



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IRANILZA COSTA DA SILVA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL  
SUPLEMENTAR PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

Recife - PE

2025

IRANILZA COSTA DA SILVA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL  
SUPLEMENTAR PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas com ênfase em construção civil.

Orientador (a): Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife - PE

2025

Silva, Iranilza Costa da.

Lodo de estação de tratamento de água como material  
suplementar para produção de materiais de construção civil /  
Iranilza Costa da Silva. - Recife, 2025.

134f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco,  
Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Inclui referências.

1. Cerâmica vermelha; 2. Material complementar; 3. Lodo de  
ETA; 4. Construção sustentável; 5. Destinação adequada de resíduo.  
I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

IRANILZA COSTA DA SILVA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL  
SUPLEMENTAR PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Estruturas.

Aprovada em 14/03/2025

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço (examinador externo)  
Universidade Federal do Pará

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Figueiredo da Nóbrega (examinadora externa)  
Universidade Federal de Capina Grande

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Perruci Galvão (examinadora externa)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha Família, em especial a minha mãe Ubirailza, ao meu pai Avanilson e à minha avó Iracema, por todo apoio e incentivo.

Ao meu esposo Robson Klebson, pelo amor, compreensão e grande incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão dessa etapa importante da minha vida só foi possível com apoio, incentivo, dedicação e compreensão de muitas pessoas especiais, sem as quais o trabalho se tornaria muito mais árduo. Com o coração repleto de gratidão, gostaria de agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram ao longo dessa trajetória. Em especial agradeço:

À Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida, ensinando-me a ser forte e a nunca perder a fé, estendendo-me a mão e me mostrando o que realmente importa nessa caminhada.

Ao meu esposo, Robson Klebson, por ser meu parceiro de vida e por dividir comigo sonhos e expectativas. Pelo amor, companheirismo, incentivo e compreensão nos momentos de estudo e dedicação exclusiva ao trabalho, e principalmente por ser meu suporte físico e emocional, por suportar meus altos níveis de estresse, irritação e choradeiras ao longo deste trabalho.

Aos meus pais Ubirailza e Avanilson e meus avôs Iracema e Sales, pelo amor incondicional, por serem minha rede de apoio, pelo acolhimento e ajuda em todos os momentos da vida. Obrigada por sempre acreditar e me incentivar a seguir os meus sonhos, vocês me formaram, me graduaram e me pós-graduaram, além de tantos outros ensinamentos que me foram dados.

Aos meus irmãos Gabriel e Iraneide, por toda a ajuda, amor e incentivo que sempre me deram.

Aos meus sobrinhos Theo Gutierrez, Aylla Sophia e Natasha Emanuele, pelo amor, alegria, risadas e leveza que trazem aos meus dias.

Aos meus sogros Lucilene e João Francisco, pelo incentivo e carinho de sempre.

Ao meu orientador Dr Arnaldo Carneiro, pela oportunidade que me foi dada, pela amizade sincera, apoio, confiança, conhecimento compartilhado e por todas as orientações durante todo o trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, Igor, Marcos, Carlos, Tacila, João Pedro e Filipe pelos debates, discussões e trocas de experiências ao longo desses dois anos

de estudo e, principalmente, por terem me emprestado seus ouvidos durante as minhas choradeiras e momentos de desespero diante dos inúmeros problemas encontrados ao longo do processo experimental deste trabalho.

Aos meus amigos Wedson, Karina, Marina, Marcela, Bruna, Wilson, Leane, Fabíola, Diego, Anselmo, Edna, Sonaly, Solange e Talisson que compartilharam, vivenciaram alegrias e angústias comigo durante toda a pós-graduação. Obrigada pela amizade, apoio e por sempre estarem comigo.

À Daniel que conseguiu as amostras de argila da Cerâmica Santa Inês para o presente estudo.

Aos professores Aline Figueirêdo da Nóbrega, Marcelo de Souza Picanço e Simone Perruci Galvão pelo aceite ao convite de composição da banca examinadora.

Aos colegas, professores e servidores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pelos estudos, parceria, amizade, conhecimento adquirido e oportunidade de convívio.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) pelo apoio e infraestrutura.

Ao Laboratórios: LabTag, LTM e Lacamm, e seus servidores, pela ajuda e prestatividade na realização dos ensaios.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, expresso minha gratidão pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida.

À Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA por me proporcionar a oportunidade de participar deste projeto de grande importância tanto para a indústria quanto para a sociedade.

Aos demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para essa pesquisa, o meu muito obrigada.

## RESUMO

A indústria da construção civil busca, cada vez mais, alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a produção de materiais de construção. Nesse contexto, o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) surge como um material complementar alternativo à argila na produção de cerâmica vermelha, devido a suas semelhanças químicas e mineralógicas. Diante desse cenário, a presente pesquisa investigou a viabilidade do uso de lodo de ETA na confecção de materiais cerâmicos. Amostras de lodo da Estação de Tratamento de Água de Pirapama e argila da Cerâmica Santa Inês foram coletadas, beneficiadas e submetidas a análises físicas, químicas, mineralógicas e térmicas. Foram preparadas misturas binárias substituindo-se gradualmente a argila por lodo de ETA, em proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa, e preparadas amostras de referência com 100% de argila e 100% de lodo. Para determinar as propriedades físicas e mecânicas, foram confeccionados 114 corpos de prova por prensagem mecânica uniaxial a 80KN e queimados a 800°C por 3 horas. Destes, 42 foram moldados com as misturas binárias 72 corpos de prova foram moldados para determinação dos parâmetros otimizados de moldagem, utilizando um protocolo desenvolvido nesta pesquisa, que empregou estudos exploratórios e análise estatística para obter os teores de umidade e a carga máxima de compactação ótimos, visando o maior desempenho mecânico. Os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios: retração linear, absorção de água, resistência à compressão e perda de massa. Os resultados dos ensaios mostraram que o lodo de ETA possui composição química e mineralógica similar à da argila. Entre os teores de LETA incorporados na massa argilosa, o teor de 15% mostrou-se mais efetivo, apresentando 41,33 MPa de resistência à compressão e absorção de água de 17,43%. Os resultados obtidos evidenciam que as misturas binárias de argila e LETA atendem aos requisitos da NBR 15270-1 para absorção de água e resistência à compressão, qualificando-as para uso como blocos e tijolos de alvenaria estruturais.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA; cerâmica vermelha; material complementar; destinação adequada de resíduo; construção sustentável.

## ABSTRACT

The civil construction industry is increasingly seeking sustainable and economically viable alternatives for the production of building materials. In this context, Water Treatment Plant (WTP) sludge emerges as an alternative supplementary material to clay in the production of red ceramics, due to its chemical and mineralogical similarities. Given this scenario, the present research investigated the feasibility of using WTP sludge in the manufacture of ceramic materials. Samples of sludge from the Pirapama Water Treatment Plant and clay from Cerâmica Santa Inês were collected, processed, and subjected to physical, chemical, mineralogical, and thermal analyses. Binary mixtures were prepared, gradually replacing the clay with WTP sludge in proportions of 5%, 10%, 15%, and 20% by mass, and reference samples were prepared with 100% clay and 100% sludge. To determine the physical and mechanical properties, 114 specimens were fabricated by uniaxial mechanical pressing at 80KN and fired at 800°C for 3 hours. Of these, 42 were molded with the binary mixtures. 72 specimens were molded to determine the optimized molding parameters, using a protocol developed in this research, which employed exploratory studies and statistical analysis to obtain the optimal moisture content and maximum compaction load, aiming for the highest mechanical performance. The specimens were subjected to the following tests: linear shrinkage, water absorption, compressive strength, and mass loss. The test results showed that WTP sludge has a chemical and mineralogical composition similar to that of clay. Among the WTP sludge contents incorporated into the clay mass, the 15% content proved to be the most effective, presenting 41.33 MPa of compressive strength and 17.43% water absorption. The results obtained show that the binary mixtures of clay and WTP sludge meet the requirements of NBR 15270-1 for water absorption and compressive strength, qualifying them for use as structural masonry blocks and bricks.

**Keywords:** Water Treatment Plant sludge; red ceramic; complementary material; proper waste disposal; sustainable construction.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 1: Processo produtivo básico utilizado na indústria cerâmica</i> .....  | 26 |
| <i>Figura 2: Representação esquemática das etapas da prensagem uniaxial. (a) A cavidade do molde é preenchida com o pó. (b) O pó é compactado pela aplicação de pressão pela parte superior do molde. (c) A peça compactada é ejetada pela ação de elevação do punção inferior.</i> ..... | 28 |
| <i>Figura 3: Vários estágios na remoção da água existente entre as partículas de argila durante um processo de secagem, (a) peça molhada, (b) peça parcialmente seca e (c) peça completamente seca.</i> .....   | 29 |
| <i>Figura 4: Percentual de produção de cerâmica vermelha por regiões do Brasil</i> .....  | 33 |
| <i>Figura 5: Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.</i> .....  | 36 |
| <i>Figura 6: Processo de tratamento de água em ciclo completo.</i> .....  | 37 |
| <i>Figura 7: Distribuição de água no floco de lodo de ETA.</i> .....  | 39 |
| <i>Figura 8: Plano experimental da pesquisa</i> .....   | 64 |
| <i>Figura 9: Amostras de (a) argila e de (b) lodo de ETA.</i> .....   | 65 |
| <i>Figura 10: Lodo de ETA durante o processo de secagem ao ar.</i> .....  | 65 |
| <i>Figura 11: Impurezas encontradas no Lodo de ETA analisado.</i> .....   | 66 |
| <i>Figura 12: Processo de moagem dos materiais.</i> .....   | 67 |
| <i>Figura 13: Curvas granulométricas e os volume de partículas dos materiais.</i> .....   | 69 |
| <i>Figura 14: Caracterização mineralógica da argila e do lodo de ETA.</i> .....   | 71 |
| <i>Figura 15: Análise Termogravimétrica da argila e do lodo de ETA.</i> .....   | 73 |
| <i>Figura 16: Composições das misturas analisadas.</i> .....  | 75 |
| <i>Figura 17: Processo de preparação e moldagem das misturas binárias.</i> .....  | 76 |
| <i>Figura 18: Pastilhas cerâmicas com (a) deformações na base e fissuras (b) variação da espessura.</i> .....   | 83 |
| <i>Figura 19: (a) Moldagem das pastilhas cerâmicas usando a prensa hidráulica MARCON - MPH-15, (b) amostra antes do processo de compactação e (c) amostra compactada.</i> .....   | 83 |
| <i>Figura 20: Moldagem das pastilhas cerâmicas: (a) Amostra compactada com massa inicial de 30g e (b) Amostra compactada com massa inicial de 20g.</i> .....  | 85 |
| <i>Figura 21: Amostras de argila com diferentes teores de umidade: (a) 3,4% (amostra seca em estufa), (b) 10,6% (amostra com umidade conforme recebida), (c) 23,9% (amostra semisseca) e (d) 28,6% (amostra plástica).</i> .....  | 87 |

|  |            |
|--|------------|
| <i>Figura 22: Amostra com 10,6% de umidade compactada com a carga máxima de 15KN: (a) corpo de prova e (b) base do corpo de prova. ....</i>  | <i>88</i>  |
| <i>Figura 23: Procedimentos moldagem utilizados na etapa 01 e 02. ....</i>   | <i>89</i>  |
| <i>Figura 24: Resultados da primeira etapa: Teor de umidade X (a) densidade aparente seca (b) resistência à compressão. ....</i>   | <i>89</i>  |
| <i>Figura 25: Influência do tempo de compactação e do teor de umidade na resistência à compressão: regressão por superfície de resposta e análise de variância no diagrama de Pareto. ....</i> | <i>91</i>  |
| <i>Figura 26: Resultados da segunda etapa: Carga de compactação máxima X (a) resistência à compressão (b) fator de viabilidade de produção. ....</i>   | <i>94</i>  |
| <i>Figura 27: Influência da força de compactação e da resistência à compressão no fator de viabilidade quando o teor de umidade é fixado em 3,4% (a) e 10,6% (b). ....</i>                     | <i>96</i>  |
| <i>Figura 28: Gráfico de Pareto representando a análise de variância envolvendo a interação de todas as variáveis da segunda etapa de definição do método. ....</i>                            | <i>96</i>  |
| <i>Figura 29: Curvas granulométricas e distribuição das partículas das misturas. ....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Figura 30: Caracterização mineralógica das misturas binárias. ....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Figura 31: Análise Termogravimétrica das misturas binárias. ....</i>  | <i>102</i> |
| <i>Figura 32: Perda de massa após a queima das misturas binárias. ....</i>   | <i>104</i> |
| <i>Figura 33: Retração linear das misturas estudadas. ....</i>   | <i>105</i> |
| <i>Figura 34: Absorção de água das misturas binárias. ....</i>   | <i>107</i> |
| <i>Figura 35: Resistência à compressão das misturas binárias queimadas. ....</i>   | <i>108</i> |
| <i>Figura 36: Resumo dos resultados dos ensaios de perda de massa, retração linear e absorção de água em relação aos teores de lodo de ETA nas misturas ....</i>                               | <i>110</i> |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| <i>Tabela 1: Composição química das argilas estudadas por diversos autores.</i>                        | 23  |
| <i>Tabela 2: Transformações que ocorrem nos corpos cerâmicos em função da temperatura.</i>             | 32  |
| <i>Tabela 3: Composição química de lodos de ETAs estudados por diversos autores.</i>                   | 40  |
| <i>Tabela 4: Composição mineralógica de lodos de ETA estudados por diversos autores.</i>               | 43  |
| <i>Tabela 5: Resultados de estudos da incorporação de lodo de ETA em cerâmicas vermelhas.</i>          | 55  |
| <i>Tabela 6: Caracterizações dos materiais.</i>  | 68  |
| <i>Tabela 7: Área específica, massa unitária e a distribuição granulométrica (em %) dos materiais.</i> | 68  |
| <i>Tabela 8: Composição química (%) por FRX dos materiais.</i>   | 70  |
| <i>Tabela 9: Nomenclatura das misturas analisadas.</i>   | 74  |
| <i>Tabela 10: Parâmetros utilizados para moldagem dos corpos de prova.</i>                             | 75  |
| <i>Tabela 11: Quantitativo de corpos de provas por ensaios analisados.</i>                             | 77  |
| <i>Tabela 12: Fator de viabilidade operacional.</i>  | 93  |
| <i>Tabela 13: Diâmetros característicos das misturas binárias.</i>                                     | 99  |
| <i>Tabela 14: Área específica e massa unitária das misturas.</i>                                       | 99  |
| <i>Tabela 15: Limites de Atterberg das misturas binárias.</i>  | 100 |
| <i>Tabela 16: Perda de massa total (%) das misturas binárias.</i>                                      | 103 |
| <i>Tabela 17: Resumo dos resultados das propriedades tecnológicas das misturas binárias queimadas.</i> | 109 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\pm$                   | Mais ou menos  |
| <b>0LETA</b>            | Amostra de referência, contendo 100% de argila e 0% de lodo de ETA |
| <b>100LETA</b>          | Amostra de referência, contendo 0% de argila e 100% de lodo de ETA |
| <b>10LETA</b>           | Amostra contendo 90% de argila e 10% de lodo de ETA                |
| <b>15LETA</b>           | Amostra contendo 85% de argila e 15% de lodo de ETA                |
| <b>20LETA</b>           | Amostra contendo 80% de argila e 20% de lodo de ETA                |
| <b>5LETA</b>            | Amostra contendo 95% de argila e 5% de lodo de ETA                 |
| <b>ABDI</b>             | Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial                   |
| <b>ABNT</b>             | Associação Brasileira de Normas Técnicas                           |
| <b>ANICER</b>           | Associação Nacional da Indústria Cerâmica                          |
| <b>cm<sup>2</sup>/g</b> | Centímetro quadrado por grama                                      |
| <b>Compesa</b>          | Companhia Pernambucana de Saneamento                               |
| <b>DRX</b>              | Difração de Raios X  |
| <b>DTA</b>              | Análise Térmica Diferencial  |
| <b>DTG</b>              | Termogravimetria Derivada  |
| <b><i>Et al.</i></b>    | E outros   |
| <b>ETA</b>              | Estação de Tratamento de Água                                      |
| <b>ETAs</b>             | Estações de Tratamento de Água                                     |
| <b>FIEMG</b>            | Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais                 |
| <b>FRX</b>              | Fluorescência de Raios X   |
| <b>g/cm<sup>3</sup></b> | Gramas por centímetro cúbico                                       |
| <b>IBGE</b>             | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                    |
| <b>Kg/m<sup>3</sup></b> | Quilograma por metro cúbico  |
| <b>LETA</b>             | Lodo de Estação De Tratamento De Água                              |
| <b>MEV</b>              | Microscopia Eletrônica De Varredura                                |
| <b>Mg/L</b>             | Miligramas por litro   |
| <b>Mm/min</b>           | Milímetros por minuto  |
| <b>MPa</b>              | Mega Pascal  |
| <b>MS</b>               | Ministério da Saúde  |
| <b>NBR</b>              | Norma Brasileira   |
| <b>Nd</b>               | Não Detectado  |
| <b>NM</b>               | Norma Mercosul   |

|               |  |
|---------------|--|
| <b>Outr.</b>  | Outros                                 |
| <b>°C/h</b>   | Celsius por hora                       |
| <b>°C/min</b> | Celsius por minutos                    |
| <b>PE</b>     | Pernambuco                             |
| <b>PF</b>     | Perda ao fogo                          |
| <b>PNRS</b>   | Política Nacional de Resíduos Sólidos  |
| <b>PNSB</b>   | Pesquisa Nacional de Saneamento Básico |
| <b>RMR</b>    | Região Metropolitana do Recife         |
| <b>TGA</b>    | Análise Termogravimétrica              |
| <b>XX</b>     | Vigésimo                               |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>16</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....   | 16        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 18        |
| 1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....                                   | 18        |
| 1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....                            | 18        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                                | <b>20</b> |
| 2.1 CERÂMICA VERMELHA .....   | 20        |
| 2.1.1 <i>Argilas</i> .....  | 20        |
| 2.1.1.1 Composição química das argilas .....                        | 22        |
| 2.1.1.2 Plasticidade das argilas .....                              | 24        |
| 2.1.2 <i>Processo de fabricação</i> .....                           | 25        |
| 2.1.2.1 Preparação da matéria-prima e da massa cerâmica .....       | 26        |
| 2.1.2.2 Conformação das peças.....                                  | 27        |
| 2.1.2.3 Secagem .....   | 29        |
| 2.1.2.4 Queima .....  | 31        |
| 2.1.2.5 Indústria cerâmica .....                                    | 33        |
| 2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....                      | 34        |
| 2.2.1 <i>Tratamento de água</i> .....                               | 35        |
| 2.2.2 <i>Origem e características do lodo de ETA</i> .....          | 37        |
| 2.2.2.1 Composição química e mineralógica .....                     | 39        |
| 2.2.3 <i>Disposição final do lodo de ETA</i> .....                  | 45        |
| 2.2.4 <i>Aplicações do lodo de ETA em materiais cerâmicos</i> ..... | 46        |
| 2.3 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 2.....                         | 60        |
| <b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....                                | <b>64</b> |
| 3.1 MATERIAIS .....   | 64        |
| 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....                                   | 66        |
| 3.3 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS.....                               | 68        |
| 3.3.1 <i>Caracterização física</i> .....                            | 68        |
| 3.3.2 <i>Caracterização química</i> .....                           | 70        |
| 3.3.3 <i>Caracterização Mineralógica</i> .....                      | 71        |
| 3.3.4 <i>Caracterização térmica</i> .....                           | 72        |
| 3.4 MISTURAS BINÁRIAS ARGILA X LODO DE ETA.....                     | 74        |
| 3.4.1 <i>Moldagens dos corpos de prova</i> .....                    | 75        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4.2    | <i>Queima dos corpos de prova</i> .....                                     | 77         |
| 3.4.3    | <i>Ensaio de caracterização dos materiais e das misturas binárias</i> ..... | 77         |
| 3.4.3.1  | Massa unitária.....   | 78         |
| 3.4.3.2  | Composição granulométrica.....  | 78         |
| 3.4.3.3  | Limites de Atterberg.....   | 78         |
| 3.4.3.4  | Análise mineralógica.....   | 78         |
| 3.4.3.5  | Análise térmica.....  | 79         |
| 3.4.4    | <i>Análise estatística</i> .....  | 79         |
| 3.4.5    | <i>Propriedades tecnológicas</i> .....                                      | 80         |
| 3.4.5.1  | Perda relativa de massa após queima.....                                    | 80         |
| 3.4.5.2  | Retração após queima.....   | 80         |
| 3.4.5.3  | Absorção de água.....   | 81         |
| 3.4.5.4  | Resistência à compressão.....   | 81         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>82</b>  |
| 4.1      | OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DE Prensagem Mecânica.....              | 82         |
| 4.1.1    | <i>Estudo exploratório com prensa hidráulica</i> .....                      | 82         |
| 4.1.3    | <i>Etapa 01: Determinação do teor de umidade ótimo (TUO)</i> .....          | 86         |
| 4.1.3.1  | Análise estatística.....  | 90         |
| 4.1.4    | <i>Etapa 02: Determinação da força máxima de compactação (FMC)</i> .....    | 92         |
| 4.1.4.1  | Análise estatística.....  | 95         |
| 4.2      | CARACTERIZAÇÕES DAS MISTURAS BINÁRIAS.....                                  | 98         |
| 4.2.1    | <i>Caracterização física</i> .....  | 98         |
| 4.2.2    | <i>Caracterização mineralógica</i> .....                                    | 101        |
| 4.2.3    | <i>Caracterização térmica</i> .....   | 102        |
| 4.3      | PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS MISTURAS BINÁRIAS.....                        | 103        |
| 4.3.1    | <i>Perda relativa de massa</i> .....  | 103        |
| 4.3.2    | <i>Retração linear</i> .....  | 105        |
| 4.3.3    | <i>Absorção de água</i> .....   | 106        |
| 4.3.4    | <i>Resistência à compressão</i> .....                                       | 108        |
| 4.4      | RESUMOS DOS RESULTADOS.....   | 109        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | <b>112</b> |
| 5.1      | CONCLUSÕES.....   | 112        |
| 5.2      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                       | 114        |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>115</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Água (ETA) são estruturas operacionais projetadas para a purificação da água bruta, tornando-a potável de acordo com os padrões de potabilidade estabelecidos para o consumo humano. Esse processo é essencial para a manutenção da saúde pública. No entanto, a purificação da água envolve uma série de etapas físicas e químicas que geram um resíduo denominado lodo de ETA. Esse resíduo contém elevadas concentrações de impurezas removidas da água bruta, bem como coagulantes e produtos químicos utilizados nas etapas de sedimentação e filtração nos decantadores durante o tratamento da água (Cordeiro, 2001; Richter, 2001; Andreoli *et al.*, 2006; Santos, 2016).

Com a crescente preocupação ambiental e a busca por práticas mais sustentáveis, a indústria da construção civil tem investido no desenvolvimento de novos materiais por meio da incorporação de resíduos industriais. Uma das alternativas promissoras envolve a substituição parcial da argila pelo lodo de ETA na fabricação de materiais cerâmicos. Essa possibilidade se deve à similaridade na composição mineralógica entre os dois materiais, sendo ambos predominantemente compostos por óxidos de silício, alumínio e ferro (Monteiro *et al.*, 2008; Cremades; Cusidó; Arteaga, 2018; Gomes *et al.*, 2019).

Diversos estudos têm investigado o potencial do lodo de ETA na produção de materiais cerâmicos, evidenciando sua viabilidade como matéria-prima. Pesquisas realizadas por Texeira *et al.* (2006), Martínez-García *et al.* (2012), Kizinievič *et al.* (2013), Benlalla *et al.* (2015), Tantawy e Mohamed (2017), Cremades, Cusidó e Arteaga (2018), Erdogmus *et al.* (2021), Sutcu *et al.* (2022) e Rodrigues (2023) demonstram que esse resíduo pode ser incorporado de maneira eficiente na fabricação de produtos cerâmicos, promovendo benefícios ambientais e econômicos.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A gestão adequada do lodo de ETA representa um grande desafio tecnológico e ambiental, pois sua disposição inadequada pode gerar impactos negativos ao meio ambiente. Frequentemente, esse resíduo é descartado em cursos d'água, terrenos próximos às estações de tratamento ou em aterros sanitários, comprometendo a qualidade ambiental e a sustentabilidade (Texeira *et al.*, 2011; Cremades; Cusidó;

Arteaga, 2018). Nesse sentido, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, (BRASIL, 2010), estabelece diretrizes para uma destinação ambientalmente adequada dos resíduos, priorizando a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos.

Na pesquisa realizada por Motta Sobrinho *et al.* (2019), foram identificadas 246 ETAs geradoras de resíduos em Pernambuco, distribuídas da seguinte forma: 69 com resíduos de decantadores e filtros, 176 apenas de filtros e uma de sistema de dessalinização. A maior concentração de ETAs de ciclo completo (ETAs convencionais) foi observada na Região Metropolitana do Recife, enquanto a maior produção de lodo ocorreu na bacia do Rio Capibaribe, com carga entre 50 e 50  $\text{mlkg}/(\text{m}^3.\text{dia})$ . Constatou-se que cerca de 75% das ETAs do estado descartam seus resíduos em corpos hídricos e 22% no solo, sem tratamento prévio. Apenas 3% realizam o processo de deságue, descartando a massa sólida no solo, sem controle na disposição final. A alta taxa de descarte inadequado evidencia a necessidade de uma destinação adequada para o resíduo gerado.

A indústria cerâmica é um setor de grande relevância, sendo responsável por uma alta demanda de insumos naturais. Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2023), são produzidos anualmente cerca de 4,675 bilhões de blocos cerâmicos. A fabricação desses produtos depende majoritariamente de matérias-primas como argila, areia e resíduos de tijolos triturados. No entanto, a extração intensiva de argila tem gerado preocupações ambientais e econômicas, devido à sua crescente escassez em diversas regiões do mundo. Assim, a incorporação do lodo de ETA surge como uma alternativa sustentável para minimizar os impactos ambientais associados à extração de argila e ao descarte inadequado de resíduos provenientes do tratamento de água.

Apesar do seu potencial como substituto da argila, a composição do lodo de ETA pode variar significativamente em função de diversos fatores, tais como a qualidade da água bruta, coagulantes e produtos químicos utilizados no tratamento e a localização da estação de tratamento.

Estudos de Cordeiro, Barroso e Achon (2011) indicam que a concentração de sólidos nos lodos dos decantadores pode ser até 500 vezes maior do que nos lodos provenientes das lavagens dos filtros. Isso sugere que fatores operacionais, como a

idade do lodo e as condições de operação da ETA, influenciam diretamente sua composição química e mineralógica.

A elevada heterogeneidade do lodo de ETA dificulta sua utilização em materiais cerâmicos. Estudos (Paixão *et al.*, 2008; Benlalla *et al.*, 2015; Santana, 2019; Ahmadi *et al.*, 2023) indicam que a incorporação do lodo de ETA aumenta a porosidade, a absorção de água e a retração linear, além de reduzir a resistência à compressão. Além disso, a obtenção de materiais cerâmicos com bom desempenho mecânico, contendo lodo de ETA, requer queima a temperaturas acima de 1000°C, o que limita sua aplicação em produtos queimados a temperaturas mais baixas. Portanto, a otimização dos parâmetros de conformação é fundamental para produzir materiais cerâmicos com lodo de ETA e bom desempenho mecânico, mesmo quando queimados a temperaturas mais baixas, como 800°C, temperatura utilizada neste trabalho.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo investigar a viabilidade da incorporação do lodo de ETA na fabricação de tijolos cerâmicos. A proposta visa reduzir a dependência de agregados naturais na produção cerâmica, contribuir para a gestão sustentável dos resíduos de ETA e minimizar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado desse material.

Esse cenário levou ao desenvolvimento de um projeto conjunto entre a COMPESA e a UFPE/CNPq, intitulado “Utilização do lodo de ETA como matéria prima na indústria cerâmica: O estado da arte para propor um catálogo de uso e aplicação para uso e aplicação do lodo de ETA como material cerâmico”, vinculado ao Edital 12/2020-PBPG 2021.1.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade do uso de resíduos de estação de tratamento de água como material suplementar para confecção de materiais cerâmicos, blocos e tijolos de alvenaria.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o impacto das diferentes proporções de lodo de ETA nas características físicas, mineralógicas e térmicas das misturas binárias;

- Analisar a influência do teor de lodo de ETA nas propriedades tecnológicas dos materiais cerâmicos;
- Determinar a dosagem ideal de lodo de ETA para sua aplicação como material suplementar na produção de cerâmica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresenta-se a fundamentação teórica dos assuntos que abrangem esta dissertação.

### 2.1 CERÂMICA VERMELHA

O termo cerâmica vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são obtidas normalmente por meio de um processo de tratamento térmico, a uma temperatura alta, chamado queima (Callister e Rethwisch, 2016).

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos obtidos a partir de combinações de elementos metálicos e não metálicos, unidos por ligações iônicas ou covalentes. Ou seja, são compostos por óxidos (como alumina ( $Al_2O_3$ ) e sílica ( $SiO_2$ )), nitretos (como nitreto de silício ( $Si_3N_4$ )) e carbetos (como carbetos de silício ( $SiC$ )), entre outros (Padilha, 2000; Callister e Rethwisch, 2016). Esses materiais são classificados em diversos grupos, incluindo vidros, produtos estruturais à base de argila, louças brancas, refratários, abrasivos, cimentos, carbonos e cerâmicas avançadas (Callister e Rethwisch, 2016).

A cerâmica vermelha, também denominada como cerâmica estrutural, envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais e de vedação, tubos, lajotas e pisos) (Schwob *et al.*, 2017). Produzida a partir de argilas naturais e submetida a processos de transformação relativamente simples, como moldagem, secagem e queima, que exigem baixo controle dos seus parâmetros operacionais, sem que haja o comprometimento da qualidade da peça cerâmica (Callister e Rethwisch, 2016; Gomes, 2016). A simplicidade dos processos de fabricação e a disponibilidade da matéria-prima tornam a cerâmica vermelha uma opção econômica e versátil para diversas aplicações na construção civil.

#### 2.1.1 Argilas

A matéria-prima fundamental para a produção de cerâmica vermelha é a argila, composta por uma variedade de argilominerais e outros minerais.

Argilominerais são silicatos de alumínio hidratados, podendo conter elementos alcalinos e alcalino terrosos, como ferro ou magnésio, que podem substituir o alumínio

(Grim, 1953; Santos, 1989). Sua estrutura básica é composta por tetraedros de silício ( $SiO_4$ ) e octaedros de alumínio ( $Al_2O_6$ ) que se combinam de diferentes formas (Pinto, 2006; Baccelli Júnior, 2010). Os argilominerais são constituídos por partículas (cristais) de pequenas dimensões, geralmente abaixo de 2mm (Santos, 1989).

A definição precisa de argila é complexa devido à diversidade de materiais que se enquadram nessa categoria. Segundo Baccelli Júnior (2010), as argilas naturais são materiais de granulação fina compostos, na maioria das vezes, por misturas complexas de diferentes minerais, como quartzo, micas, carbonatos e óxidos, além de matéria orgânica. Essa definição destaca a natureza mineralógica das argilas.

Por outro lado, autores como Grim (1953) e Santos (1989) enfatizam as propriedades físicas das argilas, como a plasticidade quando em contato com a água e a capacidade de endurecer após a secagem. Ries (1928) define argila com base em seu tamanho de partícula, estabelecendo um limite inferior de 2 micrômetros. Já Gomes (1986) apresenta uma definição mais ampla, incluindo uma variedade de materiais como barros, folhelhos, xistos, filitos, caulins, tabatingas e Taguás.

Em resumo, o termo argila abrange uma ampla gama de materiais com características comuns, como a granulometria fina e a plasticidade. A diversidade mineralógica e a origem geológica das argilas conferem a esses materiais propriedades únicas, sendo considerada uma matéria-prima abundante que os tornam adequados para diversas aplicações, como a fabricação de cerâmica, para a agricultura e mecânica dos solos.

Os tipos de argilas mais comuns são: as Cauliniticas (granulometria grossa), as Montmoriloníticas (grande tendência a rehidratação) e as Ilíticas (intermediária entre as Cauliniticas e as Montmoriloníticas) (Baccelli Júnior, 2010).

Para o uso da argila na produção de cerâmica vermelha, algumas propriedades da matéria-prima são desejáveis, tais como: boa plasticidade, alta resistência mecânica, retração controlada e permeabilidade adequada para evitar fissuras e deformações (Baccelli Júnior, 2010; Mello *et al.*, 2011; Rodrigues, 2023).

A fim de obter as propriedades desejadas, frequentemente é necessária a mistura de diferentes tipos de argila. No entanto, a formulação de uma massa cerâmica é um processo complexo, pois envolve a otimização de diversas variáveis e

a consideração das dificuldades inerentes ao processo produtivo, como o custo para obtenção e extração das matérias-primas e o controle do processo de sazonalidade (Teixeira, 2006; Baccelli Júnior, 2010).

Baccelli Júnior (2010) destaca que no processo de sazonalidade, as argilas estão geralmente dispostas segundo as características ou propriedades desejadas no material cerâmico. Por exemplo, se a proporção da mistura entre duas argilas é 1:1 (argila 1:argila 2), então o estoque, durante o processo de armazenamento do material, deve refletir esta proporção e as camadas de cada uma das argilas devem ter espessuras iguais, para a mistura adquirir as propriedades desejadas

#### 2.1.1.1 Composição química das argilas

A classificação de uma argila visando o seu emprego industrial é realizada por meio de diversas caracterizações tecnológicas. Inicialmente, a principal análise demandada é a identificação dos argilominerais constituintes, seguida da caracterização química dos óxidos, que auxilia a definir o grupo das argilas e a determinar as percentagens das respectivas impurezas presentes, tais como: o quartzo, feldspato, mica, óxido e hidróxido de ferro, alumínio e a presença de matéria orgânica que constituem informações de grande validade para o processo industrial (Sachs, 2017).

A Tabela 1 apresenta uma síntese de resultados de composições químicas das argilas caracterizadas na literatura.

Tabela 1: Composição química das argilas estudadas por diversos autores.

| Referências                            | % óxidos dos elementos químicos |                                    |                                    |                        |                       |                        |            |            |            |                                   |                       |       |       |
|--|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|-----------------------|-------|-------|
|  | <i>SiO<sub>2</sub></i>          | <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>TiO<sub>2</sub></i> | <i>K<sub>2</sub>O</i> | <i>Na<sub>2</sub>O</i> | <i>MgO</i> | <i>MnO</i> | <i>CaO</i> | <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> | <i>SO<sub>3</sub></i> | Outs  | PF    |
| <b>Monteiro <i>et al.</i> (2008)</b>   | 48,84                           | 25,94                              | 9,19                               | 1,30                   | 1,91                  | 0,46                   | 0,83       | -          | 0,30       | -                                 | -                     | -     | 12,06 |
| <b>Oliveira e Holanda (2008)</b>       | 46,42                           | 27,90                              | 9,10                               | 1,32                   | 1,67                  | 0,36                   | 0,71       | 0,11       | 0,22       | 0,21                              | -                     | -     | 11,96 |
| <b>Paixão <i>et al.</i> (2008)</b>     | 69,50                           | 13,50                              | 5,30                               | 0,60                   | 3,30                  | 1,50                   | 2,20       | 0,06       | 0,64       | -                                 | -                     | -     | 3,20  |
| <b>Zamora <i>et al.</i> (2008)</b>     | 58,26                           | 19,43                              | 5,76                               | 0,88                   | 0,94                  | 1,74                   | 1,23       | -          | 2,47       | 0,08                              | -                     | 0,09  | 9,28  |
| <b>Medeiros <i>et al.</i> (2010)</b>   | 49,83                           | 27,35                              | 2,72                               | 0,86                   | 2,56                  | -                      | -          | 0,03       | -          | -                                 | -                     | 0,04  | 16,48 |
| <b>Kizinievič <i>et al.</i> (2013)</b> | 67,52                           | 17,09                              | 6,56                               | -                      | 4,23                  | -                      | 1,88       | -          | 2,14       | -                                 | 0,58                  | -     | -     |
| <b>Camargo (2014)</b>                  | 43,59                           | 25,64                              | 10,38                              | 1,55                   | 1,63                  | -                      | 0,66       | 0,11       | 0,15       | 0,25                              | -                     | -     | 15,20 |
| <b>Martins (2014)</b>                  | 62,80                           | 24,80                              | 6,80                               | 0,70                   | 3,50                  | -                      | 1,10       | -          | -          | -                                 | -                     | -     | -     |
| <b>Silva (2014)</b>                    | 58,33                           | 15,96                              | 14,98                              | 2,02                   | 5,57                  | -                      | 0,70       | -          | 0,44       | 0,49                              | -                     | 0,65  | -     |
| <b>Benlalla <i>et al.</i> (2015)</b>   | 54,17                           | 15,27                              | 6,81                               | 0,91                   | 2,85                  | 0,76                   | 7,74       | -          | 10,88      | 0,12                              | -                     | 0,09  | 10,29 |
| <b>Lima (2016)</b>                     | 52,02                           | 24,24                              | 9,57                               | 1,10                   | 1,20                  | 0,19                   | 0,64       | 0,14       | 0,20       | 0,13                              | -                     | -     | 10,56 |
| <b>Oliveira e Leite (2018)</b>         | 45,74                           | 51,33                              | 2,71                               | -                      | 0,37                  | 0,14                   | 0,18       | 0,005      | 0,01       | 0,06                              | 0,05                  | 0,019 | -     |

Fonte: Fonte: Autora (2024)

A sílica ( $SiO_2$ ) é o elemento predominante na composição das argilas, representando entre 45% e 60% de sua massa, podendo estar presente como grãos de quartzo ou na estrutura cristalina dos argilominerais, como a caulinita (Muñoz *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2016). A sílica contribui para a trabalhabilidade e compactação das massas cerâmicas, facilitando a moldagem e reduzindo a necessidade de água (Santos *et al.*, 2012).

