



**INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS PALMEIRA DOS INDIOS  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOZELITA MARIA DOS SANTOS NETA**

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DA ESTAÇÃO  
DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) DA CIDADE DE ARAPIRACA - AL COM  
PERSPECTIVA DE APLICAÇÃO EM TIJOLOS CERÂMICOS**

**PALMEIRA DOS ÍNDIOS - AL**

**2024**

JOZELITA MARIA DOS SANTOS NETA

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) DA CIDADE DE ARAPIRACA - AL COM  
PERSPECTIVA DE APLICAÇÃO EM TIJOLOS CERÂMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Engenharia Civil como requisito parcial, para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sheyla Karolina  
Justino Marques.

PALMEIRA DOS ÍNDIOS - AL

2024



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**Instituto Federal de Alagoas**  
*Campus Maceió*  
*Biblioteca Benevides Monte*

---

624.183  
S237a

Santos Neta, Jozelita Maria dos.

Análise das características físico-químicas do lodo da estação de tratamento de água (ETA) da cidade de Arapiraca-AL com perspectiva de aplicação em tijolos cerâmicos {recurso eletrônico} / Jozelita Maria dos Santos Neta. - Dados eletrônicos (1 arquivo : 112 KB). - 2024.

Documento com 56 folhas : il. Inclui referências.

Orientação: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Sheyla Karolina Justino Marques.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, Campus Palmeira dos Índios, 2024.

1. Lodo da ETA. 2. Tratamento de água. 3. Tijolo cerâmico. I. Título.

---

Bibliotecária Nalva Maria Amaral / CRB-4/989

JOZELITA MARIA DOS SANTOS NETA


ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) DA CIDADE DE ARAPIRACA - AL COM  
PERSPECTIVA DE APLICAÇÃO EM TIJOLOS CERÂMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC),  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Engenharia Civil como requisito parcial, para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Aprovado em: 12 / 10 / 2024.


Conceito Obtido: 10

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 SHEYLA KAROLINA JUSTINO MARQUES  
Data: 16/10/2024 07:59:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Sheyla Karolina Justino Marques (Orientadora)  
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Documento assinado digitalmente  
 SAMANTHA FERREIRA MENDONÇA DE OLIVEIRA  
Data: 18/10/2024 10:59:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Ma. Samantha Ferreira Mendonça de Oliveira  
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Documento assinado digitalmente  
 TAISA MENEZES TENÓRIO  
Data: 17/10/2024 09:10:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Taisa Menezes Tenório  
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Dedico este trabalho aos meus pais, que,  
sob muito sol, me fizeram chegar até aqui, na  
sombra.

“Até aqui o Senhor nos ajudou.”

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado ao longo desta trajetória, concedendo-me sabedoria e ânimo para persistir. Atribuo ao Senhor toda honra e glória por esta conquista.

Aos meus amados pais, Salete e Francisco, agradeço por todo o apoio e compreensão ao longo deste processo. Obrigada por me permitirem sonhar e por darem as condições necessárias para concretizar este sonho. Sem vocês, nada teria sido possível.

Ao meu esposo e parceiro, Kaleb Barros, que esteve ao meu lado e me incentivou durante todo o percurso, agradeço pelo amor, paciência e apoio incondicional. Sua presença e encorajamento foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos, Rita e Carlos André, agradeço pelo apoio constante e pela motivação. A presença e o incentivo de vocês foram essenciais para que eu superasse os desafios e alcançasse esta realização.

Aos meus amigos de faculdade, que levarei para a vida, em especial Mariana, Vitória (“Civil”), Camila, Luiz, Júlio, Vinícius, Nicollas, Vitória (“Elétrica”) e Mirelle, agradeço por tornarem o curso mais leve, especialmente nas edições de “Amigo Secreto”. Agradeço também à minha amiga e irmã Maria Clara pelo auxílio e incentivo.

Aos times de Engenharia, Tratamento e Sustentabilidade, representados por Eduardo, Rogério e Érika, agradeço pelo suporte e pela disponibilização do subproduto analisado nesta pesquisa. A colaboração e o auxílio de todos foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

À professora orientadora, Dra. Sheyla Marques, pelo suporte e orientação ao longo deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram essenciais para a conclusão desta pesquisa, obrigada.

Agradeço a todos os docentes do corpo acadêmico do Instituto Federal de Alagoas que contribuíram ao longo da graduação com seus conhecimentos e ensinamentos.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para o encerramento deste ciclo, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

O tratamento de água resulta na geração de lodo, representando um desafio ambiental significativo. No entanto, observa-se que esse subproduto apresenta propriedades que o tornam adequado para ser utilizado em outras cadeias produtivas, especialmente na indústria da construção civil. Nesse contexto, este trabalho consiste na análise das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada no município de Arapiraca-AL, com o objetivo de caracterizar o lodo para sua potencial aplicação na produção de tijolos cerâmicos, visando promover uma cadeia de ciclo fechado. A metodologia adotada neste estudo baseia-se na caracterização experimental da matéria-prima por meio de ensaios de granulometria, limite de liquidez, plasticidade, fluorescência de Raios X e difração de Raios X, além de análise termogravimétrica. Os resultados indicaram que o lodo é classificado como agregado miúdo, com predominância de composição granulométrica média e fina. Adicionalmente, o subproduto foi caracterizado como não plástico. Na análise química do passivo ambiental, identificou-se a presença de componentes químicos fundentes, tais como  $K_2O$  (4,52%),  $CaO$  (1,86%) e  $MgO$  (0,15%). Esses compostos químicos possuem características fundentes que podem reduzir o tempo e a temperatura de sinterização dos materiais cerâmicos, quando em contato com os agentes formadores de fase vítrea. Além disso, os percentuais mais relevantes de sílica (53,50%) e alumínio (28,74%) foram identificados na forma de quartzo e caulinita, ratificando os resultados obtidos por meio de fluorescência de Raios X. Na análise térmica, registrou-se uma perda de massa em torno de 42% até a temperatura de 400°C. Por fim, é importante destacar o potencial de utilização do lodo da ETA como matéria-prima alternativa à luz da economia circular no setor da construção, o que poderá contribuir para a mitigação de impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Economia circular; Lodo de ETA; Subproduto.

## ABSTRACT

Water treatment results in the generation of sludge, representing a significant environmental challenge. However, it is observed that this byproduct has properties that make it suitable for use in other production chains, especially in the construction industry. In this context, this work consists of analyzing the physical, chemical, and mineralogical properties of sludge from the Water Treatment Plant (WTP) located in the municipality of Arapiraca-AL, with the aim of characterizing the sludge for its potential application in the production of ceramic bricks, aiming to promote a closed-loop cycle. The methodology adopted in this study is based on the experimental characterization of the raw material through tests for granulometry, liquid limit, plasticity, X-ray fluorescence, and X-ray diffraction, in addition to thermogravimetric analysis. The results indicated that the sludge is classified as fine aggregate, with a predominance of medium and fine particle size distribution. Additionally, the byproduct was characterized as non-plastic. In the chemical analysis of the environmental liability, the presence of fluxing chemical components such as  $K_2O$  (4,52%),  $CaO$  (1,86%), and  $MgO$  (0,15%) was identified. These chemical compounds have fluxing characteristics that can reduce the time and temperature of ceramic material sintering when in contact with agents forming a vitreous phase. Furthermore, the most relevant percentages of silica (53,50%) and aluminum (28,74%) were identified in the form of quartz and kaolinite, corroborating the results obtained through X-ray fluorescence. In the thermal analysis, a mass loss of around 42% was recorded up to a temperature of 400°C. Finally, it is important to highlight the potential use of WTP sludge as an alternative raw material in light of the circular economy in the construction sector, which could contribute to mitigating environmental impacts.

**Keywords:** Circular economy; WTP sludge; byproduct.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Limites de liquidez e plasticidade do lodo .....	45
Tabela 2 – Fluorescência de Raios X do lodo de ETA.....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de atendimento total de água.....	22
Figura 2 – Processo de tratamento da água convencional.....	23
Figura 3 – Etapas do tratamento de água convencional.....	23
Figura 4 – Aplicação de coagulante na calha Parshall.....	25
Figura 5 – Floculadores.....	26
Figura 6 – Decantadores.....	26
Figura 7 – Filtros.....	28
Figura 8 – Classificação da filtração no tratamento das águas de abastecimento.....	28
Figura 9 – Desinfecção.....	30
Figura 10 – Fluoretação.....	31
Figura 11 – Adensador.....	32
Figura 12 – Desidratação do lodo.....	33
Figura 13 – Destinação final dado ao lodo pelos municípios.....	34
Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental.....	35
Figura 15 – ETA Arapiraca.....	36
Figura 16 – Fluxograma do tratamento de água da cidade de Arapiraca – AL.....	37
Figura 17 – Fluxograma da geração e tratamento do lodo.....	38
Figura 18 – Adensador de lodo.....	38
Figura 19 – Desidratação do lodo.....	39
Figura 20 – Composição granulométrica.....	40
Figura 21 – Limite de Liquidez e Plasticidade do lodo.....	41
Figura 22 – Análise granulométrica do lodo.....	44
Figura 23 – Difractometria de Raios X.....	47
Figura 24 – Análise Térmica do lodo de ETA.....	48

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%	Porcentagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
ANA	Agência Nacional de Águas
ATG	Análise Termogravimétrica
Br	Bromo
CaO	Óxido de Cálcio
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimetria Derivada
ETA	Estação de Tratamento de Água
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro III
FRX	Fluorescência de Raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MgO	Óxido de Magnésio
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira
ND	Não determinado
NP	Não Plástico
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Policloreto de Alumínio ou Cloreto de Polialumínio

PH	Potencial Hidrogeniônico
Rb <sub>2</sub> O	Óxido de Rubídio
SAA	Sistema Adutor do Agreste
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Enxofre
SrO	Óxido de Estrôncio
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Vanádio
ZnO	Óxido de Zinco
ZrO <sub>2</sub>	Óxido de Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
4.1	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	21
4.2	PROCESSO DE TRATAMENTO DA ÁGUA CONVENCIONAL .....	22
<b>4.2.1</b>	<b>Etapa 01: Coagulação.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Etapa 02: Floculação .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Etapa 03: Decantação .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Etapa 04: Filtração .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Etapa 05: Desinfecção.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Etapa 06: Fluoretação .....</b>	<b>30</b>
4.3	GERAÇÃO DE SUBPRODUTOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	31
<b>4.3.1</b>	<b>Destinação final do lodo .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
5.1	COLETA E PREPARAÇÃO DO SUBPRODUTO .....	35
<b>5.1.1</b>	<b>Coleta e preparação .....</b>	<b>35</b>
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO .....	39
<b>5.2.1</b>	<b>Análises físicas.....</b>	<b>39</b>
5.2.1.1	Análise granulométrica .....	39
5.2.1.2	Limite de liquidez e plasticidade .....	40

<b>5.2.2</b>	<b>Análises Químicas.....</b>	<b>41</b>
5.2.2.1	Fluorescência de Raios X (FRX).....	41
5.2.2.2	Difração de Raios X (DRX).....	42
5.2.2.3	Análise Termogravimétrica (ATG).....	43
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO.....	44
<b>6.1.1</b>	<b>Análise granulométrica.....</b>	<b>44</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Limite de liquidez e plasticidade.....</b>	<b>45</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Fluorescência de Raios X (FRX).....</b>	<b>45</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Difração de Raios X (DRX).....</b>	<b>47</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Análise Termogravimétrica (ATG).....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Di Bernardo (2017), a água é componente fundamental para a subsistência de todas as formas de vida e desempenha papel crucial no progresso da sociedade. Nessa perspectiva, conforme exposto na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Nº 9.433 de 1997, a água é reconhecida como recurso natural limitado, dotado de valor econômico e designado como bem de domínio público.

