

USO DO LODO DE ETAS NA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS - UMA REVISÃO DA LITERATURA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-012>

Marcos David dos Santos (*), Igor Vieira Fernandes, Adolpho Guido de Araujo, Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

* Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, marcos.david@ufpe.br

RESUMO

O aumento da demanda por materiais sustentáveis na construção civil tem motivado a busca por alternativas ao cimento convencional, cuja produção gera altos impactos ambientais. O lodo de estação de tratamento de água (LETA), rico em óxidos de alumínio e silício, representa uma oportunidade promissora para sua valorização em materiais cimentícios. O objetivo do estudo é discutir o estado da arte das aplicações do lodo de ETA na fabricação de materiais geopoliméricos, focando em suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais, além dos desafios e perspectivas para sua utilização em larga escala na construção civil. A pesquisa é de natureza descritiva e qualitativa, baseada em uma revisão da literatura acadêmica sobre o tema. As publicações foram selecionadas na base de dados Scopus, abrangendo estudos publicados de 1990 a setembro de 2023. Estudos demonstraram que a calcinação do LETA a temperaturas entre 600 °C e 800 °C aumenta sua reatividade, resultando em resistências mecânicas superiores a 16 MPa após 7 dias de cura. Argamassas geopoliméricas com LETA calcinado e reforçada com fibra de sisal apresentou boa durabilidade, com uma perda de apenas 26,7% na resistência à flexão após ciclos de umedecimento e secagem. A pesquisa destaca a necessidade de mais estudos para padronização das condições de pré-tratamento e misturas, além de uma compreensão mais aprofundada do comportamento a longo prazo dos geopolímeros produzidos com LETA, especialmente em ambientes agressivos. A utilização desse resíduo não apenas oferece uma alternativa viável, mas também contribui para a sustentabilidade na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Revisão da literatura, Lodo, Estação de tratamento de água, Geopolímeros.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials in the construction industry has driven the search for alternatives to conventional cement, whose production is associated with significant environmental impacts. Water treatment sludge (WTS), which is rich in aluminum and silicon oxides, presents a promising opportunity for valorization in cementitious materials. The aim of this study is to discuss the state of the art in the application of WTS in the production of geopolymers, with a focus on their physical, mechanical, and environmental properties, as well as the challenges and prospects for large-scale implementation in construction. This research is descriptive and qualitative in nature, based on a review of the academic literature on the topic. Publications were selected from the Scopus database, covering studies published from 1990 to September 2023. Studies have shown that calcining WTS at temperatures between 600 °C and 800 °C increases its reactivity, resulting in mechanical strengths exceeding 16 MPa after 7 days of curing. Geopolymer mortars made with calcined WTS and reinforced with sisal fibers have demonstrated good durability, with only a 26.7% reduction in flexural strength after wetting and drying cycles. The review highlights the need for further research aimed at standardizing pre-treatment conditions and mix designs, as well as gaining a deeper understanding of the long-term behavior of geopolymers produced with WTS, particularly in aggressive environments. The use of this waste not only offers a viable alternative, but also contributes to sustainability in the construction sector.

KEYWORDS: Literature review, Sludge, Water treatment sludge, Geopolymers.

1. INTRODUÇÃO

A gradativa demanda por materiais sustentáveis na construção civil tem impulsionado a busca por alternativas ao cimento Portland comum (CPC), cuja produção é associada a elevados impactos ambientais, sobretudo em razão do alto consumo energético e da emissão significativa de dióxido de carbono (Gartner, 2004; Habert et al., 2011; Turner & Collins, 2013). Em 2014, a produção mundial de CPC foi estimada em 4,3 bilhões de toneladas, representando um aumento de 6,7% em relação ao ano anterior e reforçando a necessidade de alternativas ambientalmente viáveis (Cembureau, 2016). Nesse contexto, os geopolímeros emergem como ligantes inovadores e promissores, com

propriedades físico-químicas superiores em muitos aspectos, incluindo alta resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade, além de reduzido impacto ambiental (Duxson et al., 2007; Pacheco-Torgal et al., 2012; Provis, 2014).

Geopolímeros são materiais inorgânicos resultantes da ativação alcalina de precursores ricos em sílica e alumina, tais como metacaulim, cinza volante e outros resíduos industriais ou agroindustriais (Davidovits, 1991; Buchwald & Kaps, 2002; Gouny et al., 2012). O processo de geopolimerização envolve reações entre aluminossilicatos e soluções alcalinas - tipicamente compostas por hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) - que levam à formação de uma matriz tridimensional de aluminossilicatos com elevada resistência mecânica (Zhang, 2013; He et al., 2013). Diversos estudos têm demonstrado que o uso de resíduos como precursores geopoliméricos é uma estratégia eficaz para agregar valor à materiais descartados e reduzir a exploração de recursos naturais (Borges et al., 2014; Paya et al., 2012; Zhuang et al., 2016).

Dentre os resíduos com potencial geopolimérico, o lodo de estação de tratamento de água (LETA) tem recebido crescente atenção. Subproduto gerado em grandes volumes durante o processo de clarificação de água potável, o LETA é tradicionalmente destinado a aterros, mesmo apresentando composição rica em óxidos de alumínio (Al_2O_3) e silício (SiO_2), elementos essenciais na estrutura dos geopolímeros (Suksiripattanapong et al., 2015b; Keeley et al., 2012). Estima-se que uma única estação de tratamento de água, como a da Metropolitan Waterworks Authority (MWA) na Tailândia, possa produzir entre 300 e 700 toneladas de LETA por dia, dependendo da estação do ano (Suksiripattanapong et al., 2015a). A crescente geração desse resíduo, aliada à necessidade de soluções sustentáveis para sua gestão, torna sua valorização em materiais cimentícios alternativa altamente promissora.

