



PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS**

**LAVRAS-MG
2025**

PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO
DE TIJOLOS ECOLÓGICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração Saneamento e Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro

Orientador

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Coorientador

**LAVRAS-MG
2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Barros, Priscila Carolaine.

Uso de lodo de estação de tratamento de água para a produção de tijolos ecológicos/
Priscila Carolaine Barros. - 2025.

110 p. : il.

Orientador: André Geraldo Cornélio Ribeiro

Coorientador: Eduardo Souza Cândido

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Lodo de ETA. 2. Pozolana. 3. Tijolos solo-cimento. 4. Construção civil. I.
Geraldo Cornélio Ribeiro, André. II. Souza Cândido, Eduardo. III. Universidade
Federal de Lavras. IV. Título.

PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO
DE TIJOLOS ECOLÓGICOS**

**USE OF WATER TREATMENT PLANT SLUDGE FOR THE PRODUCTION OF
ECO-FRIENDLY BRICKS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração Saneamento e Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 31 de março de 2025.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro UFLA

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido UFLA

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes UFLA

Prof. Dr. Gustavo Henrique Nalon UFLA

Prof. Dr. Alan Pereira Vilela UNILAVRAS

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro

Orientador

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Coorientador

LAVRAS-MG

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela presença constante em minha vida, guiando meus passos e dando conforto nos momentos de dificuldades.

Aos meus pais Carlos Giovane e Renilda, meu mais profundo reconhecimento por serem meu maior exemplo de força e determinação. Seu amor incondicional e apoio incansável foram fundamentais em cada etapa desta jornada. Cada conquista alcançada também pertence a vocês, pelo esforço e dedicação em me ajudar a transformar sonhos em realidade.

Ao meu orientador, professor André Ribeiro, e ao meu coorientador, professor Eduardo Cândido, expresso minha gratidão pelos ensinamentos, dedicação e valiosa contribuição para a realização deste trabalho. Seu apoio foi essencial para o desenvolvimento deste estudo.

À Universidade Federal de Lavras, pela excelência acadêmica, infraestrutura e ambiente propício à pesquisa. Agradeço também ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela dedicação em proporcionar uma formação de qualidade.

Aos meus amigos de vida, Fabiana e Tauan, que sempre me incentivaram a alcançar meus objetivos. Obrigada por estarem ao meu lado durante essa caminhada, compartilhando desafios e conquistas, e tornando esse percurso ainda mais significativo.

Por fim, estendo meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso deste trabalho. Este é um momento significativo na minha jornada acadêmica, e cada um de vocês desempenhou uma participação importante nesse processo, e sou profundamente grata por isso.

“O Senhor é a minha luz e a minha salvação; de que terei temor?” (Salmo 27-1)

RESUMO

A reutilização do lodo proveniente de estações de tratamento de água como insumo na construção civil representa uma estratégia viável para reduzir impactos ambientais, agregar valor ao resíduo, o qual é de difícil destinação e fomenta práticas sustentáveis no setor. Neste contexto, o presente estudo investigou a viabilidade da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), tratado termicamente a 650°C (LETA650) como substituto parcial do cimento *Portland* na fabricação de tijolos ecológicos. A pesquisa realizou as caracterizações físicas, químicas e mineralógicas do lodo e do solo utilizados, bem como, a avaliação experimental de composições com diferentes teores de substituição do cimento por LETA (0, 5, 10, 20 e 40%). Os tijolos produzidos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, perda de massa e absorção de água. Um planejamento experimental com abordagem estatística fatorial foi aplicado para otimização das proporções, culminando na definição da formulação com melhor desempenho. A composição ideal foi analisada quanto a parâmetros de durabilidade, condutividade térmica e comportamento morfológico, além das propriedades mecânicas, físicas, químicas e mineralógicas. Os resultados indicaram que o LETA apresenta características de solo silto-arenoso de baixa plasticidade e perda de massa térmica total de 34,51% até 1000 °C. A análise termogravimétrica e difração de raios X demonstraram a presença de atividade pozolânica a partir de 100°C, com pico de reatividade aos 650 °C, evidenciado pelo índice de atividade pozolânica (IAP) de 88,5%. O LETA apresentou um teor de 81,39% de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), atendendo aos requisitos de composição química normativos para pozolanas. Entre os ensaios realizados, a substituição de 5% do cimento por LETA650 apresentou melhor desempenho mecânico, com melhoria na redução de absorção de água e perda de massa. Substituições de até 10% não impactou significativamente as características dos tijolos. A análise estatística confirmou a capacidade preditiva do modelo matemático proposto. Os achados evidenciam que a adição de LETA calcinado em tijolos solo-cimento constitui uma solução tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, favorecendo a valorização de resíduos e a redução da demanda por cimento convencional na indústria da construção civil.

Palavras-chave: Lodo de ETA; pozolana; tijolos solo-cimento; sustentabilidade e construção civil.

ABSTRACT

The reuse of sludge from water treatment plants as an input in civil construction represents a promising strategy to reduce environmental impacts, add value to waste that is difficult to dispose of, and promote sustainable practices in the sector. In this context, this study investigated the feasibility of incorporating sludge from a Water Treatment Plant (LETA), heat-treated at 650°C (LETA650), as a partial substitute for Portland cement in the manufacture of ecological bricks. The research involved the physical, chemical, and mineralogical characterization of the sludge and soil used, as well as the experimental evaluation of compositions with different levels of cement replacement by LETA (0, 5, 10, 20, and 40%). The bricks produced were subjected to compressive strength, mass loss, and water absorption tests. An experimental design with a factorial statistical approach was applied to optimize the proportions, culminating in the definition of the formulation with the best performance. The ideal composition was analyzed for durability, thermal conductivity, and morphological behavior, in addition to mechanical, physical, chemical, and mineralogical properties. The results indicated that LETA presents characteristics of a silty-sandy soil with low plasticity and total thermal mass loss of 34.51% up to 1000 °C. Thermogravimetric analysis and X-ray diffraction demonstrated the presence of pozzolanic activity from 100 °C, with a peak of reactivity at 650 °C, evidenced by the pozzolanic activity index (PAI) of 88.5%. LETA presented a content of 81.39% of oxides (SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3), meeting the normative chemical composition requirements for pozzolans. Among the tests performed, the replacement of 5% of the cement by LETA650 presented better mechanical performance, with improved reduction in water absorption and mass loss. Substitutions of up to 10% did not significantly impact the brick characteristics. Statistical analysis confirmed the predictive capacity of the proposed mathematical model. The findings show that the addition of calcined LETA to soil-cement bricks constitutes a technically viable and environmentally advantageous solution, favoring the valorization of waste and reducing the demand for conventional cement in the construction industry.

Keywords: Water Treatment Plant Sludge; pozzolan; soil-cement bricks; sustainability; construction industry.

INDICADORES DE IMPACTO

Este estudo destaca um potencial significativo para aumentar a sustentabilidade ambiental e promover uma economia circular, através do reaproveitamento de resíduos. A reutilização de resíduos é uma estratégia essencial da economia circular, que visa manter os materiais em uso por mais tempo, reduzindo a geração de resíduos e os impactos ambientais. Essa abordagem também promove o desenvolvimento econômico e está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente aqueles relacionados à Água Potável, e Saneamento e Cidades e Comunidades Sustentáveis, incentivando práticas mais sustentáveis. Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso do lodo de estação de tratamento de água (LETA) como substituto parcial do cimento *Portland* na produção de tijolos ecológicos. O estudo reforça a importância da valorização de subprodutos industriais e urbanos, reduzindo a necessidade de extração de matérias-primas e, consequentemente, minimizando os impactos ambientais associados. A incorporação de resíduos na produção de tijolos ecológicos não apenas promove uma destinação mais eficiente desses materiais, reduzindo o volume de resíduos encaminhados para aterros sanitários, mas também mitiga a emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂. Além disso, os resultados demonstram a viabilidade da abordagem proposta para alinhar desenvolvimento econômico, responsabilidade ambiental e bem-estar social, contribuindo para um modelo produtivo mais sustentável e resiliente.

IMPACT INDICATORS

This study highlights the significant potential to enhance environmental sustainability and promote a circular economy by enabling the reuse of waste materials. Waste reutilization is a crucial strategy within the circular economy framework, which aims to extend the lifespan of materials, reduce waste generation, and mitigate environmental impacts. This approach also supports economic development and aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those focused on Clean Water and Sanitation, as well as Sustainable Cities and Communities by encouraging more sustainable practices. The primary objective of this research was to evaluate the technical and environmental feasibility of using water treatment plant sludge (WTPS) as a partial substitute for Portland cement in the production of eco-friendly bricks. The study emphasizes the importance of valorizing industrial and urban by-products. This not only reduces the need for raw material extraction but also minimizes associated environmental impacts. Incorporating waste into the production of eco-bricks ensures more efficient disposal, decreases the volume of waste sent to landfills, and contributes to the reduction of greenhouse gas emissions, such as CO₂. Furthermore, the findings confirm the viability of this approach in balancing economic development, environmental responsibility, and social well-being, thereby supporting a more sustainable and resilient production model.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	14
1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.1 Geração de resíduos na construção civil.....	19
2.1.2 Aplicação de resíduos na construção civil	20
2.2 Pozolanas	23
2.3 Substituição de cimento por materiais pozolânicos	25
2.4 Estação de Tratamento de Água (ETA).....	26
2.4.1 Lodo de estação de tratamento de água (LETA)	28
2.4.2 Reaproveitamento do LETA na construção civil.....	30
2.5 Tijolos ecológicos	32
2.5.1 Composição do tijolo ecológico	34
2.5.2 Adição de resíduos na produção de tijolos ecológicos	36
REFERÊNCIAS	39
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	48
ARTIGO 1 – Caracterização do lodo de estação de tratamento de água (LETA) para substituição do cimento <i>Portland</i>	48
RESUMO	49
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS	53
2.1 Caracterização do LETA quanto ao seu potencial pozolânico.....	53
2.1.1 Preparação do LETA	53
2.1.2 Determinação da atividade pozolânica do LETA.....	55
2.1.3 Teste de inibição do LETA	56
2.2 Caracterização física e classificação geotécnica do LETA.....	57
2.3 Caracterização química e mineralógica do LETA	57
2.3.1 Fluorescência de Raio X (FRX).....	57

2.3.2 Difração de raio-X (DRX).....	58
2.3.3 Termogravimetria (TGA)	58
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.1 Avaliação da pozolanicidade do LETA.....	59
3.1.1 Método de Chapelle modificado e desempenho com cimento <i>Portland</i> 28 dias	59
3.1.2 Análise de aptidão.....	60
3.2 Caracterização física e classificação geotécnica LETA	62
3.2.1 Análise física do LETA	62
3.3 Análise química e mineralógica do LETA.....	65
4 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS	70
ARTIGO 2 – Tijolos ecológicos produzidos com lodo de estação de tratamento de água (LETA) em substituição parcial ao cimento <i>Portland</i>	73
RESUMO.....	74
1 INTRODUÇÃO	75
2 MATERIAL E MÉTODOS	78
2.1 Material	78
2.2 Caracterização física e classificação geotécnica do solo.....	79
2.3 Caracterização química e mineralógica do solo	79
2.3.1 Fluorescência de Raio X (FRX).....	80
2.3.2 Difração de raio-X (DRX).....	80
2.4 Planejamento experimental para a produção de tijolos ecológicos	80
2.4.1 Estudo de misturas	80
2.4.2 Produção dos tijolos ecológicos	81
2.5 Densidade dos tijolos ecológicos	83
2.6 Ensaio de determinação das variáveis de resposta da composição da mistura ótima	83

2.6.1 Absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão	83
2.6.2 Análise estatística: determinação da composição ótima	84
2.7 Análise estatística: avaliação dos resultados das variáveis respostas e da mistura ótima	85
2.8 Ensaio de caracterização da mistura ótima	85
2.8.1 Caracterização física e mecânica.....	85
2.8.2 Caracterização química, mineralógica, morfológica e térmica	85
2.8.2.1 Fluorescência de Raio X (FRX).....	86
2.8.2.2 Difração de raio-X (DRX).....	86
2.8.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	86
2.8.2.4 Condutividade térmica.....	86
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
3.1 Caracterização física e classificação geotécnica solo	88
3.2 Análise química e mineralógica do solo.....	90
3.3 Análises das misturas: obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima	92
3.4 Densidade dos tijolos ecológicos	93
3.5 Análise tecnológica das variáveis resposta para obtenção da composição da mistura ótima	93
3.5.1 Absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão	93
3.5.2 Otimização das propriedades físicas e mecânicas analisadas: mistura ótima	97
3.6 Caracterização da mistura ótima.....	98
3.6.1 Densidade, absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade	98
3.6.2 Análise das propriedades químicas, mineralógicas, microestruturais e térmicas.	100
4 CONCLUSÃO.....	104
REFERÊNCIAS	105
TERCEIRA PARTE	109
1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109

1.1 Considerações gerais	109
1.2 Contribuições do trabalho	110

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O aumento do crescimento demográfico e da industrialização, contribuiu com a maior geração de resíduos, principalmente em áreas urbanas. Um exemplo, é o lodo gerado pelas Estações de tratamento de água (LETA), o qual, é produzido em grandes quantidades diariamente e seu manejo tem se tornado um problema de preocupação global. O LETA é produzido durante o processo de tratamento de água convencional na lavagem dos decantadores e filtros. Esse resíduo é geralmente disposto de maneira inadequada no meio ambiente, o que pode levar a sérios impactos ambientais e a saúde humana.

No Brasil, a destinação final do LETA ainda é um desafio, com poucas estações adotando práticas ambientalmente adequadas. Estudos indicam que grande parte desse resíduo é descartada de forma inadequada, muitas vezes em corpos hídricos próximos às estações, o que pode comprometer a qualidade da água e gerar impactos ambientais e à saúde pública (Scapin, 2021). Além disso, a gestão desse resíduo deve atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e às normas do CONAMA, que estabelecem critérios para a disposição segura de efluentes e resíduos industriais.

Nesse contexto, aumentou nas últimas décadas os estudos referentes ao reaproveitamento do LETA, como a incorporação em produtos para construção civil (Fernandez *et al.*, 2018; Agra *et al.*, 2023; Gomes *et al.*, 2021), aplicação na geotecnia (Scapin, 2021; Boscov; Tsugawa; Montalvan, 2021; Montalvan, 2021), produção de cimento (Gomes *et al.*, 2020; He *et al.*, 2021) remediação de locais contaminados (Souza *et al.*, 2019), entre outros.

A reutilização de resíduos configura-se como uma estratégia fundamental dentro do conceito de economia circular, um modelo econômico que busca a manutenção dos materiais em um ciclo contínuo, minimizando a geração de resíduos (Sariatli, 2017). Esse modelo visa prolongar ao máximo a vida útil dos materiais na economia, reduzindo a pegada ambiental e, simultaneamente, promovendo o desenvolvimento econômico (European Commission, 2018). Além disso, a gestão sustentável de resíduos está alinhada às diretrizes estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo para a transição de práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis (United Nations-The General Assembly, 2015).

Assim, a reutilização do LETA atende aos requisitos dos ODS por meio dos objetivos 6 e 11, os quais tratam respectivamente, de projetos de inovação e infraestrutura, e do desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis. A destinação adequada desse resíduo, como a incorporação em novos produtos para construção civil, apresenta uma excelente forma de evitar o descarte inadequado na natureza e gerar valor econômico ao resíduo.

A crescente demanda por materiais pela indústria da construção civil e a escassez de recursos naturais, tem levado o setor a buscar novas alternativas de matéria-prima. A construção civil tem a necessidade de incorporar técnicas de desenvolvimento sustentável como o reaproveitamento de resíduos sólidos, promovendo a preservação de recursos naturais e a diminuição de impactos ambientais (Campos, 2019).

Os tijolos solo-cimento ou ecológicos são materiais compostos pela mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento *Portland* e água, e permitem o uso de resíduos em sua confecção. A produção desses tijolos pode ser realizada por prensa manual ou hidráulica não passando pelo processo convencional de queima. Sendo assim, é um material que possui benefícios como baixa emissão de gases poluentes e não exige mão de obra especializada por se tratar de uma técnica de fácil execução (Gomes, 2021).

O cimento *Portland* material necessário para a produção de tijolos solo-cimento, é um dos principais contribuintes para as emissões globais de CO₂, devido à calcinação do calcário e ao alto consumo energético dos fornos industriais (Coppola *et al.*, 2019). Além, do seu processo de produção gerar impactos ambientais como, a degradação de ecossistemas naturais, elevado consumo de recursos hídricos e liberação de outros poluentes atmosféricos (Coffetti *et al.*, 2022).

A substituição parcial do cimento *Portland* por materiais pozolânicos, conforme demonstrado no estudo de Torre *et al.* (2023), pode mitigar esses impactos. Torre *et al.* (2023), explicam que os materiais pozolânicos, como cinzas volantes, sílica ativa e argilas calcinadas, reagem com os produtos de hidratação do cimento, formando compostos cimentícios que melhoram a resistência e a durabilidade do concreto. Os autores concluíram que a adição de até 15% de pozolana reduziu significativamente a porosidade do concreto, aumentando sua resistência à compressão e melhorando a microestrutura da matriz cimentícia. Além disso, a redução da permeabilidade resultante do uso de pozolanas contribui para maior durabilidade das estruturas, reduzindo a necessidade de manutenção e prolongando sua vida útil.

Portanto, a substituição do cimento por materiais pozolânicos apresenta uma solução sustentável, reduzindo emissões de CO₂, minimizando a extração de matérias-primas naturais

e promovendo uma gestão mais eficiente de resíduos industriais. Assim, a utilização de pozolanas na construção civil, não apenas melhora o desempenho dos materiais, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção convencional de cimento.

Nesse sentido, estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de promover a substituição parcial ou total do cimento pelo LETA para produção de novos materiais para a construção civil (González *et al.*, 2020; Limami *et al.*, 2021; Amim *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023; Altheman *et al.*, 2023; Pang *et al.*, 2023). Essa abordagem é fundamentada na composição química do LETA, que apresenta semelhanças com o cimento *Portland*, sendo predominantemente constituído por óxidos de alumínio, ferro e silício (Gomes *et al.*, 2019; Ruviaro *et al.*, 2020). Além disso, seu reaproveitamento possibilita a redução dos custos de produção, minimiza o descarte de lodo em aterros e contribui com a implementação de práticas alinhadas à economia circular.

No entanto, no Brasil, ainda há uma escassez de estudos sobre a aplicação do LETA como substituto parcial ou total do cimento *Portland* na fabricação de tijolos solo-cimento. A ampliação dessas pesquisas pode proporcionar benefícios significativos, como o menor consumo de cimento, destinação adequada do lodo de ETA, e a valorização desse resíduo como um recurso potencialmente aplicável na indústria da construção civil.

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso de lodo de ETA como substituto parcial do cimento *Portland* na produção de tijolos ecológicos. O estudo busca compreender as propriedades físico-químicas e mineralógicas do lodo e analisar o impacto da sua incorporação na resistência mecânica, durabilidade e absorção de água dos tijolos produzidos.

Esta pesquisa tem como objetivos específicos, a caracterização do lodo de ETA quanto as propriedades físico-químicas, mineralógicas e pozolânicas; avaliar o potencial do lodo de ETA como material cimentício suplementar; o estudo da influência do lodo de ETA no desempenho dos tijolos ecológicos, considerando resistência à compressão, absorção de água, perda de massa, condutividade térmica e durabilidade; e, analisar a viabilidade do tratamento térmico do lodo para otimizar suas características pozolânicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sustentabilidade na construção civil

O conceito de sustentabilidade ganhou maior destaque globalmente a partir da Conferência das Nações Unidas sobre meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) em 1992. Foi por meio da Agenda 21, que aborda o desenvolvimento sustentável, que essa temática passou a ser discutida com maior preocupação entre as nações. Nesse cenário, a construção civil desempenha um papel fundamental, tanto da perspectiva ambiental quanto nos aspectos econômico e social, dada sua influência significativa no consumo de recursos naturais e na geração de impactos ambientais.

Nesse contexto, a aplicação do conceito de *Triple Bottom Line* (TBL) para o setor de construção torna-se essencial, pois promove a integração dos pilares econômico, ambiental e social na gestão de projetos, garantindo um equilíbrio entre sustentabilidade e rentabilidade (Petrelli *et al.*, 2024). A implementação de estratégias de reaproveitamento de resíduos, é um exemplo prático dessa abordagem, a qual reduz a demanda de extração de matéria-prima virgem e a produção de resíduos no setor (Çimen, 2021). Além disso, a incorporação de práticas sustentáveis favorece a construção de um mercado mais eficiente e responsável, alinhando crescimento econômico com a preservação ambiental e a justiça social.

O setor de construção consome aproximadamente 25% da água global, sendo responsável por 38% das emissões de CO₂. Além disso, contribui com aproximadamente 50 a 70% da geração global de resíduos, conforme relatado pelo BPIE (2021). A elevada produção de resíduos no setor acarreta impactos ambientais significativos, como a contaminação da água, a poluição atmosférica e a degradação da paisagem (Çimen, 2021). Ademais, a ineficiência na gestão de resíduos sólidos na construção civil agrava esse cenário, impulsionando o aumento contínuo da geração de resíduos e dificultando a introdução de práticas mais sustentáveis (Wang; Yu; Zhang, 2024).

O desenvolvimento sustentável na construção é essencial para mitigar os impactos ambientais, otimizar a utilização de recursos e gerar benefícios econômicos. Sua aplicação torna o setor mais equilibrado e ambientalmente consciente. A inclusão de práticas como a utilização de materiais reciclados, eficiência energética, inovação em materiais, construção modular e pré-fabricada, além da economia circular e melhorias das políticas públicas, é fundamental para

reduzir os impactos da exploração excessiva dos recursos naturais (Çimen, 2021; Zhang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024; Wang; Yu; Zhang, 2024).

Segundo Li *et al.* (2024), o setor de construção é um dos setores que possuem menor eficiência ambiental, com diferenças bastante significativas entre os países. Sendo que, os países europeus e asiáticos em regiões litorâneas, tendem a apresentar melhor desempenho ambiental, enquanto, os países da Ásia Central e da África possuem menor eficiência. Os autores destacam que, os fatores de maior influência na eficiência ambiental, são a intensidade energética, cooperação internacional, a estrutura industrial dos países e as demandas políticas.

Nesse sentido, a construção civil está focando no desenvolvimento de práticas que visam a economia circular, que incluam métodos e confecção de materiais sustentáveis para o setor de construção que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente. A economia circular constitui um modelo que visa à construção de um sistema ambientalmente sustentável e eficiente, por meio do reaproveitamento, da reutilização e da reciclagem de produtos e materiais (Kuoribo; Shokry; Mahmoud, 2024).

A economia circular é fundamentada em pontos como o conceito dos 3 R's, que significa, reduzir, reutilizar e reciclar, assim como, no menor desperdício e poluição, no prolongamento da utilização de materiais e regeneração dos sistemas naturais. Sendo assim, é uma prática que pode colaborar para a sustentabilidade na construção, através da sua abordagem restaurativa e regenerativa (Çimen, 2021).

Segundo Wang, Yu e Zhang (2024), as práticas de construção atuais ainda não atendem completamente aos princípios de sustentabilidade. Apesar do esforço crescente para implementação de soluções sustentáveis, ainda existem desafios que precisam ser superados. Os autores destacam, alguns pontos que precisam de atenção, como, a baixa taxa de reutilização e reciclagem de resíduos, a grande demanda de extração de recursos naturais pela construção civil, e a pouca utilização de tecnologias de reciclagem e aplicação de práticas sustentáveis de construção.

Diante do exposto, o futuro da sustentabilidade na indústria da construção civil exige a integração de inovação tecnológica e políticas públicas eficazes. A utilização de materiais alternativos, aliada à práticas baseadas na economia circular contribui significativamente para a mitigação dos impactos ambientais. Regulamentações mais rigorosas e incentivos governamentais são essenciais para impulsionar essas estratégias (Zhang *et al.*, 2023). Portanto, além de minimizar emissões e resíduos, a sustentabilidade no setor fomenta a criação de

empregos verdes e a melhoria da economia. Para que essas práticas sejam amplamente adotadas, é fundamental uma abordagem colaborativa entre governo, indústria e academia.

2.1.1 Geração de resíduos na construção civil

A construção civil destaca-se com um dos setores que mais geram resíduos mundialmente, devido ao uso intensivo de matérias-primas e à adoção de métodos convencionais de edificação. Esse elevado volume de resíduos configura um desafio ambiental significativo, especialmente em áreas urbanas. Estima-se que os resíduos de construção e demolição correspondem a aproximadamente 40% do lixo gerado em nível global, além do setor de construção consumir cerca de mais de 50% de toda matéria-prima extraída mundialmente (Wang; Yu; Zhang, 2024; Kuoribo; Shokry; Mahmoud, 2024).

Segundo Guerra *et al.* (2021), a produção de resíduos de construção e demolição (RCD) deve atingir 2,2 bilhões de toneladas até 2025, impulsionada pelo crescimento populacional e pela expansão do setor. Apesar do alto potencial de reciclagem, apenas cerca de 40% são reutilizados, reciclados ou convertidos em energia, enquanto 60% são destinados a aterros sanitários (EPA, 2018). No Brasil, a gestão de resíduos sólidos é regulamentada pela Lei nº 12305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010). No entanto, em países em desenvolvimento, como o Brasil, a destinação inadequada desses resíduos ainda predomina, resultando em impactos ambientais e riscos à saúde pública (da Conceição *et al.*, 2024).

O aumento da produção de RCD tem sido particularmente evidente em grandes centros urbanos, e a previsão é de um aumento contínuo até 2030. Além disso, verifica-se uma variação na composição desses resíduos, abrangendo materiais oriundos de atividades de engenharia, demolição e decoração (Wang; Yu; Zhang, 2024). O descarte inadequado desses resíduos pode gerar impactos ambientais significativos, como poluição de solo e lençóis freáticos, assoreamento de rios, degradação de paisagem e proliferação de doenças (Opoku *et al.*, 2022; Ogunmakinde; Egbelakin; Sher, 2022; Wang; Yu; Zhang, 2024).

No contexto brasileiro, a geração de RCD aumentou expressivamente na última década passando de 33 milhões de toneladas em 2010 para 44,5 milhões de toneladas em 2019, impulsionada pela expansão do setor da construção civil e a urbanização desordenada (ABRELPE, 2020). Esse crescimento está associado ao aumento populacional, mudanças no estilo de vida e à ineficiência na gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) (da Conceição *et al.*,

2024). O setor de construção gera resíduos em todas as etapas, desde escavações até demolições, incluindo materiais como, concreto, tijolos, metais, plásticos, vidro, gesso e madeira. Entretanto, uma das principais dificuldades é a carência de tratamento adequado e à disposição irregular desses materiais, que resultam na degradação ambiental e na contaminação de corpos d'água, além de comprometerem a saúde pública (Kuoribo; Shokry; Mahmoud, 2024; Li *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a economia circular surge como uma alternativa viável para a gestão de resíduos no setor, reduzindo impactos ambientais e maximizando a reutilização de materiais. Práticas com reciclagem, desmontagem seletiva, gestão eficiente desses materiais na obra, valorização de subprodutos, inovação tecnológica são essenciais para minimizar desperdícios no decorrer do ciclo de vida das edificações. Ademais, ao adotar essas estratégias colabora para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo maior eficiência e sustentabilidade no setor (Çimen, 2021; Tiosi; Simon, 2021; Ogunmakinde; Egbelakin; Sher, 2022).