Diante desse contexto, destaca-se que o consumo de água no Brasil está em ascensão, com um aumento estimado de cerca de 80% no total retirado nas últimas duas décadas e uma projeção de incremento de 24% na demanda até 2030 (ANA, 2019). Ainda de acordo com os dados fornecidos pela ANA (2019), em 2017 foram retirados aproximadamente 496,2 m<sup>3</sup>/s de água para o abastecimento urbano e 34,5 m<sup>3</sup>/s para o uso rural.

Os percentuais mencionados acima indicam uma elevada demanda de produção de água e, por conseguinte, implicam em melhorias no processo de tratamento e distribuição, com o intuito de assegurar o acesso à água potável. Em conjunto, esse processo também acarreta o aumento do resíduo, compreendido como subproduto advindo das perdas de processo do sistema de tratamento de água, gerando impactos ambientais, sobretudo nos casos em que o lodo é lançado *in natura* em corpos hídricos.

Para este trabalho é importante salientar que o conceito de subproduto se refere aos insumos resultantes da ineficiência de um processo produtivo e/ou de um sistema industrial, considerando o ciclo útil de desenvolvimento e uso dos produtos, no qual se encontram em um estado de depreciação, porém têm a capacidade de serem reinseridos em um novo fluxo de materiais e, assim, reintegrar-se ao sistema de produção original ou a um novo processo industrial (OLIVEIRA, 2022). Desse modo, o termo subproduto está vinculado aos princípios da economia circular.

Nesse sentido, o lodo é um subproduto intrínseco às etapas de tratamento de água, consistindo em um aglomerado de substâncias removidas da água durante o processo de torná-la adequada para o abastecimento público, cujas propriedades estão relacionadas tanto com o perfil característico do manancial, quanto com o tipo e a dosagem do coagulante empregado (OLIVEIRA e RONDON, 2016).

Segundo Oliveira (2016), uma ETA com capacidade de tratamento de 2400 L/s e operando em ciclo completo gera 1,8 toneladas por dia de lodo. Com base no supracitado autor, o Brasil produz anualmente 4 milhões de toneladas de lodo de ETA. Esses números destacam o considerável volume de lodo gerado, ressaltando a importância de um gerenciamento e disposição final ambientalmente adequados.

Em conformidade com a norma técnica brasileira NBR 10004:2004, intitulada Resíduos sólidos – Classificação, o lodo proveniente de estações de tratamento de água é classificado como um resíduo sólido não perigoso e não inerte, pertencente à classe IIA. Dessa maneira, sua destinação final adequada deve contemplar o reaproveitamento, seja no ciclo original ou em uma nova cadeia produtiva, visando reduzir os impactos ambientais e evitar danos ou riscos à saúde pública, conforme estabelecido na Lei 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Paralelamente, o tijolo cerâmico se destaca como um material amplamente empregado pelo setor da construção civil brasileiro, devido às características favoráveis em termos de isolamento térmico, resistência mecânica e durabilidade, tornando-o uma escolha viável para uma variedade de construções (SILVA, 2019). Sua fabricação envolve o uso de argila como matéria-prima, em um processo de conformação plástica e sinterização a elevadas temperaturas, conforme a NBR 15270-1 – Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Requisitos (ABNT, 2023).

Nessa abordagem, cabe evidenciar que o processo de fabricação de produtos cerâmicos perpassa pelas etapas de extração da matéria-prima, estocagem, extrusão, secagem e queima. Todavia, os impactos mais significativos sobre o meio ambiente são observados nas fases de remoção da argila e queima dos insumos. Essas práticas ocasionam o desequilíbrio ambiental, cujo principal impacto da extração da argila sobre o solo consiste na perda de fertilidade do solo e no aumento do escoamento superficial das águas, ocasionando também o depósito de sedimentos e a erosão (SANTOS *et al.*, 2017).

Alinhando os contextos apresentados, observa-se que a indústria da cerâmica vermelha demonstra capacidade de incorporar os subprodutos oriundos de outras atividades industriais em seu ciclo produtivo, especialmente, para este trabalho, provenientes das estações de tratamento de água. A integração de lodo no processo de fabricação de tijolos cerâmicos é benéfica para ambos os ciclos produtivos, dado que representa uma alternativa intrinsecamente

sustentável para o gerenciamento do lodo gerado no tratamento de água, ao mesmo tempo em que reduz a exploração de jazidas de argila, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais.

Reitera-se que na literatura é observada uma significativa quantidade de pesquisas com foco na incorporação de lodo na fabricação de tijolos, material refratário, pavimentação de estradas e na produção de cimentos (LIBÂNIO, 2010). Posto isto, Oliveira (2022) demonstrou viabilidade na produção de massas cerâmicas com adição de lodo, resultados análogos foram apresentados por Tartari *et al.* (2011) na fabricação de cerâmica vermelha através da inserção do lodo em misturas de argilas.

A partir da problemática do descarte de lodo de ETA e dos impactos ambientais resultantes da extração excessiva de argilas, desenvolveu-se a concepção deste trabalho, que consiste na análise das características físico-químicas do lodo da ETA da cidade de Arapiraca. Para isso, o subproduto foi submetido a ensaios de caracterização física, química, térmica e mineralógica, a fim de avaliar as propriedades pertinentes à adição em formulações para potencial incorporação na fabricação de tijolos cerâmicos.

## 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi estruturado em oito capítulos, com o propósito de evidenciar os tópicos abordados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Para tanto, adotou-se a seguinte organização:

**Capítulo 1 (INTRODUÇÃO)** – Intentou-se apresentar o assunto desenvolvido ao longo do trabalho, fundamentando-se na problemática da geração do lodo de ETA e na extração demasiada de jazidas de argila. Assim, foi compatibilizado os supracitados tópicos, evidenciando os aspectos relacionados à incorporação desse subproduto em materiais cerâmicos, com ênfase nos tijolos.

**Capítulo 2 (OBJETIVOS)** – Estabeleceu-se os principais objetivos do estudo, apresentando-os de maneira concisa, assim como os objetivos específicos esperados.

**Capítulo 3 (JUSTIFICATIVA)** – Discutiu-se a problemática relacionada à produção de lodo de ETA e sua gestão pelas empresas responsáveis pelo tratamento de água, estabelecendo uma conexão com os impactos ambientais decorrentes da extração de argila,

matéria-prima fundamental para a indústria cerâmica, dentro de uma perspectiva de economia circular.

**Capítulo 4 (REFERENCIAL TEÓRICO)** – Destacou-se o processo de tratamento de água, correlacionando-o com a geração do subproduto, bem como foi abordado o destino dado ao lodo, evidenciando o potencial de incorporação desse material em outras cadeias produtivas, em específico, para este trabalho, no setor da construção civil.

**Capítulo 5 (METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL)** – Abordam-se os processos adotados durante a pesquisa, abrangendo as etapas de caracterização física, química, mineralógica e térmica do subproduto.

**Capítulo 6 (RESULTADOS E DISCUSSÕES)** – Discutem-se os resultados obtidos ao longo da pesquisa, os quais são apresentados por meio de gráficos, tabelas e figuras, com o intuito de avaliar a influência do lodo de ETA na fabricação de tijolos cerâmicos. Para esta análise, foram empregados parâmetros das normas regulamentadoras e valores de referência da literatura.

**Capítulo 7 (CONCLUSÃO)** – Evidenciam-se os principais resultados obtidos, destacando a perspectiva do autor em relação ao que foi produzido e, dessa forma, conclui-se o trabalho.

**Capítulo 8 (SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS)** – Recomenda-se a incorporação do lodo de ETA em massas cerâmicas, utilizando diferentes proporções, para avaliar as propriedades dos produtos cerâmicos resultantes. Além disso, propõe-se submeter o material cerâmico contendo o passivo a diferentes ciclos de queima, visando analisar a formação de fases fundentes e a consequente redução da temperatura de sinterização.

**Capítulo 9 (REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS)** – Listam-se as referências utilizadas durante o desenvolvimento da pesquisa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Analisar as características físico-químicas, térmicas e mineralógicas do lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) situada no município de Arapiraca, com o intuito de incorporá-lo parcialmente em substituição à argila na produção de tijolos cerâmicos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar o lodo através de ensaios físicos de granulometria, limites de liquidez e plasticidade;
- Realizar as análises de fluorescência de Raios X (FRX), difração de Raios X (DRX) e análise termogravimétrica (ATG) do lodo de ETA.

### 3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Tsutiya (2006), os sistemas de abastecimento de água desempenham um papel fundamental na redução de doenças infecciosas, uma vez que ao torná-la potável, proporcionam diversos benefícios à saúde, prevenindo a contaminação das pessoas. Dessa forma, é notório que o acesso à água proporciona aos indivíduos de todos os estratos sociais as mesmas oportunidades de higiene, conforto e bem-estar, refletindo na redução da demanda por serviços de saúde.

Nessa abordagem, destaca-se que o abastecimento de água perpassa por vários procedimentos até chegar ao consumidor final, com o intuito de adequá-la aos padrões de potabilidade. Assim, as ETAs convencionais realizam as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, que, em conjunto, são responsáveis pela remoção das impurezas presentes na água. No entanto, durante o processo de tratamento da água, uma quantidade significativa de subproduto, denominado lodo de ETA, é gerada.

A gestão final desse passivo ambiental é um desafio significativo tanto para as empresas de saneamento quanto para o Estado, devido aos altos custos relacionados ao tratamento do lodo e ao seu descarte em aterros e corpos hídricos, que pode ocasionar a contaminação da água, dada a presença de metais pesados (GOMES *et al.*, 2019).

Em paralelo, encontra-se o contexto da indústria da cerâmica vermelha, a qual utiliza a argila como matéria-prima. Conforme Oliveira (2022), o processo de extração da argila é realizado, por vezes, de maneira inadequada, resultando em impactos ambientais adversos. Além disso, observa-se que as empresas do setor cerâmico buscam implementar novas tecnologias que aprimorem as propriedades dos artefatos cerâmicos.

