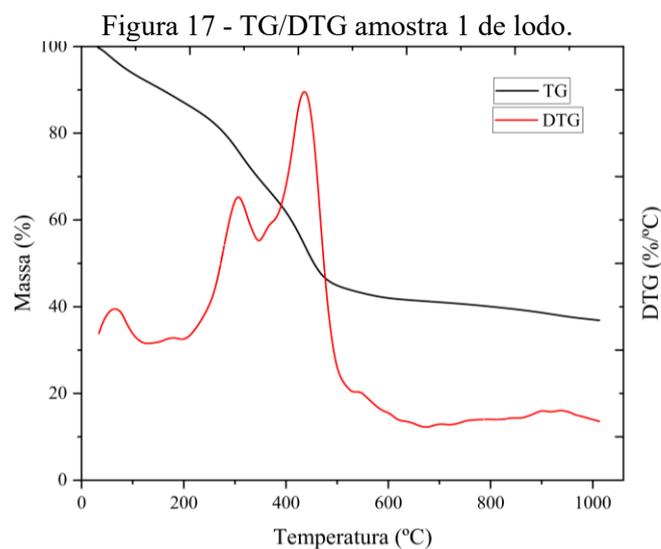


Fonte: O autor, 2024.

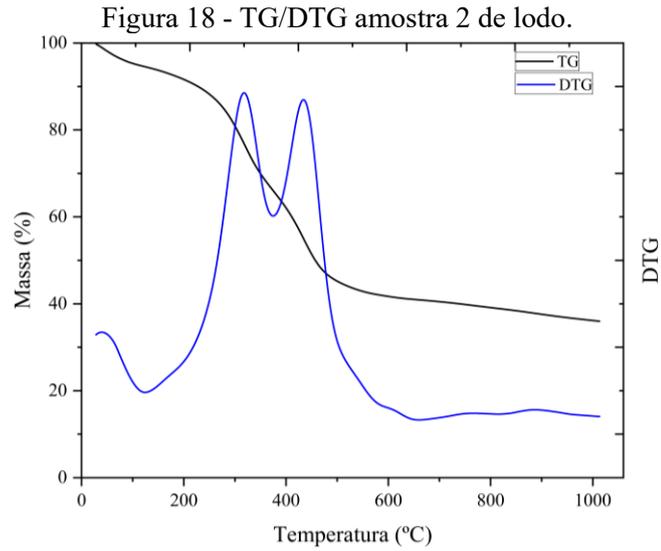
5.2 Termogravimetria

Os resultados das análises termogravimétricas das amostras do lodo estão ilustrados nas Figuras 17, 18 e 19. A taxa de degradação de massa é a curva TG e a curva derivada da perda de massa é a DTG.

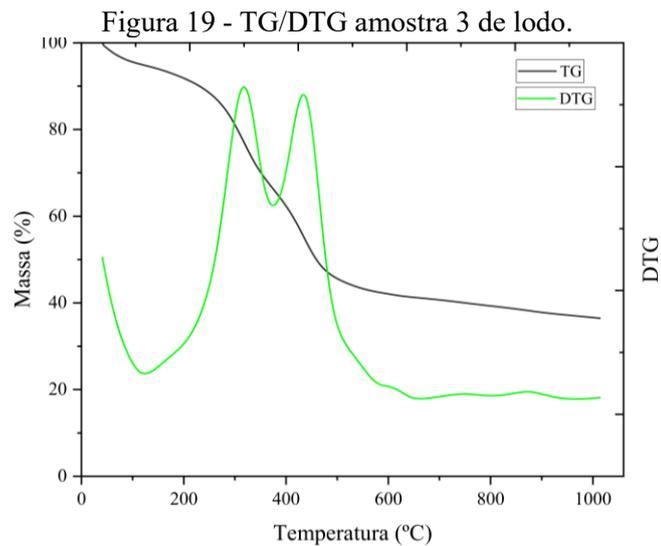
De acordo com a literatura, o lodo pode ser dividido em três estágios principais na curva de TG. Segundo Yang *et al.* (2019) o primeiro estágio da perda de massa que acontece na faixa de temperatura de 25°C a 150°C, está associado, principalmente, à evaporação da umidade. A segunda etapa inicia em 150°C até 550°C, onde ocorre a maior degradação da massa, e é devido a decomposição de compostos de fácil decomposição, como lipídios, carboidratos e outros presentes na matéria orgânica, que são transformados em matérias voláteis como gases de pequenas moléculas (CO, CH₄) e outros intermediários, assim definido por Cagnon *et al.* (2009) e Yang *et al.* (2019). O terceiro e último estágio final foi, provavelmente, associado à decomposição de sais metálicos no lodo de 550° a 1000°C (Wang *et al.*, 2017).



