



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**  
**CAMPUS VIII – ARARUNA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

**TIAGO GABRIEL SANTANA E SILVA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSA COM  
INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**ARARUNA – PB**

**2022**

**TIAGO GABRIEL SANTANA E SILVA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COM  
INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Estadual da  
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Construção Civil.

**Orientador:** Prof. Me. Igor Souza Ogata.

**Coorientador:** Prof. Dr. Daniel Baracuy da  
Cunha Campos.

**ARARUNA – PB**

**2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586a Silva, Tiago Gabriel Santana e.  
Análise da resistência à compressão de argamassa com incorporação de lodo de estação de tratamento de água [manuscrito] / Tiago Gabriel Santana e Silva. - 2022.  
46 p. : il. colorido.

Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2022.  
"Orientação : Prof. Me. Igor Souza Ogata , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."  
"Coorientação: Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Tratamento de água. 2. Calcinação. 3. Resíduo. I. Título  
21. ed. CDD 363.72

TIAGO GABRIEL SANTANA E SILVA

ANÁLISE DA RESISTENCIA A COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COM  
INCORPORACAO DE LODO DE ESTACÃO DE TRATAMENTO DE AGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Estadual da  
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

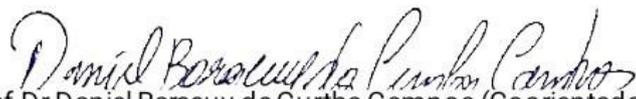
Área de concentração: Construção Civil.

21/09/2022

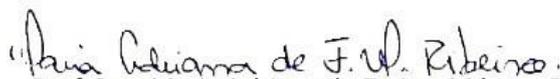
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Igor Souza Ogata (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos (Coorientador).  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais, pela dedicação, educação e oração, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por me guiar e iluminar, pela sabedoria para que pudesse realizar o sonho de ser engenheiro civil.

Aos meus pais, por toda dedicação e educação que me foi dado para que pudesse chegar nesse momento.

A minha esposa por toda compressão da minha ausência e pela força e apoio nos dias difíceis em que a luta ficou mais pesada.

Aos meus filhos, que apenas com um sorriso, me revigoravam e davam força para seguir na caminhada e buscar sempre o meu melhor.

Aos meus irmãos, familiares e amigos, por toda oração e torcida, em especial ao meu tio Antônio (*in memoriam*).

Ao meu orientador, Igor Souza Ogata, por toda compressão, dedicação e orientação a mim dada para a realização e conclusão desse trabalho.

À CAGEPA (Companhia de Água e Esgoto da Paraíba), por permitir a realização dessa pesquisa.

Aos funcionários da CAGEPA, em especial aos Agentes Operacionais, Lailton, Davi, Alexandre, François, Anderson, Agnelo, Menandro (*in memoriam*), Luciano, Edcarlos, Iremar e Radmaker que trocaram inúmeros plantões para que eu pudesse assistir as aulas, ao Subgerente de Tratamento Marcio Cordeiro e toda gerência do Regional do Brejo por todo apoio.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio, em especial a Júlio Dias, o qual serviu de inspiração por suas lutas e dificuldades enfrentadas por estar longe de seu país e de seus familiares.

A todos os professores que fizeram parte do meu aprendizado no curso, por toda dedicação e empenho em nos passar o máximo de conhecimentos.

Aos funcionários da UEPB, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

*“mas, como está escrito: Nem olhos viram, nem ouvidos ouviram, nem jamais penetrou em coração humano o que Deus tem preparado para aqueles que o amam.”*

1º Coríntios 2:9

## RESUMO

O lodo gerado após o tratamento de água para o consumo, na maioria das vezes, não tem uma disposição final adequada pelas companhias de saneamento no Brasil, sendo descartada indiscriminadamente na natureza, podendo gerar impactos ambientais tais como assoreamento, alteração na fauna e flora. Nesse sentido, o presente trabalho analisou a resistência à compressão de argamassa padrão, com substituição parcial do aglomerante por lodo calcinado, proveniente da estação de tratamento de água da cidade de Pirpirituba-PB. Inicialmente, foi feita a caracterização do lodo, onde foram realizados os ensaios da análise granulométrica e a densidade real. A calcinação foi feita em mufla a 700°C por uma hora e logo após, o destorroamento, realizou-se a análise granulométrica e executou-se o ensaio da finura do lodo calcinado. Também foi realizada a análise granulométrica do agregado miúdo e a finura do cimento. Posteriormente, foram produzidos os corpos de prova de argamassa padrão, e com substituição parcial do cimento por lodo proveniente da estação de tratamento de água, nos teores de 10 e 20%. Após a confecção, os mesmos ficaram em cura submersa por um período de 28 dias. Em seguida, os corpos de prova passaram pelo processo de ruptura para verificar a resistência a compressão, obtendo como valores de 27,341 MPa, 25,649 MPa e 21,931 MPa, respectivamente. Foi observado que o lodo pode ser aplicado como matéria prima na produção de argamassa, desde que sejam observadas as normas técnicas à sua utilização. O estudo demonstrou que o lodo se mostrou um material essencialmente fino tanto antes como após a calcinação. Considerando a grande quantidade de resíduo proveniente das estações de tratamento de água e do excedente despejado no meio ambiente, mais estudos devem ser conduzidos com a finalidade de verificar a utilização de lodo calcinado com uma finura maior e a substituição do agregado miúdo pelo lodo calcinado em argamassa.

**Palavras-Chave:** Tratamento de água. Calcinação. Resíduo.

## ABSTRACT

The sludge generated after the treatment of water for consumption, in most cases, does not have an adequate final disposal by the sanitation companies in Brazil, being indiscriminately discarded in nature, which can generate environmental impacts such as silting, alteration in fauna and flora. In this sense, the present work analyzed the compressive strength of standard mortar, with partial replacement of the binder by calcined sludge, from the water treatment plant in the city of Pirpirituba-PB. Initially, the characterization of the sludge was carried out, where the granulometric analysis and the actual density were carried out. The calcination was carried out in a muffle furnace at 700°C for one hour and soon after, the crumbling, granulometric analysis was performed and the calcined sludge fineness test was performed. The granulometric analysis of the fine aggregate and the fineness of the cement were also carried out. Subsequently, specimens of standard mortar were produced, with partial replacement of cement by sludge from the water treatment plant, at levels of 10 and 20%. After making, they were submerged curing for a period of 28 days. Then, the specimens went through the rupture process to verify the compressive strength, obtaining values of 27.341 MPa, 25.649 MPa and 21.931 MPa, respectively. It was observed that the sludge can be applied as a raw material in the production of mortar, provided that the technical standards for its use are observed. The study showed that the sludge proved to be an essentially fine material both before and after calcination. Considering the large amount of waste from water treatment plants and the surplus dumped into the environment, further studies should be conducted in order to verify the use of calcined sludge with a greater fineness and the replacement of the fine aggregate by the calcined sludge in mortar.

**Keywords:** Water treatment. Calcination. Residue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema convencional de tratamento de água-----	18
Figura 2 – Fluxograma das propriedades da argamassa -----	23
Figura 3 – Fluxograma da parte de tratamento e caracterização do lodo de ETA -----	28
Figura 4 – Fluxograma da caracterização do agregado miúdo e aglomerante -----	29
Figura 5 – Fluxograma da produção e caracterização da argamassa -----	29
Figura 6 – Estação de tratamento de água de Pirpirituba-PB -----	30
Figura 7 – Mapa da localização da ETA de Pirpirituba-PB e da barragem de Canafístula I--	31
Figura 8 – Curva granulométrica do lodo <i>in natura</i> -----	36
Figura 9 – Curva granulométrica do lodo calcinado -----	37
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo-----	39
Figura 11 – Resistência média da compressão axial das argamassas aos 28 dias -----	40
Figura 12 – Porcentagem da redução da resistência em função do teor de lodo calcinado no traço -----	41

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco .....	25
Quadro 2 – Classificação das areias quanto ao módulo de finura .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidades de materiais -----	33
Tabela 2 – Consumo de materiais das argamassas -----	33
Tabela 3 – Resultado da análise granulométrica do lodo <i>in natura</i> -----	35
Tabela 4 – Densidade real do lodo <i>in natura</i> -----	36
Tabela 5 – Resultado da análise granulométrica do lodo calcinado -----	37
Tabela 6 – Resultado da finura do lodo calcinado -----	37
Tabela 7 – Resultado da análise granulométrica do agregado miúdo -----	38
Tabela 8 – Resultado da finura do cimento -----	39
Tabela 9 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias -----	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
ETA	Estação de Tratamento de Água
OMS	Organização Mundial da Saúde
EUA	Estados Unidos da América
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
TGA	Ensaio de Termogravimetria
DSC	Ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistema de tratamento de água</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Lodo em estação de tratamento de água</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Disposição final do lodo de estação de tratamento de água</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Impactos ambientais do lodo</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Reaproveitamento do lodo na construção civil</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>Argamassa</b>	<b>23</b>
<b>2.6.1</b>	Trabalhabilidade	24
<b>2.6.2</b>	Consistência e plasticidade	24
<b>2.6.3</b>	Densidade de massa e teor de ar incorporado	25
<b>2.6.4</b>	Absorção de água	25
<b>2.6.5</b>	Resistência mecânica	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Coleta do lodo de estação de tratamento de água</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização do lodo <i>in natura</i></b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Caracterização do lodo calcinado</b>	<b>32</b>
<b>3.4</b>	<b>Agregado miúdo e cimento Portland</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>Produção da argamassa</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos materiais da argamassa</b>	<b>35</b>
<b>4.1.1</b>	Lodo <i>in natura</i>	35
<b>4.1.2</b>	Lodo calcinado	36
<b>4.1.3</b>	Agregado miúdo e cimento Portland	38

<b>4.2</b>	<b>Resistência a compressão axial da argamassa -----</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO -----</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS -----</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda de água com qualidade e quantidade suficiente para atender as necessidades humanas, é um dos maiores desafios diante de um cenário de aumento populacional verificado em todo o mundo (BITENCOURT, 2016). Conseqüentemente, o Brasil não foge dessa regra, pois segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) (IBGE, 2017) em 2017 havia 59,8 milhões de economias residenciais ativas abastecidas no país, um crescimento de 32% em relação a 2008 (45,3 milhões).