Pesquisas recentes demonstraram a viabilidade técnica do uso do LETA como precursor ou agregado em geopolímeros, especialmente quando submetido a tratamentos térmicos (Waijarean et al., 2014a, 2014b; Khater et al., 2012). Estudos reportam que a calcinação do LETA entre 600 e 800 °C favorece a reatividade dos seus constituintes, possibilitando o desenvolvimento de resistências mecânicas superiores a 16 MPa após 7 dias de cura em temperatura ambiente, principalmente quando combinado com cinza de casca de arroz, rica em sílica amorfa (Poowancum et al., 2015; Suaiam & Makul, 2015). Essa abordagem permite ajustar a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, fator crucial para o desempenho do geopolímero (Khater et al., 2012).

Apesar dos avanços, lacunas ainda existem quanto ao entendimento do comportamento a longo prazo dos geopolímeros produzidos com LETA, especialmente em relação à durabilidade frente a ciclos de umedecimento e secagem e à exposição a ambientes agressivos (Horpibulsuk et al., 2015). Adicionalmente, são escassos os estudos voltados à padronização das condições de pré-tratamento, proporções ótimas de mistura e parâmetros de cura aplicáveis ao LETA em diferentes contextos geográficos e tecnológicos. Diante disso, este artigo tem como objetivo discutir o estado da arte das aplicações do lodo de estação de tratamento de água na fabricação de materiais geopoliméricos, com ênfase em suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais, bem como nos desafios e perspectivas para sua utilização em larga escala na construção civil.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é de natureza descritiva e qualitativa, voltada à análise da produção acadêmica e científica relacionada às aplicações do lodo de ETA na fabricação de geopolímeros. Este artigo constitui um recorte da pesquisa desenvolvida por Santos (2024), na qual foi realizada uma revisão sistemática da literatura mais ampla, incluindo meta-análise e avaliação do ciclo de vida. Neste artigo, o foco recai especificamente sobre a aplicação do lodo de ETA na produção de geopolímeros, com ênfase no uso do resíduo após calcinação em diferentes temperaturas, bem como em misturas com outros resíduos para a confecção desses materiais.

Para a elaboração do trabalho, foram selecionadas publicações recentes que tratam diretamente da temática, com destaque para os principais estudos desenvolvidos sobre o assunto. A pesquisa concentrou-se em trabalhos publicados em periódicos científicos, anais de congressos e fontes correlatas, adotando uma abordagem bibliográfica com o objetivo de discutir, sistematizar e sintetizar os principais aspectos da produção científica relacionada ao tema.

A busca bibliográfica foi conduzida na base de dados Scopus, acessada por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A pesquisa abrangeu o período de 1990 a setembro de 2023, utilizando como palavra-chave principal “water treatment sludge”. Para refinar os resultados e garantir a relevância dos estudos selecionados, aplicaram-se filtros nos campos Article Title, Abstract e Keywords, direcionando a análise para os trabalhos mais alinhados ao escopo da pesquisa. Os critérios de inclusão, exclusão e demais filtros utilizados estão descritos de forma detalhada em Santos (2024).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos 12 estudos selecionados para compor a revisão da literatura, contendo informações relevantes sobre os autores, países de origem e fontes de publicação. Em sua totalidade, esses trabalhos convergem para um objetivo comum: investigar a viabilidade do uso do lodo de ETA como matéria-prima na fabricação

de geopolímeros. As pesquisas analisadas abordam diferentes aspectos dessa temática, destacando os potenciais benefícios associados ao reaproveitamento do lodo de ETA.

Quadro 1. Resumo dos documentos selecionados para a revisão.

Fonte: Autores do Trabalho.

Número	Autores	País	Fonte	Aplicação
1	Batista dos Santos et al. (2021)	Brasil	Journal of Building Engineering	Geopolímeros
2	Iamchaturapatr; Piriyaikul (2020)	Tailândia	Key Engineering Materials	
3	Ho; Orbecido; Promentilla (2018)	Filipinas	MATEC Web of Conferences	
4	Orbecido et al. (2018)	Filipinas	MATEC Web of Conferences	
5	Suksiripattanapong et al. (2017)	Tailândia	Journal of Materials in Civil Engineering	
6	Geraldo; Fernandes; Camarini (2017)	Brasil	Journal of Cleaner Production	
7	Nimwinya et al. (2016)	Tailândia	Journal of Cleaner Production	
8	Horpibulsuk et al. (2016)	Tailândia	Journal of Materials in Civil Engineering	
9	Suksiripattanapong et al. (2015)	Tailândia	Lowland Technology International	
10	Suksiripattanapong et al. (2015)	Tailândia	Construction and Building Materials	
11	Suksiripattanapong et al. (2015)	Tailândia	Construction and Building Materials	
12	Poowancum; Nimwinya; Horpibulsuk (2015)	Tailândia	RILEM Bookseries	

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calcinado em diferentes temperaturas

Santos et al. (2021) desenvolveram uma argamassa geopolimérica utilizando lodo de ETA calcinado a 750 °C por 6 horas e fibra de sisal. As amostras de referência da argamassa (0 ciclos) demonstraram uma resistência à flexão máxima de 15 MPa, enquanto as amostras envelhecidas (10 ciclos) alcançaram 11 MPa. Observou-se, portanto, uma diminuição de 26,7% na resistência à flexão das amostras envelhecidas, indicando uma durabilidade satisfatória da argamassa quando exposta a ciclos de umedecimento e secagem.

Por sua vez, Iamchaturapatr e Piriyaikul (2020) investigaram a utilização do lodo de ETA como matéria-prima na produção de geopolímeros. O lodo de ETA foi calcinado em diferentes temperaturas (105 °C, 500 °C, 650 °C e 850 °C) por 1 hora. O lodo de ETA calcinado a 850 °C por 1 hora demonstrou a maior resistência em todos os períodos de cura. Além disso, ao fabricar um geopolímero de lodo de ETA em forma de placa sólida, foi realizado um teste de redução de ruído em diversas frequências sonoras (1000 a 10000 Hz), no qual o geopolímero apresentou uma eficiência média de redução de ruído de aproximadamente 63,5%, equivalente ao desempenho de um tijolo comercial.