Portanto, a economia circular desempenha um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais no setor de construção civil e na promoção de um modelo de desenvolvimento sustentável. Sua implementação fortalece a reutilização e reciclagem de materiais, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais, além de incentivar práticas mais responsáveis no setor.

2.1.2 Aplicação de resíduos na construção civil

O reaproveitamento de resíduos auxilia para a preservação do meio ambiente, promovendo o menor consumo de recursos naturais. A reutilização de resíduos visa a otimização da utilização de matérias-primas e minimiza problemas ambientais devido à disposição inadequada. A reciclagem tem como base o aproveitamento do material na forma a qual é descartado, passando por pouco ou nenhum tratamento, sendo necessário pequenas operações (Piazza, 2020).

A reutilização de resíduos no setor de construção civil promove a sustentabilidade e a economia circular, com diversas aplicações práticas. Um exemplo significativo é a incorporação do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais cimentícios e tijolos ecológicos. Quando calcinado, o LETA atua como pozolana, reduzindo a demanda por cimento *Portland* e as emissões de CO₂ (Ruviaro *et al.*, 2023). Subprodutos industriais, como as cinzas do lodo de

ETA, melhoram as características mecânicas de concretos e argamassas, além de minimizar impactos ambientais. Outros resíduos, como escória de alto forno e minério de ferro, substituem parcialmente agregados e cimento, tornando a construção mais sustentável (Çimen, 2021; Vilela *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). Tais estratégias reduzem o descarte inadequado, diminuem a extração de recursos naturais e incentivam a inovação tecnológica.

Contudo, o reaproveitamento de resíduos enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios. A variabilidade das propriedades de sua composição exige análises detalhadas para garantir a qualidade dos materiais reciclados, enquanto a carência de normativas padronizadas dificulta sua aprovação no mercado (Gomes *et al.*, 2022). Adicionalmente, os elevados custos associados ao processamento de resíduos, bem como, a resistência do setor à adoção de novas tecnologias limita a implementação de práticas circulares. Para ampliar a reutilização de resíduos, são essenciais políticas públicas eficazes, incentivos financeiros e investimentos em pesquisa e inovação (Kuoribo *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos sólidos vem sendo estudado por pesquisadores como uma alternativa viável para a substituição total ou parcial de matérias-primas pela construção civil. Esses resíduos possuem diversas origens, como a agroindústria, mineração, indústria e da construção civil. É possível citar resíduos oriundos do beneficiamento de de mármore e granito, minério de ferro, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, areia de fundição, pneus, de construção e demolição, lodo de estação de tratamento de água e esgoto, lama de cal, entre outros (Nascimento *et al.*, 2021; Limani *et al.*, 2021; Vilela *et al.*, 2022; Gomes *et al.*, 2022; Alnezami *et al.*, 2024; Fu; Lee, 2024).

Diversos estudos têm investigado o uso de resíduos como substitutos parciais de agregados e aglomerantes na produção de concretos, argamassas, blocos de vedação e de pavimentos (Gareca *et al.*, 2020; Sang; Idowu; Okumu, 2021; Kwek *et al.*, 2022; Mohammed *et al.*, 2022; Souza; Racanelli; Quaresma, 2022; Defáveri *et al.*, 2022; Eugenio *et al.*, 2023). Ademais, os resíduos vêm sendo aplicados como substitutos do solo na produção de materiais cerâmicos (Teklehaimanot; Hailay; Tesfaye, 2021; Viana *et al.*, 2022; Idrees *et al.*, 2023) e na estabilização de solos (de Lima *et al.*, 2020; Adnan *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta uma síntese de diferentes tipos de resíduos e seus potenciais usos na fabricação de materiais de construção, conforme estudos realizados por pesquisadores nacionais e internacionais.

Quadro 1 – Estudos que utilizam resíduos na fabricação de materiais para construção civil.

Indústria/ Resíduos	Material gerado	Referências
Casca de arroz	Blocos comprimidos de Terra	Paul, Islam e Elahi, 2023.
Cinzas de combustível de óleo de palma (POFA)	Agregado sintético	Kwek <i>et al.</i> , 2022.
Cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos	Argamassas	Chu <i>et al.</i> , 2024.
	Substituição de cimento	Alnezami <i>et al.</i> , 2024.
Construção e demolição	Tijolos de barro	Harikumar <i>et al.</i> , 2022.
	Substituição de cimento	Moein <i>et al.</i> , 2024.
Corte de granito	Tijolos ecológicos/ tijolo solo-cimento	Nascimento <i>et al.</i> , 2021.
Ladrilhos cerâmicos	Cerâmica espumosa, concreto, agregado, produção de ladrilhos cerâmicos	Fu e Lee, 2024.
Lama vermelha	Agregado sintético	Souza, Racanelli e Quaresma, 2022.
Lama vermelha e rejeito de bauxita	Materiais cimentícios suplementares	Gou <i>et al.</i> , 2024.
Lodo de estação de tratamento de água	Fabricação de cimento	Ruviaro <i>et al.</i> , 2023.
	Obras geotécnicas	Roque <i>et al.</i> , 2022.
	Cerâmica estrutural	Orlov, Belkanova e Vatin, 2020.
Lodo de estação de tratamento de esgoto	Argamassa	Zhou <i>et al.</i> , 2024.
Mineração	Tijolos ecológicos/ tijolo solo-cimento	Vilela <i>et al.</i> , 2020.
Pó de mármore	Concreto asfáltico de mistura a quente	Sang, Idowu e Okumu, 2021.
Resíduo asfáltico	Materiais cimentícios mistos	Sertsoongnern <i>et al.</i> , 2024.
Resíduos cerâmicos e de pavimentos asfálticos	Camada de base para pavimentação	Mohammed <i>et al.</i> , 2022.
Resíduos orgânicos e de fundição	Substituição de solo	Borgulat, Borgulat J. e Glodniok, 2023.
Tijolos de argila e lamas da produção de fibrocimento	Tijolos ecológicos/ tijolo solo-cimento	Kongkajun <i>et al.</i> , 2020.

Fonte: Da autora (2024).

Por fim, a incorporação de resíduos na fabricação de materiais destinados à construção civil, tem se revelado uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente benéfica, conforme evidenciado pelo crescente número de investigações publicadas nos últimos anos. Essa prática contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado e ao acúmulo de resíduos em aterros sanitários. Além disso, apresenta vantagens econômicas ao possibilitar a redução de consumo de matérias primas naturais e na demanda energética envolvida nos processos produtivos convencionais.

2.2 Pozolanas

Conforme estabelece a NBR 12653 (ABNT, 2014), as pozolanas são substâncias de origem natural ou artificial caracterizada pela predominância de sílica e alumina em sua composição. Apesar de apresentarem baixa ou nenhuma capacidade aglomerante isoladamente, esses materiais manifestam reatividade em meio aquoso na presença de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), originando compostos cimentantes, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. A ocorrência da reação pozolânica contribui significativamente para o aprimoramento das propriedades mecânicas e da durabilidade dos materiais à base de cimento, além de representar uma estratégia relevante no contexto da construção civil sustentável.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), as pozolanas são classificadas em três categoriais distintas: N, C e E, conforme apresentados na Tabela 1. Essa tipificação é fundamental para assegurar que os materiais atendam aos critérios técnicos estabelecidos, possibilitando sua aplicação eficiente em sistemas cimentícios.

Tabela 1 – Classificação dos materiais pozolânicos, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014).

Classe	Requisitos
N	Pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
E	Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

No que se refere aos parâmetros químicos, exige-se que a soma dos teores de dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) seja, no mínimo, 70% da composição total. Além disso, estabelece-se um limite máximo de 4% para o teor de trióxido de enxofre (SO_3) e de 10% para perda ao fogo. Entre os critérios físicos, destaca-se a exigência de um índice de pozolanicidade com cimento *Portland* de, no mínimo, 90% em relação ao ao corpo de prova de referência aos 28 dias, e resistência à compressão mínima de 6 MPa aos 7 dias, quando ensaiado com cal.

As pozolanas apresentam propriedades relevantes para a construção civil, especialmente na formulação de cimentos compostos, devido à sua composição química e mineralógica, frequentemente associada a materiais de origem vulcânica ou obtidos por processos industriais. Sua reatividade com o hidróxido de cálcio leva a formação de compostos aglomerantes estáveis, como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, os quais promovem o aumento da resistência

mecânica e da durabilidade das matrizes cimentícias (Gilayeneh; Nwaubani, 2022; Boyle, 2023).

A reação pozolânica é caracterizada por sua natureza lenta, o que implica em uma liberação gradual de calor e em um desenvolvimento tardio da resistência mecânica. Essa reação ocorre a partir do consumo de hidróxido de cálcio, promovendo melhorias significativas na durabilidade das pastas cimentícias endurecidas, sobretudo em ambientes agressivos, como os que contêm agentes ácidos. Os produtos formados ao longo dessa reação atuam no preenchimento dos poros capilares de maior dimensão, resultando na redução da porosidade e no aumento da resistência e impermeabilidade do material (Mehta; Monteiro, 2014).

A interação entre as partículas de pozolana e do hidróxido de cálcio pode ser descrita por dois mecanismos físicos principais. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o primeiro está relacionado ao refinamento da estrutura porosa, em que os grandes vazios capilares são substituídos por uma matriz microporosa composta por poros de menor tamanho. O segundo mecanismo refere-se à formação de produtos hidratados secundários, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que se desenvolvem ao redor de partículas pozolânicas, preenchendo os poros remanescentes com materiais de baixa densidade, o que favorece o aumento da compactação da microestrutura.

Adicionalmente, Gilayeneh e Nwaubani (2022) ressaltam que a incorporação de pozolanas como substituintes parciais do cimento *Portland* contribui para o aprimoramento das propriedades do concreto. Entre os benefícios observados estão o ganho de resistência mecânica em idades avançadas, a redução da permeabilidade que impede a penetração de íons deletérios, como cloretos e sulfatos, e a diminuição da absorção de água. Esses fatores colaboram para a integridade e longevidade do concreto, conferindo-lhe uma microestrutura mais densa e menos porosa.

As pozolanas desempenham um papel relevante na melhoria da resistência do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos, contribuindo para a proteção da matriz cimentícia contra agentes deteriorantes. Sob a perspectiva ambiental, sua utilização ceste alinhada aos princípios da construção sustentável, ao passo que permite a redução do consumo de cimento *Portland*, minimizando a extração de recursos naturais e as emissões de gases efeito estufa (Gilayeneh; Nwaubani, 2022; Agra *et al.*, 2023).

O uso de materiais pozolânicos é amplamente difundido tanto na produção de cimentos compostos quanto na substituição parcial do cimento *Portland* em concretos e argamassas. Dentre os materiais comumente utilizados destacam-se as pozolanas naturais, as cinzas volantes

silicosas, as cinzas vulcânicas (Tsardaka; Tsampali; Stefanidou, 2024) e diversos resíduos industriais, como os provenientes do beneficiamento de mármore, lodos gerados em estações de tratamento de água e resíduos da indústria de cerâmica (Gilayeneh; Nwaubani, 2022; Yu *et al.*, 2023; Al-Shugaa *et al.*, 2024; Lei; Pavia, 2024).

Portanto, a incorporação de pozolanas em composições cimentícias oferece vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Além de ampliar a durabilidade dos materiais e prolongar sua vida útil em condições severas, essa prática viabiliza o aproveitamento dos resíduos sólidos industriais, como cinzas volantes e escória de alto-forno, promovendo soluções de menor impacto ambiental em comparação aos cimentos convencionais (Lei; Pavia, 2024). Assim, a utilização de adições pozolânicas consolida-se como uma estratégia eficaz para o avanço da construção civil sustentável.

2.3 Substituição de cimento por materiais pozolânicos

Nos últimos anos, tem-se intensificado o interesse pelo uso de materiais sustentáveis na construção civil, especialmente os materiais cimentícios suplementares (MCS), como alternativas parciais ao cimento *Portland* em sistemas à base de cimento. Dentre os MCS, as pozolanas destacam-se por sua elevada demanda, atribuída à sua capacidade de aprimorar as propriedades do concreto e outros materiais cimentícios (Al-Shugaa *et al.*, 2024; Coffetti *et al.*, 2022; Tsardaka *et al.*, 2024).

As pozolanas têm sido aplicadas em diferentes composições, incluindo argamassas e pastas de cimento (Al-Shugaa *et al.*, 2024; Tsardaka *et al.*, 2024; Wang; Yu; Zhang, 2024), concretos (Gilayeneh; Nwaubani, 2022; Sanytsky; Kropyvnytska; Ivashchyshyn, 2023; Torre *et al.*, 2023) e na própria produção de cimento (Lei; Pavia, 2024). Esses materiais vêm se mostrando eficazes no fortalecimento da microestrutura, na melhora da resistência mecânica, bem como na redução da porosidade e da permeabilidade.

Al-Shugaa *et al.* (2024) investigaram o uso de lodo cerâmico como adição pozolânica em misturas cimentícias, com o propósito de promover a reutilização de resíduos industriais e mitigar as emissões de CO₂ na indústria cimenteira. Os resultados indicaram um desempenho pozolânico significativo, com densificação da matriz, redução de vazios, porosidade e permeabilidade à água.

Wang, Yu e Zhang (2024) avaliaram uma estratégia de reforço pozolânico por meio da combinação de nano sílica (NS) e argila calcinada (CC), utilizando polímeros superabsorventes

como veículos de dispersão da NS próxima ao hidróxido de cálcio (CH). Tal abordagem favoreceu a formação de C-S-H na matriz cimentícia, contribuindo para a maior compactação da microestrutura, aumento da resistência à compressão e avanço do grau de hidratação.

Lei e Pavia (2024) analisaram o potencial pozolânico da escória proveniente de resíduos de catalisadores utilizados no processo de craqueamento catalítico de petróleo. Os ensaios indicaram elevada reatividade, tornando o material promissor como MCS em composições com cimento *Portland* e cal, além de viabilizar sua aplicação em cimentos de baixo carbono e sistemas geopoliméricos.

Torre *et al.* (2023), por sua vez, estudaram a influência da adição de pozolanas na porosidade e resistência à compressão do concreto. Os autores verificaram melhorias significativas na resistência mecânica e redução da porosidade, com destaque para a influência positiva da idade de cura, sendo que os ganhos se tornam mais evidentes em idades avançadas.

Desse modo, observa-se que as pozolanas vêm sendo amplamente utilizadas para reforçar materiais à base de cimento, contribuindo para o aprimoramento de suas propriedades mecânicas, microestruturais e de durabilidade. Além disso, o uso de pozolanas derivadas de resíduos industriais apresenta resultados satisfatórios para substituição parcial do cimento *Portland*, promovendo a sustentabilidade na cadeia produtiva da construção civil ao reduzir o consumo de recursos naturais e a destinação inadequada de resíduos ao meio ambiente.

2.4 Estação de Tratamento de Água (ETA)

A obtenção de água potável ocorre por meio do tratamento da água bruta provenientes dos mananciais. Esse processo envolve uma sequência de etapas físicas e químicas, cujo objetivo é remover impurezas, tanto em suspensão quanto dissolvidas, garantindo que a água atenda aos padrões de qualidade exigidos para o consumo humano. É comum aplicar produtos químicos para a desestabilização dessas partículas, que precisam ser removidas para que se tenha a clarificação da água.

A Resolução N°357 (CONAMA, 2005), estabelece as classes para as etapas de tratamento de água doces para o consumo humano, sendo elas:

- Classe Especial: Tratamento com Desinfecção;
- Classe 1: Tratamento Simplificado;
- Classe 2: Tratamento Convencional;
- Classe 3: Tratamento Convencional ou Avançado.

As estações de tratamento de água (ETAs) devem ser concebidas considerando aspectos construtivos, simplicidade do sistema operacional, custos de implantação e operação da estação. O tratamento da água visa a redução ou remoção de substâncias presentes na água bruta de atender aos parâmetros adequados para consumo humano (Scapin, 2021). Segundo Richter (2009), as ETAs se dividem em três categorias, de acordo com a tecnologia empregada: estações de tratamento convencionais, estações de filtração direta e estações de flotação de ar dissolvido.

O tratamento de água mais comum é o convencional ou completo, o qual apresenta as principais etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, estabilização do pH e fluoretação (Richter, 2009; Martinez, 2017). No decorrer das operações para o tratamento da água adiciona-se produtos químicos para desestabilizar as partículas ao longo do processo de coagulação e floculação, como, os coagulantes e floculantes (Roldão, 2020).

No decorrer do tratamento de água, cada etapa é responsável por uma função. As etapas de floculação e coagulação, é realizada o acréscimo do coagulante para o agrupamento de partículas em flocos maiores. Na decantação, ocorre a separação dos flocos presentes na água por meio da ação da gravidade, permitindo que as partículas mais densas se depositem no fundo dos tanques.

Na sequência, a água decantada é submetida ao processo de filtração, no qual são removidas as impurezas remanescentes em suspensão, garantindo maior claridade e qualidade à água tratada. Após o processo convencional, é realizado a desinfecção e fluoretação, consideradas fundamentais para a qualidade da água. A desinfecção tem como objetivo a eliminação de microrganismos patogênicos, enquanto a fluoretação consiste na adição de compostos fluoretados, visando à prevenção da saúde bucal na população (Martinez, 2017; Montalvan, 2021).

Nesse processo, nas etapas de decantação e filtração são gerados resíduos, o lodo de ETA, que precisam ser removidos periodicamente. Os quais precisam ser tratados e destinados de forma adequada pela responsável da ETA. O resíduo gerado no tratamento de água, possui elevada umidade, sendo necessário a remoção de umidade. O lodo de ETA pode ser desidratado de forma natural através de lagoas de lodo e leitos de secagem, ou mecânica, utilizando centrífugas, filtros de vácuo, filtros prensa e prensa desaguadora (Martinez, 2017).

Na Tabela 2, apresenta os principais tipos de coagulantes empregados nos processos de tratamentos em estações de tratamento de água.

Tabela 2 – Tipos de coagulantes utilizados em tratamento de água.

Tipos de Coagulantes	Exemplos
Coagulantes metálicos inorgânicos	Como o sulfato de alumínio ou alume ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$); Aluminato de sódio ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$); Cloreto de Alumínio (AlCl_3); Sulfato Férrico ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) e Cloreto Férrico (FeCl_3).
Sais metálicos pré-hidrolizados	Constituído por sulfato de alumínio, sais de ferro e hidróxidos sob condições controladas; inclui cloreto de polialumínio (PACl), sulfato de polialumínio (PAS) e cloreto de poliferro.
Polímeros orgânicos	Polímero catiônicos, polímeros aniônicos e polímeros não iônicos.
Materiais naturais a base de plantas	<i>Opuntia spp</i> e <i>Moringa oleífera</i> .

Fonte: Adaptado de Mihelcic e Zimmerman (2018).

O lodo de ETA é um resíduo que precisa de cuidados prévios antes da sua disposição final, por apresentar elevada toxicidade de concentrações de ferro, alumínio e compostos orgânicos. Esses produtos químicos podem acarretar riscos à saúde pública e à vida aquática quando dispostos de maneira inadequada no meio ambiente (Tafarel *et al.*, 2016).

2.4.1 Lodo de estação de tratamento de água (LETA)

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), em 2017, distribuiu-se 46.172.761 m³ de água por dia no Brasil, sendo de água tratada 94,21% (43.645.542) e 5,79% (2.527.219) não realizado nenhum tipo de tratamento. A respeito do lodo gerado em ETA, estima-se que varia entorno de 0,2 a 5% em relação a água tratada (Richter, 2009). O lodo gerado nas ETA's apresenta elevada umidade, sendo necessário reduzir o teor de água e sólidos, para sua obtenção em estado sólido ou semissólido, bem como, para realizar a disposição correta desse resíduo.

Os lodos de ETA's são comumente compostos de solo, material orgânico presentes na água bruta e subprodutos provenientes de produtos químicos e água (Richter, 2009). O processo eficiente de desidratação do lodo está ligado diretamente ao tipo e teor de coagulante aplicado no tratamento, bem como, porção de sólidos presentes (Martinez, 2017).

Os lodos de ETA são classificados conforme a NBR 10004 (ABNT, 2024) como resíduo sólido, Classe II A (não perigoso e não inerte). No contexto brasileiro, a gestão dos resíduos sólidos passou a ser regulamentada pela Lei nº 12305, de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa legislação estabelece diretrizes para a gestão

integrada e o manejo ambientalmente adequado dos resíduos, promovendo a responsabilidade compartilhada entre o poder público, o setor empresarial e a sociedade civil (Brasil, 2010).

Em conjunto a PNRS, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) através da Resolução 430, de 13 de maio de 2011 (CONAMA, 2011), estabelece os limites de Alumínio e Ferro dissolvidos para o lançamento de efluentes em águas doces. Tais elementos são os principais coagulantes empregados no processo de tratamento de água. Para os corpos d'água classificados como classes 1 e 2, os limites estabelecidos são de 0,1 mg/L Al e 0,3 mg/L Fe, enquanto para classe 3, os limites são de 0,2 mg/L Al e 5,0 mg/L Fe.

A destinação final do lodo de ETA's é dependente de alguns fatores como, análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Considerando o elevado volume gerado desse material tem sido realizadas pesquisas para encontrar meios viáveis de destinação desse resíduo. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que, em muitos casos, o descarte é realizado de forma inadequada, causando impactos ambientais e problemas a saúde da população.

Estes resíduos podem ser direcionados a aterro sanitário, aterro exclusivo, e para tratamento em estações de esgoto. Sendo a disposição em aterros sanitários uma das principais técnicas utilizadas. O gerenciamento do lodo quando disposto em aterro sanitário fica a cargo do administrador da ETA, no entanto, é uma prática que apresenta custos elevados e podem ocorrer impactos ambientais na construção do aterro e destinação do resíduo (di Bernado; Dantas; Voltan, 2012).

Existem diferentes estudos sendo realizados buscando por alternativas para destinar esse material, alguns deles são, disposição em aterros sanitários; co-disposição com biossólidos; disposição controlada em determinados solos; aplicações industriais, como em materiais de construção; incineração dos resíduos; disposição em estações de tratamento de esgoto, entre outras (di Bernado; Dantas; Voltan, 2012; Scapin, 2021).

Segundo Tsugawa (2022), os lodos de ETA's são identificados de acordo com o coagulante utilizado no tratamento da água, tal como a lama férrica ou ferro (coagulante de ferro) e lama de alumínio (coagulante de alumínio). As características desse resíduo quanto a composição física, química, mineralógica, mecânica, geotécnica, reológica e microestrutural é muito discrepante na literatura, sendo necessário melhorar esses conhecimentos para viabilizar a reutilização do lodo de ETA.

Nesse contexto, tornam-se essenciais os estudos voltados à caracterização do lodo de ETA, com vistas à sua aplicação em diferentes finalidades. A disposição desse resíduo em aterros sanitários representa elevados custos para as empresas administradoras das ETA'S, além

de potencializar impactos ambientais, especialmente quando realizada de forma inadequada. Por outro lado, o lodo apresenta propriedades físico-químicas que indicam seu potencial de reutilização, destacando-se, principalmente, sua aplicação na construção civil, seja por meio da incorporação em materiais de construção, seja na estabilização de solos em obras geotécnicas.

2.4.2 Reaproveitamento do LETA na construção civil

O lodo de ETA também tem sido aproveitado pela engenharia civil como matéria-prima no desenvolvimento de materiais à base de cimento, cimento e argila, materiais cerâmicos, agregados leves, aplicações geotécnicas, entre outros (Bashar *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2019; Bagriaciğ; Guner, 2020; Meda; Sharma; Tyagi, 2021; Scapin, 2021; Agra *et al.*, 2023).

A aplicação do LETA em aplicações geotécnicas voltadas à produção de novos materiais para a construção civil não possui normas técnicas de caracterização geotécnicas próprias, geralmente adota-se as utilizadas para solos. As propriedades geotécnicas mais importantes a serem determinadas são a densidade específica de sólidos, granulometria e limites de consistência. Esses parâmetros podem ser significativamente influenciados por variáveis como o tipo de processo de tratamento, fonte e qualidade de água bruta, coagulante e metodologia de desidratação utilizado nas ETA's (Gomes *et al.*, 2019; Nazir *et al.*, 2020; Montalvan, 2021; Scapin, 2021). Assim, a investigação do comportamento geotécnico do LETA é fundamental tanto para a identificação de suas características intrínsecas quanto para avaliação de seu potencial de aplicação em diferentes contextos construtivos.

O lodo de ETA contém propriedades semelhantes a solos finos como solos argilosos, principalmente os resíduos gerados no tratamento de água que utilizam coagulantes com alumínio e ferro (Gomes *et al.*, 2019). Porém, apresenta também teor de material orgânico e altas concentrações de produtos químicos (Lee; Kim; Yoo, 2018). As propriedades geotécnicas desse resíduo dependem da qualidade da água bruta e o tratamento a qual passa, as alterações ocorridas em cada ETA, irá alterar as características do LETA.

As características geotécnicas dos resíduos de ETA, são influenciadas tanto por sua composição físico-química dos sólidos, quanto pelo teor e característica química dos fluidos dos poros. Alterações nessas características podem provocar interações entre as fases sólida e líquida, como o processo de cimentação, que afetam diretamente parâmetros geotécnicos fundamentais, como a compactação, a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade. Além disso, a variação no teor de umidade desses materiais pode modificar a estrutura dos flocos e o

tamanho das partículas, interferindo também no teor de íons e na coordenação, com impactos diretos na permeabilidade residual do resíduo (Basim, 1999).

O lodo de ETA possui em sua composição predominante, óxidos de alumínio, ferro e silício (Agra *et al.*, 2023; Ruviaro *et al.*, 2023). A presença desses óxidos confere ao LETA características semelhantes às de materiais pozolânicos, os quais reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos hidratados, como silicatos ou aluminatos de cálcio, responsáveis pelo ganho de resistência em materiais cimentícios. Agra *et al.* (2023) verificaram que a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 no lodo de ETA calcinado em diferentes temperaturas atende aos requisitos estabelecidos pela norma brasileira para pozolanas. Além disso, os autores detectaram também a presença de 66,4% de caulinita a partir da calcinação em temperatura de 100°C, indicando o potencial pozolânico do material.

A viabilidade do lodo de ETA como material de natureza pozolânica tem sido objeto de investigação em múltiplas aplicações sobretudo na substituição parcial do cimento *Portland* na fabricação de concretos e argamassas (González *et al.*, 2020; Ruviaro *et al.*, 2021; Hemkemeier *et al.*, 2023). Adicionalmente, o material tem sido estudado como base para a obtenção de pozolanas artificiais (Tantawy *et al.*, 2015; Agra *et al.*, 2023), como material cimentício suplementar (Hagemann *et al.*, 2019; Manosa *et al.*, 2021; Altheman *et al.*, 2023) e, ainda, na fabricação de materiais cerâmicos (Beulah *et al.*, 2015; Cremades; Cusidó; Arteaga, 2018; Orlov; Belkanova; Vatin, 2020; Limami *et al.*, 2021; Amim *et al.*, 2022).