Diante do exposto, é notável que este trabalho poderá auxiliar o setor responsável pelo tratamento de água ao oferecer uma alternativa sustentável para o subproduto gerado, contribuindo assim para a mitigação dos impactos ambientais. Além disso, o lodo de ETA apresenta-se como uma alternativa viável para as indústrias cerâmicas reduzirem a exploração de argila, assim como aprimorarem as características finais dos materiais, o que pode ser potencializado pela incorporação dos elementos fundentes presentes nesse subproduto.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

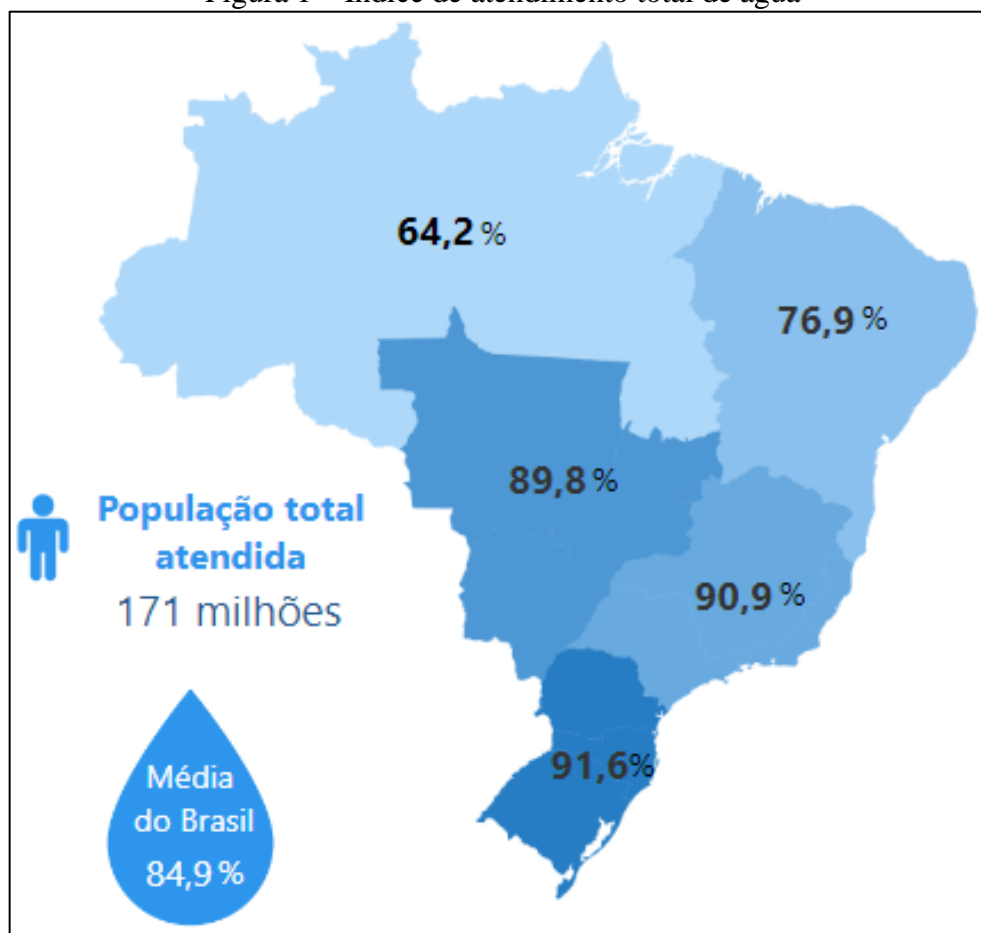
Desde os primórdios das civilizações, foram implementados processos visando à desinfecção da água, embora os princípios subjacentes permanecessem desconhecidos. Nessa perspectiva, conforme discutido por Ferreira Filho (2017), a concepção das atuais Estações de Tratamento de Água (ETA) é resultado de um extenso conjunto de avanços empíricos e científicos. Esse autor também fornece um relato da evolução histórica do saneamento, delineando as trajetórias que contribuíram para as práticas contemporâneas.

4000 a.C. – Relatos em sânscrito e em grego recomendavam que as “águas impuras” deveriam ser submetidas à fervura, expostas ao sol ou filtradas em leitos de areia antes de seu consumo. 1500 a.C. – São apresentados em algumas gravuras egípcias artefatos confeccionados artesanalmente com a finalidade de possibilitar a separação de sólidos presentes em águas empregadas para consumo. 500 a.C. – Considerado o pai da medicina, Hipócrates observou que as águas de chuva deveriam ser fervidas antes do seu consumo. Também se relata que ele teria notado que as águas tenderiam a se distinguir umas das outras por apresentarem características organolépticas distintas e outras qualidades. 300 a.C. a 300 d.C. – engenheiros romanos criaram os primeiros sistemas públicos para abastecimento de água e os grandes aquedutos. (...) 1829 – Os primeiros filtros lentos de areia são instalados na cidade de Londres (no Reino Unido) por intermédio de James Simpson (*Chelsea Water Works Company*). (FERREIRA FILHO, 2017, p.1).

Diante desse contexto, nota-se que o processo de tratamento de água é inerente ao desenvolvimento da sociedade, cujo aprimoramento buscou assegurar os padrões de qualidade, atualmente referidos como requisitos de potabilidade. Assim, consoante à NBR 12216:1992 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público (ABNT, 1992), entende-se por ETA o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade.

Em complemento, é válido ressaltar que o acesso à água potável e ao saneamento básico constitui um direito humano essencial, fundamental e universal, indispensável à vida com dignidade e reconhecido pela ONU como “condição para o gozo pleno da vida e dos demais direitos humanos” (Resolução 64/A/RES/64/292, de 28/07/2010). Todavia, segundo dados de 2022 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), somente 84,9% dos brasileiros possuíam acesso ao serviço de abastecimento de água (Figura 1).

Figura 1 – Índice de atendimento total de água



Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 2022.

Nota-se que o abastecimento de água nas regiões Norte e Nordeste apresenta os menores percentuais (64,2% e 76,9%, respectivamente), indicando déficits no sistema de saneamento e, conseqüentemente, a não satisfação dos direitos fundamentais. Nesse contexto, o acesso à água potável é uma questão a ser resolvida, devido aos riscos que sua ausência ou fornecimento inadequado podem causar à saúde pública (OLIVEIRA, 2022).

#### 4.2 PROCESSO DE TRATAMENTO DA ÁGUA CONVENCIONAL

Consoante à Lei Nº 11.445, que institui as diretrizes nacionais e a política federal para o saneamento básico, considera-se por saneamento o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais destinados ao abastecimento de água potável. Assim, o sistema de atividades que viabiliza o provimento de água é composto por captação, adução e tratamento de água bruta, adução e reservação de água tratada, como evidenciado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de tratamento da água convencional



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nessa perspectiva, nota-se que a água perpassa por uma série de processos até chegar ao consumidor final. Esses procedimentos objetivam assegurar os padrões de potabilidade requeridos pelo Ministério da Saúde por meio da Portaria N° 888, de 4 de maio de 2021, eliminando possíveis riscos à saúde da população. Com isso, para que a água seja considerada apta ao abastecimento público, é necessário realizar um conjunto de manipulações físicas e químicas que assegurem o cumprimento dos padrões regulamentados.

Desse modo, o tratamento de água em uma ETA convencional de ciclo completo envolve os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação, os quais podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Etapas do tratamento de água convencional



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Em conjunto, é cabível destacar que o tratamento de água gera como subproduto o lodo. Este está relacionado à qualidade da água bruta captada nos mananciais, haja vista que os níveis de impurezas influenciam na quantidade de lodo, além de aumentar o consumo de produtos químicos para atender aos padrões de qualidade (SANTOS; DE GOIS MICHELAN; JESUS, 2021).

#### **4.2.1 Etapa 01: Coagulação**

Entende-se por coagulação o processo de desestabilização das partículas coloidais e suspensas, resultante da interação entre ações físicas e reações químicas envolvendo o coagulante – usualmente um sal de alumínio ou de ferro –, a água e as impurezas presentes. Diante disso, o principal objetivo dessa etapa de tratamento é elevar a velocidade de sedimentação do aglomerado de partículas a ser formado pela adição de coagulante – no entanto, para estações de tratamentos dotadas de unidades de flotação, não se aplica a elevação da velocidade de sedimentação (LIBÂNIO, 2010).

Nessa perspectiva, o processo de coagulação envolve a hidrólise da solução aquosa, com o aumento da concentração dos íons  $H^+$  e a redução do pH da suspensão, e a etapa de mistura rápida, que consiste no transporte das espécies hidrolisadas de ferro ou alumínio para o contato com as impurezas presentes, desestabilizando-as. Em seguida, com a aproximação e colisão das partículas desestabilizadas, formam-se os flocos que podem ser removidos por sedimentação, flotação e filtração (LIBÂNIO, 2010).

No mais, é válido ressaltar que no Brasil é comumente utilizado, nas estações de tratamento, o Cloreto de Polialumínio (PAC) devido às características inerentes a esse produto químico. Assim, a aplicação de PAC em uma ETA é exibida na Figura 4.

Figura 4 – Aplicação de coagulante na calha Parshall



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 4.2.2 Etapa 02: Floculação

A floculação é um processo no qual as partículas se agregam para formar aglomerados de pequenas massas, apresentando um peso específico superior ao da água, o que resulta na formação de flocos (ROSCILD, 2018). Desse modo, trata-se de um sistema físico no qual os coloides são postos em contato uns com os outros, de modo a viabilizar o aumento de seu tamanho físico, alterando assim sua distribuição granulométrica (FERREIRA FILHO, 2017).

Nesse sentido, o propósito da floculação está fundamentado na agregação das partículas coloidais, de modo a permitir sua remoção na fase líquida por meio de processos de separação sólido-líquido. Com isso, reitera-se que a eficiência desse processo influencia no desempenho das demais etapas do tratamento, viabilizando a qualidade microbiológica do efluente, acentuando o tempo de carreira dos filtros e reduzindo o custo do metro cúbico de água tratada (LIBÂNIO, 2010). Assim, os floculadores, local onde ocorre a floculação, estão evidenciados na Figura 5.

Figura 5 – Flocladores



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 4.2.3 Etapa 03: Decantação

A decantação constitui uma etapa fundamental no processo de tratamento de água, sendo responsável pela retenção/remoção das partículas sólidas de maior dimensão pela ação da gravidade. Desse modo, é nessa fase que se inicia a clarificação da água, a qual contém os flocos formados nas etapas de coagulação e floculação. Nesse sentido, a Figura 6 mostra os tanques de decantação, local no qual ocorre a sedimentação dos sólidos.

Figura 6 – Decantadores



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nessa abordagem, conforme discutido por Ferreira Filho (2017), o processo de sedimentação gravitacional pode ser classificado em quatro categorias fundamentais, a saber:

- Sedimentação discreta (Tipo I) – Caracteriza-se por dispor de partículas com dimensões e velocidades constantes ao longo do processo de sedimentação, visto que não há interação significativa entre essas.
- Sedimentação floculenta (Tipo II) – Ocorre alteração da velocidade de sedimentação das partículas, dado que essas se agregam, ocasionando o aumento do diâmetro e, consequentemente, o aumento de sua velocidade de sedimentação ao longo da altura.
- Sedimentação em zona (Tipo III) – As partículas permanecem em posições fixas em relação às adjacentes, fomentando o aumento da concentração de sólidos e a interação entre eles (ALVES, 2018).
- Sedimentação por compressão (Tipo IV) – Classifica-se como zona de compressão, dado que apresenta uma elevada concentração de partículas sólidas sedimentadas, as quais se sobrepõem, comprimindo a estrutura devido ao peso das partículas (ALVES, 2018).

Por conseguinte, o objetivo da decantação consiste em reduzir o índice de sólidos existentes na água, atuando na clarificação do fluido. No mais, é válido ressaltar que o desempenho da sedimentação é influenciado diretamente pela eficiência das etapas de coagulação e floculação (LOPES *et al.*, 2020).

#### **4.2.4 Etapa 04: Filtração**

Consoante à Ferreira Filho (2017), a filtração é um processo físico-químico que permite remover as partículas coloidais presentes na fase líquida por meio da percolação por um meio granular. Com isso, essa etapa detém grande relevância no tratamento de água, dado que, por mais eficiente que seja o processo de decantação, este não é capaz de garantir a remoção de todos os sólidos. No mais, é válido mencionar que os filtros também atuam na remoção de micro-organismos. Nesse contexto, a Figura 7 mostra um tanque de filtração.

