XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8244

Lodo de estação de tratamento de água como precursor funcional em geopolímeros

Water treatment plant sludge as a functional precursor in geopolymers

Maurílio Gomes-Pimentel
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | mauriliogp@ufpa.br
Rosana Coelho
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | rosanacoelho16@gmail.com
Márcio Rodrigo Nunes de Souza
Instituto Federal do Amapá | Macapá | Brasil | marcio.souza@ifap.edu.br
Alcebíades Negrão Macêdo
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | anmacedo@ufpa.br
Marcelo de Souza Picanço
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | marcelosp@ufpa.br

Resumo

A geração de lodo de estação de tratamento de água (WTS) pressiona a gestão de resíduos e é pouco valorizada como recurso mineral. Embora o WTS apresente potencial para aplicação em geopolímeros, ainda faltam avaliações sistemáticas de substituição efetiva do metacaulim mantendo o sistema ativador fixo. Neste estudo, avaliou-se o potencial do WTS calcinado como precursor funcional em ligantes geopoliméricos, com substituições do metacaulim por WTS em 0%, 50% e 100%. A formulação com 50% de WTS aumentou a fluidez e atingiu a maior resistência aos 28 dias, mantendo absorção e índice de vazios semelhantes ao sistema de referência, enquanto 100% de WTS elevou a porosidade e reduziu a resistência. O DRX confirmou a formação predominante de gel amorfo, com fases cristalinas residuais. Os resultados indicam uma rota tecnicamente robusta para converter um resíduo urbano em ligante de menor impacto, apoiando estratégias de construção circular.

Palavras-chave: Aluminosilicatos de resíduos. Minerais secundários. Materiais circulares. Ligantes álcali-ativados. Valorização de resíduos urbanos.

Abstract

The generation of water treatment sludge (WTS) places increasing pressure on waste management systems and remains largely underutilized as a mineral resource. Although WTS has shown potential for application in geopolymers, systematic evaluations of effective metakaolin replacement while maintaining a fixed activator system are still lacking. This study evaluated the potential of calcined WTS as a functional precursor in geopolymeric binders by replacing metakaolin with WTS at levels of 0%, 50%, and 100%. The formulation containing 50% WTS exhibited improved flowability and achieved the highest compressive strength at 28 days while maintaining water absorption and void content comparable to the reference system. In contrast, the 100% WTS formulation increased porosity and reduced strength. X-ray diffraction (XRD) confirmed the predominance of an amorphous gel together with residual crystalline phases. These findings indicate a technically robust pathway for converting an urban waste into a lower-impact binder, supporting circular construction strategies.

Keywords: Waste aluminosilicates. Secondary minerals. Circular materials. Alkali-activated binders. Urban waste valorization.

Como citar:
GOMES-PIMENTEL, M. *et al.*, Lodo de estação de tratamento de água como precursor funcional em geopolímeros. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8244

INTRODUÇÃO

A crescente geração de lodos de estações de tratamento de água (ETA) tornou-se um desafio ambiental e econômico global, associado à expansão dos sistemas de abastecimento e ao aumento do acesso à água tratada. O marco de 8 bilhões de habitantes registrado pela ONU em novembro de 2022 reforça a tendência de crescimento da demanda por tratamento e, consequentemente, do volume de lodo gerado [1]. Entre 2000 e 2024, 2,2 bilhões de pessoas passaram a ter acesso a serviços de água potável geridos com segurança, intensificando esse fluxo residual. Em paralelo, as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) para a qualidade da água potável têm orientado a atualização de regulamentos nacionais, elevando exigências operacionais [2]. Ainda assim, esses lodos são majoritariamente destinados a aterros, com custos e impactos associados ao transporte e à disposição final [3][4][5].

