APLICAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE MATERIAL CERÂMICO - ESTADO DA ARTE

APPLICATION OF WATER TREATMENT PLANT SLUDGE IN CERAMIC MATERIAL PRODUCTION – STATE OF THE ART

Marcos David dos Santos[1]; Adolpho Guido de Araujo[2]; Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira[3]; Tacila Bertulino de Souza[4]; Arnaldo Manoel Pereira Carneiro[5].

[1]Mestre | marcos.david@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [2]Doutor | aguia@poli.br | UPE | Recife, Brasil; [3]Graduada | cartaxo.braga@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [4]Mestre | tacila.bertulino@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil; [5]Doutor | arnaldo.carneiro@ufpe.br | UFPE | Recife, Brasil.

Resumo:
O crescimento acelerado das atividades urbanas tem impulsionado a geração de grandes volumes de lodo das estações de tratamento de água (LETA), cuja disposição final representa um desafio ambiental, técnico e econômico. As limitações quanto à disponibilidade de áreas para aterros e os custos envolvidos no descarte desse resíduo têm incentivado o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis, entre as quais se destaca o reaproveitamento do LETA na construção civil, em particular, na produção de materiais cerâmicos. Este trabalho tem como objetivo discutir o estado da arte sobre a aplicação do LETA em materiais cerâmicos, reunindo e analisando os principais avanços científicos, lacunas de conhecimento e perspectivas futuras. A metodologia adotada é descritiva e qualitativa, com base em uma revisão da literatura científica publicada entre 1990 até setembro de 2023. As buscas se concentraram em estudos relevantes que exploram o uso do LETA em misturas com argila e/ou outros resíduos. Os resultados indicaram que a substituição parcial da argila por LETA, principalmente em proporções de até 20%, podem melhorar as propriedades dos materiais cerâmicos, destacando-se como uma alternativa viável tanto para a gestão de resíduos quanto para a produção de insumos na engenharia.

Palavras-chave:
Estado da arte; Lodo; Estação de tratamento de água; Cerâmicas.

Abstract:
The rapid expansion of urban activities has led to a significant increase in the generation of sludge from water treatment plants (WTPS), whose final disposal poses environmental, technical, and economic challenges. Limitations related to landfill availability and the high costs associated with waste disposal have driven the search for more sustainable alternatives, among which the reuse of WTPS in the construction industry stands out, particularly in ceramic material production. This study aims to discuss the state of the art regarding the application of WTPS in ceramics, compiling and analyzing major scientific advances, knowledge gaps, and future prospects. The adopted methodology is descriptive and qualitative, based on a literature review of scientific publications from 1990 to September 2023. The review focused on relevant studies that explore the use of WTPS in binary mixtures with clay and/or other residues. Results indicate that the partial replacement of clay with WTPS, especially in proportions up to 20%, can improve the properties of ceramic materials, highlighting it as a feasible alternative for both waste management and the supply of construction inputs.

Keywords:
State of the art; Sludge; Water treatment plant; Ceramics.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação ambiental e a busca por soluções sustentáveis na construção civil têm impulsionado o desenvolvimento de materiais alternativos baseados no reaproveitamento de resíduos industriais. Entre esses resíduos, o lodo proveniente das estações de tratamento de água (ETA) tem se destacado como uma matéria-prima promissora para a fabricação de materiais cerâmicos, em razão de sua composição química rica em óxidos metálicos, especialmente óxidos de ferro, alumínio, silício e cálcio (Kalembkiewicz e Chmielowski, 2012; Liu *et al*., 2012). O aproveitamento desse resíduo não apenas contribui para a conservação de recursos naturais e redução de impactos ambientais, como também pode agregar valor técnico aos produtos finais, conferindo-lhes propriedades funcionais e estéticas específicas.

O LETA é gerado em grandes quantidades nos processos de clarificação de águas subterrâneas e superficiais, sobretudo em regiões onde a concentração de ferro ultrapassa os limites estabelecidos por normas de potabilidade. Em países como a Lituânia, por exemplo, águas subterrâneas apresentam concentrações de ferro que podem atingir até 3,5 mg/L, muito acima do limite de 0,2 mg/L definido pelas normas sanitárias locais (Šerelis *et al*., 2017; Pundienė *et al*., 2013). O tratamento dessas águas, por meio de técnicas como a aeração e filtração, resulta na formação de um lodo rico em Fe_2O_3, que, apesar de não conter contaminantes tóxicos, ainda é amplamente descartado em aterros, contribuindo para o aumento dos passivos ambientais.