Ruviaro *et al.* (2023), avaliaram a viabilidade da utilização do lodo de ETA calcinado como substituto parcial do cimento *Portland*, utilizando proporções entre 0 e 30% em massa, com temperatura de calcinação ideal de 700°C. Os resultados indicaram que o material apresentou reatividade pozolânica e desempenho satisfatórios como material cimentício suplementar na fabricação de cimento do tipo argiloso calcinado com calcário (LC_3), evidenciado por parâmetros como cinética de hidratação, propriedades reológicas, resistência à compressão, microestrutura e emissões de CO_2 . Os resultados demonstram que o lodo apresenta características interessantes para a aplicação em matrizes cimentícias, tanto nos quesitos de redução de impactos ambientais, quanto pelo desempenho mecânico favorável.

Agra *et al.* (2023), por sua vez, investigaram a produção de pozolanas de elevada reatividade a partir do lodo de ETA. O estudo demonstrou que o material atende aos requisitos normativos brasileiros para pozolanas, e que, ao ser calcinado a 800°C, apresentou sinais de sinterização, caracterizando essa temperatura como limite superior para garantir sua

reatividade. Os autores demonstraram que o lodo calcinado possui características adequadas para aplicação como pozolanas de alta performance.

Nesse contexto, o lodo de ETA tem sido estudado para diferentes aplicabilidades, e possui algumas características individuais que possibilita a aplicação em produtos para construção civil, como, cimento, tijolos e cerâmicas. Porém, seu aproveitamento possui desafios, devido às suas características físicas e químicas, e elevado teor de compostos orgânicos, fatores que podem aumentar a porosidade e a absorção de água dos materiais resultantes, comprometendo sua integridade e desempenho (Gomes *et al.*, 2019).

Portanto, além de apresentar propriedades que favorecem sua utilização como insumo alternativo na construção civil, o reaproveitamento do LETA contribui significativamente para o desenvolvimento sustentável do setor. Essa prática promove a conservação de recursos naturais, reduz o consumo energético e mitiga os impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos sólidos.

2.5 Tijolos ecológicos

A técnica de solo-cimento foi introduzida no Brasil na década de 40, por iniciativa da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP) em parceria com a Diretoria da Aeronáutica Civil. Desde então, essa metodologia é estudada para diversas aplicações para a engenharia civil. A incorporação do cimento *Portland* no solo proporciona melhores propriedades geotécnicas ao material, tais como a redução da absorção e perda de umidade, melhoria na resistência à compressão e diminuição da permeabilidade. Assim, promovendo ao material melhores características, como maior durabilidade, trabalhabilidade e potencial redução de custos no processo de produção.

Segundo a NBR 12023 (ABNT, 2012), o solo-cimento é um produto endurecido, proveniente da cura da composição de solo compactada, cimento e água, em proporções que devem seguir uma dosagem, que são executadas conforme a NBR 12253 (ABNT, 2012). Para ser empregado como material de construção, o solo-cimento deve ser submetido aos processos de compactação e cura, os quais são fundamentais para o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas. A mistura adequada deve conferir ao material maior resistência mecânica à compressão, impermeabilidade, durabilidade e menor índice de retração volumétrica (ABCP, 2004).

A técnica de solo-cimento pode ser aplicada para diversos fins, como para a estabilização de solos em pavimentos, barragens, diques, reservatórios, na construção aplicando técnicas construtivas diversas, bem como, fabricação de materiais para indústria da construção. Dentre as diversas aplicações possíveis, destaca-se a produção de tijolos ecológico, que representam uma alternativa sustentável aos materiais convencionais.

Na confecção de tijolos ecológicos, a estabilização mecânica é obtida por meio processo de compactação, o qual permite a reorganização dos grãos do solo. Esse processo resulta na redução da porosidade, devido ao melhor arranjo entre os grãos e a eliminação parcial da água presente na mistura, tornando o solo mais denso. Como consequência, há um incremento significativo na resistência mecânica do material (Filho, 2021).

Existem algumas propriedades importantes que precisam ser determinadas para produção tijolos ecológicos, como a umidade e o teor de cimento, propriedades físico-químicas dos solos e granulometria do cimento. Em relação as propriedades mecânicas o processo da mistura precisa apresentar parâmetros e energia de prensagem adequados. Assim, o ensaio de compactação é adotado como referência para a definição da energia de prensagem, uma vez que valores insuficientes podem comprometer a integridade do produto, impedindo-o de atender às exigências estabelecidas pelas normas técnicas brasileiras (Filho, 2021; Marques, 2015).

No que se refere às propriedades mecânicas do tijolo solo-cimento, o fator principal de influência, é a composição do solo. Solos com maior proporção de areia tendem a apresentar melhor desempenho em termos de resistência mecânica. Contudo, outros fatores também devem ser considerados em conjunto, tais como, os limites de consistência, granulometria e presença e tipos de argilominerais (Marques, 2015).

Nesse contexto, a respeito aos constituintes do solo, geralmente existem minerais primários como o quartzo e minerais secundários como argilominerais, ressaltando os filossilicatos. Sendo, os argilominerais do solo os responsáveis por conferir plasticidade e no desenvolvimento da sua capacidade de troca catiônica (CTC). A CTC corresponde à habilidade do solo de realizar trocas iônicas na presença de água, sem alteração da estrutura cristalina (da Silva, 2013). Essa característica permite permutas com os cátions de cálcio presentes na cal e no cimento, favorecendo reações químicas e cimentícias que contribuem para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do material (Filho, 2021).

Por fim, a confecção dos tijolos ecológicos à base de solo-cimento requer atenção a diversos fatores técnicos que influenciam diretamente o desempenho do material. Entre os principais, destacam-se: a classificação do solo e sua granulometria, porcentagem de cimento e

umidade da mistura, a categoria do cimento, definição da sua mistura, a energia de prensagem, cura após prensagem, entre outros parâmetros que devem ser rigorosamente controlados para garantir a qualidade do produto.

2.5.1 Composição do tijolo ecológico

O tijolo ecológico, também denominado tijolo solo-cimento, é formado por solo, cimento e água, podendo ainda ser incorporar determinados resíduos em sua formulação. Diferente dos tijolos tradicionais, esse material não passa pelo tradicional processo de queima, são apenas prensados, assim, não há emissão de CO₂ na atmosfera e consumo de combustíveis na sua produção. A produção dos tijolos ecológicos compreende os seguintes passos:

- a) Preparo do solo: deve ser peneirado para a retirada das partículas grosseiras, e destorroado para homogeneização das partículas;
- b) Preparo da mistura: com o solo preparado, é adicionado o cimento devendo ser misturado até obter-se uma mistura homogênea, adicionando-se água até a mistura ser uniformizada;
- c) Moldagem do tijolo: é realizado em prensa manual ou hidráulica;
- d) Cura e armazenamento: os tijolos devem passar por molhagem nos primeiros 7 dias após moldados e depois devem ser armazenados em câmara úmida por 28 dias.

Segundo a ABCP (2004) a proporção de cimento recomendado para estabilizar composições de solo-cimento é de 5 a 13% considerando o peso seco do solo. Assim, a maior proporção da composição é de solo, e o cimento é utilizado em menor dosagem, tendo como objetivo a estabilização do solo, conferindo maior resistência à deformação ao produto. A definição da proporção ideal de cimento deve considerar resultados de ensaios prévios, bem como fatores como a granulometria do solo, os índices de consistência, origem, coloração, região e profundidade da amostra.

Os solos mais apropriados para tijolos ecológicos são os solos classificados como arenosos, os quais possuem aproximadamente 60 a 80% de areia com diâmetro entre 0,06 a 2,00 mm. A composição do solo ideal indicada para a confecção do material é de 50% de areia, 25% silte e 25% de argila. Não sendo adequado solos com quantidade de areia acima de 75% ou maior que 50% de argila. A proporção de argila e a areia do solo pode influenciar de forma

positiva ou não na mistura, elevado teor de areia, reduz a coesão das partículas e exige o aumento do teor de estabilizante (Belém *et al.*, 2016).

Segundo a NBR 13553 (ABNT, 2012) o solo deve apresentar as seguintes propriedades para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento, sendo elas:

- a) 100% de material que passa na peneira de abertura de 4,75 mm;
- b) 10% a 50% de material que passa na peneira de abertura de 75 μm ;
- c) Limite de liquidez menor ou igual a 45%;
- d) Índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

A umidade a ser empregada na produção do solo-cimento, é estipulado pelo ensaio de compactação para solo-cimento, sendo determinado o valor de umidade ótima e peso específico máximo para a mistura. A determinação correta da proporção de água é necessária para garantir a plasticidade adequada do solo e promover a reação de hidratação do cimento, bem como, satisfazer as reações cimentícias e pozolânicas com o solo (Filho, 2021).

Os tijolos ecológicos apresentam diversas vantagens, quanto ao sistema construtivo, sendo elas: utilização de prensas manuais ou hidráulicas para moldagem; não são queimados, assim, causam menor poluição; facilidade de construção e produção; melhor isolamento termoacústico; melhor acabamento, possuem faces lisas, dispensando acabamentos, assim, podendo ser utilizado apenas impermeabilizantes; possibilita obras mais limpas, reduzindo a geração de entulhos; e economia, permite melhor aproveitamento de materiais, assim, evitando desperdícios (Filho, 2021; Gomes, 2021).

Os tijolos ecológicos, podem ainda ser produzidos com a reutilização de resíduos sólidos na sua composição, o que permite diminuir a extração de recursos naturais beneficiando o meio ambiente. Estes tijolos apresentam vantagens ambientais, possibilita o uso de mão de obra e matéria prima local, sendo uma técnica simples e de fácil execução (Gomes, 2021).

A adição de resíduos na composição de tijolos ecológicos pode ter a função de substituir parcialmente o aglomerante, ser adicionado como substituto parcial ou total do solo e da água (Filho, 2021). No caso da substituição do aglomerante, são empregados resíduos com potencial pozolânico, capazes de participar das reações cimentícias. Na literatura são encontrados estudos envolvendo a utilização de matérias pozolânicas na confecção de tijolos, tais como o lodo de tratamento de água, cinzas de casca de arroz, pó de mármore, cinzas volantes, entre outros (Ewais *et al.*, 2017; Saleem; Kazmi; Abbas, 2017; Munir *et al.*, 2018; Beulah *et al.*, 2021; Gencel *et al.*, 2021; Limami *et al.*, 2021; Amim *et al.*, 2022).

2.5.2 Adição de resíduos na produção de tijolos ecológicos

O aproveitamento de resíduos diversos para confecção de tijolos ecológicos tem sido amplamente estudado. O principal objetivo dessa prática é a redução do teor de cimento nas composições, visando minimizar os impactos ambientais decorrentes da produção do cimento, bem como, promover a melhoria das propriedades físico-químicas e mecânicas desse produto.

Os resíduos são capazes de serem substitutos parciais do cimento, do solo e da água na composição dos tijolos ecológicos. Nascimento *et al.* (2021) reaproveitaram resíduo de corte de granito (GCR) em substituição parcial do cimento *Portland* e do solo, para produção de tijolos ecológicos. Os autores utilizaram resíduos com granulometrias diferentes para cada tipo de substituição. Durante a pesquisa, foi observado a necessidade do controle da umidade da mistura, por este fator exercer influência significativa na prensagem do tijolo, e consequentemente na resistência mecânica do material. O estudo indicou que a incorporação de até 20% de resíduo de GCR na mistura do tijolo ecológico não teve influência significativa na redução da resistência à compressão quando comparado ao tratamento controle. Portanto, a utilização desse resíduo na substituição de solo e cimento, apresentou resultados promissores para incorporação em tijolos ecológicos.

Vilela *et al.* (2020) utilizaram resíduo de mineração de minério de ferro para substituição de solo para produção de tijolos ecológicos. Os resultados indicaram um aumento da densidade aparente dos tijolos à medida que se elevou o teor de resíduo incorporado à mistura, o que contribuiu para a redução da absorção de água do material. Quanto ao desempenho mecânico à compressão todas as substituições entre 10 e 40% apresentaram resultados acima do exigido na normatização brasileira. Portanto, o resíduo empregado, considerando suas características físicas e químicas, demonstrou ser uma alternativa viável para a incorporação em materiais de construção.

Garcez *et al.* (2024) utilizaram resíduos do processamento do açaí, a semente de açaí após tratamento térmico na substituição de clínquer na composição de cimento argiloso calcinado calcário (LC₃) na fabricação de tijolos solo-cimento. O resíduo mostrou-se favorável para a utilização na fabricação de tijolos ecológicos, proporcionando uma melhoria na estabilização do solo e ganho na resistência à compressão da matriz solo-cimento, devido ao menor tamanhos dos grãos em relação as partículas do solo.

Gonçalves *et al.* (2023) produziram tijolos modulares solo-cimento com ativação alcalina em escala real utilizando a composição de solo argiloso e areia, incorporando

metacaulim ou escória de alto-forno como precursores, NaOH como ativador simples ou composto com cal hidratada. Os tijolos modulares com metacaulim ou escória de alto forno e ativador composto atenderam aos requisitos de utilização, demonstrando que essas misturas podem ser uma alternativa viável para produção sustentável de tijolos, com a reutilização de resíduos industriais e diminuição da demanda por cimento *Portland*.

Considerando os aspectos abordados, a adição de resíduos na composição de tijolos ecológicos, está alinhado com as metas globais de sustentabilidade, através da sua metodologia de produção sem queima e consequente diminuição da emissão de gases nocivos, além de promover valorização aos resíduos, proporcionando a utilização em novos materiais e reduzindo a disposição em locais inadequados e a poluição do meio ambiente.

2.5.3 Estudo de dosagem de misturas

A formulação de misturas representa um dos principais desafios enfrentados pela indústria, especialmente na produção de materiais. Nesse contexto, a aplicação métodos estatísticos experimentais contribui para a redução de erros e da variabilidade nos resultados, proporcionando maior controle sobre o processo produtivo. Os estudos de misturas permitem determinar as características do produto com base nas proporções dos componentes utilizados, sendo a resposta obtida uma variável representativa da qualidade do material desenvolvido (Cabral, 2013).

Segundo Santos (2013), um experimento com misturas refere-se à combinação de dois ou mais componentes para a formulação de um produto. A definição da quantidade de ensaios a serem realizados nesse tipo de experimento deve considerar não apenas a estimativa dos possíveis erros experimentais, mas também aspectos relacionados à viabilidade prática e econômica da pesquisa.

Roldão (2020), utilizou planejamento fatorial 2^k para otimizar a melhor formulação de mistura para produzir blocos intertravados cerâmicos. Os resultados demonstraram que a ferramenta estatística otimizou a formulação das misturas e permitiu a melhor avaliação em conjunto das propriedades tecnológicas do produto. Em outro estudo, Driouich et al. (2023) utilizou um protocolo de síntese baseado em um experimento de planejamento de mistura, para combinação dos produtos para a síntese de geopolímeros. Os dados analisados evidenciaram que a otimização das misturas dos geopolímeros, gerando produtos com elevado desempenho, confirmando a validade do modelo estabelecido por modelos matemáticos.

Cabral (2013) utilizou o modelo matemático de rede simplex para definir misturas para a confecção de tijolos ecológicos. As misturas foram produzidas e avaliadas conforme variáveis de predileções, sendo possível analisar através de ferramentas estatísticas de otimização e superfície de respostas, a correlação entre as propriedades tecnológicas do produto e como cada uma interfere em seu desempenho.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2020. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo. ABRELPE. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 01 de Outubro de 2024.
- ADNAN, M. *et al.* Soil stabilization using waste “Bagasse ash and lime”: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.018>.
- ALNEZAMI, S. *et al.* A sustainable treatment method to use municipal solid waste incinerator bottom ash as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 423, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135855>.
- AL-SHUGAA, M. *et al.* Pozzolanic performance and characteristic analysis of binary blended cement incorporating ceramic polishing sludge. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 29, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.119>.
- ALTHEMAN, D. *et al.* Water treatment waste as supplementary cementitious material. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.418>.
- ALTOÉ, Silvia Paula Sossai. **Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açúcar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers)**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- AMIM, F. *et al.* Potential Use of Wastewater Treatment Plant Sludge in Fabrication of Burnt Clay Bricks. **Sustainability**, v. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116711>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **Dosagem das misturas de solo-cimento normas de dosagem e métodos de ensaios**. São Paulo: ABCP, Estudo Técnico ET-35,1986. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- BAGRIACIK, B.; GÜNER, E. D. An Experimental Investigation of Reinforcement Thickness of Improved Clay Soil with Drinking Water Treatment Sludge as an Additive. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 12, p. 3619-3627, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0111-5>.
- BASHAR, N. A. M. *et al.* Water Treatment Sludge as an Alternative Liner for Landfill Site: FTIR and XRD Analysis. **International Conference on Advanced Science, Engineering and Technology (ICASET)**, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4965082>.

BASIM, S.C. **Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Nova Jersey. 1999.

BELFIORE, C.M. *et al.* An end of waste alternative for volcanic ash: A resource in the manufacture of ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 263, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120118>.

BEULAH, M. *et al.* Mine Waste-Based Next Generation Bricks: A Case Study of Iron Ore Tailings, Red Mud and GGBS Utilization in Bricks. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9499613>.

BORGULAT, A.; BORGULAT, J.; GLODNIOK, M. Safety Evaluation of Soil Substitutes Produced Based on Organic and Casting Waste. **Journal of Ecological Engineering**, v. 25, n. 1, p. 327-335, 2024. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/175200>.

BOYLE, A. Classification of pozzolana and production of pozzolanic cements. **The Science and Technology of Cement and Other Hydraulic Binders**, v. 2023, p. 653-694, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95080-0.00018-2>.

BPIE, Buildings Performance Institute Europe. **Challenges and Solutions for Highly Efficient and Climate-neutral Buildings**. Berlin, 2021. Disponível em: <https://www.bpie.eu/publication/whole-life-carbon-challenges-and-solutions-for-highly-efficient-and-climate-neutral-buildings/>. Acesso em: 28 de Outubro de 2024.

BRASIL. **Lei nº 12305**, de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.

CABRAL, Vivian Ane Lopes. **Avaliação da incorporação do lodo da ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CHU, H. *et al.* Assessing the performance and sustainability of ecological mortar with municipal solid waste incineration fly ash solidified by sulphoaluminate cement. **Construction and Building Materials**, v. 450, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138613>.

ÇIMEN, O. Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127180>.

COFETTI, D. *et al.* Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>.

COFFETTI, D. *et al.* Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, de 13 de maio de 2011. **Resolução CONAMA Nº 430** - Padrões e condições para o lançamento de efluentes em corpos de água. Brasília, DF, 2011.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, de 17 de março de 2005. **Resolução CONAMA Nº 357** - Classificação de águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, DF, 2005.

COPPOLA, L. *et al.* Pastore, An empathetic added sustainability index (EASI) for cementitious based construction materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 475-482, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.160>.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.

Da CONCEIÇÃO, M. M. M. Resíduos da construção civil no Brasil: uma revisão narrativa. **Brazilian Journal of Development**, v.10, n.2, p. 01-13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv10n2-022>.

da SILVA, Vamberto Monteiro. **Estudo da potencialidade do resíduo cerâmico incorporado na produção de tijolos maciços de solo-aglomerante(s)**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

de LIMA, J. S. P. *et al.* Estabilização física de solo laterítico arenoso utilizando resíduos cerâmicos. **Revista Matéria**, vol. 25, nº4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1176>.

DI BERNADO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos, São Paulo: Editora LDiBe, 2012.

DRIOUICH, A. *et al.* Mix design optimization of metakaolin-slag-based geopolymer concrete synthesis using RSM. **Results in Engineering**, v. 20, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101573>.

EPA, United States Environmental Protection Agency, 2018. **Reduce, Reuse, and Recycle Construction and Demolition Materials at Land Revitalization Projects**. EPA.

EUGENIO, T. M. C. *et al.* Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Journal of Building Engineering**, vol. 63, p. 105547, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105547>.

EUROPEAN COMMISSION. **COMMUNICATION from the COMMISSION to the EUROPEAN PARLIAMENT, the COUNCIL, the EUROPEAN ECONOMIC and SOCIAL COMMITTEE and the COMMITTEE of the REGIONS on a Monitoring Framework for the Circular Economy**. EUROPEAN COMMISSION, n.7, Strasbourg, 2018.

EWAS, E. M. M. *et al.* Insulating refractory bricks from water treatment sludge and rice husk ash. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 58, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0071-6>.

FILHO, Ricardo Eugênio Barbosa Ramos. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manípua com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

FU, S.; LEE, J. Recycling of ceramic tile waste into construction materials. **Developments in the Built Environment**, v. 18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100431>.

GARCEZ, L. R. *et al.* Characteristics of the açai seed (*Euterpe precatoria* Martius) after thermal processing and its potential in soil-cement brick. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02816>.

GARECA, M. *et al.* Nuevo material sustentable: ladrillos ecológicos a base de residuos inorgánicos. **Revista Ciencia, Tecnología e Innovación**, v. 18, n. 21, p. 25-61, 2020. Disponível em: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-87872020000100003. Acesso em: 02 de Outubro de 2024.

GENCEL, O. *et al.* 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123843>.

GILAYENEH, V. S.; NWAUBANI, S. O. Transport Properties of Pozzolanic Concrete Based on the South African Durability Indexes. **Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22)**, n. 116, 2022. DOI: 10.11159/icsect22.116.

GOMES, Ana Cláudia Franca. **Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

GOMES, S. C. *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 145, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.

GONÇALVES, L. F. da C. *et al.* Evaluation of mechanical, physical and chemical properties of ecological modular soil-alkali activated bricks without *Portland* cement. **Environmental Development**, v. 48, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100932>.

GONZÁLEZ, K. B. *et al.* Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, v. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>.

GOU, M. *et al.* Valorization of industrial wastes for sustainable cement-based materials with enhanced chloride binding. **Journal of Building Engineering**, v. 95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110181>.

GUERRA, B. C. *et al.* Circular economy applications in the construction industry: A global scan of trends and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129125>.

HAGEMANN, S. E. *et al.* Synergic effects of the substitution of *Portland* cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 916-926. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324>.

HARIKUMAR, M. *et al.* Clay bricks using building debris. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.347>.

HEMKEMEIER, T. A. *et al.* Repair mortars with water treatment plant sludge (WTSP) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) for more eco-efficient and durable constructions. **Journal of Cleaner Production**, v. 386, p. 135750, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135750>.

HUANG, B. *et al.* Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.

IDREES, M. *et al.* Sustainable production of Low-Shrinkage fired clay bricks by utilizing waste plastic dust. **Alexandria Engineering Journal**, vol. 68, p. 405-416, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.040>.

ISAIA, G.C (ed.). **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. In: JOHN V.M. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São PAULO: IBRACON, 2017.
KONGKAJUN, N. *et al.* Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00448>.

KRAUSMANN, F. *et al.* From resource extraction to outflows of wastes and emissions: socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. **Global Environmental Change**, v. 52, p. 131-140, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>.

KUORIBO, E.; SHOKRY, H.; MAHMOUD, H. Attaining material circularity in recycled construction waste to produce sustainable concrete blocks for residential building applications. **Journal of Building Engineering**, v. 96. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110503>.

KWEK, S.Y. *et al.* Development of sintered aggregate derived from POFA and silt for lightweight concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 49, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104039>.

LEE, Y.; KIM, I.; YOO, Y. Stabilization of High-Organic-Content Water Treatment Sludge by Pyrolysis. **Energies**, v. 11, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en11123292>.

LEI, Z.; PAVIA, S. Pozzolanic activity of FCC catalyst waste slag (CWS) for cement and geopolymer production. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100758>.

LI, K.; ZOU, Z.; ZHANG, Y.; SHUAI, C. Assessing the spatial-temporal environmental efficiency of global construction sector. **Science of the Total Environment**, v. 951, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175604>.

LIMAMI, H. *et al.* Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100050>.

MANOSA, J. *et al.* Water treatment sludge as precursor in non-dehydroxylated kaolin-based alkali-activated cements. **Applied Clay Science**, v. 204, p. 106032, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106032>.

MARQUES, Sheyla Karolina Justino. **Produção de tijolos resíduo-cimento usando cascalho de perfuração e cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MARTIN, H. et al. Too good to waste: Examining circular economy opportunities, barriers, and indicators for sustainable construction and demolition waste management. **Sustainable Production and Consumption**, v. 48, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.026>.

MARTINEZ, Juan Gabriel Bastidas. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MEDA, S. R.; SHARMA, S. K.; TYAGI, G. D. Utilization of Waste Sludge as a Construction Material- A Review. **Materials Today: Proceedings**, vol. 46, p. 4195-4202, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.762>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Pini. São Paulo, IBRACON, p. 751. 2014. ISBN 978-85-98576-21-3.

MIHELICIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Engenharia Ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro. LTC. 2018.

MOEIN, M. M. *et al.* Utilizing construction and demolition waste in concrete as a sustainable cement substitute: A comprehensive study on behavior under short-term dynamic and static loads via laboratory and numerical analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 97, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110778>.

MOHAMMED, K. *et al.* The comparative experimental studies on the suitability of ceramic waste aggregate and recycled asphalt pavement aggregate as an alternative for base course. Material. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 160-171, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33736/jcest.4781.2022>.

MONTALVAN, Edy Lenin Tejada. **Geotechnical properties of mixtures of water treatment sludge and residual lateritic soils from the State of São Paulo**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MUNIR, M. J. *et al.* Development of Eco-Friendly Fired Clay Bricks Incorporating Recycled Marble Powder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 5, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002259](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002259).

NASCIMENTO, E. S. S. *et al.* Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002>.

NAZIR, A. K. *et al.* Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing it as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 30490-30501, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2>.

OGUNMAKINDE, O.E.; EGBELAKIN, T.; SHER, W. Contributions of the circular economy to the UN sustainable development goals through sustainable construction. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 178, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.10.6023>.

ORLOV A.; BELKANNOVA M.; VATIN N. Structural Ceramics Modified by Water Treatment Plant Sludge. **Materials**, v. 13, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma13225293>.

ORLOV, A.; BELKANNOVA, M.; VATIN, N. Structural Ceramics Modified by Water Treatment Plant Sludge. **Materials**, v. 13, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma13225293>.

PAUL, S.; ISLAM, M. S.; ELAHI, T. E. Potential of waste rice husk ash and cement in making compressed stabilized earth blocks: Strength, durability and life cycle assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 73, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106727>.

PETRELLI, M. Z. *et al.* Sustainable practices in construction project management: impacts on triple bottom line. **Engineering Sustainability**, v. 177, n. 3, p. 150–161, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1680/jensu.21.00109>.

PIAZZA, Stéphanie Abisag Sáez Meyer. **Geração e valoração de um novo compósito para a construção civil utilizando resíduos da produção de painéis de MDF, de celulose e de cal.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento.** Ed. Blucher, 2009.

ROLDÃO, Antônio José Leal Nina. **Adição de lodo da ETA de Manaus em massa argilosa para obtenção de cerâmica para pavimentação.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

ROQUE, A. *et al.* Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works. **Environmental Challenges**, v. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100465>.