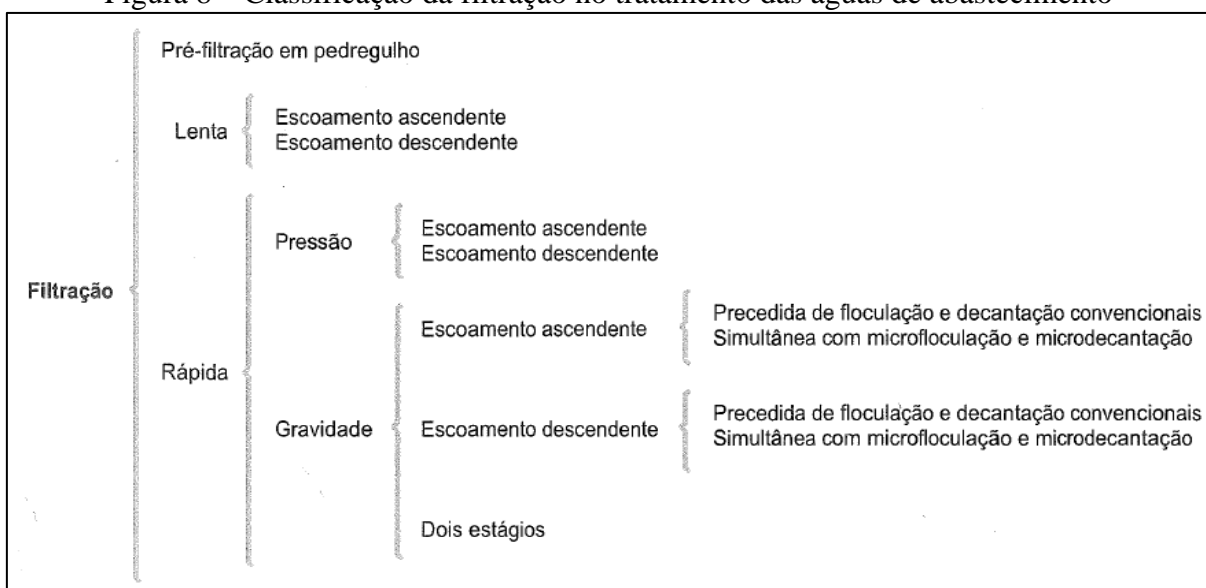
Figura 7 – Filtros



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A configuração do processo de filtração é influenciada pelas características das estações de tratamento. Desse modo, a filtração pode ocorrer de maneira direta, sistema no qual não há a etapa de decantação e, por consequência, os filtros são os únicos responsáveis pela retenção de partículas em suspensão (LIMA, 2019), ou ser classificada em filtros lentos e rápidos, os quais são diferenciados pela taxa com que operam e pelo método de limpeza (RICHTER, 2009). Posto isso, a Figura 8 apresenta a classificação formulada pelo autor Libânio (2010, p. 332), que considera os principais aspectos e características dos filtros.

Figura 8 – Classificação da filtração no tratamento das águas de abastecimento



Fonte: Fundamentos de qualidade e tratamento de água, Marcelo Libânio, 2010.

Nesse contexto, destaca-se que a filtração direta compreende três modalidades: filtração ascendente (FDA), filtração descendente (FDD) e dupla filtração. Na filtração ascendente, o fluxo ocorre no sentido de baixo para cima, deslocando-se da parte inferior do filtro, onde há grãos de maior diâmetro, para a parte superior, atravessando grãos mais finos. Já o fluxo descendente se dá pela passagem da água por partículas com diâmetros menores e, posteriormente, pelos grãos de maior granulometria. Esse processo garante o aumento da segurança sanitária da água filtrada. Por fim, a dupla filtração engloba os dois tipos supracitados, iniciando pela etapa ascendente e prosseguindo para o filtro descendente (LIMA, 2019).

Em relação à classificação em filtros lentos e rápidos, de acordo com a NBR 12216:1992 – Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público (ABNT, 1992), aplica-se o processo lento para o tratamento de águas do tipo B – águas subterrâneas ou superficiais, provenientes de bacias não-protetidas e que possam se enquadrar nos padrões de potabilidade, mediante processo de tratamento que não exija coagulação. Esse tipo de filtro detém menor taxa de filtração e as limpezas são realizadas com menor frequência, geralmente por remoção manual da camada superior do leito, onde as impurezas se concentram (RICHTER, 2009).

Enquanto isso, os filtros rápidos são destinados à remoção de partículas em suspensão nos casos em que a água passará pelo processo de coagulação, seguido ou não de decantação, ou quando for identificado que os sólidos podem ser removidos pelo filtro sem que haja coagulação (ABNT, 1992). Dessa maneira, esses filtros dispõem de uma taxa de filtração maior quando comparados aos filtros lentos, além de ser necessário realizar limpezas com maior frequência.

#### **4.2.5 Etapa 05: Desinfecção**

A desinfecção tem por finalidade inativar os micro-organismos patogênicos presentes na fase líquida, por meio de agentes físicos e químicos, dado que por mais eficientes que sejam as etapas do tratamento, somente o processo de desinfecção elimina e previne o crescimento microbiológico nas redes de distribuição (FUNASA, 2014). Nessa abordagem, de acordo com a Portaria N° 2.914 do Ministério da Saúde, toda água para consumo humano, fornecida coletivamente, deverá passar por processo de desinfecção ou cloração.

Dessa maneira, esse processo atua na promoção da segurança microbiológica da água tratada e, conseqüentemente, na proteção da saúde pública, através do uso de produtos químicos, cujos principais utilizados são: cloro gasoso, hipoclorito de sódio e ozônio (SILVA, 2018). Dentre esses, ressalta-se que o uso de cloro é considerado mais indicado, devido aos fatores econômicos e à elevada eficiência contra os agentes veiculadores de doenças (OLIVEIRA, 2022). Assim, a Figura 9 mostra o funcionamento da etapa de desinfecção.

Figura 9 – Desinfecção



Fonte: Hidrogeron, 2024.

#### 4.2.6 Etapa 06: Fluoretação

A fluoretação é o processo de adição de flúor na água tratada, com o propósito de aumentar o índice de fluoreto presente na água destinada ao consumo. Assim, essa etapa do tratamento constitui uma medida preventiva para auxiliar na saúde dentária, uma vez que estudos comprovam a redução, entre 50% e 65%, da prevalência de cárie dental em indivíduos que consomem água tratada com flúor desde o nascimento, durante um período de aproximadamente dez anos de ingestão da dose ótima (FUNASA, 2012). Posto isso, a Figura 10 mostra o processo de adição de flúor em uma ETA.

Figura 10 – Fluoretação



Fonte: Diário de Pernambuco, 2015.

Nesse contexto, destaca-se que a fluoretação é regulamentada pela Lei nº 6.050, de 24 de maio de 1974, a qual estabelece que os projetos destinados à construção ou ampliação de sistemas públicos de abastecimento de água, nos quais haja estação de tratamento, devem incluir previsões e planos relativos à fluoretação da água (BRASIL, 1975).

A lei mencionada acima foi regulamentada pelo Decreto nº 76.872, de 22 de dezembro de 1975, que define ser necessário realizar estudos acerca da aplicação de fluoretação na água para consumo humano nos casos de projetos destinados à construção ou à ampliação de sistemas públicos de abastecimento de água, incluindo os casos em que não há estações de tratamento. Em complemento, é válido ressaltar que os parâmetros de concentrações e diretrizes de uso do flúor são regidos pela portaria nº 635/GM/MS, de 30 de janeiro de 1976 (BRASIL, 1976).

#### 4.3 GERAÇÃO DE SUBPRODUTOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento de água dispõe como subproduto o lodo, o qual é gerado nas unidades de separação sólido-líquido e na lavagem dos filtros. Este é composto por resíduos biodegradáveis e materiais orgânicos dissolvidos, além de minerais, metais pesados e compostos químicos provenientes da água bruta e do processo de coagulação. Desse modo, o índice de lodo gerado está condicionado à qualidade do manancial, que envolve a turbidez da

água bruta, a concentração de coagulantes utilizados no tratamento, o tempo de permanência do lodo nos tanques e a eficiência da decantação (LUSTOSA *et al.*, 2017).

Conforme apontado por Ferreira Filho (2017, p. 429), as características do lodo são definidas de acordo com o local onde este é produzido. Observa-se que o lodo gerado no processo de sedimentação detém uma alta concentração de sólidos e baixa vazão, enquanto que, no caso em que a produção advém das retrolavagens, tem-se uma elevada vazão e baixa concentração de partículas.

Os subprodutos gerados na etapa de decantação frequentemente exibem um baixo teor de partículas sólidas, geralmente inferiores a 1% (FERREIRA FILHO, 2017). Diante desse contexto, destaca-se que o tratamento do lodo compreende as etapas de adensamento e desidratação, visando remover o teor de umidade e, por conseguinte, elevar os níveis de sólidos para valores que possibilitem o manuseio e a destinação final adequada. A Figura 11 mostra o processo de adensamento.

Figura 11 – Adensador



Fonte: Agreste Saneamento, 2023.

É válido reiterar que o adensamento é realizado com o propósito de gerar lodo concentrado por meio da adição de polímeros. Dessa forma, busca-se remover o máximo de água possível, visando reduzir os custos associados aos processos subsequentes. Em sequência, procede-se à etapa de desidratação, a qual é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Desidratação do lodo



Fonte: Agreste Saneamento, 2023.

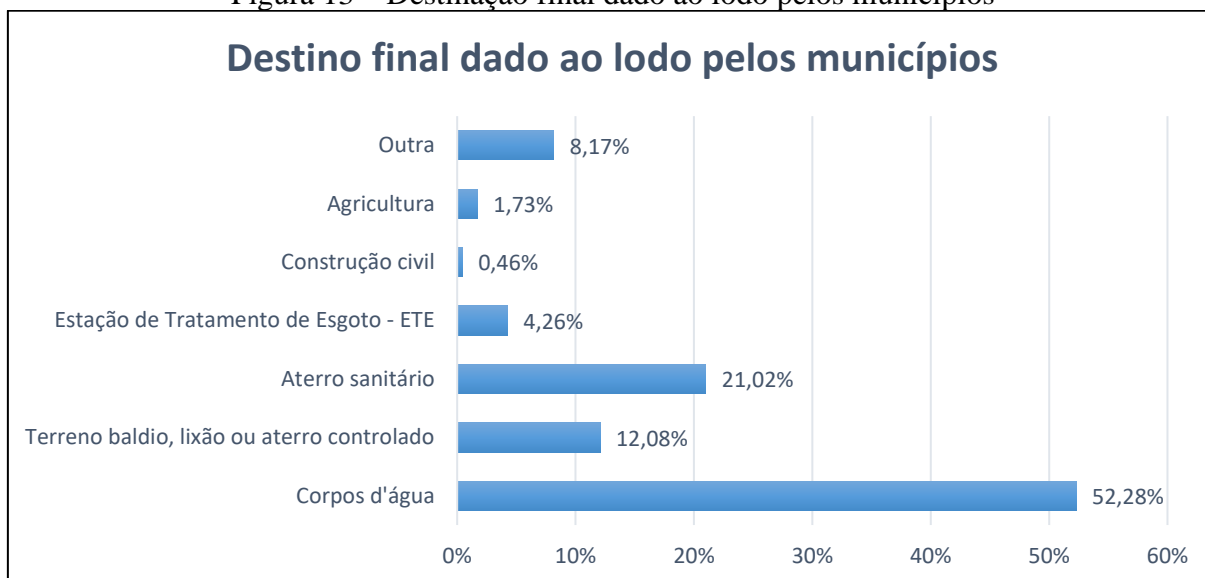
Essa fase consiste na remoção da água com o objetivo de reduzir o volume. Assim, os sistemas de desidratação podem ser classificados em naturais e mecânicos, e dependem de vários fatores, os quais englobam diferentes aspectos relacionados às características do lodo e da estação de tratamento (LIBÂNIO, 2010).