O estudo conduzido por Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) abordou a produção de argamassas geopoliméricas utilizando lodo de ETA não calcinado em substituição parcial ao metacaulim, nas proporções de 0%, 15%, 30% e 60% em massa. Os resultados indicaram que o lodo de ETA reduziu a fluidez, a resistência à compressão e à flexão, além de aumentar a porosidade e a permeabilidade da argamassa. No entanto, a substituição de 15% do metacaulim pelo lodo de ETA resultou em uma resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias.

Nimwinya et al. (2016) avaliaram a produção de um ligante geopolimérico utilizando lodo de ETA calcinado a 600 °C por 2 horas e cinza de casca de arroz, com um ativador alcalino composto por uma mistura de Na₂SiO₃ e NaOH. Os resultados mostraram que a densidade dos geopolímeros foi consistentemente três vezes menor que a do CPC. A proporção ideal da razão SiO₂/Al₂O₃ para a maior resistência situou-se entre 4,9 e 5,9 para condições de cura a temperatura ambiente (27-30 °C) e a 60 °C. Nessas condições ótimas, os compósitos geopoliméricos atingiram 19 MPa de resistência à compressão.

O estudo de Poowancum, Nimwinya e Horpibulsuk (2015) concentrou-se no desenvolvimento de um geopolímero utilizando lodo de ETA calcinado a 600 °C por 2 horas e cinza de casca de arroz como materiais principais. Os resultados indicaram que a adição de cinza de casca de arroz contribuiu positivamente para a resistência do geopolímero derivado do lodo de ETA. Com a inclusão de 30% em massa de cinza de casca de arroz, a resistência do geopolímero aproximou-se da resistência mínima exigida pelo CPC. Além disso, ressaltou-se que a densidade do geopolímero desenvolvido foi três vezes menor do que a do cimento Portland.

3.2 Mix do lodo de ETA com outros resíduos

Ho, Orbecido e Promentilla (2018) realizaram uma investigação sobre um sistema geopolimérico utilizando lodo de ETA e cinzas volantes. Os resultados revelaram que um teor elevado de álcalis resultou na diminuição da resistência à compressão do ligante. Adicionalmente, a pesquisa buscou otimizar a formulação para a produção do geopolímero, identificando a combinação ideal de 18,9% de lodo de ETA, 76,1% de cinzas volantes e 5,0% de NaOH. Essa

combinação demonstrou maximizar a resistência à compressão e reduzir a massa unitária das amostras, alcançando valores de 8,98 MPa para resistência à compressão e 1877,7 kg/m³ para massa unitária na condição ótima.

Por outro lado, Orbecido et al. (2018) concentraram-se no desenvolvimento de um geopolímero utilizando lodo de ETA e cinzas volantes. As propriedades desse novo material foram comparadas com as amostras de referência que foram curadas em água. Os resultados do teste de resistência a ácidos confirmaram a notável durabilidade do ligante contra ataques de ácido sulfúrico, com a massa das amostras praticamente inalterada mesmo após 28 dias de imersão em solução ácida. Além disso, a resistência à compressão não apenas permaneceu constante, mas também mostrou um aumento significativo com o tempo de cura.

Suksiripattanapong et al. (2017) realizaram a produção de geopolímeros utilizando lodo de ETA e resíduos de concreto de cimento (RCC), com variação de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em massa em relação ao peso seco do lodo de ETA, para avaliação como unidades de alvenaria não estrutural. Os resultados obtidos indicaram que as proporções ideais de ativador alcalino líquido/RCC proporcionaram a máxima redução na massa unitária para diferentes teores de RCC, com valores ótimos de 16, 8, 5,33, 4, 3,2 e 2,67 para RCC variando de 5% a 30%, respectivamente. Além disso, a razão de Na₂SiO₃:NaOH de 70:30 resultou na maior massa unitária e resistência à compressão entre as razões testadas para a combinação de lodo de ETA e RCC.

O estudo conduzido por Horpibulsuk et al. (2016) concentrou-se na produção de um geopolímero utilizando lodo de ETA e cinzas volantes, com o objetivo de desenvolver unidades de alvenaria. O ativador alcalino líquido foi uma combinação de Na₂SiO₃ e NaOH. Os resultados do teste cíclico de umedecimento e secagem indicam que o geopolímero, fabricado com uma composição ótima (ativador alcalino:cinza volante= 1,6, Na₂SiO₃:NaOH= 90:10) e sob condições térmicas ideais, de 85 °C por 72 horas, pode ser empregado como uma unidade de alvenaria durável, apresentando resistência à compressão superior a 12 MPa após 12 ciclos de umedecimento e secagem.

Suksiripattanapong et al. (2015) investigaram um geopolímero composto por lodo de ETA e cinzas volantes, utilizando uma mistura de solução de Na₂SiO₃ e NaOH como ativador alcalino líquido. Os resultados ressaltaram a importância da proporção ideal entre o ativador alcalino e as cinzas volantes para alcançar a máxima resistência e massa unitária do material. Além disso, foi observada uma influência significativa da temperatura e duração do aquecimento no desenvolvimento da resistência. A formulação ideal, que proporciona a máxima massa unitária e resistência, consiste em uma proporção de Na₂SiO₃:NaOH de 80:20 e uma relação entre o ativador alcalino e as cinzas volantes de 1,3, independentemente das condições térmicas e do tempo de cura. Os resultados indicaram que a temperatura de 75 °C e o período de 72 horas de aquecimento foram identificados como as condições ideais para o desenvolvimento da resistência do material.

Em outra pesquisa desenvolvida por Suksiripattanapong et al. (2015), o foco foi o desenvolvimento da resistência em unidades de alvenaria geopolimérica feitas a partir de lodo de ETA e cinzas volantes. A resistência das unidades de alvenaria geopolimérica variou entre 12 e 20 MPa, dependendo da duração do aquecimento, sendo que o desenvolvimento da resistência se mostrou insignificante após 72 horas.