A alumina ( $Al_2O_3$ ) contribui para o aumento da resistência mecânica dos materiais cerâmicos, através da transformação em mulita durante a queima, geralmente acima de 1000°C. A mulita age como um reforço na matriz cerâmica, aumentando sua resistência (Muñoz *et al.*, 2016; Magalhães *et al.*, 2021). A alumina está associada à presença de argilominerais como caulinita e muscovita (Medeiros *et al.*, 2016; Muñoz *et al.*, 2016).

O óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ), além de atuar como agente fundente, decompõe-se em temperaturas entre 800 e 1000°C, formando hematita (Rodrigues, 2023) ou goetita, o que confere coloração avermelhada às massas cerâmicas (Luz; Lins, 2008; Santos, 2016). Teores de  $Fe_2O_3$  acima de 4% já são suficientes para gerar a coloração avermelhada característica (Dondi, Raimondo, Zanelli, 2014). Geralmente, o teor de  $Fe_2O_3$  não excede 10% (Muñoz *et al.*, 2016), pois teores elevados (acima de 5%) podem favorecer a formação de fases vítreas e conglomerados vítreos (Yatsenko; Yatsenko; Zakarlyuka, 2017), impactando negativamente as propriedades mecânicas, como a tenacidade.

Os óxidos alcalinos ( $K_2O$  e  $Na_2O$ ) e alcalinos terrosos ( $CaO$  e  $MgO$ ) estão presentes nas argilas em baixas concentrações. A presença de fundentes como  $K_2O$ ,  $CaO$  e  $Fe_2O_3$  é importante para facilitar a fusão e aumentar a formação de fases cristalinas (Toya *et al.*, 2007; Rodrigues, 2023), os agentes fundentes atuam diminuindo a temperatura de sinterização do material ao qual é adicionado (Lengler, Vicenzi, Bergmann, 2009).

#### 2.1.1.2 Plasticidade das argilas

A plasticidade é uma das mais importantes propriedades das argilas, normalmente definida como uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume (Caputo, 2016).

Segundo Grim (1968), a plasticidade das argilas está diretamente relacionada à presença de água, quando a argila contém água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais, forma-se uma película de água adsorvida rígida em torno das partículas. A presença de uma pequena quantidade de água líquida entre as partículas age como lubrificante, facilitando o deslizamento relativo entre elas quando submetidas a uma tensão de cisalhamento. Essa capacidade de deformação plástica é fundamental para a caracterização das argilas e está diretamente relacionada ao teor de umidade do material.

A composição mineralógica é um dos principais fatores que influenciam a plasticidade das argilas. A fração arenosa, rica em minerais como quartzo e feldspato, tende a reduzir a plasticidade, enquanto a presença de argilominerais como caulinita e montmorilonita a aumenta (Grim, 1962; Santos, 2009). Além da influência da composição mineralógica, a granulometria também exerce um papel fundamental na plasticidade das argilas. Santos (2009) destaca que quanto maior a superfície específica, maior é a quantidade de água que pode ser adsorvida pelas partículas, o que aumenta a plasticidade.

Conforme Souza (2015), os limites de consistência, também conhecidos como limites de Atterberg, são utilizados para determinar a quantidade de água presente no solo em diferentes estados de consistência. O limite de liquidez (LL) representa o teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico, enquanto o limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor de umidade no qual o solo deixa de ser plástico e se torna semissólido. A diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade é denominada índice de plasticidade (IP). Os procedimentos para a determinação desses limites estão descritos nas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

### 2.1.2 Processo de fabricação

Na fabricação de materiais cerâmicos, busca-se obter produtos com propriedades adequadas para as diversas aplicações tecnológicas. O processamento cerâmico influencia diretamente as características das cerâmicas. A fabricação da cerâmica vermelha, por exemplo, envolve diversas etapas, que podem ser divididas em: obtenção da matéria-prima, preparação da massa cerâmica, conformação das peças, tratamento térmico, controle de qualidade e disposição final. Um resumo do

processo produtivo básico utilizado na indústria cerâmica pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Processo produtivo básico utilizado na indústria cerâmica



Fonte: Autora (2024)

### 2.1.2.1 Preparação da matéria-prima e da massa cerâmica

A preparação da massa cerâmica é uma etapa fundamental no processo de fabricação de produtos cerâmicos, como tijolos e telhas. Essa etapa envolve diversas subdivisões, desde a obtenção da matéria-prima até a dosagem dos componentes.

A primeira etapa consiste no sazonalamento da argila, um processo que consiste em estocar a argila extraída em condições controladas de umidade, permitindo a ocorrência de reações químicas e biológicas que melhoram suas propriedades plásticas (Baccelli Júnior, 2010; Aguiar *et al.*, 2022).

Após o sazonalamento, a argila passa por processos de moagem e dosagem. A moagem tem como objetivo reduzir o tamanho das partículas e garantir a homogeneidade da massa (Baccelli Júnior, 2010; Aguiar *et al.*, 2022). A dosagem consiste na adição de outros componentes, como desmoldantes e corantes, de acordo com a formulação desejada.

A formulação da massa cerâmica é um processo que requer conhecimento sobre a composição química e mineralógica das matérias-primas. A escolha dos componentes e suas proporções influencia diretamente as propriedades do material cerâmico, como resistência mecânica, porosidade e cor (Baccelli Júnior, 2010; Aguiar *et al.*, 2022). Para determinar a melhor formulação, são realizados diversos ensaios, como análise química, mineralógica e ensaios físicos, como a determinação da retração linear e da resistência à flexão (Baccelli Júnior, 2010).

A qualidade da massa cerâmica influencia diretamente a qualidade do material cerâmico. Uma massa bem preparada garante maior produtividade, menor desgaste

dos equipamentos e reduz a ocorrência de defeitos como trincas e deformações. A utilização de argila diretamente da jazida, sem o devido preparo, pode comprometer a qualidade do produto e gerar diversos problemas durante o processo de fabricação (Almeida, 2010; Baccelli Júnior, 2010).

#### 2.1.2.2 Conformação das peças

Após a preparação e o beneficiamento dos materiais, a massa cerâmica é submetida a um processo de conformação para adquirir a forma desejada. A escolha do método de conformação, como a extrusão, a prensagem a seco ou a colagem, depende das características do material e da peça cerâmica (Albero, 2000; Freitas *et al.*, 2009; Callister e Rethwisch, 2016). A conformação plástica (extrusão), por exemplo, envolve a utilização de massas plásticas, enquanto a conformação a seco (prensagem) utiliza pós cerâmicos e a conformação por via úmida (colagem) envolve a utilização de suspensões aquosas de materiais cerâmicos (barbotinas) (Albero, 2000; Callister e Rethwisch, 2016).

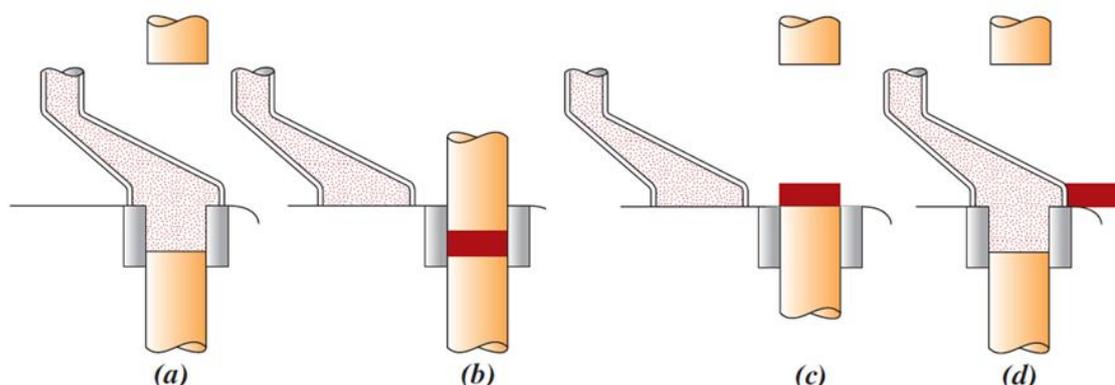
A extrusão é um processo de conformação no qual uma massa cerâmica plástica rígida é forçada pelo orifício de uma matriz que apresenta a geometria de seção transversal desejada (Callister e Rethwisch, 2016). Esse processo é amplamente utilizado na indústria cerâmica na fabricação de produtos cerâmicos como tijolos, tubos e azulejos.

De acordo com Freitas *et al.* (2009) e Callister e Rethwisch (2016), o método de conformação por enchimento, também conhecido como a colagem de barbotinas é um método de conformação que se baseia na absorção da água presente em uma suspensão de argila (barbotina) por um molde poroso, geralmente de gesso. Ao entrar em contato com o molde, a água é absorvida, depositando uma camada sólida de material cerâmico nas paredes do molde. A espessura dessa camada depende do tempo de contato entre a barbotina e o molde.

A prensagem é um processo de conformação que consiste na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, sob a ação de uma força aplicada (Albero, 2000; Callister e Rethwisch, 2016). Existem três procedimentos básicos para a prensagem de pós: prensagem uniaxial, prensagem isostática (ou hidrostática) e prensagem a quente (Callister e Rethwisch, 2016).

Na prensagem uniaxial (Figura 2), o pó cerâmico é compactado em matriz metálica mediante pressão aplicada em uma única direção, utilizando uma prensa mecânica ou hidráulica (Albero, 2000; Freitas *et al.*, 2009; Callister e Rethwisch, 2016). A peça conformada assume a configuração da matriz e do punção pelo qual a pressão é aplicada (Callister e Rethwisch, 2016). Embora limitado a geometrias simples, como tijolos e azulejos, este método se destaca por suas altas taxas de produção e baixo custo.

Figura 2: Representação esquemática das etapas da prensagem uniaxial. (a) A cavidade do molde é preenchida com o pó. (b) O pó é compactado pela aplicação de pressão pela parte superior do molde. (c) A peça compactada é ejetada pela ação de elevação do punção inferior. (d) A peça compactada é ejetada pela ação de elevação do punção inferior.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Na prensagem isostática, o pó cerâmico é compactado em um molde flexível, no qual é aplicada uma pressão por um fluido, isostaticamente. Essa técnica garante uma distribuição homogênea da pressão, permitindo a fabricação de peças complexas, como as com relevos em múltiplas direções ou com grandes relações de aspectos, como no caso de tubos e barras, que possui dimensões distintas em das outras (Albero, 2000; Callister e Rethwisch, 2016). Apesar de demandar mais tempo e custo, o método de prensagem isostática oferece maior flexibilidade na escolha da geometria das peças em comparação à prensagem uniaxial.

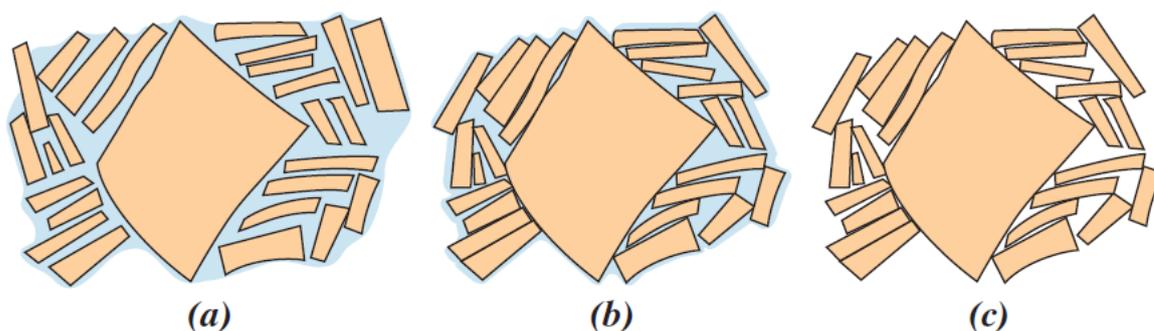
Diferentemente das prensagens uniaxial e isostática, que exigem um processo de queima posterior à conformação da peça cerâmica, na prensagem a quente, a prensagem de pós e o tratamento térmico são realizados simultaneamente — o pó é compactado em uma temperatura elevada (Callister e Rethwisch, 2016). Esse método é ideal para materiais que formam fase líquida apenas em temperaturas elevadas e,

portanto, apresentam baixa porosidade (Callister e Rethwisch, 2016; Lucindo, 2019). No entanto, o método apresenta algumas limitações. Ele é dispendioso em termos de tempo, uma vez que o molde e a matriz precisam ser aquecidos e resfriados em cada ciclo de moldagem. Além disso, a fabricação do molde, geralmente, tem um custo elevado e uma vida útil curta.

### 2.1.2.3 Secagem

Durante o processo de conformação da peça cerâmica, adiciona-se água para auxiliar na moldagem. No entanto, antes da queima, é necessário remover essa água por meio do processo de secagem. A secagem consiste na evaporação da água livre presente nos poros da peça cerâmica, promovendo a aproximação das partículas de argila e, conseqüentemente, a retração da peça (Heinrich; Gomes, 2014; Callister e Rethwisch, 2016; Rodrigues, 2023). A Figura 3 ilustra vários estágios na remoção da água existente entre as partículas de argila durante um processo de secagem, de acordo com Callister e Rethwisch (2016).

Figura 3: Vários estágios na remoção da água existente entre as partículas de argila durante um processo de secagem, (a) peça molhada, (b) peça parcialmente seca e (c) peça completamente seca.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Conforme ilustrado na Figura 3, segundo Callister e Rethwisch (2016), nos estágios iniciais do processo de secagem (Figura 3 (a)), as partículas de argila encontram-se adsorvidas a uma fina película de água. Conforme a secagem progride e a água é removida, a separação entre as partículas diminui, o que ocasiona a retração (Figura 3 (b e c)).

As peças cerâmicas quando submetidas à secagem apresentam uma propriedade de retrair-se, chamada retração linear de secagem. Esta propriedade é determinada pela medida da variação do comprimento ou volume de um corpo de

prova, quando a argila é seca a 105-110 °C (Baccelli Júnior, 2010). A ocorrência de retração não uniforme pode levar à formação de tensões internas e, conseqüentemente, à formação de fissuras e deformações, comprometendo a qualidade da peça (Baccelli Júnior, 2010; Rodrigues, 2023).

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), durante a etapa de secagem, a água presente no interior da peça cerâmica migra para a superfície, onde evapora. Se a taxa de evaporação for superior à taxa de difusão da água no interior da peça, a superfície secará mais rapidamente, causando tensões internas e, conseqüentemente, a formação de fissuras e deformações. Para evitar esses problemas, a taxa de secagem deve ser controlada de forma a permitir que a água migre para a superfície de forma gradual, evitando gradientes de umidade que possam gerar tensões. O autor destaca que a taxa de evaporação pode ser controlada ajustando parâmetros como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

Conforme destacado por Nascimento *et al.* (2019), a maior taxa de difusão na superfície em relação ao interior da peça pode levar à formação de uma crosta seca que impede a saída da umidade interna, intensificando os gradientes de umidade e aumentando a probabilidade de ocorrência de defeitos, como fissuras e deformações. Callister e Rethwisch (2016) complementa que a taxa de evaporação na superfície deve ser, no máximo, igual à taxa de difusão da água para evitar tensões internas e a formação de fissuras.

Além disso, Callister e Rethwisch (2016) ressalta que outros fatores influenciam a retração da peça cerâmica durante a secagem, como a espessura do corpo, a umidade da peça e o tamanho das partículas de argila. O autor destaca que peças mais espessas tendem a apresentar maior retração e maior probabilidade de formação de defeitos. A umidade da peça também influencia diretamente a retração, sendo desejável um teor de umidade o mais baixo possível para reduzi-la. Quanto ao tamanho das partículas, a retração aumenta conforme as partículas se tornam menores. Para minimizar a retração, pode-se aumentar o tamanho médio das partículas ou adicionar materiais não plásticos com partículas maiores à massa cerâmica.

#### 2.1.2.4 Queima

Após a secagem, a peça verde, ou seja, um corpo cerâmico conformado e seco, mas que não tenha sido queimado (Callister e Rethwisch, 2016), é submetida à queima em temperaturas elevadas, geralmente entre 900°C e 1400°C (Monteiro e Vieira, 2004; Callister e Rethwisch, 2016; Rodrigues, 2023). Durante o processo de queima, ocorrem diversas transformações, como a sinterização, a formação de fases vítreas e a cristalização, que conferem à peça as propriedades finais desejadas (Callister e Rethwisch, 2016; Aguiar *et al.*, 2022).

De acordo com Callister e Rethwisch (2016), a vitrificação consiste na formação gradual de um vidro líquido que flui para o interior e preenche parte do volume dos poros da peça cerâmica. O grau de vitrificação é influenciado pela temperatura, tempo de queima e composição da matéria-prima. O autor destaca que a presença de agentes fundentes, como o feldspato, por exemplo, promove a formação da fase vítrea em temperaturas mais baixas. Além disso, a temperatura de queima influencia diretamente a extensão da vitrificação, ou seja, a vitrificação aumenta conforme a temperatura de queima aumenta. Assim, é importante que o aquecimento seja realizado de forma controlada, evitando choques térmicos que possam causar fissuras e deformações nas peças cerâmicas.

De acordo com Baccelli Júnior (2010), no processo produtivo da cerâmica, a queima é a etapa principal, pois é nela que se manifestam os defeitos originados nas etapas anteriores, como a preparação da massa, a conformação e secagem das peças cerâmicas. O objetivo da queima é promover reações químicas e físicas que conferem ao material suas propriedades finais. Defeitos como a insuficiência de queima, a requeima e as variações de temperatura no forno podem comprometer a qualidade da cerâmica.

O processo de queima, segundo a FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FIEMG (2013), geralmente envolve três etapas: aquecimento até a temperatura máxima, patamar nessa temperatura e resfriamento lento. Esse procedimento permite obter peças cerâmicas com as propriedades desejadas, como alta resistência mecânica e baixa porosidade.

Segundo Souza (2010), a escolha criteriosa das rampas de aquecimento utilizadas durante o processo de queima é importante, pois elas não devem ser tão

rápidas que provoquem fissuras e trincas nas peças devido ao choque térmico, além de promover a eliminação incompleta dos materiais orgânicos, resultando em defeitos na estrutura do material, nem tão lentas que aumentem o tempo de ciclo do processo de queima, resultando em menor produtividade e maior consumo de energia, o que pode inviabilizar a produção economicamente.

Durante a calcinação, os corpos cerâmicos sofrem diversas transformações físico-químicas, como a desidratação, a decomposição de minerais e a formação de novas fases cristalinas (Baccelli Júnior, 2010; Aguiar *et al.*, 2022; Rodrigues, 2023). A Tabela 2, adaptada de Rodrigues (2023), apresenta um resumo detalhado dessas transformações em função da temperatura.

Tabela 2: Transformações que ocorrem nos corpos cerâmicos em função da temperatura.

| <b>Faixa de temperatura (°C)</b> | <b>Modificações esperadas</b>   |
|----------------------------------|---|
| <b>200 – 300</b>                 | Oxidação de orgânicos   |
| <b>250 – 300</b>                 | Retração devido à decomposição do hidróxido de alumínio. Estabiliza-se em 500°C |
| <b>400 – 500</b>                 | Oxidação dos sulfetos   |
| <b>573</b>                       | Transformação alotrópica do quartzo (de $\beta$ para $\alpha$ )                 |
| <b>600</b>                       | Desidroxilação completa dos cristais de argila                                  |
| <b>500 – 900</b>                 | Perda do $CO_2$ dos carbonatos e Perda da estrutura da mica                     |
| <b>1150</b>                      | Formação da mulita  |
| <b>1300 – 1500</b>               | Expansão típica da mulitização  |
| <b>1900 – 2000</b>               | Fusão completa  |

Fonte: Adaptada de Rodrigues (2023)

É importante ressaltar que o tipo de argilomineral influencia diretamente as transformações ocorridas durante a calcinação, resultando em diferentes fases a altas temperaturas. A otimização do processo de calcinação, com menor consumo energético e maior eficiência, contribui para a melhoria das condições ambientais da produção cerâmica.

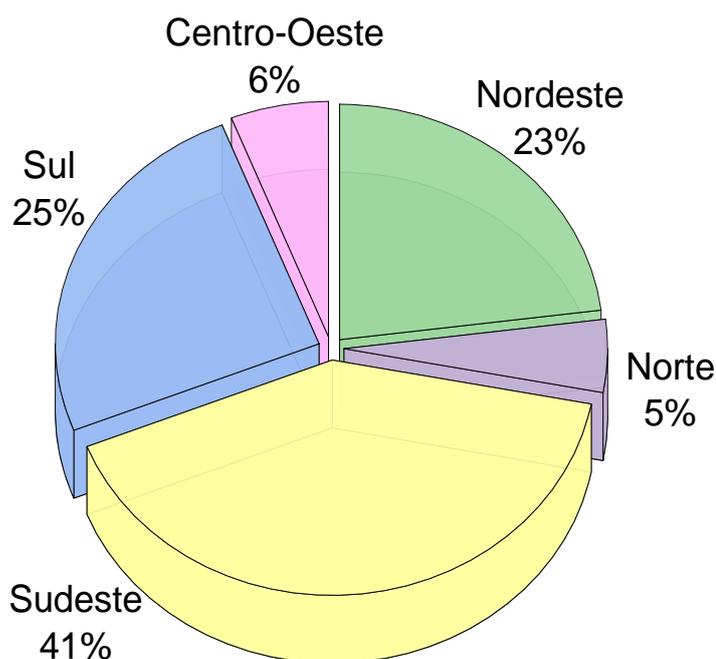
### 2.1.2.5 Indústria cerâmica

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil, também denominada cerâmica estrutural, envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais e de vedação, tubos, lajotas e pisos) (Schwob *et al.*, 2017).

De acordo com dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica - ANICER (2015) e do Cadastro Central de Empresas – CEMPRESA (IBGE, 2021), em 2015, a indústria de cerâmica vermelha era responsável por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil, contando com 6903 empresas, gerando um faturamento anual de R\$ 18 bilhões e cerca de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos. No entanto, em 2021, houve uma redução de cerca de 19% no número de empresas, totalizando 5578, indicando uma mudança no cenário do setor nos últimos anos.

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cujo 89% produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste, sul e nordeste, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país (ABDI, 2016; Schwob *et al.*, 2017) (Figura 4).

Figura 4: Percentual de produção de cerâmica vermelha por regiões do Brasil



Fonte: Adaptada de ABDI (2016).

A AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI (2016) e Schwob *et al.* (2017) destacam que a região Sul abriga cerca de 29% das empresas do setor, seguida pelas regiões Sudeste e Nordeste, com 26% e 24%, respectivamente. A região Sudeste, por sua vez, concentra 41% da produção nacional, com destaque para São Paulo, que detém 731 mil toneladas de produção mensal e cerca de 650 empresas mecanizadas, tornando-se o maior consumidor de lenha e energia elétrica do setor. As regiões Sul e Nordeste respondem por 25% e 23%, respectivamente, da produção nacional. A região Centro-Oeste detém 6% da produção, enquanto a região Norte, com produção predominantemente artesanal, representa cerca de 5% do setor.

Os principais impactos ambientais relacionados à indústria de cerâmica vermelha estão geralmente associados a fatores como: degradação das áreas de extração da argila, consumo de energia, geração de resíduos sólidos decorrentes de perdas por falhas na qualidade do produto, emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (FIEMG, 2016).

Segundo a FIEMG (2016) e a ANICER (2014), o setor cerâmico brasileiro têm avançado bastante no que se refere as questões ambientais, adotando diversas práticas como a recuperação de áreas de extração, a geração de empregos e renda nas comunidades locais e o aproveitamento de resíduos. Nesse sentido, destaca-se a utilização em larga escala de biomassas renováveis, como resíduos da agroindústria e da indústria moveleira, além de resíduos de podas e de áreas de reflorestamento, como combustível para os fornos cerâmicos, e a incorporação de resíduos inertes na massa cerâmica, contribuindo para as reduções do impactos ambientais e gestão sustentável.

No caso da incorporação de resíduos não inertes, essa ação evita que o material seja despejado em aterros sanitários emitindo gases poluentes na atmosfera ou liberando substâncias tóxicas ao solo e à água durante o seu processo de decomposição (ANICER, 2014).

## 2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Os resíduos oriundos das Estações de Tratamento de Água (ETAs) estão enquadrados na definição de Resíduos Sólidos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004). Além disso, sob a ótica da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei

nº 12305, 2 de agosto de 2010, que traz como objetivo uma destinação ambientalmente adequada, que inclui a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos. Assim, os lodos gerados nas ETAs devem ser tratados e dispostos de forma correta para não causar impactos ambientais, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas, além de contribuir para a proliferação de vetores de doenças. Encontrar uma destinação correta vem se apresentando como um grande desafio tecnológico e econômico.

### 2.2.1 Tratamento de água

O abastecimento de água potável é um direito da população brasileira assegurado pela Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico (Brasil, 2007). Existem diversas técnicas de tratamento de água e para escolher a apropriada, deve-se conhecer a finalidade a que a água tratada se destina (Santos, 2016). Em relação ao abastecimento público, a água deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021). Essa portaria dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano.

No que se refere às definições, a Portaria MS nº 888, em seu artigo 5º, adota as seguintes (Brasil, 2021):

Art. 5º Para os fins deste Anexo são adotadas as seguintes definições:

I - água para consumo humano: água potável destinada à ingestão, preparação de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem;

II - água potável: água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido neste Anexo e que não ofereça riscos à saúde;

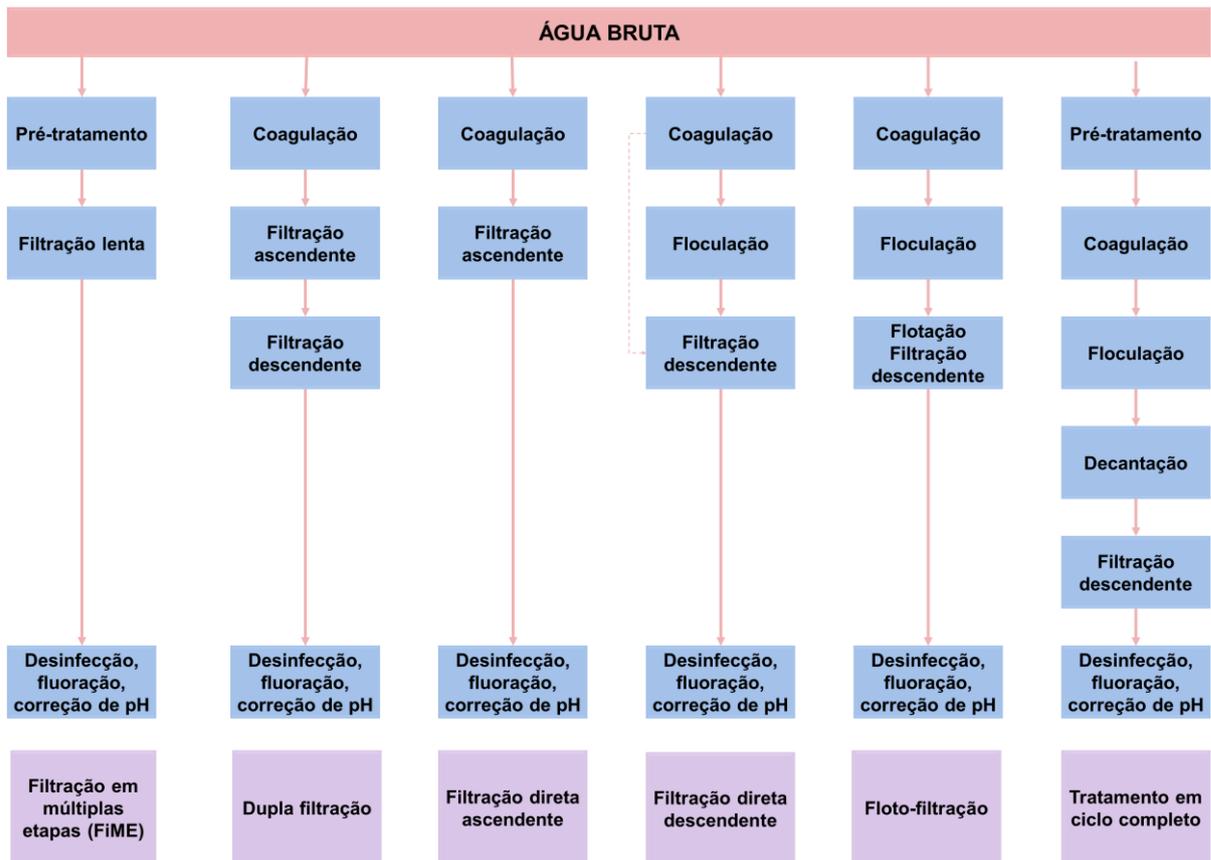
III - padrão de potabilidade: conjunto de valores permitidos para os parâmetros da qualidade da água para consumo humano, conforme definido neste Anexo.

Estação de tratamento de água (ETA) é um conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade (NBR 12216, ABNT, 1992). Dentro de uma ETA, seja ela de ciclo completo, filtração lenta ou direta, a qualidade da água bruta é o fator determinante para a escolha da técnica de tratamento mais adequada (coagulação, floculação, filtração, etc.) (Reali, 1999; Tavares, 2003; Montalvan, Boscov, 2016; Santos, 2024). A caracterização da água

bruta permite a seleção do processo mais eficiente para a remoção de contaminantes e o atendimento aos padrões de potabilidade estabelecidos.

A Figura 5 apresenta um Fluxograma as principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.

Figura 5: Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.

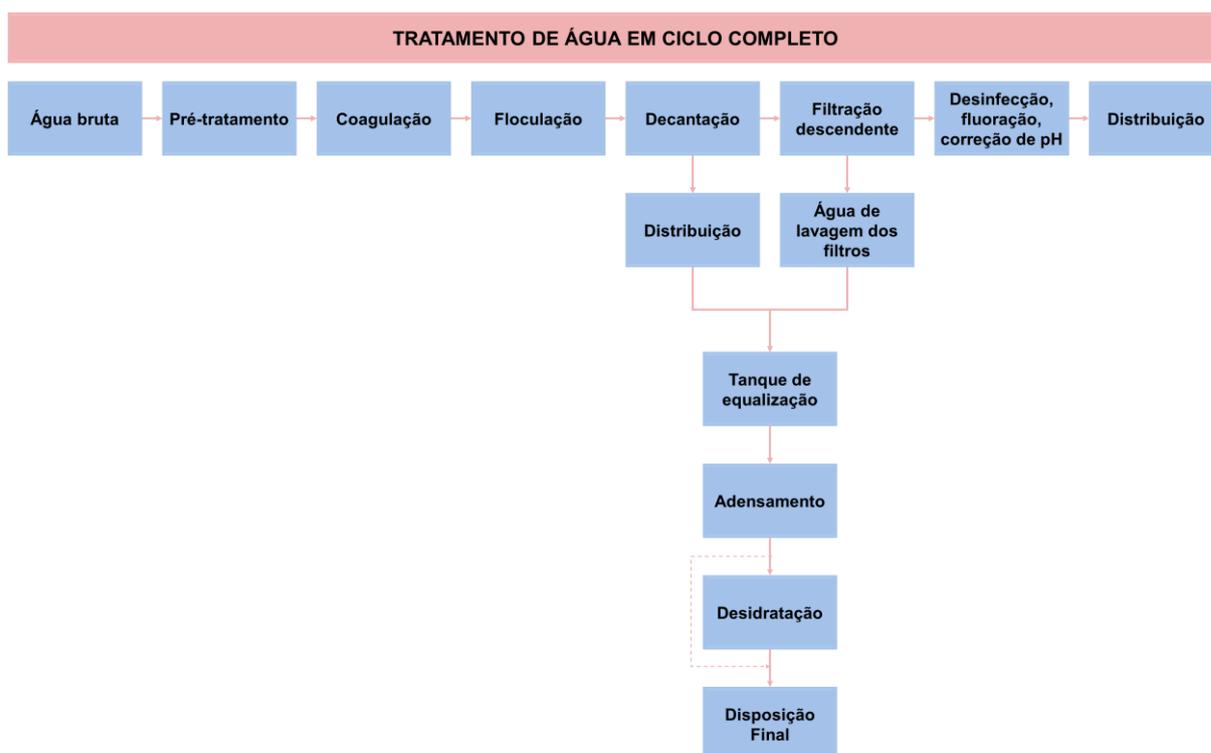


Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005).

De acordo com a Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (BRASIL, 2020), no Brasil, aproximadamente 5,5% do volume de água distribuído no país não recebe tratamento antes de chegar à população. Do volume distribuído tratado, 75,1% recebem tratamento de ciclo completo, também conhecido como tratamentos convencionais ou clássicos. Já os outros 4,2% recebem tratamento não convencional (não realizam todas as etapas realizadas em um ciclo completo); e 20% realizam um tratamento simplificado, apenas com desinfecção (e, em alguns casos, ocorre a fluoretação e correção de pH).

A Figura 6 apresenta o fluxograma do tratamento de água em uma estação de tratamento convencional, incluindo as etapas de tratamento e disposição final do lodo gerado.

Figura 6: Processo de tratamento de água em ciclo completo.



Fonte: Adaptado de Richter (2001); Tavares (2003) e Santos (2024).

É importante ressaltar que cada etapa de tratamento gera diferentes tipos de resíduos, como sólidos (lodos), líquidos (água proveniente da lavagem dos filtros) e gasosos (emissões de gases), os quais podem ter impactos ambientais significativos. A quantificação e o tratamento adequado desses resíduos são essenciais para minimizar seus efeitos negativos e garantir a sustentabilidade do processo de tratamento de água.

### 2.2.2 Origem e características do lodo de ETA

O lodo de ETA é definido, comumente, como o resíduo constituído de água e sólidos suspensos originalmente contidos na fonte de captação de água bruta, tais como os sedimentos do solo e a matéria orgânica carregada, somados aos subprodutos gerados pela adição de reagentes químicos no processo de tratamento (Cordeiro, 2001; Richter, 2001; Andreoli *et al.*, 2006; Santos, 2016).