Fonte: O autor, 2024.



Fonte: O autor, 2024.



Fonte: O autor, 2024.

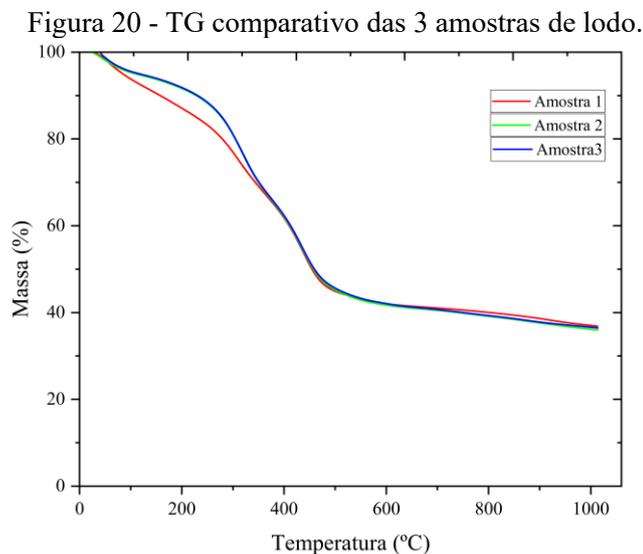
Analisando o termograma da Figura 17 pode-se observar que conforme ocorre o aumento da temperatura, a massa da amostra tende à degradação. Observando a curva de TG, nota-se uma perda de massa elevada, em torno de 60%, ao final da análise. O primeiro pico tem o seu ponto máximo em aproximadamente 60 °C e perdurando até 100 °C, correspondente à perda de umidade em aproximadamente 7% de massa. A segunda e terceira região de decomposição térmica ocorrem na faixa de temperatura 300-600 °C, os máximos em aproximadamente 300 °C e 430 °C, com uma perda percentual de massa de aproximadamente

15% e 27%, respectivamente. Após passar dos 800°C a massa é constante, restando apenas as cinzas do material.

Na Figura 18, correspondente à amostra 2, o primeiro pico tem o seu máximo aos 41 °C proveniente da desidratação, e sendo estendido até aproximadamente os 100 °C, com a perda de massa aproximada de 5%. O segundo e terceiro pico estão na faixa de temperatura de 200-600 °C, com os máximos em aproximadamente 320 °C e 430 °C, com as respectivas perdas de massas percentuais em 30% e 24%, que são correspondentes à perda de matéria orgânica. Ao passar dos 700 °C a variação da massa já é quase nula, restando apenas as cinzas do material.

Observando a Figura 19, não é possível visualizar com nitidez o ponto de máximo do primeiro pico, pois a análise teve o seu início após a máxima degradação da massa correspondente à desidratação da amostra, sendo 4% a massa de umidade presente. No segundo pico a amostra perdeu 29% da sua massa e no terceiro pico 26%. No gráfico os máximos foram de 320 °C e 440 °C, provenientes da degradação da matéria orgânica. A amostra continuou perdendo massa até atingir a marca de 36% na temperatura final de 1020 °C.

O gráfico das 3 análises de termogravimetria está compilado na Figura 20.



Fonte: O autor, 2024.

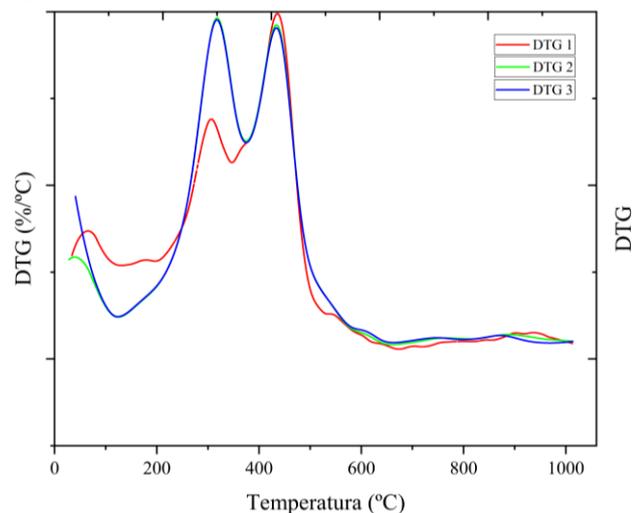
Por meio do gráfico comparativo, pode-se observar que a TG das amostras 2 e 3 estão praticamente sobrepostas, com um comportamento idêntico na perda de massa com o aumento

da temperatura. Já a amostra 1 apresenta um comportamento semelhante na decomposição da massa ao das outras amostras.