3.3 Caracterização química

As características químicas do lodo de estação de tratamento de água (lodo de ETA) são fundamentais para determinar sua viabilidade em aplicações na construção civil. Esses atributos influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, durabilidade, interação com outros materiais, reatividade com componentes químicos e conformidade com normas ambientais. Assim, compreender a composição química do lodo é essencial para otimizar seu uso, garantindo eficiência dos materiais, sustentabilidade e atendimento aos padrões da indústria da construção.

Diversos estudos que analisam a composição química dos LETAs foram identificados e compilados nesta revisão. Dentre os 12 trabalhos listados no Quadro 1, 8 apresentaram dados de composição química expressos em óxidos, conforme resumido na Tabela 1. Os valores sublinhados indicam o óxido de maior concentração em cada estudo, enquanto os valores em negrito representam os três principais componentes em termos de concentração.

Tabela 1. Composição química em óxidos de lodos de ETAs utilizados na fabricação de geopolímeros
Fonte: Autores do Trabalho.

Área	Autores	Localidade	País	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Outros	PF
Geopolímeros	Batista dos Santos et al. (2021)	Manaus	Brasil	40,73	<u>42,39</u>	10,94	0,56	2,18	0,95	-	<u>0,63</u>	1,26	0,36	-
	Batista dos Santos et al. (2021)	Manaus	Brasil	55,78	27,16	9,54	-	<u>3,32</u>	<u>1,69</u>	-	0,55	0,95	0,36	-
	Iamchaturapat; Piriyakul (2020)	Bangkok	Tailândia	66,43	20,46	6,71	0,85	2,20	1,07	-	-	-	0,41	1,87
	Orbecido et al. (2018)	Manila	Filipinas	42,00	30,00	<u>19,30</u>	<u>2,46</u>	0,78	1,45	0,20	-	1,38	2,43	-
	Suksiripattanapong et al. (2017)	Bangkok	Tailândia	61,84	24,80	9,52	0,60	1,90	-	-	-	-	0,59	0,75
	Geraldo; Fernandes; Camarini (2017)	Campinas	Brasil	55,77	32,48	1,88	-	2,70	0,76	-	-	<u>1,42</u>	0,23	4,76
	Nimwinya et al. (2016)	Bangkok	Tailândia	58,99	24,64	6,63	0,69	1,54	1,14	<u>4,08</u>	-	0,88	1,41	-
	Horpibulsuk et al. (2016)	Bangkok	Tailândia	<u>67,33</u>	22,47	6,15	0,68	1,26	-	-	-	-	1,04	0,78

A produção de geopolímeros exige, principalmente, altos teores de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), pois esses elementos são responsáveis pela formação da matriz amorfa tridimensional de aluminosilicatos, característica dos geopolímeros. Os estudos que apresentaram os maiores teores de SiO_2 foram: Horpibulsuk et al. (2016) – 67,31%, Iamchaturapatr & Piriyaikul (2020) – 66,44%, e Suksiripattanapong et al. (2017) – 61,84%. Já os maiores teores de Al_2O_3 foram encontrados em Batista dos Santos et al. (2021) – 42,39%, e Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) – 32,48%.

O óxido de ferro (Fe_2O_3) também pode desempenhar um papel secundário na estruturação dos geopolímeros, influenciando principalmente a coloração e, em alguns casos, contribuindo levemente para a resistência mecânica. Orbecido et al. (2018) apresentou um alto teor de Fe_2O_3 (19,30%), o que pode alterar o comportamento do material final. Os demais estudos indicaram teores médios entre 6% e 11%. O óxido de cálcio (CaO) é particularmente relevante em sistemas híbridos, nos quais ocorre a formação de géis C-A-S-H em conjunto com N-A-S-H, típicos de geopolímeros ativados alcalinamente. Orbecido et al. (2018) apresentou destaque nesse aspecto, com teor de 2,46% de CaO .

Os óxidos alcalinos, como K_2O e Na_2O , são importantes para a ativação dos precursores, especialmente quando se pretende reduzir a adição de aditivos externos. Geraldo et al. (2017) apresentou 2,70% de K_2O , enquanto Nimwinyá et al. (2016) obteve 4,08% de Na_2O , o que pode contribuir para a ativação alcalina do sistema. Outros óxidos, como TiO_2 , MgO e P_2O_5 , aparecem em teores mais baixos. O TiO_2 pode atuar como filler e influenciar a coloração do material, enquanto MgO e P_2O_5 podem afetar a durabilidade química dos geopolímeros.

Geograficamente, observa-se que os lodos da Tailândia apresentam elevados teores de sílica e baixos teores de cálcio, o que os torna ideais para geopolimerização. No Brasil, os lodos avaliados (provenientes de regiões como Manaus e Campinas) demonstram maior variabilidade composicional, com perfis que vão desde materiais mais aluminossilicatados (Batista dos Santos et al., 2021) até lodos com maior concentração de álcalis e perdas ao fogo (Geraldo et al., 2017).

Embora não seja possível generalizar a composição química dos LETAs, verifica-se uma predominância de silício, alumínio e ferro. A presença de silício é frequentemente associada à sílica dissolvida na água subterrânea, oriunda da interação da água com formações geológicas ricas em minerais silicáticos ou da desintegração de minerais nas bacias hidrográficas. Já o alumínio e o ferro geralmente estão ligados ao tipo de coagulante utilizado no tratamento da água, especialmente na etapa de coagulação. O cálcio, por sua vez, costuma estar associado à aplicação de cal para correção de pH nas ETAs ou ao uso de coagulantes auxiliares que contenham esse elemento.

Alguns estudos também apresentaram dados sobre a perda ao fogo (PF), parâmetro que indica a massa perdida durante a calcinação, devido principalmente à volatilização de compostos como carbonatos e matéria orgânica. Valores mais altos, como encontrados em Geraldo et al. (2017) 4,76%, são geralmente atribuídos à presença de algas, bactérias, detritos vegetais e outros materiais orgânicos presentes no lodo, além de polímeros utilizados como auxiliares de coagulação e floculação. Esses polímeros, ao se decomorem durante o ensaio, também contribuem para o aumento da perda de massa, juntamente com subprodutos orgânicos formados ao longo do tratamento da água.