Para manter essas economias abastecidas são necessárias estações de tratamento de água (ETA), tornando a água potável e, ao mesmo tempo, gerando resíduos conhecidos como lodo de ETA (BUSELATTO et al., 2019), que de acordo com a NBR 10.004/2004, podem ser classificados como resíduos sólidos.

O descarte final de lodo de ETA configura uma operação complexa com implicações técnicas, econômica e social. No Brasil os lodos de ETA têm sido, frequentemente, descartados indiscriminadamente na natureza, principalmente em rios. Em contrapartida, a nova legislação ambiental brasileira, mais restritiva, obriga as empresas a destinar adequadamente qualquer resíduo poluente gerado (RODRIGUES; HOLANDA, 2013).

Esses resíduos sólidos são gerados na indústria de abastecimento da água, quando utilizado o tratamento completo ou convencional - constituído das unidades operacionais de coagulação, floculação, decantação e filtração -, pois o uso de coagulantes, agregam os sólidos presentes na água, gerando uma massa pastosa que é chamada de lodo (PROSAB, 1999). Segundo Maciel e Machado (2015), esses sólidos são coletados nas operações de decantação e filtração, representando de 0,3% a 1% do volume de água tratada (BUSELATTO et al., 2019).

Dessa maneira, o lançamento do lodo diretamente nos corpos d'água pode introduzir toxicidade aos organismos aquáticos e comprometer a qualidade das águas e sedimentos destes ambientes, pois além de conterem metais como ferro e manganês, ainda possuem metais pesados - principalmente o alumínio - e altas concentrações de sólidos, turbidez e matéria orgânica. A presença dessas substâncias pode causar assoreamento, alterações estéticas, além de distúrbios na composição química e biológica do corpo receptor (MACIEL; MACHADO, 2015).

Além dos poluentes supracitados, o lodo de ETA possui componentes encontrados também no cimento Portland, a exemplo do Cálcio, Silício, Alumínio e Ferro, sendo um indício de que este material pode ser empregado na produção de argamassas, artefatos e blocos de concreto para a construção civil, substituindo, em certas proporções, as matérias-primas

normalmente utilizadas. Ademais, considerando que o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais, demandando de 20% a 50% do total de insumos extraídos, a reciclagem de lodo em concretos e argamassas pode ser uma alternativa para a diminuição de impactos ambientais causados nesse processo de extração (HOPPEN et al., 2005).

Sendo assim, tendo em vista a necessidade de adequação, por parte das companhias de saneamento básico, à legislação que proíbe o descarte inadequado do lodo e à busca por soluções sustentáveis e viáveis no âmbito técnico e financeiro, quanto à destinação dos rejeitos oriundos do tratamento de água, é necessário estudos que ampliem as alternativas de disposição final adequada deste lodo.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o lodo proveniente de ETA para aproveitamento na substituição parcial do aglomerante na confecção de argamassa.

## **1.1 Objetivo geral**

Analisar a resistência a compressão de argamassa padrão com substituição parcial do aglomerante por lodo calcinado de ETA.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar a caracterização física do lodo antes e após a calcinação;
- Caracterizar fisicamente os materiais empregados na argamassa (agregado miúdo e cimento) por meio de ensaios determinados pelas normas vigentes;
- Verificar a resistência a compressão axial na argamassa padrão e com a incorporação de 10% e 20% de lodo calcinado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistema de tratamento de água

Todo o processo de adequação da água bruta, proveniente de mananciais, para o consumo humano é realizado na unidade operacional da ETA (BITENCOURT, 2016; RODRIGUES, 2012). Nesse tratamento, a água passa por operações unitárias para transformar-se em água potável, ou seja, que está em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), sendo convencionalmente realizadas as operações unitárias de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

E especificamente no Brasil, essas ETA's são frequentemente do tipo convencional, pois segundo a PNSB 2017, do volume de água tratada e distribuída no Brasil, 75,1% passam por estações de tratamento convencional (IGBE, 2017).

A coagulação é a operação unitária que consiste na formação dos coágulos através das mudanças físico-químicas produzidas pela dispersão de um coagulante solúvel que se hidrolisa em partículas carregadas positivamente, anulando as cargas negativas dos colóides (LIMA, 2016). Essa atividade é influenciada por fatores como temperatura, pH, alcalinidade, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica e tamanho das partículas (PEREIRA, 2011), necessitando, conseqüentemente, de bastante atenção na sua realização.

O sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado nesse processo e que por meio de sua carga, é capaz de provocar a desestabilização de partículas. Outras substâncias também podem ser usadas como o cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico e polímeros sintéticos (LIMA, 2016), mas nenhum deles se compara ao sulfato de alumínio quanto ao custo-eficiência.

Após a coagulação, ocorre o processo de floculação, que consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos), de modo a formar outras maiores denominadas de flocos, sendo, portanto, suscetíveis a remoção por decantação (ou flotação) e filtração (PEREIRA, 2011).

A finalidade dessa etapa é apenas permitir o contato entre os coágulos, aumentando o tamanho dos flocos e conseqüentemente sua massa e densidade, o que acelera o processo de sedimentação, preparando a água para o processo subsequente de decantação. (HELLER; PÁDUA, 2010).

A decantação é uma das técnicas mais antigas e simples de clarificação da água e utiliza da ação da força de gravidade sobre as impurezas, promovendo a sedimentação delas no

fundo da unidade, e resultando na clarificação do sobrenadante (HELLER; PÁDUA, 2010). Essas impurezas são os flocos formados nas operações unitárias anteriores que são mais densas que a água e pela ação da gravidade apresentam um movimento descendente, depositando-se no fundo e formando um lodo (PEREIRA, 2011).

As partículas que não são removidas na decantação, sejam por seu pequeno tamanho ou por serem de densidade muito próxima à da água, deverão ser encaminhadas para a filtração (LIMA, 2016).

Lima (2016) considera a filtração como a operação unitária mais importante na cadeia de tratamento de água. Pereira (2011), por sua vez, define filtração como o processo que consiste na remoção das partículas suspensas e coloidais e dos microrganismos presentes na água que permeia através de um meio filtrante. É considerado como um processo final de remoção de impurezas na ETA, realizando uma espécie de "polimento" na água, logo, é o principal responsável pelo cumprimento do padrão de potabilidade.

Na filtração as impurezas são retidas no meio filtrante sendo necessária a lavagem dos filtros após certo período, geralmente, feita por meio da introdução de água com alta velocidade no sentido ascensional. A água utilizada na lavagem é descartada em cursos de água, mas também pode ser retornada ao início do processo de tratamento desde que haja uma avaliação da qualidade da água reusada (HELLER; PÁDUA, 2010).

Após todo o processo de remoção de impureza, ocorre uma operação unitária de caráter corretivo e preventivo, a desinfecção. Corretivamente, a desinfecção objetiva a eliminação de organismos patogênicos que possam estar presentes na água, incluindo bactérias, protozoários e vírus. E preventivamente, é utilizada para manter um residual do desinfetante na água fornecida à população, para atuar preventivamente, caso ocorra alguma contaminação na rede de distribuição (HELLER; PÁDUA, 2010).

Os agentes desinfetantes podem ser físicos caracterizados pela aplicação de calor, irradiação e luz ultravioleta. Estes também podem ser químicos quando utilizam oxidantes a base de cloro, bromo, iodo, ozônio, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio e os íons metálicos prata e cobre (PEREIRA, 2011).

## **2.2 Lodo em estação de tratamento de água**

Segundo Alvarenga (2019) e Rodrigues (2012), o tratamento empregado pela grande maioria das ETAs brasileiras é o sistema do tipo convencional (Figura 1), o que, basicamente

gera dois tipos de resíduo, o lodo retirado na lavagem dos filtros e o lodo resultante da limpeza dos decantadores.



Fonte: Roschild, (2018).

Para Rodrigues (2012) e Souza (2010), a quantidade total de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60% a 95 % da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, sendo que o restante é oriundo do processo de filtração. Por sua vez, Pereira (2011) afirma que a porcentagem de lodo removido numa ETA varia de 0,2% a 5% do volume de água tratada, mas isso depende de onde este é originado - decantadores, flotores ou filtros - e da técnica e método adotado para remoção do lodo.

A quantidade e qualidade desses resíduos apresentam propriedades distintas, e depende de fatores como a qualidade da água bruta a ser tratada -cor, turbidez, sólidos em suspensão-, do tipo e dosagem dos produtos químicos utilizados, da frequência de remoção de lodo dos decantadores e da frequência da lavagem dos filtros (ALVARENGA, 2019; RODRIGUES, 2012; SOARES, 2013).

Lima (2016) relata que diante da variação da qualidade da água bruta devido ao ciclo hidrológico, o lodo apresenta um aumento da matéria orgânica e decréscimo do conteúdo mineral no período chuvoso e o inverso no período de estiagem. Complementarmente, Alvarenga (2019) afirma essas variações nas características da água provoca modificações significativas nas quantidades produzidas de lodo, com maior produção no período chuvoso.

Os Lodos gerados caracterizam-se por possuir grande umidade, geralmente maior que 95%, estando de maneira geral, sob forma fluida e ser formado basicamente de partículas coloidais que apresentam tamanho que varia de 1nm a 1mm, conferindo à água cor e turbidez (LIMA, 2016). A consistência desse lodo é determinada pela concentração de sólidos, que se apresenta como líquido nos pontos de geração até uma consistência similar a argila, utilizada

na produção de cerâmica, na torta obtida em centrifugas, ou ainda com material quebradiço, nos leitos de secagem (LIMA, 2016).

### **2.3 Disposição final do lodo de estação de tratamento de água**

Segundo Hopen et al. (2005) e Souza (2010), a disposição final do lodo é um dos trabalhos mais difíceis para o serviço de tratamento de água, pois envolve custos de manuseio, transporte e restrições ambientais. Dentre as alternativas disponíveis para a disposição do material, é possível destacar o lançamento em cursos d'água, aplicação no solo, disposição em aterro sanitário, incineração, aproveitamento na fabricação de cimento e tijolos, reciclagem em matriz de concreto e aplicação na pavimentação de estradas, tijolos refratários e como agente plastificador em cerâmica (BITENCOURT, 2016; BUSELATTO et al., 2019; HOPPEN et al., 2005; RODRIGUES, 2012).