RUVIARO, A. S. *et al.* Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129484>.

RUVIARO, A. S. *et al.* Eco-efficient cement production: Investigating water treatment plant sludge and eggshell filler use in LC3 systems. **Construction and Building Materials**, v. 394, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132300>.

SALEEM, M.A.; KAZMI, S.M.S.; ABBAS S. Clay bricks prepared with sugarcane bagasse and rice husk ash – A sustainable solution. **MATEC Web of Conferences**, v. 120, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712003001.

SANG, L.; IDOWU, T.; OKUMU, V. Evaluation of the performance of waste marble dust as a mineral filler in hot-mix asphalt concrete. **Journal of Civil Engineering, Science and Technology**, v. 12, n. 1, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33736/jcest.2401.2021>.

SANTOS, Osvaldo Cruz. **Formulação de bloco intertravado cerâmico com adição de resíduos urbanos e industriais.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas da Terra. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Natal, 2013.

SANYTSKY, M.; KROPYVNYTSKA, T.; IVASHCHYSHYN, H. Sustainable modi ed pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, y ash and silica fume. **Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 1254, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012004>.

SARIATLI, F. Linear economy versus circular economy: a comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. **Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development**, v. 6, p. 31-34, 2017. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>.

SCAPIN, Juliana. **Avaliação da utilização de mistura de solo e lodo de estação de tratamento de água como material de cobertura e de fundo em células experimentais de resíduos sólidos urbanos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SEKHAR, D.C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 166, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>.

SERTSOONGNERN, P. et al. Utilization of asphalt waste dust with fly ash in mixed cement materials for sustainable construction. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101699>.

SILVA, K. D. do C. *et al.* Effects of Glass Wool Residue Recycled Admixtures on the Properties of Portland Cement-Based Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, nº 11, 2022. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004462).

SOUSA, J. A. S.; RACANELLI, L.A.; QUARESMA, J.N.N. Estudo da Produção do Agregado Sintético Fabricado com Resíduo do Processo Bayer para indústria da construção civil - Parte I. **Revista Matéria**, v. 27, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1356>.

TAFAREL, N.F. *et al.* Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Matéria**, v.21, n. 4, p. 974–986, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0090>.

TANTAWY, M. A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. **Materials Research Bulletin**, v. 61, p. 415-421, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.10.042>.

TEKLEHAIMANOT, M.; HAILAY, H.; TESFAYE, T. Manufacturing of Ecofriendly Bricks Using Microdust Cotton Waste. **Journal of Engineering**, v. 2021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8815965>.

TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. Economia Circular: suas contribuições para o desenvolvimento da Sustentabilidade. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.2, p.11912-11927, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-017>.

TORRE, C. A. *et al.* Influence of the addition of pozzolan on the porosity and compressive strength of concrete. **21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global TransFormations: Integration and Alliances for Integral Development”**, Buenos Aires - ARGENTINA, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.321>.

TSARDAKA, E. C.; TSAMPALI, E.; STEFANIDOU, M. Assessment of perlite by-product as pozzolanic material in cement pastes. **Journal of Building Engineering**, v. 91, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109513>.

TSUGAWA, Juliana Keiko. **Methodology to evaluate the behavior of water treatment Sludge and other pasty waste assustainable geomaterial: Rheological and geotechnical approaches.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

UNITED NATIONS-THE GENERAL ASSEMBLY. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development.** 2015. A/RES/70/1, 2015.

VIANA, Q. S. *et al.* Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19337-1>.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

WANG, C.; YU, L.; ZHANG, J. Production forecast, comprehensive utilization, management measures and visualization analysis of construction waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101720>.

YU, L. *et al.* Conversion of recycled sludge waste into high value-added ceramics as engineering construction materials: Fabrication, characterization and performance evaluation. **Chemical Engineering Journal**, v. 475, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146509>.

ZHOU, X. *et al.* Effect of sewage sludge ash on mechanical properties, drying shrinkage and high-temperature resistance of cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03101>.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 – Caracterização do lodo de estação de tratamento de água (LETA) para substituição do cimento *Portland*

Artigo redigido conforme a norma NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

Este trabalho investigou o potencial da cinza de lodo de tratamento de água (LETA) como substituto parcial do cimento *Portland*, em composições de solo-cimento destinadas à fabricação de tijolos ecológicos. Primeiramente, o LETA foi submetido à secagem em estufa e posterior calcinação nas temperaturas de 450, 550, 650 e 750 °C, com o objetivo de identificar a térmica ideal para a ativação pozolânica, conforme o ensaio de Chapelle modificado NBR 15895 (ABNT, 2010). A avaliação da reatividade também incluiu o ensaio padronizado com cimento *Portland* disposto pela NBR 5752 (ABNT, 2014) e o teste de inibição proposto por Hofstrand *et al.* (1984). O material foi caracterizado em termos físicos (granulometria, massa específica e limites de consistência), químicos e mineralógicos, utilizando-se fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TG) e difração de raios X (DRX). Classificado como resíduo não perigoso e não inerte, o LETA apresentou silto-arenosa e baixa plasticidade, com perda de massa total de 34,51% até 1000 °C, atribuída parcialmente à evaporação da água (4,8%) e à decomposição da matéria orgânica (8,3%). A atividade pozolânica foi identificada a partir de 100 °C, sendo otimizada a 650 °C, conforme os resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) de 88,5%, associado ao aumento da resistência à compressão e à evidência mineralógica observada nos ensaios de DRX e TGA. A análise química da amostra calcinada a 650°C (LETA650°C) indicou um conteúdo combinado de 81,39% dos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, conforme exigido por normas técnicas para materiais pozolânicos. A análise de DRX confirmou a conversão da caulinita em metacaulim, indicando a presença de fases amorfas reativas compatíveis com sistemas cimentícios. A baixa concentração de álcalis sugere a estabilidade química do material em meio alcalino. Os resultados obtidos apontam o LETA650°C como um insumo viável para substituição parcial do cimento Portland, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil por meio da valorização de resíduos industriais.

Palavras-chave: Lodo de ETA; material pozolânico; substituição de cimento; reaproveitamento de resíduos.

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de água potável à população é realizado por meio das Estações de tratamento de água (ETA's), onde a água passa por algumas etapas de tratamento antes de ser distribuída para consumo humano. O tratamento de água convencional compreende as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (Richter, 2009). Durante as etapas de decantação e filtração, são gerados resíduos conhecidos como lodo de estação de tratamento de água (LETA), o qual têm sido motivo de preocupação global devido à elevada produção de resíduos e aos desafios relacionados ao seu descarte (Roque; Montalvan; Boscov, 2022).

O volume de LETA gerado depende do método utilizado para tratar a água, bem como, da qualidade da água bruta. Assim, qualquer alteração sazonal ou modificações de dosagens de coagulantes podem impactar diretamente no volume de lodo produzido (Ahmad, T.; Ahmad, M.; Alam, M., 2016). Estima-se que o lodo gerado corresponda a aproximadamente 0,2 a 5% da quantidade de água tratada, o que representa uma quantidade considerável de resíduo (Richter, 2009).

No Brasil, o LETA é frequentemente disposto em córregos e rios, o que pode resultar em sérios impactos ambientais e riscos à saúde humana. Em resposta a esses desafios, têm sido realizados estudos voltados à valorização desse resíduo. Entre as alternativas investigadas, destacam-se sua utilização na melhoria do tratamento de águas residuais (Gomes *et al.*, 2019), na produção de cerâmica (Benlalla *et al.*, 2015; Cremades; Cusidó; Artega, 2018), materiais cimentícios (Liu *et al.*, 2021; Jia; Lu; Yang, 2021; Agra *et al.*, 2023; Ruviano *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023), tijolos (Limani *et al.*, 2021; Amim *et al.*, 2022), tais como agregado para construção civil (González-Corrochano *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021) e em obras geotécnicas (Tsugawa; Pereira; Boscov, 2017; Nazir *et al.*, 2020; Roque; Montalvan; Boscov, 2022). Para esses fins, o lodo necessita ser desidratado e seco, com o intuito de estabilizar possíveis substâncias nocivas à saúde humana.

A literatura apresenta ampla aceitação do uso do LETA como material cimentício suplementar. Contudo, a constituição química pode variar substancialmente em função dos processos específicos adotados nas ETA's e das características geológicas da região de origem da água bruta. Diferenças significativas nas concentrações dos óxidos como SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, elementos essenciais para o desenvolvimento de reações pozolânicas, evidenciam a necessidade de realizar uma caracterização química detalhada do LETA para cada contexto

específico (Ahmad, T.; Ahmad, M.; Alam, 2016; Gomes *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2021). Adicionalmente, torna-se essencial que esses óxidos estejam em estado amorfo para favorecer a dissolução e as reações pozolânicas. Nesse sentido, estudos cristalográficos utilizando a técnica de difração de raios X são considerados relevantes (Agra *et al.*, 2023).

Pesquisas recentes têm evidenciado o potencial pozolânico do LETA. No estudo de Agra *et al.* (2023), o material foi submetido à calcinação em temperaturas variando entre 600 °C e 800 °C por 3 horas, além de realizarem um processo de redução de granulométrica como intuito de potencializar sua reatividade. Os resultados demonstraram que o LETA atende aos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras para materiais pozolânicos, apresentando atividade a partir de 100 °C. Contudo, observou-se uma leve sinterização na temperatura de 800 °C, indicando que essa faixa térmica representa o limite superior recomendado para a obtenção de pozolanas com desempenho satisfatório.

No estudo realizado por Yang *et al.* (2023), avaliou-se tratamentos térmicos variando entre 105 °C e 1200 °C por 2 horas, sendo realizado redução das partículas para atender os requisitos dos procedimentos analíticos. Os resultados demonstram que as concentrações de SiO₂, Al₂O₃, estão dentro dos limites estabelecidos para caracterizar materiais pozolânicos. Os ensaios de atividade pozolânica e as análises do comportamento de hidratação do cimento, indicaram que o LETA não apresentou reatividade em temperaturas inferiores a 400 °C, resultado atribuído ao elevado teor de matéria orgânica presente no material, o qual atuou como agente inibidor das reações de hidratação. Contudo, na faixa entre 400 °C e 800 °C, o material apresentou desempenho positivo quanto à atividade pozolânica, evidenciando o potencial do material para uso como adição mineral reativa em composições cimentícias.

Godoy *et al.* (2020) investigaram tratamentos térmicos entre 600 °C a 800 °C, por 1 hora. O LETA calcinado a 600 °C apresenta elevado potencial como material cimentício suplementar, das quais as argamassas com teores de 14% e 35% de LETA apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias, sugerindo sua viabilidade para a fabricação de cimento composto e pozolânico.

Estudos recentes têm demonstrado diversas possibilidades para a incorporação do LETA na produção de materiais de construção, incluindo tijolos, cerâmicas, agregados leves, cimento e geopolímeros. No entanto, os principais desafios relacionados a sua aplicação incluem suas propriedades físico-químicas e a elevada presença de matéria orgânica. Esses fatores tendem a aumentar a porosidade e a absorção de água dos compósitos, o que pode comprometer sua

integridade estrutural e prejudicar o desempenho mecânico dos materiais resultantes (Gomes *et al.*, 2019).

O uso desse resíduo além de reduzir os impactos ambientais associados ao descarte, também minimiza a extração de matéria primas e substitui a disposição em aterros sanitários pelo reaproveitamento sustentável do resíduo. Além disso, colabora para a confecção materiais inovadores para a construção alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente aqueles relacionados à Água Potável e Saneamento, e Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Diante desse contexto, este trabalho teve como intuito investigar o potencial do lodo de estação de tratamento de água (LETA) como material cimentício suplementar. O estudo foi conduzido por meio da avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do material.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O lodo de estação de tratamento de água (LETA) foi coletado na estação de tratamento de água (ETA) da UFLA, localizada em Lavras-MG, nas coordenadas -21,2301427 (latitude), e -44,977938 (longitude). A ETA utilizou os coagulantes de sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio. O LETA foi SECO ao ar por 15 dias, e posteriormente recolhido e armazenado em recipientes plásticos do tipo “bombonas” para ser utilizado posteriormente.

O aglomerante utilizado foi o cimento *Portland* CII-F-32, da marca Cauê, escolhido pelo seu fácil acesso para a fabricação de tijolos solo-cimento considerando demanda em grande escala.

2.1 Caracterização do LETA quanto ao seu potencial pozolânico

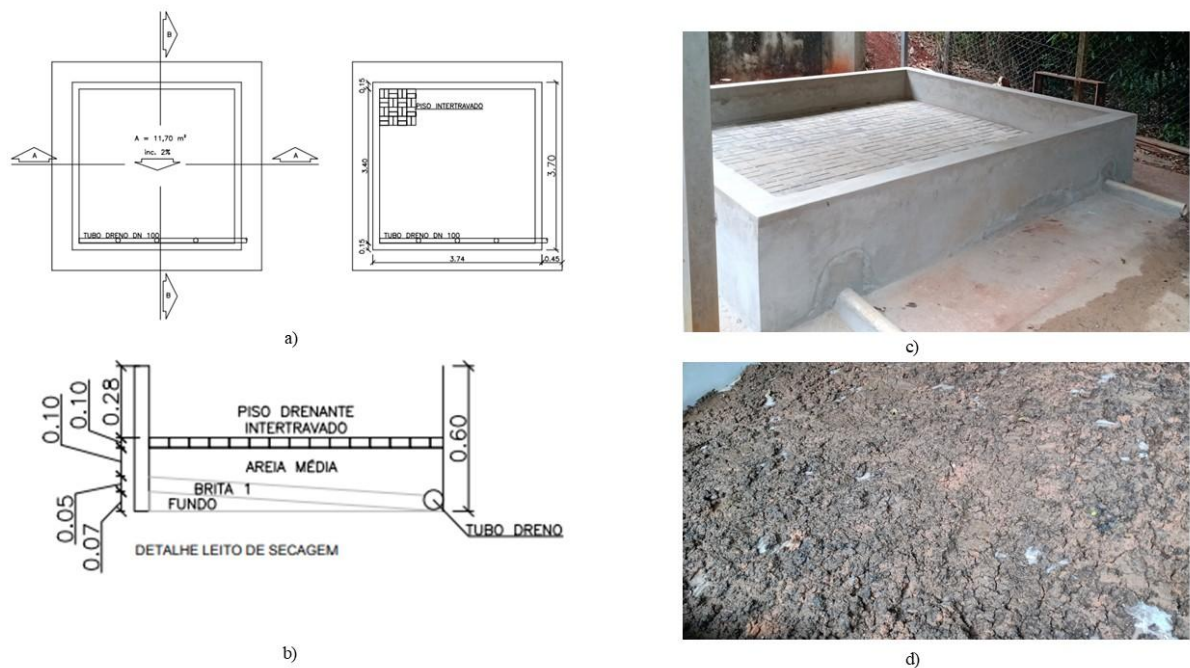
2.1.1 Preparação do LETA

O lodo proveniente da estação de tratamento de água (LETA) foi seco ao ar em um leito de secagem, o qual foi construído para esta pesquisa na ETA-UFLA, com o intuito do uso para à pesquisa, bem como, para benefícios futuros da estação e viabilizar a disposição adequada do resíduo gerado. O projeto do leito de secagem foi elaborado com base em diretrizes adaptadas da NBR 12209 (ABNT, 2011), que estabelece parâmetros para leitos de secagem. O foi realizado com base nas particularidades da ETA, levando em consideração tanto a área disponível para implantação da estrutura quanto o volume de lodo a ser processado.

O leito de secagem possui dimensões com 3,70 m de comprimento e 3,40 m de largura, totalizando uma área construída de 12,58 m². As paredes laterais têm 0,60 m de altura, e o meio filtrante é definido com 3 camadas: a primeira de brita 1, a segunda de areia média e a terceira de tijolo drenante intertravado que atua como camada de suporte, conforme Figura 1.

Após a construção do leito de secagem, o lodo passou por secagem natural durante 15 dias. Em seguida, o resíduo coletado foi submetido a secagem final em estufa a 100 ± 5 °C, a fim de minimizar erros associados a umidade. A escolha dessa temperatura visou garantir a completa evaporação da água presente nas partículas, considerando que temperaturas abaixo de 100°C podem resultar na retenção de umidade residual, ocasionando uma subestimação da umidade real do material (O’Kelly, 2016). Após essa etapa, o resíduo foi destorroado, peneirado e armazenado em recipientes plásticos do tipo “bombona” para preservar suas características.

Figura 1 – Leito de secagem.



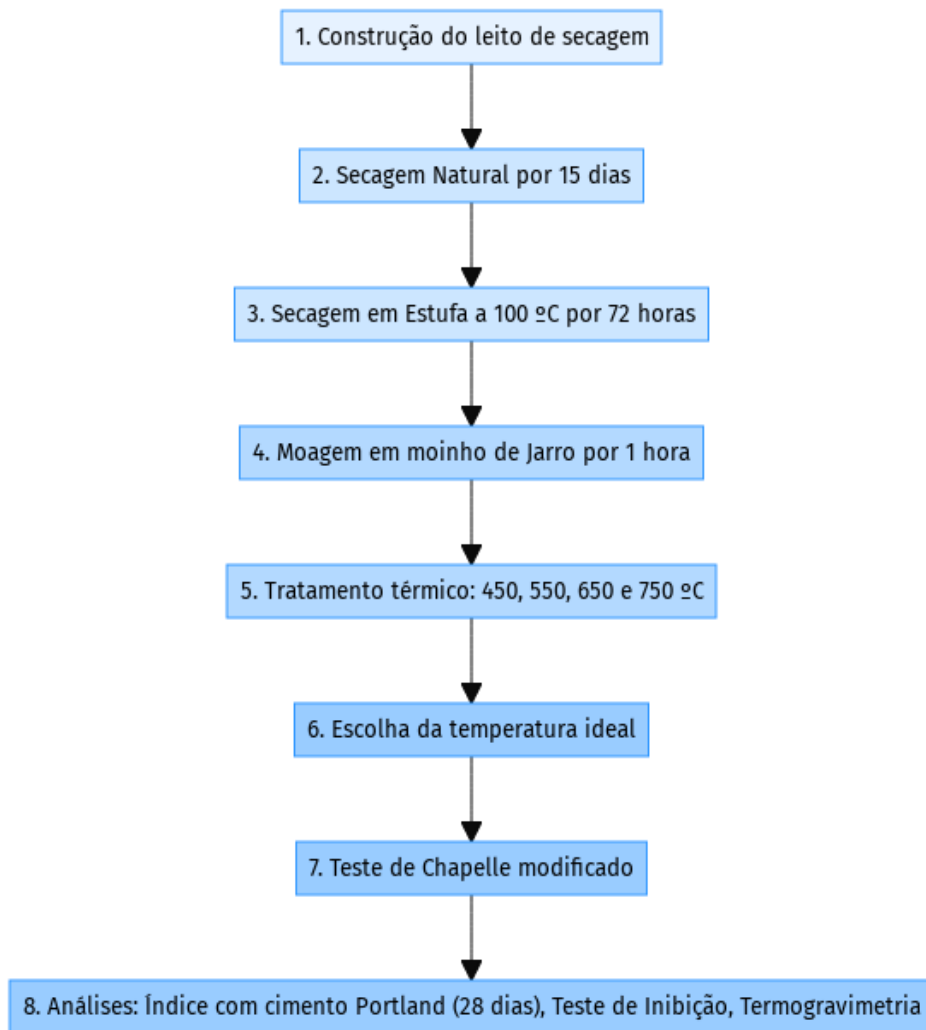
a) Planta baixa leito de secagem, b) perfil leito de secagem, c) leito de secagem e d) lodo secando naturalmente. Fonte: Da autora (2025).

Para viabilizar a aplicação do LETA nesta pesquisa, foi necessário reduzir sua granulometria para partículas menores que 0,075 mm. Essa etapa foi realizada em moinho de jarro equipado com 960 esferas cerâmicas, operando a uma rotação de 200 rpm, com processamento de 1 kg de material por 1 hora.

Em razão do elevado teor de matéria orgânica presente no LETA, o material foi submetido a um tratamento térmico por calcinação nas temperaturas de 450, 550, 650 e 750°C, por um período de 2 horas, com o objetivo de potencializar sua reatividade e eficiência como material pozolânico.

O fluxograma a seguir, Figura 2, apresenta as etapas detalhadas do tratamento do LETA realizados neste estudo.

Figura 2 – Fluxograma do processamento do LETA nesta pesquisa.



Fonte: Da autora (2025).

2.1.2 Determinação da atividade pozolânica do LETA

A análise de pozolanicidade foi conduzida por meio do método de Chapelle modificado, conforme disposto pela norma NBR 15895 (ABNT, 2010). O ensaio foi realizado para identificar a melhor faixa térmica de atividade pozolânica do LETA, sendo as temperaturas avaliadas de 450 °C, 550 °C, 650 °C e 750 °C.

Após a identificação da temperatura ideal, o LETA tratado termicamente em 650 °C (LETA650) passou pelo ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias, conforme os critérios propostos na NBR 5752 (ABNT, 2014).

2.1.3 Teste de inibição do LETA

A aptidão do LETA foi avaliada conforme o método proposto por Hofstrand *et al.* (1984), o qual avalia o índice de inibição do endurecimento do concreto por meio da elevação da temperatura durante a reação. Para registrar as leituras de temperaturas, foram empregados cabos termopares tipo K conectados a um coletor de dados, com medições realizadas a intervalos de um minuto ao longo de 24 horas.

O ensaio foi realizado tanto para um sistema de referência quanto para o LETA650. Cada mistura foi equipada com um cabo termopar e acondicionada em um sistema hermético. Para assegurar o isolamento térmico, foram utilizadas 2 caixas de isopor colocadas dentro de uma caixa térmica, com as misturas completamente isoladas por lã de vidro.

A preparação das misturas foi realizada em um béquer, no qual o cimento e a água foram homogeneizados em proporções específicas por 5 minutos. As misturas foram, então, colocadas em caixas de isopor, onde os cabos termopares foram inseridos. As caixas foram fechadas e posicionadas dentro da caixa térmica, iniciando-se a coleta de dados de temperatura.

O cálculo do índice de inibição é realizado por meio das Equações 1, 2 e 3, propostas por Hofstrand *et al.* (1984).

$$I = 100 * t^2 - \left(\frac{t'^2 * T'^2}{t'^2} \right) - \left(\frac{T^2 * S'^2}{T'^2} \right) - \left(\frac{S^2}{S'^2} \right) \quad \text{Equação 1.}$$

$$S'^2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2} \quad \text{Equação 2.}$$

$$S^2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2} \quad \text{Equação 3.}$$

Onde: t^2 = Tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento; t'^2 = Tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento- material adicionado; T^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água; T'^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-material adicionado; S^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água; S'^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-material adicionado.

2.2 Caracterização física e classificação geotécnica do LETA

Na Tabela 1, está disposto, a identificação dos ensaios que foram realizados e as respectivas normas para a caracterização física do LETA seco em estufa utilizados nesta pesquisa.

Tabela 1 - Ensaio de caracterização física do LETA.

Ensaio	Norma
Massa específica dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2017)
Teor de umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016)
Limites de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2017)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2018)

Fonte: Da autora (2025).

O LETA foi classificado segundo o Transportation Research Board (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

2.3 Caracterização química e mineralógica do LETA

A caracterização química e mineralógica do LETA seco em estufa e LETA650, foi realizada por meio de ensaios de fluorescência de raio X (p-FRX), difração de Raios-X (DRX) e análise termogravimétrica (TG). Esses ensaios foram realizados nos seguintes laboratórios: Laboratório de relação solo-planta, Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis (CIMS), Central de Análise e Prospecção Química (CAPQ), localizados na UFLA. As amostras foram maceradas e peneiradas até obter granulometria de aproximadamente 0,075 mm.

2.3.1 Fluorescência de Raio X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raio-X foi empregado para identificar a composição de diversos materiais, permitindo uma análise qualitativa e quantitativa de cada elemento presentes na amostra. O ensaio foi realizado pelo equipamento Bruker® Tracer 5g com número de série 900G8270, o equipamento possui alvo de ródio, de 4 W e 15-20 keV, com colimador de 8 mm, detector de deriva de silício com janela de grafeno e resolução 145 eV, e realizada no Laboratório de Relação Solo-planta na UFLA.

2.3.2 Difração de raio-X (DRX)

O ensaio de difração de raio-X foi utilizado para observar a mineralogia do material. A estrutura cristalina dos materiais foi analisada identificando padrões de difração obtidos utilizando um difratômetro de raios-X Shimadzu modelo XDR 6100, com radiação Cu, 40kV, 30 mA, faixa de varredura de 10° a 70°, resolução de 0,02° a 2° min⁻¹, realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis da UFLA.

2.3.3 Termogravimetria (TGA)

Este ensaio foi realizado para o LETA seco em estufa, na Central de Análises e Prospecção Química da UFLA (CAPQ). Para sua execução, a amostra foi calcinada em atmosfera inerte (N₂) e controlada, sendo a variação gravimétrica monitorada em tempo real com o uso de uma balança de alta precisão. Dessa forma, foi possível correlacionar a variação gravimétrica em intervalos específicos de temperatura aos minerais correspondentes. O equipamento utilizado é do modelo Shimadzu DTG-60A/60AH, composto por balança, forno, suporte de amostra, sensor de temperatura, programador térmico, registrador (TA-60WS) e controlador de fluxo e atmosfera (FC-60A). O ensaio foi conduzido em uma faixa térmica entre 30 °C a 1000 °C, com aquecimento de 10°C/min, em uma atmosfera de nitrogênio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação da pozolanicidade do LETA

3.1.1 Método de Chapelle modificado e desempenho com cimento *Portland* 28 dias

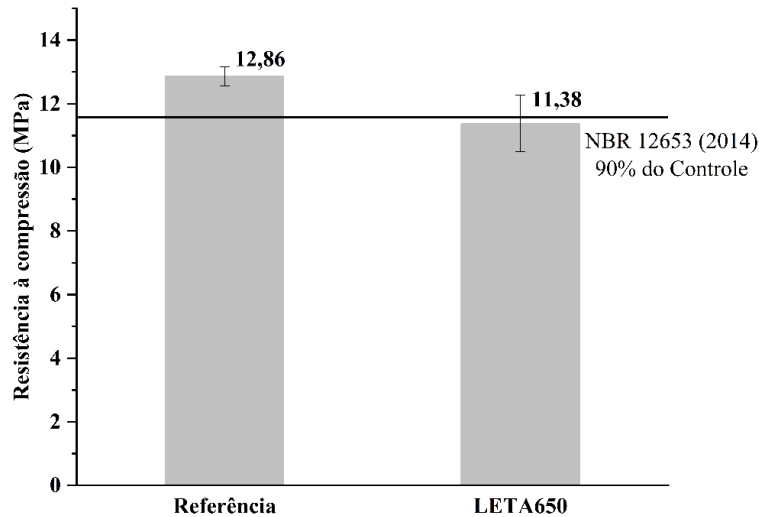
Segundo Raverdy *et al.* (1980) a adição mineral para ser classificada como pozolana precisa apresentar no mínimo 330 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g. Os testes de Chapelle resultaram em valores 392,44, 387,42, 514,60, 718,77 e 258,56 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de resíduo para o LETA100°C, LETA450°C, LETA550°C, LETA650°C e LETA750°C. Os tratamentos térmicos de 100, 450, 550 e 650 750 °C são superiores ao limite mínimo estabelecido por Raverdy *et al.* (1980). Os resultados nos permitem definir o LETA uma pozolana em todas as amostras testadas, exceto a submetida a 750 °C.