3.4 Ensaios microestruturais

A realização de ensaios microestruturais em geopolímeros com lodo de ETA é essencial para obter informações detalhadas sobre a composição e interação dos materiais em nível microscópico. Esses ensaios proporcionam uma visualização direta da microestrutura, permitindo a identificação de fases, avaliação da homogeneidade, detecção de defeitos e estudo da interface entre os componentes. Além de contribuir para a otimização da formulação do geopolímero, a análise microestrutural valida modelos teóricos, impulsiona a busca por soluções sustentáveis e promove o reaproveitamento de resíduos industriais em materiais de construção. Os resultados dos estudos dos autores analisados fornecem uma visão abrangente das microestruturas de geopolímeros que incorporam lodo de ETA em sua constituição, destacando como vários parâmetros influenciam essas microestruturas, como apresentados a seguir:

1. Orbecido et al. (2018) - Mix com outros resíduos

- Observaram que a cinza volante e o lodo de ETA apresentavam microestruturas distintas (Figura 1).
- A transformação do geopolímero resultou na redução das microesferas típicas da cinza volante, sugerindo que o NaOH atacou as microesferas, enfraquecendo ou destruindo-as.

2. Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) - Calcinação em diferentes temperaturas

- Notaram que o uso de LETA resultou em maior porosidade e cavidades maiores na matriz de geopolímero quando comparado à matriz de referência (Figura 2).

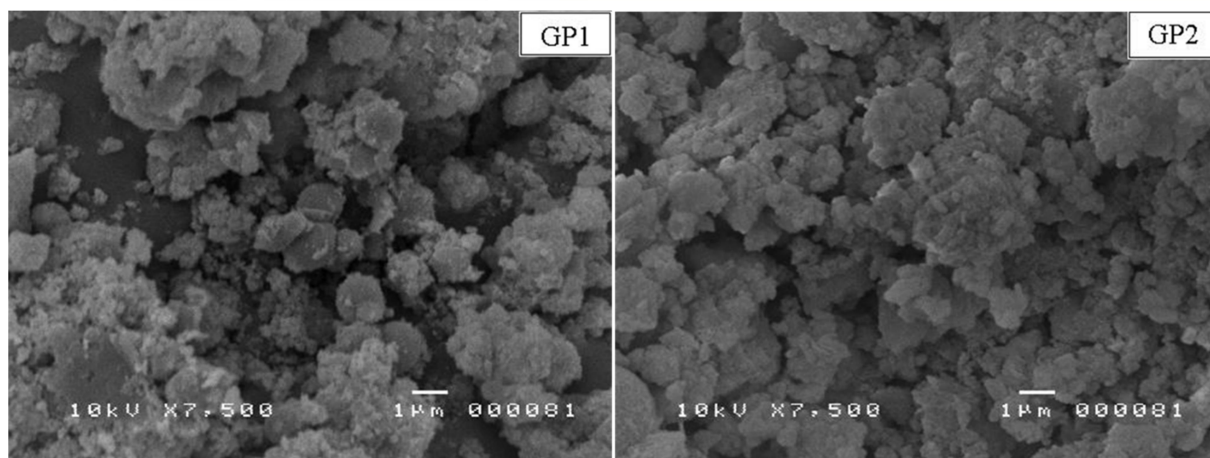


Figura 1: Imagens de MEV de geopolímeros GP1=22,3% de LETA e GP2= 0% de LETA. Fonte: Orbecido et al. (2018).