Os lodos lançados de forma irregular em corpos d'água, pode provocar diversas alterações prejudiciais ao meio ambiente, dentre estas a redução do oxigênio dissolvido no corpo d'água receptor - devido a decomposição da matéria orgânica contida no resíduo -, o aumento da concentração de metais - a exemplo do alumínio, ferro e manganês - e a conseqüente destruição da fauna e flora (SOUZA, 2010). Além disso, pode também ocasionar o assoreamento, mudança de cor e aumento da quantidade de sólidos em suspensão (RODRIGUES, 2012).

Para Souza (2010), o lançamento desses resíduos em corpos d'água pode ser uma opção de disposição final viável caso o corpo d'água possua capacidade de absorção da carga orgânica lançada ou o mesmo não seja destinado ao abastecimento público. Contudo, devido a presença de metais nesse lodo, a possibilidade de incorporação tornasse prejudica.

O lodo de ETA também pode ser depositado no solo, em local adequado como um aterro sanitário, que garante um confinamento seguro no que diz respeito à poluição ambiental e à saúde pública, pois este é um empreendimento fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas (LIMA, 2016).

O despejo do lodo de ETA em aterro sanitário consiste em um depósito controlado do lodo em células previamente impermeabilizadas e cobertas com solo impermeável. Este depósito pode ser realizado em aterro exclusivo ou aterros de resíduos domésticos (SOUZA, 2010). Neste último caso, o lodo deve estar desidratado, não contendo água livre e deve ter uma quantidade de sólidos inferior a 25% (PEREIRA, 2011).

O aterro sanitário pode ser uma alternativa viável para a disposição final do lodo, principalmente em cidade de pequeno e médio porte, com disponibilidades de áreas economicamente acessíveis (HOPPEN, 2005; PEREIRA, 2011). Entretanto, Souza (2010), não acredita nesta alternativa como meio de disposição, em razão do alto custo de implantação e as restrições quanto a umidade máxima para recebimento do lodo. Nos EUA, dentro das práticas de disposição do lodo, o aterro para resíduos domésticos é adotado em aproximadamente 20% das cidades com até 100.000 habitantes (HOPPEN, 2005).

Pereira (2011) diz que mesmo selecionando outras alternativas de disposição de lodo, é importante prever o emprego de aterros sanitários como opção de armazenamento dos resíduos de forma emergencial, uma vez que pode haver necessidade de sua utilização em casos de variações bruscas na quantidade ou qualidade dos lodos, a fim de absorver a produção excedente, e nas eventuais contingências referentes a restrições no tráfego de veículos pesados na área ou eventual paralisação da alternativa escolhida em função de restrições de mercado, restrições sazonais ou impedimentos legais e institucionais. Além disso, Lima (2016) afirma que a destinação final dos resíduos de ETAs em aterros sanitários é uma alternativa que requer bastante precaução dado que a mistura do lodo com resíduo doméstico pode causar impactos inesperados.

O aproveitamento do lodo de estação de tratamento de água no solo pode trazer benefícios, tais como a melhoria estrutural do solo, a adição de traços minerais, o ajuste do pH, o aumento da capacidade de retenção de água e a melhoria das condições de aeração (PEREIRA, 2011; SOUZA, 2010).

Todavia, a aplicação sem controle pode levar hidróxidos de alumínio e ferro presentes no lodo a reagirem e a indisponibilizarem o fósforo no solo ou, até mesmo, causar a toxicidade do alumínio com pH superior a 6,5, o carregamento do nitrato do solo e a contaminação da água subterrânea (SOUZA, 2010). Além disso, embora a concentração de alumínio no lodo de ETA que utilizam o sulfato de alumínio como coagulante se assemelhar à concentração de alumínio em solos, não é recomendável para disposição do resíduo no solo a presença de alumínio no lodo, em altas concentrações, pois a ligação desse metal com o fósforo presente na terra pode limitar o crescimento das plantas. Para isso se utiliza um limite de aplicação de lodo de sulfato de alumínio a um máximo de 2,2 kg/m<sup>2</sup> a 4,4 kg/m<sup>2</sup> (PEREIRA, 2011).

Um método alternativo de lançamento de lodo de ETA bastante difundido em alguns países da Europa e nos Estados Unidos é a disposição em estações de tratamento de esgoto (ETE), sendo lançado por meio de rede coletora de esgoto ou transportado em caminhão

(LIMA, 2016). Segundo Pereira (2011), 24% da disposição final do lodo nos Estados Unidos é através de rede de esgoto.

O lançamento direto do lodo na rede de esgoto sanitário pode ser considerado um dos métodos mais baratos de disposição final para este resíduo (SOUZA 2010). Contudo, é apenas um modo de transferir a gestão do lodo gerado na ETA para a administração da ETE (LIMA, 2016).

Complementando o anteriormente exposto, Soares (2013) avalia a utilização do resíduo de uma ETA que aplicava sulfato de alumínio ao simular a disposição desse resíduo como coagulante em uma ETE. Pela execução dos ensaios em colunas de sedimentação foi concluído que após 2 horas de sedimentação houve maior redução na concentração dos parâmetros cor, turbidez, sólidos suspensos totais, demanda química de oxigênio, coliformes totais e *Escherichia coli* nas colunas de sedimentação que receberam o lodo que nas colunas sem esta adição, reforçando que tal resíduo é capaz de auxiliar no tratamento de águas residuais.

Lima (2016) adverte que ao lançar o lodo na rede de esgoto, as ETEs deverão ser preparadas para o aumento do volume de lodo a ser processado em seu sistema de desidratação, bem como nos seus custos de transporte e disposição, apesar de se tratar de uma alternativa econômica final.

## **2.4 Impactos ambientais do lodo**

Segundo Almeida (2020), existe uma grande preocupação em dispor corretamente o lodo das ETAs derivado do potencial tóxico desses resíduos que dependem, efetivamente, do teor de metais presentes, características físico-químicas resultantes das reações submetidas no processo de tratamento, forma e tempo de retenção, características do curso d'água e do coagulante. Cádmio, chumbo, cobre, cromo, manganês, níquel, zinco, e o próprio alumínio são exemplos de metais com potenciais de toxicidade e esses podem interagir e influenciar no procedimento de tratamento, distribuição e reutilização desse resíduo.

O lodo das ETAs sendo despejado *in natural*, sem nenhum tratamento prévio, em cursos d'água podem vir a causar toxidade aos organismos aquáticos e, por conseguinte, a degradação destes meios, pois além de elevados teores de metais, esse resíduo possui consideradas concentrações de sólidos, alta turbidez e DQO, que podem originar bancos de lodo, assoreamento, alterações na cor e na composição química e alterações biológicas no corpo aquático (PEREIRA, 2011). Além de que, de acordo com Freitas et al. (2021), elevadas

concentrações de alumínio no corpo humano põem em risco a saúde da população, o que torna esta suscetível ao Alzheimer ou a uma desordem na capacidade de memorizar.

## **2.5 Reaproveitamento do lodo na construção civil**

Diante da quantidade de lodo gerada e do impacto ambiental causado pelo descarte desses resíduos, vários estudos foram realizados para aproveitar o lodo de ETA em outros setores da economia, inclusive na incorporação em materiais da construção civil em função da semelhança com materiais argilosos, como é o caso das cerâmicas vermelhas e em matrizes de argamassa e concreto. Essa aplicação pode reduzir a utilização de recursos naturais como areia e argila e minimizar os impactos dos rejeitos produzidos pelas ETA's. Um dos maiores empecilhos para essa utilização é a viabilidade econômica e a aceitação desse novo produto em detrimento dos convencionais (PEREIRA, 2011).

As características dos materiais utilizados na fabricação de tijolos são, em sua maioria, similares às características físicas e químicas dos resíduos de ETA, sendo estes compostos por argilas, silte, areia, coagulantes e matéria orgânica. O procedimento de sua adição pode acontecer durante o processo de fabricação dos tijolos ou ainda, indiretamente, na própria jazida onde a argila é retirada (DRUMOND, 2013).

Como exemplo desse reaproveitamento, Ramirez (2015) analisou o lodo de ETA, úmido e calcinado à 900°C, na aplicação em concreto e verificou que o lodo úmido possui influência negativa na resistência à compressão do concreto, sendo que quanto maior o teor de substituição menor o valor atingido. Por sua vez, nos concretos produzidos com lodo calcinado, houve uma melhoria de 20% nas propriedades mecânicas do concreto.

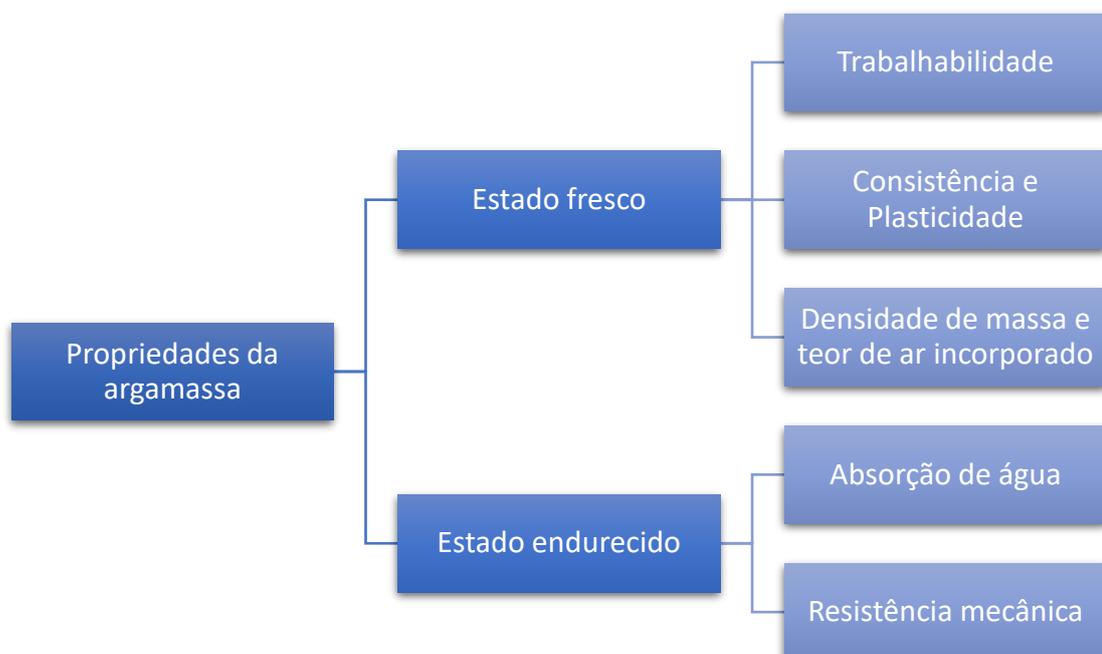
Em outra situação Ruviano et al. (2020) avaliaram o comportamento de pastas e argamassas com a incorporação de 10% e 25% de lodo de ETA calcinado, em relação às propriedades mecânicas, tendo sido possível viabilizar a incorporação de lodo de ETA calcinado em misturas cimentícias. Eles observaram que para a resistência à compressão axial, é possível a substituição de até 25% de cimento Portland por lodo de ETA calcinado sem perdas significativas na resistência das pastas. Considerando a resistência à tração na flexão das argamassas, foi possível a substituição de até 10% sem perdas.