As rotas convencionais de gerenciamento do lodo de ETA (WTS) apresentam limitações relevantes. Além dos custos recorrentes de disposição, essas estratégias desconsideram o potencial mineralógico do resíduo, que frequentemente apresenta elevados teores de SiO_2 e Al_2O_3, derivados dos coagulantes utilizados e da fração argilosa presente na água bruta [6][7]. Os estudos de [3][8][9] indicam que esses lodos podem exibir composição semelhante à de argilas naturais, com proporções variáveis de caulinita, quartzo e óxidos de ferro, sugerindo potencial para reaproveitamento em matrizes cimentícias ou ligantes alternativos. No entanto, esse potencial permanece amplamente subexplorado nas práticas atuais de gestão de resíduos.

Nesse contexto, os geopolímeros constituem uma plataforma promissora para a valorização de resíduos minerais. Produzidos por ativação alcalina de precursores ricos em aluminosilicatos, esses ligantes permitem incorporar subprodutos industriais e resíduos urbanos, frequentemente alcançando desempenho mecânico e durabilidade comparáveis ou superiores aos de ligantes convencionais à base de cimento Portland, além de potencial para reduzir emissões de CO_2 e demanda energética quando precursores de alta intensidade ambiental são parcialmente substituídos por resíduos disponíveis localmente [10].

Apesar dos avanços na incorporação de resíduos em sistemas geopoliméricos, persistem lacunas quanto ao uso do lodo de ETA como precursor. Os estudos de [11][12][13][14] mostram sua aplicação sobretudo como componente secundário, combinado a precursores altamente reativos, como metacaulim, cinza volante ou cinza de casca de arroz, inclusive em sistemas ternários. Entretanto, ainda são escassos estudos que avaliem a substituição efetiva do metacaulim por lodo de ETA mantendo constante o sistema ativador e analisando simultaneamente desempenho mecânico e indicadores de durabilidade.

Diante disso, este estudo avalia a viabilidade técnica do lodo de ETA como precursor funcional na produção de geopolímeros por meio de uma abordagem integrada, abrangendo caracterização físico-química e mineralógica, comportamento no estado fresco, desempenho mecânico e indicadores de durabilidade. Ao investigar estratégias de substituição progressiva do metacaulim por lodo de ETA, o trabalho contribui para

soluções construtivas circulares alinhadas à gestão sustentável de resíduos e à mitigação de impactos ambientais no setor da construção.

MATERIAIS E MÉTODOS

O lodo de ETA (WTS) foi coletado na ETA do Bolonha, em Belém (PA) (Figura 1A), responsável pelo abastecimento de parte da região metropolitana. Após a coleta, o material foi submetido à secagem ao ar livre para reduzir a umidade e facilitar o manuseio, a homogeneização e o processamento térmico subsequente.

O lodo de ETA, previamente seco, foi adicionado (2 kg) em cadinhos de porcelana e calcinado em forno mufla. A calcinação foi conduzida a 700 ºC por 2 h, temperatura selecionada para promover a desidroxilação da caulinita, evitando sinterização excessiva. Ao final do tratamento térmico, o forno foi aberto e o material foi resfriado rapidamente ao ar, visando preservar as fases amorfas e reativas geradas.