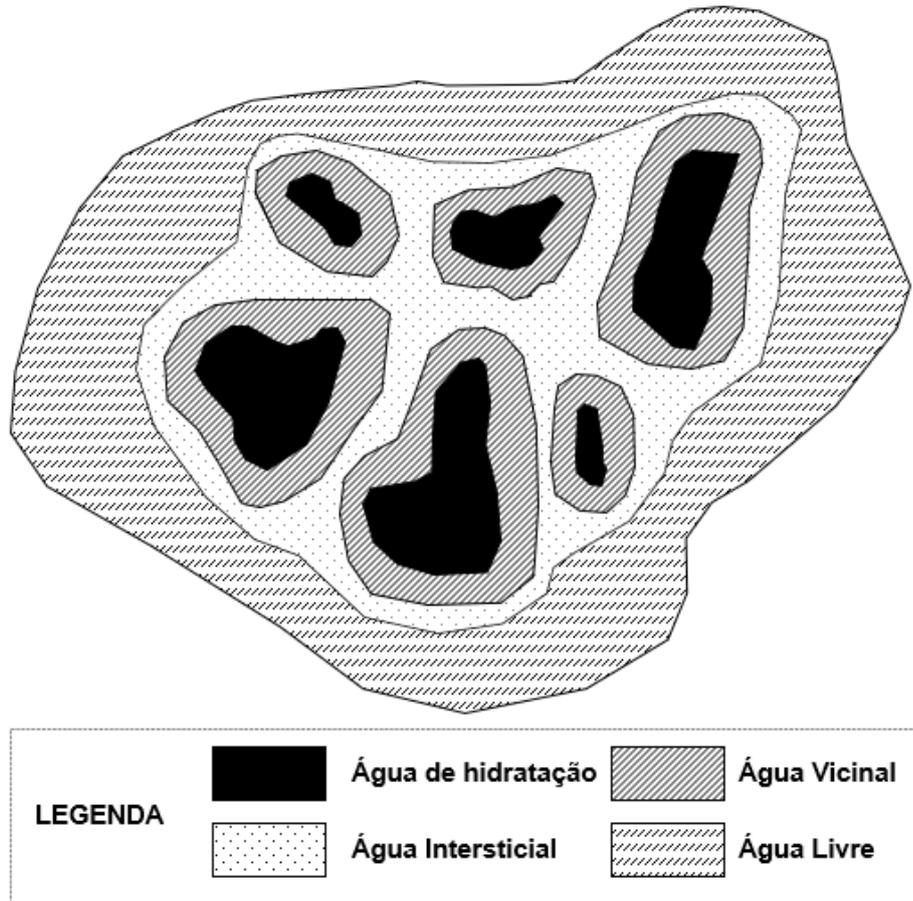
Soares *et al.* (2009) destacam que o lodo de ETA é gerado nos decantadores, etapa na qual ocorre a remoção dos sólidos, como partículas de argila, silte e matéria orgânica, presentes na água. Os autores ressaltam que o lodo de ETA pode ser composto também de resíduos originados dos clarificadores, lavagem de filtros, recuperação da água de lavagem ou uma combinação dessas operações. Cordeiro (2001) e Soares *et al.* (2009) destacam que as características quantitativas e qualitativas desse resíduo variam de acordo com diversos fatores, como a qualidade da água bruta, a quantidade e o tipo de coagulante adicionado na etapa de coagulação, a eficiência dos floculadores e decantadores, o tempo de retenção do lodo nos tanques e a eficiência da sedimentação. Os autores também ressaltam que a composição química do lodo pode variar significativamente, dependendo da origem da água e dos processos de tratamento utilizados.

Conforme Smollen e Kafaar (1994), a água contida no lodo de ETA pode estar presente em diversas formas, com diferentes graus de associação com a fase sólida. Essa classificação se baseia na dificuldade de separação da água das partículas sólidas, podendo ser ordenada da seguinte forma:

- Água Livre: água não associada às partículas sólidas;
- Água Intersticial ou capilar: água ligada mecanicamente que fica presa nos flocos;
- Água Vicinal: fisicamente ligadas às múltiplas camadas de moléculas de água, firmemente aderidas à superfície da partícula por ligação de hidrogênio;
- Água Quimicamente ligada ou água de hidratação.

A Figura 7 apresenta um modelo esquemático da estrutura de um floco de lodo, evidenciando a matriz sólida rodeada por uma película de água de hidratação (em preto).

Figura 7: Distribuição de água no floco de lodo de ETA.



Fonte: Adaptada de Smollen e Kafaar (1994)

O teor de sólidos totais do floco de lodo varia entre 1.000 a 40.000 mg/L (0,1 a 4%), sendo deste, de 75 a 90% sólidos suspensos e 20 a 35% compostos voláteis, apresentando, portanto uma pequena porção biodegradável, mas o qual pode ser prontamente oxidável. A massa específica do lodo de ETA varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes neste, ela pode variar de 1,002kg/m<sup>3</sup> para lodos com teor de sólidos de 1%, até 1,5kg/m<sup>3</sup> após processo de desidratação (Richter, 2001).

#### 2.2.2.1 Composição química e mineralógica

A Tabela 3 apresenta uma síntese de resultados de composições químicas do lodo de ETA caracterizados na literatura.

Tabela 3: Composição química de lodos de ETAs estudados por diversos autores

| Referências                               | % óxidos dos elementos químicos |                                    |                                    |                        |                       |                        |            |            |            |                                   |                       |      |       |
|---|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|-----------------------|------|-------|
|   | <i>SiO<sub>2</sub></i>          | <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>TiO<sub>2</sub></i> | <i>K<sub>2</sub>O</i> | <i>Na<sub>2</sub>O</i> | <i>MgO</i> | <i>MnO</i> | <i>CaO</i> | <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> | <i>SO<sub>3</sub></i> | Outs | PF    |
| <b>Chiang; Chien; Hwang (2008)</b>        | 70,14                           | 15,45                              | 5,37                               | -                      | 5,24                  | 1,02                   | 1,64       | -          | 0,64       | -                                 | -                     | -    | -     |
| <b>Monteiro <i>et al.</i> (2008)</b>      | 24,68                           | 30,39                              | 11,59                              | 0,9                    | 0,35                  | -                      | 0,17       | -          | 0,16       | -                                 | -                     | 1,09 | 30,67 |
| <b>Oliveira e Holanda (2008)</b>          | 35,92                           | 31,71                              | 12,79                              | 1,1                    | 0,58                  | 0,06                   | 0,71       | 0,09       | 0,1        | 0,35                              | -                     | -    | 16,93 |
| <b>Paixão <i>et al.</i> (2008)</b>        | 12,6                            | 8,60                               | 73,0                               | -                      | -                     | -                      | -          | 0,50       | 5,20       | -                                 | -                     | 0,10 | -     |
| <b>Vitorino, Monteiro e Vieira (2009)</b> | 41,12                           | 38,31                              | 16,34                              | 1,16                   | 0,89                  | -                      | -          | -          | 0,25       | 0,64                              | -                     | 1,29 | 28,0  |
| <b>Tartari <i>et al.</i> (2011)</b>       | 24,1                            | 31,6                               | 18,6                               | 2,2                    | 0,3                   | -                      | -          | -          | -          | -                                 | 2,8                   | 2,8  | 20,4  |
| <b>Kizinievič <i>et al.</i> (2013)</b>    | 10,9                            | 1,34                               | 68,65                              | -                      | -                     | -                      | 0,61       | -          | 8,23       | 9,39                              | 0,88                  | 0,88 | -     |
| <b>Silva (2014)</b>                       | 52,19                           | 17,70                              | 21,09                              | 2,03                   | 4,08                  | -                      | 0,54       | -          | 0,31       | 0,78                              | 0,45                  | 0,83 | -     |
| <b>Benlalla <i>et al.</i> (2015)</b>      | 27,12                           | 62,66                              | 1,16                               | 0,16                   | 0,83                  | 0,24                   | 0,37       | -          | 1,25       | 0,19                              | -                     | 0,91 | 5,11  |
| <b>Mymrin <i>et al.</i> (2017)</b>        | 17,01                           | 24,46                              | 13,0                               | 0,4                    | 0,18                  | 0,02                   | 0,15       | 3,2        | 0,3        | 0,44                              | 0,61                  | 1,07 | 39,77 |
| <b>Pei Ling <i>et al.</i> (2018)</b>      | 40,33                           | 31,84                              | 6,43                               | 0,46                   | 1,32                  | -                      | 0,48       | -          | -          | 0,2                               | 0,14                  | 0,44 | 18,5  |
| <b>Santana (2019)</b>                     | 7,66                            | 17,46                              | 11,45                              | 0,21                   | 0,17                  | 0,04                   | 0,05       | 0,13       | 0,32       | 0,74                              | 2,30                  | 1,35 | 58,12 |

Continua ...

| Referências                    | % óxidos dos elementos químicos |                                    |                                    |                        |                       |                        |            |            |            |                                   |                       |      |       |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|-----------------------|------|-------|
|                                | <i>SiO<sub>2</sub></i>          | <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | <i>TiO<sub>2</sub></i> | <i>K<sub>2</sub>O</i> | <i>Na<sub>2</sub>O</i> | <i>MgO</i> | <i>MnO</i> | <i>CaO</i> | <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> | <i>SO<sub>3</sub></i> | Outs | PF    |
| <b>Bandieira et al. (2021)</b> | 42,36                           | 22,7                               | 10,64                              | 1,07                   | 1,4                   | -                      | 0,36       | -          | 0,57       | 0,29                              | -                     | 0,92 | 19,69 |
| <b>Erdogmus et al. (2021)</b>  | 45,47                           | 20,41                              | 7,94                               | 0,18                   | 1,2                   | 0,93                   | 1,58       | 0,15       | 5,19       | 0,18                              | 0,21                  | 0,06 | 16,5  |
| <b>Seddik et al. (2022)</b>    | 64,48                           | 16,5                               | 3,43                               | 0,82                   | 0,69                  | 2,04                   | 3,15       | -          | 2,81       | 0,38                              | -                     | 0,85 | 4,85  |
| <b>Sutcu et al. (2022)</b>     | 45,5                            | 20,4                               | 6,94                               | -                      | 1,2                   | 0,93                   | 1,58       | -          | 5,19       | -                                 | -                     | 0,86 | 17,4  |
| <b>Teoh et al. (2022)</b>      | 36,38                           | 19,74                              | 2,34                               | 0,18                   | 0,43                  | 0,14                   | 0,24       | -          | 2,83       | 0,35                              | -                     | 1,52 | 62,93 |

PF = Perda ao Fogo. Outs = outros

Fonte: Autora (2024)

A análise da composição química dos lodos de ETA estudados por diversos autores como material cerâmico complementar, apresentada na Tabela 3, destaca que os lodos estudados são compostos majoritariamente por óxidos de silício ( $SiO_2$ ), alumínio ( $Al_2O_3$ ) e ferro ( $Fe_2O_3$ ). Essa composição é similar à composição de diversas argilas (Monteiro *et al.*, 2008; Oliveira e Holanda, 2008; Paixão *et al.*, 2008; Silva, 2014), como demonstrado na Tabela 1 da seção 2.1.1.1, o que sugere o potencial dos lodos de ETA como matéria-prima para a produção de materiais cerâmicos.

Na literatura é comum denominar o lodo de ETA em função do coagulante utilizado. No processo de tratamento da água para remoção de cor e turbidez, os coagulantes mais utilizados são compostos principalmente de sais de ferro e alumínio, como sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), sulfato férrico ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) e cloreto férrico ( $FeCl_3$ ) (Gomes *et al.*, 2019). Assim, dos 17 trabalhos analisados, 18% são considerados como lodo férrico (Paixão *et al.*, 2008; Kizinievič *et al.*, 2013 e Silva, 2014) e 82% como lodo de alumínio (Chiang, Chien, Hwang, 2008; Monteiro *et al.*, 2008; Oliveira e Holanda, 2008; Paixão *et al.*, 2008; Vitorino, Monteiro e Vieira, 2009; Tartari *et al.*, 2011; Benlalla *et al.*, 2015; Mymrin *et al.*, 2017; Pei Ling *et al.*, 2018; Santana, 2019; Bandeira *et al.*, 2021; Erdogmus *et al.*, 2021; Seddik *et al.*, 2022; Sutcu *et al.*, 2022 e Teoh *et al.*, 2022).

O lodo férrico, composto principalmente por  $Fe_2O_3$  (Paixão *et al.*, 2008; Kizinievič *et al.*, 2013 e Silva, 2014), quando utilizado na fabricação de material cerâmico atua como pigmento natural, intensificando a coloração vermelha, conforme destacado por Kizinievič *et al.* (2013).

A perda ao fogo dos lodos de ETAs estudados variaram consideravelmente, entre 3,2% e 62,93%. Essa elevada perda pode ser relacionada ao elevado teor de matéria orgânica, aliado à presença de argilominerais e hidróxidos, que se decompõem durante o processo de queima (Camargo, 2014; Santana, 2019; Gomes *et al.*, 2019; Teoh *et al.*, 2022).

A Tabela 4 apresenta a composição mineralógica dos lodos de ETAs estudados.

Tabela 4: Composição mineralógica de lodos de ETA estudados por diversos autores.

| <b>Referências</b>                      | <b>Minerais</b> |           |           |                |           |
|---|-----------------|-----------|-----------|----------------|-----------|
| <b>Chiang, Chien, Hwang (2008)</b>      | Quartzo         |           |           |                |           |
| <b>Monteiro <i>et al.</i> (2008)</b>    | Caulinita       | Gibsita   | Goetita   | Quartzo        |           |
| <b>Oliveira e Holanda (2008)</b>        | Caulinita       | Quartzo   | Gibsita   |                |           |
| <b>Vieira, Margem e Monteiro (2009)</b> | Caulinita       | Quartzo   | Hematita  |                |           |
| <b>Kizinievič <i>et al.</i> (2013)</b>  | Hematita        | Quartzo   | Talco     |                |           |
| <b>Agostini (2014)</b>                  | Quartzo         | Hematita  | Calcita   | Alumina        |           |
| <b>Nor <i>et al.</i> (2015)</b>         | Quartzo         | Caulinita |           |                |           |
| <b>Rodrigues (2016)</b>                 | Caulinita       | Gibsita   | Goetita   | Quartzo        | Muscovita |
| <b>Montalvan e Boscov (2016)</b>        | Quartzo         | Goetita   | Muscovita | Caulinita      |           |
| <b>Tantawy e Mohamed (2017)</b>         | Quartzo         | Albita    | Calcita   |                |           |
| <b>Mymrin <i>et al.</i> (2017)</b>      | Ilita           | Caulinita | Quartzo   |                |           |
| <b>Pei Ling <i>et al.</i> (2018)</b>    | Caulinita       | Quartzo   | Hematita  | Zeolita cúbica |           |
| <b>Godoy <i>et al.</i> (2019)</b>       | Caulinita       | Quartzo   | Albita    |                |           |
| <b>Ying e Awang (2019)</b>              | Quartzo         | Caulinita | Rutilo    |                |           |
| <b>Bandiera <i>et al.</i> (2021)</b>    | Quartzo         | Caulinita | Olivina   | Anatásio       |           |
| <b>Erdogmus <i>et al.</i> (2021)</b>    | Quartzo         | Muscovita | Ilita     | Calcita        |           |
| <b>Seddik <i>et al.</i> (2022)</b>      | Montmorilonita  | Quartzo   | Calcita   | Albita         |           |
| <b>Sutcu <i>et al.</i> (2022)</b>       | Quartzo         | Muscovita | Ilita     | Calcita        |           |
| <b>Marchiori <i>et al.</i> (2022)</b>   | Quartzo         | Muscovita | Caulinita |                |           |
| <b>Yang <i>et al.</i> (2023)</b>        | Mulita          | Muscovita | Quartzo   | Albita         |           |

Fonte: Autora (2024)

Com relação à sua composição mineralógica (Tabela 4), o lodo de Estação de Tratamento de Água é composto principalmente de caulinita e quartzo, com a presença de outros minerais como gibsita (Monteiro *et al.*, 2008; Oliveira e Holanda, 2008; Rodrigues, 2016), goetita (Monteiro *et al.*, 2008; Montalvan e Boscov, 2016; Rodrigues, 2016), hematita (Vieira, Margem e Monteiro, 2009; Kizinievič *et al.*, 2013; Agostini, 2014; Pei Ling *et al.*, 2018), calcita (Agostini, 2014; Tantawy e Mohamed, 2017; Erdogmus *et al.*, 2021; Seddik *et al.*, 2022; Sutcu *et al.*, 2022), talco (Kizinievič *et al.*, 2013), calcita (Agostini, 2014;), alumina (Agostini, 2014;), muscovita (Rodrigues, 2016; Montalvan; Boscov, 2016; Erdogmus *et al.*, 2021; Sutcu *et al.*, 2022; Marchiori *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023), mulita (Yang *et al.*, 2023), albita (Godoy *et al.*, 2019; Seddik *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023), ilita (Mymrin *et al.*, 2017; Erdogmus *et al.*, 2021; Sutcu *et al.*, 2022), zeolita cúbica (Pei Ling *et al.*, 2018), rutilo (Ying, Awang, 2019), olivina (Bandeira *et al.*, 2021), anatásio (Bandeira *et al.*, 2021), montmorilonita (Seddik *et al.*, 2022).

Os resultados dos difratogramas e das composições químicas apresentados pelos autores em seus respectivos trabalhos, mostra que há semelhança entre as composições químicas e mineralógicas entre os lodos e argilas estudados (Teixeira *et al.*, 2006; Monteiro *et al.*, 2008). Este aspecto pode facilitar a interação entre partículas de lodo e argila (Teixeira *et al.*, 2006).

Assim, de acordo com as análises químicas e mineralógicas do lodo de ETA apresentados nas Tabelas 3 e 4, destaca-se que:

A presença de sílica na composição do lodo de ETA pode ser associada à estrutura cristalina dos argilominerais, como por exemplo, caulinita, ou ainda, apresentar-se na sua forma livre como quartzo (Souza *et al.*, 2008). Além disso, a sílica pode estar presente na água subterrânea devido à interação da água com formações geológicas que contêm minerais ricos em silício ou devido a desintegração de minerais nas bacias hidrográficas podendo contribuir para a presença de sílica na água (Santos, 2024).

O óxido de alumínio, por sua vez, pode ser associado à estrutura dos argilominerais como a caulinita e a muscovita (Souza *et al.*, 2008; Santos, 2024). A presença de ferro nos lodos pode ter origem tanto em argilominerais, como a goethita e a hematita (Camargo, 2014; Rodrigues, 2023; Santos, 2024). Além disso, o uso de

coagulantes à base de alumínio e de ferro durante o tratamento de água pode contribuir para o aumento dos teores desses elementos nos lodos (Camargo, 2014; Rodrigues, 2023).

### 2.2.3 Disposição final do lodo de ETA

Um dos principais desafios ambientais do tratamento de água é a disposição adequada do resíduo gerado durante o processo. Uma das alternativas mais econômicas, consiste em seu lançamento direto na rede de esgoto, sem qualquer tipo de tratamento, a não ser a presença de um tanque para controle e regularização da vazão de lançamento (Reali, 1999). Entretanto, essa prática é inadequada, pois não garante um destino ambientalmente correto para o lodo e sobrecarrega as estações de tratamento de esgoto (ETE), comprometendo a eficiência dos processos e a qualidade do efluente final, transferindo, assim, o problema para outro ponto do sistema de saneamento.

De acordo com Reali (1999), duas alternativas mais adequadas para a disposição do lodo são a utilização de lagoas ou leitos de secagem. Essas opções, no entanto, exigem a disponibilidade de grandes áreas para a implantação, condições climáticas favoráveis e a produção de lodo com características específicas, como baixo teor de umidade. Embora sejam alternativas mais ambientalmente corretas em comparação com o lançamento direto na rede de esgoto, é fundamental avaliar os potenciais impactos gerados, como a emissão de odores e a contaminação do solo.

Além disso, existem várias alternativas passíveis de adoção, que depende dos fatores como a composição do lodo, transporte, regulamentações ambientais locais e fatores econômicos, tais como: disposição em aterros sanitários, incineração dos resíduos (Reali, 1999; Richter, 2001; Santos, 2024), disposição controlada em certos tipos de solos (Montalvan, 2016; Morselli *et al.*, 2022) e reaproveitamento na construção civil (Orbecido *et al.*, 2018; Sverguzova; Saprónova; Fomina, 2020; Li *et al.*, 2021; Duan *et al.*, 2022).

Na literatura é possível encontrar trabalhos que analisaram a viabilidade da utilização do lodo de ETA na construção civil como matéria-prima na produção de argamassas (Li *et al.*, 2021; Pham *et al.*, 2021; Al-Rawashdeh *et al.*, 2022) e concretos (Amornpunyapat; Panyakapo; Panyakapo, 2021; He *et al.*, 2023), uma vez que é um setor em que há uma grande demanda por recursos naturais, e utilizam, geralmente,

carbonato de cálcio e argila como matérias-primas; como material pozolânico, na produção de materiais cimentícios suplementares (Duan *et al.*, 2022; Qin *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023) e como agregados (Huang; Wang, 2013; Kwek; Awang, 2018; Ying; Awang, 2019).

Além dos estudos que incorporam o lodo de ETA na produção de geopolímeros (Ho; Orbecido; Pomentilla, 2018; Orbecido *et al.*, 2018; Jamchaturapatr; Piriyaikul, 2020) e materiais cerâmicos (Texeira *et al.*, 2006; Martínez-García *et al.*, 2012; Kizinievič *et al.*, 2013; Benlalla *et al.*, 2015; Svergzova; Sapronova; Fomina, 2020), o lodo contém minerais comuns em argilas e, assim, sua composição facilita a mistura argila/lodo (Monteiro *et al.*, 2008).

#### 2.2.4 Aplicações do lodo de ETA em materiais cerâmicos

Na literatura é possível encontrar vários trabalhos que analisaram a viabilidade da produção de material cerâmico utilizando misturas binárias de argila e lodo de ETA, obtidos da etapa de decantação. Dentre esses trabalhos pode-se destacar:

Monteiro *et al.*, (2008) avaliou a influência da temperatura de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmicas vermelhas contendo lodo de estação de tratamento de água, localizada no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. O lodo foi caracterizado quanto à distribuição granulométrica, composição química, mineralógica, comportamento térmico e morfologia. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0, 3, 5 e 10%, em massa), moldadas em corpos de prova de 11,5×2,5×1,0cm, com 8% de umidade e queimadas a 700, 900 e 1100°C por 1 hora, com uma taxa de aquecimento de 3°C/min. As propriedades cerâmicas avaliadas incluíram densidade, retração linear, absorção de água e resistência à flexão. Os resultados destacam que a incorporação de lodo aumentou a absorção de água e reduziu a resistência mecânica das cerâmicas, devido a alterações na porosidade durante a queima.

Oliveira e Holanda (2008) investigaram a influência do lodo de estação de tratamento de água, localizada no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, na microestrutura de cerâmicas vermelhas. Amostras com diferentes proporções de lodo (0, 5, 10 e 15%, em massa) foram calcinadas a 850, 950 e 1050°C. Os autores observaram que a adição de lodo, composto por partículas finas, aumentou a plasticidade da massa argilosa. A calcinação a 1050°C promoveu a dissolução parcial do quartzo, resultando

na formação de fase vítrea. Os autores concluíram que a incorporação de até 15% de lodo não afetou significativamente a microestrutura e as propriedades físico-mecânicas da cerâmica, como retração linear, absorção de água, massa específica aparente e resistência à flexão.

Paixão *et al.* (2008) estudaram a produção de cerâmicas com lodo com alto teor de ferro da estação de tratamento de água, localizada em Minas Gerais, Brasil. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0, 2, 5 e 10%, em massa), moldadas em corpos de prova de 5,5x 20,5x61,1mm e queimadas a 950, 1000 e 1050°C por 3h, com taxa de aquecimento de 5°C/min. Os resultados indicaram que a adição de 2 a 5% de lodo reduziu a resistência à flexão em cerca de 30%, devido à baixa interação entre lodo e argila, evidenciada por microfissuras e aumentou a absorção de água.

Muller (2009) investigou a incorporação de lodo da Estação de Tratamento de Água do Bolonha na fabricação de tijolos cerâmicos. O lodo foi desaguado em unidades de desaguamento e caracterizado antes de ser adicionado à massa cerâmica em diferentes proporções (10%, 12% e 20%). Os tijolos foram queimados a 500°C por 48 horas e submetidos a ensaios de resistência, absorção de água e análise visual. A incorporação de 20% de lodo resultou em alta plasticidade e dificuldades na fabricação dos tijolos. No entanto, as proporções de 10% e 12% apresentaram melhores resultados em termos de resistência, indicando a viabilidade da produção de tijolos cerâmicos com até 12% de lodo de ETA. O estudo destaca o potencial do lodo de ETA como matéria-prima alternativa na indústria cerâmica, contribuindo para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental.

Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) estudaram o uso de lodo de ETA obtido em diferentes etapas do sistema de tratamento: desarenação, decantação e filtração. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual a 20,1mm com diferentes proporções de LETA (0, 3, 5, 7 e 10%, em massa), e queimados a 700°C com uma taxa de aquecimento de 2°C/min. Os resíduos foram caracterizados por diversas técnicas, incluindo DRX, FRX, MEV e análise termogravimétrica. As propriedades físicas e mecânicas avaliadas foram retração linear, absorção de água e resistência à compressão.

Os resultados mostraram que os resíduos de decantação e filtração possuem composição química e mineralógica semelhantes, sendo compostos por minerais argilosos, hidróxidos de alumínio e ferro, mica e quartzo. O resíduo do desarenador é composto basicamente por quartzo, com traços de mica e caulinita. O resíduo arenoso do desarenador proporcionou benefícios à massa cerâmica, como a melhoria da trabalhabilidade, a redução da retração linear e da absorção de água. Os autores concluíram que os três tipos de resíduos de ETA podem ser utilizados na produção de cerâmica vermelha, com destaque para o resíduo arenoso do desarenador, que apresenta vantagens adicionais em relação aos demais.

Kizinievič *et al.* (2013) realizaram uma avaliação da incorporação do lodo de ETA em produtos cerâmicos. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0, 5, 10, 20, 30 e 40%, em massa), moldadas em corpos de prova de 70x70x70mm e queimadas entre 1000°C e 1050°C por 4 horas. Os resultados mostraram que a adição de 5% de lodo aumentou a densidade e a resistência à compressão, além de reduzir a absorção de água.

Por outro lado, a adição de 40% de lodo diminuiu a densidade e a resistência à compressão, além de aumentar a absorção de água e a porosidade. O estudo também revelou que o lodo, composto principalmente por óxido de ferro, pode ser utilizado como pigmento natural, conferindo uma coloração mais intensa aos produtos cerâmicos. A análise microestrutural indicou que a adição de LETA resultou em uma matriz mais porosa nos tijolos.

Agostini (2014) investigou a influência da composição química do lodo de estação de tratamento de água (ETA), influenciada pela qualidade da água, nas propriedades de cerâmica vermelha. Três amostras de lodo, coletadas em diferentes épocas do ano, e uma amostra de argila foram utilizadas. O lodo foi caracterizado por FRX, DRX e lixiviação. Amostras de cerâmica com 5% de lodo foram moldadas e sinterizadas a 800, 950 e 1050°C por 12 horas, com uma taxa de aquecimento de 2,5°C/min. As cerâmicas foram caracterizadas quanto à composição química e mineralógica, perda ao fogo e impacto ambiental, além de testes de retração linear, absorção de água e resistência à flexão.

O autor observou que a composição química do lodo influenciou significativamente as propriedades das cerâmicas, especialmente a absorção de

água, que apresentou um aumento de 61% em algumas amostras sinterizadas a 950°C. A 1050°C, as cerâmicas apresentaram baixa absorção de água. A 800°C, as propriedades não foram significativamente alteradas pela adição de lodo. E concluiu que a influência da composição do lodo é mais evidente em temperaturas de sinterização mais elevadas e que a adição de lodo em cerâmicas sinterizadas a 800°C não compromete suas propriedades.

Martins (2014) avaliou a influência do lodo de ETA, proveniente de diferentes coagulantes (sulfato de alumínio e policloreto de alumínio), nas propriedades de cerâmica vermelha. Amostras com 10, 20 e 30% de lodo foram preparadas, porém a mistura com 30% de lodo se mostrou inviável para prensagem. As demais amostras foram queimadas a 900, 1000 e 1200°C por 2 horas. As propriedades avaliadas incluíram retração linear, absorção de água, porosidade aparente, densidade e resistência à flexão. A caracterização das matérias-primas e dos corpos de prova após a queima foi realizada por FRX, DRX e MEV.

O autor observou que, de acordo com os resultados, o lodo gerado com sulfato de alumínio afetou negativamente as propriedades mecânicas, enquanto o lodo proveniente do policloreto de alumínio não apresentou o mesmo efeito. Na temperatura de 1000°C, todas as amostras atenderam aos requisitos para blocos cerâmicos da norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005). A 1000°C e 1200°C, as amostras também apresentaram características adequadas para placas de revestimento cerâmico, conforme a norma NBR 13818 (ABNT, 1997). Por fim, concluiu que é possível incorporar até 20% de lodo de ETA na produção de cerâmica vermelha, desde que a temperatura de queima seja de no mínimo 1000°C.

Silva (2014) estudou a utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água, gerado na etapa de decantação, para a produção de tijolos cerâmicos maciços. Amostras com diferentes proporções de lodo (0, 5, 10, 15, 20 e 25%, em massa) foram moldadas e queimadas a 950°C por 3 horas. O lodo e a argila foram caracterizados por DRX, FRX, MEV e ATD e ATG. As propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova foram avaliadas por retração linear de queima, absorção de água, tensão de ruptura à flexão, porosidade aparente, perda ao fogo e massa específica aparente. Os resultados mostraram que a absorção de água variou de acordo com o teor de lodo, com todos os corpos de prova apresentando valores inferiores a 25%. O uso de até

15% de lodo foi considerado viável, pois, acima dessa porcentagem, houve problemas com a resistência mecânica.

Benlalla *et al.* (2015) investigaram o uso de lodo de ETA, rico em alumina, na produção de blocos cerâmicos estruturais. Foram produzidos corpos de prova com 80x30x20mm com diferentes proporções de LETA (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%), moldados em corpos de prova de 80x30x20mm e queimados a 800, 900 e 1000°C por 2 horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. As propriedades tecnológicas avaliadas incluíram densidade aparente, retração linear, absorção de água, resistência à compressão, DRX e MEV.

Os resultados mostraram que a adição de lodo não alterou a plasticidade da cerâmica. O aumento do teor de lodo, no entanto, provocou maior absorção de água e retração, além de reduzir a resistência mecânica, resultando em corpos cerâmicos mais porosos e com menor densidade. Os autores recomendaram o uso de 20% a 30% de lodo, com temperatura de calcinação entre 900 e 930°C, para a produção de blocos cerâmicos estruturais.

Nor *et al.* (2015) investigaram o uso do lodo de ETA como material na fabricação de tijolos. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0% a 100%, com incrementos de 20%) e queimadas a 600°C por 2 horas e a 1000°C por 3 horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. As propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova foram avaliadas por retração linear de queima, perda de massa ao fogo, absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão.

Os resultados indicaram que o tijolo contendo 100% de lodo alcançou a maior resistência à compressão, atingindo 17,123MPa. De acordo com a Norma Malasiana MS7.6:1972, os tijolos com teores de lodo entre 20% e 100% atendem aos requisitos gerais para utilização de tijolos na construção de paredes.

Katte *et al.* (2017) investigaram a viabilidade de utilizar lodo de ETA como aditivo na produção de tijolos cerâmicos. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0% a 40%, em massa com incrementos de 5%), moldadas em corpos de prova cúbicos e cilíndricos e queimadas a 1050°C por 2 horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. Além disso, os resultados mostraram que o aumento do teor de lodo aumentou a absorção de água e perda de massa após queima e

reduziu a retração linear, entretanto, os resultados obtidos ficaram dentro dos limites exigido pela norma francesa. Por outro lado, os autores observaram que a incorporação de até 15% de lodo à argila não comprometeu a resistência à compressão, atingindo um valor superior ao exigido pela norma francesa. Os resultados mostraram que a adição de lodo pode causar eflorescência nos tijolos. Portanto, os autores concluíram que a utilização de até 15% de lodo de ETA na produção de tijolos é uma alternativa ecologicamente correta, pois permite a valorização desse resíduo e a produção de materiais de construção com propriedades adequadas.

Tantawy e Mohamed (2017) investigaram a incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em blocos cerâmicos, visando a produção de blocos leves, resistentes e com boa qualidade térmica. Corpos de prova com dimensões de 250x120x65mm foram produzidos com diferentes proporções de lodo e argila. A queima foi realizada a uma taxa de aquecimento de 100°C/h (aproximadamente 1,67°C/min), com permanência a 573°C por 30min para evitar rachaduras, e posterior aquecimento a 700, 850 e 1000°C por 1 hora. As propriedades físicas e mecânicas avaliadas incluíram retração linear de queima, perda de massa ao fogo, absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão.

Os resultados indicaram que o aumento do teor de lodo resultou em menor densidade e maior porosidade dos blocos. Embora o aumento da temperatura de calcinação tenha melhorado as propriedades, a substituição da argila pelo lodo reduziu a formação de fase vítrea. Os autores concluíram que a incorporação de 15% a 30% de lodo de ETA permite a produção de blocos cerâmicos com qualidade aceitável, atendendo aos requisitos de resistência, leveza e isolamento térmico.

Kizinievičs e Kizinievičs (2017) investigaram a utilização de lodo da estação de tratamento de água como aditivo na fabricação de tijolos cerâmicos. O estudo avaliou a influência de diferentes proporções de lodo (5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%, em massa) nas propriedades físicas e mecânicas dos tijolos moldados em corpos de prova de 70x70x70mm. As amostras foram queimadas a 1000 e 1050°C por 4 horas, com um tempo total de ciclo de 34 horas. Os resultados mostraram que a adição de lodo reduziu a densidade, a resistência à compressão e aumentou a porosidade dos tijolos. A retração linear e a absorção de água também aumentaram com o aumento do teor de lodo. Além disso, o estudo revelou que o lodo atua como um pigmento

natural, conferindo aos tijolos uma coloração mais intensa e escura, devido ao alto teor de óxido de ferro amorfo. Por fim, os autores concluíram que o lodo de ETA pode ser utilizado como um aditivo para tingir cerâmicas, além de ser uma alternativa para o descarte desse resíduo.

Cremades, Cusidó e Arteaga (2018) investigaram a viabilidade de utilizar lodo da estação de tratamento de água, localizada em Barcelona, Espanha, seco por atomização, na produção de cerâmicas de revestimento. Os pesquisadores produziram amostras com diferentes proporções de lodo (0%, 20%, 30%, 40% e 70%, em massa) e argila, moldadas em corpos de prova de 70×10×10mm e queimadas a 980°C por 3 horas, com uma taxa de aquecimento de 160°C/h (aproximadamente 2,67°C/min).

Os resultados mostraram que a adição de lodo aumentou a retração linear e a absorção de água das peças cerâmicas, além de reduzir sua resistência mecânica. Os autores atribuíram essa redução ao alto teor de carbonatos no lodo, que geraram porosidade e diminuíram a densidade após a queima. As cerâmicas com até 10% de lodo apresentaram potencial para uso em pisos, devido ao baixo impacto ambiental. Por fim, concluíram que o lodo de ETA pode ser uma alternativa para a produção de cerâmicas de revestimento, especialmente para aplicações que exigem alta porosidade e baixo custo.

Santana (2019) investigou a possibilidade de utilizar lodo da estação de tratamento de água, localizada em Recife, Brasil, como substituto parcial da argila na produção de materiais cerâmicos. Foram produzidos corpos de prova com diferentes proporções de LETA (2 a 15%, em massa), utilizando argila vermelha e preta, e submetidos a queima a 850 e 1000°C por 2 horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. Uma série de testes, incluindo resistência à compressão, absorção de água, perda de massa após queima, densidade aparente e porosidade, foram realizados nos corpos de prova.

Os resultados indicaram que a adição de até 10% de lodo à argila vermelha proporcionou materiais cerâmicos com propriedades adequadas para as temperaturas de queima estudadas. Enquanto isso, a utilização de argila preta, por outro lado, não resultou em materiais cerâmicos com as propriedades desejadas.

Sutcu *et al.* (2022) investigaram a viabilidade da produção de tijolos cerâmicos utilizando lodo de estação de tratamento de água de Bartın, Turquia, e cinzas de fundo de incineração de resíduos sólidos urbanos. Os pesquisadores produziram amostras com diferentes proporções de LETA (60%, 70%, 80%, 90%, 95%, 100%, em massa) e cinza de fundo, moldadas em corpos de prova de 190×90×50mm e queimadas a 900, 1000 e 1100°C por 2 horas, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min.

Os resultados demonstraram que, independentemente da temperatura de queima, a densidade aparente aumentou com o aumento do teor de cinza, enquanto a absorção de água e a porosidade aparente foram reduzidas. Esses resultados indicam que a adição de cinzas de fundo de incineração de resíduos sólidos urbanos contribui para a densificação dos materiais cerâmicos. Além disso, a combinação de lodo de ETA e cinzas de fundo resultou em propriedades físico-mecânicas aceitáveis, demonstrando o potencial de aplicação desses materiais residuais na produção de tijolos cerâmicos.

Ahmadi et al (2023) avaliou a viabilidade do uso de lodo de ETA como substituto da argila na produção de tijolos cerâmicos. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0, 20, 40, 60 e 80%, em massa), moldadas em corpos de prova de 210×100×55mm e queimadas a 800 e 1000°C com uma taxa de aquecimento de 5°C/min. As propriedades mecânicas e a durabilidade dos tijolos foram analisadas por meio de testes como limites de Atterberg, teor ótimo de água, porosidade, resistência à compressão e flexão, densidade, absorção de água e eflorescência.