## 2.6 Argamassa

Segundo Fiorito (2009), as argamassas são definidas como sendo a mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. São utilizadas em obras sendo normalmente compostas de areia natural lavada e os aglomerantes são em geral o cimento Portland e cal hidratada. A NBR 13281/2005, que trata dos requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos, define argamassa como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). São classificadas de acordo com a sua aplicação em: assentamento, revestimento de paredes e tetos, uso geral, reboco, decorativa em camada fina e em monocamada.

O desempenho das argamassas é analisado no estado fresco e no endurecido, como mostrado no fluxograma (Figura 2), e cada um desses tem suas propriedades. Para Batalha (2012) e Santos (2018), na caracterização das propriedades das argamassas, é necessário considerar sua interação com o material de contato, tendo em vista que a argamassa possui comportamentos diferentes com base no material em que é aplicada.

**Figura 2 – Fluxograma das propriedades da argamassa**



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.6.1 Trabalhabilidade

Conforme Almeida (2020), a trabalhabilidade é uma propriedade da argamassa em seu estado fresco e indica a facilidade de manuseio da argamassa em relação à sua mistura, ao seu transporte e aplicação. Santos (2018) acrescenta que essa propriedade depende da combinação de outras propriedades tais como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a massa específica e a adesão inicial.

Almeida (2020) e Santos (2018) destacam que a argamassa pode ser considerada trabalhável quando esta for penetrada facilmente pela colher de pedreiro, sem que esteja fluida, além disso, permanece coesa durante seu transporte, não endurece ou adere na ferramenta de manuseio, permanece plástica durante o tempo de aplicação, além de ser espalhada com facilidade na base de aplicação.

### 2.6.2 Consistência e plasticidade

Consistência ou fluidez da argamassa é definida como o ajuste da quantidade de água de amassamento na mistura durante seu estado fresco. As argamassas podem ser classificadas em seca, plástica ou fluida ao adicionar mais ou menos água, além disso, depende também da quantidade de pasta aglomerante existente ao redor dos agregados (BATALHA, 2012). Segundo Almeida (2020), a consistência é o resultado das ações das forças internas, viscosidade e coesão e ângulo de atrito externo que propiciam a alteração da forma da argamassa.

A plasticidade pode ser considerada como a capacidade da argamassa em seu estado fresco manter-se deformada após a diminuição das tensões responsáveis por essa deformação (CUNHA, 2019; ALMEIDA, 2020; SANTOS, 2018). Os tipos e as quantidades de aglomerantes, o tempo e a intensidade de mistura influenciam a plasticidade, além da presença de aditivos. Conforme a finalidade e forma da aplicação da argamassa, a plasticidade adequada para cada mistura exige uma quantidade ótima de água, possibilitando uma consistência ótima, logo, consistência e plasticidade são os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade. Para conseguir a plasticidade na argamassa, deve-se usar aditivos, materiais finos, fibras e polímeros, dependendo da especificidade do uso (BATALHA, 2012).

### 2.6.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa expressa a relação entre a massa do material e o seu volume (CUNHA, 2019). É uma propriedade que pode variar de acordo com os materiais empregados nas argamassas, assim como, com o teor de ar incorporado, que se refere à fração de ar incorporada à mistura. Assim, as argamassas em seu estado fresco e com menor massa específica, são mais leves, e como resultado, tem-se uma mistura trabalhável durante um período mais longo (CARASEK, 2010). O Quadro 1 mostra a classificação das argamassas quanto a densidade.

**Quadro 1 - Classificação das argamassas em relação à massa específica no estado fresco**

Argamassa	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Principais agregados utilizados	Aplicações
Leve	$m < 1,40$	Vermiculita, perlita e argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 < m \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	$m > 2,30$	Brita (sulfato de bário)	Blindagem e radiação

Fonte: Carasek (2010).

### 2.6.4 Absorção de água

Santos (2018) cita que a absorção de água por capilaridade é a propriedade que associa a capacidade que a água tem de percolação na camada de revestimento em seu estado endurecido, tanto quando a água está no seu estado líquido quanto no estado de vapor, sendo que isso torna-se possível pelo fato da argamassa ser um material poroso.

A ligação entre porosidade e a relação água/cimento é, seguramente, o fator mais importante para essa propriedade, porque, independentemente de outros fatores, afeta a porosidade da matriz da argamassa de cimento e da zona de transição na interface entre a matriz e o agregado miúdo (BATALHA, 2012).

### 2.6.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica de uma argamassa em seu estado endurecido é a capacidade da mesma suportar esforços mecânicos de diversas origens, tensões simultâneas denominadas como tração, compressão e cisalhamento (ALMEIDA, 2020).

De acordo com Cunha (2019), diferentemente dos concretos, a resistência à compressão das argamassas não é tratada como uma propriedade de essencial importância, mas sim o controle da sua água para garantir a trabalhabilidade. Contudo, as argamassas devem ter resistência suficiente para suportar os esforços aos quais a parede será exposta, mesmo que altos valores de resistência não resultem necessariamente numa parede com maior resistência.

A resistência à compressão possibilita avaliar, de forma indireta, a resistência de uma argamassa e suas diversas ações mecânicas. A resistência tem início com o endurecimento e aumenta continuamente com o tempo (SANTOS, 2018).

É importante frisar que a seleção do traço das argamassas influencia nessa propriedade. De maneira que, é possível conseguir a resistência à compressão, tração e rigidez maior, com uma quantidade maior de cimento, no entanto, com a relação água/cimento (a/c) maior, menor será a resistência à compressão e à tração das argamassas convencionais (SANTOS, 2018).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

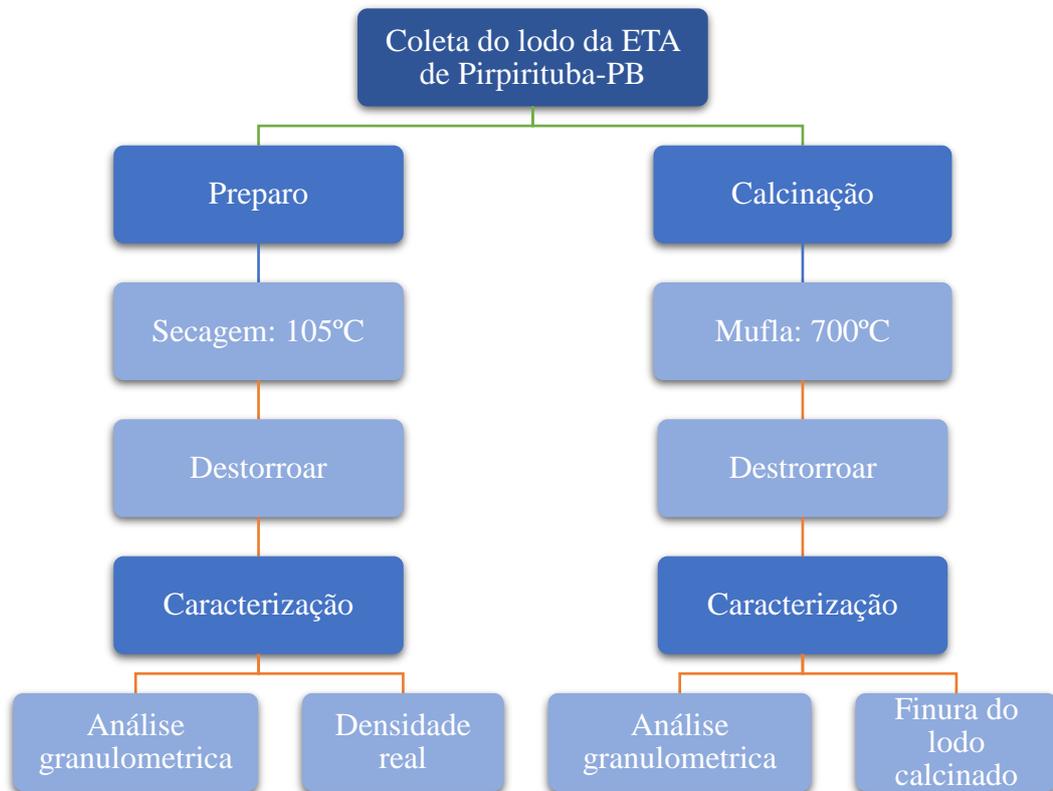
Dependendo das suas peculiaridades, podem existir diversos tipos de pesquisas científicas, sendo classificadas quanto a natureza, aos seus objetivos, aos procedimentos técnicos e a forma de abordagem do problema. Quanto a natureza a pesquisa é classificada como aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos, nesse caso, a utilização do lodo de estação de tratamento de água calcinado em substituição ao cimento na argamassa com disposição final do resíduo.