O material apresentou pozolanicidade desde a sua constituição natural apenas seco em estufa a 100°C, porém neste trabalho, foi escolhido o LETA650, por apresentar maior reatividade, sendo este o valor de 718,77 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de resíduo. Ahmad T., Ahmad K. e Alam (2018), obtiveram classificação semelhante por meio do teste direto de Chapelle para do lodo gerado na retrolavagem de filtros calcinados a 800°C em Ghaziabad, Índia, o qual encontraram 560 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de resíduo. Alex *et al.* (2024), constataram desempenho similar ao avaliarem a cinza de casca de arroz, encontraram valores de consumo de hidróxido de cálcio variando entre 622,96 a 1085,46 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de resíduo, indicando alta reatividade pozolânica. Portanto, o LETA650 se qualifica como pozolana artificial e pode ser utilizado como substituto parcial do cimento *Portland*.

A Figura 3, dispõem o resultado de desempenho do LETA650 no teste com cimento *Portland* 28 dias. Os ensaios realizados resultaram em valores de resistência à compressão de 12,86 MPa para a pasta de cimento de referência e de 11,38 MPa para a amostra contendo LETA650, correspondendo a um índice de atividade pozolânica (IAP) de 88,5%. Conforme disposto na NBR 12653 (ABNT, 2015) um material é classificado como pozolânico quando apresenta, no mínimo, 90% da resistência à compressão da pasta de referência. Assim, o LETA650 não alcançou o limite mínimo estabelecido pela normatização brasileira. Porém, é importante destacar que o valor exigido pela norma brasileira é mais rigoroso quando comparado a outras normas internacionais, como a ASTM C618-19 (2019), que aceita materiais com no mínimo 75% da resistência da referência para serem considerados pozolânicos.

Portanto, embora o LETA650 não atenda aos padrões normativos brasileiros, isso não impede o uso do material como pozolana.

Figura 3 – Resistência à compressão aos 28 dias com cimento *Portland*, argamassa de referência (100% cimento) e LETA650 (75% cimento e 25% LETA650).



Fonte: Da autora (2025).

Os resultados de índice de atividade pozolânica (IPA) do LETA650 apresenta valores semelhantes a outros materiais pozolânicos descritos na literatura. Vilela *et al.* (2020) identificaram um IPA de 83,32% para um resíduo de mineração proveniente localizada no município de Mariana-MG. Em outro estudo, Agra *et al.* (2023) relataram um IPA de 89,63% para o LETA calcinado a 600 °C. Além disso, Godoy *et al.* (2020) investigaram substituições variadas de LETA calcinado a 600°C na produção de cimentos *Portland* blendados, obtendo resultados promissores nas proporções de 14% e 35% de resíduo, atendendo às normas NBR 16697 (ABNT, 2018) e EN 197-1 (ECS, 2011). Em ambas as investigações, o LETA apresentou comportamento pozolânico favorável à sua aplicação como adição mineral ao cimento *Portland*. Os resultados demonstraram, ainda, que o reaproveitamento desse resíduo por meio de sua valorização contribui para práticas sustentáveis na construção civil.

3.1.2 Análise de aptidão

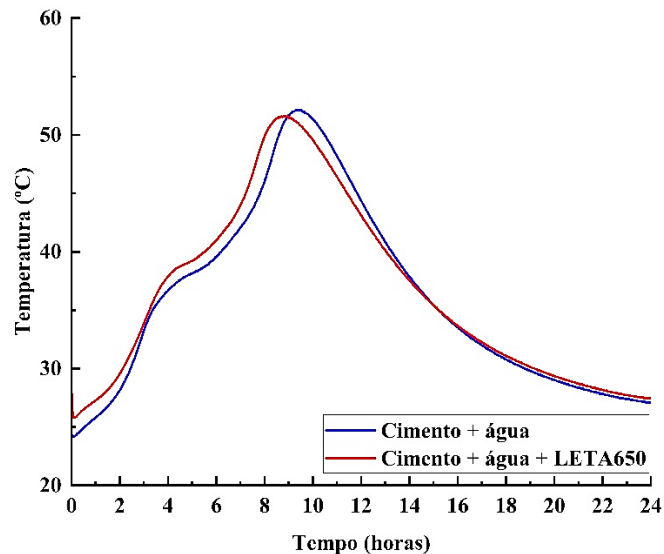
A classificação do efeito de inibição de adição de materiais pozolânicos na cura do cimento, de acordo com Okino *et al.* (2004), está disposta na Tabela 3. A Figura 4, demonstra as curvas obtidas no teste de inibição da cura do cimento, do tratamento referência constituído por cimento + água e do tratamento cimento + água + LETA650.

Tabela 3 – Classificação do efeito de inibição de materiais pozolânicos na cura do cimento.

Índice de hidratação (%)	Classificação
$I < 10$	Baixa inibição
$10 \leq I < 50$	Moderada inibição
$50 \leq I \leq 100$	Alta inibição
$I > 100$	Extrema inibição

Fonte: Modificada de Okino *et al.* (2004).

Figura 4 – Curva de inibição do cimento + água e do cimento + água + LETA650.



Fonte: Da autora (2025).

A pasta de cimento de referência atingiu uma temperatura máxima de hidratação de 52,15 °C em 10 horas de ensaio. Já a pasta com adição do material pozolânico apresentou uma temperatura máxima de hidratação de 51,62 °C em 9 horas. Assim, a incorporação do LETA650 resultou em uma leve redução tanto na temperatura quanto no tempo de hidratação, sendo assim, a presença do LETA650 reduz a temperatura de hidratação do cimento *Portland*. Convertendo os dados obtidos em índice de inibição, como proposto por Okino *et al.* (2004), calculou-se um valor de 7,33% para o LETA650, conferindo a amostra um índice de inibição baixo.

É possível observar que a incorporação de 25% de LETA650 na pasta de cimento possui baixa influência na cinética de hidratação e na dispersão da fase ligante, conforme disposto na Tabela 7. Portanto, a performance da matriz cimentícia contendo esse percentual de resíduo como adição pozolânica e justificando sua investigação em aplicações de maior escala.

Os valores do índice de inibição do LETA650 na hidratação do cimento *Portland* são semelhantes a outros encontrados na literatura. Yang *et al.* (2023) avaliou diferentes tratamentos térmicos para ativação pozolânica do lodo de ETA. As análises das reações de hidratação em matrizes cimentícias contendo LETA indicaram que, a partir de temperaturas superiores a

400°C, o processo de hidratação do cimento *Portland* ocorreu normalmente, evidenciando a compatibilidade do resíduo tratado com o sistema cimentício. Complementarmente, Liu *et al.* (2021) avaliou a redução de hidróxido de cálcio em compósitos formulados com cimento *Portland* e LETA calcinado a 800°C. A partir da curva de saturação, foi possível verificar o consumo adicional de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, confirmando a ocorrência da reação pozolânica e, conseqüentemente, a natureza reativa do material.

Nesse contexto, a temperatura estudada nesta pesquisa de 650 °C, está dentro do indicado na literatura, considerando a faixa de temperatura média adequada para a incorporação do LETA como pozolana em materiais cimentícios está entre 400 a 800°C. Nessas temperaturas de tratamento, a sílica promove a hidratação para formar C-S-H no ambiente alcalino. Segundo Yang *et al.* (2023), o LETA tratado a 600°C possui uma maior reatividade por causa da desidroxilação, porém, a temperatura ideal estudada para o tratamento do material é 800°C, devido ao alumínio mal cristalizado e o silício amorfo se envolverem na hidratação e o C-A-S-H ser o principal produto da cinética de hidratação.

3.2 Caracterização física e classificação geotécnica LETA

3.2.1 Análise física do LETA

A Tabela 4, dispõem os resultados referentes a caracterização física do LETA seco em estufa, sendo estes a umidade (w), massa específica dos grãos (ρ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e os diâmetros característicos das partículas (d_{30} , d_{50} e d_{90}). Na Figura 5, está disposto o gráfico com a curva granulométrica das partículas.

Tabela 4 – Características físicas do LETA natural.

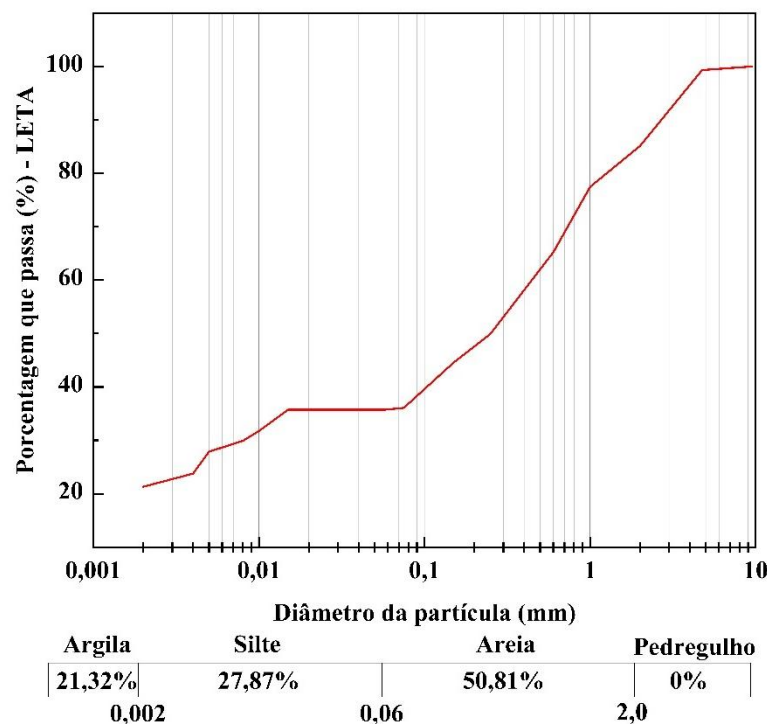
Índices Físicos		Diâmetros característicos		Limites de Consistência	
w (%)	2,91	d_{30} (mm)	0,0079	LL (%)	47
ρ_s (g/cm ³)	2,327	d_{50} (mm)	0,25	LP (%)	43
		d_{90} (mm)	2,70	IP (%)	4

Fonte: Da autora (2025).

O LETA foi seco em estufa para padronização da umidade para a realizar a caracterização do material, sendo a umidade final obtida de 2,91%. O resultado da massa específica dos grãos média do LETA após secagem em estufa a 100 °C, foi de 2,327 g/cm³, valor comum em solos orgânicos. Este valor é semelhante a outros obtidos na literatura, como ao de 2,36 g/cm³ encontrado por Agra *et al.* (2023) para o LETA de Botafogo em Igarassu/PE

e ao encontrado por Roque *et al.* (2021) para o lodo da represa Taiacupeba em Suzano/SP. Conforme O’Kelly (2016), a massa específica dos grãos do LETA é inversamente proporcional ao teor de matéria orgânica, de modo que concentrações elevadas de matéria orgânica tendem a reduzir esse parâmetro. O autor também destaca que essa propriedade é fortemente influenciada pela proporção e peso específico dos aditivos químicos utilizados durante o tratamento da água.

Figura 5 – Curva granulométrica do LETA.



Fonte: Da autora (2025).

O LETA apresentou limite de liquidez (LL) de 47% e índice de plasticidade (IP) de 4%, indicando comportamento de baixa plasticidade. Como disposto no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o LETA enquadra-se como silte arenoso ou argiloso de baixa plasticidade (ML ou CL), semelhante a argilas caulínicas ou ílticas com plasticidade relativamente reduzida. Pela classificação Transportation Research Board (TRB), o LETA é classificado como solo A-5, caracterizado como siltoso de plasticidade moderada, com comportamento diatomáceo ou micáceo e alta elasticidade, indicado pelo valor de LL (DNIT, 2006).

O LETA com base nos valores obtidos para os limites de consistência apresenta comportamento de um solo silto-arenoso de baixa plasticidade (ML). Roque *et al.* (2021) classificaram o LETA desidratado como silte de baixa plasticidade (ML), indicando pouca atividade de finos. Em contrapartida, Tsugawa, Pereira e Boscov (2017) classificaram o LETA

in natura como silte orgânico de alta plasticidade (MH). Essa discrepância no comportamento do LETA seco e *in natura* pode ser atribuída ao método de secagem, que pode reduzir a plasticidade do material e a sua capacidade hidrofílica. A classificação do LETA apresenta grande variabilidade na literatura, sendo influenciada pela identificação do solo da região onde a ETA está localizada, da proporção de material orgânico e os componentes químicos dos coagulantes usados no tratamento da água.

A granulometria do LETA não apresentou partículas com grânulos maiores que 4,75 mm, assim, o ensaio de granulometria foi realizado por sedimentação e peneiramento do material lavado e retido na malha de 0,075 mm após a sedimentação. Durante o ensaio de sedimentação do LETA, ocorreu a formação de espuma após agitação do material em solução defloculante no dispersor. Para que a espuma se dissipasse e o nível da suspensão atingisse o volume de 1000 ml na proveta, conforme estabelecido pela norma técnica aplicável, foi necessário realizar a lavagem cuidadosa da espuma com o auxílio de uma pisseta contendo água destilada, possibilitando assim o início adequado do ensaio.

O LETA apresentou uma granulometria contendo 49,19% de finos (argila e silte) e 50,81% de areia, conforme indicado na Figura 3. Esses resultados são consistentes com o diâmetro característico do material, onde 50% das partículas possuem tamanho inferior a 0,25 mm. Adicionalmente, a granulometria revela que menos de 50% do material possui partículas menores que 0,075 mm, atribuindo ao LETA características predominante de areia. Em solos com mais de 12% de finos, suas características podem ser avaliadas utilizando a Carta de Plasticidade de Casagrande dos solos, considerando os índices de consistência e a localização do índice de plasticidade abaixo da linha A no gráfico de plasticidade, neste caso, indicaram um comportamento semelhante ao silte e de solo não coeso. Assim, o LETA é categorizado como areia siltosa (SM).

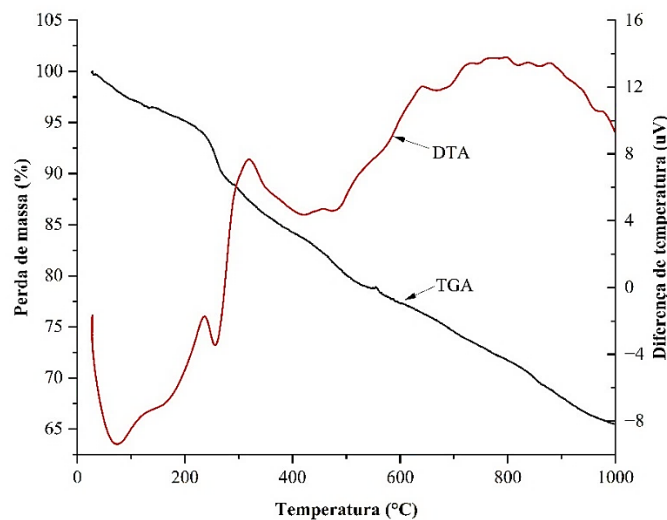
Ao analisar os resultados e considerando a baixa plasticidade e coesão do material, o LETA foi classificado como areia siltosa. A literatura apresenta variações nas características desse material. Tsugawa, Pereira e Boscov (2017) identificaram um solo do município de Cubatão-SP como silte de alta plasticidade (MH), com 68,4% de argila e 26% de material orgânico. Contudo, Cremades, Cusidó e Artega (2018) encontraram 86,6% de silte e 2,8% de argila no LETA proveniente de Barcelona, Espanha. Embora ambos os estudos tenham identificado um elevado percentual de partículas finas, os teores diferem significativamente, evidenciando ser necessário uma avaliação individual do LETA. O conhecimento específico

do LETA permite não apenas compreender suas propriedades específicas, mas também determinar sua aplicação mais adequada.

3.3 Análise química e mineralógica do LETA

O comportamento térmico do LETA foi analisado por meio das curvas TGA/DTA, conforme apresentado na Figura 6. As curvas foram traçadas simultaneamente para evidenciar a correlação entre a perda de massa e possíveis mudanças de fase. A calcinação do LETA até 1000 °C resultou em uma redução de massa total de 34,54%, sendo aproximadamente 4,8% atribuídos umidade retida nas partículas e a decomposição da matéria orgânica de 8,3%.

Figura 6 – Curva TGA/DTA do LETA100°C.



Fonte: Da autora (2025).

O pico endotérmico observado entre 30 °C a 100 °C pode ser associado à evaporação da água da superficial presente na matéria orgânica e em aluminossilicatos (Ling *et al.*, 2017). Essa fase endotérmica estende-se de 100 °C até 250 °C, com uma taxa reduzida de perda de massa. Adicionalmente, a queima da matéria orgânica é evidenciada por uma reação exotérmica de 250 °C a 450 °C, resultando em perda de massa de 8,3% (Ling *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017).

Na desidroxilação ocorre na faixa endotérmica entre 450 °C e 650 °C, com uma perda de massa de 5,7%, semelhante à conversão de caulinita em metacaulim, concedendo um estado amorfo ao lodo calcinado (Agra *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023). Esse processo se prolonga na faixa térmica de 650 °C a 850 °C, período no qual ocorre a descarbonização com a dissipação de CO₂ e o desenvolvimento de hematita (Tironi *et al.*, 2017). A fase final, caracterizada por um evento exotérmico até 1000 °C, observa-se um rearranjo estrutural que se segue na formação de mulita, acompanhado pela diminuição reatividade pozolânica (Godoy *et al.*, 2020).

Os resultados da composição química dos materiais (LETA100°C e LETA650°C) analisados por fluorescência de raio-X (FRX), está exibido na Tabela 6. Considerando sua constituição química, a soma dos óxidos do LETA, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é superior a 70% indicando um potencial pozolânico significativo, conforme os parâmetros exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Porém, para que esses óxidos contribuam de forma mais efetiva nas reações pozolânicas, é essencial que estejam predominantemente de modo amorfo (Agra *et al.*, 2023).

Tabela 6 – Principais elementos químicos presentes no LETA100°C e LETA650°C.

Composição química	LETA100°C	LETA650°C
SiO_2	20,64	20,64
Fe_2O_3	45,32	49,36
Al_2O_3	10,02	11,39
K_2O	0,11	0,12
MgO	-	0,96
TiO_2	0,38	0,42
CaO	1,52	1,67
MnO	0,26	0,30
SO_3	0,39	0,40
Cr_2O_3	0,06	0,67
Perda de Ignição (PI)	34,54 %	-

Fonte: Da autora (2024).

Nesta pesquisa, foram encontrados para o LETA100°C e LETA650°C, os percentuais de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, são de 75,97% e 81,39%, respectivamente. Os resultados confirmam a existência de sílica e óxido de ferro como componentes majoritários. A alta concentração de óxido de ferro e alumina no material pode estar associada ao tipo de coagulante utilizado na ETA, bem como, à composição do solo na região de captação da água.

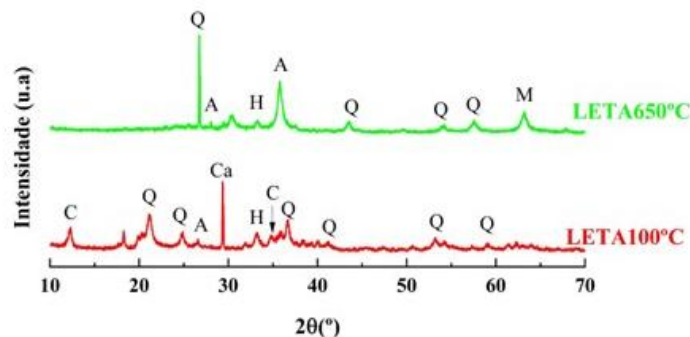
Considerando resultados encontrados na literatura (González *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021; Godoy *et al.*, 2021; Agra *et al.*, 2023), percebe-se que o LETA analisado possui quantidades mais substanciais de Fe_2O_3 do que os valores médios da literatura. O teor substancial de Fe_2O_3 e Al_2O_3 é atribuído aos diferentes agente floculantes utilizado na ETA-UFLA (sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio) e característica química do solo da região de captação da água, os resultados encontrados são semelhantes aos das análises de TG e DRX.

Além disso, destaca-se que a perda de ignição (PI) do LETA100°C, é significativamente superior em relação aos valores encontrados na literatura (Gomes *et al.*, 2019; González *et al.*, 2020; Godoy *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Agra *et al.*, 2023). Esse fato, resulta de fatores tais

como, a desidroxilação da caulinita e ao teor de composto orgânico presente no material, o que foi possível observar também na análise termogravimétrica. No que se refere à presença de álcalis, os quais não foi encontrado Na_2O e o teor de K_2O é inferior aos encontrados na literatura. O que demonstra a eficiência reativa da pozolana, pelo fato desses óxidos serem expansivos e reagirem com alguns compostos formados durante a hidratação do cimento, prejudicando o processo de ativação pozolânica (Berenguer *et al.*, 2021).

Na Figura 7, está disposto os difratogramas mineralógicos dos materiais avaliados, e a Tabela 7, dispõem as fases minerais majoritárias encontradas no LETA100°C, LETA650°C.

Figura 7 – Difratogramas de raio-X do LETA100°C, LETA650°C.



Fonte: Da autora (2025).

Tabela 7 – Fases minerais majoritárias encontradas no LETA100°C, LETA650°C por DRX.

Símbolo	Mineral	Fórmula química	LETA100°C	LETA650°C
Q	Quartzo	SiO_2	x	x
H	Hematita	Fe_2O_3	x	x
A	Albita	$\text{Na}_{0,98}\text{Ca}_{0,02}\text{Al}_{1,02}\text{Si}_{2,98}\text{O}_8$	x	x
Ca	Calcita	CaCO_3	x	
C	Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	x	
M	Mulita	$3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$		x

Fonte: Da autora (2025).

Os principais componentes cristalinos encontrados no LETA100°C foram o quartzo, caulinita e albita (Figura 7). O LETA geralmente possui elevada proporção de $\text{Al}(\text{OH})_3$ produzido por flocculação, porém, seu pico de difração não foi detectado devido a natureza coloidal amorfa do material (Yang *et al.*, 2023). Os resultados demonstram predominância de quartzo e albita, associados a hematita e mulita. Observa-se que o lodo calcinado não possui presença de caulinita, o que significa que a transformação de caulim-metacaulim (desidroxilação) está completa (Godoy *et al.*, 2020).

Foi detectado também, a presença da fase de mulita, porém, ainda não está estável, devido não ter sido exposta a temperatura adequada de calcinação. A mulita estável se forma

no LETA a partir de faixas térmicas superiores a 1000°C, uma vez que maiores temperaturas de calcinação irá reduzir os locais de defeitos dos cristais contendo alumínio, resultando na redução da atividade do alumínio (Kovarík, Bowden e Szanyi, 2021; Yang *et al.*, 2023). O LETA calcinado a 650°C apresentou uma mudança cristalina no material, porém, o arranjo e a conformação da coordenação de Si e Al não mudaram fundamentalmente. A principal modificação é semelhante à remoção de água entre camadas na organização da caulinita e uma mudança na estrutura do metacaulim (Godoy *et al.*, 2020; Agra *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023).

A Tabela 7, demonstra as fórmulas químicas dos materiais que o alumínio e o silício estão distribuídos na coordenação cristalina do LETA, em conjunto com o ferro. Os átomos ativos de Si e Al por calcinação tornam o material pozzolânico ativo, ou seja, possui potencial para participar nas fases hidratação do cimento (Jia; Lu; Yang, 2021). Portanto, esses resultados confirmaram a viabilidade de o LETA650°C ser utilizado como material cimentício suplementar sob a ótica da sua composição mineral.

4 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que o lodo de estação de tratamento de água (LETA), após calcinação a 650 °C, possui características técnicas e ambientais adequadas para substituir parcialmente o cimento *Portland* em composições de solo-cimento destinadas à fabricação de tijolos ecológicos. A análise física e química inicial classificou o LETA como um material não perigoso e não inerte, de natureza silto-arenosa e baixa plasticidade, cuja variabilidade composicional exige avaliação individualizada prévia. A calcinação mostrou-se essencial para ativar sua reatividade, visto que o material *in natura* apresentou perda de massa significativa (34,54% até 1000 °C), incluindo 4,8% de água retida e 8,3% de decomposição de material orgânico.

A reatividade pozolânica do LETA foi comprovada em temperaturas superiores a 100 °C, com desempenho otimizado após tratamento térmico a 650 °C. Nessa condição, o material alcançou o índice de atividade pozolânica (IAP) de 88,5% em ensaios de resistência à compressão, contribuiu para a diminuição do calor liberado durante a hidratação do cimento *Portland*, indicando compatibilidade e baixo risco de inibição das reações. Os resultados da constituição química do LETA650 apresentaram, 81,39% de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, atendendo aos requisitos normativos brasileiros para pozolanas, bem como, não foi detectado a presença de álcalis o que garantiu estabilidade à matriz cimentícia. As análises de difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TGA) confirmaram a presença de metacaulim e de quartzo e albita, evidenciando a capacidade do material de participar ativamente das interações químicas entre o cimento e a água.

A integração entre métodos padronizados (como o método de Chapelle modificado e ensaios mecânicos) e análises mineralógicas robusteceu a confiabilidade dos resultados, validando o LETA calcinado como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável. Ao substituir parcialmente o cimento *Portland*, esse resíduo promove a mitigação dos efeitos ambientais associados ao seu descarte inadequado, além de promover práticas de economia circular no setor de construção. Portanto, o estudo conclui que a incorporação do LETA como pozolana em tijolos ecológicos representa uma alternativa sustentável, tecnicamente viável e compatível com os princípios de desenvolvimento sustentável, sem comprometer o desempenho do produto.

REFERÊNCIAS

- AGRA, T. M. S. *et al.* Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. **Applied Clay Science**, v. 236, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106870>.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v.124, p. 1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-19**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento *Portland* - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- BENLALLA, A. *et al.* Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171-177, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>.
- BERENGUER, R. *et al.* Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides. **Journal of Building Engineering**, v.41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102358>.

- CHAKRABORTY, A. K. New Data on Thermal Effects of Kaolinite in the High temperature Region. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 71, p. 799–808, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1023318008031>.
- CREMADES L.V.; CUSIDÓ J.A.; ARTEGA 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: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, ed. 3, p. 274, 2006.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 197-1: Cement Part 1 - Composition, Specifications, and Conformity Criteria for Common Cements**. Brussels, 2011.
- GODOY, L. G. G. *et al.* Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00329>.
- GOMES, S. de C. *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 145, p. 148-159, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.
- GONZÁLEZ, K. B. *et al.* Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, v. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>.
- GONZÁLEZ-CORROCHANO, B. *et al.* Effect heating dwell time has on the retention of heavy metals in the structure of lightweight aggregates manufactured from wastes. **Environmental Technology**, v. 39, p. 2511-2523, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1358768>.
- HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with *Portland* cement. **Forest Products Journal, Madison**, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.
- JIA, Q.; LU, J.; YANG, J. Investigation on the feasibility of resource utilizing drinking water treatment sludge as a pozzolan to prepare cement-based materials. **E3S Web of Conferences**, v. 267, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126702006>.
- KOVARIK, L.; BOWDEN, M.; SZANYI, J. High temperature transition aluminas in d-Al₂O₃/h-Al₂O₃ stability range: Review. **Journal of Catalysis**, v. 393, p. 357-368, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.10.009>.
- LI, D. *et al.* 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**, v. 277, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122330>.
- LIMANI, H. *et al.* Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100050>.
- LING, Y. P. *et al.* Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, v. 143, p. 300–306, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.04.007>.