Diversos estudos têm demonstrado o potencial do LETA na fabricação de produtos cerâmicos, como blocos, tijolos e revestimentos. A adição desse resíduo às massas cerâmicas pode influenciar positivamente características como a coloração dos corpos após queima, além de propriedades físicas e mecânicas, como absorção de água, porosidade, retração linear e resistência à compressão (Liu *et al*., 2012; Pundienė *et al*., 2013; Šerelis *et al*., 2017). O teor ideal de adição varia conforme a composição do LETA e das matérias-primas argilosas, bem como a temperatura de queima, sendo recomendadas proporções entre 3% e 20%, com queimas variando de 880 °C a 1100 °C. Além disso, o ferro presente no LETA atua como pigmento natural, promovendo tons avermelhados mais intensos nos produtos cerâmicos (Pundienė *et al*., 2013).

No entanto, a utilização do LETA em proporções elevadas pode comprometer a integridade mecânica dos produtos, devido ao aumento da porosidade e à formação de fases amorfas, como a etringita, especialmente em baixas temperaturas de queima (Kalembkiewicz & Chmielowski, 2012). Por isso, alguns autores sugerem o uso de aditivos complementares, como resíduos de vidro moído, para melhorar a densificação e a resistência mecânica dos corpos cerâmicos (Šerelis *et al*., 2017). Essas estratégias evidenciam que o reaproveitamento do LETA exige não apenas conhecimento da composição química e mineralógica do resíduo, mas também uma abordagem integrada e sinérgica com outros resíduos industriais.

Apesar do avanço das pesquisas na área, ainda existem lacunas importantes no que diz respeito à influência dos parâmetros de queima na formação de fases responsáveis pela coloração e propriedades mecânicas dos produtos cerâmicos. A literatura carece de dados sistematizados sobre os mecanismos de transformação mineralógica do LETA durante o processo de queima, bem como sobre os limites técnicos e econômicos para sua aplicação em escala industrial (Liu *et al*., 2012). Portanto, há necessidade de mais estudos voltados à caracterização detalhada do LETA, à engenharia de formulações cerâmicas otimizadas e ao desempenho dos produtos resultantes frente às exigências normativas.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão do estado da arte sobre o uso do lodo de ETA na produção de materiais cerâmicos, destacando seus benefícios, limitações e perspectivas tecnológicas. A partir da análise de diferentes estudos e abordagens, buscando contribuir para o avanço do conhecimento científico e para a consolidação do LETA como insumo viável na indústria cerâmica.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada no artigo possui caráter descritivo e qualitativo, com foco na análise da produção acadêmica e científica relacionada aos usos e aplicações do lodo de estação de tratamento de água (ETA) na produção de cerâmicas. O artigo constitui um recorte de Santos (2024), na qual foi realizada uma revisão sistemática da literatura com maior amplitude, abrangendo meta-análise e avaliação do ciclo de vida. Neste artigo, busca-se apresentar e discutir o estado da arte especificamente voltado à aplicação do lodo de ETA na confecção de cerâmicas.

Para a elaboração do artigo, foram levantadas publicações recentes que abordam a temática, com foco nos principais estudos desenvolvidos sobre o assunto, a partir de trabalhos publicados em periódicos científicos, anais de congressos e afins. A abordagem adotada é de natureza bibliográfica, com o intuito de discutir, sistematizar e sintetizar os principais aspectos da produção científica sobre o tema, considerando diferentes contextos, abordagens e enfoques ao longo do tempo.

A busca bibliográfica foi conduzida na base de dados da Scopus, acessada por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A pesquisa abrangeu o período compreendido entre 1990 até setembro de 2023, tendo como ponto de partida a utilização da palavra-chave "*water treatment sludge*". Para refinar os resultados e assegurar a relevância dos estudos selecionados, aplicaram-se filtros específicos nos campos *Article Title, Abstract e Keywords*, o que permitiu concentrar a análise nos trabalhos mais diretamente relacionados ao tema. Os demais critérios de inclusão, exclusão e os filtros adicionais utilizados podem ser consultados em Santos (2024), onde se encontram detalhados de forma mais abrangente.

O Quadro 1 apresenta um resumo dos 16 documentos selecionados para compor este estado da arte, contendo informações relevantes sobre os autores, países de origem e fontes de publicação de cada estudo.