Os resultados mostraram que o aumento do teor de LETA aumentou os limites de Atterberg e a porosidade, enquanto a densidade, a resistência à compressão e flexão diminuíram. Eflorescência moderada foi observada em amostras com maior teor de lodo. Os autores concluíram que os tijolos com até 20% de LETA e queimados a 1000°C apresentaram propriedades aprimoradas, adequadas para condições de exposição severas e moderadas.

Rodrigues (2023) investigou a utilização de lodo de estação de tratamento de água da Região Metropolitana do Recife, Brasil, na produção de cerâmicas vermelhas, avaliando a influência da calcinação e moagem do lodo nas propriedades do material final. Foram produzidas amostras com diferentes proporções de LETA (0%, 5%, 10%

e 20%, em massa) e dois tipos de argila, moldadas em corpos de prova de 60x20x5mm e queimadas a 950°C por 3 horas, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Os resultados indicaram que a incorporação do LETA aumenta a retração e a absorção de água das cerâmicas, além de reduzir sua resistência mecânica, especialmente para teores acima de 10%. A calcinação e a moagem do lodo demonstraram ter pouca influência nas propriedades finais das cerâmicas.

A autora concluiu que o tipo de argila e o teor de lodo são os principais fatores que afetam as propriedades das cerâmicas produzidas com LETA e que o uso do lodo bruto é mais vantajoso, pois evita gasto com o processo de beneficiamento.

De acordo com os estudos destacados anteriormente, as principais propriedades tecnológicas dos materiais cerâmicos analisadas incluem perda de massa, retração linear, absorção de água, resistência à compressão, porosidade, eflorescência, densidade de massa e resistência à flexão. Embora estudos anteriores tenham analisado diversas propriedades tecnológicas, esta pesquisa se concentrou na análise das propriedades: perda de massa, retração linear, absorção de água e resistência à compressão. A seleção dessas propriedades se justifica pela sua relevância na avaliação do desempenho de materiais cerâmicos em diversas aplicações, como revestimentos e materiais estruturais.

Portanto, a Tabela 5 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos em estudos anteriores, organizados por proporção de lodo de ETA, temperatura, método de conformação para as propriedades de perda de massa, retração linear, absorção de água e resistência à compressão.

Tabela 5: Resultados de estudos da incorporação de lodo de ETA em cerâmicas vermelhas

| Referências                               | LETA (%) | Temperatura de queima (°C) | Método de conformação              | Perda de massa (%) | Retração linear (%) | Absorção de água (%) | Resistência à compressão (MPa) |
|---|----------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------|
| <b>Monteiro <i>et al.</i> (2008)</b>      | 0 - 10   | 700                        | Prensagem                          |                    | 1 – 1,3             | 22 – 25              |                                |
|   |          | 900                        | Hidráulica                         | -                  | 2,8 – 3,2           | 22- 25               | -                              |
|   |          | 1100                       | (20MPa)                            |                    | 8 - 9               | 11 - 14              |                                |
| <b>Oliveira e Holanda (2008)</b>          | 0 - 15   | 850                        | Prensagem                          |                    | 1,5 – 2             | 24,2 – 25            |                                |
|   |          | 950                        | Hidráulica                         | -                  | 2,5 – 2,8           | 23 – 24,2            | -                              |
|   |          | 1050                       | (24MPa)                            |                    | 6,03 – 7,44         | 15,9 – 16,2          |                                |
| <b>Paixão <i>et al.</i> (2008)</b>        | 0 - 10   | 950                        | Prensagem                          | 3,8 – 5,5          | 2,83 – 4,35         | 8,12 – 11,82         |                                |
|   |          | 1000                       | Hidráulica                         | 3,2 - 4,8          | 6,52 – 6,96         | 3,71 – 9,35          | -                              |
|   |          | 1050                       | (19,7MPa)                          | 3,6 – 5,4          | 8,48 – 16,31        | 0,35 – 2,47          |                                |
| <b>Vitorino, Monteiro e Vieira (2009)</b> | 0 - 10   | 700                        | Prensagem<br>Hidráulica<br>(18MPa) | -                  | 0,5 – 0,8           | 15,7 – 17,3          | 2,2 – 2,8                      |
| <b>Muller (2009)</b>                      | 0 - 12   | 500                        | Extrusão                           | -                  | -                   | 12,3 – 15,4          | 2,1 - 3,2                      |
| <b>Kizinievič <i>et al.</i> (2013)</b>    | 0 - 40   | 1000                       | Prensagem                          | -                  | 11,5 – 14,8         | 11 – 28,8            | 14 – 48,5                      |
|   |          | 1050                       | Manual                             |                    | 15,1 – 17,8         | 4,6 – 19,8           | 25,9 – 53,8                    |
| <b>Agostini (2014)</b>                    | 0 - 5    | 800                        |                                    |                    | 5,8 – 6,0           | 13 - 13,4            |                                |
|   |          | 950                        | Extrusão                           | -                  | 6,8 – 7,6           | 10,9 – 11,9          | -                              |
|   |          | 1050                       |                                    |                    | 10 – 10,85          | 5,0 – 7,0            |                                |
| <b>Martins (2014)</b>                     | 0 - 20   | 900                        | Prensagem                          |                    | 0,41 – 1,80         | 16,74 – 25,51        |                                |
|   |          | 1000                       | Hidráulica                         | -                  | 3,5 – 6,86          | 9,14 – 17,59         | -                              |
|   |          | 1200                       | (19,62MPa)                         |                    | 7,1 – 10,46         | 0,25 – 6,40          |                                |
| <b>Silva (2014)</b>                       | 0 - 25   | 950                        | Prensagem<br>Hidráulica<br>(40MPa) | 4,5 – 6,29         | - 0,34 – 0,03       | 11,91 – 17,48        | -                              |

Continua

| Referências                              | LETA (%) | Temperatura de queima (°C) | Método de conformação           | Perda de massa (%) | Retração linear (%) | Absorção de água (%) | Resistência à compressão (MPa) |
|--|----------|----------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------|
| <b>Benlalla et al. (2015)</b>            | 0 - 30   | 800                        | Prensagem Manual                | 11,0 – 17,0        | 1,25 - 1,8          | 16,2 – 25,2          | 7,25 – 14,7                    |
|  |          | 900                        |                                 | 12,5 – 18,0        | 1,6 – 2,4           | 17,9 – 27,9          | 7,5 – 16,1                     |
|  |          | 1000                       |                                 | 13,5 – 19,0        | 2,3 – 2,8           | 15,0 – 23,5          | 8,25 – 17,25                   |
| <b>Nor et al. (2015)</b>                 | 0 - 100  | 1000                       | Prensagem Mecânica (15KN)       | 19,6 – 36,9        | 24,4 – 41,72        | 21,07 – 32,20        | 4,52 – 17,12                   |
| <b>Kizinievič e Kizinievič (2017)</b>    | 0 - 60   | 1000                       | Prensagem Manual                | -                  | 11,5 – 15,2         | 11 – 28              | 2,5 – 48,5                     |
| <b>Katte et al. (2017)</b>               | 0 - 40   | 1050                       | Prensagem Manual                | 9,26 – 20,98       | 6,92 – 1,37         | 17,6 – 31,24         | 2,81 – 16,03                   |
| <b>Tantawy e Mohamed (2017)</b>          | 0 - 60   | 700                        | Prensagem                       | 7,5 – 9,5          | 0,2 – 1,5           | 22 – 26              | 27,46 – 41,68                  |
|  |          | 850                        | Hidráulica                      | 7,6 – 9,6          | 0,8 – 1,7           | 19 – 23              | 34,32 – 45,11                  |
|  |          | 1000                       | (1,96MPa)                       | 8,0 – 10,8         | 1,0 – 6,8           | 14 - 19              | 19,61 – 41,19                  |
| <b>Cremades, Cusidó e Arteaga (2018)</b> | 0 - 70   | 980                        | Extrusão                        | 17,0 - 41,0        | 1,8 - 6,1           | 2,4 - 37             | -                              |
| <b>Santana (2019)</b>                    | 0 - 15   | 800                        | Prensagem                       | 7,5 – 15,0         | -                   | 18,1 – 28,1          | 2,2 – 6,0                      |
|  |          | 1000                       | Hidráulica (37MPa)              | 8,0 – 16,0         |                     | 18,0 – 28,0          | 3,5 – 10,5                     |
| <b>Rodrigues (2023)</b>                  | 0 - 20   | 950                        | Prensagem Hidráulica (19,61MPa) | 10,8 – 19,5        | - 0,5 – 2,5         | 12,7 – 28,3          | -                              |
| <b>Ahmadi et al. (2023)</b>              | 0 - 80   | 800                        | Prensagem Manual                | -                  | -                   | 16,38 – 34,5         | 5,8 – 14,5                     |
|  |          | 1000                       |                                 |                    |                     | 14,51 – 26,0         | 6,1 – 17,0                     |

Fonte: Autora (2024)

A Tabela 5 mostra que os estudos anteriores empregaram uma variedade de métodos de conformação, incluindo extrusão (Muller, 2009; Agostini, 2014; Cremades, Cusidó e Arteaga, 2018) e diferentes variações de prensagem:

- **Prensagem manual:** Estudos como os de Kizinievič *et al.* (2013), Benlalla *et al.* (2015), Kizinievič e Kizinievič (2017), Katte *et al.* (2017) e Ahmadi *et al.* (2023) utilizaram prensagem manual, moldando os corpos de prova com auxílio de um soquete.
- **Prensagem hidráulica:** A prensagem hidráulica foi o método mais utilizado, com pressões variando de 1,96 a 40MPa (Monteiro *et al.*, 2008; Oliveira e Holanda, 2008; Paixão *et al.*, 2008; Vitorino, Monteiro e Vieira, 2009; Martins, 2014; Silva, 2014; Tantawy e Mohamed, 2019; Santana, 2019; Rodrigues, 2023; Ahmadi *et al.*, 2023).
- **Prensagem mecânica:** A prensagem mecânica foi o método menos utilizado, com carga máxima de compactação de 15kN (Nor *et al.*, 2015).

A prensagem mecânica permite um controle mais preciso da força aplicada, resultando em corpos de prova com densidade mais uniforme. A extrusão é comumente mais utilizada na indústria cerâmica vermelha, principalmente na fabricação de tijolos, telhas e blocos. A prensagem hidráulica é geralmente utilizada na conformação de materiais cerâmicos com geometrias simples, como tijolos e azulejos, e destaca-se por suas altas taxas de produção e baixo custo. Já o método de prensagem manual é caracterizado pela falta de precisão na força aplicada durante o processo de conformação, o que pode resultar em materiais cerâmicos com densidade não uniforme e alta variação nas propriedades mecânicas.

Em todos os estudos analisados, os corpos de prova foram submetidos à secagem antes do processo de queima, a fim de evitar a formação de fissuras devido à rápida evaporação da água presente no material. A queima foi realizada em fornos com temperaturas variando entre 500 e 1200°C e taxas de aquecimento entre 1,67 e 10°C/min. As variações nas temperaturas de queima e nas taxas de aquecimento podem ser atribuídas às diferentes composições dos materiais cerâmicos e aos objetivos específicos de cada estudo.

Em relação aos teores de lodo de ETA (LETA), alguns autores substituíram a argila por LETA variando os percentuais de forma empírica. A maioria dos estudos

(72%, ou 13 estudos) investigou a incorporação de até 40% de lodo de ETA em misturas binárias de argila e LETA, enquanto os 28% restantes avaliaram a incorporação de porcentagens mais elevadas, variando de 0 a 100%, como no trabalho de Nor *et al.* (2015).

Em geral, a adição do lodo de ETA resultou no aumento da perda de massa, da retração linear e da absorção de água, e na redução da resistência à compressão das amostras cerâmicas analisadas. Apesar da redução observada do desempenho mecânico com o aumento do teor de LETA, a maioria dos trabalhos recomendam a substituição da argila por LETA entre 5% e 30% (Monteiro *et al.*, 2008; Oliveira e Holanda, 2008; Vitorino, Monteiro e Vieira, 2009; Martins, 2014; Silva, 2014; Tantawy e Mohamed, 2019; Santana, 2019; Rodrigues, 2023; Ahmadi *et al.*, 2023).

Kizinievič *et al.* (2013) observaram que, com a adição de 5% de LETA, os corpos de prova calcinados a 1000°C apresentaram aumento na resistência à compressão de 36% a 50% e diminuição na absorção de água de 33% a 60%. Já o estudo realizado por Vitorino, Monteiro e Vieira (2009), com adições de LETA de 3%, 5%, 7% e 10%, mostrou que as amostras, após a queima a 700°C, apresentaram aumento na absorção de água em até 11% e redução na resistência mecânica de 4% a 22%.

A variação nos resultados observados nos dois estudos pode ser explicada pelas diferenças nos teores de LETA, nas temperaturas de queima e nas propriedades dos materiais utilizados. Kizinievič *et al.* (2013) utilizaram um teor de LETA de 5% e uma temperatura de queima de 1000°C, enquanto Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) utilizaram teores de LETA de 3% a 10% e uma temperatura de queima de 700°C. Além disso, as características do LETA e da argila (Tabela 3) utilizados em cada estudo podem ter influenciado os resultados. O elevado teor de óxido de ferro do LETA utilizado por Kizinievič *et al.* (2013) pode ter contribuído para o aumento da resistência à compressão devido à formação de fases cristalinas que reforçam a estrutura do material. Por outro lado, o elevado teor de óxido de alumínio do LETA utilizado por Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) pode ter dificultado a sinterização e promovido a formação de fases frágeis, resultando na redução da resistência mecânica.

A avaliação da influência da temperatura nas propriedades tecnológicas de materiais cerâmicos, principalmente resistência à compressão e absorção de água, foi conduzida em 10 estudos, correspondendo a 56% dos trabalhos analisados. O objetivo principal foi identificar a temperatura ótima para minimizar defeitos estruturais e maximizar a resistência mecânica dos materiais cerâmicos, uma vez que o aumento da temperatura de queima induz transformações de fase na cerâmica, resultando na densificação dos corpos de prova, promovendo o aumento do desempenho mecânico e a redução da porosidade (Oliveira e Holanda, 2008; Paixão *et al.*, 2008; Kizinievič *et al.*, 2013). Contudo, 70% dos estudos analisados demonstraram que a utilização de temperaturas superiores a 1000°C pode acarretar reduções significativas no desempenho mecânico (Oliveira e Holanda, 2008; Paixão *et al.*, 2008; Kizinievič *et al.*, 2013; Agostini, 2014; Martins, 2014; Silva, 2014; Benlalla *et al.*, 2015; Tantawy e Mohamed, 2019).

Assim, o aumento indiscriminado da temperatura não garante melhorias no desempenho mecânico e, conseqüentemente, resulta em desperdício energético durante a queima do material cerâmico. Neste contexto, a temperatura de queima ideal é aquela que proporciona resultados satisfatórios para a cerâmica a ser produzida, considerando as propriedades desejadas e a eficiência energética do processo

Além das pesquisas utilizando misturas binárias de argila e lodo de ETA, tem surgido estudos que analisam a possível produção de materiais cerâmicos com misturas binárias ou ternárias com adições superiores a 50% de lodo de ETA, combinados com material com alta concentração de sílica, que produzem materiais cerâmicos com propriedades mecânicas semelhantes às da argila (Torres, Hernández e Paredes, 2012; Medeiros *et al.*, 2014; Wolff, Schwabe, Conceição, 2015; Mahanna *et al.*, 2024).

Mahanna *et al.* (2024) investigaram a viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de água, localizada em Dakahlia, Egito, na produção de tijolos cerâmicos. Os pesquisadores produziram amostras com diferentes proporções de LETA (10% a 50%, em massa, com incrementos de 10%) e areia (10% e 20%), moldadas em formatos 240×120×60mm e 50×50×50mm e queimadas em um forno a 700°C por 3 horas, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min. Os resultados demonstraram que o aumento do teor de LETA resultou em uma redução da

resistência à compressão dos tijolos, além de aumentar a porosidade e a absorção de água. Por outro lado, a adição de areia promoveu melhorias nas propriedades mecânicas e microestruturais.

Os autores concluíram que a alta concentração de sílica, alumínio e ferro no LETA, presente em todas as amostras, contribuiu para as propriedades dos tijolos, especialmente em relação à formação de fases vítreas. Apesar da diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de LETA, os resultados indicaram que o lodo de ETA pode ser utilizado como matéria-prima na produção de tijolos, oferecendo uma alternativa mais sustentável para o seu descarte, especialmente quando combinado com a adição de areia.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 2

Sobre as considerações acerca das cerâmicas vermelhas, temos que:

Os componentes majoritários das argilas, principal matéria-prima utilizada na fabricação das cerâmicas vermelhas, são sílica ( $SiO_2$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ) e óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ). A sílica, presente principalmente como quartzo, reduz a plasticidade da massa argilosa devido à sua estrutura rígida, que dificulta o deslizamento entre as partículas de argila. Já a alumina quando combinada com a sílica e outros minerais acelera a formação da fase vítrea, contribuindo para o aumento da resistência e o óxido de ferro é o responsável pela redução da temperatura de calcinação, atuando como agente fundente, e pela coloração avermelhada as cerâmicas.

Além desses constituintes majoritários, as argilas são compostas por agentes fundentes, tais como: os óxidos alcalinos (óxidos de sódio ( $Na_2O$ ) e potássio ( $K_2O$ )) e os alcalino-terrosos (óxidos de cálcio ( $CaO$ ) e magnésio ( $MgO$ )), que atuam na formação de fase líquida, reduzindo a temperatura de sinterização e promovendo a densificação do material cerâmico à base de argilas.

A plasticidade das argilas está diretamente relacionada à sua mineralogia e ao teor de água. A presença de minerais como quartzo e feldspatos reduz a plasticidade, enquanto argilominerais, como caulinita e montmorilonita, proporcionam o aumento. A água, ao formar películas lubrificantes entre as partículas, facilita a deformação plástica, sendo que a quantidade ideal varia com a granulometria, influenciando diretamente a produção.

A matéria orgânica também contribui para o aumento da plasticidade, porém, favorecendo o aumento da porosidade, devido a sua eliminação no processo de calcinação.

A conformação de massas cerâmicas para obtenção de formas desejadas varia conforme o material e a peça. O método de conformação por prensagem uniaxial, no qual o pó cerâmico é compactado em uma matriz metálica por meio de pressão aplicada em uma única direção, utilizando uma prensa mecânica

Após a conformação, a peça compactada deve ser submetida à secagem, a fim de evitar a formação de fissuras devido à rápida evaporação da água presente no material. Em seguida, a peça passa pela etapa de queima em temperatura elevada, geralmente entre 900 e 1400°C, embora a temperatura ideal possa variar dependendo do tipo de material cerâmico e das propriedades desejadas, com o objetivo de reduzir a porosidade e aumentar a resistência mecânica.

O processo de queima é composto por três etapas principais: aquecimento até a temperatura máxima, manutenção dessa temperatura em patamar e resfriamento lento. A escolha criteriosa das rampas de aquecimento é importante durante o processo de queima. Rampas muito rápidas podem causar fissuras e trincas nas peças devido ao choque térmico e à eliminação incompleta de materiais orgânicos, resultando em defeitos estruturais nas peças. Por outro lado, rampas muito lentas aumentam o tempo de ciclo, diminuem a produtividade e elevam o consumo de energia, inviabilizando a produção economicamente

Sobre as considerações acerca do lodo de Estação de Tratamento de Água e a sua aplicação na indústria cerâmica, temos que:

O processo de tratamento de água em ciclo completo consiste nas etapas: pré-tratamento, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH. Cada etapa do tratamento de água gera diferentes tipos de resíduos, como resíduos sólidos (lodos), líquidos (água proveniente da lavagem dos filtros) e gasosos (emissões de gases), os quais podem ter impactos ambientais significativos. O resíduo gerado nos decantadores, etapa na qual ocorre a remoção dos sólidos, como partículas de argila, silte e matéria orgânica, presentes na água, é denominado lodo de ETA.

Um dos principais desafios ambientais é a disposição adequada do lodo de ETA, uma vez que as alternativas mais econômicas e utilizadas consistem em seu lançamento direto na rede de esgoto, sem qualquer tipo de tratamento, e na disposição em aterros. Essas práticas são inadequadas, pois geram impactos ambientais significativos, como a contaminação do lençol freático. Além disso, não garantem um destino ambientalmente correto para o lodo e acarretam na sobrecarga das estações de tratamento de esgoto (ETE). Essa sobrecarga compromete a eficiência dos processos e a qualidade do efluente final, transferindo o problema para outro ponto do sistema de saneamento.

A similaridade na composição mineralógica entre argilas e lodos de ETA, predominantemente constituídos por óxidos de silício, alumínio e ferro, sugere o potencial de utilização do LETA como material cerâmico suplementar. No entanto, a composição dos lodos de ETA pode variar significativamente devido a fatores como a qualidade da água bruta, a dosagem e o tipo de coagulante utilizado, a eficiência dos processos de floculação e decantação, o tempo de retenção do lodo nos tanques e a eficiência da etapa de sedimentação. A elevada heterogeneidade do LETA, resultante da variação nos fatores mencionados, dificulta a padronização do material, exigindo análises e ajustes frequentes para garantir a qualidade e a padronização do material cerâmico produzido.

A literatura evidencia que a adição do lodo de ETA no processo de fabricação dos materiais cerâmicos resulta no aumento da perda de massa, da retração linear e da absorção de água, além da redução da resistência à compressão das amostras cerâmicas analisadas. Apesar da redução observada do desempenho mecânico com o aumento do teor de LETA, a maioria dos estudos recomenda a substituição da argila por LETA entre 5 e 30%.

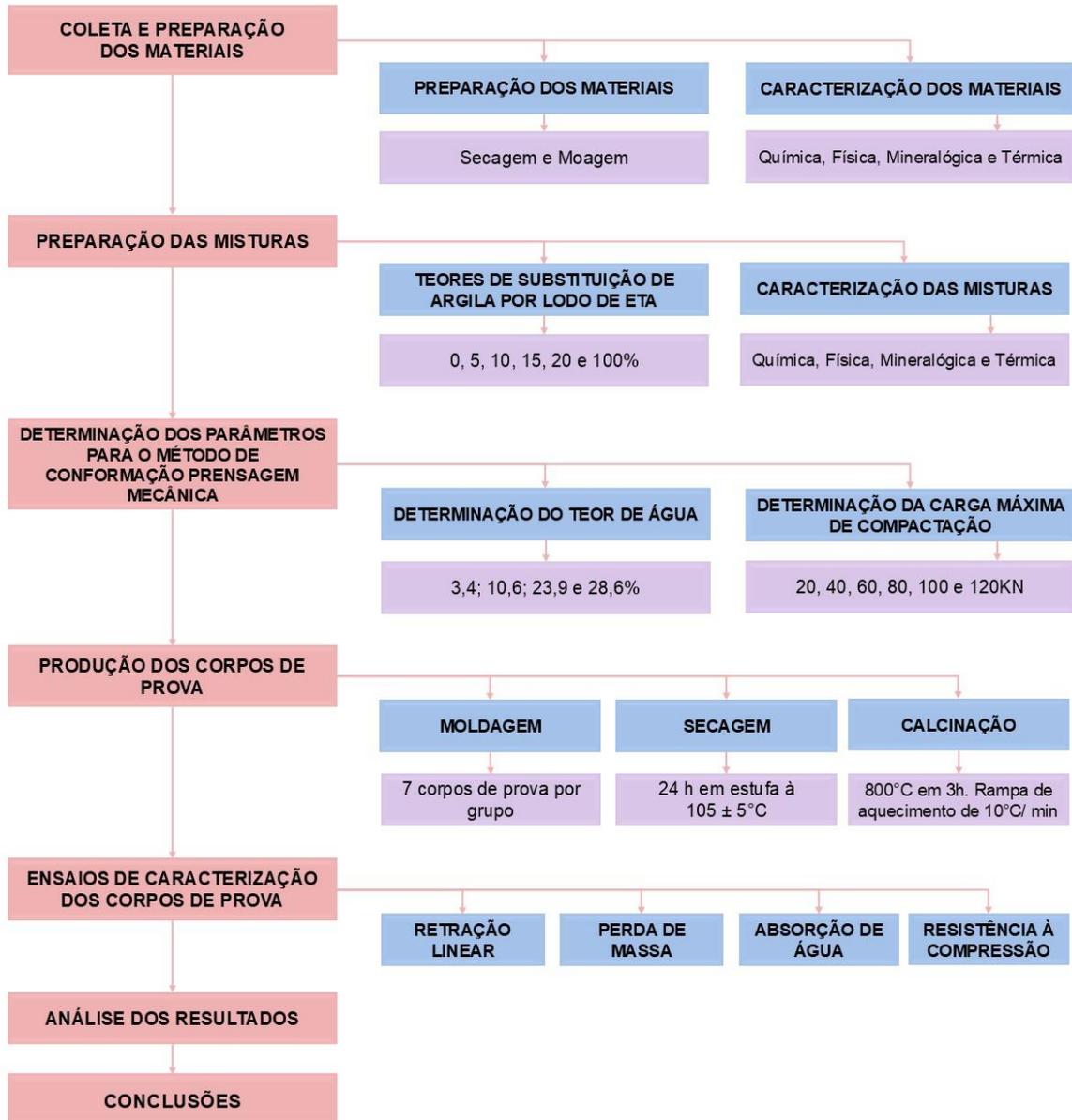
A revisão da literatura também destaca que o aumento indiscriminado da temperatura não garante melhorias nas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, resulta em desperdício energético durante a queima do material cerâmico. Dessa forma, a temperatura ideal é aquela que proporciona resultados satisfatórios para a cerâmica a ser produzida, considerando as propriedades desejadas e a eficiência energética do processo.

Diante dessas considerações, o reaproveitamento do lodo de ETA requer estudos individualizados, dada a variabilidade da sua composição química e mineralógica e comportamento diverso em diferentes matrizes. Contudo, apesar desses desafios, o lodo de ETA demonstra potencial como material suplementar, minimizando os impactos ambientais da sua disposição final inadequada e promovendo uma destinação adequada para o resíduo.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A seguir o plano experimental dessa pesquisa.

Figura 8: Plano experimental da pesquisa



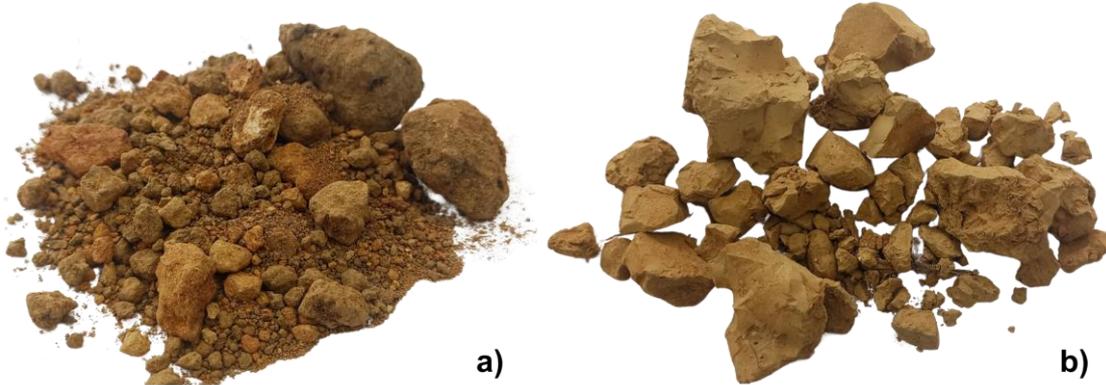
Fonte: Autora (2024)

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais manuseados nessa pesquisa foram: argila (Figura 9 (a)) comumente utilizada na produção de cerâmicas vermelhas na região metropolitana de Recife, fornecida pela Cerâmica Santa Inês, localizada em Vicência- PE e o Lodo de ETA (Figura 9 (b)) foi coletado do decantador da Estação de Tratamento de Água de Pirapama, localizada Cabo de Santo Agostinho – PE. A ETA de Pirapama utiliza o

método de tratamento de água convencional, ou seja, o método de ciclo completo, e utiliza o sulfato de alumínio como coagulante

Figura 9: Amostras de (a) argila e de (b) lodo de ETA.



Fonte: Autora (2024)

A coleta do lodo de ETA foi realizada em janeiro de 2024, durante o período chuvoso no Estado de Pernambuco. Conforme observado por Teixeira *et al.* (2004), o lodo coletado durante o período chuvoso tende a apresentar maior teor de argila em comparação com o lodo coletado em períodos de estiagem, devido à influência do nível do rio na quantidade de sedimentos finos em suspensão. Após a coleta, o lodo foi secado ao ar (Figura 10) na ETA de Pirapama, sendo exposto ao sol quando possível, e, em seguida, armazenado em uma bombona, a qual ficou vedada até o início dos ensaios.

Figura 10: Lodo de ETA durante o processo de secagem ao ar.



Fonte: Autora (2024)

A presença de impurezas, como as mostradas na Figura 11 (materiais orgânicos, resíduos vegetais e partículas indesejadas), no lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) são provenientes do processo no qual são removidas diversas impurezas, como areia, silte, matéria orgânica (dissolvida e em suspensão), íons que causam dureza, microrganismos e outras substâncias que comprometem a qualidade da água (Tartari *et al.*, 2011; Rodrigues, 2023; Yang *et al.*, 2023).

Figura 11: Impurezas encontradas no Lodo de ETA analisado.



Fonte: Autora (2024)

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Cerca de 3kg de argila (teor de umidade de 10,6%) e de lodo de ETA (teor de umidade de 80,6%) foram submetidos ao processo de preparação. Inicialmente, as amostras secas foram destorroadas em almofariz com auxílio de uma mão de gral, como recomendado pela NBR 6457 (ABNT, 2016), e, então, submetidas à passagem pela peneira ABNT nº 10 (abertura de 2mm).

Após o destorroamento manual, observou-se que apenas 20,5% da argila e 0,2% do lodo de ETA passaram pela peneira ABNT nº 10, indicando que uma parcela significativa das partículas possuía dimensões superiores a 2mm. Esse resultado demonstra que o método de destorroamento manual não foi eficaz na redução do tamanho das partículas, especialmente no caso do lodo de ETA, que apresentava uma aspecto rígido e grumoso, dificultando a desagregação das partículas.

Desta forma, para reduzir os diâmetros das partículas as amostras foram submetidas ao processo de moagem. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa (marca Icamo, modelo 5) a  $100 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas, para remoção da

umidade. Posteriormente, os materiais secos em estufa foram moídos em um moinho de bolas até atingir uma granulometria inferior a 0,3mm (fração passante na peneira ABNT nº 50), com 90% das partículas apresentando diâmetros inferiores a 0,18mm (fração passante na peneira ABNT nº 80). Essa granulometria foi escolhida com base nos estudos de Rodrigues (2023), que indicam que partículas com diâmetros inferiores a 0,18mm, classificadas como areia fina pela NBR 6502 (ABNT, 1995), contribuem para aumentar a plasticidade e reduzir a retração das massas cerâmicas.

Para determinar o tempo de moagem, foram realizados testes com amostras de argila e lodo de ETA. Aproximadamente 1kg de cada material foi moído em um moinho de bolas por 10, 20 e 30 minutos, respectivamente. A granulometria das amostras moídas foi determinada por peneiramento, utilizando a peneira ABNT nº 50 (abertura de 0,3mm). Os resultados indicaram que um tempo de moagem de 30 minutos foi suficiente para garantir que mais de 95% das partículas de ambas as amostras passassem pela peneira. A escolha desse tempo de moagem foi baseada na necessidade de obter uma granulometria fina, porém com um tempo de processamento viável com menor gasto de energia. Para tempos de moagem inferiores, como 10 e 20 minutos, a porcentagem de partículas que passavam pela peneira era significativamente menor, cerca de 35 e 67%, respectivamente.

O moinho de bolas utilizado neste estudo foi um cilíndrico com dimensões de 30x26cm e volume de 15,9 litros. Os corpos moedores utilizados foram as esferas de porcelanas com três diâmetros distintos: 35, 20 e 13mm, totalizando 8,6kg. A distribuição de massa entre as diferentes dimensões dessas esferas foi a seguinte: 3,32Kg de bolas menores, 2,16Kg de bolas médias e 3,12Kg de bolas maiores. Em cada moagem, cerca de 1kg de amostra foi moída por 30 minutos a uma velocidade de rotação de 50rpm. A Figura 12 ilustra o processo de produção dos pós.

Figura 12: Processo de moagem dos materiais.



Fonte: Autora (2024)

### 3.3 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS

Os materiais foram analisados em relação as suas características físicas, química, térmica e mineralógica, após o processo de secagem em estufa e moagem, conforme apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Caracterizações dos materiais.

| <b>Tipo de Caracterização</b> | <b>Ensaio</b>  | <b>Referência</b>                  |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| <b>Análise física</b>         | Massa unitária   | Adaptada da NBR 16972 (ABNT, 2021) |
|                               | Granulometria à laser                                      | -                                  |
|                               | Área específica  | -                                  |
| <b>Análise química</b>        | Fluorescência de raios X (FRX)                             | -                                  |
| <b>Análise mineralógica</b>   | Difração de raios X (DRX)                                  | -                                  |
| <b>Análise térmica</b>        | Termogravimetria (TG) e termogravimetria diferencial (DTG) | -                                  |

Fonte: Autora (2024)

#### 3.3.1 Caracterização física

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios físicos realizados nos materiais. São apresentados as distribuição granulométrica (em%) dos materiais e os valores médios da área específica e da massa unitária obtidos a partir de três repetições.

Tabela 7: Área específica, massa unitária e as distribuição granulométrica (em%) dos materiais.

| <b>Materiais</b>   | <b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Área Específica (cm<sup>2</sup>/g)</b> | <b>Fração (%)</b>           |                                     |                            |
|--------------------|--|---|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
|                    |  |   | <b>Areia (d &gt; 60 μm)</b> | <b>Silte (60μm &lt; d &gt; 2μm)</b> | <b>Argila (d &lt; 2μm)</b> |
| <b>Argila</b>      | 0,730                                    | 0,900                                     | 0,35                        | 8,58                                | 91,07                      |
| <b>Lodo de ETA</b> | 0,422                                    | 0,892                                     | -                           | 8,25                                | 91,75                      |

d = diâmetro

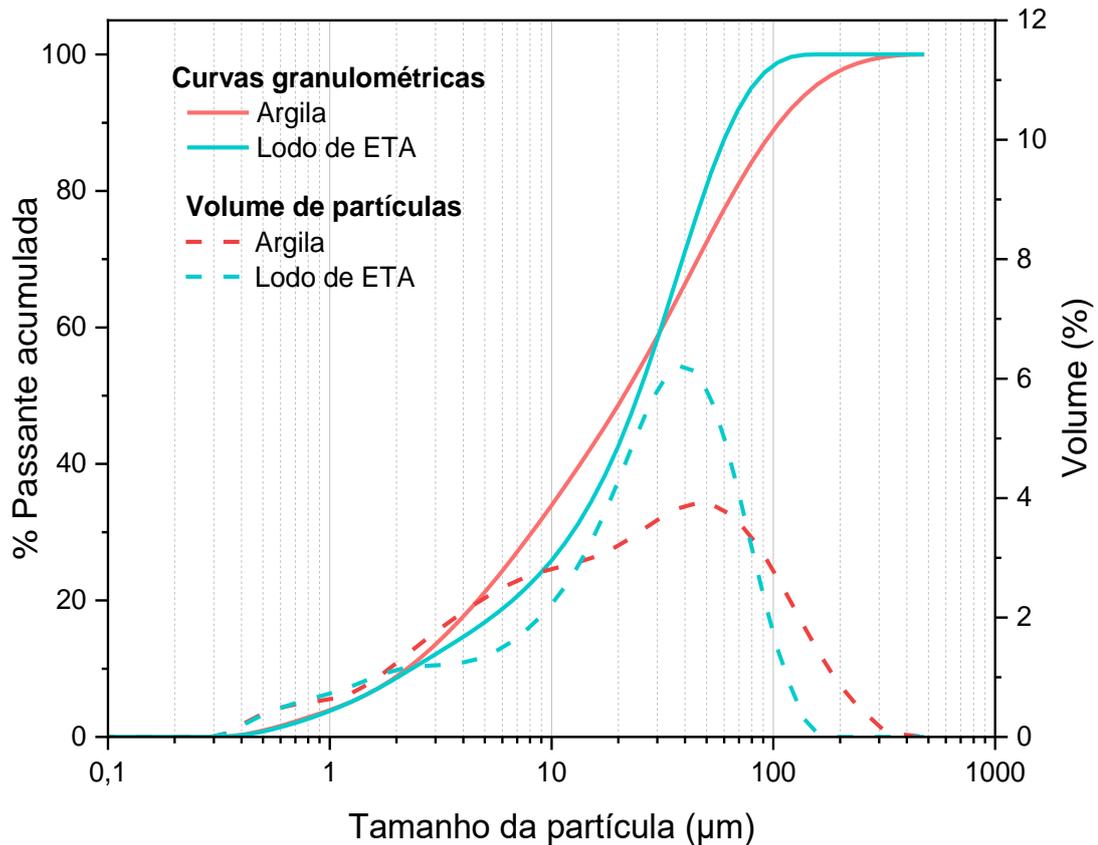
Fonte: Autora (2024)

A área específica, um parâmetro importante para diversas propriedades dos materiais cerâmicos, como reatividade e sinterização (Margem, 2008; Coelho, 2014), apresentou valores próximos para o lodo de ETA (0,892cm<sup>2</sup>/g) e a argila (0,9cm<sup>2</sup>/g). A pequena diferença observada pode ser atribuída ao aumento do teor de partículas com dimensões inferiores a 2μm do lodo de ETA, em relação a amostra de argila

estudada, que é um indicativo de boas propriedades adsorventes do material (Acevedo, Rocha, Bertolino, 2021).