#### **4.3.1 Destinação final do lodo**

Sabe-se que o lodo proveniente de estações de tratamento de água é considerado um resíduo sólido não inerte pertencente à classe II-A, cujas características incluem combustibilidade e solubilidade em água, NBR 10.004 – Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 2004). Dessa maneira, após os processos de adensamento e desidratação, esse subproduto deve ser destinado aos locais legalmente adequados, não sendo permitido o lançamento *in natura* em águas superficiais.

Contudo, no Brasil, o destino final do lodo ainda é uma problemática que impacta no meio ambiente. Segundo dados do IBGE (2017), dos 5570 municípios brasileiros, 5517 detêm serviços de abastecimento de água em funcionamento e 1825 produzem lodo no processo de tratamento da água. As destinações do lodo gerado por município são apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Destinação final dado ao lodo pelos municípios



Fonte: Elaborado pela autora, 2024, com base nos dados fornecidos pelo IBGE, 2017.

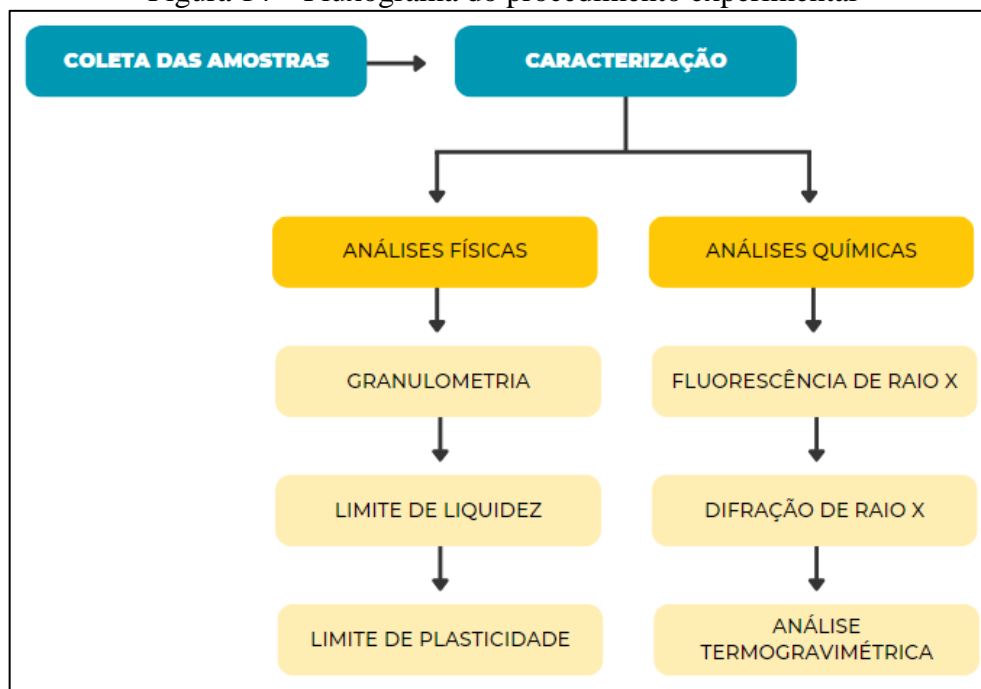
Observa-se que uma proporção significativa de municípios brasileiros, correspondente a 52,28%, destina o lodo para corpos hídricos. Esse percentual evidencia o lançamento de um grande volume de lodo nos rios, o que influencia na qualidade das águas e pode acarretar diversos impactos ambientais. Em contrapartida, apenas 0,46% desse subproduto é destinado à construção civil. No entanto, verifica-se que esse setor apresenta um elevado consumo de recursos naturais, os quais poderiam ser parcialmente substituídos pelo lodo, visando mitigar os danos ao meio ambiente.

As características físicas e químicas de lodos de ETAs são, muitas vezes, similares às características dos materiais utilizados na fabricação de tijolos, pois apresentam propriedades similares à argila natural e xisto utilizados na produção destes materiais. As grandes quantidades de lodos gerados em ETAs podem diminuir significativamente a quantidade de argila e xisto utilizados na fabricação de tijolos, aumentando a vida útil das jazidas naturais. A possibilidade de reunir os rejeitos advindos do lodo de ETAs em conjunto com os resíduos da construção civil, no intuito de estudar formas de utilização dos mesmos, poderá ser uma interessante estratégia no sentido de minimizar os impactos ambientais gerados por estes dois setores. (PRADO FILHO, 2015).

## 5 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi de caráter experimental, com viés tecnológico e abordagem quantitativa. A Figura 14 apresenta o fluxograma do procedimento experimental desenvolvido neste trabalho, abrangendo as etapas de caracterização físico-química da matéria-prima.

Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Em síntese, a pesquisa foi dividida em etapas de coleta e caracterização do subproduto, por meio da realização dos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, fluorescência de raios X, difração de raios X e análise termogravimétrica. É oportuno pontuar que a amostra de lodo passou por um processo de preparação/beneficiamento, no qual foi realizada a secagem em estufa para remoção da umidade e, posteriormente, o peneiramento, para viabilizar a execução dos ensaios de caracterização.

### 5.1 COLETA E PREPARAÇÃO DO SUBPRODUTO

#### 5.1.1 Coleta e preparação

O lodo utilizado foi proveniente da ETA do município de Arapiraca-AL (Figura 15), que integra o Sistema Adutor do Agreste (SAA), cujo manancial é o rio São Francisco. Essa unidade opera com uma vazão média de aproximadamente 350 L/s em condições normais

de qualidade da água bruta, utilizando o ciclo completo, também denominado tratamento convencional. Desse modo, ressalta-se que o tratamento da fase líquida é composto por coagulação, floculação, decantação, filtração e cloração final, enquanto o manejo da fase sólida é formado por adensador de lodo por gravidade e Bag's de desidratação de lodo.

Figura 15 – ETA Arapiraca



Fonte: Agreste Saneamento, 2023.

Além disso, destaca-se que a ETA é dividida em três módulos, sendo que cada um é composto por três câmaras de floculação com agitadores mecanizados, seguidos de dois decantadores lamelares de alta taxa. A água decantada dos três módulos é reunida em um barrilete único a montante dos filtros, e em seguida é distribuída para nove filtros rápidos em paralelo. Por fim, a água filtrada segue para o sistema de desinfecção por dosagem de hipoclorito de sódio gerado *in loco*. A Figura 16 ilustra o processo de tratamento de água da ETA do município de Arapiraca.

Figura 16 – Fluxograma do tratamento de água da cidade de Arapiraca – AL

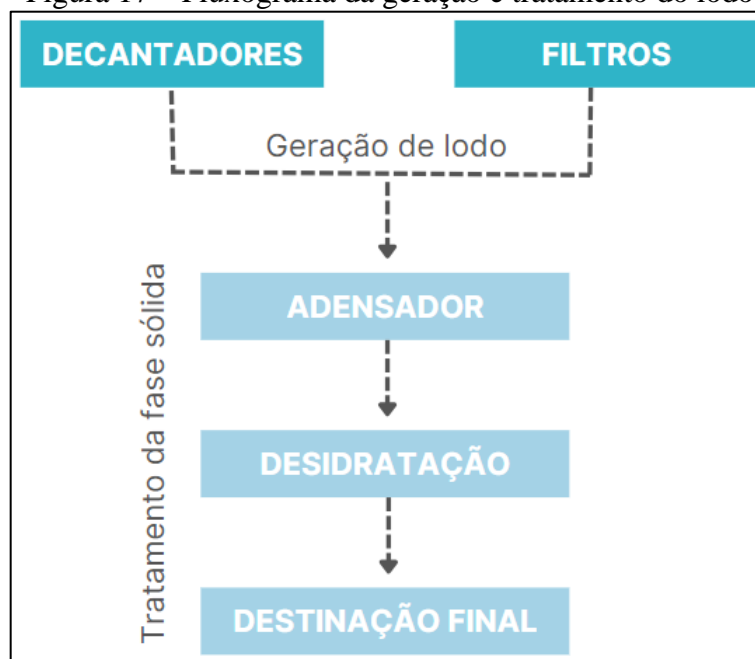


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Como observado no fluxograma acima (Figura 16), a primeira etapa do abastecimento de água é a captação e o direcionamento da água bruta até a estação de tratamento. Em seguida, inicia-se o processo de coagulação, seguido pelos floculadores, correspondendo à terceira etapa, os quais são responsáveis por formar aglomerados de pequenas massas, com densidade superior à da água. A quarta fase é composta por tanques que têm a função de decantar os flocos formados na etapa anterior. As partículas que não decantam são retidas em filtros, compostos por areia, antracito e uma camada suporte do tipo reverso, conforme ETA especificada neste trabalho.

Na última etapa, a água filtrada passa pelo sistema de desinfecção por dosagem de hipoclorito de sódio, seguindo para o armazenamento no reservatório de água tratada para posterior distribuição na cidade. Em relação à geração do subproduto em análise nesta pesquisa, a obtenção do lodo é principalmente proveniente do descarte de sólidos dos decantadores e do rejeito das retrolavagens dos filtros, e eventualmente da remoção do sobrenadante dos floculadores e das descargas de fundo das unidades. O fluxo de produção e tratamento do lodo pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma da geração e tratamento do lodo



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

É relevante destacar que o tratamento da fase sólida inclui o adensamento do lodo em um adensador do tipo gravitacional (Figura 18). Posteriormente, o lodo adensado é recalcado para a área de desidratação por meio de uma tubulação de ferro fundido. No mais, a etapa de desidratação e o acondicionamento do lodo são realizados por bags de membranas geotêxteis, compostos por duas unidades em paralelo, equipados com berço drenante (Figura 19).

Figura 18 – Adensador de lodo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 19 – Desidratação do lodo



Fonte: Agreste Saneamento, 2022.

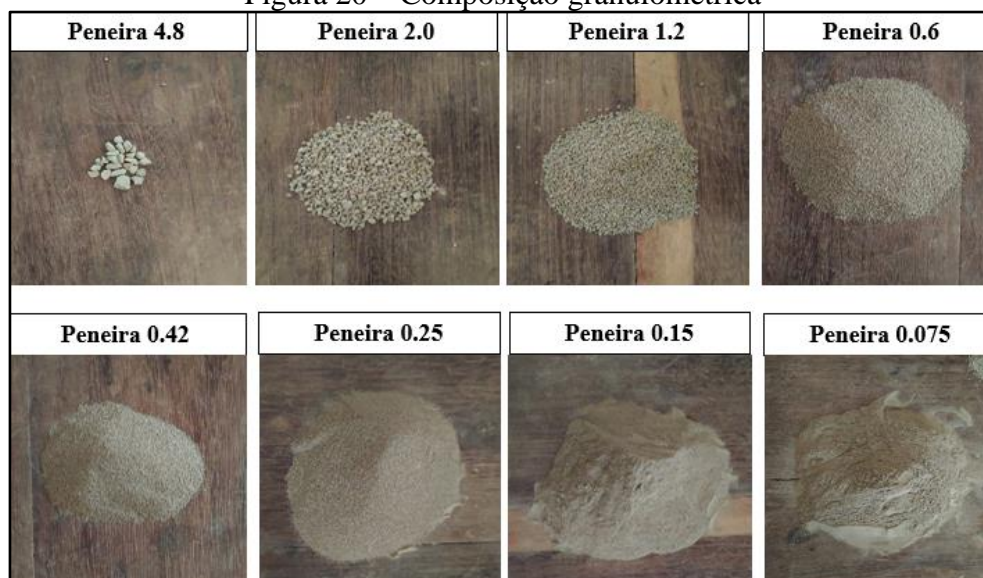
## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO

### 5.2.1 Análises físicas

#### 5.2.1.1 Análise granulométrica

A amostra de lodo foi submetida ao ensaio de granulometria por peneiramento (Figura 20), seguindo as diretrizes da NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2018), com o objetivo de verificar o tamanho dos grãos e classificá-los quanto à sua dimensão. O processo de peneiramento permitiu determinar a composição granulométrica da matéria-prima, calculando o percentual de peso do material em relação à massa total. Assim, as amostras foram classificadas em diferentes faixas de solo, em conformidade com as especificações da NBR 6502 – Rochas e solos – Terminologia (ABNT, 1995).