LIU, Y. *et al.* The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105291>.

NAZIR, A. K. *et al.* Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing it as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p. 30490-30501, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2>.

O'KELLY, B. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. **Geotechnical Research**, v. 3, n. 4, p. 148-179, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/jgere.16.00013>.

OKINO, E. Y. A. *et al.* CHAPA AGLOMERADA DE CIMENTO-MADEIRA DE *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p. 451-457, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000300016>.

RAVERDY, M. *et al.* Appreciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires. In: **7th International Congress Chemical Cement**, Paris, v.3, p. 36-41, 1980. Paris: [s.n.], 1980.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. Ed. Blucher, 2009.

ROQUE, A. *et al.* CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E GEOTÉCNICA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA TAIACUPEBA. **Geotecnica**, n. 151, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.03>.

ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works. **Environmental Challenges**, v. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100465>.

RUVIARO, A. *et al.* Eco-efficient cement production: Investigating water treatment plant sludge and eggshell filler use in LC3 systems. **Construction and Building Materials**, v. 394, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132300>.

TIRONI, A. *et al.* Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement and Concrete Composites**, v.37, p. 319–327, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>.

TSUGAWA, J. K.; PEREIRA, K. F. S.; BOSCOV, M. E. G. Thixotropy of Sludge from the Cubatão Water Treatment Plant, Brazil. **Geotechnical Frontiers**, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784480472.090>.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

YANG, J. *et al.* Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 365, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027>.

ZHOU, D. *et al.* Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1180–1192, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.098>.

ARTIGO 2 – Tijolos ecológicos produzidos com lodo de estação de tratamento de água (LETA) em substituição parcial ao cimento *Portland*

Artigo redigido conforme a norma NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

Este estudo investigou o reaproveitamento do lodo de estação de tratamento de água (LETA), submetido a tratamento térmico a 650°C, como material pozolânico para substituição parcial do cimento *Portland* na fabricação de tijolos ecológicos. Misturas de solo-cimento-LETA foram preparadas com 90% de solo e 10% matriz cimentícia, substituindo-se o cimento Portland por LETA nas proporções de 0, 5, 10, 20 e 40%. Por fim, determinaram-se a $W_{ótima}$ e $\rho_{máxima}$ das misturas para fabricação de tijolos ecológicos. Para cada composição, foram confeccionados 15 tijolos, os quais foram submetidos a ensaios de resistência mecânica à compressão, perda de massa por imersão e absorção de água. A análise estatística fatorial foi aplicada para otimização das misturas e definição da composição ideal. As propriedades tecnológicas avaliadas incluíram resistência à compressão, perda de massa por imersão, absorção de água, durabilidade, condutividade térmica, além de análises química, mineralógica e morfológica. O percentual de 7,3% de substituição do cimento por LETA650 foi identificado como a proporção ótima na mistura. A incorporação de 5% de LETA650 em substituição ao cimento *Portland* resultou nas melhores propriedades mecânicas, com destaque para a resistência à compressão, além de redução na absorção de água e perda de massa, quando comparada à referência. Foi possível substituir o solo pelo resíduo sem variação significativa das propriedades em até 10% comparando com a referência. A análise estatística fatorial aplicada à otimização das misturas demonstrou-se eficaz, conforme evidenciado pela concordância entre os dados experimentais e os valores previstos pelo modelo matemático. A produção de tijolos solo-cimento com substituição parcial do cimento por LETA revelou-se uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável, promovendo o reaproveitamento adequado do resíduo e contribuindo para a redução do consumo e da extração de matérias-primas naturais.

Palavras-chave: Tijolos solo-cimento; lodo de ETA; materiais sustentáveis.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e a expansão urbana houve uma elevação substancial na demanda por novas construções e infraestruturas aprimoradas, além de uma maior procura por materiais de construção globalmente. Nesse contexto, a construção civil desempenha um papel fundamental nesse processo, embora seja também uma das atividades mais intensivas na demanda de recursos naturais e energia em seus processos produtivos.

Estima-se que o setor de construção utiliza mais da metade dos recursos naturais extraídos do planeta para a execução e manutenção do ambiente construído. Esse cenário é agravado pelo consumo expressivo de energia, devido à emissão de gases de efeito estufa e elevada demanda hídrica envolvida nas etapas produtivas (CBCS, 2014). Frente a esses desafios, o setor de construção civil tem intensificado seus esforços na busca por soluções sustentáveis que contribuam para diminuir a demanda por recursos naturais e mitigação dos impactos ambientais associados à sua cadeia produtiva.

Nesse contexto, o tijolo solo-cimento conhecido como tijolo ecológico, representa uma alternativa alinhada ao desenvolvimento sustentável. Sua produção não envolve queima, eliminando a emissão de gases nocivos ambientalmente e reduzindo significativamente o consumo energético associado à extração de matérias-primas. Nesse sentido, é possível fabricar os tijolos diretamente no canteiro de obras (Nascimento *et al.*, 2021). Assim como, possui a vantagem de incorporar resíduos industriais e agroindustriais, sem comprometer suas propriedades técnicas e, sob determinadas condições, até melhorando seu desempenho (Filho *et al.*, 2021).

Diversos estudos destacam a viabilidade técnica do uso de resíduos como substituintes parciais do cimento Portland, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas dos compósitos em função da atividade pozolânica desses materiais. Como por exemplo, Nascimento *et al.* (2021) investigaram o uso de resíduo de corte de granito, enquanto Vilela *et al.* (2020) e Beulah *et al.* (2021) avaliaram resíduos de minério de ferro. Outras pesquisas exploram materiais como resíduos de scheelita (Filho *et al.*, 2021), cinzas de casca de arroz (Alex; Dhanalakshmi; Ambedkar, 2016), escória de resíduos de catalisador (Lei; Pavia, 2024), cinzas vulcânicas (Belfiore *et al.*, 2020), lodo cerâmico de polimento (Al-Shugaa *et al.*, 2024), entre outros.

Nesse cenário, o lodo proveniente de estações de tratamento de água (LETA) é um resíduo gerado em grande escala em todo o mundo. O descarte inadequado do LETA representa um desafio para empresas de saneamento, devido ao risco à saúde pública e à vida aquática,

além, dos elevados custos associados ao manejo ambientalmente adequado. No Brasil, o sistema de tratamento de água atende aproximadamente 5451 municípios, abrangendo 201,7 milhões de habitantes, o que equivale a 99,3% da população do país. Em 2022, a quantidade de água tratada alcançou 17,9 bilhões de m³/ano, com um consumo médio per capita de 148,2 l/hab.dia (SNIS, 2023). O LETA representa aproximadamente 0,2 a 5% do volume total de água tratada (Richter, 2009). Com base nesse intervalo, estima-se que a geração diária de LETA atinja no Brasil cerca de 2,45 milhões de m³/dia, o que reforça a importância da adoção de estratégias eficientes para o seu manejo e disposição final.

O LETA apresenta umidade elevada, o que dificulta o seu descarte e amplifica os riscos ambientais quando disposto de forma inadequada no meio ambiente. Como alternativa sustentável, o LETA pode ser incorporado em materiais de construção, por exemplo, como material cimentício suplementar (MCS). Essa aplicação tem sido amplamente investigada, conforme pesquisas de Gomes *et al.*, 2019, de Godoy *et al.*, 2020, González *et al.*, 2020, Agra *et al.*, 2023, Ruviaro *et al.*, 2023 e Yang *et al.*, 2023.

Ruviaro *et al.* (2023) avaliaram a utilização conjunta de LETA e casca de ovo em substituição parcial de argila e calcário em sistemas de cimento argiloso calcinado calcário (LC₃), concluíram que essa combinação favorece a resistência mecânica e reduz as emissões de CO₂, permitindo altos índices de substituição.

Gomes *et al.* (2019) realizaram uma revisão sobre a aplicação do LETA na fabricação de materiais de construção, incluindo telhas, tijolos, agregados leves, cimento, concreto e geopolímeros. Para tijolos cerâmicos, a substituição máxima recomendada é de 10% de LETA com presença de alumínio, com mínima redução do desempenho mecânico. Para concreto estrutural e não estrutural, os autores sugerem substituições de até 5% de cimento ou areia por LETA, sem comprometer o desempenho mecânico. Ressaltaram ainda a importância de estudos mais aprofundados sobre a durabilidade, potencial lixiviação de elementos tóxicos, e manejo sustentável do LETA.

González *et al.* (2020) investigaram substituições de cimento por LETA em argamassas hidráulicas, utilizando proporções de 10% e 30% em peso com variadas faixas térmicas de calcinação. Ahmed, Muhammad e Ibrahim (2022) avaliaram os efeitos de teores crescentes de LETA (0, 5, 10, 15 e 20%) na densidade e resistência mecânica à compressão do concreto. Ambos os estudos observaram que substituições mais elevadas de cimento por LETA podem reduzir ligeiramente a densidade e a resistência à compressão dos materiais cimentícios.

Embora a literatura apresente resultados promissores sobre a aplicação do LETA como material cimentício suplementar, ainda há uma lacuna de pesquisas que investiguem seu uso como substituto do cimento *Portland* na fabricação de tijolos ecológicos. Essa abordagem inovadora visa explorar o potencial desse resíduo sustentável, tanto para mitigar os impactos ambientais decorrentes de sua disposição inadequada quanto para reduzir a demanda de cimento *Portland*. Além disso, pretende contribuir com informações relevantes para a evolução do estudo de materiais ecologicamente corretos e sustentáveis.

Diante do potencial de diversos resíduos para atuarem como substituintes parciais do cimento *Portland* em composições voltadas à construção sustentável, bem como, os avanços recentes na aplicação do lodo de estações de tratamento de água (LETA) como material cimentício suplementar (González et al., 2020; de Godoy et al., 2020; Nascimento et al., 2021), torna-se essencial investigar a viabilidade técnica desse resíduo termicamente tratado (650°C) em composições de solo-cimento para tijolos ecológicos. Embora estudos indiquem sua aplicabilidade, ainda há lacunas na otimização das proporções de substituição, na avaliação integrada de propriedades tecnológicas (absorção de água, resistência à compressão), além da avaliação de durabilidade em condições reais de uso.

Com base nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica do LETA calcinado (650°C) como material cimentício suplementar em substituição parcial ao cimento *Portland* na produção de tijolos ecológicos. Para isso, serão investigadas diferentes proporções de substituição (0, 5, 10, 20 e 40%) a partir de ensaios físicos, químicos e mineralógicos, visando a identificação da composição mais adequada sob o ponto de vista técnico e de desempenho. Além disso, propõe-se aplicar análise estatística fatorial para otimizar as misturas e validar a composição ideal mediante avaliação de propriedades tecnológicas, durabilidade e condutividade térmica, contribuindo assim para o estudo de materiais sustentáveis alinhados aos princípios da economia circular para construção civil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

O solo utilizado no experimento foi coletado no campus da Universidade Federal de Lavras-MG, localizado em Lavras-MG, nas coordenadas geográficas -21,2309044 (latitude) e -44,985250 (longitude). Após a coleta, o solo foi submetido a secagem ao ar livre, destorroado, peneirado e armazenado em recipientes plásticos do tipo “bombonas”, de forma a preservar suas propriedades físico-químicas.

O lodo de estação de tratamento de água (LETA) utilizado neste estudo foi coletado na estação localizada na UFLA, em Lavras-MG, nas coordenadas -21,2301427 (latitude), e -44,977938 (longitude). A Tabela 1, mostra as principais propriedades físico-químicas do LETA100 e LETA650 utilizado neste estudo.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do LETA100 e LETA650.

Propriedades	LETA100	LETA650
Composição química (%)		
SiO ₂	20,64	20,64
Fe ₂ O ₃	45,32	49,36
Al ₂ O ₃	10,02	11,39
K ₂ O	0,11	0,12
MgO	-	0,96
TiO ₂	0,38	0,42
CaO	1,52	1,67
MnO	0,26	0,3
SO ₃	0,39	0,4
Cr ₂ O ₃	0,06	0,67
Perda de Ignição (PI) (%)	34,54	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	75,97	81,39
IAP (%), método de Chapelle modificado	39,24	71,88
IAP (%), NBR 12653 (ABNT, 2015)	-	89,63
Propriedades físicas		
Umidade (%)	2,91	-
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,327	-
LL (%)	47	-
LP (%)	43	-
IP (%)	4	-

Fonte: Da autora (2025).

Inicialmente, o LETA foi submetido a secagem natural durante 15 dias. Em seguida, para viabilizar sua aplicação na pesquisa, foi realizada a redução granulométrica, de modo que os grãos passassem por uma peneira com abertura de 0,075 mm. A moagem foi conduzida em moinho de jarro equipado com 960 esferas cerâmicas, operando a uma rotação de 200 rpm, com processamento de 1 kg de material por 2 horas. Posteriormente, visando otimizar a ativação da pozolana no LETA, o material passou por um tratamento térmico por calcinação a 650 °C por 2 horas.

O aglomerante empregado foi o cimento *Portland* CII-F-32, da marca Cauê, por suas características técnicas adequadas para a fabricação de tijolo solo-cimento.

2.2 Caracterização física e classificação geotécnica do solo

Na Tabela 2, está disposto a identificação dos ensaios que foram realizados e as respectivas normas para a caracterização física do solo nesta pesquisa.

O solo foi classificado segundo o Transportation Research Board (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Além disso, realizou-se o ensaio de retração linear, seguindo os parâmetros estabelecidos pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED, 1984), para a verificação da presença de argilas expansivas em sua composição, cuja presença poderia comprometer a estabilidade dimensional dos tijolos.

Tabela 2 - Ensaios de caracterização física do solo.

Ensaio	Norma
Massa específica dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2017)
Teor de umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016)
Limites de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2017)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2020)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2018)

Fonte: Da autora (2025).

2.3 Caracterização química e mineralógica do solo

A caracterização química e mineralógica do solo, LETA seco em estufa e LETA650, foi realizada por meio dos ensaios de fluorescência de raio X (p-FRX), difração de Raios-X (DRX)

e termogravimetria (TG). As amostras foram maceradas e peneiradas até obter granulometria de aproximadamente 0,075 mm.

2.3.1 Fluorescência de Raio X (FRX)

A análise de fluorescência de raio-X foi empregada para identificar a composição de diversos materiais, permitindo uma análise qualitativa e quantitativa de cada elemento presentes na amostra. Essa análise foi realizada por meio do método de espectrometria de fluorescência de raio-X portátil (p-XRF) pelo equipamento Bruker® Tracer 5g com número de série 900G8270, o equipamento possui alvo de ródio, de 4 W e 15-20 keV, com colimador de 8 mm, detector de deriva de silício com janela de grafeno e resolução 145 eV, e realizada no Laboratório de relação solo-planta da UFLA.

2.3.2 Difração de raio-X (DRX)

A difração de raio-X foi utilizada para observar as principais fases cristalinas do material. A estrutura cristalina dos materiais foi analisada em difratômetro de raios-X Shimadzu modelo XDR 6100, com radiação Cu, 40kV, 30 mA, faixa de varredura de 10° a 70°, resolução de 0,02° utilizando uma faixa de varredura de 2° min⁻¹, realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis da UFLA.

2.4 Planejamento experimental para a produção de tijolos ecológicos

2.4.1 Estudo de misturas

As misturas foram realizadas por meio do ensaio de compactação com energia de compactação equivalente ao Proctor Normal, conforme descrito na norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Foram preparadas 5 misturas contendo 90% de solo e 10% de matriz cimentícia (MC), com substituições graduais de cimento *Portland* (CP) por LETA650 nas proporções, 0, 5, 10, 20 e 40% em massa. Esse ensaio foi conduzido para determinar os parâmetros de umidade ótima ($W_{ótima}$) e massa específica seca máxima ($\rho_{máxima}$).

Na Tabela 3, apresenta-se o planejamento experimental das misturas para o ensaio de compactação.

Tabela 3 – Estudo de misturas para obtenção da $w_{ótima}$ e $\rho_{máxima}$.

Tratamentos	10% MC		Solo
	CP	LETA	
T0	100%	0	90%
T5	95%	5%	90%
T10	90%	10%	90%
T20	80%	20%	90%
T40	60%	40%	90%

Fonte: Da autora (2025).

As misturas foram inicialmente preparadas combinando-se o solo e água necessários para cada corpo de prova. Essas combinações foram armazenadas em sacos plásticos e deixadas em repouso por 24 horas para favorecer a homogeneização. Após o descanso, adicionou-se os materiais cimentícios às misturas, repetiu-se a homogeneização, e a mistura foi transferida para prensa para a realização do ensaio de compactação, como disposto na norma NBR 7182 (ABNT, 2020).

Com base nas curvas de compactação obtidas, foram calculadas as médias aritméticas dos parâmetros e realizada a análise estatística χ^2 (qui-quadrado) para verificar se houve diferenças significativas entre os resultados. Os valores médios de $w_{ótima}$ e $\rho_{máxima}$ foram então utilizados para a moldagem dos tijolos ecológicos.

2.4.2 Produção dos tijolos ecológicos

Para avaliar de forma mais precisa a influência do resíduo do LETA nas características físicas e mecânicas das misturas solo-cimento-LETA e identificar a composição ideal que atenda aos requisitos normativos aplicáveis aos tijolos ecológicos, maximizando o aproveitamento do resíduo na mistura, foi adotado um planejamento experimental fatorial de misturas.

O planejamento experimental foi composto de 3 matérias-primas: solo, cimento e lodo de estação de tratamento de água, considerando seus quantitativos percentuais em massa as variáveis independentes. Já as variáveis respostas (variáveis dependentes) consideradas foram a resistência à compressão, absorção de água e perda de massa.

Para determinar a composição ideal, foram inicialmente produzidas 5 misturas experimentais de tijolos ecológicos de solo-cimento e 15 corpos de prova para cada composição. A composição base consistiu em 90% de solo, com substituições progressivas do cimento por LETA650, os teores de, 0, 5, 10, 20 e 40% em massa. O teor total de matriz

cimentícia utilizada foi de 10%, conforme determinado pela classificação do solo como A-4, como sugerido no manual proposto pela ABCP (2004).

O volume de água para a fabricação dos tijolos foi estabelecido por meio do ensaio de compactação seguindo o prescrito na norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Após o ensaio, foram calculadas as médias aritméticas da umidade ótima e peso específico máximo dos tratamentos. Paralelamente, foi conduzida uma análise estatística para verificar se houve diferenças estatística significativas entre os resultados.

A fabricação dos tijolos envolveu inicialmente, a mistura do solo e água, correspondente a cada corpo de prova, seguida de armazenamento em sacos plásticos por 24 horas para garantir a homogeneização adequada. Posteriormente, à matriz cimentícia foi incorporada (Figura 1a), e a mistura passou por nova homogeneização antes de ser moldada em prensa hidráulica (Figura 1b), conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Processo de produção dos tijolos ecológicos.



a) Homogeneização da mistura; b) compactação e modelagem dos tijolos; c) tijolo compactado; e, d) tijolos ecológicos. Fonte: Da autora (2025).

A cura foi dividida em duas partes: nos primeiros 7 dias, os tijolos foram submetidos à umidificação 3 vezes ao dia (Figura 1d); em seguida, foram mantidos em uma câmara úmida modificada por 21 dias, totalizando um período de cura de 28 dias, conforme critérios

estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2013). A fabricação dos tijolos seguiu as especificações das normas NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012), além das diretrizes da ABCP (2004).

Os tijolos foram moldados em prensa hidráulica da Verde Equipamentos com motor de 7,5 cv, com as seguintes medidas: 25 x 12,5 x 6 cm (comprimento x largura x espessura) (Figura 1c).

Após a primeira etapa da moldagem dos tijolos ecológicos, foi realizada uma análise estatística visando à otimização dos dados e à definição da mistura ótima. A mistura otimizada foi, então, preparada e submetida à avaliação de suas características tecnológicas.

2.5 Densidade dos tijolos ecológicos

A caracterização dos tijolos ecológicos de solo-cimento foi realizada após 28 dias de cura. Os tijolos foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas, conforme os parâmetros propostos pela NBR 8492 (ABNT, 2012), para analisar a densidade, foram utilizados três corpos de prova escolhidos aleatoriamente. Foram retiradas três medidas da altura, do comprimento e largura, através de um paquímetro digital. A massa foi determinada por uma balança digital, com unidade de medida em gramas, e a densidade foi obtida pela Equação 1.

$$d = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 1.}$$

Onde: d é a densidade em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; m é a massa em g; e V é o volume em m^3 .

2.6 Ensaios de determinação das variáveis de resposta da composição da mistura ótima

2.6.1 Absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão

A absorção de água foi determinada seguindo o proposto pela NBR 8492 (ABNT, 2012), como observado na Equação 2, a qual refere-se ao cálculo do teor de absorção de água. O ensaio utilizou três corpos de prova por tratamento, os quais passaram por secagem em estufa a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, até atingir massa constante, e retirando a massa do tijolo seco. Posteriormente, foram imersos em água por 24 horas e após remover o excesso de água, determinou-se a massa saturada dos tijolos. A absorção de água de cada corpo de prova foi obtida empregando a Equação 2.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação 2.}$$

Onde: m_1 é a massa do tijolo seco em estufa (g); m_2 é a massa do tijolo saturado (g) e A é a absorção de água (%).

A perda de massa por imersão segue as determinações do ME-258 (DNIT, 2023). Os tijolos foram imersos em água até atingir aproximadamente 0,01 m acima da face superior dos tijolos, por 24 horas. A seguir, a massa que ficou submersa na água, foi coada com o auxílio de um coador de papel. O teor de perda de massa por imersão foi obtido pela Equação 3.

$$P_i = \frac{m_d \times 100}{m_o} \times 100 \quad \text{Equação 3.}$$

Onde: m_d é a massa do solo seco, desprendida do corpo de prova (g); m_o é a massa do solo seco (g) e P_i é a perda de massa por imersão (%).

O ensaio de resistência à compressão seguiu os parâmetros determinados pela NBR 8492 (ABNT, 2012), a qual orienta a preparação das amostras para o corte, posicionamento e capeamento e preparação do ensaio. Os tijolos foram cortados ao meio, perpendiculares à sua maior dimensão, e revestidos com suave camada de argamassa de cimento *Portland*, e a força aplicada durante o ensaio foi uma carga uniforme de 500 N/s. O equipamento utilizado foi uma máquina de teste universal modelo WDW-300 E.

2.6.2 Análise estatística: determinação da composição ótima

De posse dos resultados obtidos dos ensaios de determinação das variáveis de resposta (absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão), realizou-se a análise estatística. Com os valores obtidos das variáveis respostas foi definido os limites para a aplicação da otimização do experimento, determinando a mistura ideal, a qual corresponde ao melhor resultado simultâneo entre as propriedades físicas (absorção de água e perda de massa por imersão) e mecânica (resistência à compressão).

A composição ótima de solo-cimento-LETA650 foi realizada aplicando a função estatística Desejabilidade, no software Minitab® 2022. Para a definição da otimização das propriedades analisadas foram definidos limites inferiores e superiores, conforme os resultados mínimos e máximos obtidos na análise experimental dos tijolos. Para a adoção dos limites utilizados foi considerado valores referentes a normas técnicas nacionais e internacionais, sendo elas a NBR 8492 (ABNT, 2012), ME-258 (DNIT, 2023) e XP P13-901 (AFNOR, 2022).

2.7 Análise estatística: avaliação dos resultados das variáveis respostas e da mistura ótima

Neste trabalho, foram realizadas o teste de Dunnet, considerando a significância $\alpha = 0,05$, com o objetivo de avaliar o desempenho dos resultados encontrados para as variáveis respostas (absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão) e para os dados da mistura ótima (absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão), sendo este avaliado comparando-os ao tratamento controle (T0).

2.8 Ensaios de caracterização da mistura ótima

2.8.1 Caracterização física e mecânica

A caracterização física e mecânica da mistura otimizada foi conduzida utilizando os mesmos parâmetros empregados na obtenção das variáveis de respostas para obter a composição ideal. Para a análise de densidade, absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão, foram seguidos os critérios estabelecidos pela NBR 8492 (ABNT, 2012).

Foi realizado também avaliado a durabilidade dos tijolos por meio do ensaio de envelhecimento acelerado, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13554 (ABNT, 2012), que aborda a durabilidade do tijolo solo-cimento aplicando vários ciclos de molhagem e secagem. Após os 28 dias de cura, 3 corpos de prova foram submetidos a 6 ciclos de umedecimento e secagem, nos quais foram determinadas a absorção de água, a densidade e a perda de massa. Cada ciclo consistiu em uma imersão em água por 5 horas, seguidas de secagem a 71 ± 2 °C, por 42 horas.

2.8.2 Caracterização química, mineralógica, morfológica e térmica

A caracterização química, mineralógica e morfológica dos tijolos produzidos com a mistura ótima foi realizada por meio de ensaios fluorescência de raio X (p-FRX), difração de Raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e condutividade térmica, respectivamente. As amostras foram previamente maceradas e peneiradas até atingirem uma granulometria de aproximadamente 0,075 mm, com o intuito de adequá-las para a caracterização química e mineralógica. Por último, foi realizada a análise de condutividade térmica nos tijolos.

2.8.2.1 Fluorescência de Raio X (FRX)

A análise de fluorescência de raio-X foi empregada para identificar a composição de diversos materiais, permitindo uma análise qualitativa e quantitativa de cada elemento presentes na amostra. Esse ensaio foi realizado pelo método de espectrometria de fluorescência de raio-X portátil (p-XRF) pelo equipamento Bruker® Tracer 5g com número de série 900G8270, o equipamento possui alvo de ródio, de 4 W e 15-20 keV, com colimador de 8 mm, detector de deriva de silício com janela de grafeno e resolução 145 eV, e realizada no Laboratório de relação solo-planta da UFLA.

2.8.2.2 Difração de raio-X (DRX)

A difração de raio-X foi utilizada para observar as principais fases cristalinas do material. O ensaio foi realizado utilizando um difratômetro de raios-X Shimadzu modelo XDR 6100, com radiação Cu, 40kV, 30 mA, faixa de varredura de 10° a 70°, resolução de 0,02° com varredura de 2° min⁻¹, realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis da UFLA.

2.8.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise no MEV foi realizada no Departamento de Fitopatologia da UFLA utilizando um microscópio eletrônico de transmissão (MET) Zeiss EM 109, com amostras extraídas da superfície interna dos tijolos. Esta análise teve por objetivo avaliar o efeito da adição de LETA650 e sua correlação com as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos tijolos produzidos.