A Figura 13 apresenta as curvas granulométricas e a distribuição de partículas dos materiais.

Figura 13: Curvas granulométricas e os volumes de partículas dos materiais



Fonte: Autora (2024)

A análise granulométrica dos materiais (Figura 13) revelou que a argila e o lodo de ETA possuem uma ampla faixa de distribuição de tamanhos de partículas, variando entre  $0,34\mu\text{m}$  e  $478,63\mu\text{m}$  para a argila e entre  $0,34\mu\text{m}$  e  $138,04\mu\text{m}$  para o lodo de ETA. Os diâmetros característicos,  $D(10)$ ,  $D(50)$  e  $D(90)$ , indicaram que a argila utilizada apresenta um maior conteúdo de partículas finas e grossas em comparação com o lodo de ETA, com valores de  $2,70\mu\text{m}$ ,  $23,66\mu\text{m}$  e  $110,39\mu\text{m}$ , respectivamente, enquanto o lodo de ETA apresentou valores de  $2,69$ ,  $28,19$  e  $74,43\mu\text{m}$ , respectivamente.

### 3.3.2 Caracterização química

A análise da composição química dos materiais foi realizada por Fluorescência de Raios X (FRX) em um espectrômetro Shimadzu EDX-720, no Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais (Lacamm) do IFRN Natal-Central. As amostras em pó foram analisadas sob vácuo. Duas leituras foram realizadas: uma no intervalo de Sódio (Na) a Scândio (Sc) e outra no intervalo de Titânio (Ti) a Urânio (U), intervalos característicos desta técnica analítica, a fim de realizar a detecção dos elementos presentes em cada faixa de energia.

Na Tabela 8 são apresentadas as composições químicas dos materiais estudados nessa pesquisa.

Tabela 8: Composição química (%) por FRX dos materiais.

|                                    | <b>Argila</b> | <b>Lodo de ETA</b> |
|------------------------------------|---------------|--------------------|
| <i>SiO<sub>2</sub></i>             | 51,44         | 37,83              |
| <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 21,97         | 33,69              |
| <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 16,89         | 21,94              |
| <i>K<sub>2</sub>O</i>              | 3,92          | 0,47               |
| <i>TiO<sub>2</sub></i>             | 1,93          | 1,29               |
| <i>SO<sub>3</sub></i>              | 1,28          | 2,42               |
| <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>  | 0,92          | 1,29               |
| <i>CaO</i>                         | 0,68          | 0,44               |
| <i>BaO</i>                         | 0,66          | 0,43               |
| <i>MnO</i>                         | 0,22          | -                  |
| <i>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> | 0,05          | -                  |
| <i>ZnO</i>                         | 0,03          | -                  |
| <i>SrO</i>                         | 0,01          | -                  |
| <b>Outros</b>                      | -             | 0,21               |

Fonte: Autora (2024)

A análise química dos materiais, apresentada na Tabela 8, revela que tanto a argila quanto o lodo de ETA são constituídos principalmente por sílica (*SiO<sub>2</sub>*), alumina (*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*) e óxidos de ferro (*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*). Embora a composição seja similar, as concentrações desses óxidos majoritários e a presença de outros elementos, como os óxidos fundentes, variam entre os dois materiais. A relação *SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* no lodo de ETA é de aproximadamente 1,12, enquanto na argila é de 2,34. Essa relação, próxima à da caulinita pura (1,18, segundo Monteiro *et al.*, 2008).

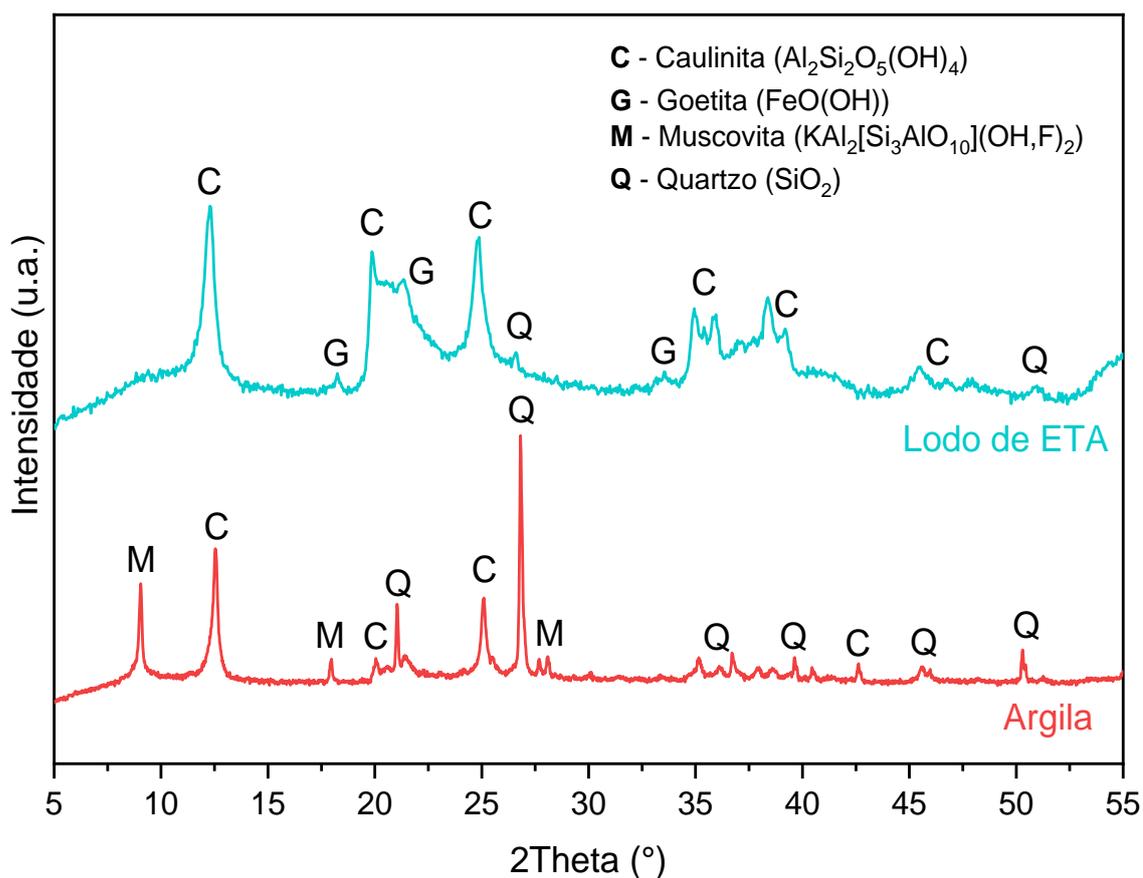
Além disso, o lodo apresenta menor teor de óxidos fundentes,  $K_2O$  e  $CaO$  ( $K_2O + CaO$ ) (0,91%) em comparação com a argila (4,6%), porém apresenta maior teor de óxidos de ferro (21,94%), o que favorece a redução da temperatura de fusão.

A composição química do lodo de ETA estudado é semelhante à de outros lodos de estações de tratamento de água estudados na literatura (Tabela 3), conforme relatado por Oliveira e Holanda (2008), Monteiro *et al.* (2008), Tartari *et al.* (2011), Rodrigues (2023) e Yang *et al.* (2023).

### 3.3.3 Caracterização Mineralógica

Os padrões de difração de raios X obtidos nos ensaios de caracterização mineralógica dos materiais estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14: Caracterização mineralógica da argila e do lodo de ETA.



Fonte: Autora (2024)

O difratograma de raios X da amostra de argila estudada (Figura 14) destaca que os picos de difração predominantes são correspondentes ao quartzo ( $SiO_2$ ), picos com maiores intensidades em torno de  $20,5^\circ$ ,  $26,5^\circ$ ,  $36,5^\circ$  e  $50^\circ$ . Outros minerais

identificados com intensidades menores foram a muscovita ( $KAl_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$ ) e a caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ).

Por outro lado, o difratograma de raios X do lodo de ETA apresentou picos de difração predominantes de caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), picos com maiores intensidades em torno de 12°, 20°, 25°, 35,5°, 38,5° e 45,5°. Além disso, outros minerais identificados com intensidades menores foram a goetita ( $FeO(OH)$ ) e o quartzo ( $SiO_2$ ).

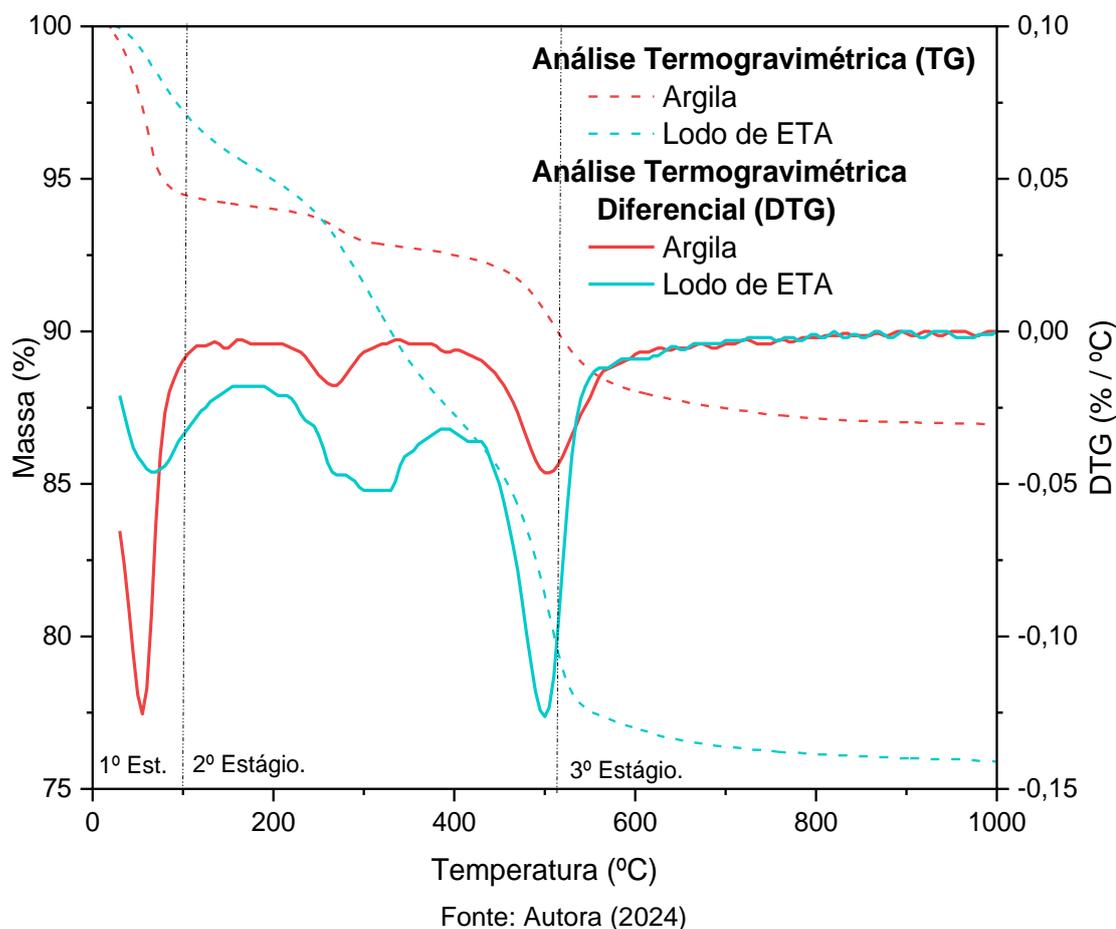
As composições mineralógicas do lodo de ETA confirmaram similaridade a outros lodos provenientes de outras ETA's principalmente com a predominância da caulinita (Monteiro *et al.*, 2008; Vieira, Margem e Monteiro, 2009; Montalvan e Boscov, 2016; Rodrigues, 2016)

Logo, as informações expostas nos difratogramas da argila e do lodo de ETA (Figura 14), corroboram com as suas respectivas composições químicas evidenciadas na Tabela 8, uma vez que seus componentes são variações dos óxidos presentes. Assim, a argila tem como seus principais minerais constituintes quartzo, caulinita e mica muscovita, com maior predominância de picos de quartzo, e o lodo de ETA tem como seus principais minerais constituintes a caulinita, a goetita e o quartzo, com maior predominância da caulinita.

#### 3.3.4 Caracterização térmica

A Figura 15 ilustra o comportamento térmico da argila e do lodo de ETA.

Figura 15: Análise Termogravimétrica da argila e do lodo de ETA.



Os termogramas da argila e do lodo de ETA (Figura 15) revelam três principais eventos térmicos. A primeira perda de massa, ocorrendo entre 64 e 100°C para a argila e 74 e 100°C para o lodo de ETA, está associada à remoção da água não estrutural (umidade) (Texeira *et al.*, 2006; Oliveira, Machado, Holanda, 2004; Santana, 2019). O segundo evento, centrado em torno de 266°C para a argila e 332°C para o lodo, pode ser relacionado a queima de matéria orgânica, desidroxilação de hidróxidos existentes e perda de água interlamelar (Santana, 2019). Por fim, o terceiro evento, em torno de 510°C para a argila e 500°C para o lodo de ETA, está relacionado à desidroxilação da caulinita, com a perda de água estrutural na forma de íons OH<sup>-</sup> (Oliveira, Machado, Holanda, 2004; Santana, 2019).

A análise termogravimétrica (Figura 15) revelou uma maior perda de massa durante a queima do lodo de ETA (19,9%) em comparação com a argila (9,32%), evidenciando a presença de maior quantidade de matéria orgânica na composição do lodo de ETA. Essa diferença é confirmada pela perda de massa total em 1000°C, que foi de 13,04% para a argila e 24,11% para o lodo de ETA. A queima da matéria

orgânica, ocorrida principalmente no terceiro estágio térmico, entre 266°C e 510°C, contribuiu significativamente para maior parte da perda de massa do lodo de ETA (cerca de 15,5%).

### 3.4 MISTURAS BINÁRIAS ARGILA X LODO DE ETA

Os corpos de prova cerâmicos foram moldados a partir de misturas binárias compostas por lodo de ETA e argila. A nomenclatura completa das misturas encontra-se detalhada na Tabela 9.

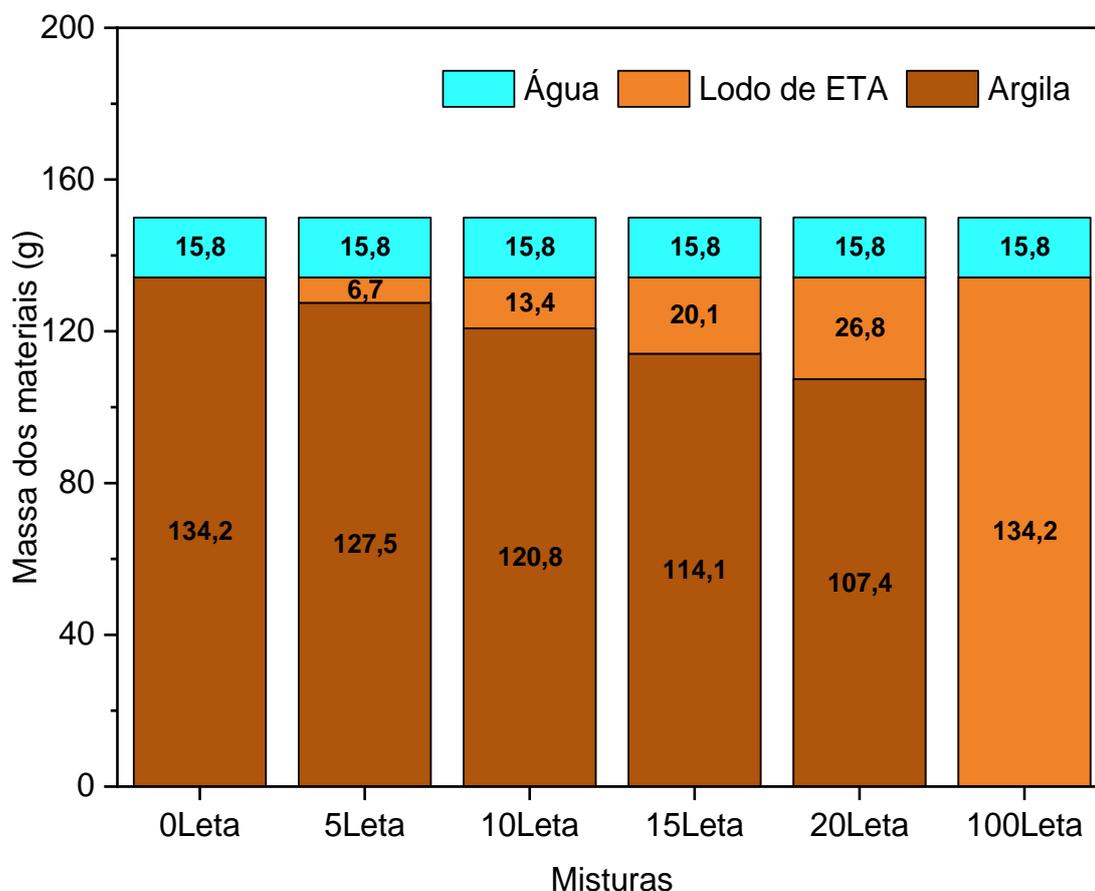
Tabela 9: Nomenclatura das misturas analisadas.

| <b>Misturas</b> | <b>Descrição</b>                                    |
|-----------------|---|
| <b>0LETA</b>    | Amostra contendo 100% de argila e 0% de lodo de ETA |
| <b>5LETA</b>    | Amostra contendo 95% de argila e 5% de lodo de ETA  |
| <b>10LETA</b>   | Amostra contendo 90% de argila e 10% de lodo de ETA |
| <b>15LETA</b>   | Amostra contendo 85% de argila e 15% de lodo de ETA |
| <b>20LETA</b>   | Amostra contendo 80% de argila e 20% de lodo de ETA |
| <b>100LETA</b>  | Amostra contendo 0% de argila e 100% de lodo de ETA |

Fonte: Autora (2024)

As misturas binárias foram preparadas substituindo-se gradualmente a argila por lodo de ETA, em proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa. Além disso, foram preparadas amostras de referência com 100% de argila e 100% de lodo. A escolha dessas proporções foi baseada em estudos anteriores, como os estudos de Chiang, Chien e Hwang (2008), Kizinievič *et al.* (2013), Silva (2014) e Benlalla *et al.* (2015), que observaram que a substituição de mais de 20% da argila por lodo de ETA pode comprometer significativamente as propriedades mecânicas das peças cerâmicas. Por exemplo, Kizinievič *et al.* (2013) observaram uma redução de até 49% na resistência à compressão e um aumento de até 100% na absorção de água ao substituir 40% da argila por lodo de ETA. As composições das misturas binárias estão ilustradas na Figura 16.

Figura 16: Composições das misturas analisadas.



Fonte: Autora (2024)

### 3.4.1 Moldagens dos corpos de prova

A tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para moldagem dos corpos de prova.

Tabela 10: Parâmetros utilizados para moldagem dos corpos de prova

| Parâmetros                         |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| <b>Teor de Umidade</b>             | 10,6%              |
| <b>Força Máxima de Compactação</b> | 80KN               |
| <b>Velocidade de ensaio</b>        | 5mm/min            |
| <b>Modo de ensaio</b>              | Compressão simples |

Fonte: Autora (2024)

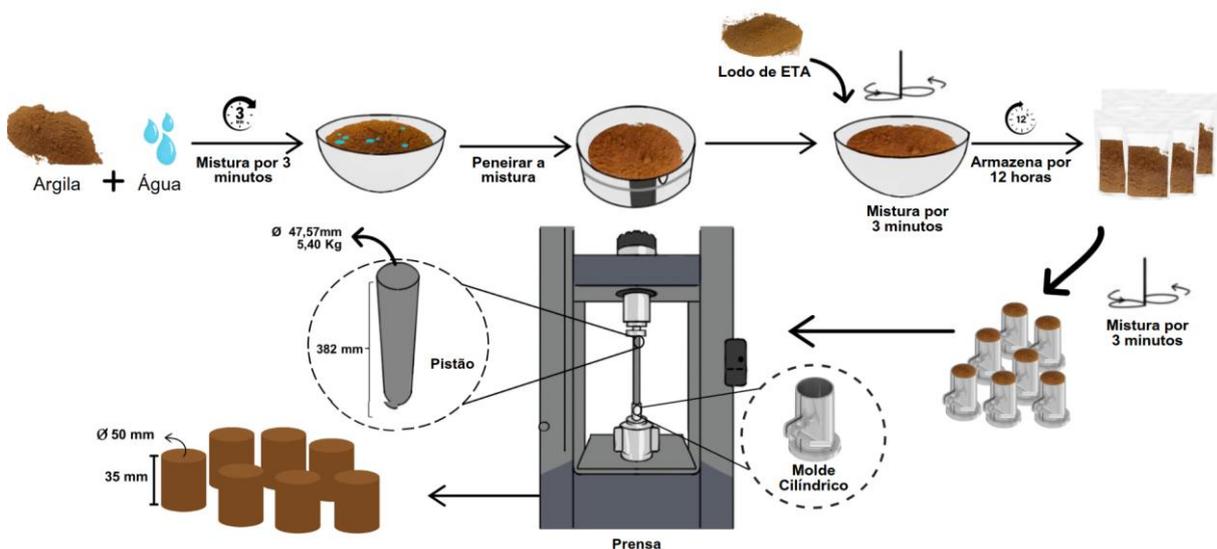
Para cada amostra analisada, foram preparadas 150g de cada mistura, independentemente da proporção de lodo utilizada, a fim de evitar problemas como perda de material durante a adição da mistura ao molde (utilizou-se um funil para essa etapa). As amostras 0LETA e 100LETA foram individualmente umedecidas e homogeneizadas manualmente até atingirem o teor de umidade de 10,6%. Esse

procedimento foi adotado com o objetivo de reduzir os possíveis erros durante o processo de homogeneização.

Durante a preparação da amostra 100LETA, observou-se que o lodo de ETA apresenta baixa solubilidade em água, o que dificultou a correção da umidade da amostra. Diante disso, optou-se por corrigir a umidade da argila seca em estufa (teor de umidade inicial de 3,6%) para 10,6% e armazená-la. A umidade do lodo de ETA seco em estufa foi mantida para as misturas binárias e corrigida apenas a umidade da amostra 100LETA. Para preparar as misturas, a argila com teor de umidade de 10,6% foi umedecida com a quantidade de água necessária para corrigir a umidade da mistura binária. Em seguida, as misturas foram armazenadas em sacos plásticos lacrados por 12 horas para garantir a manutenção das características desejadas, como a umidade. Caso o teor de umidade estivesse diferente de 10,6%, realizava-se o ajuste antes da moldagem dos corpos de prova.

A Figura 17 ilustra o procedimento de preparação e moldagem das misturas binárias analisadas.

Figura 17: Processo de preparação e moldagem das misturas binárias.



Fonte: Autora (2024)

Para determinar as propriedades físicas e mecânicas, foram confeccionados 114 corpos de prova por prensagem mecânica uniaxial a 80KN e queimados a 800°C por 3 horas. Destes, 42 foram moldados com as misturas binárias 72 corpos de prova

foram moldados para determinação dos parâmetros otimizados de moldagem, utilizando um protocolo desenvolvido nesta pesquisa, que empregou estudos exploratórios e análise estatística para obter os teores de umidade e a carga máxima de compactação ótimos, visando o maior desempenho mecânico.

O detalhamento sobre a determinação dos parâmetros utilizados para moldagem dos corpos de provas se encontra na seção 4.1.

Para garantir a triplicata dos resultados, foram moldados 7 corpos de prova cerâmicos com as dimensões 50mm X 35mm para cada grupo amostral. O número de corpos de prova de cada amostra submetidos a cada ensaio está detalhado na Tabela 11.

Tabela 11: Quantitativo de corpos de provas por ensaios analisados

| <b>Ensaio</b>                         | <b>Quantidade de corpos de prova por amostra</b> |
|---------------------------------------|--|
| <b>Perda relativa de massa (%)</b>    | 7  |
| <b>Retração linear (%)</b>            | 7  |
| <b>Absorção de água (%)</b>           | 3  |
| <b>Resistência à Compressão (MPa)</b> | 4  |

Fonte: Autora (2024)

#### 3.4.2 Queima dos corpos de prova

Os corpos de provas moldados foram secos em um forno estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  por 24 horas para remoção da umidade residual que pudesse causar fissuras durante a queima. E posteriormente, foram submetidos à queima a  $800^\circ\text{C}$  em uma mufla (marca Linn, modelo Elektro therm) no Laboratório de Materiais e Estruturas – LABME/CTG/UFPE. A rampa de aquecimento estabelecida foi de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . Após atingir a temperatura máxima,  $800^\circ\text{C}$ , a queima continuou por 3 horas e, após esse período, os corpos de prova foram resfriados naturalmente até a temperatura ambiente. Com o objetivo de evitar a ocorrência de fissuras térmicas, observadas em testes pilotos quando os corpos de prova eram retirados antes do resfriamento completo, adotou-se um período de resfriamento de cerca de 24 horas.

#### 3.4.3 Ensaios de caracterização dos materiais e das misturas binárias

A argila e o lodo de ETA foram submetidos a um processo de preparação que incluiu a secagem em estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$ , por 24 horas, para remoção da umidade.

Em seguida, os materiais secos foram moídos em moinho de bolas por 30 minutos. Após essa preparação, os materiais e as misturas binárias foram analisados quanto às suas propriedades físicas, composição mineralógica e comportamento térmico.

#### 3.4.3.1 Massa unitária

A massa unitária foi determinada no estado solto por meio de recipiente de massa e volume conhecidos, onde foram realizadas três leituras para cada mistura e considerou-se o valor médio delas.

#### 3.4.3.2 Composição granulométrica

Os ensaios para análise da composição granulométrica dos materiais e das misturas binárias foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da Universidade Federal de Pernambuco. A determinação do tamanho de partícula foi realizada por meio de um granulômetro a laser Malvern, modelo Mastersizer 2000, cujo limite inferior de detecção é 10nm e o superior é 2000 $\mu$ m. A análise foi realizada via úmido, utilizando o acessório Hydro 2000MU. Para garantir a triplicata dos resultados, foram realizadas três leituras e determinada a média entre elas.

#### 3.4.3.3 Limites de Atterberg

Para determinação dos limites de Atterberg da argila e do Lodo de ETA e das misturas binárias foram realizados os ensaios de limite de liquidez e plasticidade conforme os procedimentos pelas normas vigentes, NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco.

#### 3.4.3.4 Análise mineralógica

Os ensaios para análise da mineralógica dos materiais e das misturas binárias foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da Universidade Federal de Pernambuco. As análises de difração de raios X (DRX) foram realizadas pelo método do pó no equipamento Bruker D2 PHASER, operando com voltagem de 30 kV e corrente de 10 mA ( $P = 300$  W), radiação Cu-K $\alpha = 1,54060\text{\AA}$  e utilizando o detector Bruker-AXS-Lynxeye. A faixa de varredura ( $2\theta$ ) foi de 4° a 80°, com passo do goniômetro de 0,02019° e rotação constante da amostra de 10 rpm. A abertura da fenda primária foi de 0,4mm, a faca utilizada foi de 3mm e o tempo de contagem por passo de 0,5 segundo. As amostras foram indexadas usando o aplicativo DIFFRAC.EVA com o banco de dados COD (REV212673 2018.12.20).

#### 3.4.3.5 Análise térmica

Os ensaios para a análise térmica dos materiais e das misturas foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da Universidade Federal de Pernambuco. As curvas de análise termodiferencial (TDA) e termogravimétrica (TGA) foram obtidas simultaneamente utilizando o equipamento Shimadzu DTG – 60H, com taxa de aquecimento de 15 °C/min. A temperatura máxima estabelecida foi de 1000°C. A atmosfera para a realização das análises foi de nitrogênio (N<sub>2</sub>) com fluxo constante de 50ml/min. Empregou-se como amostra de referência a alumina calcinada. O porta-amostra utilizado foi um cadinho de alumina cilíndrico, com diâmetro de 5,0mm e altura de 2,5mm. As medidas foram realizadas com aproximadamente 40mg de cada alíquota.

#### 3.4.4 Análise estatística

A moldagem de corpos de prova cerâmicos por prensagem mecânica requer a determinação de diversos parâmetros do processo de moldagem, como o teor de umidade da mistura, a carga máxima de compactação e a velocidade de deslocamento do pistão. Esses parâmetros influenciam diretamente na resistência mecânica das misturas queimadas.

Nesse contexto, os parâmetros de teor de umidade ótima e carga máxima de compactação foram determinados por meio de duas etapas:

- Etapa 01: Determinação do teor de umidade ótimo (TUO);
- Etapa 02: Determinação da força máxima de compactação (FMC).

Para as duas etapas de definição do procedimento de moldagem, com o intuito de verificar tanto a influência do tempo de compactação e teor de umidade na resistência à compressão, como também a influência da resistência à compressão e da força de compactação no fator de viabilidade, verificou-se as condições de normalidade e homogeneidade dos dados. Em seguida, procedeu-se uma análise estatística paramétrica com o teste de análise de variância (ANOVA), cujos resultados foram representados em um gráfico de Pareto.

Para isso, empregou-se um planejamento fatorial misto em ambas as etapas, permitindo a modelagem de superfícies de resposta tridimensionais de segunda ordem, capazes de representar a influência dos fatores na variável de interesse. As

análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio do software Statistica 10. Os resultados detalhados das análises estatísticas, incluindo os coeficientes dos modelos e os gráficos de Pareto, são apresentados nas seções seguintes.

### 3.4.5 Propriedades tecnológicas

As amostras após o processo de queima foram analisadas quanto as suas propriedades: perda de massa, absorção de água, retração linear e resistência à compressão.

#### 3.4.5.1 Perda relativa de massa após queima

A perda relativa de massa das amostras após sinterização foi determinada por meio da Equação (1).

$$PM_{que}(\%) = \left( \frac{M_{sec} - M_{que}}{M_{que}} \right) \cdot 100$$

em que:

$PM_{que}$ : Perda relativa de massa na queima (%);

$M_{sec}$ : Massa do corpo de prova seco em estufa a  $100 \pm 10$  °C (g);

$M_{que}$ : Massa do corpo de prova queimado a 800 °C (g).

#### 3.4.5.2 Retração após queima

Com um auxílio de um paquímetro digital, com faixa de medição de 0 a 150mm e precisão de 0,01mm, foram realizadas duas medições do diâmetro de cada amostra sinterizada.

A retração após sinterização das amostras foi determinada com base na Equação (2).

$$R_{que}(\%) = \left( \frac{D_{sec} - D_{que}}{D_{que}} \right) \cdot 100$$

em que:

$R_{que}$ : Retração após queima (%);

$D_{sec}$ : Comprimento do corpo de prova seco em estufa a  $100 \pm 10$  °C (mm);

$D_{que}$ : Comprimento do corpo de prova queimado a 800 °C (mm).

### 3.4.5.3 Absorção de água

As amostras queimadas foram pesadas e submersas em água por 24 horas. Posteriormente, após 24h, foram pesadas novamente para determinar a sua massa saturada.

A absorção de água das amostras foi determinada com base na Equação (3).

$$A_b(\%) = \left( \frac{M_{sat} - M_{que}}{M_{que}} \right) \cdot 100$$

em que:

$A_b$ : Absorção de água (%);

$M_{sat}$ : Massa do corpo de prova saturado (g);

$M_{que}$ : Massa do corpo de prova queimado a 800 °C (g).

### 3.4.5.4 Resistência à compressão

Foram realizados ensaios de resistência à compressão nas amostras queimadas com auxílio de uma máquina servo controlada Shimadzu modelo AGS\_X de 300KN, com velocidade de carregamento de 5mm/min. Os Ensaio foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas – LABME/CTG/UFPE.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Otimização dos parâmetros do método de prensagem mecânica

#### 4.1.1 Estudo exploratório com prensa hidráulica

Inicialmente, foram preparadas 100 g de cada mistura binária (amostra com teor de umidade de 3,6%, umidade residual) e homogeneizadas manualmente por 3 minutos e, em seguida, foram pesadas amostras de 10 g. Cada amostra foi colocada em moldes cilíndricos de aço inoxidável, com 30mm de diâmetro, previamente lubrificadas com etileno glicol. A compactação das amostras foi realizada em uma prensa hidráulica MARCON - MPH-15, aplicando uma carga de 10 toneladas-força (48,4MPa) por 10 minutos. Esses parâmetros de compactação foram definidos com base em estudos anteriores do grupo de pesquisa de cerâmicas avançadas do laboratório onde foi realizado as moldagens das pastilhas cerâmicas, como o de Siqueira Júnior (2011), que produziu pastilhas cerâmicas com lodo de ETA utilizando procedimentos semelhantes e obteve resultados de resistência mecânica superiores a 25MPa após queima a 800°C.

Durante os testes preliminares de moldagem, foram moldadas as amostras de referência (0LETA) e a mistura 10LETA (com 10% de lodo de ETA) e observadas algumas dificuldades durante o processo. Apesar de terem sido preparadas 13 amostras para cada mistura, as 13 amostras apresentavam variação de espessura (Figura 18 (b)) e massa. Além disso, a maioria das amostras (cerca de 38%) apresentavam deformações da base e fissuras (Figura 18 (a)). Essas irregularidades podem estar relacionadas ao teor de umidade das misturas, que pode não ter sido suficiente para garantir uma boa compactação e a lubrificação inadequada dos moldes.

Figura 18: Pastilhas cerâmicas com (a) deformações na base e fissuras (b) variação da espessura.



(a) Deformação na base e fissuras      (b) Variação da espessura

Fonte: Autora (2024)

Para investigar a influência da lubrificação, foram realizadas novas moldagens com um teor de etileno glicol superior ao utilizado inicialmente. No entanto, os problemas de deformação persistiram em algumas amostras, indicando a existência de outros fatores que podem estar influenciando a qualidade das peças. Essas irregularidades podem comprometer a qualidade das peças cerâmicas e dificultar a análise das propriedades tecnológicas, como a resistência mecânica. Para solucionar esses problemas, foi realizado novos testes com diferentes condições de preparação das amostras (Figura 19), foi testado a moldagem das pastilhas com cerca de 50% do limite de plasticidade, conforme os estudos de Santos (1989) e Rodrigues (2023).

Figura 19: (a) Moldagem das pastilhas cerâmicas usando a prensa hidráulica MARCON - MPH-15, (b) amostra antes do processo de compactação e (c) amostra compactada.



(a) Prensa hidráulica



(b) Amostra antes da compactação

(c) Amostra compactada



Fonte: Autora (2024)

As misturas foram umedecidas até atingirem um teor de umidade de  $50\% \pm 0,5\%$  em relação à massa seca, conforme recomendado por Rodrigues *et al.* (2023). Após a adição de água, as amostras foram homogeneizadas manualmente por 3 minutos e, em seguida, armazenadas em sacos plásticos lacrados por 12 horas para que a umidade pudesse ser distribuída por toda a massa. Antes da moldagem, o teor de umidade de cada amostra foi verificado e, se necessário, foi ajustado com adição de pequenas quantidades de água. Essa etapa é importante, pois garante que todas as amostras apresentem a mesma umidade, evitando variações nas propriedades das peças cerâmicas.