Figura 20 – Composição granulométrica



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Destaca-se que o comportamento granulométrico dos solos influencia as características finais dos compósitos, dado que o arranjo entre os grãos impacta as propriedades mecânicas, a compactação, a resistência e a durabilidade dos materiais (OLIVEIRA, 2022). Posto isso, o procedimento experimental para a caracterização granulométrica do lodo de ETA foi realizado no Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, Campus Palmeira dos Índios.

#### 5.2.1.2 Limite de liquidez e plasticidade

Consoante à NBR 6502 – Rochas e solos – Terminologia (ABNT, 1995), entende-se por limite de liquidez (LL) o teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado de consistência limite entre os estados líquido e plástico. Esse parâmetro é determinado através do ensaio de Atterberg, descrito pela NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2017), no qual o solo é moldado em uma ranhura e submetido a golpes até que a ranhura se feche. Desse modo, quanto maior o limite de liquidez, maior a quantidade de água necessária para o solo atingir uma consistência líquida.

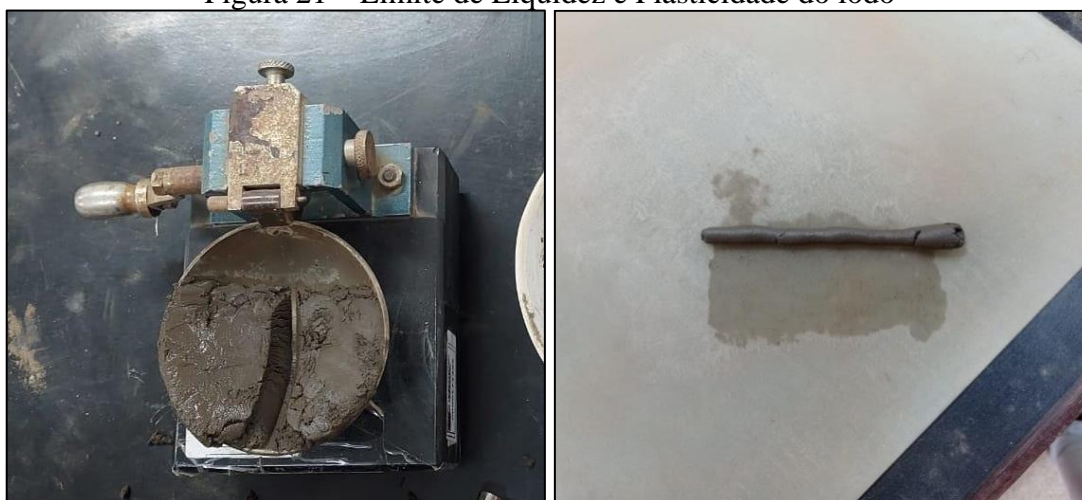
O limite de plasticidade (LP), por sua vez, é a umidade mínima na qual o solo passa de um estado semissólido para um estado plástico (ABNT, 1995). Para determinar esse limite, o solo é moldado em pequenos cilindros até que se fragmente ao ser rolado com um diâmetro de 3 mm e comprimento de aproximadamente 100 mm, de acordo com a NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016). Ressalta-se ainda que esses ensaios são utilizados para determinar o índice de plasticidade (IP), definido como a diferença entre o LL

e o LP. Esse índice indica a faixa de umidade na qual o solo exibe propriedades plásticas, sendo crucial para prever o comportamento do solo.

Reitera-se que a água desempenha um papel fundamental no comportamento dos solos, influenciando diversas propriedades, uma vez que a variação da umidade do solo pode fazer com que ele transite de um estado quase líquido para um estado sólido (ZORZAN *et al.*, 2019). Dessa maneira, é notória a importância de identificar os limites de consistência para a determinação precisa das características dos materiais.

Os ensaios para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade da matéria-prima seguiram as diretrizes estabelecidas pela NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016) para o preparo da amostra, além das normas específicas para cada ensaio (Figura 21). As análises foram realizadas no Laboratório de Construção Civil e Materiais do Instituto Federal de Alagoas, Campus Palmeira dos Índios.

Figura 21 – Limite de Liquidez e Plasticidade do lodo



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

## 5.2.2 Análises Químicas

### 5.2.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise química por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica não destrutiva amplamente reconhecida para determinar a composição química de materiais, além de estabelecer a proporção de cada elemento presente na amostra.

Este método baseia-se na interação de raios X com a matéria, resultando na emissão de radiação característica dos elementos presentes na amostra. Quando uma amostra é irradiada por raios gama ou raios X, os átomos nela contidos absorvem essa energia e são excitados para estados de energia mais elevados. Ao retornarem ao estado fundamental, emitem radiação de fluorescência de Raios X, cuja energia é específica de cada elemento, permitindo sua identificação e correspondente quantificação (OLIVEIRA, 2011 e BECKHOFF *et al.*, 2006).

Dessa forma, observa-se que esse ensaio é essencial para a identificação de componentes nocivos, assim como para entender a influência desses elementos em tratamentos térmicos de materiais (OLIVEIRA, 2022). A capacidade de detectar e quantificar óxidos permite a identificação de impurezas, a garantia de conformidade com especificações e a otimização de processos que dependem da composição química para obter resultados eficazes em tratamentos térmicos.

A amostra de lodo foi submetida ao ensaio de FRX para a identificação da composição química, com o intuito de realizar uma análise qualitativa dos óxidos presentes na amostra e estabelecer a proporção quantitativa de cada elemento. O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando um espectrômetro por fluorescência de Raios X e empregando o método semiquantitativo para determinar os elementos presentes na amostra.

#### 5.2.2.2 Difração de Raios X (DRX)

A difratometria de Raios X baseia-se na interação de ondas na frequência de raios X com os planos de repetição sistemática do retículo cristalino, em consonância com a Lei de Bragg, que estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (ALBERS *et al.*, 2002 e PRADO, 2011).

Conforme Albers *et al.* (2002), a técnica de difração de Raios X é a mais indicada para a determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos, pois, na maioria dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos Raios X. Ademais, este método é recomendado devido à sua simplicidade e rapidez, à confiabilidade dos resultados obtidos e à sua eficácia na análise de materiais compostos por múltiplas fases (ALBERS *et al.*, 2002).

Desse modo, a difração de Raios X é fundamental para a caracterização cristalográfica dos materiais, corroborando com os resultados de fluorescência de Raios X (OLIVEIRA, 2022). Com isso, os minerais presentes na amostra de lodo foram identificados utilizando a técnica de Difração de Raios X (DRX). A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), empregando um difratômetro de Raios X.

#### 5.2.2.3 Análise Termogravimétrica (ATG)

A Análise Termogravimétrica (ATG) é uma técnica que mede a variação de massa de uma substância em função de um programa de aquecimento controlado, permitindo a avaliação das mudanças de peso conforme a temperatura (PEREIRA, 2013). Desse modo, os resultados do ensaio são apresentados em uma curva de ATG, que mostra a variação da massa em função da temperatura ou do tempo, permitindo a identificação de constantes térmicas, a caracterização do material, bem como estudos cinéticos, de decomposição e de estabilidade térmica (DENARI e CAVALHEIRO, 2012).

Nessa perspectiva, destaca-se que a ATG é amplamente utilizada em áreas como ciência dos materiais, química e engenharia, especialmente para caracterizar polímeros, cerâmicas, compostos orgânicos e inorgânicos (DENARI e CAVALHEIRO, 2012). Com isso, a amostra de lodo foi submetida à análise térmica, realizada no Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando o equipamento Shimadzu DTG-60.

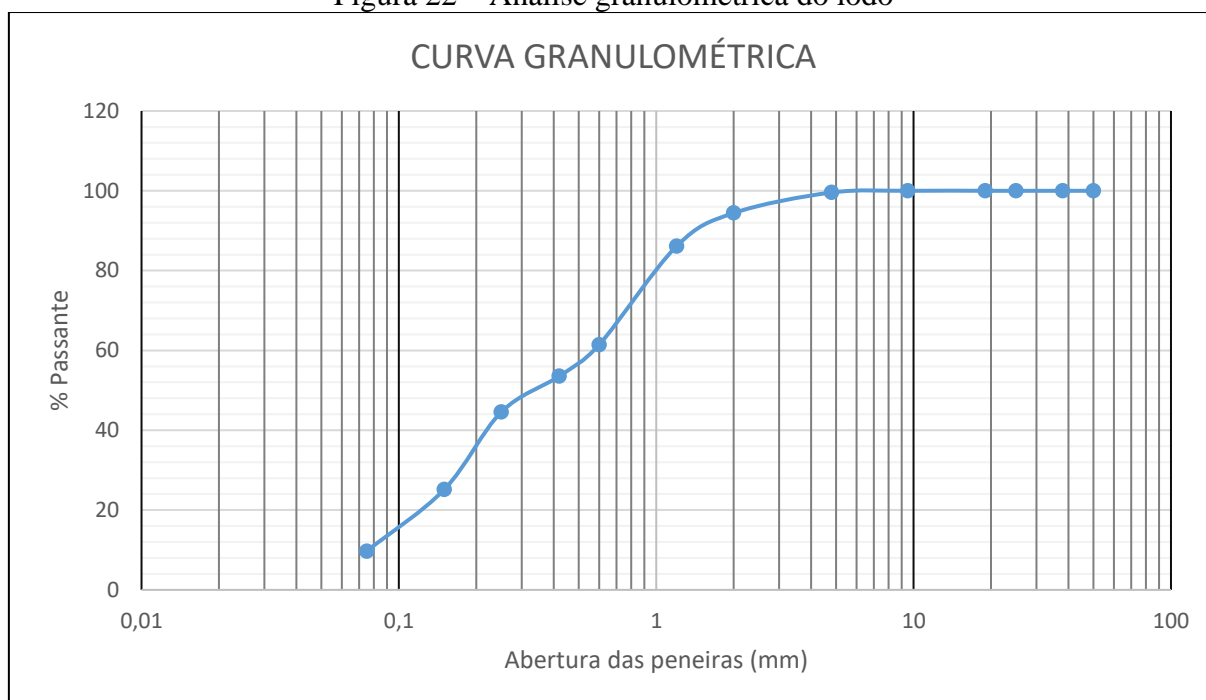
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO

#### 6.1.1 Análise granulométrica

A análise da curva granulométrica do lodo indica uma predominância de areia média e fina. A Figura 22 ilustra essa distribuição granulométrica, evidenciando a composição predominante das partículas presentes na amostra.

Figura 22 – Análise granulométrica do lodo



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Ao avaliar a distribuição granulométrica, fundamentando-se nas definições estabelecidas pela NBR 6502 – Rochas e solos – Terminologia (ABNT, 1995), foram encontrados os seguintes percentuais: 43,86% de areia fina, 32,57% de areia média, 13,43% de areia grossa e 9,71% de siltes e argilas. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Petterle *et al.* (2018), que identificou a presença de 71,12% de partículas arenosas.