Número	Autores	Países	Fontes	Aplicação
1	Seddik *et al*. (2022)	Egito	Construction and Building Materials	Cerâmicas
2	Teoh *et al.* (2022)	Malásia	Journal of Building Engineering	
3	Gencel *et al*. (2022)	Turquia	Archives of Civil and Mechanical Engineering	
4	Sutcu *et al*. (2022)	Romênia	Construction and Building Materials	
5	Harja *et al.* (2022)	Turquia	Construction and Building Materials	
6	Erdogmus *et al.* (2021)	Turquia	Journal of Building Engineering	
7	Gencel *et al.* (2021)	Turquia	Construction and Building Materials	
8	Bandieira *et al*. (2021)	Brasil	Materials and Structures/Materiaux et Constructions	
9	Sverguzova; Sapronova; Fomina (2020)	Rússia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	
10	Starostina; Shevtsova; Starostina (2019)	Rússia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	
11	Kizinievič *et al.* (2018)	Lituânia	Journal of Material Cycles and Waste Management	
12	Kizinievič; Kizinievič (2017)	Lituânia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	
13	Mymrin *et al.* (2017)	Brasil	Journal of Cleaner Production	
14	Katte *et al.* (2017)	Namíbia	International Journal of Civil Engineering and Technology	
15	Nor *et al.* (2015)	Malásia	Jurnal Teknologi	
16	Kizinievič *et al.* (2013)	Lituânia	Construction and Building Materials	

Quadro 1: Resumo dos documentos selecionados para a revisão.
Fonte: Os autores (2025).

Em conjunto, esses trabalhos convergem para um objetivo comum: investigar a viabilidade do uso do lodo de ETA como material alternativo na produção de cerâmicas. As pesquisas analisadas abordam diferentes aspectos dessa aplicação, desde propriedades mecânicas e desempenho técnico até impactos ambientais, evidenciando os potenciais benefícios associados ao reaproveitamento sustentável desse resíduo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. MIX DE ARGILA E LODO DE ETA

Bandieira *et al*. (2021) realizaram uma avaliação sobre a utilização do lodo como substituto da argila, em proporções de 0%, 2%, 5%, 10% e 20%, em massa. Os tijolos produzidos com até 10% de LETA apresentaram resistência à compressão entre 14 e 16 MPa, valores compatíveis com os requisitos da ABNT NBR 15270-1 para blocos cerâmicos de alvenaria. A presença do lodo de ETA aumentou a porosidade, resultando em uma maior absorção de água. No entanto, mesmo com 20% de LETA, a absorção permaneceu abaixo dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15270-1, assegurando conformidade com os critérios técnicos vigentes.

Sverguzova, Sapronova e Fomina (2020) conduziram uma pesquisa sobre a utilização do lodo de ETA como adição na fabricação de tijolos cerâmicos. O LETA foi incorporado à argila em proporções variando de 0% a 100%, com incrementos de 10%. Observou-se que a inclusão do lodo resultou no aumento da resistência à compressão das amostras, elevando de 1,8 para 2,5 MPa. Entretando, a absorção de água aumentou com o lodo, sugerindo limitação para uso estrutural.

Kizinievič e Kizinievič (2017) investigaram o uso do lodo de ETA na produção de tijolos cerâmicos, incorporando-o à argila em proporções de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, em massa, e submetendo a mistura à queima a 1000 °C. Com 5% de lodo, os tijolos apresentaram boas propriedades físicas e mecânicas, atendendo às normas EN 772-1:2003 e EN 772-21:2011. Já com 60% de lodo, houve queda significativa na densidade e resistência, além de aumento da porosidade e absorção de água, sendo viável apenas para aplicações específicas de materiais porosos ou de menor carga. O lodo também funcionou como pigmento, conferindo coloração vermelha mais escura aos tijolos.

O estudo conduzido por Katte, Wouatong e Kamgang (2017) analisou os efeitos da substituição parcial do lodo ETA nas propriedades de tijolos cerâmicos. Foram criadas composições de argila-lodo, introduzindo de 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%, em massa, de lodo na argila. As amostras foram então calcinadas a 1050 °C por 2 horas. Os resultados apontaram que a adição de lodo de ETA causou eflorescência e que até 15% de lodo podem ser incorporados aos tijolos, atingindo uma resistência à compressão de 11,6 MPa, superando as prescrições da norma francesa NF P13-304. Além disso, os lixiviados obtidos dos tijolos triturados mostraram baixos níveis de metais pesados, indicando que esses foram imobilizados na matriz cerâmica durante o processo de calcinação.

Nor *et al*. (2015) investigaram o uso do lodo de ETA como material na fabricação de tijolos. O lodo de ETA foi incorporado à argila em proporções que variaram de 0% a 100%, com incrementos de 20%, em massa. As peças cerâmicas resultantes foram submetidas a um processo de calcinação a 600 ˚C por 2 horas e a 1000 ˚C por 3 horas. Os resultados indicaram que o tijolo contendo 100% de lodo alcançou a maior resistência à compressão, atingindo 17,123 N/mm². Conforme a norma malasiana MS 7.6:1972, os tijolos com teores de lodo entre 20% e 100% atendem aos requisitos gerais para utilização de dos tijolos de carga e blocos de vedação.