Durante os novos testes preliminares, observou-se que o aumento do teor de umidade das misturas dificultava o processo de compactação. Ao aplicar uma carga de 10 toneladas-força (48,4MPa), a prensa hidráulica apresentava uma redução de cerca de 50% da força aplicada após aproximadamente 30 segundos, indicando que a amostra não estava sendo compactada de forma eficiente. Além disso, parte da massa cerâmica era expelida pelos lados do molde após aproximadamente 2 minutos de compactação, resultando em uma perda de material de até 60%. Diante desses problemas, os parâmetros de compactação foram ajustados. A carga aplicada foi reduzida para 5 toneladas-força (24,2MPa) e o tempo de compactação para 3 minutos. Após a compactação, as peças foram secas em estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  por 24 horas e, em seguida, queimadas em forno a  $800^\circ\text{C}$  por 3 horas, com uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

Durante o ensaio de resistência à compressão das pastilhas cerâmicas, realizado em uma máquina servo controlado Shimadzu modelo AGS-X de 300KN, observou-se que a prensa registrou um aumento contínuo da carga aplicada, atingindo valores superiores a 150MPa, sem que a máquina detectasse a sua ruptura. Ao interromper o ensaio, notou-se que as pastilhas sofreram deformação, com redução do diâmetro e várias fissuras, sugerindo que as baixas dimensões das pastilhas ( $\emptyset 30\text{mm} \times 5,5\text{mm}$ ) tenha limitado a sensibilidade da prensa, impedindo a detecção da ruptura da amostra.

Sendo assim, necessário realizar a moldagem dos corpos de provas com maiores dimensões para poder avaliar a resistência à compressão das misturas. Entretanto, o molde utilizado já era o maior disponível no laboratório. Além disso

observou-se que a altura da prensa hidráulica, em relação à sua base, impedia o aumento da quantidade de massa no molde, impossibilitando o aumento da quantidade de massa e conseqüentemente, a compactação de peças espessuras maiores (Figura 20). Diante disso, optou-se por realizar a moldagem dos corpos de prova utilizando a prensa mecânica Shimadzu modelo AGS-X de 300KN. A prensa mecânica oferece maior flexibilidade na configuração dos moldes e permite a aplicação de forças de compactação mais elevadas e controladas, o que possibilita a produção de corpos de prova com as dimensões padronizadas.

Figura 20: Moldagem das pastilhas cerâmicas: (a) Amostra compactada com massa inicial de 30g e (b) Amostra compactada com massa inicial de 20g.



(a) Massa inicial de 30g.

(b) Massa inicial de 20g.

Fonte: Autora (2024)

#### 4.1.2 Determinação dos parâmetros de moldagem para prensagem mecânica

Diante da indisponibilidade de moldes que possibilite a moldagem dos corpos de provas com altura mínima de  $20 \pm 3$ mm, altura necessária para garantir a leitura dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, conforme observado nos testes pilotos, realizados na seção 4.1.1, foi necessário realizar a adaptação de um molde. Para isso, utilizou-se um molde cilíndrico de 50x100mm, normalmente utilizado para moldagem de corpos de prova de argamassa, e um pistão de ferro com diâmetro de 47,7mm, espessura de 382mm e massa de 5,40kg.

A moldagem de corpos de prova cerâmicos por prensagem mecânica requer a determinação de diversos parâmetros tais como: o teor de umidade da mistura, a carga máxima de compactação e a velocidade de deslocamento do pistão. Esses

parâmetros influenciam diretamente na resistência mecânica das misturas queimadas.

Neste contexto, os parâmetros de teor de umidade ótima e carga máxima de compactação foram determinados por meio de duas etapas:

- Etapa 01: Determinação do teor de umidade ótimo (TUO);
- Etapa 02: Determinação da força máxima de compactação (FMC).

### **Etapa 01: Determinação do teor de umidade ótimo (TUO)**

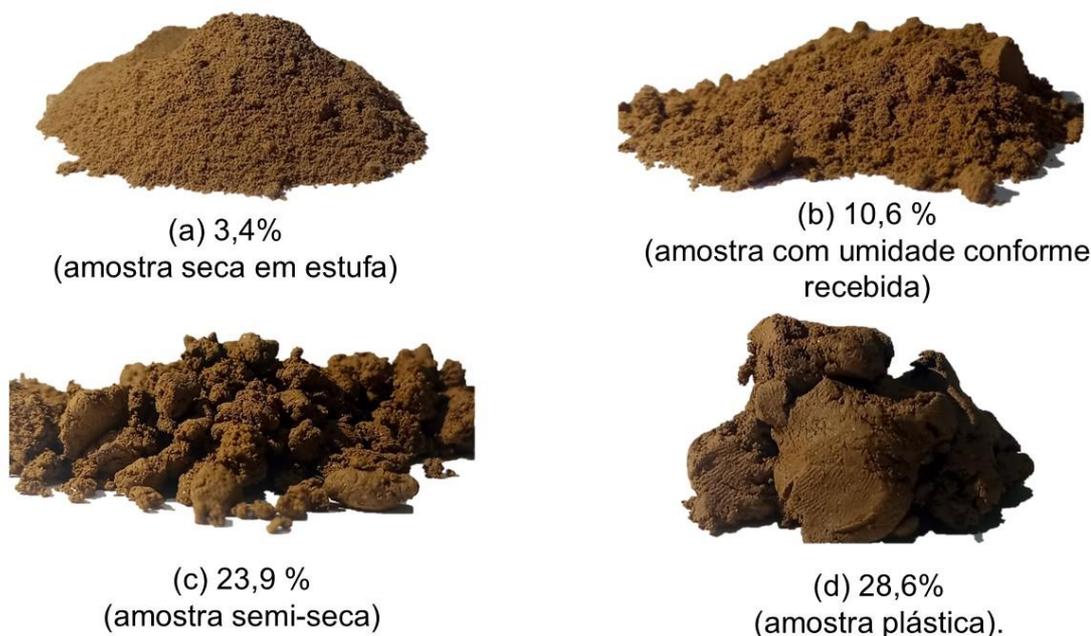
#### 4.1.3 Etapa 01: Determinação do teor de umidade ótimo (TUO)

O ensaio de Proctor é utilizado para determinar a umidade ótima de compactação de solos, ou seja, o teor de umidade que resulta na máxima densidade aparente seca do solo após a aplicação de cargas repetidas (Proctor, 1933). No ensaio, geralmente, são compactadas em cinco teores de umidades crescentes, espaçados de 2 em 2%, determinando-se para cada uma delas a densidade específica aparente seca após a compactação (Freitas, 2016).

Entretanto, para determinar o teor de umidade ótimo para a moldagem dos corpos de prova cerâmicos, o ensaio de Proctor foi adaptado. Devido à limitação de material, a variação da umidade não pôde ser realizada de 2 em 2%, optando-se por uma variação maior para abranger uma faixa mais ampla de teores de umidade. As umidades da argila foram escolhidas com base em algumas características (Figura 21):

- **Amostra seca em estufa:** 3,4% (correspondente à umidade residual após secagem em estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  por 24 horas);
- **Amostra com a umidade de campo:** 10,6% (umidade da argila conforme recebida);
- **Amostra semisseca:** 23,9% (umidade intermediária entre a seca e a plástica);
- **Amostra plástica:** 28,6% (umidade próxima ao limite de plasticidade da mistura 10LETA, teor intermediário de substituição das misturas).

Figura 21: Amostras de argila com diferentes teores de umidade: (a) 3,4% (amostra seca em estufa), (b) 10,6% (amostra com umidade conforme recebida), (c) 23,9% (amostra semisseca) e (d) 28,6% (amostra plástica).

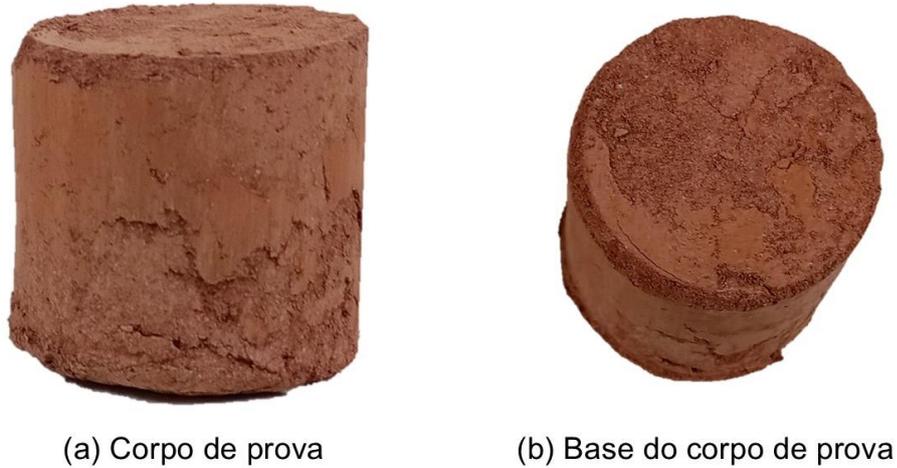


Fonte: Autora (2024)

A velocidade de deformação controlada, utilizada no ensaio de compressão simples, foi de 5mm/min.

Inicialmente, foi realizado um teste piloto com duas amostras de argila, com umidades de 3,4 e 10,6%, utilizando a carga máxima de compactação de 15KN. Essa carga foi utilizada no trabalho de Nor *et al.* (2015), que observou que a amostra de referência apresentou resistência à compressão de 7,64MPa, enquanto a amostra com 20% de lodo de ETA apresentou resistência à compressão de 4,52MPa. Entretanto, ao moldar as amostras de teste com a carga máxima de 15KN, notou-se que as amostras compactadas estavam apenas parcialmente compactadas, apresentando-se extremamente frágeis e com diversas fissuras (Figura 22), que inviabiliza a sua utilização, pois a peça conformada deve ter resistência mecânica suficiente para se manter intacta durante o transporte até o forno, onde irá se realizar a queima (Callister e Rethwisch, 2016).

Figura 22: Amostra com 10,6% de umidade compactada com a carga máxima de 15KN: (a) corpo de prova e (b) base do corpo de prova.



Fonte: Autora (2024)

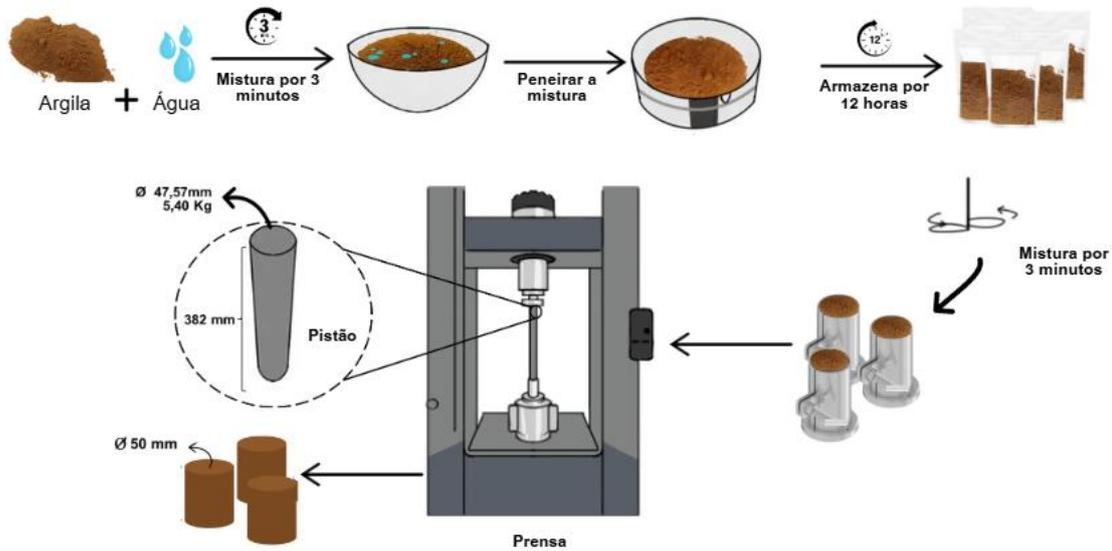
Diante disso, optou-se por utilizar o controle da carga de compactação por tempo, a fim de determinar, na segunda etapa, a carga de compactação máxima da amostra com teor ótimo de umidade. A seguir, são apresentados os tempos de compactação utilizados:

- 3 minutos: tempo utilizado na moldagem das pastilhas por prensagem hidráulica;
- 5 minutos: tempo intermediário;
- 7 minutos: tempo máximo para a amostra plástica atingir a altura mínima de  $20 \pm 3\text{mm}$  (altura suficiente para garantir a precisão dos resultados dos ensaios de compressão, conforme observado nos testes pilotos).

Portanto, em síntese, na primeira etapa foram moldadas amostras com 4 teores de umidade (3,6%, 10,6%, 23,9% e 28,6%) com 3 tempos de compactação (3, 5 e 7 minutos). Para cada combinação de umidade e tempo de compactação, três corpos de prova foram moldados e a densidade aparente seca (relação entre a massa e volume do corpo de prova) e a resistência à compressão foram verificadas. Totalizando a moldagem de 36 corpos de provas.

A Figura 23 ilustra um esquema utilizado para a preparação e moldagem dos corpos de provas cerâmicos da etapa 01 e 02.

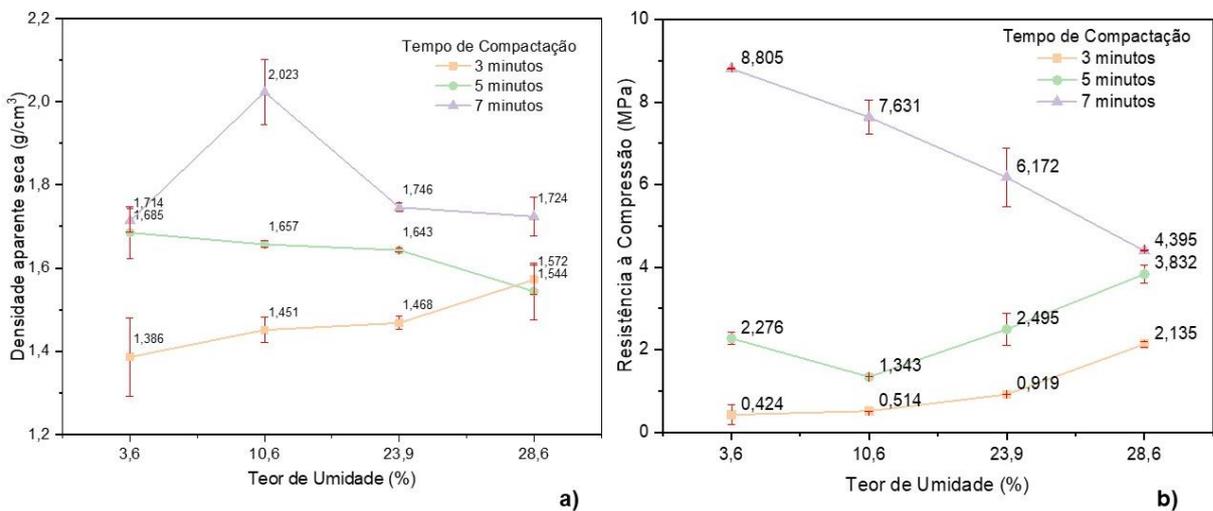
Figura 23: Procedimentos moldagem utilizados na etapa 01 e 02.



Fonte: Autora (2024)

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos na primeira etapa.

Figura 24: Resultados da primeira etapa: Teor de umidade X (a) densidade aparente seca (b) resistência à compressão.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 24 (a), observa-se que para os tempos de compactação de 3 minutos nota-se uma tendência de aumento da densidade aparente seca com o acréscimo do teor de umidade. No entanto, para tempo de compactação de 5 minutos, essa tendência se inverteu, e a densidade aparente seca diminuiu com o aumento do teor de umidade. Já para tempo de compactação de 7 minutos, a densidade aparente seca variou entre 1,714 e 2,023g/cm³, sem uma tendência clara de aumento ou diminuição com o teor de umidade.

Na Figura 24 (b) observa-se que para os tempos de compactação de 3 minutos e 5 minutos, há uma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de umidade. Para o tempo de compactação de 7 minutos, observa-se uma tendência de diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de umidade.

Esses comportamentos ocorrem provavelmente porque, quando o tempo de compactação é curto, a água presente no material atua como um lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas e a densificação do material (Souza, 2015; Freitas, 2016; Vargas, 2021). Nesse contexto, um maior teor de umidade permite que as partículas se acomodem melhor, resultando em uma compactação mais eficiente e, conseqüentemente, em uma maior resistência à compressão (Gun'ko *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2024). Por outro lado, para um tempo de compactação prolongado o excesso de umidade se torna prejudicial. A água em excesso passa a ocupar os espaços vazios entre as partículas, tendendo a afastá-las, não colaborando, portanto, com a densificação do material (Freitas, 2016; Vargas, 2021).

Portanto, para primeira etapa conclui-se a amostra de argila com teor de umidade 10,6% apresentou maior densidade aparente seca e a amostra de argila com teor de umidade 3,4% apresentou a maior resistência mecânica.

#### 4.1.3.1 Análise estatística

Para a escolha da umidade das misturas, foi aplicado um planejamento fatorial misto, considerando a resistência à compressão como a resposta desejada. Os fatores analisados foram o tempo de compactação e o teor de umidade, com 3 e 4 níveis, respectivamente. A partir desses dados, desenvolveu-se um modelo de regressão que relaciona essas variáveis, resultando em uma superfície quadrática tridimensional, conforme representado pela Equação 4.

$$g(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot y + e \cdot y^2 + f \cdot x \cdot y \quad (eq4)$$

em que:

$g(x, y)$ : Resistência à compressão (MPa);

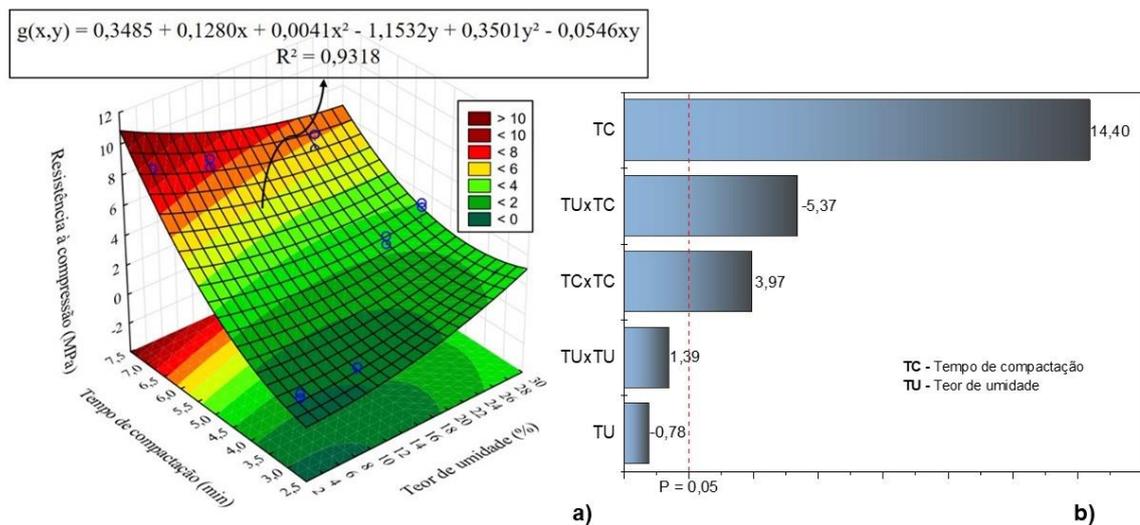
$x$ : Tempo de compactação (minutos);

$y$ : Teor de umidade (%);

$a, b, c, d, e, f$ : coeficientes que correspondem aos parâmetros da regressão.

Com base na Equação 4, foi realizado um ajuste de superfície não linear, cujas função e superfície ajustadas estão representadas na Figura 25.

Figura 25: Influência do tempo de compactação e do teor de umidade na resistência à compressão: regressão por superfície de resposta e análise de variância no diagrama de Pareto.



Fonte: Autora (2024)

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,9318 (Figura 25 (a)), demonstrando que o modelo ajustado representa de maneira precisa a relação entre as variáveis estudadas. A Figura 25 (b) ilustra a análise de variância por meio de um diagrama de Pareto, que identifica os fatores com impacto significativo na variável resposta. A linha vertical vermelha representa o nível de significância de 5%, indicando que os fatores cujos valores ultrapassam essa linha apresentam impactos estatisticamente significativos nos valores de resistência à compressão.

O teor de umidade (TU) e sua interação consigo mesmo (TUxTU) não se apresentaram estatisticamente significativos, o que pode ser explicado por comportamentos distintos na relação entre teor de umidade e resistência à compressão, dependendo do tempo de compactação utilizado.

O tempo de compactação (TC) demonstrou um impacto direto e proporcional nos valores de resistência, sendo, portanto, considerado estatisticamente significativo na análise de variância, conforme evidenciado no gráfico de Pareto (Figura 25 (b)).

#### 4.1.4 Etapa 02: Determinação da força máxima de compactação (FMC)

Para determinar a força máxima de compactação foram preparadas duas amostras de argila com diferentes teores de umidade: 3,4% (amostra com maior resistência à compressão após queima) e 10,6% (amostra com maior densidade aparente seca). A escolha do teor de 10,6%, além do teor de 3,6%, foi baseada na observação do comportamento das amostras durante o processo de compactação. Amostras com umidade de 3,4% apresentaram dificuldades na desmoldagem após 7 minutos de prensagem mecânica, mesmo com a aplicação de óleo nos moldes, sendo necessário, o uso de ferramentas, como chave de grifo e alicates, para serem removidas dos moldes, levando em média, individualmente, 10 minutos para a completa desmoldagem, o que inviabiliza o processo para produção em larga escala.

Diante disso, a segunda etapa do processo de moldagem avaliou diferentes forças de compactação para os teores de umidade 3,4% e 10,6%. Inicialmente, foram realizados testes pilotos para determinar o intervalo de variação da força máxima de compactação a ser utilizado nessa etapa. Nesses testes, observou-se que uma força máxima de compactação de 20KN (tempo de compactação com 3 minutos) era a mínima necessária para garantir a integridade dos corpos de prova após a moldagem, ou seja, sem apresentar fissuras ou deformações na base. Por outro lado, forças superiores a 120KN causaram danos aos moldes cilíndricos, indicando o limite superior da faixa de compactação. Portanto, o intervalo da força de compactação entre 20 e 100KN foi definido para os ensaios subsequentes.

Além disso, foi realizada uma análise qualitativa da viabilidade operacional, considerando critérios como facilidade de desmoldagem, resistência mecânica e integridade da amostra compactada. Para quantificar essa viabilidade, foi determinado um fator de viabilidade ( $f$ ), calculado de acordo com a equação 5:

$$f = 0,3 \cdot C_1 + 0,2 \cdot C_2 + 0,5 \cdot C_3 \text{ (eq5)}$$

em que:

$f$ : Fator de viabilidade operacional;

$C_1$ : Critério de desmoldagem;

$C_2$ : Critério de integridade;

$C_3$ : Critério de desempenho mecânico.

A seguir os detalhamentos dos critérios analisados:

- Critério de desmoldagem ( $C_1$ )
  - Desmoldagem sem auxílio de ferramenta (1);
  - Desmoldagem rápida com auxílio de ferramenta (0,67);
  - Desmoldagem lenta com auxílio de ferramenta (0,33);
  - Desmoldagem inviável (0).
- Critério de integridade ( $C_2$ ): a amostra apresentou fissuras, esfarelamento, deformação da base ou fragilidade.
  - Nenhum problema de integridade (1);
  - Apenas um problema de integridade (0,67);
  - Dois problemas de integridade (0,33);
  - Três ou mais problemas de integridade ou teve desmoldagem inviável (0).
- Critério de desempenho mecânico ( $C_3$ )
  - Resistência superior a 20MPa (1);
  - Resistência superior a 10MPa e inferior a 20MPa (0,67);
  - Resistência superior a 2MPa e inferior a 10MPa (0,33);
  - Resistência inferior a 2MPa (0).

Assim, de acordo com os critérios estabelecidos foram determinados os intervalos de avaliação do fator de viabilidade (Tabela 12)

Tabela 12: Fator de viabilidade operacional.

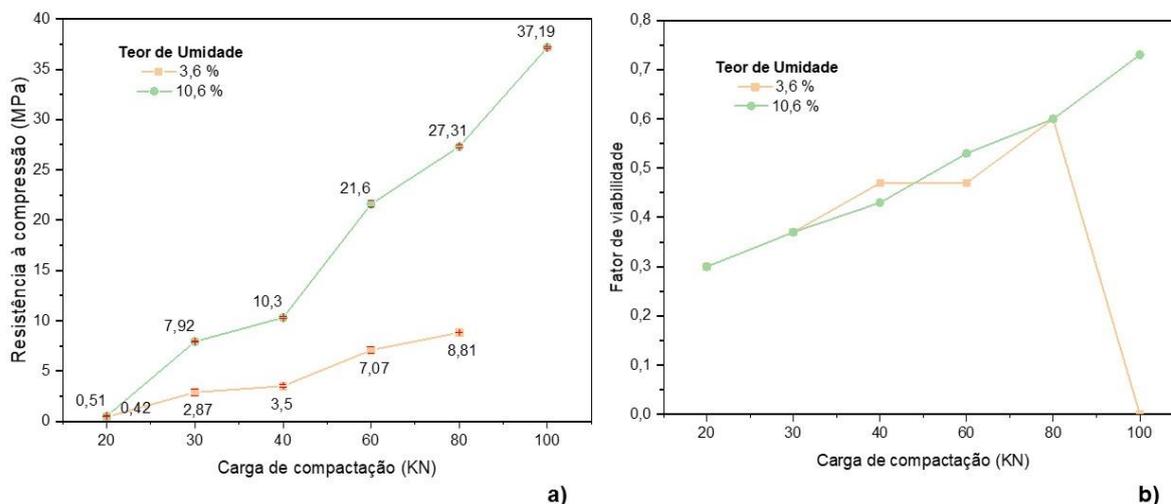
| Inviável   | Pouco viável      | Viável            |
|------------|-------------------|-------------------|
| $f \leq 0$ | $0 < f \leq 0,50$ | $0,50 < f \leq 1$ |

Fonte: Autora (2024)

As amostras com teores de umidade de 3,4% e 10,6% foram submetidas às forças de compactação de 20KN, 30KN, 40KN, 60KN, 80KN e 100KN. Para cada amostra, foram analisados em triplicatas os critérios de desmoldagem, de integridade e de desempenho mecânico e determinado o fator de viabilidade operacional, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Totalizando a moldagem de 36 corpos de provas.

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos na segunda etapa.

Figura 26: Resultados da segunda etapa: Carga de compactação máxima X (a) resistência à compressão (b) fator de viabilidade de produção.



Fonte: Autora (2024)

Na Figura 26 (a), observa-se uma tendência de acréscimo gradual da resistência à compressão com o aumento da carga de compactação para ambos os teores de umidade, como observado na etapa de determinação do teor de umidade ótimo (Etapa 01). Além disso, nota-se que a amostra com umidade de 10,6% apresentou resistência à compressão superior à amostra com umidade de 3,4% em todas as cargas de compactação testadas.

Na Figura 26 (b), nota-se uma tendência de acréscimo gradual do fator de viabilidade com o aumento da carga de compactação para ambos os teores de umidade, comportamento que está diretamente relacionado com o aumento da resistência à compressão.

Em relação às observações sobre o fator de viabilidade de produção das misturas compactadas, temos que as amostras compactadas com as cargas de compactação de 20kN e 30kN foram desmoldadas sem auxílio de ferramenta (menos de 2 minutos por amostra), porém apresentaram fissuras, deformação da base. No caso das amostras com umidade de 3,6%, foram observados esfarelamento, maior quantidade de fissuras e baixa resistência mecânica (resistência à compressão inferior a 3MPa)

As amostras compactadas com cargas de compactação de 40kN e 60kN tiveram desmoldagem rápida com auxílio de ferramenta (entre 2 minutos e 5 minutos

por amostra), apresentaram fissuras. As amostras com umidade de 3,4% apresentaram maior quantidade de fissuras, quando comparadas com as amostras com maior teor de umidade.

Já as amostras compactadas com cargas de compactação de 80KN e 100KN apresentaram desmoldagem lenta com auxílio de ferramenta (mais de 5 minutos por amostra). Os corpos de prova com umidade de 3,4% compactadas com 100KN não foram possíveis serem desmoldados, mesmo com auxílio de ferramentas, ademais, 2 dos 3 moldes utilizados foram danificados durante o processo de moldagem.

#### 4.1.4.1 Análise estatística

Para a escolha da força máxima de compactação, foi aplicado um planejamento fatorial misto, foram analisados os fatores resistência à compressão, força máxima de compactação utilizada na moldagem e teor de umidade e avaliou-se a influência deles na resposta fator de viabilidade operacional. A partir desses dados, desenvolveu-se um modelo de regressão que relaciona essas variáveis. A fim de representar o modelo, foram fixados os dois teores de umidade trabalhados (3,4% e 10,6%) e modelado um parabolóide hiperbólico de equação do, conforme representado pela Equação 6.

$$z(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + dy + e \cdot y^2 + f \cdot x \cdot y \quad (eq6)$$

em que:

$z(x, y)$ : Fator de viabilidade operacional;

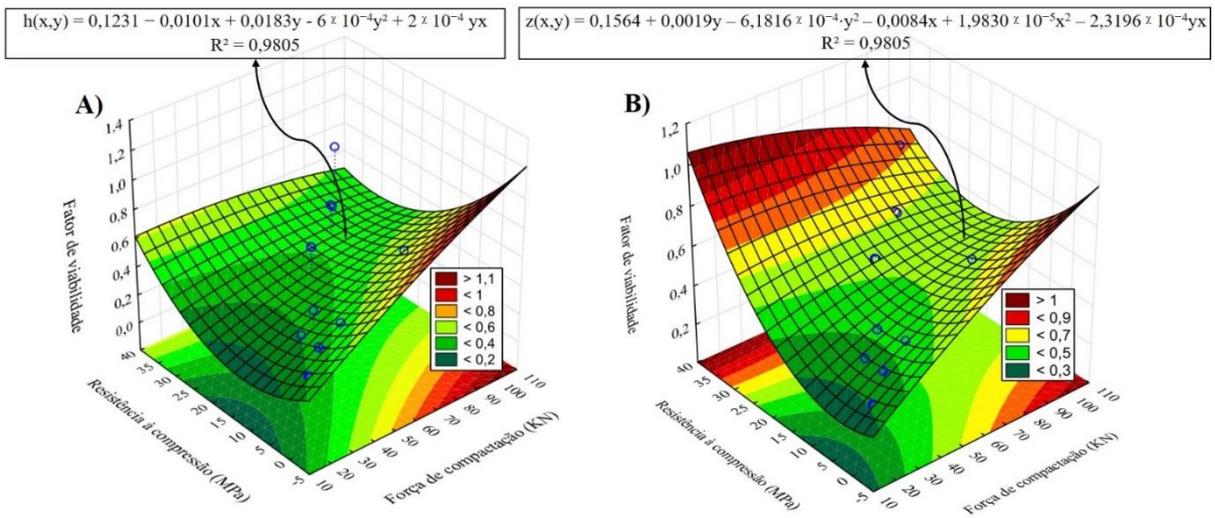
$x$ : Força de compactação (KN);

$y$ : Resistência à compressão (MPa);

$a, b, c, d, e, f$ : coeficientes que correspondem aos parâmetros da regressão.

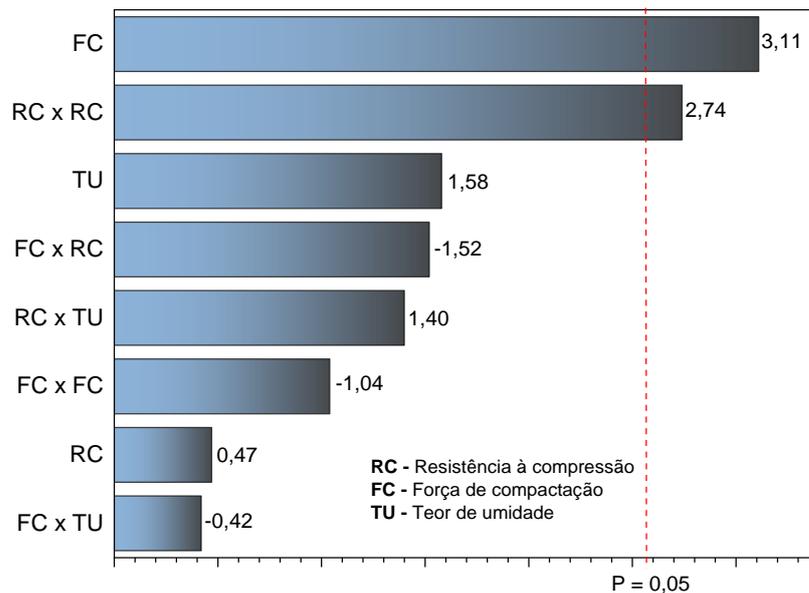
Com base na Equação 6, realizou-se o ajuste de superfície para ambos os teores de umidade, obtendo-se um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9805, que demonstra a precisão do ajuste e a representatividade da relação entre as variáveis. As funções e superfícies ajustadas estão representadas na Figura 28 e o diagrama de Pareto (Figura 29).

Figura 27: Influência da força de compactação e da resistência à compressão no fator de viabilidade quando o teor de umidade é fixado em 3,4% (a) e 10,6% (b).



Fonte: Autora (2024)

Figura 28: Gráfico de Pareto representando a análise de variância envolvendo a interação de todas as variáveis da segunda etapa de definição do método.



Fonte: Autora (2024)

As interações entre os fatores analisados forneceram insights relevantes sobre o comportamento do fator de viabilidade operacional. Observa-se que a força de compactação (FC) e a resistência à compressão (RC) apresentam um comportamento interdependente, no qual o aumento simultâneo de ambas tende a elevar o fator de viabilidade. No entanto, é importante destacar que esse aumento não é contínuo, uma vez que, para valores muito elevados de força de compactação e resistência à

compressão, podem ocorrer dificuldades no processo de desmoldagem, o que comprometeria a viabilidade operacional. Esse efeito, embora não completamente representado nas superfícies de resposta é coerente com a moldagem prática dos corpos de prova. Observou-se, por exemplo, que a amostra com umidade de 3,4% compactada a 100KN apresentou inviabilidade de desmoldagem, o que limita o aumento do fator de viabilidade para essa combinação de parâmetros.

Embora a interação entre a força de compactação e a resistência à compressão não varie substancialmente em função do teor de umidade (TU), observa-se que, com TU mais elevado (10,6%), o fator de viabilidade operacional é maior. Esse comportamento é explicado pela maior plasticidade e capacidade de rearranjo das partículas proporcionadas pelo aumento da umidade, o que facilita a formação de estruturas mais homogêneas e melhora as condições de compactação e desmoldagem. Assim, o teor de umidade mais alto contribui para ampliar a zona de viabilidade, suavizando as restrições impostas pelas variáveis de força e resistência.

Nesse contexto, os efeitos observados no fator de viabilidade de produção são predominantemente governados pelas influências isoladas da força de compactação, resistência à compressão e TU, com destaque para a interação entre FC e RC, que desempenha um papel mais expressivo na determinação da viabilidade.

A análise conjunta dos resultados da primeira e segunda etapa, resultados de resistência à compressão, densidade aparente seca e o fator de viabilidade revelam que a carga de compactação e o teor de umidade influenciam as propriedades das peças cerâmicas. Destacando que a escolha do teor de umidade ótima e da carga de compactação máxima deve levar em consideração tanto a resistência mecânica desejada quanto a viabilidade de produção das peças cerâmicas.

Os procedimentos adotados neste estudo para a determinação dos parâmetros de conformação por prensagem mecânica, como teor de umidade ótima e carga máxima de compactação, demonstraram resultados satisfatórios, evidenciados pela obtenção de corpos de prova com densidade uniforme e bom desempenho mecânico. Esses procedimentos podem servir como base para a determinação dos parâmetros de moldagem de outros materiais particulados, desde que as características específicas de cada material, como propriedades físicas e químicas, sejam

consideradas. Os parâmetros específicos determinados neste estudo foram: teor de umidade ótima de 10,6% e carga máxima de compactação de 80kN.