Destaca-se que o processo de cominuição do subproduto para a realização do ensaio apresentou dificuldades devido à formação de grumos de grande dureza. Essa dificuldade também foi observada na pesquisa conduzida por Alves (2019), a qual analisou laboratorialmente o lodo desidratado de ETA para uso em pavimentação. O autor argumenta que a dificuldade na desagregação das partículas de lodo pode ser atribuída ao emprego de óxidos de ferro e alumínio no processo de adequação da potabilidade da água.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2017), o lodo de ETA é predominantemente constituído por frações inorgânicas, compostas por argila, silte e areia fina. Nesse contexto, a composição granulométrica do subproduto é influenciada por vários fatores, incluindo o tipo de coagulante utilizado no tratamento, as condições climáticas e a umidade da amostra durante o ensaio (OLIVEIRA, TENÓRIO e MARQUES, 2023).

### 6.1.2 Limite de liquidez e plasticidade

Os resultados dos ensaios de Limites de Liquidez e Plasticidade estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Limites de liquidez e plasticidade do lodo

<b>Material</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
Lodo da ETA	ND	Não plástico	ND

Nota: ND – Não determinado

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Observa-se que a amostra do subproduto não apresentou plasticidade, o que se assemelha ao resultado obtido na pesquisa conduzida por Gonçalves *et al.* (2017), na qual foi realizado o incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. Resultado análogo foi verificado no estudo de Alves (2019), o qual também identificou lodo com características não plásticas (NP). De acordo com o autor, a utilização de coagulantes durante o processo de tratamento da água, especialmente para este trabalho, o Cloreto de Polialumínio (PAC), pode resultar na impermeabilização do lodo, o que leva à eliminação de sua plasticidade.

Posto isso, devido à impossibilidade de determinar os limites de liquidez e plasticidade, o lodo deste estudo foi classificado como não plástico.

### 6.1.3 Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise química do lodo de ETA, realizada por meio da técnica de fluorescência de Raios X, indicou que os óxidos em maiores proporções foram SiO<sub>2</sub> (53,5%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (28,74%), seguidos por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,91%) e K<sub>2</sub>O (4,52%). Portanto, constata-se que a amostra analisada não contém metais pesados. A composição química do composto em estudo está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Fluorescência de Raios X do lodo de ETA

<b>Óxidos</b>	<b>Valores encontrados (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	53,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,91
K <sub>2</sub> O	4,52
CaO	1,86
TiO <sub>2</sub>	1,54
MgO	1,15
SO <sub>3</sub>	0,33
MnO	0,14
ZrO <sub>2</sub>	0,12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06
SrO	0,05
ZnO	0,04
Rb <sub>2</sub> O	0,03
Br	0,01

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Resultados similares foram observados no estudo de Petterle *et al.* (2018), que analisou placas cerâmicas contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz. A pesquisa identificou percentuais de SiO<sub>2</sub> (36,11%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,31%), e os avaliou como formadores de fase vítrea, além de constituintes residuais de interesse para a indústria cerâmica. A presença de alumínio no subproduto pode ser atribuída ao uso de Policloreto de Alumínio (PAC) no processo de tratamento de água em Arapiraca.

Destaca-se que os compostos químicos K<sub>2</sub>O (4,52%), CaO (1,86%) e MgO (0,15%) possuem características fundentes, o que pode promover sinterização mais rápida ou em menor temperatura nos tijolos cerâmicos, quando estes interagem com os agentes formadores de fase vítrea SiO<sub>2</sub> (36,11%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,31%) (OLIVEIRA, 2022). Conforme apontado por Inocente *et al.* (2018), a presença de sílica é um indicativo de que o resíduo pode aprimorar a qualidade das peças cerâmicas, especialmente no que tange à resistência mecânica, pois a sílica é um óxido formador de fase vítrea, associado à vitrificação do material. Além disso, segundo os autores, a presença de cálcio, magnésio e potássio contribui para o aumento da resistência às mudanças abruptas de temperatura.

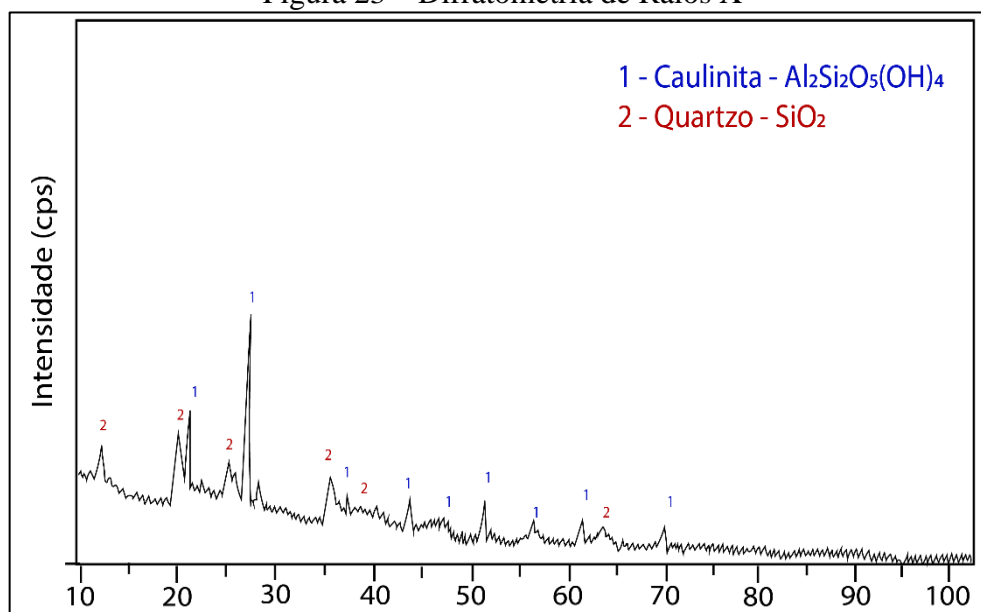
É importante mencionar que a composição química do lodo está relacionada às suas características, que são influenciadas pela qualidade do manancial e, conseqüentemente,

pelo tipo de coagulante utilizado no tratamento. Assim, o mês e a região da coleta da amostra para análise por meio de FRX são fatores que afetam o percentual de óxidos (OLIVEIRA, TENÓRIO e MARQUES, 2023).

#### 6.1.4 Difração de Raios X (DRX)

O Difratoograma de Raios X do lodo (Figura 23) apresentou picos característicos das fases caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Esses resultados ratificam a análise química obtida por fluorescência de Raios X, mostrando a caulinita predominantemente como óxidos de silício e alumínio, enquanto o quartzo se apresenta como óxido de silício.

Figura 23 – Difratomia de Raios X



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

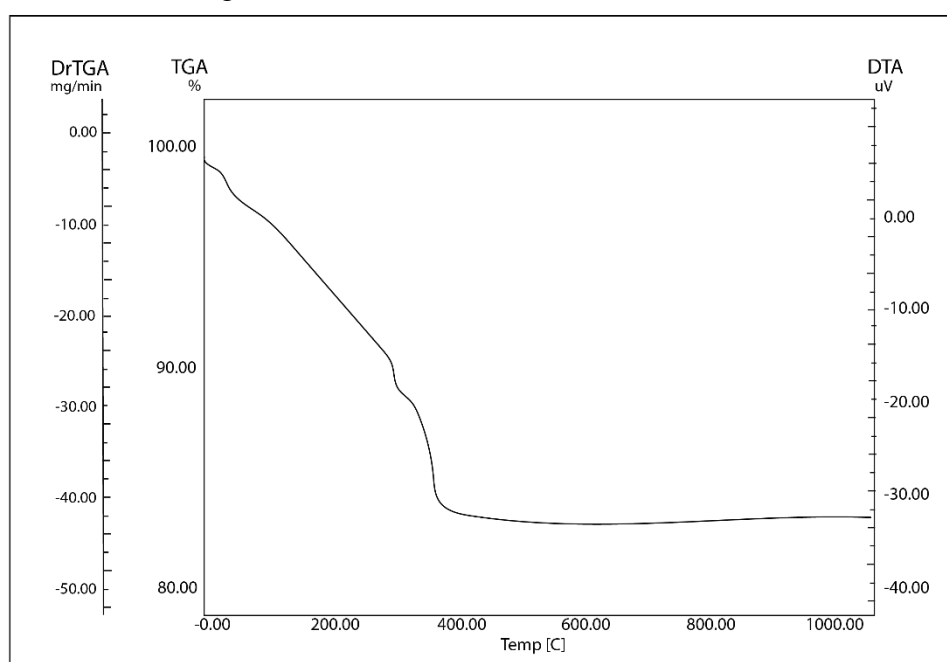
Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos, nos quais as fases cristalinas de caulinita e quartzo se destacaram como as mais proeminentes no lodo de ETA (BUSELATTO *et al.*, 2019; GASTALDINI *et al.*, 2015). Essas fases têm um impacto positivo no processo de conformação e na trabalhabilidade da massa cerâmica (OLIVEIRA, 2022).

Conforme Santos (2019), o silício é um componente essencial na indústria cerâmica, desempenhando um papel crucial na formulação de esmaltes, abrasivos e vidros. Identificada principalmente na forma cristalina do quartzo, que é a forma mais pura, e na caulinita, o silício se destaca por suas propriedades intrínsecas, como elevada dureza, alto ponto de fusão e a capacidade de formar vidros a altas temperaturas.

### 6.1.5 Análise Termogravimétrica (ATG)

A análise da curva de ATG indicou uma perda de massa de cerca de 42% até 400°C, seguida de estabilização a partir dessa temperatura. Essa perda pode ser atribuída à eliminação de água adsorvida, hidroxilas e decomposição da matéria orgânica (BUSELATTO *et al.*, 2019). Na curva de ATG, observa-se que, para temperaturas entre 400°C e 1000°C, a perda de massa não é considerada significativa. A curva termogravimétrica do lodo da ETA está apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Análise Térmica do lodo de ETA



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Resultados semelhantes foram observados na pesquisa de Oliveira (2022), que analisou as características e propriedades do lodo da ETA da cidade de Palmeira dos Índios-AL na produção de massas cerâmicas. No entanto, no estudo de Godoy (2018), que avaliou o lodo da ETA da região de Blumenau (SC), o percentual de massa foi de 16,3%. A variação nos valores encontrados na análise da curva de ATG pode ser atribuída à heterogeneidade dos lodos de ETA investigados, que varia conforme a região geográfica e os processos adotados nas estações de tratamento (BUSELATTO *et al.*, 2019).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz do que foi apresentado, evidencia-se que o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Arapiraca, Alagoas, apresenta características favoráveis que o tornam adequado para utilização em massas cerâmicas. Essa adequação é atribuída à similaridade granulométrica da matéria-prima, coerente com a apreciação microestrutural da argila. A presença de óxidos formadores de fase vítrea no subproduto também sugere um potencial significativo para a redução do tempo e da temperatura de sinterização dos artefatos cerâmicos, o que pode diminuir tanto a emissão de gases poluentes quanto os custos operacionais das indústrias cerâmicas.

A composição granulométrica do lodo apresenta predominância de areia fina (43,86%) e areia média (32,57%), caracterizando-o como um material arenoso, de acordo com a NBR 6502 – Rochas e solos – Terminologia (ABNT, 1995). Em relação à plasticidade, o lodo foi classificado como não plástico. Quanto à análise química, identificada por meio da fluorescência de Raios X, foram encontrados percentuais de  $K_2O$  (4,52%),  $CaO$  (1,86%) e  $MgO$  (0,15%). Esses óxidos apresentam características fundentes, o que pode reduzir significativamente o tempo e a temperatura necessários para a sinterização, contribuindo para uma produção mais sustentável e econômica, em conformidade com as práticas ambientais e econômicas.