2.8.2.4 Condutividade térmica

A análise térmica seguiu o método proposto por Gandia *et al.* (2019) utilizando uma câmara isolada construída com painéis de MDP (painel de partículas de média densidade). Embaixo da câmara, foi instalada uma fonte de calor composta por uma lâmpada incandescente, controlada por um termóstato que mantém a temperatura constante em 323,15 K. Sensores foram posicionados na parte superior da câmara, no meio das amostras (tijolos), para monitorar as variações térmicas durante o teste. Os dados coletados pelos sensores foram registrados no Datalog e enviados para um computador, permitindo a comparação e armazenamento das

informações. A estabilização da temperatura foi alcançada após um período de amostragem de 6 horas. A condutividade térmica que passa pelos tijolos foi obtida através da Equação 4.

$$K = \frac{P * E}{\Delta T} \quad \text{Equação 4.}$$

Onde: K é a condutividades térmica (W/m.K); P é a radiação da lâmpada incandescente em (W.m²); E é a espessura da amostra (m); e ΔT é a diferença de temperatura para estabilização (k).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização física e classificação geotécnica solo

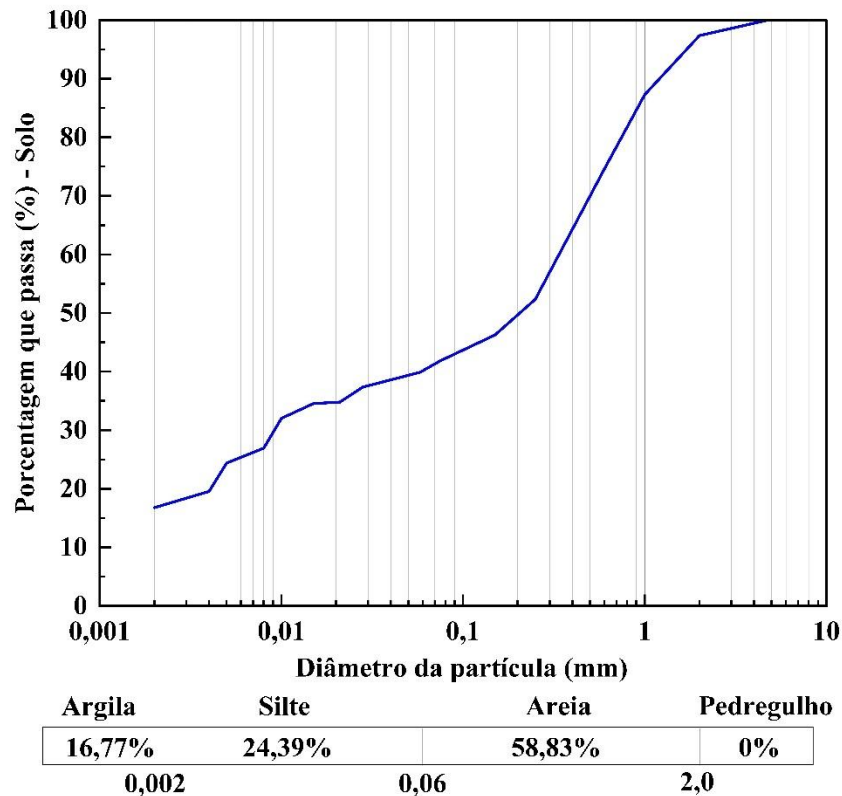
A Tabela 4, dispõem os dados referentes a caracterização física do LETA seco em estufa e do solo, sendo estes a umidade (w), massa específica dos grãos (ρ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), umidade ótima do solo ($w_{ótima,solo}$), massa específica seca máxima do solo ($\rho_{máx,solo}$) e os diâmetros característicos das partículas (d_{30} , d_{50} e d_{90}). Na Figura 2, está disposto o gráfico da distribuição granulométrica das partículas em do solo estudado.

Tabela 4 – Características físicas Solo.

Índices Físicos		Diâmetros característicos		Limites de Consistência		Compactação	
w (%)	1,73	d_{30} (mm)	0,009	LL (%)	40	$w_{ótima,solo}$ (%)	17,49
ρ_s (g/cm ³)	2,176	d_{50} (mm)	0,2	LP (%)	30	$\rho_{máx,solo}$ (g/cm ³)	1,752
		d_{90} (mm)	1,19	IP (%)	10		

Fonte: Da autora (2025).

Figura 2 – Curva granulométrica Solo.



Fonte: Da autora (2025).

Para a fabricação dos tijolos ecológicos, o solo deve atender a determinados requisitos estabelecidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012). Na Tabela 5, está apresentado as propriedades exigidas pela norma para a produção desses tijolos, como também os valores obtidos para o solo analisado. Conforme a NBR 10833 (ABNT, 2012), o LL deve ser menor ou igual a 45% e o IP menor ou igual a 18%.

Tabela 5 – Características do solo coletado.

Características estipuladas pela norma	Característica do solo
100% passando na peneira de 4,75 mm	100% passando na peneira de 4,75 mm
10 % a 50% passando na peneira de 75 μ m (0,075 mm)	42% passando na peneira de 75 μ m (0,075 mm)

Fonte: Da autora (2025).

O solo apresenta um LL igual 40 a e IP igual a 10, como disposto na Tabela 4. Os resultados apresentados na Tabela 5 e a Tabela 4, dispõem que o solo é adequado para a fabricação de tijolos ecológicos seguindo as diretrizes normativas. Além dos padrões normativos, o solo passou por caracterização para conhecimento de suas características físicas. Inicialmente o solo foi submetido a secagem em estufa para ajuste da umidade, atingindo um teor final 1,73%, adequado para a realização das análises necessárias.

A massa específica dos grãos média do solo após secagem em estufa a 100 °C, foi de 2,176 g/cm³, valor compatível com aqueles relatados na literatura para fabricação de tijolos ecológicos e tijolos de terra compactada. Estudos prévios indicam variações na massa específica do solo conforme a região do material utilizado. Rebello, Deekshitha e Shetty (2023) encontraram um valor de massa específica de 2,03 g/cm³ para um solo do município de Mangaluru na Índia, empregado na confecção de tijolos de terra compactada com solo-cimento-cinza volante. Nascimento *et al.* (2021) identificaram uma massa específica de 2,64 g/cm³ para um solo do município de Estância- SE, enquanto Paul, Islam e Elahi (2023) registraram 2,68 g/cm³ para um solo da região de Kodaillar Char, Narayanganj em Bangladesh.

Segundo a classificação dos solos pela Transportantion Research Board (TRB), o solo analisado enquadra-se na categoria A-4, caracterizando-se como um solo siltoso de plasticidade moderada. Já pelo Sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), o solo é identificado como silte arenoso (ML). No que se refere, a distribuição granulométrica, o solo apresenta 16,77% argila, 24,39% silte e 58,83% areia. Solos que serão estabilizados com cimento *Portland*, é estabelecido limites para a porcentagem de finos em sua constituição, não devendo o solo apresentar porcentagem maior que 50% de finos (CEPED, 1984).

Portanto, pode-se concluir que o solo apresenta predominância arenosa com fração siltosa, sendo classificado como A-4 segundo a TRB, e a porcentagem de finos de 41,16% está

conforme as diretrizes propostas. A classificação do solo, confere com outras na literatura para a produção de tijolos ecológicos. Por exemplo, Vilela *et al.* (2020) e Metzker (2019) classificaram um solo em uma região localizada em Lavras-MG, como A-4, com IP de 9,90%.

O ensaio de retração como disposto no manual do CEPED (1984), determina que o encolhimento ao longo do comprimento da caixa não pode ser superior a 2 cm e a amostra não deve apresentar trincas transversais na parte central após 7 dias. O valor de retração do solo encontrado foi de 1,59 cm, e não apresentou trincas transversais na parte central do corpo de prova, assim, dado que o valor máximo permitido é de 2 cm, o solo pode ser utilizado para a fabricação de solo-cimento.

3.2 Análise química e mineralógica do solo

A constituição química do solo analisados por fluorescência de raio-X (FRX), está exibido na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais elementos químicos presentes no solo.

Composição química	Solo
SiO ₂	43,55
Fe ₂ O ₃	4,29
Al ₂ O ₃	18,42
K ₂ O	0,16
MgO	0,86
TiO ₂	0,79
CaO	0,51
MnO	0,03
Cr ₂ O ₃	0,03

Fonte: Da autora (2024).

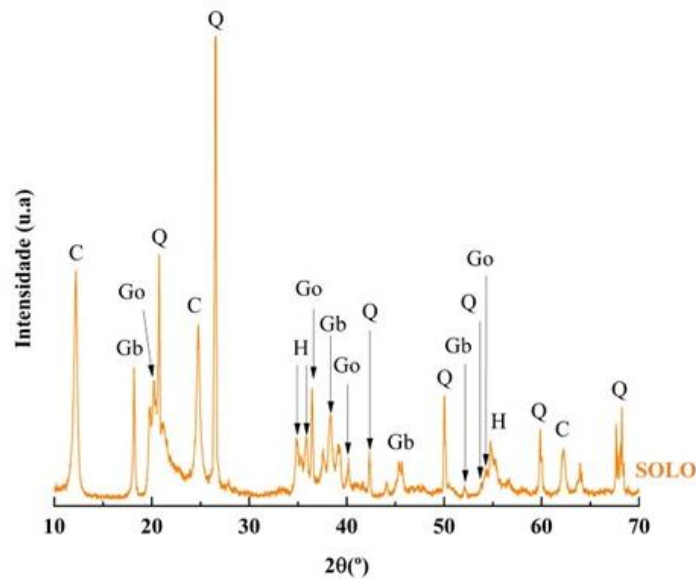
Na análise química do solo arenoso, mostrada na Tabela 6, observa-se uma predominância de sílica (SiO₂ – 43,55%) e uma menor porcentagem de óxido de alumínio (Al₂O₃ – 18,42%) o que confirma predominância do quartzo, o que era esperado considerando que o solo coletado foi classificado como solo arenoso. Outros autores encontraram resultados semelhantes a esta pesquisa (Manosa *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2021; Scapin, 2021; Gonçalves, Balestra e Gil, 2023).

O solo foi analisado quanto a seu pH, obtendo um valor de 7,54, ou seja, apresentou um pH alcalino. Yang *et al.* (2013) avaliaram o comportamento mecânico do solo cimento com diferentes pH, em meio básico, ácido e alcalino, observaram que o pH alcalino não provoca alterações significativas na aparência da mistura de solo cimento, porém, pode causar

diminuição na resistência mecânica à compressão entre 30 % e 40 %. No estudo de Zeng *et al.* (2023) avaliaram a interferência do pH nas propriedades mecânicas de um solo. Os resultados demonstraram que quanto mais o pH se torna ácido ou alcalino, irá diminuir a resistência mecânica e a coesão do solo. Assim, o teor do pH alcalino pode interferir na qualidade final do tijolo solo cimento, podendo causar uma perda de resistência mecânica ao produto.

A Figura 3 em conjunto com a Tabela 7, demonstra os difratogramas mineralógicos e as fases minerais majoritárias encontradas no solo, respectivamente.

Figura 3 – Difratogramas de raio-X do solo.



Fonte: Da autora (2025).

Tabela 7 – Fases minerais majoritárias encontradas no solo por DRX.

Símbolo	Mineral	Fórmula química	Solo
Q	Quartzo	SiO_2	x
H	Hematita	Fe_2O_3	x
C	Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	x
Gb	Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	x
Go	Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	x

Fonte: Da autora (2025).

É possível observar no solo a predominância das fases mineralógicas gibbsita, goethita e quartzo associados a caulinita e hematita (Figura 2), minerais comuns em solos silto-arenosos (Gomes *et al.*, 2022). O quartzo é um mineral presente na maioria dos solos nas frações silte e areia, bem como, existe na fração argila dos solos brasileiros lateríticos caulinita. Os óxidos ou hidróxidos de alumínio e ferro cristalinos, como a gibbsita, hematita e goethita, também são de comum ocorrência na fração fina dos solos lateríticos (Montalvan, 2021). Esses resultados corroboram com os encontrados na análise de FRX, e por outros autores na literatura que

utilizaram solos com características químicas e mineralógicas semelhantes ao dessa pesquisa (Scapin, 2021; Montalvan, 2021; Gomes *et al.*, 2022; Gonçalves *et al.*, 2023).

3.3 Análises das misturas: obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima

Os resultados dos ensaios de compactação para o solo e as misturas estudadas, estão apresentados na Tabela 8. Nota-se que menores adição do resíduo (5% e 10%) promove uma redução da umidade ótima ($w_{ótima}$) e uma elevação na massa específica seca máxima ($\rho_{máxima}$) das misturas. No entanto, com a maior adição de resíduo (20% e 40%) é possível observar aumento de $w_{ótima}$ e diminuição de $\rho_{máxima}$, comportamento comum para solos granulares quando é aplicado uma mesma energia de compactação, visto que o solo pode apresentar aumento na redução do índice de vazios se comparado a solos mais finos (Pinto, 2006; Gomes *et al.*, 2022). Pode-se observar, que as misturas apresentam maiores umidades ótimas e menores massas específicas, quando comparados aos valores obtidos pelo solo, como disposto na Tabela 4.

Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de compactação para $w_{ótima}$ e $\rho_{máxima}$ para os tratamentos T0, T5, T10, T20, T40.

Ensaio de compactação		
Tratamentos	$w_{ótima}$ (%)	$\rho_{máxima}$ (g/cm ³)
T0	18,60	1,735
T5	17,90	1,753
T10	17,80	1,750
T20	18,22	1,748
T40	18,24	1,731
Média	18,15	1,743
* $\Sigma\chi^2_{calculado}$	0,09	0,00046
$\chi^2_{tabelado (5;0,05)}$	11,07	11,07

* $\Sigma\chi^2_{calculado} < \chi^2_{tabelado}$, indica casualidade entre os resultados, ou seja, os dados não possuem diferença estatística. Fonte: Da autora (2025).

Conforme, os dados do teste estatístico χ^2 (qui-quadrado), os resultados da umidade ótima e massa específica seca máxima não apresentam diferença estatística, que significa que a variação dos teores não difere de forma considerável entre si. Portanto, para a fabricação de tijolos ecológicos escolheu-se utilizar uma umidade média de 18,15%, a escolha de uma umidade ideal única para as misturas, o que possibilita a melhor avaliação das características físicas e mecânicas do produto para substituir o cimento *Portland* por LETA.

A técnica de utilização de uma umidade ideal para as misturas é realizada por outros autores na literatura quando se trata da substituição na matriz cimentícia do solo-cimento, como Nascimento *et al.* (2021) e Garcez *et al.* (2024) que utilizaram 14% de umidade ótima para a fabricação de diferentes traços de tijolos solo-cimento com aplicação de resíduos. Em outro estudo, Rebello, Deekshitha e Shetty (2023) usaram 17% de umidade ideal para confeccionar blocos de terra comprimida, substituindo na matriz solo-cimento o cimento *Portland* por cinzas volantes.

3.4 Densidade dos tijolos ecológicos

A Tabela 9, dispõem a densidade seca dos tijolos de solo-cimento aos 28 dias de cura.

Tabela 9 – Densidade dos tijolos ecológicos.

Tratamentos	Densidade (g/cm ³)	Δs
T0 (controle)	1,622 ns	0,010
T5	1,645 ns	0,006
T10	1,601 ns	0,025
T20	1,605 ns	0,014
T40	1,646 ns	0,015

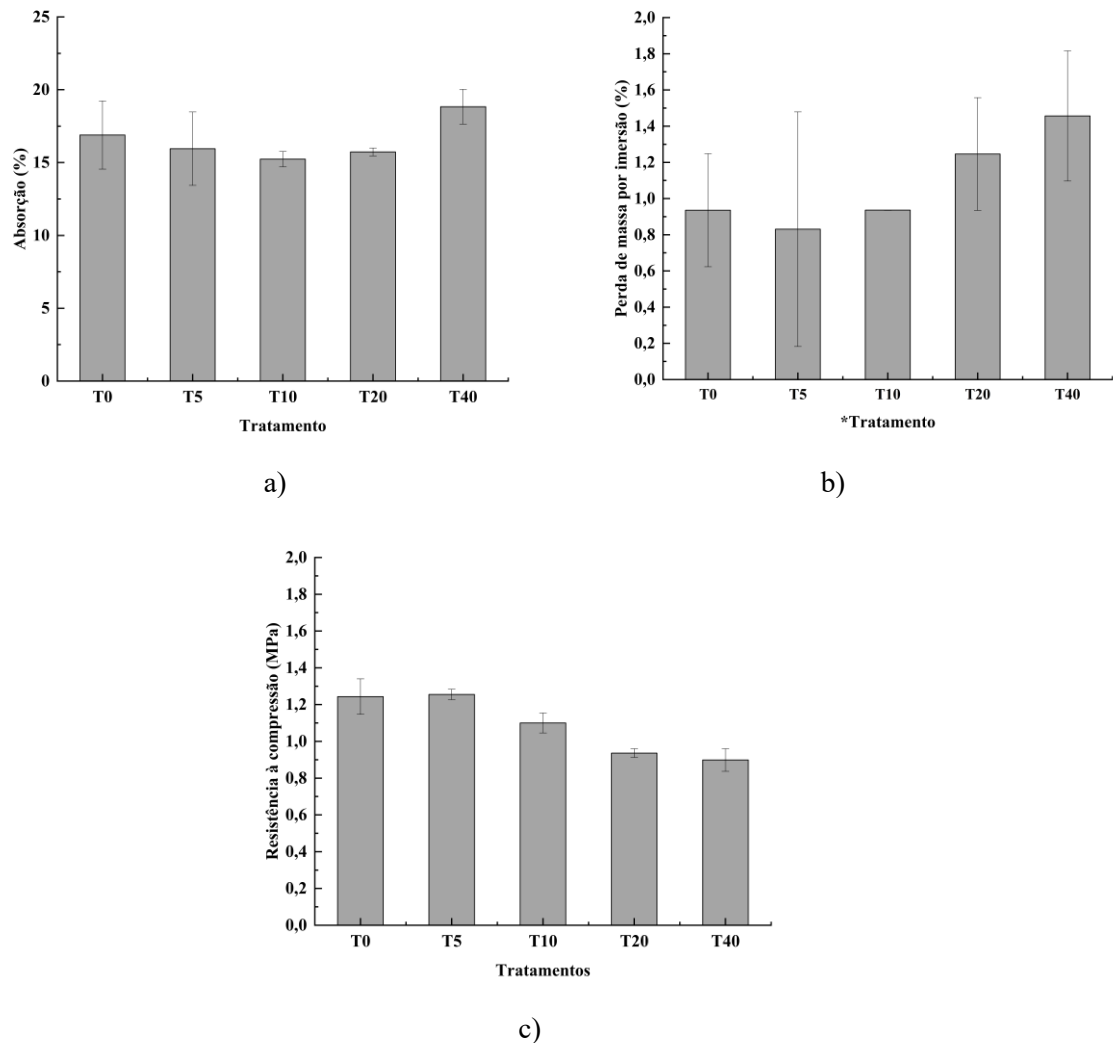
As médias rotuladas com ns não diferem da média do nível controle pelo teste de Dunnet ($\alpha = 0,05$), e Δs é o desvio padrão. Fonte: Da autora (2025).

Os resultados de densidade encontrados não apresentaram desvio padrão considerável, ou seja, apresentou valores menores, indicando que maior parte dos valores do conjunto de dados está próxima da média, não sendo possível representá-los graficamente. Verifica-se que para nenhuma das misturas utilizadas houve diferença significativa entre as médias das densidades, sendo a variação máxima obtida aumentou 1,48% na substituição de 40% (T40) de cimento *Portland* por LETA650°C, esse valor não sendo considerado uma diferença estatística considerável. Assim, verifica-se que para nenhuma das misturas houve grandes variações da massa específicas, a qual pode ser atribuída ao padrão de massa (3218 g) usado para prensar os tijolos, característica semelhante ao encontrado no estudo de Nascimento *et al.* (2021).

3.5 Análise tecnológica das variáveis resposta para obtenção da composição da mistura ótima

3.5.1 Absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão

Nas Figuras 4a, 4b e 4c, estão apresentados os resultados alcançados para os ensaios de absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão, após 28 dias de cura. Figura 4 – Caracterização dos tijolos solo-cimento quanto a absorção de água, a resistência à compressão e a perda de massa por imersão.



a) Absorção de água dos tijolos, b) perda de massa por imersão dos tijolos e c) resistência à compressão dos tijolos. *Tratamento T10 apresenta desvio padrão muito pequeno não sendo possível ser representado graficamente. Fonte: Da autora (2025).

A NBR 8491 (ABNT, 2012), dispõe que para cada 10 tijolos escolhidos para cada mistura, 7 devem apresentar a média mínima de resistência à compressão de 2,0 MPa, considerando o valor individual não deve ser inferior a 1,7 MPa. Os outros 3 corpos de prova devem ser avaliados quanto a absorção de água cuja média deve ser no máximo 20% e 22% para valor individual.

Na Figura 4a observa-se a proporção da absorção de água de todos os tratamentos realizados. Os testes estatísticos demonstram que não há diferença significativa entre as médias

($F = 4,47$, $f_{\text{crítico}} = 3,0556$, $p\text{-valor} = 0,014$) pelo teste de Dunnet. É possível observar que todos os tratamentos atenderam ao requisito estabelecido pela NBR 8491 (ANBT, 2012), que determina o limite de 20%. O tratamento T40 com o maior teor de resíduo obteve 18,83 % de absorção de água, a maior entre as misturas, absorvendo 10% a mais de água que o tratamento controle. Já os tratamentos com menores teores de cimento, apresentaram menores absorção de água, em comparação com o tratamento controle. Assim, a adição de LETA650 substituindo o cimento em menor teor agiu de forma benéfica na produção dos tijolos.

A maior absorção de água dos tratamentos com maior concentração de LETA650, pode ocorrer pelas porcentagens consideráveis de quartzo e feldspato (albita), presentes no LETA650. Esses constituintes minerais tendem a favorecer a formação de porosidade na matriz dos tijolos solo-cimento, impactando diretamente suas propriedades físicas (Lima *et al.*, 2010; Liu *et al.* 2021).

Os teores de absorção de água obtidos são corroborados pelo estudo de misturas e os maiores valores de $\gamma_{d,\text{máximo}}$ (Tabela 1), ou seja, houve uma melhor compactação das partículas, proporcionando diminuição no número de vazios, e conseqüentemente diminuindo a penetração da água nos tijolos (Metzker, 2019).

González *et al.* (2020) relataram que a incorporação de cinzas de LETA como substituto do cimento *Portland* em pastas de cimento melhora as características mecânicas e contribui no preenchimento de poros abertos nas argamassas, conseqüentemente atuando na diminuição da absorção de água. Gomes *et al.* (2019) em sua pesquisa de literatura observaram que a adição de LETA em até 10% é satisfatória na manutenção do desempenho estrutural dos tijolos cerâmicos não interferindo na resistência mecânica.

Os valores de perda de massa por imersão (Figura 4b)), não apresentaram diferença significativa entre as médias ($F = 2,75$, $f_{\text{crítico}} = 3,0556$, $p\text{-valor} = 0,067$) pelo teste de Dunnet. Ao observar o gráfico de perda de massa por imersão, verifica-se que os tratamentos com teores mais elevados de LETA650 apresentaram maior perda de massa quando comparado ao tratamento controle. Os resultados sugerem que quando houve maior adição de resíduo isso prejudicou a adesão do aglomerante com o solo, ou seja, quando esse material ficou em contato com a água, apresentou maior perda. Porém, mesmo a perda de massa sendo maior, os tijolos ainda apresentaram uma perda de massa pouco significativa, atendendo o limite de 10% sugerido para construção de solo-cimento pelo CEPED (1984).

Os resultados de perda de massa e absorção de água, possuem semelhanças quanto substituição de LETA650 empregado, os tratamentos T5 e T10 com menores adição do resíduo,

tiveram resultados satisfatórios, diminuindo a perda de massa e a absorção de água dos tijolos. Essa melhoria trata-se da eficiência da compactação do solo, a qual confere maior densidade e resistência ao material, bem como, reduz os espaços vazios e diminui a permeabilidade e contração. A baixa absorção de água e perda de massa também indica eficiência do arranjo das partículas da mistura mesmo com a incorporação do LETA.

Na Figura 4c está disposto os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão. Os valores mostraram que há diferença significativa entre as médias ($F = 62,49$, $f_{\text{crítico}} = 2,866$, $p\text{-valor} = 1,19 \times 10^{-12}$) pelo teste de Dunnet. Verificou-se com o teste de Dunnet que a substituição do cimento pelo LETA650, em percentuais acima de 10% resultou em perdas significativas de resistência à compressão, quando comparado com a referência. É possível observar que todos os tratamentos estudados obtiveram resistência inferior ao mínimo de 2,0 MPa proposto pela normatização brasileira NBR 8491 (ABNT, 2012).

Porém, no âmbito internacional os resultados encontrados estão dentro das classificações da norma francesa XP P13-901 (AFNOR, 2022). A norma XP P13-901 (AFNOR, 2022), dispõem a especificação de tijolos de terra crua em 4 tipos de classes de aplicação e 6 categorias de resistência à compressão. Assim, os tratamentos T0, T5 e T10 são classificados na categoria Rc 1 ($\geq 1,00$ MPa), T20 e T40 como Rc 0 ($< 1,0$ MPa, não podendo ser menor que 0,8 MPa).

A redução de resistência dos tijolos com a adição de cinzas já era esperada, por ter tido diminuído o teor do ligante principal (Garcez *et al.*, 2024). Porém, a adição do LETA650 em pequenas porcentagens (até 10%) agiu de forma benéfica para a resistência à compressão dos tijolos solo-cimento, ou seja, a melhor compactação do material com a adição do resíduo promove melhoria do material em todas as suas características analisadas.

A incorporação de LETA como material cimentício em maiores teores gerou a redução da resistência à compressão dos tijolos. Isso se deve à diminuição do elemento de ligação e, como esperado, à resistência reduzida. Na literatura González *et al.* (2020) encontrou evidências que há influência significativa da relação variável de cinza de lodo:cimento na resistência à compressão de argamassas sobre outras variáveis. No entanto, os autores consideraram o material uma alternativa viável e sustentável para o setor de construção.

Existem alguns fatores que podem ter influenciado a resistência à compressão dos tijolos solo-cimento não ter alcançado a resistência mínima proposta pela norma brasileira de 2,0 MPa, como o teor de pH do solo utilizado ser alcalino. Solos com pH alcalino quando utilizado na produção de solo-cimento pode apresentar perda de resistência mecânica do material entre 30

a 40% (Yang *et al.*, 2013). Outro fator, é a utilização de câmara úmida modificada, a qual não foi possível ser controlado sua temperatura e umidade, pode ter influenciado na cura dos tijolos e na hidratação do cimento.

Nesse contexto, destaca-se que os resultados encontrados com a adição do LETA650 foram bastante significativos. Deve-se notar que o LETA650 possui características amorfas, e esses resultados podem não ser replicados com os mesmos parâmetros se testado em outros solos com características diferentes. Visto que, o solo com curva granulométrica bem graduada, não uniforme e com teores de sílica e alumínio reagiu quimicamente quando misturado com o LETA650 e o cimento. Essa reação química promoveu interferência nas características de densidade, absorção de água, perda de massa e efeito mecânico, melhorando a resistência quando utilizado menor teores de adição do resíduo.