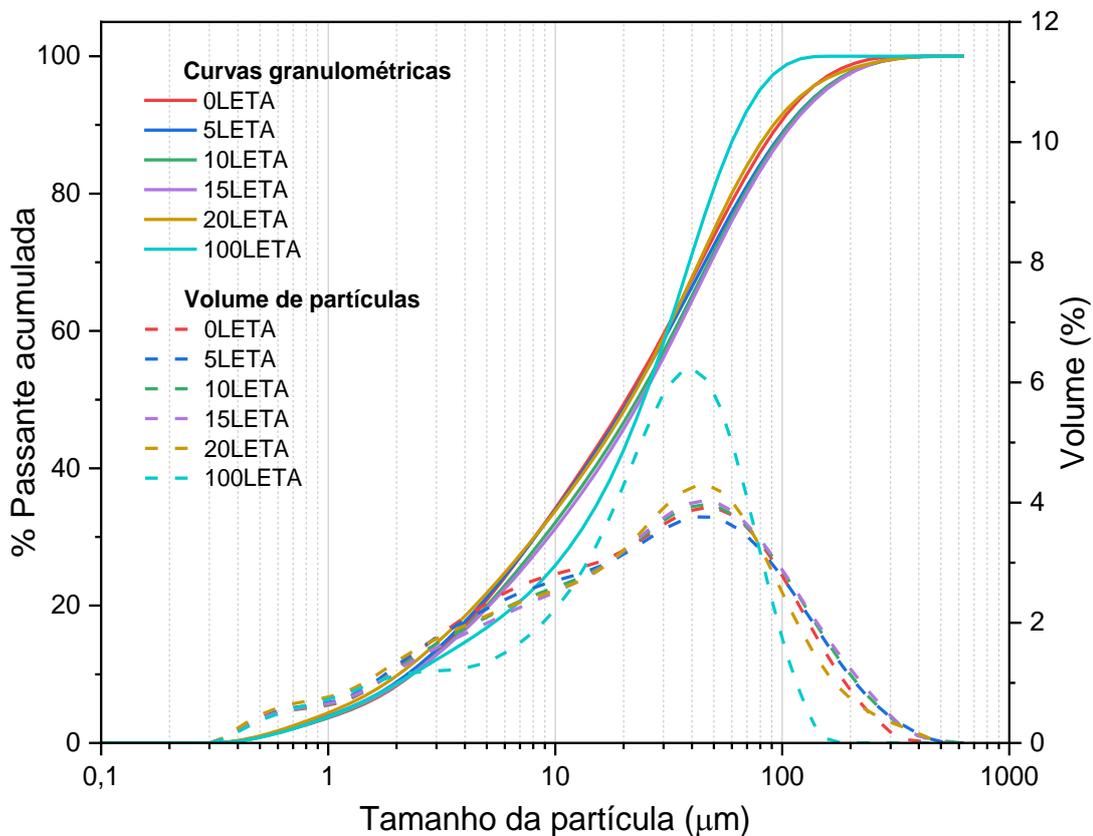
## 4.2 CARACTERIZAÇÕES DAS MISTURAS BINÁRIAS

A seguir os resultados das análises físicas, mineralógicas e térmicas das misturas antes do processo de queima.

### 4.2.1 Caracterização física

A Figura 29 apresenta o comportamento granulométrico das misturas binárias e a Tabela 13 resume os diâmetros característicos, D10 (diâmetro para o qual 10% das partículas possuem diâmetro menor), D50 (diâmetro para o qual 50% das partículas possuem diâmetro menor) e D90 (diâmetro para o qual 90% das partículas possuem diâmetro menor), determinados a partir da análise granulométrica das misturas.

Figura 29: Curvas granulométricas e distribuição das partículas das misturas.



Fonte: Autora (2024)

Tabela 13: Diâmetros característicos das misturas binárias.

| <b>Diâmetros (µm)</b> | <b>0LETA</b> | <b>5LETA</b> | <b>10LETA</b> | <b>15LETA</b> | <b>20LETA</b> | <b>100LETA</b> |
|-----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>D10</b>            | 2,701        | 2,565        | 2,693         | 2,675         | 2,349         | 2,694          |
| <b>D50</b>            | 23,659       | 24,328       | 26,362        | 27,362        | 24,668        | 28,185         |
| <b>D90</b>            | 110,388      | 122,096      | 123,373       | 126,585       | 104,936       | 74,426         |

Fonte: Autora (2024)

A análise granulométrica por difração de raios laser das misturas binárias contendo argila e lodo de ETA (Figura 29), apresentaram uma distribuição de tamanhos de partículas entre 0,34 µm e 590,2 µm. Os diâmetros médios das misturas, D(10), D(50) e D(90), tiveram uma variação de 2,3 µm até 2,7 µm, 23,7 µm até 28,2 µm e 74,4 µm até 126,6 µm, respectivamente, abrangendo uma ampla faixa de tamanhos.

Além disso, a Figura 18 e a Tabela 12 destacam um crescimento gradual dos diâmetros médios (D50 e D90) das misturas à medida que aumenta a proporção de lodo de ETA até atingir 15% (15LETA). Por outro lado, a mistura 20LETA apresentou um comportamento granulométrico semelhante ao comportamento da mistura de referência (0LETA).

A tabela 14 apresenta as áreas específicas e as massas unitárias das misturas analisadas.

Tabela 14: Área específica e massa unitária das misturas.

| <b>Misturas</b> | <b>Área específica (cm<sup>2</sup>/g)</b> | <b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|---|--|
| <b>0LETA</b>    | 0,900                                     | 0,730                                    |
| <b>5LETA</b>    | 0,928                                     | 0,669                                    |
| <b>10LETA</b>   | 0,883                                     | 0,649                                    |
| <b>15LETA</b>   | 0,882                                     | 0,637                                    |
| <b>20LETA</b>   | 0,977                                     | 0,628                                    |
| <b>100LETA</b>  | 0,892                                     | 0,422                                    |

Fonte: Autora (2024)

As áreas específicas das misturas variaram entre 0,88 cm<sup>2</sup>/g e 0,98 cm<sup>2</sup>/g, indicando uma elevada concentração de partículas finas, o que resulta em uma maior superfície específica por unidade de massa.

As misturas binárias contendo 5% e 20% de lodo de ETA (5LETA e 20LETA) tiveram um acréscimo de sua área específica em 3,1% e 8,6%, respectivamente, em relação à amostra de referência (0LETA). Por outro lado, as misturas com 10% e 15% de lodo de ETA (10LETA, 15LETA e 100LETA) apresentaram uma menor redução da área específica, de 1,9% e 2,0%, respectivamente, sugerindo que apesar do lodo de ETA conter uma maior quantidade de partículas finas (Figura 29), a substituição parcial da argila por até 15% de lodo de ETA promove um melhor empacotamento das partículas, resultando em uma menor área superficial específica.

As misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA) apresentaram uma redução gradual de massa unitária, com valores de 4,6%, 7,9%, 9,9% e 11,5% superiores a amostra de referência (0LETA), respectivamente, evidenciando uma relação direta entre o aumento do teor de substituição da argila por lodo de ETA e a massa unitária das misturas analisadas.

A Tabela 14 apresenta os limites de Atterberg das misturas binárias analisadas.

Tabela 15: Limites de Atterberg das misturas binárias.

| <b>Misturas</b> | <b>Limite de<br/>Liquidez (%)</b> | <b>Limite de<br/>Plasticidade (%)</b> | <b>Índice de<br/>Plasticidade (%)</b> |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>0LETA</b>    | 35,30                             | 22,10                                 | 13,20                                 |
| <b>5LETA</b>    | 36,20                             | 22,40                                 | 13,80                                 |
| <b>10LETA</b>   | 38,50                             | 28,10                                 | 10,40                                 |
| <b>15LETA</b>   | 43,90                             | 31,76                                 | 12,14                                 |
| <b>20LETA</b>   | 44,00                             | 32,00                                 | 12,00                                 |
| <b>100LETA</b>  | Nd                                | NP                                    | NP                                    |

NP = Não Plástico. Nd = Não detectado

Fonte: Autora (2024)

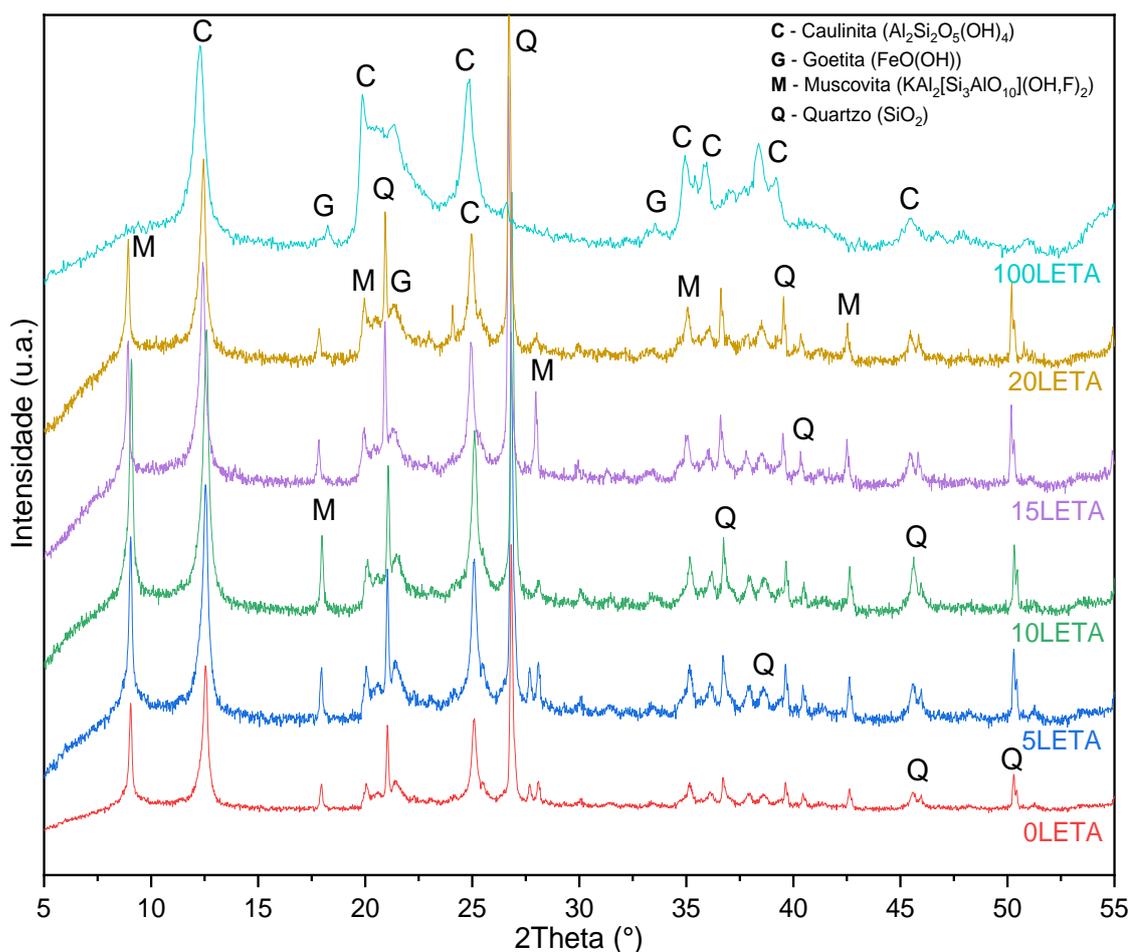
Os limites de liquidez das misturas variaram entre 35% e 44% e os limites de plasticidade variaram entre 22% e 32%, indicando uma relação direta entre o aumento do teor de substituição da argila por lodo de ETA e os limites de Atterberg (limite de liquidez e plasticidade) das misturas analisadas. De acordo com Monteiro *et al.* (2008) e Rodrigues (2023), os valores elevados de limites de liquidez e plasticidade das misturas contendo lodo de ETA pode ser relacionado com a presença de matéria orgânica, devido à restos de folhas e madeira, compostos orgânicos adsorvidos nas superfícies dos minerais e bactérias.

Os índices de plasticidade (IP) determinados para as misturas analisadas permitem classificá-las da seguinte forma: aquelas com IP entre 1 e 7% são consideradas fracamente plásticas, entre 7 e 15% são medianamente plásticas e acima de 15% são altamente plásticas (Caputo, 2016; Santos *et al.*, 2012). Conforme demonstra a Tabela 14, a mistura de referência e as misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA) são classificadas como medianamente plásticas, enquanto a mistura 100LETA é classificada como não plástica.

#### 4.2.2 Caracterização mineralógica

Os padrões de difração de raios X obtidos nos ensaios de caracterização mineralógica das binárias anidras estão apresentadas na Figura 30.

Figura 30: Caracterização mineralógica das misturas binárias.



O difratograma de raios X da mistura 100LETA apresentou picos de difração predominantes de caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) e picos com menores intensidades de goetita ( $FeO(OH)$ ) e quartzo ( $SiO_2$ ).

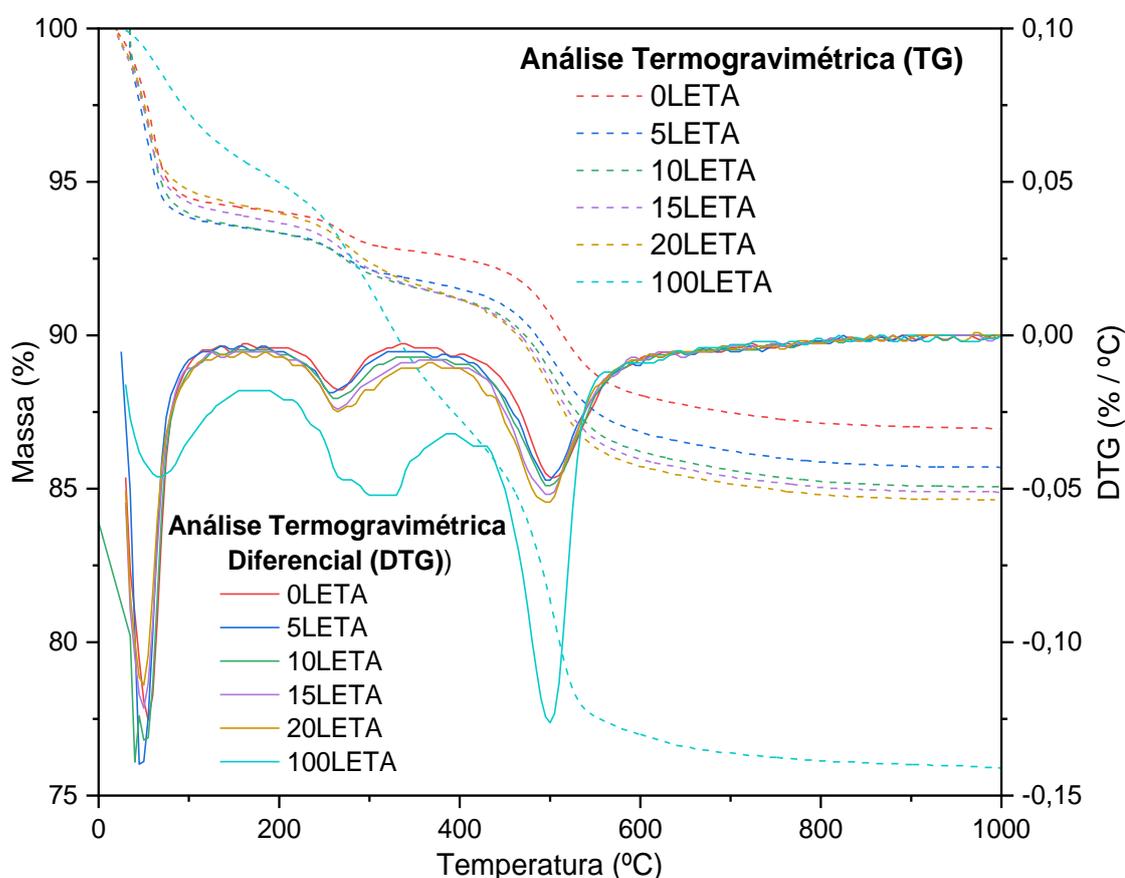
Por outro lado, os DRXs da mistura de referência e das misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA) destacam que os picos de difração predominantes são correspondentes ao quartzo ( $SiO_2$ ), à caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), à muscovita ( $KAl_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$ ) e à goetita ( $FeO(OH)$ ).

Analisando qualitativamente os difratogramas de raios X (Figura 19), observa-se que o aumento do teor de lodo de ETA nas misturas resultou em um aumento da intensidade dos picos dos minerais muscovita ( $17^\circ$ ,  $35^\circ$  e  $41,5^\circ$ ), quartzo ( $40^\circ$  e  $50^\circ$ ), caulinita ( $25^\circ$ ) e goetita ( $23^\circ$ ).

#### 4.2.3 Caracterização térmica

A Figuras 31 ilustra o comportamento térmico das misturas binárias e a Tabela 16 apresenta os valores da perda de massa total observadas na análise termogravimétrica das misturas binárias.

Figura 31: Análise Termogravimétrica das misturas binárias.



Fonte: Autora (2024)

Os termogramas das misturas binárias (Figura 31) revelam três principais eventos térmicos: 64 °C, 266 °C e 510 °C, para as misturas 0LETA, 5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA, e 74 °C, 332 °C e 500 °C, para a mistura 100LETA.

Assim, como observado na análise termogravimétrica dos materiais, temos que o primeiro evento térmico pode ser relacionado à remoção da água não estrutural (umidade) (Oliveira, Machado, Holanda, 2004; Texeira *et al.*, 2006; Oliveira, Holanda, 2008; Santana, 2019), o segundo evento pode ser relacionado a queima de matéria orgânica, desidroxilação de hidróxidos existentes e perda de água interlamelar (Santana, 2019). Por fim, o terceiro evento térmico, poder ser relacionado à desidroxilação da caulinita, com a perda de água estrutural na forma de íons OH<sup>-</sup> (Oliveira, Holanda, 2008; Santana, 2019).

Tabela 16: Perda de massa total (%) das misturas binárias.

| <b>0LETA</b> | <b>5LETA</b> | <b>10LETA</b> | <b>15LETA</b> | <b>20LETA</b> | <b>100LETA</b> |
|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 13,04        | 14,32        | 14,93         | 15,12         | 15,37         | 24,11          |

Fonte: Autora (2024)

Observou-se, na Tabela 16, que a perda de massa total tem um acréscimo gradual com o aumento do teor de substituição da argila por lodo de ETA, variando entre 13,04% na mistura 0LETA (amostra de referência com 100% de argila) para 24,11% na mistura 100LETA (amostra de controle com 100% de lodo de ETA), sugerindo uma relação direta entre o aumento do teor de matéria orgânica com o aumento da proporção de lodo de ETA nas misturas binárias.

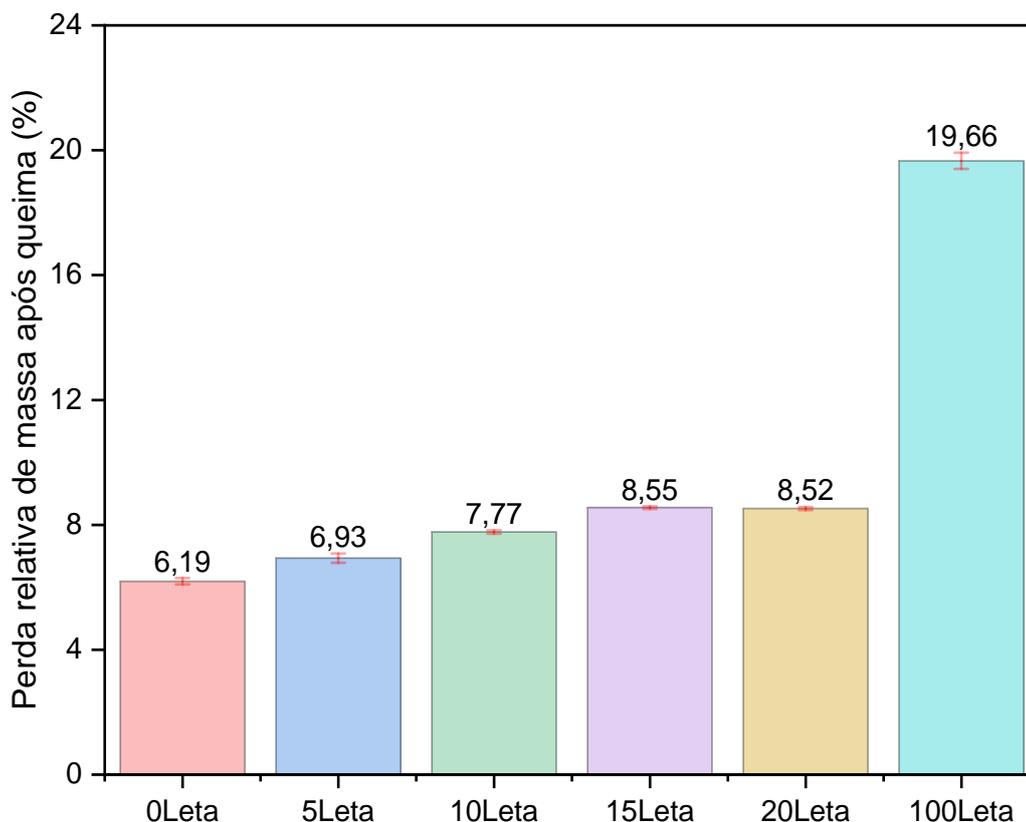
#### 4.3 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS MISTURAS BINÁRIAS

A seguir os resultados obtidos das propriedades tecnológicas das amostras queimadas.

##### 4.3.1 Perda relativa de massa

A Figura 32 ilustra a perda de massa das misturas estudadas após a queima, destacando a quantidade de material que foi removida durante o processo.

Figura 32: Perda de massa após a queima das misturas binárias.



Fonte: Autora (2024)

Observou-se que a perda de massa tem um acréscimo gradual com o aumento do teor de substituição da argila por lodo de ETA, variando entre 6,19% na mistura 0LETA (amostra de referência com 100% de argila) para 19,66% na mistura 100LETA (amostra de controle com 100% de lodo de ETA). Esse comportamento pode ser relacionado à presença de materiais orgânicos e componentes voláteis presentes na composição do lodo de ETA, os quais são liberados durante o processo de queima (Wolff, Schwabe, Conceição, 2015; Santana, 2019; Rodrigues, 2023), que corrobora com comportamento da argila e da instabilidade térmica do lodo de ETA refletido na análise termogravimétrica (Figura 31).

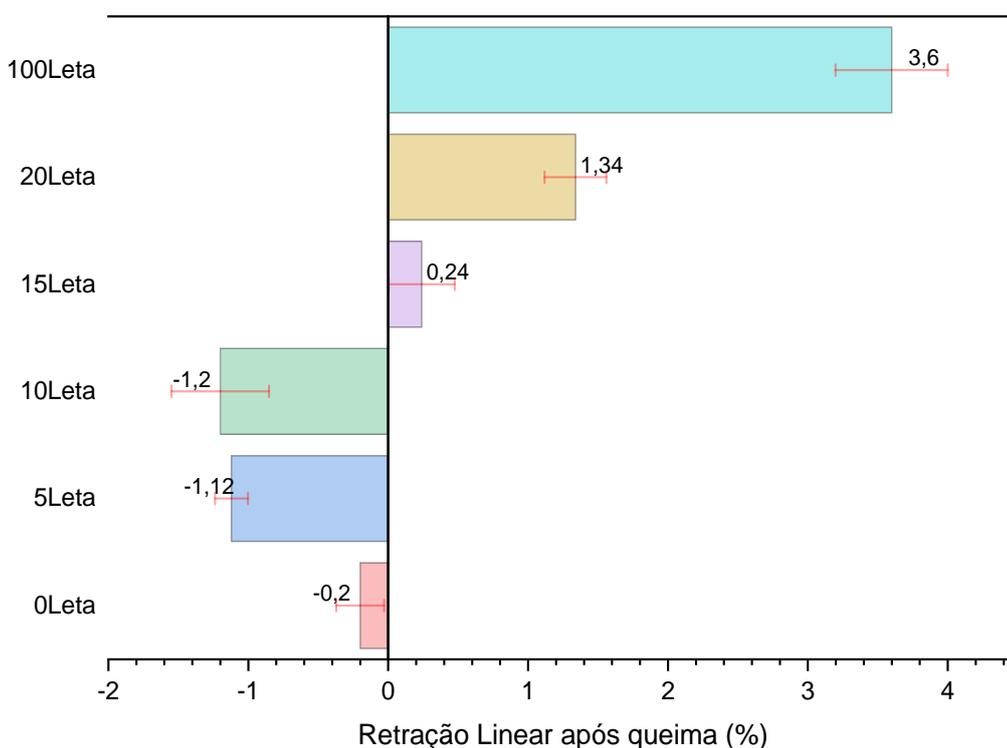
Para as misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA), a perda de massa aumentou gradualmente, com um acréscimo de 11,94%, 25,46%, 38,17% e 37,57%, respectivamente, em relação a amostra de referência (0LETA). A estabilização do crescimento gradual da perda de massa foi observada entre as misturas 15LETA e 20LETA. Essa estabilização pode estar relacionada a influência da argila no comportamento térmico das misturas proporcionando maior estabilidade estrutural, retardando a decomposição de

componentes voláteis e, conseqüentemente, limitando a perda de massa durante o processo de queima, como evidenciado na análise termogravimétrica (Figura 20), as misturas 15LETA e 20LETA apresentaram comportamento semelhante a mistura de referência (0LETA).

#### 4.3.2 Retração linear

A Figura 33 ilustra a retração linear das misturas estudadas após a queima.

Figura 33: Retração linear das misturas estudadas.



Fonte: Autora (2024)

Observa-se que a mistura composta por 100% de argila (0LETA) e as misturas binárias contendo 5 e 10% de lodo de ETA (5LETA e 10LETA) apresentaram valores negativos de retração linear após a queima a 800°C, refletindo em uma leve expansão linear para amostra de referência. Enquanto, as misturas binárias 5LETA e 10LETA apresentaram uma expansão linear significativamente superior, cerca de 5,6 e 6 vezes maior que 0LETA, respectivamente.

A pequena expansão observada pode ser justificada pela liberação de tensões após a remoção dos corpos de prova do molde, conforme descrito por Santos (1989). Santos (1989) afirma que as argilas, geralmente, durante a etapa de secagem apresentam uma mínima retração e que alguns materiais podem apresentar uma

pequena expansão devido à liberação de tensões após a remoção do molde. O autor destaca que esse comportamento é mais comum em materiais com elevado teor de quartzo e moldados com baixa umidade, como as misturas analisadas neste trabalho.

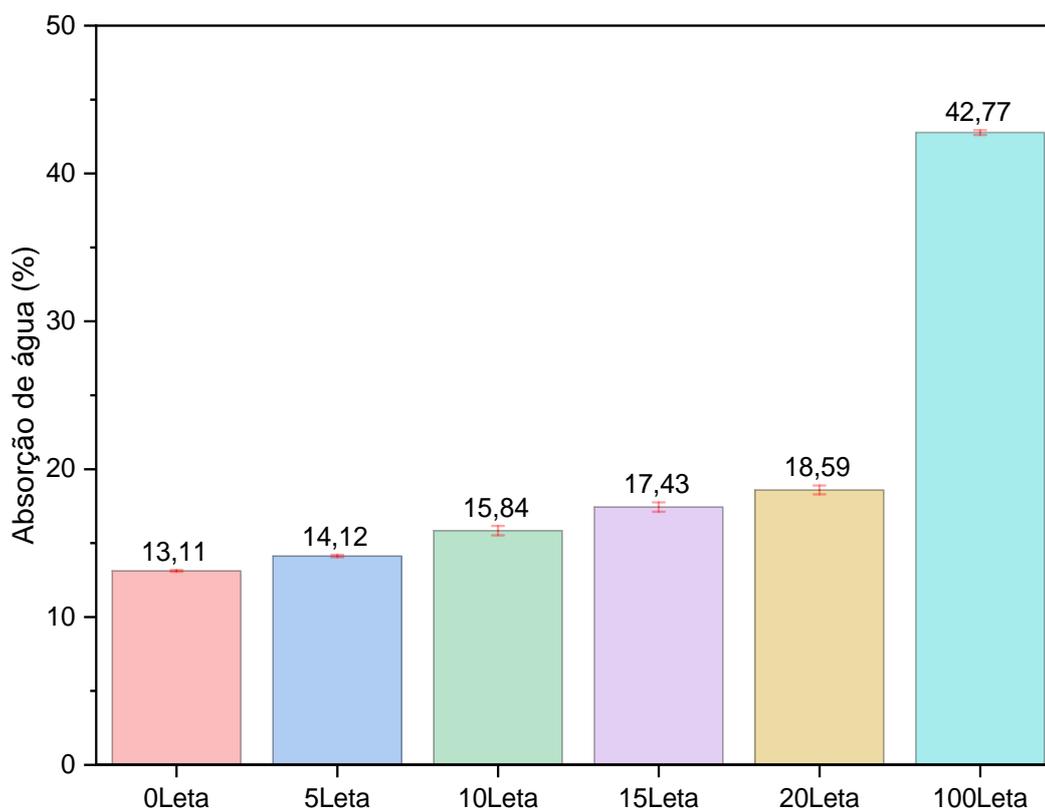
Por outro lado, as misturas com teores de lodo de ETA superiores à 15% sofreram retração linear, diferindo do comportamento apresentado nas demais misturas. A amostra 15LETA apresentou uma retração linear após queima, com valor de 0,24%, destacando-se a mudança de comportamento das misturas binárias queimadas, sugerindo o início do processo de vitrificação (Oliveira e Holanda, 2008). A retração causa um empacotamento mais denso de partículas, resultando em maior força de interação entre as partículas, o que aumenta a resistência mecânica do corpo (Paixão *et al.*, 2008).

A amostra com 100% de lodo de ETA (100LETA) apresentou a maior retração linear, com valor de 4,54%. Essa elevada retração pode ser atribuída à ausência de uma matriz argilosa estabilizadora e a alta instabilidade térmica do lodo de ETA, evidenciada na análise termogravimétrica (Figura 20), que destaca a perda de massa significativa em temperaturas relativamente baixas, o que contribui para a elevada retração observada.

#### 4.3.3 Absorção de água

A Figuras 34 apresenta os resultados médios de absorção de água das misturas binárias queimadas.

Figura 34: Absorção de água das misturas binárias.



Fonte: Autora (2024)

Os resultados do ensaio de absorção de água (Figura 34) destacam o impacto da incorporação do lodo de ETA nas misturas queimadas analisadas, evidenciando uma relação direta entre o aumento do teor de substituição da argila por lodo de ETA e a absorção de água das misturas analisadas.

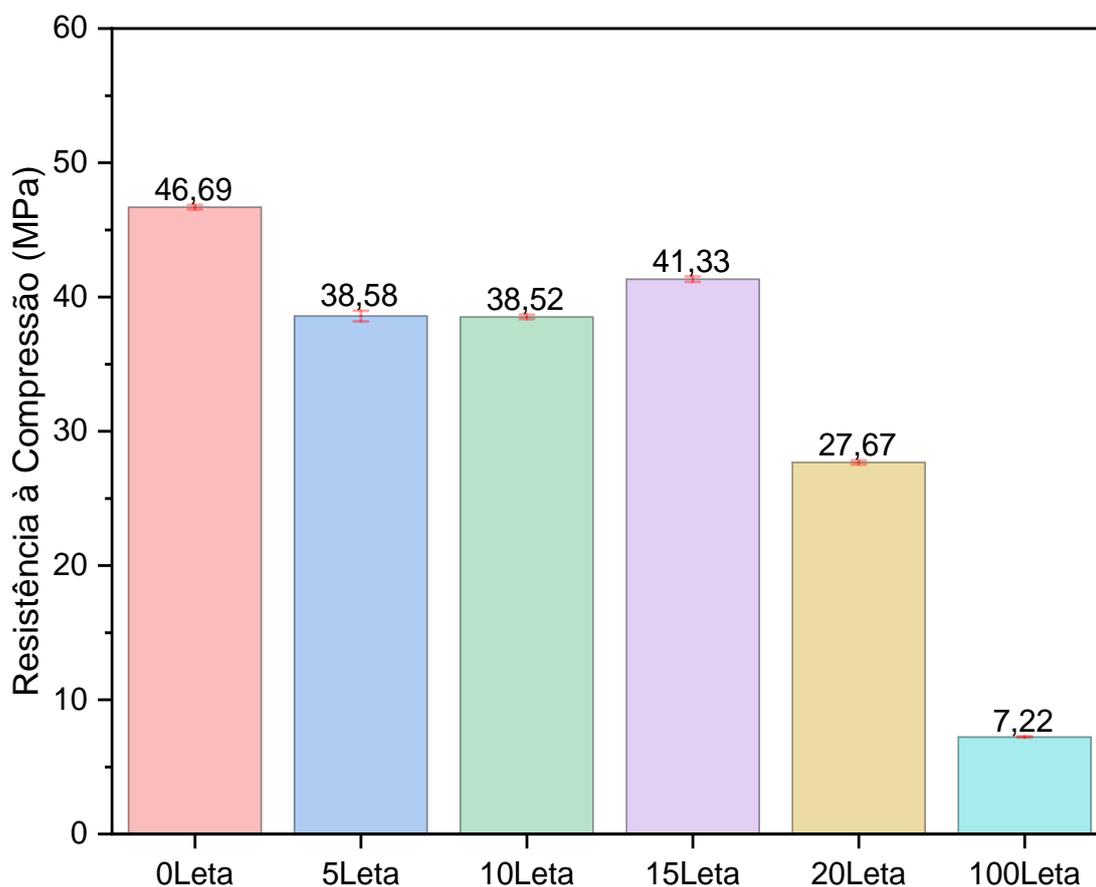
A mistura 0LETA apresentou a menor absorção de água (13,11%), indicando menor porosidade e, conseqüentemente, maior densidade. Por outro lado, a amostra 100LETA apresentou a maior absorção, cerca de 3,4 vezes superior (44,77%) à amostra de referência, refletindo em uma maior porosidade e menor densidade.

As misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA) tiveram um crescimento gradual na absorção de água, com valores de 7,70%, 20,82%, 32,95% e 41,84% superiores a amostra de referência (0LETA), respectivamente. Esse crescimento linear sugere que o aumento do teor de lodo nas misturas promove a formação de poros durante o processo de queima, devido a eliminação da matéria orgânica e a água de hidratação, presente no lodo de ETA (Monteiro *et al.*, 2008, Oliveira, Holanda, 2008).

#### 4.3.4 Resistência à compressão

A Figura 35 apresenta os resultados médios de resistência à compressão das misturas binárias queimadas.

Figura 35: Resistência à compressão das misturas binárias queimadas.



Fonte: Autora (2024)

A mistura 0LETA apresentou a maior resistência à compressão (46,69MPa). Por outro lado, a amostra 100LETA apresentou a menor resistência (7,22MPa), com uma redução de cerca de 84,5% em relação à amostra de referência. Esse comportamento mecânico das misturas está diretamente relacionado aos resultados obtidos nos ensaios de perda de massa após queima e absorção de água, discutidos anteriormente, que evidenciam a elevada porosidade da mistura. Os resultados indicam que quanto maior a perda de massa e a absorção de água, menor é a resistência à compressão das misturas analisadas, como observado na literatura por Texeira *et al.* (2006), Torres, Hernández e Paredes (2012) e Rodrigues (2023).

As misturas binárias contendo de 5% a 20% de lodo de ETA (5LETA, 10LETA, 15LETA e 20LETA) tiveram uma diminuição da resistência à compressão, com valores

de 17,37%, 17,50%, 11,48% e 40,74% inferiores a amostra de referência (0LETA), respectivamente. Essa redução sugere que o aumento do teor de lodo nas misturas promove a formação de poros durante o processo de queima, devido a eliminação da matéria orgânica e a água livre, presente no lodo de ETA (Texeira *et al.*, 2006; Monteiro *et al.*, 2008), que acarreta a diminuição da sua resistência mecânica.

A mistura 15LETA teve a maior resistência à compressão (41,33MPa) entre as misturas contendo lodo de ETA, com um aumento de cerca de 6%, em relação às misturas 5LETA e 10LETA, indicando que 15% é o teor ótimo de lodo de ETA nas misturas analisadas. Além disso, a mistura com 100% de lodo de ETA evidencia a inviabilidade do uso isoladamente do lodo de ETA, sugerindo que a ausência da argila nas misturas impede a formação de fases cristalinas, resultando em um material altamente poroso e fragilizado, como observado nos resultados de absorção de água (Figura 34), retração linear (Figura 33) e perda de massa (Figura 32) das misturas analisadas.