O difratograma de Raios X ratifica os resultados da caracterização química do subproduto, indicando a presença de picos associados às fases cristalinas de quartzo ( $SiO_2$ ) e caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ). Destaca-se que esses minerais são essenciais para a qualidade e eficiência do processo cerâmico, uma vez que aprimoram a trabalhabilidade e a conformação das massas cerâmicas (OLIVEIRA, 2022). A curva termogravimétrica do lodo de ETA evidenciou uma perda de aproximadamente 42% da massa a 400°C, estabilizando-se a partir dessa temperatura. Essa significativa perda de massa é atribuída ao alto teor de matéria orgânica, hidroxilas e água adsorvida presentes no composto (BUSELATTO, *et al.*, 2019).

Por fim, reitera-se que a caracterização do lodo da ETA da cidade de Arapiraca mostrou a viabilidade de sua incorporação em materiais cerâmicos. Os resultados sugerem que o composto pode ser uma alternativa viável para substituir parcialmente a argila. Dessa forma, verificou-se que o aproveitamento do lodo da ETA de Arapiraca na fabricação de produtos cerâmicos pode representar alternativa viável e intrinsecamente sustentável para a gestão de

resíduos sólidos, ao mesmo tempo em que agrega valor à cadeia produtiva local e promove a economia circular.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A caracterização físico-química do subproduto permitiu identificar aspectos que podem ser explorados em trabalhos futuros relacionados à incorporação do lodo de ETA em artefatos cerâmicos. Nesse contexto, a utilização do lodo em massas cerâmicas, substituindo parcialmente a argila, principal matéria-prima da indústria da cerâmica vermelha, pode aprimorar as características dos tijolos e promover uma economia circular, mitigando impactos ambientais. Essa abordagem representa uma alternativa para avaliar a viabilidade da adição desse passivo.

Em relação ao comportamento físico e mecânico, recomenda-se a realização de ensaios físicos, como absorção de água e retração linear, além da submissão dos corpos de prova aos ensaios de resistência, para avaliar o desempenho dos tijolos cerâmicos. Paralelamente, sugere-se avaliar diferentes temperaturas de sinterização e os percentuais de incremento do lodo de ETA em massas cerâmicas. Esse processo permitirá analisar se houve redução do tempo e da temperatura de sinterização devido à presença de elementos fundentes.

É importante destacar que a incorporação do lodo em massas cerâmicas pode representar uma alternativa intrinsecamente sustentável para a destinação desse subproduto, oferecendo à indústria da cerâmica vermelha uma solução que reduz impactos ambientais e beneficia ambas as cadeias produtivas. Os resultados obtidos proporcionam uma perspectiva sobre a redução de custos e a diminuição da extração de recursos naturais, além de estimar a quantidade de lodo que pode ser reciclado e incorporado no material cerâmico, evitando sua disposição inadequada no meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de usos consultivos da água no Brasil**. Brasília – DF, 2019. Disponível em: [https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana\\_manual\\_de\\_usos\\_consuntivos\\_da\\_agua\\_no\\_brasil.pdf](https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf). Acesso em: 03 Fevereiro 2024.
- ALBERS, A. P. F. *et al.* Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, p. 34-37, 2002.
- ALVES, H. C. **Análise laboratorial de lodos desidratados de Estações de Tratamento de Água da Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG para uso em pavimentação**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG.
- ALVES, Jaqueline. **Estudo da influência dos parâmetros pH, volume de coagulante e frequência de rotação na separação sólido-líquido do minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco - MG, 2018. Disponível em: <https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeq/Dissertacao%20versao%20final%20Jaqueline%20Alves%20Roberto.pdf>. Acesso em: 24 Janeiro 2024.
- Assembleia Geral das Nações Unidas. Resolução 64/A/RES/64/292, de 28 de julho de 2010. Nova York, 2010. Disponível em: <https://undocs.org/Home/Mobile?FinalSymbol=A%2FRES%2F64%2F292&Language=E&DeviceType=Desktop&LangRequested=False>. Acesso em: 23 Janeiro 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: SOLO – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

BECKHOFF, *et al.* Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis. Springer, Berlin, 2006.

BRASIL. Decreto nº 76.872, de 22 de dezembro de 1975. Regulamenta a Lei nº 6.050, de 24 de maio de 1974, que dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas públicos de abastecimento. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 1975. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/antigos/d76872.htm#:~:text=DECRETO%20N%2076.872%2C%20DE,em%20sistemas%20p%C3%BAblicos%20e%20abastecimento](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d76872.htm#:~:text=DECRETO%20N%2076.872%2C%20DE,em%20sistemas%20p%C3%BAblicos%20e%20abastecimento). Acesso em: 30 Janeiro 2024.

BRASIL. Lei n. 6.050, de 24 de maio de 1974. Dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6050.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6050.htm). Acesso em: 30 Janeiro 2024.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jan. 2007. Seção 1, p. 1. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm). Acesso em: 15 Março 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria n.º 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre normas de potabilidade de água para o consumo humano. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 dez. 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 05, Anexo XX, de 28 de setembro de 2017. Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde, 2017. Disponível em: [http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria\\_Consolidacao\\_5\\_28\\_SETEMBRO\\_2017.pdf](http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf). Acesso em: 24 Janeiro 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 635/Bsb, de 26 de dezembro de 1975. Aprova normas e padrões sobre a fluoretação da água de sistemas públicos de abastecimento. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/349893/>. Acesso em: 30 Janeiro 2024.

BUSELATTO, Denis Meira *et al.* Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Eder Tadeu Gomes. **Princípios e Aplicações da Análise Térmica**. São Paulo. IQSC, 2012, 40p.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: LDiBE, 2017.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de Água: Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. ISBN 978-85-352-8740-0.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. Manual de Cloração de Água em Pequenas Comunidades Utilizando o Clorador Simplificado Desenvolvido pela FUNASA. Brasília: FUNASA, 2014. Disponível em: [https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/manualdecloracaodeaguaempequenascomunidades.pdf](https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualdecloracaodeaguaempequenascomunidades.pdf). Acesso em: 28 Janeiro 2014.

FUNASA. Manual de Fluoretação da Água para Consumo Humano. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2012. Disponível em: [https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/mnl\\_fluoretacao\\_2.pdf](https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/mnl_fluoretacao_2.pdf). Acesso em: 28 Janeiro 2024.

GASTALDINI, A. L. G. *et al.* The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and building materials**, v. 94, p. 513-520, 2015.

GODOY, L.G.G. **Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) calcinado em cimento composto e pozolânico**. Dissertação de M.Sc., Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2018.

GOMES, Samuel De Carvalho *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019.

GONÇALVES, F. *et al.* **Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário**. 2017. Disponível em: [http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_205\\_n\\_1661.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_205_n_1661.pdf). Acesso em: 01 Março 2024.

INOCENTE, J. M. *et al.* Estudo de Recuperação de Resíduos Vítreos na Formulação de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 23, n. 3, p. 34-39, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=destaques>. Acesso em: 3 Fevereiro 2024.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LIMA, Julyenne Kerolainy Leite. **Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1689?show=full>. Acesso em 27 Janeiro 2024.

LOPES, Verônica dos Santos *et al.* Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, p. 567-572, 2020.

LUSTOSA, Jordanna B. *et al.* Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. **Revista Dae**, v. 65, n. 206, p. 44-61, 2017.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ab>. Acesso em: 23 Janeiro 2024.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação (mestrado) – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, Isadora Yule Queiroz de. **Gerenciamento do lodo de Estação de Tratamento de Água em Mato Grosso do Sul: uma análise crítica**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS.

OLIVEIRA, Isadora Yule Queiroz de; RONDON, Odilar Costa. **Diagnóstico da gestão de lodo de Estação de Tratamento de Água em Mato Grosso do Sul**. Interações (Campo Grande), v. 17, p. 687-698, 2016.

OLIVEIRA, Samantha Ferreira Mendonça de. **Análise das características e propriedades do lodo de ETA da cidade de Palmeira dos Índios-AL na produção de massas cerâmicas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios – AL.

OLIVEIRA, S. F. M.; TENÓRIO, T. M.; MARQUES, S. K. J. Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios - Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas. **Revista Matéria**, v. 28, n. 4, 2023.

PEREIRA, Thereza Mylene de Moura. **Caracterização térmica (TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual) de hormônios bioidênticos (estriol e estradiol)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PETTERLE, Antônio R. *et al.* **Placas Cerâmicas contendo lodo de ETA e Cinza de Casca de Arroz: Correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura**. Química Nova, v. 41, p. 1117-1126, 2018.

PRADO FILHO, Hayrton Rodrigues do. **Tratamento e Disposição do Lodo de ETA e Impactos na Qualidade das Águas**. Qualidade Online, 14 jul. 2015. Disponível em: <https://qualidadeonline.wordpress.com/2015/07/14/tratamento-e-disposicao-do-lodo-de-eta-e-impactos-na-qualidade-das-aguas/>. Acesso em: 3 Fevereiro 2024.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. **Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no estado de Sergipe**. 2011. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

RICHTER, Carlos A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

ROSCHILD, Caroline Voser Pereira. **Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

SANTOS, Diego Hildebrando dos *et al.* **Influência da sílica e da temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo bayer**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/ITEC), Belém, Pará, 2019. Disponível em: [http://200.239.66.58/jspui/bitstream/2011/11261/1/Tese\\_InfluenciaSilicaTemperatura.pdf](http://200.239.66.58/jspui/bitstream/2011/11261/1/Tese_InfluenciaSilicaTemperatura.pdf)

SANTOS, Edinalva Alves Vital dos *et al.* **Impactos socioeconômicos e ambientais das indústrias de cerâmicas nordestinas: revisão bibliográfica.** II Congresso Nacional de Inovação e Desenvolvimento do Setor Cerâmico, 2017. Disponível em: [https://editorarealize.com.br/editora/anais/conidis/2017/TRABALHO\\_EV074\\_MD1\\_SA2\\_ID1600\\_26092017111858.pdf](https://editorarealize.com.br/editora/anais/conidis/2017/TRABALHO_EV074_MD1_SA2_ID1600_26092017111858.pdf). Acesso em: 12 Fevereiro 2024.

SANTOS, Lucas Avelino Reis; DE GOIS MICHELAN, Denise Conceição; JESUS, Taynar Mota. Verificação da produção de lodo de ETA em função da quantidade e da qualidade da água bruta. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, p. 235-258, 2021.

SILVA, Ana Maria. Utilização do tijolo cerâmico na construção civil. **Revista Tecnologia e Inovação em Engenharia Civil**, v. 2, n. 1, p. 96-105, 2019.

SILVA, Hugo Guilherme. **Avaliação e tratamento de oocistos de *Cryptosporidium spp.* e cistos de *Giardia spp.* presentes na água de lavagem dos filtros e no resíduo flutuado gerados pela tecnologia de ciclo completo com flotação por ar dissolvido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia, Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2018. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18062018-105134/publico/Dissertacao\\_Final\\_Hugo.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18062018-105134/publico/Dissertacao_Final_Hugo.pdf). Acesso em: 28 Janeiro 2024.

TARTARI, Rodrigo *et al.* **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/Mbkf84XhX4SPPZcsn9r74WL/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 03 Fevereiro 2024.

Tsutiya, M. T. **Abastecimento de água.** 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

ZORZAN, Lucas Ghion *et al.* **Propriedades e índices físicos de solos.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019. Disponível em: <https://dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/01/APOSTILA-PROPRIEDADES-E-%C3%8DNDICES-F%C3%8DSICOS-DE-SOLOS.pdf>. Acesso em: 15 Março 2024.