Kizinievič *et al*. (2013) avaliaram a incorporação de lodo de ETA em argilas para produção cerâmica, com proporções de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%, em massa, e queima entre 1000 °C e 1050 °C. Com 5% de lodo, observou-se aumento na densidade (5% a 14%), na resistência à compressão (36% a 50%) e na porosidade efetiva (19% a 45%). Já com 40% de lodo, houve redução na densidade (10% a 22%) e na resistência (43% a 49%), além de porosidade aumentada em cerca de 55%. O lodo, rico em Fe_2O_3, também atuou como pigmento, conferindo coloração vermelho mais escuro e intenso ao produto final.

Diversos estudos apontam que o LETA possui potencial para ser incorporado à argila na produção de materiais cerâmicos, apresentando impactos variados sobre as propriedades físico-mecânicas dos produtos finais. Por exemplo, Bandieira *et al*. (2021) e Katte *et al*. (2017) observaram que teores até 20% de LETA mantêm a resistência à compressão dentro de normas técnicas, mesmo com o aumento da porosidade e absorção de água. Assim como, Kizinievič e Kizinievič (2017) demonstraram que altos teores de LETA (acima de 40%) comprometem significativamente a densidade e a resistência mecânica, apesar de atuarem como pigmentos naturais. É possível observar uma correlação direta entre o aumento do teor de LETA e a elevação da porosidade e absorção de água, o que impacta negativamente a resistência mecânica. Contudo, essa tendência não é linear nem universal. Em Nor *et al*. (2015), a resistência máxima foi obtida com 100% de LETA, o que levanta questões sobre os efeitos sinérgicos de parâmetros como mineralogia do lodo, condições de queima e tipo de argila empregada.

3.2. MIX DE ARGILA, LODO DE ETA E OUTROS RESÍDUOS

Estudos recentes, como o de Seddik *et al*. (2022), apresentam uma análise do desempenho térmico de tijolos fabricados a partir da mistura de argila, lodo de ETA em diferentes proporções (35%, 40%, 45% e 50%) e cinza de bagaço de cana. As amostras foram avaliadas quanto à resistência mecânica, e todas as amostras apresentaram resistências compatíveis com os limites estabelecidos pela norma egípcia (*Egyptian Standard Specifications*). Os resultados experimentais revelaram que a condutividade térmica dos tijolos variou de 0,11 a 0,26 W/m.K, enquanto os tradicionais variaram de 0,33 a 1,6 W/m.K. Esses resultados sugerem que os tijolos produzidos a partir dessa mistura têm potencial para contribuir para a sustentabilidade na construção, reduzindo o consumo de energia, conforme demonstrado em simulações utilizando o software *EnergyPlus*.

Em uma pesquisa conduzida por Gencel *et al*. (2021), foram analisadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de tijolos, que foram confeccionados com lodo de ETA, vidro e mármore. Diferentes composições foram testadas, variando a quantidade do lodo de ETA de 70% a 100%, com adições de vidro variando de 3% a 15% e mármore em 15%. Os resultados indicaram que todos os tijolos fabricados apresentaram uma absorção de água situada na faixa de 5,3% a 12,6%, classificando-os como tijolos de primeira classe e resistentes a condições climáticas severas, de acordo com as normas ASTM C373-18 e ASTM C62-17. A condutividade térmica e porosidade dos tijolos foram observadas em 1,014 W/mK e 11%, respectivamente. Além disso, a resistência à compressão e a densidade aparente de todas as amostras de tijolos atendem às obrigações do código internacional de construção.

Starostina, Shevtsova e Starostina (2019) investigaram a produção de cerâmicas de parede, obtidas a partir da incorporação do lodo de ETA com substituições de 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20%, em massa, e derivados de óleo emulsionado. Durante a queima, a 950 °C, de amostras cerâmicas, com lodo de ETA observou-se a oxidação dos produtos de óleo emulsionado, resultando na formação de produtos gasosos como CO, H_2O e CO_2, tornando a estrutura dos materiais cerâmicos porosa. Com até 20% de adição de lodo, os produtos cerâmicos apresentam potencial de utilização como material de construção e isolante térmico em estruturas de fechamento, bem como na instalação de divisórias internas.