#### 4.4 RESUMOS DOS RESULTADOS

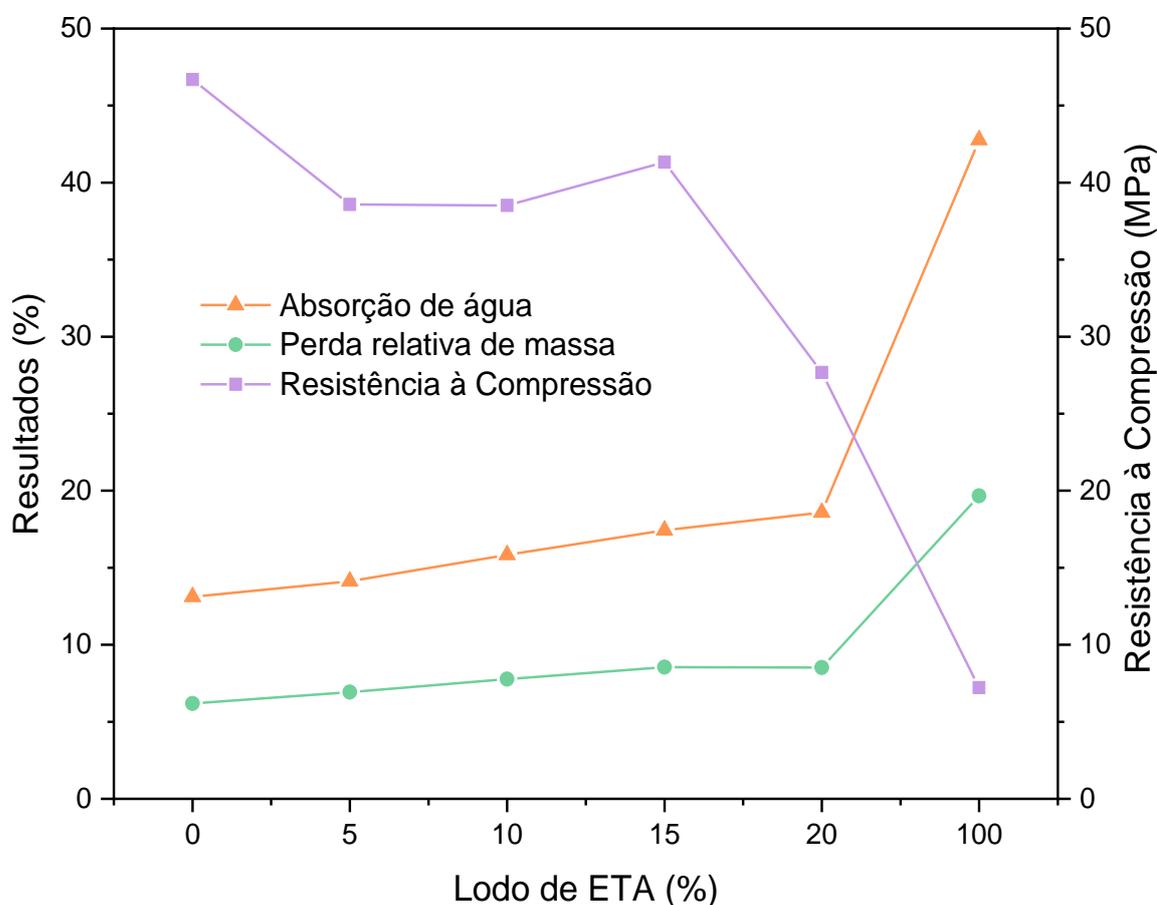
A Figura 36 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de perda de massa, retração linear e absorção de água em relação aos teores de lodo de ETA nas misturas e a Tabela 17 apresenta um resumo dos resultados das propriedades tecnológicas das misturas binárias queimadas obtidos nesta pesquisa.

Tabela 17: Resumo dos resultados das propriedades tecnológicas das misturas binárias queimadas.

| <b>Misturas</b> | <b>Perda de massa após queima (%)</b> | <b>Retração linear (%)</b> | <b>Absorção de água (%)</b> | <b>Resistência à compressão (MPa)</b> |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| <b>0LETA</b>    | 6,191 ± 0,100                         | -0,201, ± 0,171            | 13,111 ± 0,064              | 46,689 ± 0,162                        |
| <b>5LETA</b>    | 6,930 ± 0,150                         | -1,117 ± 0,118             | 14,118 ± 0,082              | 38,575 ± 0,397                        |
| <b>10LETA</b>   | 7,767 ± 0,055                         | -1,199 ± 0,349             | 15,837 ± 0,320              | 38,524 ± 0,168                        |
| <b>15LETA</b>   | 8,554 ± 0,043                         | 0,238, ± 0,236             | 17,432 ± 0,316              | 41,334 ± 0,198                        |
| <b>20LETA</b>   | 8,517 ± 0,049                         | 1,341 ± 0,221              | 18,585 ± 0,305              | 27,665 ± 0,156                        |
| <b>100LETA</b>  | 19,660 ± 0,260                        | 3,595 ± 0,401              | 42,772 ± 0,166              | 7,219 ± 0,046                         |

Fonte: Autora (2024)

Figura 36: Resumo dos resultados dos ensaios de perda de massa, retração linear e absorção de água em relação aos teores de lodo de ETA nas misturas



Fonte: Autora (2024)

A análise da Figura 36 revela que o aumento do teor de lodo de ETA nas misturas resultou no aumento da perda de massa e da absorção de água, e na diminuição da resistência à compressão. Embora não se observe uma tendência linear de diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor de lodo de ETA, há uma redução geral nos resultados obtidos. O aumento da resistência observado no teor de 15% sugere uma maior eficiência do método de conformação, que promoveu melhor compactação da peça, reduzindo a porosidade e densificando a matriz, resultando no aumento da resistência à compressão da mistura.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 17, destaca-se que de acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2023), que traz requisitos para componentes cerâmicos, blocos e tijolos para alvenaria, a mistura de referência (0LETA) e as misturas binárias analisadas obtiveram resultados de absorção de água dentro do intervalo normativo (8 a 25%). Em relação à resistência à compressão, as amostras

obtiveram resultados superiores aos requisitos para blocos e tijolos sem função estrutural (VED,  $f_b \geq 1,5\text{MPa}$ ) e para blocos e tijolos estruturais (EST,  $f_b \geq 4,0\text{MPa}$ ).

Já amostra com 100LETA apresentou resistência à compressão (7,2MPa) dentro intervalo normativo para blocos e tijolos com função estrutural (EST), porém apresentou valor de absorção de água (42,8%) superior ao intervalo normativo (8 a 25%), inviabilizando o uso isoladamente do lodo de ETA.

Portanto, a proporção do lodo de ETA recomendado é de até 15%, com um teor de umidade ótimo de 10,6%, preparado nas misturas moldadas com método de conformação prensagem mecânica uniaxial com carga máxima de compactação de 80KN e queimadas a 800°C para produzir material cerâmico com bom desempenho mecânico.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a viabilidade do uso de lodo de Estação de Tratamento de Água como matéria-prima para a confecção de materiais cerâmicos. Os objetivos específicos incluíram avaliar o impacto das diferentes proporções de lodo de ETA nas características físicas, mineralógicas e térmicas das misturas binárias, analisar a influência do teor de lodo de ETA nas propriedades tecnológicas dos materiais cerâmicos e determinar a dosagem ideal de lodo de ETA para sua aplicação como material suplementar na produção de cerâmica. A seguir serão apresentadas as principais conclusões deste estudo, bem como sugestões para futuras pesquisas nesse tema.

### 5.1 CONCLUSÕES

A caracterização das misturas binárias argila x lodo de ETA revelou que o aumento do teor de lodo de ETA resultou em alterações significativas em suas propriedades. Observou-se uma redução na massa unitária, que passou de  $0,73\text{g/cm}^3$  para a mistura de referência até  $0,422\text{g/cm}^3$  para a mistura com 100% de lodo, o que pode ser atribuído à menor densidade do lodo em comparação com a argila. O índice de plasticidade das misturas também foi afetado pelo aumento do teor de LETA. A amostra de referência apresentou um índice de plasticidade de 13,20%, enquanto as misturas contendo LETA variaram entre 12 e 13,8%. A amostra com 100% de LETA, por sua vez, foi considerada não plástica.

A análise mineralógica por DRX indicou a predominância de quartzo, muscovita, caulinita e goetita na composição das misturas, com alterações maiores nas intensidades dos picos de caulinita e muscovita com a adição do LETA. A análise térmica evidenciou maior perda de massa nas misturas com o aumento do LETA, o que pode ser atribuído à presença de compostos orgânicos e minerais hidratados. A amostra contendo apenas lodo de ETA apresentou instabilidade térmica, com a ocorrência de processos de desidratação e decomposição de matéria orgânica em faixas de temperatura entre 100 e  $600^\circ\text{C}$ . No geral, as misturas contendo 5, 10 e 15% de lodo de ETA apresentaram comportamento térmico e mineralógico mais próximo da mistura de referência.

Em relação aos corpos de prova produzidos com misturas binárias, a perda de massa aumentou gradualmente com a substituição da argila por LETA, variando de 6,19% na amostra de referência para 19,66% na mistura contendo apenas LETA. As misturas com 5 e 10% de LETA apresentaram expansão linear, cerca de 5,6 e 6 vezes maior que a amostra de referência, respectivamente, enquanto as misturas com 15, 20 e 100% de lodo apresentaram retração linear.

A absorção de água aumentou com o acréscimo de LETA, variando de 13,11% na amostra de referência para 42,77% na mistura contendo apenas LETA, evidenciando o aumento da porosidade do material com o aumento do teor de lodo nas amostras. A resistência à compressão apresentou uma redução com a incorporação do LETA, variando de 46,69MPa na amostra de referência para 7,22MPa na mistura contendo apenas LETA.

A dosagem ótima de lodo de ETA nas misturas foi de 15%, resultando em um material cerâmico com a maior resistência à compressão (41,33MPa) entre as misturas analisadas, representando um aumento de cerca de 6% em relação às misturas com 5% e 10% de lodo de ETA. A utilização do lodo de ETA isoladamente é inviável, sugerindo que a ausência da argila impede a formação das fases cristalinas necessárias para conferir ao material resistência e estabilidade térmica, resultando em um material cerâmico altamente poroso e frágil.

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que o lodo de Estação de Tratamento de Água pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos, desde que sejam realizados os processos de beneficiamento do resíduo, como secagem e moagem, para garantir a homogeneidade e a qualidade da mistura.

A realização de testes de compactação com diferentes teores de umidade e cargas aplicadas demonstrou a eficácia dos procedimentos adotados para determinar os parâmetros de conformação por prensagem mecânica, resultando em corpos de prova com bom desempenho mecânico. Esses procedimentos podem servir como base para a determinação dos parâmetros de moldagem de outros materiais particulados, desde que as características específicas de cada material, como granulometria, plasticidade e composição química, sejam consideradas.

Os resultados obtidos evidenciam que as misturas binárias de argila e lodo de ETA atendem aos requisitos da NBR 15270-1 (ABNT, 2023) para absorção de água e resistência à compressão, qualificando-as para uso em componentes cerâmicos, como blocos e tijolos de alvenaria. A amostra com 100% de lodo de ETA, apesar de apresentar resistência à compressão dentro dos padrões estruturais, excede os limites de absorção de água, inviabilizando sua aplicação isolada. A pesquisa valida a incorporação de lodo de ETA em misturas cerâmicas, desde que em proporções adequadas, para produção de materiais em conformidade com as normas técnicas.

Portanto, a proporção do lodo de ETA recomendado é de até 15%, com um teor de umidade ótimo de 10,6%, preparado nas misturas moldadas com método de conformação prensagem mecânica uniaxial com carga máxima de compactação de 80KN e queimadas a 800°C para produzir material cerâmico com bom desempenho mecânico.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas algumas sugestões relevantes para dar continuidade às pesquisas nessa área:

- Analisar o efeito da calcinação do lodo de ETA (visando eliminar a matéria orgânica) na fabricação de materiais cerâmicos, com o objetivo de comparar as propriedades tecnológicas (como, a resistência mecânica, a porosidade e a absorção de água) dos materiais produzidos com o lodo de ETA calcinado e com o lodo de ETA seco em estufa;
- Verificar o efeito da temperatura de calcinação nas propriedades das cerâmicas produzidas por meio dos processos de conformação extrusão e prensagem a seco;
- Avaliar a durabilidade das cerâmicas produzidas;
- Testar o processo de extrusão para a confecção dos materiais cerâmicos compostos por argila e lodo de ETA.

## 6 REFERÊNCIAS

ACEVEDO, N. I. A.; ROCHA, M. C. G.; BERTOLINO, L. C. Determinação da área superficial específica e da porosidade de duas amostras de argilas provenientes da bacia de Taubaté - São Paulo. **Brazilian Applied Science Review**, v. 1, pág. 39-57, 2021. DOI: 10.34115/basrv5n1-004.

ACKAH, L. A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p. 1374, 2018. DOI: 10.3390/su10051374.

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). **Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha**: Subsídios para a Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva de Cerâmica Vermelha. ABID: Brasília, 2016. p. 265.

AGOSTINI, M. **A influência da variabilidade da geração do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades da cerâmica vermelha**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B.; SANT'ANNA, M. A. K.; ALMEIDA, K. M.; GIORI, A. J. N. **Processos de fabricação de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022. ISBN 978-65-5919-051-5.

AHMADI, M.; HAKIMI, B.; MAZAHERI, A.; MAHDI, K. Potential Use of Water Treatment Sludge as Partial Replacement for Clay in Eco-Friendly Fired Clay Bricks. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9389–9389, 2023. DOI: 10.3390/su15129389.

ALBERO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial – Parte I: O preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 5, pág. 23, 2000.

ALGAMAL, Y.; KHALIL, N. M.; SALEEM, Q. M. Usage of the sludge from water treatment plant in brick-making industry. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 53, n. 3, p. 504-510, 2018.

ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E.; ALMEIDA, C. S. M. Diagnóstico ambiental do setor de cerâmica vermelha na região de Oeiras (PI). **Revista em**

**Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 2, pág. 429-440, 2021. DOI:10.17765/2176-9168.2021v14n2e8001.

ALMEIDA, M. A. F. **Diagnóstico da indústria cerâmica vermelha, do município do Paudalho, no estado de Pernambuco**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

AL-RAWASHDEH, M.; ALZOUBI, A.; HANANDEH, S.; YOUSEF, I.; AL-NAWASEH, M. Performance of Mortar Incorporating Heat-Treated Drinking Water Treatment Sludge as a Silica-Sand Replacement. **Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 1639–1652, 2022.

AMORNPUNYAPAT, R.; PANYAKAPO, P.; PANYAKAPO, M. Development of lightweight concrete interlocking block panel with water treatment sludge and expanded metal ferrocement. **Engineering Journal**, v. 25, n. 1, p. 81–97, 2021.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P. S. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). In: **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Cleverson Vitorio Andreoli (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006. 1ª edição. Projeto PROSAB.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. São Paulo, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-3**: Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Dados do Setor**. 2023. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor>. Acesso em: 10 dezembro de 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Relatório Anual 2014**. Rio de Janeiro. ANICER, 2014.

\_\_\_\_\_. **Relatório Anual 2015**. Rio de Janeiro. ANICER, 2015.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007. DOI:10.1080/10643380600776239.

BACCELLI JÚNIOR, G. **Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Seridó - RN**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BANDIEIRA, M. **Avaliação da reciclagem de lodo de tratamento de água na produção de blocos de cerâmica vermelha**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

BANDIEIRA, M.; ZAT, T.; SCHUSTER, S. L.; JUSTEN, L. H.; WEIDE, H.; RODRÍGUEZ, E. D.. Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 4, 2021.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171-177, 2015. DOI: 10.1016/j.clay.2015.09.012.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, 2007.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 313/2002**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. 2002.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMARGO, C. N. O. **Avaliação do lodo amarelo de ETA para incorporação em cerâmica vermelha**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2016.

CHIANG, K. Y.; CHIEN, K. L.; HWANG, S. J. Study on the characteristics of Building bricks produced from reservoir sediment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 2–3, p. 499–504, 2008.

CIPRIANO, P. B.; REZENDE, R. T. O.; FERRAZ, A. V. Produção de cerâmica vermelha utilizando argila de mineração de gipsita e destruição de gesso. **Acta Brasiliensis**, v. 1, pág. 25-29, 2019. DOI: 10.22571/10.22571/2526-4338145.

COELHO, J. L. **Utilização do resíduo de beneficiamento mineral de uma rocha com espudomênio no desenvolvimento de fritas e esmaltes cerâmicos**. 2014.

Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETA's). In: **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Cleverson Vítório Andreoli (coordenador). Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 1ª edição. Projeto PROSAB.

CORDEIRO, J. S.; BARROSO, M. M.; ACHON, C. L. Resíduos de estações de tratamento de água e a saúde ambiental. **7th Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos — Energia dos Resíduos**, Anais, APESB e ISWA, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, Cód, v. 5, 2011.

COSTA, L. L. N.; MONTENEGRO, L. M. Responsabilidade socioambiental: um estudo no setor de cerâmica vermelha de Itabaiana - SE. **Amazônia, Organizações e Sustentabilidade**, v. 2, pág. 147-172, 2015. DOI: 10.17800/2238-8893/aos.v4n2p147-172.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1071-1080, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.094

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Vol. 2. São Carlos: RiMa, 2005.

DONDI, M.; RAIMONDO, M.; ZANELLI, C. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 96, p. 91–109, 2014. DOI: 10.1016/j.clay.2014.01.013.

DUAN, W.; ZHUGE, Y.; PHAM, P. N.; LIU, Y.; KITIPORNCHAI, S.. A ternary blended binder incorporating alum sludge to efficiently resist alkali-silica reaction of recycled glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 349, p. 131415–131415, 2022.

ERDOGMUS, E.; HARJA, M.; GENCEL, O.; SUTCU, M.; YARAS, A. New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102471, 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102471.

ERDOGMUS, E.; YARAS, A.; USTAOGU, A.; HEKIMOĞLU, G.; SARI, A.; GENÇEL, O.. Thermal performance analysis of novel foam concrete composites with PCM for energy storage and environmental benefits in buildings, **Energy and Buildings**, v. 296, 113413, 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: FIEMG, 2016.

FERREIRA, M. M. **Caracterização de argilas caulínicas do Quadrilátero Ferrífero muda seu potencial de aplicação na indústria de cerâmica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

FERREIRA, M. M.; VARAJÃO, A. F. D. C.; MORALES-CARRERA, A. M.; PERALTA-SÁNCHEZ, M. G.; COSTA, G. M. Transformações mineralógicas e cristaloquímicas decorrentes dos ensaios termais em argilas caulínicas ferruginosas. **Cerâmica**, v. 58, pág. 105-110, 2012.

FREITAS, C. S. R; PEREIRA, I. A. F. S.; PEREIRA, M. L. G; SIMÕES, T. C.R.; FERREIRA, A. A. L. Influência de diferentes processos de conformação nas características finais de produtos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 3, pág. 15, 2009.

FREITAS, M. C. **Avaliação de técnica de melhoria de solos colapsáveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

FREITAS, R. A. **Análise de misturas e caracterização de matéria-prima para a indústria da cerâmica vermelha**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

GODOY, L. G. GRAUPNER DE; R., ABRAHÃO B.; GARCEZ, M. R.; COSTA, E. B. DA; DA DALT, S.; ANDRADE, J. J. de O.. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 223, p. 939–950, 2019.

GOMES, C. F. **A argila “o que são e para que servem”**. Porto: Fundação Calouste Gulbenkian, dezembro de 1986.

GOMES, N. L. **Desenvolvimento e produção de compósitos de matriz cerâmica baseado em zircônia-titânia reforçado com óxido de terra-rara para revestimento do sistema de exaustão de turbina aeroespacial**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.032.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy, McGraw Hill Book Company**. 2. ed. New York, 1953.

GRIM, R.. E. **Applied Clay Mineralogy**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962. 422 p.

GUN'KO, V. M.; TUROV, V. V.; PAKHLOV, E. M.; KRUPSKA, T. V.; CHARMAS, B. Effect of water content on the characteristics of hydro-compacted nanosilica. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 45sou9, p. 171–178, 2018.

HE, Z.; XU, H.; HAN, X.; HUYNH, T.-P.; ASLANI, F.; SHI, J. Utilization of manganese-rich sludge in concrete: Mechanical, nanoscale characteristics and leaching behavior. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 70, p. 106359–106359, 2023.

HEINRICH, J. G.; GOMES, C. M. **Introduction to Ceramics Processing**. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 2014. 222 p.

HO, V.; ORBECIDO, A.; PROMENTILLA, M. A. Investigation on mixture design of one-part geopolymers from fly ash and water treatment sludge. **MATEC Web of Conferences**, 2018.

HUANG, C. H.; WANG, S. Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174–183, 2013.

IAMCHATURAPATR, J.; PIRIYAKUL, K. Strength and Noise Reduction of Geopolymeric Material Produced from Waste Sludge. **Key Engineering Materials**, 856. 354-359, 2020. DOI:10.4028/www.scientific.net/kem.856.354.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cadastro Central de Empresas – CEMPRE**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017**: abastecimento de água e esgotamento sanitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

KATTE, V.; SEUKEP, J. F. N; MOUNDOM, A; WOUATONG, A. S. L.; KAMGANG, M. The effect of partial replacement of waste water treatment sludge on the properties of burnt clay brick. International. **Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, p. 109-122, 2017.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V. Utilisation of drinking water treatment sludge for the manufacturing of ceramic products. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2017.

KIZINIEVIČ, O.; ŽURAUSKIENĖ, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464–473, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041.

KWEK, S. Y.; AWANG, H. Artificial lightweight aggregate from palm oil fuel ash (POFA) and water treatment waste. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, [s.l.:s.n.], 2018.

LEGLER, H. C. M.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. P.. Caracterização Comparativa de Fundentes para Emprego na Indústria Cerâmica. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 14, n. 4, 2009.

LI, D.; ZHUGE, Y.; LIU, Y.; PHAM, P.N.; ZHANG, C.; DUAN, W.; MA, X. Reuse of drinking water treatment sludge in mortar as substitutions of both fly ash and sand based on two treatment methods. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 277, 2021.

LIMA, D. P. **Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizada como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas**. 2016.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Fundação Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

LIU, X.; WANG, X.; WEI, X.; LUO, M.; CHEN, X.; ZHONG, L. Experimental study on the effects of water content on the compression characteristics and particle breakage of calcareous sand. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, 2024.

LUCINDO, V. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz cerâmica (CMC) à base de zircônia-titânia reforçada com óxido de terra rara para revestimento do sistema de exaustão de turbina do setor aeroespacial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: usos e aplicações**. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

MAGALHÃES, R. S.; SANTOS, R. M.; SILVA, A. A. M.; MARQUES, F. P.; GOMES, É. R. Propriedades e aplicações industriais de argilas do estado do Maranhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, pág. 82090-82108, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-425.

MAHANNA, H.; SALAH, H.; MANSOUR, A.; ELAREED, A.; ABADEL, A. A.; NEHDI, M. L.; TAHWIA, A. M. Eco-efficient reuse of alum-based water treatment sludge into structural sintering bricks. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03011, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03011.

MAIA, F. S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

MARCHIORI, L.; STUDART, A.; ALBUQUERQUE, A.; PAIS, L. A.; BOSCOV, M. E.; CAVALEIRO, V. Mechanical and Chemical Behaviour of Water Treatment Sludge and Soft Soil Mixtures for Liner Production. **The Open Civil Engineering Journal**, [s. l.], v. 16, n. 1, 2022. DOI: 10.2174/18741495-v16-e221115-2022-27.

MARGEM, J. I.. **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (E.T.A.) em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; ELICHE-QUESADA, L.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. S343–S348, 2012.

MARTINS, B. E. D. B. S. **Avaliação da influência do coagulante contido no lodo gerado na ETA em corpos cerâmicos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. Technical feasibility of the incorporation of rice husk ash, sludge from water treatment plant and wood ash in clay for ceramic coating. **REM - Revista Escola de Minas**, v. 67, n. 3, p. 279-283, 2014.

MEDEIROS, R. P. S.; DUTRA, J. P. F.; GRILO, A. E.; MARTINELLI, C. A.; PASKOCIMAS; D. A. MACEDO. Preparação de compósitos alumina-mulita de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulínica da Paraíba e hidróxido de alumínio. **Cerâmica**, vol. 62, no. 363, pp. 266–271, 2016. DOI: 10.1590/0366-69132016623631992.

MELLO, I. S. C.; MOTTA, J. F. M.; BEZERRA, M. S.; NESI, J. R.; LORETI JUNIOR, R. **Atlas de matérias-primas minerais cerâmicas do Nordeste brasileiro**. São Paulo: CPRM, 2011. 184 p.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture. **Geotechnical Special Publication**, [s.l.:s.n.]. p. 418–427, 2016.

MONTEIRO, N. B. **Características de lodos de estações de tratamento de água desidratadas por sistema geotêxtil**: estudo de caso. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J. I.; SÁNCHEZ, R.; VIEIRA, C. M. F. Incorporação de lodo residual de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1281-1287, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013.

MOTTA SOBRINHO, M. A.; TAVARES, R. G.; ARRUDA, V. C. M. de; CORREA, M. M.; PEREIRA, L. J. R. Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 761–771, 2019.

MORSELLI, L. B. G. A., CARMO, L. A. G. DO, QUADRO, M. S., & ANDREAZZA, R.. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, 18(5). DOI: 10.14808/sci.plena.2022.051701.

MULLER, E. A. **Avaliação do uso de lodos de estação de tratamento de água como matéria-prima na fabricação de tijolos cerâmicos**: estudo de caso – ETA Bolonha. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

MUÑOZ, P.; MORALES, M. P.; LETELIER, G. V.; M. A. G. Mendívil. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 241–252, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O. M.; CATAI, R. E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J. L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D. E. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 367–373, 2017.

NASCIMENTO, J. J. S.; LUNA, C. B. B.; COSTA, R. F.; BARBIERI, L. F. P.; BEZERRA, E. O. T. Evaluation of red clay and ball clay drying using transient three-dimensional mathematical modeling: volumetric shrinkage and moisture content. **Materials Research Express**, v. 6, n. 9, p. 095206, 2019.

NOR, M. A. M.; HAMED, A. S. A.; ALI, F. H.; KHIM, O. K. Properties and performance of water treatment sludge (wts)-clay bricks. **Jurnal Teknologi**, v. 77, n. 32, p. 83-93, 2015.

OLIVEIRA, E. A.; LEITE, J. C. Use of Clay Sludge Water Treatment Plant Sludge to Produce Ceramic Brick. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, v. 5, n. 12, p. 281-289, 2018. DOI: 10.22161/ijaers.5.12.39.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de eliminação (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, pág. 167-173, 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p. 324-330, 2004.

ORBECIDO, A.; HO, V.; HINODE, H.; KURNIAWAN, W.; NGUYEN, L.; PROMENTILLA, M. A. Characterization and acid resistance test of one-part geopolymer from fly ash and water treatment sludge. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 156, p. 05003–05003, 2018.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2000.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 54, pág. 63-76, 2008.

PEI LING, Y.; OOI, C.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Properties evaluation and fabrication of green clay reformulated from water sludge. **Ceramics International**, v. 44, n. 2, p. 1411– 1419, 2018.

PHAM, P.N.; DUAN, W.; ZHUGE, Y.; LIU, Y.; TORMO, I.E.S. Properties of mortar incorporating untreated and treated drinking water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 280, 2021.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. **Engineering News Record**, New York, v. 111, n. 9, p. 20-28, 1933.

QIN, J.; ZHU, H.; HE, Z.; YU, X.; SHI, J.; LU, J.; MA, C.; CHENG, Y. Recycling of water treatment sludge into magnesium potassium phosphate cement component by a combination of silica fume. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, p. 104308–104308, 2022.

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETA's. In: **Noções gerais e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Marco Antônio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 1999. 1ª edição. Projeto PROSAB.

REIS, A.; SOUZA, J.; PERINI, B. L. B.; UENO, O. K. Influência da adição de lodo, de uma estação de tratamento de água (ETA), nas propriedades mecânicas em cerâmica vermelha. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT**, 21. 2014, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá, 2014.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Edgar Blucher, 2001. 112 p.

RIES, H. **Clays**: occurrence, properties and uses. 3. ed. Wiley, 1928.

RODRIGUES, C. B. **Utilização de lodo de estação de tratamento de água como matéria-prima na produção de cerâmica vermelha**: efeitos da calcinação e moagem. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

RODRIGUES, L. P. **Preparação e caracterização de piso cerâmico vitrificado incorporado com dispersão de estação de tratamento de água**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

SACHS, L. L. B. **Projeto materiais de construção da região metropolitana de São Luís e entorno**. Teresina: CPRM, 2017.

SALES, A.; SOUZA; R. F.; SANTOS, N. W.; ZIMER, A. M.; ALMEIDA, F. C. R. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust:

Thermal properties and potential application. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, n. 12, p. 2446–2453, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.012.

SANTANA, J. E. **Estudo do lodo da ETA Agrestina Nova para adição em componentes cerâmicos e na fornecimento de argilas aniônicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SANTOS, C. V. P.; SILVA, A. R.; GUIMARÃES FILHO, M. A. S.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A. A. Índice de plasticidade e análise racional de argilas de Marabá (PA) para avaliação das zonas de extrusão. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 2, pág. 25, 2012.

SANTOS, G. M. **Estudo das variáveis de processamento de materiais primários da região do Crato - CE na fabricação de produtos cerâmicos por extrusão e por prensagem**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SANTOS, J. J. H. **Utilização do lodo gerado na ETA de Alvorada-RS na fabricação de blocos cerâmicos**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2016.

SANTOS, M. D. **Revisão sistemática da literatura com meta-análise sobre o lodo de estações de tratamento de água com avaliação do ciclo de vida em blocos cerâmicos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. v. 1. São Paulo: Edgar Blucher Ltda., 1989.

SCHWOB *et al.* Panorama do setor de cerâmica vermelha no Brasil. In: **Cerâmica Vermelha: Projeto EELA no Brasil**, p. 11-33, 2017. AGUIAR *et al.*. Processos de fabricação de cerâmica vermelha. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022. 53p. – (Série Tecnologia Ambiental; 118).

SEDDIK, A. M.; ABDEEN, A.; MOHAMED, A. S.; BAHAA E.. Thermal performance analysis of clay brick mixed with sludge and agriculture waste. **Construction and**

**Building Materials**, [S. l.], v. 344, p. 128267–128267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128267>.

SILVA, E. L. G.. **Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em corpos cerâmicos**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, São Luís, 2014.

SILVA, M. K. A. G.. **Potencial energético da madeira de clones de eucalipto implantados na região neotropical do Brasil e seu desempenho como biocombustível**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2022.

SILVA, W. B. C.; CORREIA, A. M. M. Análise da inovação no segmento da indústria de cerâmica vermelha: uma aplicação do radar da inovação. **Gestão & Regionalidade**, v. 115, pág. 130-151, 2021. DOI: 10.13037/gr.vol38n115.7568.

SILVEIRA, P. H. P. M.; ELTOM, A. E.; SANTOS, J. L.; DELAQUA, G. C. G; VIEIRA, C. M. F; JESUS, P. R. R.; SILVA, M. H. P.; GOMES, A. V. Addition of hematite as a sintering aid in alumina: effect of concentration on physical, microstructural and mechanical properties. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 21, 2024. DOI: 10.4322/2176-1523.20242978.

SIQUEIRA JÚNIOR, B. **Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água e estudo de reaproveitamento na indústria de cerâmica vermelha**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot-Plant Study. **Water Science Technology**. v. 30, n.8, pp. 159-168, 1994. DOI: 10.2166/wst.1994.0402.

SOARES, A. F. S.; CUNHA, A. B. L.; MACHADO, A. O. V.; LAGES, F. A. E.. Caracterização físicoquímica do lodo gerado nas ETAs e impactos ambientais associados ao lançamento em corpo d'água. In: **Seminário Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente, 8., / Simpósio de Engenharia Ambiental do Espírito Santo, 4.**, Vitória/ES, 2009.

SOUZA, J. S. **Mecânica dos solos**. NT Editora. Brasília: 2015. 188p.

SOUZA, R. B. **Desenvolvimento de elementos cerâmicos para uso em dispositivos de inspeção de dutos (PIGS)**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUZA, V. P., TOLEDO R., HOLANDA, J. N. F., VARGAS, H., FARIA JR, R. T. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Cerâmica**. 54, 351-355p, 2008.

SUTCU, M.; GENCEL, O.; ERDOGMUS, E.; KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V.; KARIMIPOUR, A.; VELASCO, P. M. Low cost and eco-friendly building materials derived from wastes: Combined effects of bottom ash and water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 324, p. 126669–126669, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126669>.

SVERGUZOVA, S. V.; SAPRONOVA, Z. A.; FOMINA, E. V. The Use of Water Treatment Sludge Containing Clay with Adsorbed Copper and Nickel Ions in the Production of Ceramic Bricks. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 753, n. 5, p. 052009–052009, 2020. DOI: 10.1088/1757-899x/753/5/052009.

TANTAWY, M. A.; MOHAMED, R. S. A. Middle Eocene clay from gaset Abu Khashier: geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture. **Applied Clay Science**, v. 138, p. 114-124, 2017. DOI:10.1016/j.clay.2017.01.005.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, 2011.

TAVARES, R. G.. **Problemas operacionais na indústria da água**: consumo excessivo de cloro na linha tronco de distribuição do sistema Gurjaú e lodos gerados pelas 6 maiores estações de tratamento de água da região metropolitana do Recife. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

TEIXEIRA, S. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A.; DIAS, F. C. Influência da data de coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas, nas suas propriedades tecnológicas. In: **Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society**, 48., 2004, Curitiba. Anais [...]. Curitiba, 2004. p. 1-12.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561-565, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006.

TEOH, W. P.; CHEE, S. Y.; HABIB, N. Z.; CHOK, V. S.; LEM, K. H.; LOOI, S. Y.; NG, C. A. Recycling of treated alum sludge and glycerine pitch in the production of eco-friendly roofing tiles: Physical properties, durability, and leachability. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 52, 2022.

TORRES, P.; HERNÁNDEZ, D.; PAREDES, D. Uso produtivo de lodos de plantas de tratamento de água potável na fabricação de ladrilhos cerâmicos. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 3, pág. 145-154, 2012.

TOYA, T.; NAKAMURA, A.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A.; OKADA, K. Glassceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. **Ceramics International**, v. 33, n. 4, p. 573–577, 2007.

VARGAS, D. A. **Comportamento mecânico de um solo tratado com estabilizantes químicos para pavimento de estrada florestal**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2021.

VIEIRA, A. F. F. **Estudo de casos de granulados para prensagem**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2020.

VIEIRA, S. C.; MARGEM, J. I.; MONTEIRO, S. N.. Mullitization kinetics from silica- and alumina-rich wastes. **Ceramics International**, v. 33, p. 59-66, 2008. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.07.015.

VITORINO, J. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de estação de tratamento de água em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 55, pág. 385-392, 2009.

VOANKA, K. C.; SILVA, L.; DOLIVEIRA, S. L. D.; KUASOSKI, M.; SOARES, S. Inovação voltada para a sustentabilidade em indústrias de cerâmica vermelha: uma revisão. **Revista Gestão e Análise**, v. 3, 2022. DOI: 10.12662/2359-618xregea.v11i3.p7-24.2022.

WAKAI, F.; OKUMA, G.; NISHIYAMA, N. Sintering mechanics of ceramics: a short review. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 4-13, 2019.

WENG, C. H.; LIN, D. F.; CHIANG, P. C.. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, v. 7, p. 679-685, 2003. DOI: 10.1016/S1093-0191(02)00037-0.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 96, p. 282–289, 2015.

YANG, J.; REN, Y.; CHEN, S.; ZHANG, Z.; PANG, H.; WANG, X.; LU, J. Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 365, p. 130027, 2023.

YATSENKO, N. D.; YATSENKO, E. A.; ZAKARLYUKA, S. G. Phase composition and properties of building ceramic as a function of the contents of calcium carbonates and iron oxides. **Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)**, v. 73, n. 9–10, p. 319–322, 2017.

YING, K. S.; AWANG, H.. Performance of Aggregate Incorporating Palm Oil Fuel Ash (Pofa) and Silt. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**. 2019, 9, 1218–1223.

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

ZACCARON, A.; GALATTO, S. L.; NANDI, V. S.; FERNANDES, P. Avaliação da resistência mecânica e absorção de água em cerâmica vermelha com incorporação de chamote. **Scientia Plena**, v. 2, pág. 1-12, 2018. DOI: 10.14808/sci.plena.2018.029901.

ZAMORA, R. M. R.; AYALA, F. E.; GARCIA, L. C.; MORENO A. D.; SCHOUWENAARS, R.. Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A, v. 43, n. 13, p. 1562–1568, 2008.