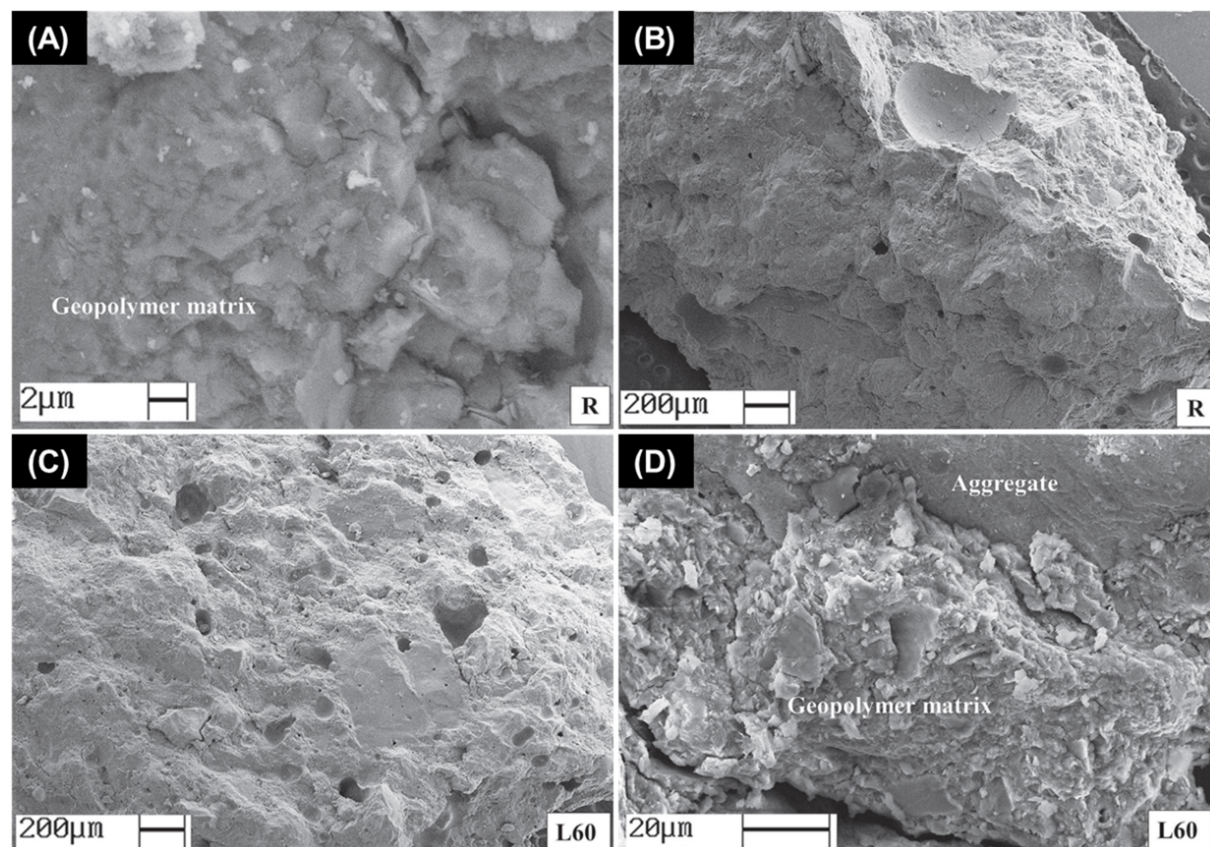


Figura 2: Imagens de MEV aos 28 dias de argamassas geopoliméricas de A e B) referência e C e D) 60% de LETA. Fonte: Geraldo; Fernandes; Camarini (2017).

3. Nimwinya et al. (2016) - Calcinado em diferentes temperaturas

- Mostraram que amostras curadas a temperaturas mais elevadas resultaram em matrizes mais densas, com menor porosidade (Figura 3). A maior porosidade observada em amostras curadas à temperatura ambiente está associada à menor densidade e à presença de partículas não reagidas de LETA.

4. Suksiripattanapong et al. (2015) - Mix com outros resíduos

- Investigaram a influência de diferentes razões ativador alcalino/cinza volante e a proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ nas microestruturas e na resistência dos geopolímeros (Figura 4). Suas observações sobre a influência de diferentes valores

de ativador alcalino na reação de geopolimerização e na resistência são relevantes para a discussão dos resultados microestruturais;

- Destacaram a importância de atingir a proporção ideal $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, que foi de 80:20;
- Também mencionaram que altos valores de ativador alcalino podem resultar em menor resistência devido a microfissuras e maior distância entre as partículas, o que está relacionado com as observações sobre a influência da razão ativador alcalino/cinza volante nas microestruturas dos geopolímeros.

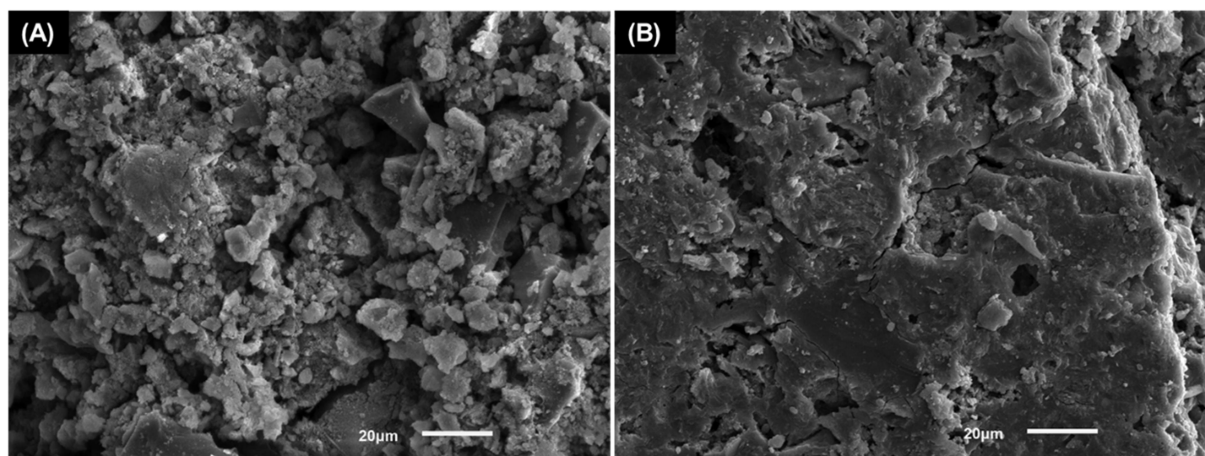


Figura 3: Imagens de MEV do geopolímero nas proporções LETA/cinza da casca de arroz= 50:50 em cura de A) 27-30 °C e B) 60 °C. Fonte: Nimwinya et al. (2016).