Referente aos procedimentos técnicos, a metodologia é classificada como experimental, uma vez que tem a finalidade de procurar refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob controle, que no seguinte estudo foi o de incorporar diferentes teores de lodo oriundo de estação de tratamento de água, em substituição parcial do cimento pelo mesmo. Acerca da abordagem do problema é classificada como quantitativa, pois nessa classificação considera que tudo pode ser quantificável, e nesse estudo foram utilizados os resultados dos experimentos para analisá-los.

No estudo foram desenvolvidos ensaios laboratoriais como análise granulométrica, densidade real, finura do cimento e do lodo calcinado e resistência a compressão axial da argamassa, além de análise e discussão dos resultados obtidos.

A metodologia foi dividida em três etapas com a finalidade de separar a coleta, preparo e caracterização do lodo, a caracterização dos materiais que compõem a argamassa e a produção e caracterização da argamassa. Na primeira etapa, apresentada no fluxograma (Figura 3), é representado todo o processo de preparo, tratamento e caracterização do lodo. Inicialmente, após a coleta do lodo na ETA de Pirpirituba-PB, com uma parte do lodo foi realizada a secagem, destorroamento e caracterização através da análise granulométrica e densidade real, e com a outra parte do lodo, foi realizado o tratamento com a calcinação em mufla, destorroamento e caracterização através da análise granulométrica e realizado o ensaio de finura.

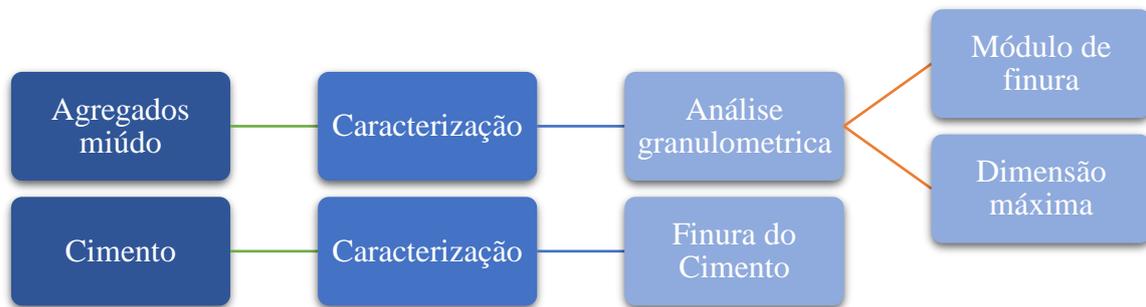
**Figura 3 – Fluxograma da parte de tratamento e caracterização do lodo de ETA**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na segunda etapa, (Figura 4), foi caracterizado o agregado miúdo, através das análises granulométrica, bem como foi caracterizado também o aglomerante, através do ensaio de finura do cimento. A determinação da composição granulométrica do agregado miúdo é essencial, uma vez que, ela pode influenciar diretamente no desempenho das argamassas principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, compacidade e resistência aos esforços mecânicos, do mesmo modo que, a finura do cimento influencia nas diversas propriedades da argamassa, tais como: resistência à compressão axial, trabalhabilidade, impermeabilidade e exsudação.

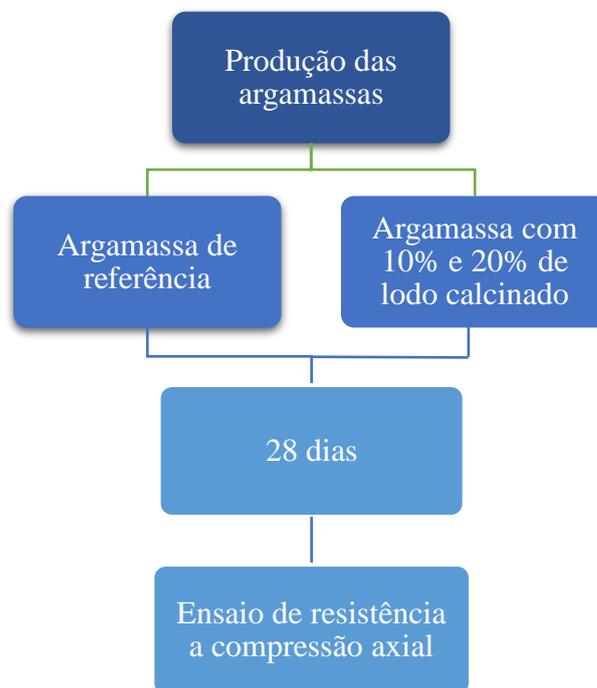
**Figura 4 – Fluxograma da caracterização do agregado miúdo e aglomerante**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A terceira etapa foi a produção e caracterização da argamassa quanto a resistência à compressão axial. A Figura 5, apresenta o fluxograma com a confecção das argamassas substituindo diferentes porcentagens do aglomerante pelo lodo de ETA calcinado e logo após os 28 dias de cura, procedeu com o ensaio de resistência a compressão.

**Figura 5 – Fluxograma da produção e caracterização da argamassa**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 Coleta do lodo de estação de tratamento de água

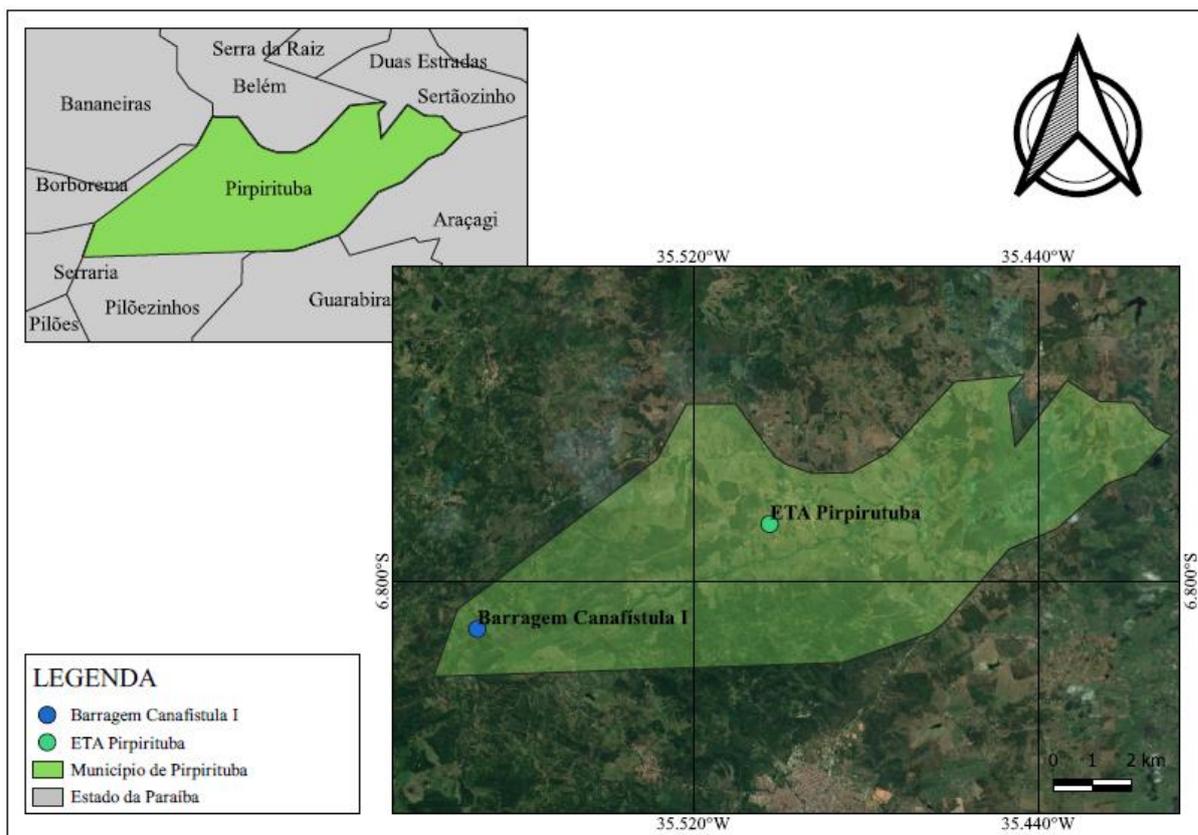
O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Água de Pirpirituba – PB, conforme apresenta a Figura 6, cujo abastecimento é realizado pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA). O volume tratado na ETA é em média 80 m<sup>3</sup>/h para uma população de 10.590 habitantes (IGBE, 2021). O processo de tratamento da água é do tipo convencional, onde são realizadas as etapas de aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. A água bruta é captada do manancial de Canafístula I, mostrado no mapa (Figura 7), com capacidade de armazenar 4.666.188 m<sup>3</sup>, localizado também no município de Pirpirituba – PB, sendo que este manancial atende outros municípios como Duas Estradas, Sertãozinho, Lagoa de Dentro e Serra da Raiz. O lodo gerado na ETA provém da lavagem dos filtros e dos decantadores. Os filtros são limpos duas vezes por dia, já a limpeza dos decantadores dependem da quantidade gerada de sedimentos, variando entre 2 e 4 meses.

**Figura 6 – Estação de tratamento de água de Pirpirituba-PB**



Fonte: Google Earth, 2018

**Figura 7 – Mapa da localização da ETA de Pirpirituba-PB e da barragem de Canafistula I**



Fonte: Google Earth, 2022

### 3.2 Caracterização do lodo *in natura*

Para a caracterização do lodo *in natura* foram executados os ensaios de análise granulométrica e densidade real. A análise granulométrica seguiu a norma DNER-ME 083/98, realizando a secagem do lodo em estufa a 105°C por 24 horas, após isso, o lodo foi destorroado e quarteado, resultando em uma amostra de 1.000 g. Em seguida, de forma manual, foi realizado o peneiramento na série normal de peneiras, anotou-se o peso do material retido em cada uma das peneiras e realizaram-se os cálculos para analisar módulo de finura e diâmetro máximo.