3.5.2 Otimização das propriedades físicas e mecânicas analisadas: mistura ótima

A dosagem ideal das misturas analisadas, foi determinada por meio da função Desejabilidade por meio do software Minitab® 22. O modelo indicou como mistura ótima, a composição contendo, 9,27 % de cimento *Portland* e 0,73% de LETA650, enquanto os 90% de solo foram mantidos como componente fixo, sem influência na otimização.

A mistura otimizada apresentou índices de desejabilidade individuais de 1,0 para resistência à compressão (RCS), perda de massa por imersão (PM) e absorção de água (ABS), indicando que atendeu plenamente aos critérios estabelecidos nesta pesquisa. Esses parâmetros estão conforme as referências técnicas utilizadas, como disposto na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de índice de desejabilidade individual (ID_i) e desejabilidade composta (ID_c) referentes à mistura ótima para as propriedades analisadas.

Propriedade	Valor limite	ID _i
RCS	$RCS \geq 0,8 \text{ MPa}$	1,00
ABS	$ABS \leq 20\%$	1,00
PM	$PM \leq 5\%$	1,00
ID _c		0,95

Fonte: Da autora (2025).

A desejabilidade composta (ID_c) de 0,95, próxima ao valor ideal de 1,0 sugere que os limites adotados são satisfatórios para os objetivos do estudo. Contudo, em uma otimização global, pode haver pequenas variações no conjunto de respostas. Esse comportamento decorre do fato de que para obter a melhor proporção de cimento e LETA foi realizada a maximização

da RCS e minimização da ABS e a PM. Dessa forma, a variabilidade da IDc aponta que a otimização foi mais eficaz na maximização da RCS do que na minimização da ABS e da PM.

3.6 Caracterização da mistura ótima

3.6.1 Densidade, absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão antes e após o ensaio de durabilidade

Os valores médios obtidos para a densidade (D), absorção de água (ABS), perda de massa por imersão (PM) e resistência à compressão (RCS) dos tijolos produzidos com a mistura ótima aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado estão dispostos na Tabela 11. A Tabela 12, demonstra os dados referentes ao tratamento controle (T0) utilizados para a avaliar a estatística do teste de Dunnet. Verifica-se que a densidade do tijolo com a mistura ótima não apresentou redução significativa após o envelhecimento acelerado, isto é, o tijolo não apresentou aumento significativo dos poros após ser envelhecido. Essa redução é influenciada pelo esfarelamento dos tijolos solo-cimento durante os ciclos de molhagem e secagem, causando o aumento dos vazios (Metzker, 2019).

Tabela 11 – Valores médios da densidade, absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado.

Propriedades	28 dias	Δs	Depois do envelhecimento acelerado	Δs
D (g/cm ³)	1,652*	0,006	1,612 ns	0,014
ABS (%)	16,00 ns	2,454	13,71*	0,048
PM (%)	0,83 ns	0,652	10,07*	5,183
RCS (MPa)	1,15*	0,051	0,8*	0,006

*Diferencia-se estatisticamente pelo teste de Dunnet ($\alpha = 0,05$) do tratamento controle; ns não difere estatisticamente pelo teste de Dunnet ($\alpha = 0,05$) do tratamento controle; e, Δs é o desvio padrão. Fonte: Da autora (2025).

Tabela 12 – Valores médios da densidade, absorção de água, perda de massa por imersão e resistência à compressão aos 28 dias, do Tratamento controle (T0).

Propriedades	28 dias	Δs
D (g/cm ³)	1,622	0,010
ABS (%)	16,89	2,340
PM (%)	0,94	0,312
RCS (MPa)	1,26	0,096

Fonte: Da autora (2025).

É possível observar que a propriedade absorção de água após o ensaio de durabilidade apresentou melhoria em comparação com o ensaio feito antes dos ciclos de molhagem e

secagem (Tabela 11). Os resultados demonstram que a densidade antes do envelhecimento acelerado apresentou diferença significativa quando comparado ao tratamento controle. Os tijolos produzidos com a mistura ótima tiveram a diminuição de 14,31% da absorção de água após o envelhecimento acelerado. Esse resultado demonstra que o tijolo apresentou melhoria nas suas características após o período de cura, mesmo estando em um ambiente em condições extremas como é produzido pelo ensaio de durabilidade.

Ao observar o valor médio de perda de massa por imersão, verifica-se que, anteriormente ao ensaio de durabilidade, os tijolos apresentaram baixa perda de massa e não apresentou diferença significativa comparando-os ao tratamento controle, porém, após o envelhecimento acelerado obteve uma perda de massa significativamente superior. Esse fator pode ser justificado pelo esfarelamento da superfície dos tijolos, como corroborado pela diminuição da sua densidade. Levando em consideração o limite sugerido de perda de massa para construção de solo-cimento é de 10% (CEPED, 1984), após o envelhecimento acelerado os tijolos atenderam ao requisito.

Para a resistência à compressão dos tijolos solo-cimento, foram obtidas as médias antes e após o envelhecimento acelerado, as quais apresentaram diferença significativa em comparação ao tratamento controle. Verifica-se que após o ensaio de durabilidade o material apresentou diminuição de 30,43% na resistência mecânica. Essa redução da resistência está associada ao maior teor de perda de massa por imersão e a redução da densidade dos tijolos, estando esses fatores relacionados com a formação do aumento de poros após adição do LETA. Um outro fator que pode ter influenciado na baixa resistência à compressão dos tijolos também da mistura ótima antes e após o envelhecimento acelerado, é o pH alcalino do solo que pode provocar a redução da resistência mecânica de materiais solo-cimento (Yang *et al.*, 2013).

Os valores de densidade, absorção de água e perda de massa, demonstra que os tijolos produzidos com a mistura ótima e a incorporação do LETA650 promove a melhoria do material, comprovando que é possível conciliar sustentabilidade com boas propriedades técnicas. A utilização do LETA torna-se sustentável por possibilitar a redução do teor de cimento *Portland* nas composições. A produção deste último é caracterizada por um elevado consumo energético e intensa queima de combustíveis fósseis, resultando na emissão significativa de CO₂, um dos principais gases de efeito estufa, com impactos ambientais expressivos (Gomes *et al.*, 2019; Agra *et al.*, 2023; Godoy *et al.*, 2020).

Por fim, foi possível observar que para todos os cenários analisados no protocolo de otimização da mistura ótima o modelo matemático corrobora os valores determinados

experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 12. Desta forma, a ferramenta de otimização foi considerada acurada para a predição das características de interesse.

Tabela 12 – Avaliação da eficiência da otimização das propriedades físicas e mecânicas com a obtenção da mistura ótima.

Parâmetros	Modelo matemático	Experimental	Variação
ABS (%)	16,29	16,00	-1,81%
PM (%)	0,96	0,83	-13,54%
RCS (MPa)	1,17	1,15	-1,71%

Fonte: Da autora (2025).

3.6.2 Análise das propriedades químicas, mineralógicas, microestruturais e térmicas

Os resultados obtidos nas análises dos componentes químicos encontrados na mistura ótima dos tijolos após 28 dias de cura, estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química dos tijolos produzidos com a mistura ótima.

Composição química	Mistura ótima
SiO ₂	33,36
Al ₂ O ₃	16,02
Fe ₂ O ₃	4,96
K ₂ O	0,29
MgO	1,28
TiO ₂	0,68
CaO	9,03
MnO	0,04
SO ₃	0,59
Cr ₂ O ₃	0,03

Fonte: Da autora (2025).

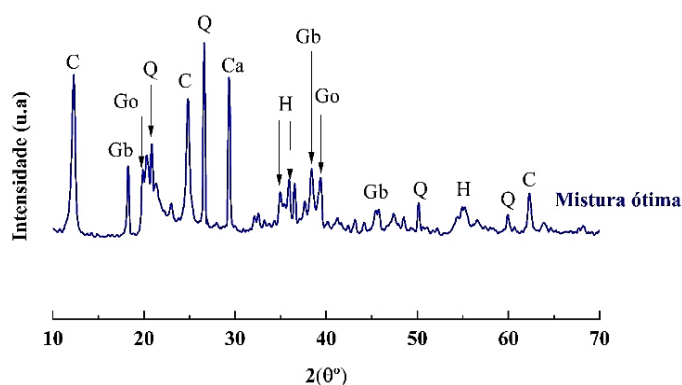
Observa-se que a mistura possui como componentes majoritários sílica, alumina e óxido de cálcio, em conjunto com uma quantidade reduzida de óxido de ferro. Sabe-se que a estabilização química ocorre quando tipos diferentes de materiais capazes de promover reações físico-químicas entre as partículas e o material são misturados ao solo. Esses materiais podem criar uma matriz que liga e cobre os grãos (Garcez *et al.*, 2024). Assim, a incorporação de cimento e LETA ao solo promoveu o maior teor de óxido de cálcio e diminuição da sílica. Esses materiais promoveram a reação da sílica e da alumina com hidróxido de cálcio e água, bem como, contribuíram com a redução da absorção de água dos tijolos.

Esses valores podem ser explicados pela interação entre o sistema solo, cimento e LETA650, bem como, pelos tipos de componentes químicos, principalmente sílica e óxido de

cálcio. Essa interação tornou o material menos poroso e diminuiu a capacidade de absorção de água do material, porém, pode ter causado a falta de água para apoiar a hidratação e o endurecimento e prejudicado o comportamento mecânico da mistura.

Os principais componentes mineralógicos encontrados nos tijolos produzidos com a mistura ótima estão dispostos na Figura 5 e na Tabela 14. Pode-se observar que o material possui de forma majoritária um equilíbrio das fases de caulinita, calcita, quartzo, hematita, gibbsita e goethita. A composição da mistura dos tijolos possui como principal constituinte o solo, sendo perceptível que os principais elementos detectados são semelhantes à sua composição, como disponível na seção 3.2 na Tabela 7. Adicionalmente, o sistema solo-cimento-LETA, apresenta calcita encontrado na composição mineralógica do LETA650 e do cimento, sendo que o cimento quando entra em contato com o ar passa por processo de carbonatação (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 5 – Difratograma dos componentes mineralógicos dos tijolos ecológicos produzidos com a mistura ótima.



Fonte: Da autora (2025).

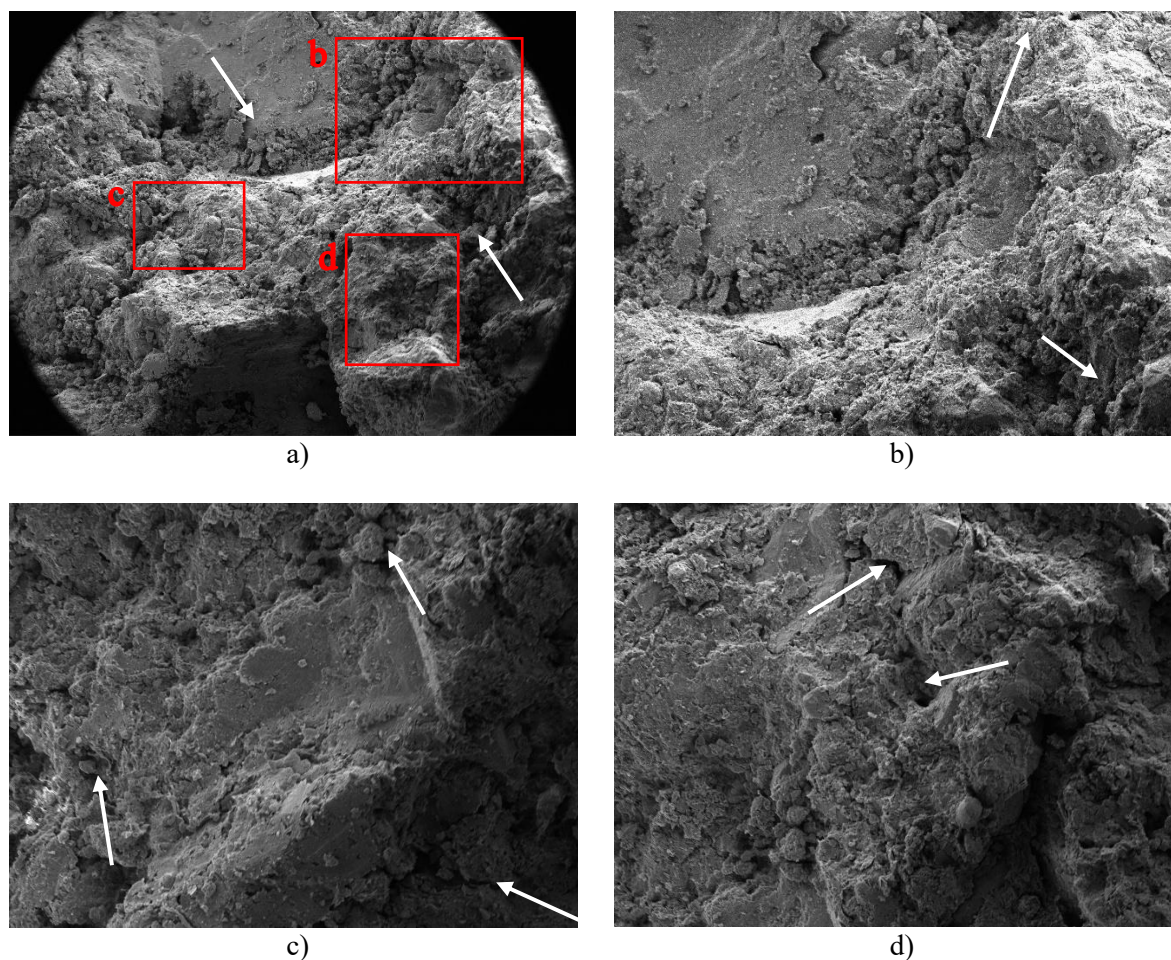
Tabela 14 – Fases minerais majoritárias encontradas nos tijolos produzidos com a mistura ótima por DRX.

Símbolo	Mineral	Fórmula química
Q	Quartzo	SiO ₂
H	Hematita	Fe ₂ O ₃
Ca	Calcita	CaCO ₃
C	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Gb	Gibbsita	Al(OH) ₃
Go	Goethita	FeO(OH)

Fonte: Da autora (2025).

Na Figura 6, está disposta a grande área analisada de micrografia analisada com seus pontos de enfoque, obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 6 –Micrografias dos tijolos ecológicos produzidos com a mistura ótima.



a) Micrografia da face de um tijolo confeccionado com a mistura ótima; b), c) e d) Micrografia expandida com diferentes focos. Fonte: Da autora (2025).

Podemos observar que os tijolos apresentam uma microestrutura uniforme, porém, possui poros e fissuras (setas brancas), os quais podem favorecer processos de infiltração. A presença dessas discontinuidades estruturais está associada à redução da densidade aparente e ao comprometimento da resistência mecânica dos tijolos. Outro ponto a ser analisado considerando o envelhecimento acelerado, a imersão e secagem, resultaram em uma cura contínua do cimento, a qual provocou um comportamento diferente no material, em comparação a redução da absorção de água. Isso pode ocorrer pelo menor número de vazios no interior dos tijolos, o que reflete também na densidade aparente, a qual não houve diferença significativa durante o envelhecimento acelerado (Vilela *et al.*, 2020).

A análise de condutividade térmica dos tijolos produzidos com a mistura ótima resultou em um valor médio de 1,54 W/m.°C ($\Delta s = 0,006$). Esse comportamento pode ser inferido à aos

vazios presentes no material, considerando que a microestrutura dos tijolos apresentou porosidade, conforme demonstrado na Figura 5. A presença desses poros influencia diretamente a diminuição da condutividade térmica, corroborando estudos prévios (Gandia *et al.*, 2019; Vilela *et al.*, 2020; Sanou *et al.*, 2024).

A capacidade térmica dos tijolos está relacionada, principalmente, à composição de óxidos presentes no solo (Qiu; White, 2001), destacando-se também a contribuição dos óxidos alcalinos presentes na mistura, como K_2O e CaO , que favorecem o aumento dessa propriedade (Munoz *et al.*, 2024). Os valores de condutividade obtidos do material é um indicativo do desempenho positivo, sugerindo que a incorporação do resíduo contribuiu para a melhoria da eficiência térmica dos tijolos.

Os resultados reforçam o potencial dos tijolos como uma alternativa sustentável para a indústria de construção, tendo visto que sua menor condutividade térmica pode favorecer a redução da transferência de calor nos ambientes internos. Essa característica impacta diretamente na eficiência energética das edificações, promovendo menor consumo de energia para climatização e favorecendo práticas construtivas alinhadas aos princípios de sustentabilidade.

4 CONCLUSÃO

Este estudo comprovou a viabilidade técnica da fabricação de tijolos ecológicos de solo-cimento utilizando o lodo de estação de tratamento de água calcinado a 650°C (LETA650) para substituir parcialmente o cimento *Portland*. A análise estatística das misturas revelou que o monitoramento rigoroso da umidade durante a prensagem é determinante para a qualidade dos tijolos, influenciando diretamente sua compactação e propriedades tecnológicas finais. Embora substituições de até 40% de cimento por LETA650 tenham aumentado a absorção de água dos tijolos – indicando maior porosidade do resíduo –, a resistência à compressão mais elevada foi obtida na substituição de 5%, evidenciando a importância de equilibrar a incorporação do resíduo com a manutenção da integridade estrutural.

Quanto à perda de massa por imersão, todas as formulações apresentaram desempenho satisfatório, mesmo na substituição de 40%, sendo que o maior valor de perda de massa ainda se manteve dentro de limites compatíveis com aplicações não estruturais. O modelo matemático de otimização permitiu definir uma composição ideal, validada por ensaios de durabilidade, que garantiu estabilidade ao produto. Apesar de a resistência à compressão não atingir o mínimo exigido pela norma brasileira (ABNT), os resultados alinharam-se a padrões internacionais, como os estabelecidos pela norma francesa XP P13-901 (AFNOR, 2022), sugerindo adequação para usos específicos em contextos menos exigentes.

O protocolo de otimização da mistura ótima através de um modelo matemático mostrou-se eficiente para a predição das características de interesse. O que sugere que a aplicação da ferramenta estatística é eficaz na otimização das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos em sua produção.

Na perspectiva ambiental, a aplicação de LETA650 reduziu a demanda por cimento *Portland* e ofereceu uma destinação sustentável ao resíduo, mitigando impactos associados à extração de matérias-primas e ao descarte inadequado do lodo. Assim, conclui-se que a aplicação do LETA650 para substituir o cimento, é uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora para a fabricação de tijolos ecológicos, desde que as proporções de substituição sejam ajustadas conforme requisitos de resistência mecânica e aplicação. O estudo reforça ainda a eficácia de ferramentas estatísticas na otimização de misturas e destaca a viabilidade de resíduos como o LETA na transição para práticas sustentáveis na indústria de construção civil.

REFERÊNCIAS

AFNOR. **XP P13-901**: Briques et Blocs de terre crue pour murs et cloisons — Définitions — Spécifications — Méthodes d'essai — Conditions de réception. Saint-Denis, 2022.

AGRA, T. M. S. *et al.* Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. **Applied Clay Science**, v. 236, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106870>.

AHMED, F.R.; MUHAMMAD, M. A.; IBRAHIM, R. K. Effect of alum sludge on concrete strength and two-way shear capacity off lat slabs. **Structures**, v. 40, p. 991-1001, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.086>.

AL-SHUGAA, M. A. *et al.* Pozzolanic performance and characteristic analysis of binary blended cement incorporating ceramic polishing sludge. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 29, p. 3711-3725, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.119>.

ALEX, J.; DHANALAKSHMI, J.; AMBEDKAR, B. Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 353-362, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **Dosagem das misturas de solo-cimento normas de dosagem e métodos de ensaios**. São Paulo: ABCP, Estudo Técnico ET-35, 1986. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento *Portland* - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

BELFIORE, C. M. *et al.* An end of waste alternative for volcanic ash: A resource in the manufacture of ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 263, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120118>.

BEULAH, M. *et al.* Mine Waste-Based Next Generation Bricks: A Case Study of Iron Ore Tailings, Red Mud and GGBS Utilization in Bricks. **Hindawi - Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, ID 9499613, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9499613>.

CBCS, Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, 2014. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**. CBCS. Disponível em: <https://www.cbcs.org.br/5dotSystem/userFiles/MMAPnuma/Aspectos%20da%20Construcao%20Sustentavel%20no%20Brasil%20e%20Promocao%20de%20Politicass%20Publicas.pdf>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo cimento**. Camaçari: CEPED, 1984.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, ed. 3, p. 274, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. **ME-258**: Solos – Compactação em equipamentos miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Brasília, 2023.

FILHO, R. E. B. R. *et al.* Ecological bricks produced from scheelite residue, stone powder, and cassava wastewater for nonstructural masonry. **Revista Principia**, v. 59, n.2, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5237>.

GANDIA, R.M. *et al.* Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. **Construction and Building Materials**, v. 222, p.168–182, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>.

GARCEZ, L. R. *et al.* Characteristics of the açai seed (*Euterpe precatoria* Martius) after thermal processing and its potential in soil-cement brick. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02816>.

GODOY, L. G. G. *et al.* Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00329>.

GOMES, A. C. F. *et al.* Aplicação de rejeito de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. **Revista Matéria**, v. 27, n. 01, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1341>.

GOMES, S. C. et al. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 145, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.

GONÇALVES, L. F. da C.; BALESTRA, C. E. T.; GIL, M. A. R. Evaluation of mechanical, physical and chemical properties of ecological modular soil-alkali activated bricks without *Portland* cement. **Environmental Development**, v. 48, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100932>.

GONZÁLEZ, K. B. *et al.* Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, v. 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>.

LEI, Z.; PAVIA, S. Pozzolanic activity of FCC catalyst waste slag (CWS) for cement and geopolymer production. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100758>.

LIU, Y. *et al.* The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105291>.

MANOSA, J. *et al.* Water treatment sludge as precursor in non-dehydroxylated kaolin-based alkali-activated cements. **Applied Clay Science**, v. 204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106032>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Microestrutura do Concreto. In: Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M., Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais, ed. 4. São Paulo, 2014.

METZKER, Stefânia Lima Oliveira. **QUALIDADE DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO COM A INCLUSÃO DE RESÍDUOS VEGETAIS E URBANOS**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

MONTALVAN, Edy Lenin Tejada. **Geotechnical properties of mixtures of water treatment sludge and residual lateritic soils from the State of São Paulo**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MUNOZ, P. *et al.* Stabilization of extruded earth-based materials by adding hydrated cement powder from recycled concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 98, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111260>.

NASCIMENTO, E. S. S. *et al.* Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002>.

PAUL, S; ISLAM, M.S.; ELAHI, T. E. Potential of waste rice husk ash and cement in making compressed stabilized earth blocks: Strength, durability and life cycle assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 73, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106727>.

QIU, L.; WHITE, M. A. The Constituent Additivity Method to Estimate Heat Capacities of Complex Inorganic Solids. **Journal of Chemical Education**, v. 78, n. 8, 2001. DOI: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>.

REBELLO, N.; DEEKSHITHA, K. SHETTY, S. Hydraulically manufactured cement and fly ash stabilized compressed soil block. **Materials Today: Proceedings**, v. 88, p. 29-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.483>.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. Ed. Blucher, 2009.

RUVIARO, A. S. *et al.* Eco-efficient cement production: Investigating water treatment plant sludge and eggshell filler use in LC3 systems. **Construction and Building Materials**, v. 394, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132300>.

SANOUE, I. *et al.* Effect of the coconut fibers and cement on the physico-mechanical and thermal properties of adobe blocks. **Heliyon**, v.10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38752>.

SCAPIN, Juliana. **AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MISTURA DE SOLO E LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL DE COBERTURA E DE FUNDO EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2022. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. SNIS. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtosdsnis/diagnosticos/DIAGNOSTICOTEMATICOVISAOGERAL/AESNIS2023.pdf>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>.

YANG, J. *et al.* Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 365, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027>.

YANG, Y. *et al.* Effect of mechanical property of cemented soil under the different pH value. **Applied Clay Science**, v. 79, p. 19-24, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.014>.

ZENG, J. *et al.* Influence of Different pH and Clay Content on the Mechanical Properties of Red Clay. **Open Access Library Journal**, v. 10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1110784>.

TERCEIRA PARTE

1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1.1 Considerações gerais

Esta pesquisa, visou avaliar as características químicas, físicas e mineralógicas do lodo de estação de tratamento de água (LETA), além de investigar sua aplicação para substituir parcialmente o cimento *Portland* na fabricação de tijolos ecológicos. A proposta visa contribuir para o desenvolvimento de produtos sustentáveis e a valorização de resíduos, promovendo a economia circular no setor de construção civil.

A indústria de construção civil, está entre as maiores consumidoras de matérias-primas no planeta, gerando impactos ambientais significativos. O desenvolvimento sustentável desse setor é essencial tanto para reduzir esses impactos quanto para otimizar a utilização de recursos naturais e econômicos. Nesse contexto, a reutilização de resíduos surge como uma alternativa viável para o desenvolvimento do setor de construção. A aplicação de resíduos industriais apresenta grande potencial de aproveitamento, como por exemplo, o lodo de estação de tratamento de água (LETA).

Em decorrência da elevada concentração de compostos químicos no LETA, esse resíduo não se deve ser descartado de maneira inadequada, devendo ser disposto em aterros específicos, o que gera altos custos operacionais. Todavia, o lodo de ETA tem sido aproveitado pela engenharia civil como matéria-prima, como, para confecção de artefatos de concreto, em obras geotécnicas e na fabricação de produtos cerâmicos. Além disso, as características pozolânicas do LETA permitem a sua utilização como substituto parcial do cimento *Portland*, embora, sua variabilidade composicional ainda exija estudos mais detalhados.

Dessa forma, esta pesquisa busca colaborar para a caracterização do LETA e sua incorporação na fabricação de tijolos ecológicos, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável. Apesar, de estudos recentes terem explorado substituir parcialmente o cimento *Portland* por esse resíduo (Bashar *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2019; Scapin, 2021; Agra *et al.*, 2023), existe ainda uma lacuna em relação a aplicação em tijolos ecológicos. Assim, torna-se fundamental a análise sobre suas características, os tratamentos necessários para seu uso e as porcentagens ideais de substituição, consolidando seu potencial como material sustentável na construção civil.

1.2 Contribuições do trabalho

Com base no que foi discutido neste trabalho, conclui-se que esta pesquisa pode contribuir significativamente para a sustentabilidade ambiental e a economia circular, ao viabilizar o reaproveitamento de resíduos. O estudo reforça a importância da valorização de subprodutos industriais e urbanos, reduzindo a demanda por extração de matérias-primas e, conseqüentemente, minimizando os impactos ambientais associados. A aplicação de resíduos produção de tijolos ecológicos não apenas promove uma destinação mais eficiente desses materiais, reduzindo a quantidade de resíduos encaminhados para aterros sanitários, mas também mitiga a emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂. Além disso, os resultados demonstram a viabilidade da abordagem proposta para alinhar desenvolvimento econômico, responsabilidade ambiental e bem-estar social, contribuindo para um modelo produtivo mais sustentável e resiliente.