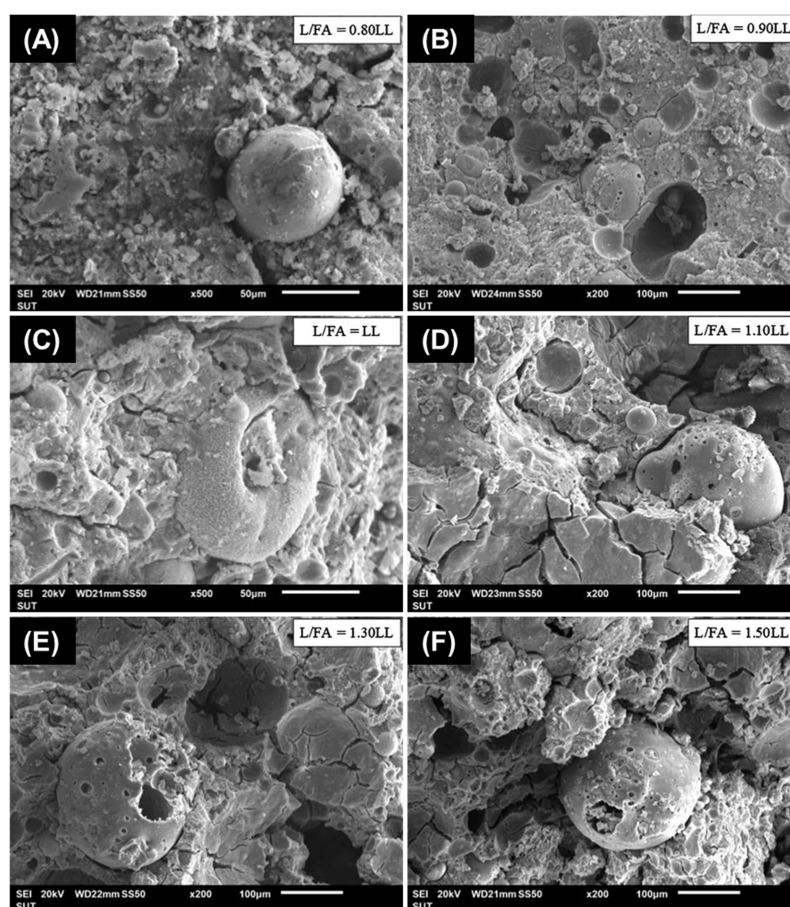


Figura 4: Imagens de MEV de amostras do geopolímero curadas por 7 dias com diferentes conteúdos de ativador alcalino. Fonte: Suksiripattanapong et al. (2015).

5. Suksiripattanapong et al. (2015) - Mix com outros resíduos

- Este estudo complementa o anterior, considerando a influência da razão ativador alcalino/cinza volante, da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ e da temperatura de cura nas microestruturas e na resistência (Figura 5);
- Demonstraram que a razão ativador alcalino/cinza volante ideal de 1,3 resultou em produtos cimentícios ligando partículas de cinza volante e lodo de ETA, formando uma matriz densa;
- Também destacaram a importância da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ideal, que foi de 80:20;
- Observaram que razão ativador alcalino/cinza volante muito altas ou baixas podem afetar negativamente a resistência, relacionando-se com a importância da razão ideal ativador alcalino/cinza volante e da proporção $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$.

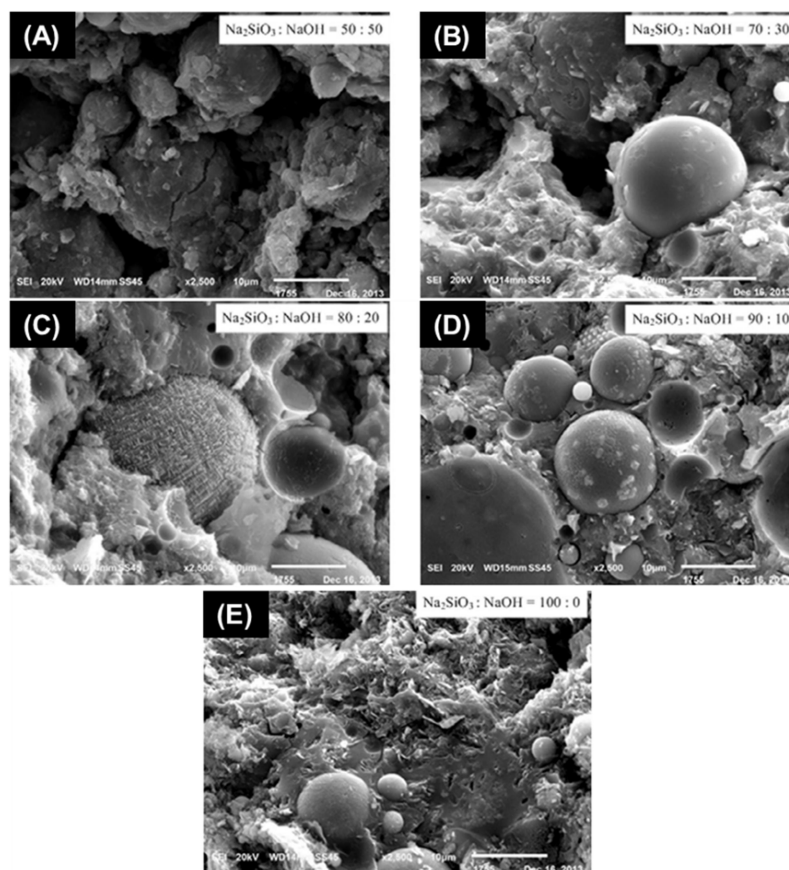


Figura 5: Imagens de MEV do geopolímero na razão ativador alcalino/cinza volante de 1,2, calcinado a 85 °C por 3 dias e curado por 7 dias, para diferentes razões $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de A) 50:50, B) 70:30, C) 80:20, D) 90:10 e E) 100:0. Fonte: Suksiripattanapong et al. (2015).

4. CONCLUSÃO

O lodo de ETA demonstrou ser um material viável para aplicação em sistemas geopoliméricos, tanto na forma calcinada quanto in natura, com desempenho variável conforme a temperatura de calcinação, proporções utilizadas e adição de outros resíduos. Segue abaixo os principais achados:

- A calcinação do lodo de ETA influencia diretamente sua reatividade e o desempenho mecânico dos geopolímeros. Temperaturas mais elevadas, como 850 °C, resultaram em maior resistência à compressão, conforme verificado por Iamchaturapatr e Piriyaikul (2020). A calcinação a 600 °C por 2 horas mostrou-se eficaz quando combinada com cinza da casca de arroz, gerando compósitos com boa resistência e densidade reduzida (Nimwinya et al., 2016; Poowancum et al., 2015).
- Com relação ao comportamento frente a ciclos de umedecimento e secagem, a argamassa geopolimérica com lodo de ETA calcinado e reforço de fibra de sisal demonstrou durabilidade satisfatória, com perda de apenas 26,7% na resistência à flexão após 10 ciclos de umedecimento e secagem (Santos et al., 2021). Geopolímeros com lodo de ETA e cinzas volantes também apresentaram resistência superior a 12 MPa após 12 ciclos (Horpibulsuk et al., 2016), evidenciando seu potencial em aplicações expostas a variações ambientais.