Por outro lado, a densidade real foi realizada com base na norma DNER-ME 093/94, tendo sido executado realizando a secagem de aproximadamente de 10 g de lodo em estufa a 105°C, logo após foi pesado o picnômetro vazio e com a amostra. Em seguida, colocou-se água destilada no picnômetro, aqueceu por 15 minutos e deixou esfriar à temperatura ambiente. Posteriormente, completou com água destilada, colocou em banho de água à temperatura ambiente por 15 minutos, colocou a rolha, anotou a temperatura e pesou novamente. Por fim, após retirar o material e lavá-lo, encheu-se completamente com água destilada, colocou-se no

banho de água a temperatura ambiente, durante 15 minutos, colocou a rolha perfurada, anotou a temperatura do banho e pesou. O resultado da densidade real foi obtido pela média de duas determinações e o valor foi referido à água à temperatura de 20°C.

### 3.3 Caracterização do lodo calcinado

O lodo passou pelo processo de calcinação, com objetivo de obter uma granulometria fina e assim substituir parcialmente o cimento pelo mesmo, na confecção de argamassa padrão. Nessa perspectiva foi realizado o mesmo tratamento que Ruviaro et al. (2020), estudando lodo proveniente de uma ETA localizada em Venâncio Aires – RS. Os autores avaliaram a influência da incorporação do lodo calcinado em pasta e argamassa e na determinação da temperatura de calcinação, aplicaram o ensaio de termogravimetria, onde foi aquecida uma amostra até 1000°C e após os resultados da análise termogravimétrica (TGA) e a curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC), foi escolhida a temperatura de 700°C uma vez que garante a desidroxilação completa e está bem abaixo da temperatura de recristalização observado no DSC.

Sendo assim, o processo de calcinação foi realizado em três etapas. Primeiro foi procedido o pré-aquecimento (10°C/min) até atingir 700°C, depois foi mantida a temperatura constante de 700°C por um período de 1 h e por fim o resfriamento lento, em que o material foi deixado descansar na mufla desligada até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, foi executado o destorroamento de forma manual.

De posse do lodo calcinado e destorroado, a caracterização se procedeu através do ensaio de análise granulométrica e do ensaio de finura, sendo que o primeiro ensaio seguiu a norma DNER-ME 083/98, da mesma maneira que foi feito com o lodo *in natura*. E o segundo ensaio seguiu a norma NBR 11.579/2013, sendo realizado pesando  $50 \pm 0,05$ g do cimento, colocado sobre a peneira ABNT 0,075m e realizado o peneiramento durante aproximadamente 20 minutos, logo depois, foi pesado o resíduo do cimento na peneira em gramas e calculada a finura.

### 3.4 Agregado miúdo e cimento Portland

. O agregado miúdo e o aglomerante foram adquiridos no comércio local da cidade de Araruna – PB sendo que o cimento Portland foi escolhido o CP II-F-32 de marca Nacional. A caracterização do agregado miúdo foi realizada de acordo com a norma DNER-ME 083/98 e a

do aglomerante em conformidade com a norma NBR 11579/2012. O aglomerante hidráulico apresenta coloração escura, secagem e pega rápida e é composto por material carbonático.

### 3.5 Produção da argamassa

Para produção da argamassa foi considerada uma proporção de uma parte de cimento e três de areia, em massa, e a relação água/cimento foi de 0,48 de acordo com a NBR 7.215/2019, apresentado na Tabela 1. Foram realizados três traços, um sem lodo, um com 10% do lodo e o outro com 20% do lodo, os dois últimos, em substituição parcial a massa do cimento Portland, sendo que para cada traço foram confeccionados três corpos de prova com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. A granulometria do lodo utilizado foi o passante da peneira 100, com abertura de 0,15 mm. Além disso, foi utilizada a areia normal, em conformidade com a norma NBR 7.214/2015, a mistura dos materiais foi realizada de forma manual assim como a compactação, conforme descrito na NBR 7.215/2019. O consumo de materiais dos três traços de argamassa é apresentado na Tabela 2.

**Tabela 1 – Quantidades de materiais**

Material	Quantidade (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

Fonte: NBR 7.215/2019.

**Tabela 2 – Consumo de materiais das argamassas**

Mistura	Traço em massa	Consumo (g)			
	Cim.:Areia:Água	Cimento	Lodo Calc.	Areia	Água
Referência	1:3:0,48	312	0	936	150
10% Lodo Calc.	1:3:0,48	280,8	31,2	936	150
20% Lodo Calc.	1:3:0,48	249,6	62,4	936	150

Nota: Lodo Calc. = Lodo Calcinado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após serem desmoldadas, todas os corpos-de-prova foram destinados aos ensaios mecânicos foram submetidas a cura submersa em água saturada com cal até a idade do ensaio de 28 dias. No dia 30 de junho de 2022, foi então realizado o ensaio de resistência à compressão

axial, seguindo a norma NBR 7.215/2019, O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica elétrica da marca Solotest no laboratório de estrutura da UEPB.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos materiais da argamassa

#### 4.1.1 Lodo *in natura*

A caracterização do lodo *in natura* foi necessária para determinar a distribuição das dimensões das partículas do lodo sem tratamento, além da densidade real. Os resultados do ensaio de granulometria estão apresentados na Tabela 3 e na Figura 8. Enquanto o resultado da densidade real foi apresentado na Tabela 4.

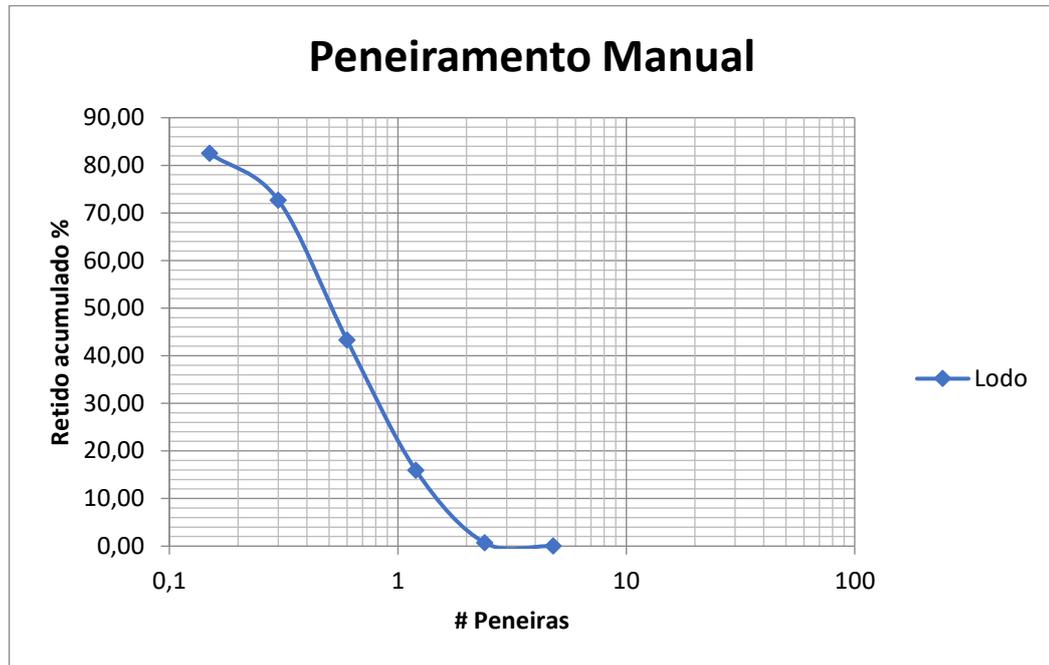
**Tabela 3 – Resultado da análise granulométrica do lodo *in natura***

Peneiras n°	Abertura (mm)	Retido		Acumulado	
		(g)	(%)	(g)	%
4	4,8	0,12	0,01	0,12	0,01
8	2,4	6,97	0,70	7,09	0,71
16	1,2	151,52	15,20	158,61	15,91
30	0,6	272,52	27,34	431,13	43,26
50	0,3	292,84	29,38	723,97	72,64
100	0,15	98,22	9,85	822,19	82,49
-	Fundo	174,51	17,51	996,70	100,00
-	Total	996,70	100,00		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Diante dos resultados da análise granulométrica, determinou-se a dimensão máxima de 2,4 e módulo de finura de 2,15 para o lodo.

Figura 8 – Curva granulométrica do lodo *in natura*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Densidade real do lodo *in natura*

Amostras nº	Densidade real
1	1,807
2	1,815
Média	1,811

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.2 Lodo calcinado

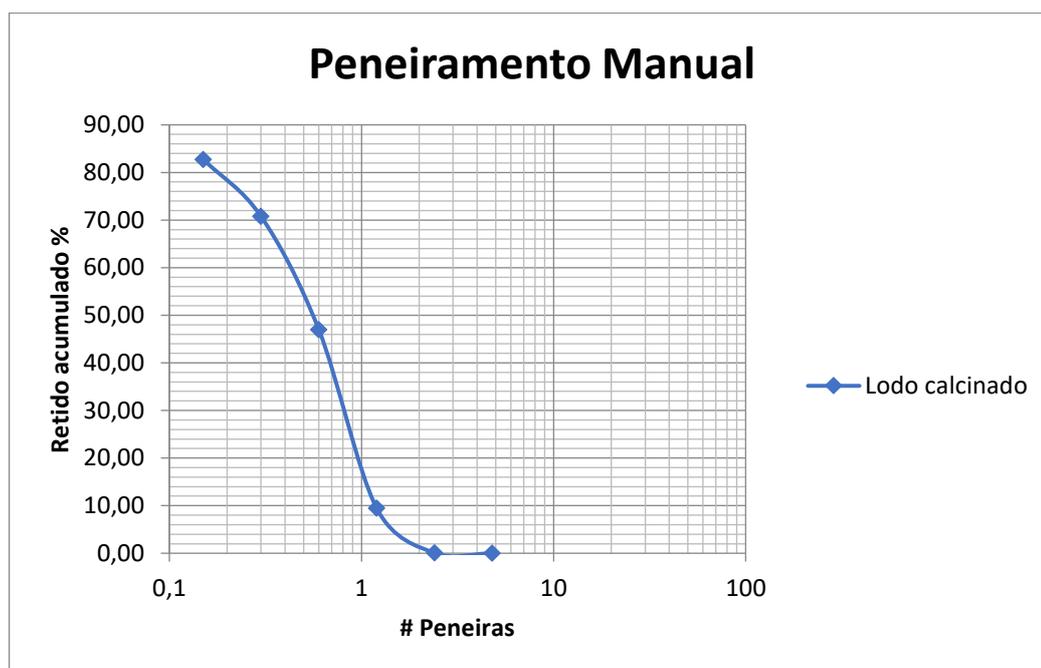
Foi necessário também a caracterização do lodo calcinado para conhecer a distribuição granulométrica das partículas do lodo tratado e comparar com a do lodo *in natura*, assim como determinar a sua finura. Os resultados da análise granulométrica do lodo após a calcinação são apresentados na Tabela 5 e sintetizado graficamente na Figura 9.