O estudo realizado por Kizinievič *et al*. (2018) abordou a utilização combinada de lodo de ETA e resíduos de vidro na fabricação de tijolos cerâmicos. O lodo de ETA foi integrado à argila em proporções variando de 40% a 60%, enquanto o vidro foi adicionado em uma faixa de 10% a 40%, em massa. A queima dessas peças cerâmicas ocorreu em temperaturas de 900 e 1000 °C. Os resultados obtidos indicaram que a inclusão do lodo de ETA e vidro como aditivos proporciona melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos produtos cerâmicos, resultando em um aumento na densidade (de 1035 a 1470 kg/m³) e na resistência à compressão (de 6 a 14,4 MPa). Quanto à absorção de água, os valores variam de cerca de 18,5% a 43,4%, o que pode estar dentro dos limites normativos dependendo da aplicação específica do tijolo.

Mymrin *et al*. (2017) desenvolveram cerâmicas a partir da substituição de até 60%, em massa, do lodo de ETA em conjunto com sais de neutralização ácida, resíduos de vidro e uma mistura de argila

e areia. O teor dos componentes nas misturas varia dentro das seguintes faixas: lodo de ETA entre 30% e 50%, em massa, vidro entre 15% e 25%, sais de neutralização ácida entre 15% e 25% e a mistura de argila-areia entre 15% e 30%. As amostras foram calcinadas a temperaturas de 900 °C, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C e 1100 °C por 6 horas. As cerâmicas desenvolvidas apresentaram resistência à flexão 2,5 vezes superior à das cerâmicas de referência. Quanto à absorção de água, todos os compósitos atingiram níveis entre 8% e 22%, conforme os limites estabelecidos pela ABNT NBR 15270-1. Além disso, os ensaios de espectroscopia de absorção atômica mostraram um baixo nível de contaminação das soluções lixiviadas em comparação aos requisitos estabelecidos pelas normas ambientais brasileiras.

A integração de outros resíduos à matriz cerâmica contendo LETA tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar ou compensar propriedades comprometidas. Seddik *et al*. (2022) e Gencel *et al*. (2021) demonstraram ganhos significativos na condutividade térmica e absorção de água com a introdução de cinza de bagaço de cana, vidro e mármore. Kizinievič *et al*. (2018) também apontaram que o vidro contribui para o aumento da densidade e resistência, atuando como fundente na matriz cerâmica. Esse grupo de estudos revela que a combinação sinérgica entre LETA e resíduos ricos em sílica e cálcio pode melhorar propriedades críticas dos produtos cerâmicos, inclusive sob altas proporções de substituição. No entanto, ainda faltam diretrizes padronizadas sobre proporções ideais e temperaturas de queima para cada tipo de resíduo complementar, o que dificulta a reprodutibilidade e a padronização industrial.

3.3. MIX DO LODO DE ETA E OUTROS RESÍDUOS

O estudo de Teoh *et al*. (2022) aborda a produção de telhas a partir da reciclagem do lodo de ETA e de um subproduto oleoquímico, conhecido como alcatrão de glicerina. O lodo de ETA foi calcinado a 300 °C por 2 horas e utilizado nas proporções de 15%, 20%, 25% e 30% na mistura. As telhas apresentaram densidade aparente na faixa de 320-1920 kg/m³, atenderam aos requisitos mínimos de resistência mecânica (1543,50-2674,33 N) para telhas de alto e médio perfil de acordo com a ASTM C1492–03 e tiveram uma baixa absorção de água de 4,32-4,87%, abaixo do limite máximo permitido de 6% conforme a ASTM C67–07.

Gencel *et al*. (2022) estudaram a produção de tijolos com lodo de ETA (80% a 100%) e resíduos de concreto (0% a 20%). Os tijolos com 5% a 20% de resíduos apresentaram densidade entre 1,72 e 2,10 g/cm³, condutividade térmica de 0,889 a 0,659 W/m·K e resistência à compressão de 8,9 a 20,2 MPa, atendendo à norma ASTM C67. A absorção de água variou de 7,9% a 17,5%, sendo os tijolos com até 15% de resíduos adequados para clima severo, conforme ASTM C67. A queima promoveu a formação de novas fases cristalinas, refletindo a interação entre os materiais.

O estudo de Sutcu *et al*. (2022) abordou os efeitos da combinação de lodo de ETA nas proporções de 60%, 70%, 80%, 90%, 95% e 100% e cinza de resíduos sólidos urbanos (0% a 40%) para a fabricação de tijolos. A incorporação de até 40%, em massa, das cinzas de resíduos sólidos apresentaram resistência à compressão superior ao limite mínimo estabelecido pela norma ASTM C62-08. No entanto, a densidade aparente e a resistência à compressão diminuíram em comparação com tijolos com 100% de lodo.