Todas as 3 amostras apresentam uma decomposição máxima semelhantes ao teor de cinzas da análise imediata. Ao final na termogravimetria, na temperatura de 1020°C as cinzas correspondentes às amostras 1, 2 e 3 são, respectivamente, 37,66 %, 36,46% e 35,99%. De acordo com Furtado *et al.* (2010), as cinzas presentes na biomassa são consideradas como incombustíveis ou a fração inerte da amostra e podem efetivamente reduzir o poder calorífico.

Para uma melhor visualização da análise de DTG das 3 amostras, também foram colocadas em um único gráfico, identificado na Figura 21.

Figura 21 - DTG comparativo das 3 amostras de lodo



Fonte: O autor, 2024.

Assim como na Figura 20, a Figura 21 evidencia comportamento idênticos das amostras 2 e 3, podendo ser diferenciadas apenas no início, aos 35°C e ao final após os 750 °C. Contudo, a amostra 1 mostra um comportamento semelhante, com a decomposição em faixas próximas de temperatura, porém, com máximos diferentes.

A estação de tratamento é operada por cinco pessoas diferentes, em turnos distintos. Embora todos tenham recebido o mesmo treinamento, cada um trabalha de maneira individual. A dosagens de produtos químicos é feita de acordo com as características do efluente. Fatores como purgas nos tanques de cola, de soda cáustica e a campanha de garrafas em processamento, são determinantes na característica do efluente. Na campanha incolor, são tratadas garrafas degradadas, com resíduos de óleo e saneantes; na campanha verde, predominam garrafas de água sanitária e refrigerante; e na campanha azul, a maioria das garrafas é de água, apresentando

pouca matéria orgânica. Esses fatores podem ter influenciado as características do lodo gerado pelo filtro prensa.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nas análises pode-se concluir que o lodo oriundo do processo de reciclagem de PET possui características favoráveis para o seu reaproveitamento em processos térmicos, podendo também ser reutilizado para fins agrícolas, por possuir um alto teor de matéria orgânica, de aproximadamente 50%, de acordo com as análises de termogravimetria. Contudo, é necessário um aprofundamento nas análises da composição química do lodo para o uso como fertilizante.

Diante dos resultados das análises realizadas, as amostras apresentaram a média de cinzas de $38,44\% \pm 2,76$, média de teor de voláteis de $39,50\% \pm 0,31$, média de teor de carbono fixo de $22,10\% \pm 2,47$ e PCS de $17,41\% \pm 0,84$. Nas análises de TG e DTG pode-se observar o teor de umidade média em 5,3% e 50,3 % de indícios de matéria orgânica.

Dentre as amostras analisadas, a amostra 3 possui os melhores resultados para processos de combustão, mesmo que com uma diferença percentual sutil. A menor porcentagem de cinzas na análise imediata (confirmada na TG), o maior teor de voláteis e poder calorífico maiores. Destaca a sua maior viabilidade para a utilização em processos de combustão.

A variação nos resultados das amostras de lodo do filtro prensa pode ser atribuída às características do material que está sendo processado na linha de reciclagem, à dosagem de produtos químicos, ao efluente tratado e ao operador que está trabalhando no setor.

O lodo oriundo da reciclagem de PET apresenta potencial para ser utilizado como fonte alternativa e renovável de energia. A investigação de novas fontes energéticas proveniente de resíduos é crucial para diminuição do descarte de material rico em importantes propriedades. O conhecimento específico e adequado dos resíduos pode mitigar a extração de recursos naturais para suprimento energético.

7 REFERÊNCIAS

ABIPET. **Infográfico: 12º Censo da Reciclagem no Brasil**. 2022. Disponível em: https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil- Novembro_2022.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. Resíduos Sólidos: Classificação. 2. ed. Rio de Janeiro -RJ: ABNT, 2004, 71 p.

ALVES, A.C.F. *et al.* **Environtal Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24850–24862, aug. 2019

ANDREOLI, C. V. **Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto**. SANEPAR, 1998.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Ash in Biomass. ASTM E1755-24, West Conshohocken, PA, USA; 2015.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM E872-24, West Conshohocken, PA, USA; 2024.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM D5865/D5865M-19, West Conshohocken, PA, USA; 1996.

AVELAR, N. V. R *et al.* **Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste**. *Renewable Energy*, v. 91, p. 417-424, 2016.

BASTIAN, E. Y. O.; ROCCO, J. L. S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil – série P+L**. São Paulo: CETESB; SINDITÊXTIL 85 p., 2009.

BORGES, F.; SELLIM, N.; MEDEIROS, S. H. W. **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia.** *Ciência & Engenharia*, n. 17, v. 27, 2008.

CAGNON, B. *et al.* **Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors.** *Bioresource Technology*, v.100, n.1, p.292–298, 2009
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.009>

CASTRO, A. L. F. G. *et al.* **Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014.** *Multi-Science Journal*, v. 1, n. 2, p. 66-73, 2015.