**Tabela 5 – Resultado da análise granulométrica do lodo calcinado**

Peneiras n°	Abertura (mm)	Retido		Acumulado	
		(g)	(%)	(g)	%
4	4,8	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,4	0,60	0,06	0,60	0,06
16	1,2	93,86	9,39	94,46	9,45
30	0,6	375,04	37,52	469,50	46,97
50	0,3	237,83	23,79	707,33	70,76
100	0,15	119,89	11,99	827,22	82,75
-	Fundo	172,43	17,25	999,65	100,00
-	Total	999,65	100,00		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da análise granulométrica, determinou-se a dimensão máxima de 2,4 e módulo de finura de 2,10 para o lodo calcinado.

**Figura 9 – Curva granulométrica do lodo calcinado**

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado do ensaio de finura do lodo calcinado é apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 – Resultado da finura do lodo calcinado**

Ensaio	%
Finura do lodo calcinado	41,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando-se os gráficos e as tabelas da análise granulométrica dos lodos antes e após a calcinação, observa-se que não houve mudança significativa na curva de distribuição granulométrica. Foi possível também observar que as curvas não possuem aspectos uniforme, visto que as partículas se concentram nas peneiras de abertura de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. Com isso, os lodos podem ser considerados como um material fino, o que pode possibilitar um aumento na trabalhabilidade, diminuição na capilaridade e na permeabilidade na sua incorporação em argamassa, no entanto, é necessário mais estudo para verificar essas propriedades.

#### 4.1.3 Agregado miúdo e cimento Portland

Foi indispensável a caracterização do agregado e do aglomerante uma vez que esses materiais têm influência direta na resistência à compressão das argamassas. Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Tabela 7 e a Figura 10 mostra graficamente a distribuição granulométrica do agregado miúdo elaborada a partir da relação entre o percentual de massa retida e as aberturas das peneiras, em mm. Ao mesmo tempo que o resultado da finura do cimento é apresentado na Tabela 8.

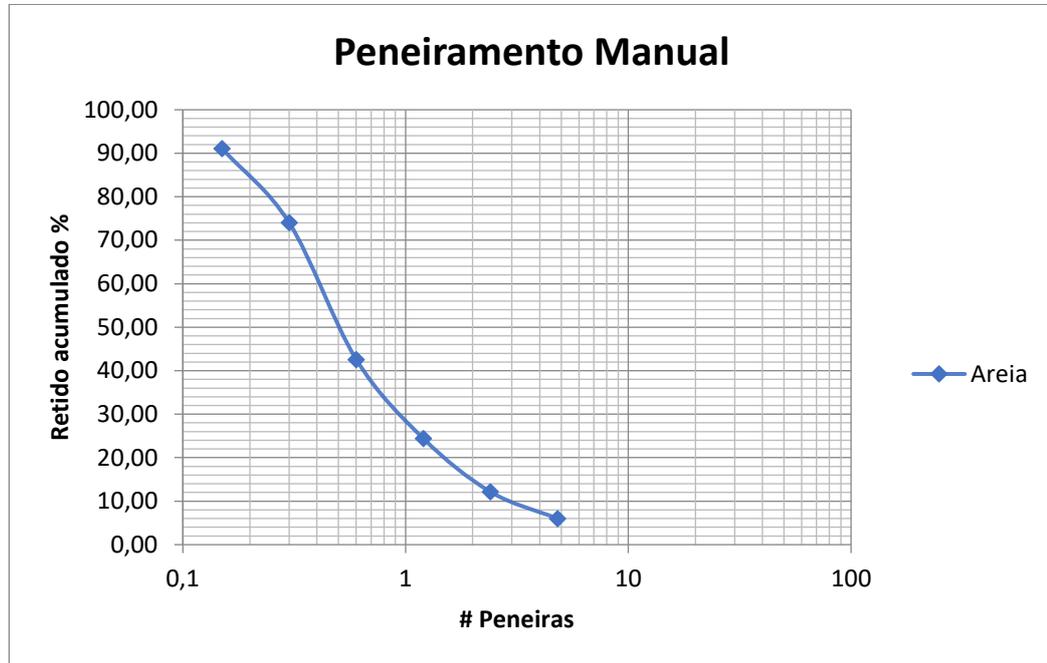
**Tabela 7 – Resultado da análise granulométrica do agregado miúdo**

Peneiras nº	Abertura (mm)	Retido		Acumulado	
		(g)	(%)	(g)	%
4	4,8	60,32	6,01	60,32	6,01
8	2,4	61,82	6,16	122,14	12,17
16	1,2	122,96	12,26	245,10	24,43
30	0,6	182,36	18,18	427,46	42,61
50	0,3	315,37	31,44	742,83	74,04
100	0,15	170,81	17,03	913,64	91,07
-	Fundo	89,60	8,93	1003,24	100,00
-	Total	1003,24	100,00		

Fonte: Elaborada pelo autor.

A areia utilizada na pesquisa apresenta dimensão máxima de 2,4 e o módulo de finura de 2,5. Com base no módulo de finura (2,5) e no Quadro 2, a areia foi classificada como areia média.

**Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Quadro 2 – Classificação das areias quanto ao módulo de finura**

Tipos	Módulo de Finura - MF	Utilização
Areia Grossa	$MF > 3,3$	Concreto e chapisco
Areia Média	$2,4 < MF < 3,3$	Emboço
Areia Fina	$MF < 2,4$	Reboco

Fonte: Ribeiro (2002).

**Tabela 8 – Resultado da finura do cimento**

Ensaio	%
Finura do cimento	1,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.2 Resistência a compressão axial da argamassa

O ensaio de resistência à compressão axial é fundamental pois possibilita avaliar a resistência de uma argamassa e suas diversas ações mecânicas. Além disso, foi possível determinar a resistência para as argamassas com a incorporação de diferentes teores de lodo calcinado. Os resultados do ensaio de compressão axial aos 28 dias, as médias e os desvios

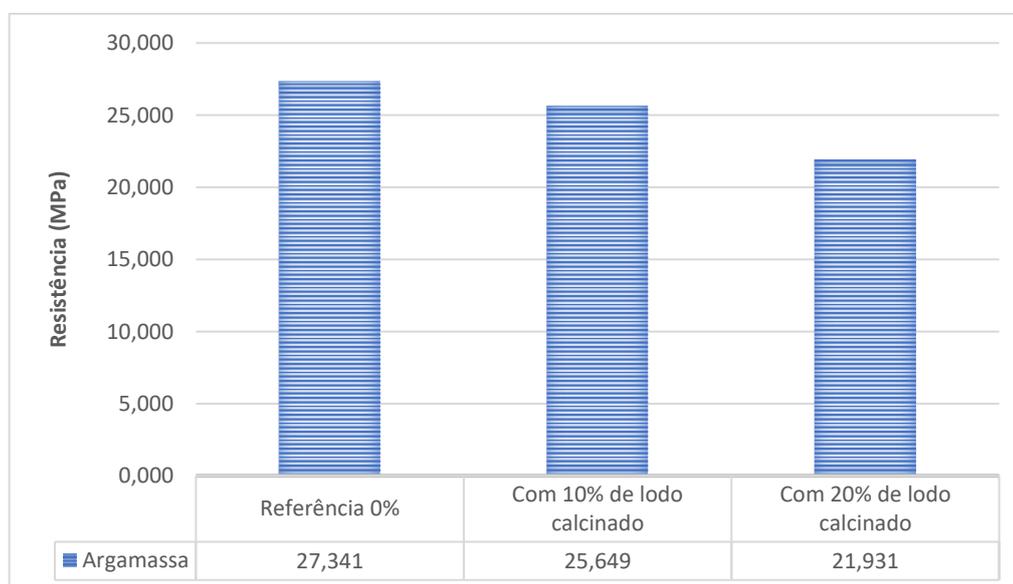
padrão das argamassas de referência e com o lodo calcinado, estão apresentados na Tabela 9 e graficamente na Figura 11.

**Tabela 9 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias**

Argamassa	Referência 0% (MPa)	Com 10% de lodo calcinado (MPa)	Com 20% de lodo calcinado (MPa)
1	27,478	27,161	24,283
2	25,438	24,043	22,211
3	29,108	25,742	19,300
Média	27,341	25,649	21,931
Desvio Padrão	1,501	1,275	2,044

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 11 – Resistência média da compressão axial das argamassas aos 28 dias**



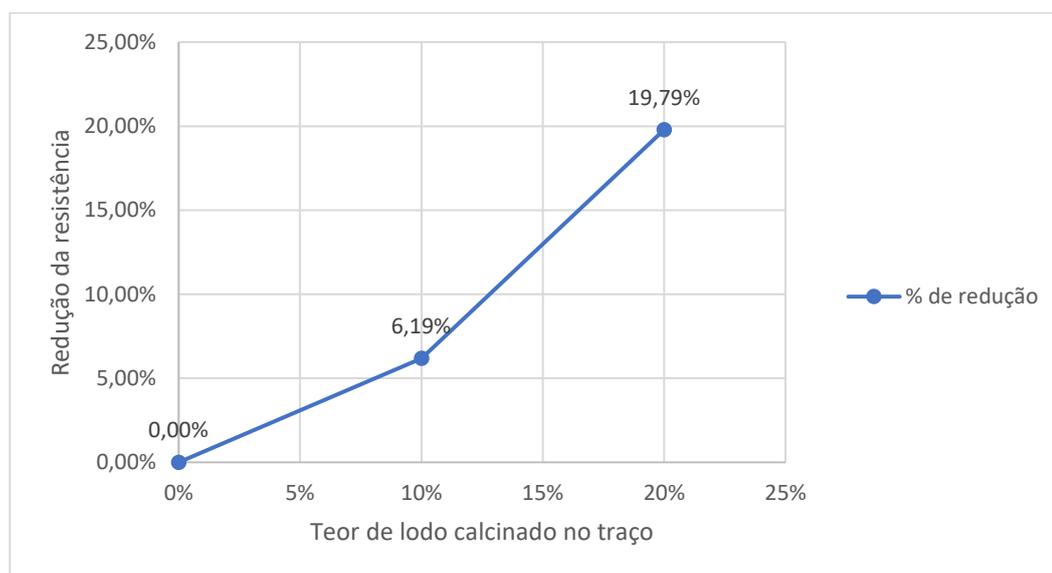
Fonte: Elaborada pelo autor.