A pesquisa de Harja *et al*. (2022) investigou a produção e caracterização de tijolos sem argila, utilizando lodo de ETA nas proporções de 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 100% e cinza de madeira de carvalho (CMC) com substituições de 0% a 30% como matérias-primas. Os tijolos contendo 80%, em massa, de lodo de ETA e 20%, em massa, de CMC atenderam aos requisitos padrão para materiais de alvenaria de argila, de acordo com a norma turca. A absorção de água dos tijolos com até 10% de CMC ficou abaixo de 20%. No entanto, os tijolos com maior teor de CMC (30%) mostraram uma estrutura mais porosa e presença de microfissuras devido a diferenças na expansão térmica, contribuindo assim para a diminuição da resistência à compressão.

Erdogmus *et al*. (2021) produziram tijolos com lodo de ETA e resíduos de tijolos queimados (RTQ). As proporções de lodo de ETA foram de 25%, 40%, 55%, 70%, 85% e 100%, em massa, da mistura. Observou-se que os tijolos obtidos com mais de 75% e 60% de RTQ, respectivamente, tinham menor resistência à compressão em comparação com os tijolos obtidos apenas a partir do lodo de

ETA. Além disso, os tijolos produzidos com proporções de 55%, 70%, 85% e 100% de lodo apresentam uma absorção de água menor que 20%, adequando-se às especificações para tijolos de primeira e segunda classe, conforme ASTM C373-88.

O uso do LETA em formulações isentas de argila, como as telhas de Teoh *et al*. (2022) ou os tijolos de Harja *et al*. (2022), expande sua aplicabilidade para sistemas alternativos. Essas abordagens, embora inovadoras, revelam desafios técnicos como baixa densidade, porosidade elevada e presença de microfissuras, especialmente quando há incompatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos. Apesar disso, estudos como o de Sutcu *et al*. (2022) demonstram que a adição controlada de resíduos sólidos urbanos pode mitigar essas limitações. Ainda assim, há escassez de dados sobre o desempenho a longo prazo e a durabilidade desses materiais em condições reais de uso, o que constitui uma lacuna relevante para a literatura.

3.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

As características químicas do LETA são fundamentais para avaliar sua viabilidade como material para a produção de cerâmicas. Esses atributos influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, durabilidade, interações com outros materiais, reatividade com os componentes químicos e conformidade com normas ambientais. Assim, a compreensão da composição química do LETA é essencial para otimizar seu uso, garantindo eficiência, sustentabilidade e aderência aos padrões da indústria.

Diversos estudos foram identificados na revisão bibliográfica com foco na caracterização química do LETA, especialmente por meio da análise de sua composição em óxidos. Entre os dezesseis trabalhos selecionados no Quadro 1, sete apresentaram esse tipo de caracterização e estão organizados na Tabela 1. Nessa tabela, os valores sublinhados correspondem aos óxidos de maior concentração absoluta entre todos os estudos analisados, enquanto os destacados em negrito representam os três principais óxidos presentes em cada estudo individual.

Área	Autores	Local	Países	SiO_2	$Al2O_3$	$Fe2O_3$	CaO	K_2O	MgO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	Outros	PF
Cerâmicas	Seddik *et al*. (2022)	Beni-Suef	Egito	**64,48**	**16,50**	**3,43**	2,81	0,69	3,15	2,04	0,38	0,82	0,85	4,85
	Teoh *et al*. (2022)	Pulau Indah	Malásia	**36,38**	**19,74**	2,34	**2,83**	0,43	0,24	0,14	0,35	0,18	1,52	62,93
	Gencel *et al*. (2022); Sutcu *et al*. (2022); Harja *et al*. (2022); Marchiori *et al*. (2022); Batista dos Santos *et al*. (2021); Erdogmus *et al*. (2021); Gencel et al. (2021)	Bartin	Turquia	**45,47**	**20,41**	**7,94**	5,19	1,20	1,58	0,93	0,18	0,18	0,36	16,50
	Bandieira *et al*. (2021)	-	Brasil	**42,36**	**22,70**	**10,64**	0,57	1,40	0,36	-	0,29	1,07	0,92	19,69
	Kizinievič *et al*. (2018)	-	Lituânia	**10,90**	1,34	**68,65**	8,23	-	0,61	-	**9,39**	-	0,88	-
	Mymrin *et al*. (2017)	Paraná	Brasil	**17,01**	**24,46**	**13,00**	0,30	0,18	0,15	0,02	0,44	0,40	3,81	39,77
	Katte *et al*. (2017)	Etoa-Meki	Camarões	**54,94**	**23,41**	**4,79**	0,49	0,47	0,90	0,24	0,16	1,85	0,17	10,52

Tabela 2: Composição química em óxidos dos lodos de ETAs utilizados em cerâmicas.
Fonte: Os autores (2025).