CAVALHEIRO, E. T. G. *et al.* **A influência de fatores experimentais nos resultados de análises termogravimétricas.** *Química nova*, fev. 1995.

CHAGAS, W. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro.** 2000. 142 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública)- Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2000.

CORREIA, E. F. **Projeto de Lei nº 418/11 de 16 de fevereiro de 2016.** Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=854999. Acesso em: 25 out. 2024.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, É. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica.** São Carlos: IQSC, p. 40, 2012

DRAEGER, A. *et al.* **Aproveitamento do lodo têxtil na produção de briquetes para geração de energia térmica.** *Revista de Estudos Ambientais*, v. 23, n. 1, p. 46–56, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2021v23n1p46-56>. Acesso em: 26 out. 2024.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. **Produção e características dos biossólidos.** *In: Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.* Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

TERA AMBIENTAL. **Entenda os processos de tratamento de lodo líquido e lodo sólido.** 2020. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/entenda-os-processos-de-tratamento-de-lodo-liquido-e-lodo-solido>. Acesso em: 15 ago. 2024

FILTRO PRENSA. Grabe – Equipamentos industriais, 2024. Disponível em: <https://www.grabe.com.br/produto/filtro-prensa/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

FOELKEL, C. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto** - KVAERNER PULPING Industries and Process Pulp and Paper. 2010 www.akerkvaerner.com. Acesso em: 20 set. 2024.

FURTADO, T. S. *et al.* **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

GILENO, L. A. **Avaliação do Ciclo de Vida da reciclagem de garrafas PET em contexto brasileiro: rotas B2B (bottle-to-bottle) e B2F (bottle-to-fiber).** 2020. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2020.

HARUMI, M. I. **Aproveitamento energético do lodo de ETEI de indústria de papel no município de Correia Pinto/SC.** Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124491/204.pdf?sequence=1>. Acesso em: 30 set. 2024.
<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9C6HB5>

IMHOFF, K; IMHOFF, K. R. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias.** 26 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1986. 301 p.

IWAKI, G. **Destinação final de lodos de ETAs e ETEs.** Portal tratamento de Água, 19/05/2018. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-etes/>. Acesso em: 01 ago. 2024.

KEMP, J. **Just the Facts on Dewatering Systems**. Water Environment & Technology, v. 9 n.12, p. 47-54, 1997. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/24666482>. Acesso em 07 ago. 2024.

LEITE, W. P. **Recuperação e recirculação de água no processamento mineral**, 2011. 58 p. Monografia de especialização - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACHADO, R. **Comissão aprova percentual mínimo de PET reciclado em garrafas**. Câmara dos deputados, 18/05/2022. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/876748-comissao-aprova-percentual-minimo-de-pet-reciclado-em-garrafas/>. Acesso em: 12 out. 2024.

METCALF, B.; EDDY, I. N. C. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991. p. 765-926.

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**, 1998. 425p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel** - Estudo de Caso. 2003. 321 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica de Sanitária) Universidade de São Paulo USP, São Paulo, 2003.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel: estudo de caso**. 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Acesso em: 06 out. 2024.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts, An analysis of European plastics production**, 129 demand and waste data. [s.l: s.n.].

SISINNO, C. L. S., 2003. **Disposição em aterros controlados de resíduos sólidos industriais não-inertes: avaliação dos componentes tóxicos e implicações para o ambiente e para a saúde humana.** Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 369-374, 2003.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V. FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 1ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. . **A tecnologia da reciclagem de polímeros.** Química Nova, [s.l.], v. 28, n. 1, p.65-72, fev. 2005. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000100014>.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2019/904 do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 5 de junho de 2019. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0904>. Acesso em: 26 out. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Process design manual for sludge treatment and disposal**, Washington: EPA, Sep. 1979.

YANG, B. et al. **Evaluation of activated carbon synthesized by one-stage and two-stage co-pyrolysis from sludge and coconut shell.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v170, p722–731, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.130>

ZAMORA, A. M. *et al.* **Atlas do plástico: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos.** Fundação Heinrich Böll. ISBN / DOI 978-65-87665-02-3. Novembro. 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/atlas-do-plastico>. Acesso em 09 set. 2024.

ANEXO A



Gradamento (1)



Calha Parshall (2)



Tanque de captação 1 (3)



Centífuga e desarenador (4)



Transportadora de lama redler (5)



Tanque de captação 2 (6)



3 decantadores em série (7)



Reatores em série (8)



Adição de HCl – reator 1 (9)



Adição de coagulante – reator 2 (10)



Adição de polímero aniônico – reator 3 (11)



Decantador lamelar (12)



Calha de purga de lodo decantador lamelar (13)



Calha de purga de lodo decantadores em série (14)



Tanque de preparação de lodo (15)



Filtro prensa (16)