No tratamento do lodo através da calcinação alguns autores realizaram o ensaio termogravimétrico (TGA), Buselatto et. al (2019), fizeram a calcinação em um forno, escolhendo a temperatura de 600°C por 1 h, para incorporar o lodo calcinado como agregado miúdo em concreto e concluíram que com uma dosagem adequada poder-se-á inserir o material em concretos. Em relação a calcinação, verificam-se diferentes temperaturas escolhidas logo após o ensaio termogravimétrico como no estudo citado. Se fosse realizado o ensaio no presente estudo, poderia ser que obtivessem resultados diferentes.

Com base nas informações de resistência a compressão axial foi possível verificar que há uma tendência de redução da resistência à medida que se aumenta os teores de substituição do lodo calcinado na argamassa.

Conforme apresenta a Tabela 8, ao verificar a influência da presença do resíduo, percebe-se que houve um decréscimo na resistência à compressão axial à medida que a quantidade de lodo calcinado presente na mistura aumenta. A resistência média da argamassa com 20% do lodo teve uma redução maior do que a argamassa com 10%. A Figura 12 apresenta a porcentagem da redução da resistência à compressão em relação a argamassa de referência.

Figura 12 – Porcentagem da redução da resistência em função do teor de lodo calcinado no traço



Fonte: Elaborada pelo autor

Esse resultado é semelhante ao encontrado em Ruviano et al. (2020), os quais avaliaram a influência da incorporação de lodo calcinado em substituição ao aglomerante, com percentuais de 10% e 25% em pastas e em argamassas e verificaram que houve uma redução na resistência à compressão das argamassas de 13,2% e 15,5%, respectivamente. Essa tendência também foi verificada no estudo de Batalha (2012), ao utilizar o lodo calcinado como componente da mistura substituindo parcialmente o cimento em 5%, 10% e 15% em massa nas argamassas.

Portanto, comparando os resultados obtidos com os trabalhos citados, acredita-se que a substituição parcial do cimento por lodo calcinado, resulta em perda de resistência à compressão, mas essa perda não compromete o desempenho mecânico das argamassas, pois até 10% de adição de lodo a resistência à compressão se manteve dentro do que se esperava, como diz Ribeiro (2013), que para o mesmo traço utilizado no estudo (1:3) e água suficiente para obtenção de uma adequada trabalhabilidade a resistência a compressão é da ordem de 25 MPa.

Mesmo que a resistência à compressão da argamassa não aumente à medida que se insere o lodo, ainda assim, poderia ser substituído pois o lodo é um resíduo e o cimento tem um preço alto para sua aquisição.

Outra opção de uso do lodo na inserção de argamassa seria a substituição no percentual do agregado miúdo, inclusive outras pesquisas realizaram esse tipo de uso.

Uma destas pesquisas foi o trabalho de Ramirez (2015) que avaliou a influência da substituição de areia natural por diferentes teores de substituição de lodo úmido e lodo calcinado, constatando que a adição de até 20% de lodo calcinado propiciou aumento nas propriedades mecânicas do concreto. Semelhantemente, Santos (2018) utilizou o lodo seco e calcinado como substituto do agregado miúdo na produção de argamassas com teores de 0%, 3%, 5% e 10%, verificando aumento nas propriedades mecânicas na substituição por lodo calcinado, sendo o teor de 3% o que obteve os melhores resultados.

Em comparação aos outros resíduos, como por exemplo, o caulim o resultado foi pior, mas isso pode ser por causa do grau de finura do caulim como observado por Oliveira (2005), que avaliou o desempenho mecânico de argamassas, nas quais foi utilizado um caulim calcinado, como material de substituição parcial do cimento Portland, observando que ao passar o caulim calcinado em duas peneiras, ABNT 200 (0,074 mm) e 325 (0,044 mm), constatou que o passante na peneira menor obteve desempenho melhor. Nesse contexto e levando em conta que o lodo utilizado foi o passante na peneira ABNT 100 (0,15mm) e a finura do lodo calcinado obtido de 41,1%, bastante elevado para um aglomerante e muito maior do que a finura do cimento utilizado de 1,8%, a utilização do lodo calcinado mais fino, passantes em peneiras menores e/ou que realize o processo de moagem para obtenção de melhoramento na granulometria, podem ser uma opção que poderá trazer resultados melhores.

Diante do exposto, o emprego do lodo calcinado traz benefícios na questão ambiental referente ao descarte do resíduo do tratamento da água e numa alternativa para disposição final para as companhias de saneamento do país. Além disso, pode reduzir os impactos ambientais decorrentes da produção do cimento e o desenvolvimento a construção civil de maneira mais sustentável.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos experimentos realizados, foi observado que o lodo calcinado da estação de tratamento de água de Pirpirituba pode ser aplicado na indústria da construção civil como matéria prima na produção de argamassa, desde que sejam observadas as normas técnicas à sua utilização.

O estudo demonstrou que o lodo da ETA de Pirpirituba - PB se mostrou um material essencialmente fino tanto antes como após a calcinação, onde as partículas se concentram nas peneiras de abertura de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. Dessa forma, o lodo pode possibilitar um aumento na trabalhabilidade, diminuição na capilaridade e na permeabilidade na sua incorporação em argamassa.

Em relação aos materiais empregados na argamassa, a areia utilizada no estudo foi classificada como média e o cimento foi verificado com estando de acordo com as normas vigentes.

Na verificação da resistência a compressão axial para as argamassas de referência, com a incorporação de 10% do lodo e com 20% do lodo, foi obtido os valores de 27,341 MPa, 25,649 MPa e 21,931 MPa, respectivamente. Esse resultado indica em perda de resistência à compressão, mas essa perda não compromete o desempenho mecânico das argamassas, pois até 10% de adição de lodo a resistência à compressão se manteve dentro do que se esperava. Entre essas amostras utilizadas, foi verificado que quanto maior o teor de lodo, maior é a redução da resistência à compressão axial das argamassas.

Levando em consideração a grande quantidade de resíduo proveniente das estações de tratamento de água e do excedente despejado no meio ambiente, é importante dar continuidade a novos estudos sobre a utilização do lodo. Uma alternativa seria utilizar o lodo mais fino realizando um processo de moagem e/ou utilizando apenas o passante de peneira com abertura menor. Como também, substituir o agregado miúdo por lodo na confecção de argamassa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT. **ABNT NBR 11579**. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT. **ABNT NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT. **ABNT NBR 7214**. Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. **ABNT NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ALMEIDA, L. F. S. **A influência nas propriedades físicas, mecânicas e perda de transmissão sonora do lodo de ETA incorporado em argamassas**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- ALMEIDA, L. F. S.; ANACLETO, M. G.; COSTA, W. A. C. **Estudo da viabilidade da utilização de lodo de ETA em blocos vazados de concreto por meio da avaliação de propriedades mecânicas e acústica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- ALVARENGA, J. M. C. **Uso de lodo gerado em estação de tratamento de água na fabricação de bloco cerâmico ecológico para uso em construções rurais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2019.
- BATALHA, C. T. **Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.
- BITENCOURT, G. A. **Caracterização ecotoxicológica de lodo gerado em estação de tratamento de água**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, na forma do Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021.
- BUSELATTO, D. M.; WENZEL, M. C.; ROCHA, G. H.; WEBBER, J.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, e-12270, 2019.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo:IBRACON, 2010.

CUNHA, B. B. **Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa**. 2019. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

DNER. **DNER-ME 083/98**. Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DNER. **DNER-ME 093/94**. Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DRUMOND, A. A. **Estudo em bancada da interferência na aplicação de resíduo de ETA no sistema de tratamento de esgoto**. 2013. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FREITAS, A. C. B.; SANTOS, A. L. C.; BEZERRA, M. C. M.; NASCIMENTO, S. C. T. Revisão sistemática de estudos sobre o alumínio como fator de risco para a doença de alzheimer. **Revista Processos Químicos**, v. 15, n. 29, 2021.

FRIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: PINI, 2009.

HELLER L.; PÁDUA V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. v. 1. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Revista Cerâmica**, v. 51, n. 318, pp. 85-95, 2005.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

LIMA, D. P. **Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

MACIEL, P. R.; MACHADO, L. R. Alternativas para a utilização de lodo das estações de tratamento de água (ETA) como agregado na construção civil. **Revista Acadêmica Oswaldo Cruz**, São Paulo, ano 2, n.7, julho-setembro 2015.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.490–496, 2006.

PEREIRA, S. L. M. **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal do Paraíba, João Pessoa, 2011.

PROSAB. **Rede Cooperativa de Pesquisa: Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

RAMIREZ, K. G. **Viabilidade do aproveitamento de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na Confecção de Concretos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

RIBEIRO, C. C. **Materiais de construção civil**. 4. ed. Belo Horizonte, Editora: UFMG, 2013.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 352, pp. 551-556, 2013.

RODRIGUES, L. P. **Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água de Campos dos Goytacazes em corpos cimentícios para uso em tijolo solo-cimento**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

ROSCHILD, C. V. P. **Tratamento de água**. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/11/Aula-7-Tratamento-de-%C3%A1gua-Caroline-Voser.pdf>. Acesso em: 05 set. 2022.

RUVIARO, A. S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T. P.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 243-260, out./dez. 2020.

SANTOS, F. P. **Caracterização e estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018.

SOARES, L. A. **Utilização de resíduo de ETA no tratamento de efluente de lagoas de estabilização**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SOUZA, F. R. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto**. 2009. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.