A composição química do LETA apresenta uma ampla variação, influenciada por fatores como diferenças regionais, tratamentos empregados e a natureza das águas brutas. Os três principais

óxidos encontrados com maior frequência nos estudos são a sílica (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). A sílica se destaca em 5 dos 7 estudos, com concentrações particularmente altas nos estudos de Seddik *et al*. (2022) e Katte *et al*. (2017), o que é relevante, pois a sílica é um componente chave na formação de fases vítreas e mullita em cerâmicas. O óxido de alumínio também se destaca, aparecendo entre os três principais em 6 estudos, com valores superiores a 22%, sendo importante para a formação de fases refratárias. O óxido de ferro, com destaque para o estudo de Kizinevič *et al*. (2018), acaba sendo relevante para a coloração em cerâmicas pigmentadas, embora possa comprometer a resistência mecânica se não for bem balanceado.

A diversidade geoquímica dos resíduos também é notável. Estudos realizados no Egito e em Camarões mostram que o lodo de ETA rico em sílica e com baixos teores de ferro, é ideal para massas cerâmicas com baixa deformação e coloração clara. Na Malásia, o LETA apresenta alto valor de perda ao fogo (PF), indicando uma alta fração orgânica ou compostos voláteis ou carbonatados. Na Lituânia, por outro lado, a altíssima concentração de Fe_2O_3 e CaO sugere que o material se assemelha mais a uma lama férrica calcária, sendo necessário cuidado no seu uso devido ao risco de vitrificação prematura e comprometimento da resistência mecânica.

Em relação aos óxidos em menores proporções, como CaO e MgO, observa-se que eles influenciam a formação de fases vítreas e podem reduzir a temperatura de sinterização. Já os óxidos Na_2O e K_2O atuam como fundentes, estando presentes em concentrações baixas na maioria dos casos. Óxidos como TiO_2 e P_2O_5 estão presentes na maioria dos estudos também em quantidades menores, o TiO_2 pode influenciar aspectos relacionados a coloração e a absorção de radiação, enquanto que o P_2O_5 quando encontrados em elevadas quantidades, pode prejudicar à resistência ao formar fases amorfas.

Os valores de PF dos LETAs analisados variam amplamente, o que tem implicações importantes para sua aplicação cerâmica. Altos valores de PF indicam maior conteúdo orgânico ou carbonatos, o que pode afetar a retração e a formação de poros, exigindo tratamentos térmicos mais controlados. A variabilidade composicional entre os LETAs destaca a necessidade de uma abordagem cuidadosa na escolha de cada tipo de resíduo, considerando suas características específicas para aplicações cerâmicas.

4. CONCLUSÃO

Observa-se que a substituição parcial da argila por lodo de ETA, em diferentes proporções, impacta positivamente as propriedades dos tijolos cerâmicos, especialmente nas menores dosagens (até 20%). Nesse intervalo, a resistência à compressão se manteve dentro dos padrões normativos, sendo que alguns estudos relataram até mesmo ganhos nessa propriedade com a adição do lodo. No entanto, o aumento da proporção de lodo de ETA também resultou em elevação da porosidade, o que contribuiu para maior absorção de água, principalmente nas formulações com altos teores, podendo comprometer a durabilidade do material.

Em relação ao comportamento térmico, diversos estudos relataram melhorias significativas, com destaque para a redução da condutividade térmica, o que favorece a sustentabilidade ao diminuir o consumo energético em edificações. Quando associado a outros resíduos, como cinza de bagaço de cana, vidro ou concreto reciclado, o LETA contribuiu para o aprimoramento do desempenho térmico e mecânico dos tijolos, evidenciando ganhos em densidade e resistência à compressão. Por outro lado, a incorporação de materiais como alcatrão de glicerina e cinzas de resíduos sólidos urbanos demonstrou efeitos adversos nas propriedades mecânicas, indicando a necessidade de ajustes nas formulações e no controle dos insumos utilizados.

A caracterização química do lodo de ETA revelou a predominância de óxidos de sílica, alumínio e ferro, que influenciam diretamente o comportamento cerâmico dos corpos de prova, desde a formação de fases vítreas até a pigmentação do material. Lodos com altos teores de sílica e alumínio são mais adequados para a produção de cerâmicas com maior resistência e menor

porosidade, enquanto aqueles com elevados níveis de ferro podem atuar como pigmentos naturais, desde que em concentrações controladas. Ademais, lodos com elevada perda ao fogo (PF), atribuída à presença de carbonatos ou matéria orgânica, demandam cuidados específicos durante a queima, a fim de evitar defeitos como deformações e porosidade excessiva.