- Geopolímeros produzidos com lodo calcinado a 850 °C exibiram desempenho satisfatório na redução sonora (~63,5%), comparável a materiais comerciais (Iamchaturapatr e Piriyaikul, 2020). Além disso, a densidade desses geopolímeros é significativamente inferior à do cimento Portland convencional, o que contribui para a leveza do material.
- A combinação de lodo de ETA com cinzas volantes e resíduos como cinza de casca de arroz e resíduo de carbetto de cálcio permite ajustar as propriedades do geopolímero, com destaque para a proporção de 30% (Poowancum et al., 2015). A formulação ideal identificada por Ho et al. (2018) - com 18,9% de lodo de ETA, 76,1% de cinzas volantes e 5% de NaOH – atingiu resistência à compressão de 8,98 MPa, adequada para aplicações de menor exigência estrutural.
- As proporções entre os ativadores alcalinos ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) e entre o ativador e os precursores são determinantes para o desempenho do material, sendo as razões 80:20 e 70:30 as mais eficazes nos estudos avaliados.
- As condições térmicas (temperatura e tempo de cura) também impactam significativamente o desenvolvimento da resistência, com destaque para o período de 72 horas a 75–85 °C como ideal.
- O geopolímero produzido por Orbecido et al. (2018) demonstrou elevada resistência a ambientes ácidos, mantendo sua integridade após 28 dias de exposição ao ácido sulfúrico, o que reforça seu potencial em ambientes agressivos.
- Os lodos de ETA analisados apresentam potencial relevante para a produção de geopolímeros, especialmente aqueles com altos teores de SiO_2 e Al_2O_3 , característicos de materiais pozolânicos reativos. A presença de CaO em algumas amostras permite a exploração de sistemas híbridos, com propriedades específicas de desempenho. Por outro lado, a variabilidade na composição química exige ajustes no tipo e na dose do ativador alcalino, além de possíveis tratamentos prévios nos lodos com alta perda ao fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKBARNEJAD, A. et al. Durability of alkali-activated slag concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 04014245, 2015.
2. BATISTA DOS SANTOS, G.Z.; PASSOS DE OLIVEIRA, D.; DE ALMEIDA MELO FILHO, J.; MARQUES DA SILVA, N. Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021.
3. BUCHWALD, A.; KAPS, C. Alkali-activated binders by use of industrial by-products. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 109–115, 2002.
4. CEMBUREAU. **The European Cement Association**. Activity Report 2016. Bruxelas: Cembureau, 2016.
5. DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633–1656, 1991.
6. DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2917–2933, 2007.
7. GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low- CO_2 ” cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1489–1498, 2004.
8. GERALDO, R.H.; FERNANDES, L.F.R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 146–155, 2017.
9. GOUNY, C. et al. Valorization of a kaolinitic clay in the synthesis of geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 59–60, p. 79–85, 2012.
10. HABERT, G. et al. Environmental comparison of geopolymer and OPC cement based on thermal and mechanical properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1137–1145, 2011.
11. HE, J. et al. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 108–118, 2013.
12. HO, V.; ORBECIDO, A.; PROMENTILLA, M.A. **Investigation on mixture design of one-part geopolymer from fly ash and water treatment sludge**. [S.l: s.n.], 2018.
13. HORPIBULSUK, S. et al. A sustainable approach to reuse of water treatment sludge as geopolymer aggregate in clay brick. **Waste Management**, v. 46, p. 323–331, 2015.
14. HORPIBULSUK, S. et al. Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, 2016.
15. IAMCHATURAPATR, J.; PIRIYAKUL, K. **Strength and noise reduction of geopolymeric material produced from waste sludge**. [S.l: s.n.], 2020. v. 856 KEM.

16. KEELEY, J. et al. Sludge production and management for water treatment works. **Environmental Technology**, v. 33, p. 1–10, 2012.
17. KHATER, H. M. Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2012.
18. NIMWINYA, E. et al. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 128–134, 2016.
19. ORBECIDO, A. et al. **Characterization and acid resistance test of one-part geopolymer from fly ash and water treatment sludge**. [S.l: s.n.], 2018.
20. PACHECO-TORGAL, F. et al. Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (LCA), eco-labeling and case studies. Oxford: **Woodhead Publishing**, 2012.
21. POOWANCUM, A. et al. Water treatment sludge–rice husk ash blend as sustainable geopolymer precursors. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 857–865, 2015.
22. POOWANCUM, A.; NIMWINYA, E.; HORPIBULSUK, S. **Development of room temperature curing geopolymer from calcined water-treatment-sludge and rice husk ash**. [S.l: s.n.], 2015. v. 10.
23. PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 1–2, 2014.
24. SANTOS, Marcos David dos. **Revisão sistemática da literatura com meta-análise sobre o lodo de estações de tratamento de água com avaliação do ciclo de vida em blocos cerâmicos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
25. SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of limestone powder and waste sand in geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 302–309, 2015.
26. SUKSIRIPATTANAPONG, C. et al. Strength development of water treatment sludge–fly ash geopolymer. **Waste Management**, v. 38, p. 395–403, 2015a.
27. SUKSIRIPATTANAPONG, C. et al. Use of water treatment sludge as a geopolymer aggregate. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, p. 327–336, 2015b.
28. SUKSIRIPATTANAPONG, C. et al. Water treatment sludge–calcium carbide residue geopolymers as nonbearing masonry units. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, 2017.
29. SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S.; BOONGRASAN, S.; et al. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge–fly ash lightweight cellular geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 807–816, 2015.
30. SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S.; CHANPRASERT, P.; et al. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 20–30, 2015.
31. SUKSIRIPATTANAPONG, C.; SRIJUMPA, T.; et al. Compressive strengths of water treatment Sludge–fly ash geopolymer at various compression energies. **Lowland Technology International**, v. 17, n. 3, p. 147–156, 2015.
32. TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125–130, 2013.
33. WAIJAREAN, N. et al. Properties of geopolymers made from calcined sludge and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 748–753, 2014.
34. ZHANG, Z. Properties and microstructure of alkali activated fly ash–slag materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 329–336, 2011.