Do ponto de vista da viabilidade técnica, os tijolos fabricados com LETA mostraram-se compatíveis com os requisitos normativos de resistência mecânica e absorção de água, especialmente quando a substituição não excede 20%. Contudo, para aplicações estruturais, o uso de proporções elevadas de lodo deve ser evitado, uma vez que pode comprometer o desempenho final do produto. A análise detalhada da composição química do LETA, aliada à adequação das formulações e condições de processamento, é fundamental para garantir a produção de materiais cerâmicos reciclados com qualidade, desempenho e sustentabilidade, viabilizando sua aplicação segura na construção civil.

Apesar dos avanços recentes, a utilização do LETA em materiais cerâmicos ainda apresenta lacunas relevantes que limitam sua adoção em escala industrial. A escassez de estudos sobre a variabilidade composicional do LETA, os efeitos do pré-tratamento e granulometria, bem como a falta de investigações sobre durabilidade e impactos ambientais, dificultam a replicabilidade dos resultados e a padronização de processos. Além disso, a ausência de metodologias consolidadas para formulação, conformação e queima restringe a criação de parâmetros técnicos confiáveis para a indústria cerâmica.

Nesse cenário, é imprescindível o avanço de pesquisas integradas que considerem múltiplas variáveis operacionais, com ênfase na caracterização sistemática do lodo de ETA oriundo de diferentes fontes. Estudos de validação em escala real, simulações computacionais de desempenho térmico e estrutural, análises de ciclo de vida e o desenvolvimento de normas técnicas específicas devem ser priorizados. Esses esforços são essenciais para consolidar o uso do LETA como uma alternativa sustentável, segura e tecnicamente viável, alinhada às diretrizes da economia circular e às exigências da construção civil contemporânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDIEIRA, M. *et al*. 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.

ERDOGMUS, E. *et al*. New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. **Journal of Building Engineering**, v. 42, 2021.

GENCEL, O. *et al*. Manufacturing of fired bricks derived from wastes: utilization of water treatment sludge and concrete demolition waste. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 22, n. 2, 2022.

GENCEL, O.; KAZMI, S.M.S.; MUNIR, M.J.; SUTCU, M.; ERDOGMUS, E.; YARAS, A. Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study. **Construction and Building Materials**, v. 298, 2021.

HARJA, M. *et al*. Production and characterization of natural clay-free green building brick materials using water treatment sludge and oak wood ash. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 22, n. 2, 2022.

KALEMBKIEWICZ, J.; CHMIELOWSKI, K. Influence of hydrothermal treatment on the chemical composition of water treatment sludge and the release of heavy metals. **Journal of Environmental Management**, London, v. 110, p. 9–15, 2012.

KATTE, V.Y. *et al*. 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, n. 6, p. 567–584, 2017.

KIZINIEVIČ, O. *et al*. Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p. 1228–1238, 2018.

KIZINIEVIČ, O. *et al*. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464–473, 2013.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V. **Utilisation of drinking water treatment sludge for the manufacturing of ceramic products**. 2017, [S.l: s.n.], 2017.

LIU, Y.; ZHANG, N.; JIN, Z.; SHI, C. Characterization and potential utilization of water treatment sludge in bricks. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 33, p. 378–384, 2012.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O.M.; CATAI, R.E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J.L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D.E.; IZZO, R.L.S. 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.

NOR, M.A.M. *et al*. Properties and performance of water treatment sludge (WTS)-clay bricks. **Jurnal Teknologi**, v. 77, n. 32, p. 83–93, 2015.

PUNDIENĖ, I.; PAKŠTAS, V.; VAITKEVIČIUS, V.; KIGELIS, R.; BOGDEVIČIUS, M. The influence of water treatment sludge additive on the properties of ceramic products. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 41, p. 532–540, 2013.

SANTOS, M. D. dos. **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.

SEDDIK HASSAN, A.M.S. *et al*. Thermal performance analysis of clay brick mixed with sludge and agriculture waste. **Construction and Building Materials**, v. 344, 2022.

ŠERELIS, E.; STONYS, R.; PUNDZIENĖ, I.; VAITKEVIČIUS, V.; SKIRGAILIS, M. Utilization of water treatment sludge and glass waste in the production of ceramic products. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 19, p. 1440–1450, 2017.

STAROSTINA, I.V.; SHEVTSOVA, R.G.; STAROSTINA, Y.L. **Application of oil-products-containing water treatment sludge in wall ceramics production**. 2019, [S.l: s.n.], 2019.

SUTCU, M. *et al*. Low cost and eco-friendly building materials derived from wastes: Combined effects of bottom ash and water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 324, 2022.

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**. 2020, [S.l: s.n.], 2020.

TEOH, W.P. *et al*. 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**, v. 52, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC), a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e a Companha Pernambucana de Saneamento (COMPESA).