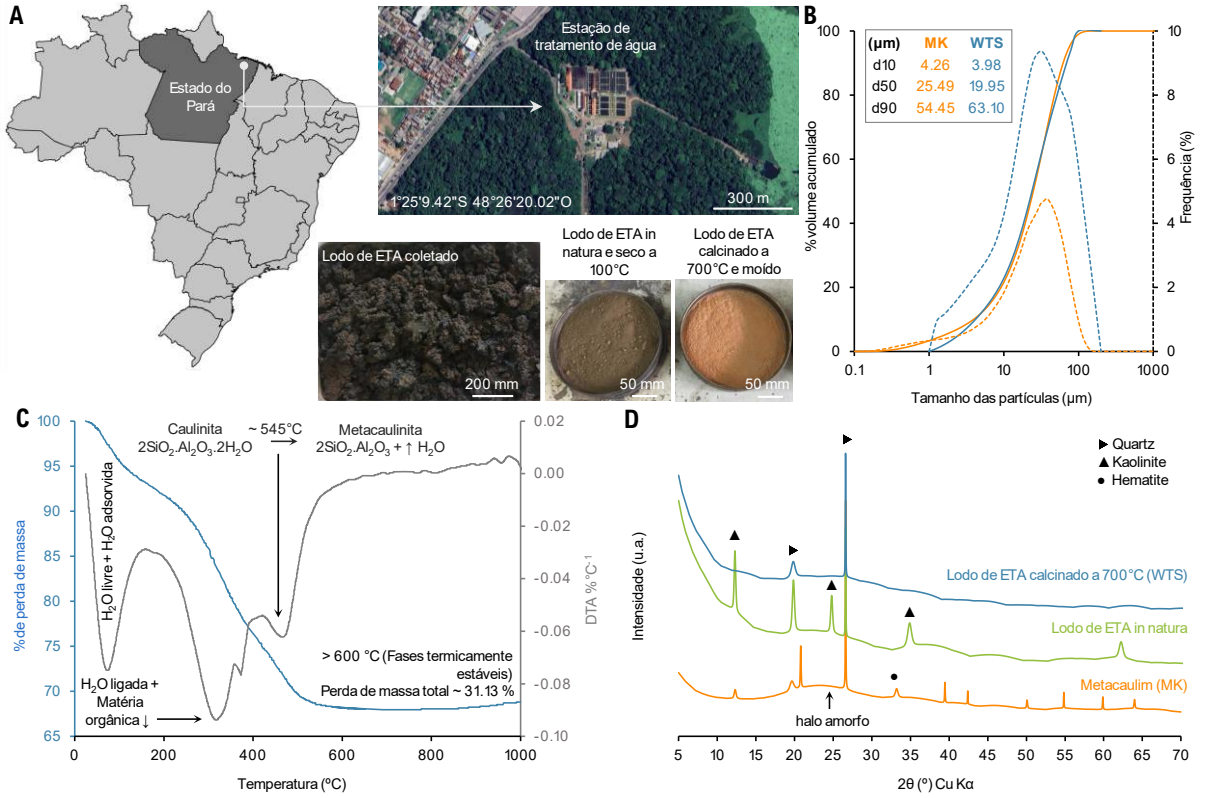
Após a calcinação, o lodo foi moído para obtenção de um pó fino adequado à caracterização subsequente e à produção dos geopolímeros. Para isso, 1 kg do material foi processado em moinho de bolas com 5 kg de esferas de alumina (densidade 3,65 g/cm^3), com distribuição bimodal: cerca de um terço da massa em esferas de 20 mm e dois terços em esferas de 12 mm, combinação adotada para favorecer fragmentação e refinamento. O tempo total de moagem foi de 1 h. A granulometria por difração a laser dos precursores é mostrada nas Figura 1B, com curvas acumuladas e diferencial, evidenciando refinamento e faixa granulométrica.

A análises termogravimétrica (TGA/DTG) do lodo de ETA (Figura 1C) foi realizada sob atmosfera controlada, permitindo identificar eventos de perda de água e desidroxilação, além da formação de fases termicamente estáveis acima de 600 ºC. As curvas de perda de massa e DTG fundamentaram a escolha da temperatura de calcinação. O teor de caulinita foi estimado em aproximadamente 57,21% pelo método de [15].

Os difratogramas de raios X (DRX) do lodo de ETA in natura e após calcinação a 700 °C são apresentados na Figura 1D, permitindo identificar as fases cristalinas e as transformações mineralógicas induzidas pelo tratamento térmico, com predominância de quartzo e caulinita. Complementarmente, apresenta-se o DRX do metacaulim (MK), utilizado como material de referência no estudo. A composição química e a caracterização física dos materiais são apresentadas no Quadro 1.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8244

Figura 1: Origem, processamento e caracterização dos precursores utilizados na síntese geopolimérica.



Nota: (A) Localização das fontes de matérias-primas no estado do Pará, Brasil, com imagem de satélite da estação de tratamento de água (Google Earth) e registros fotográficos do lodo coletado, bem como do material em pó após processamento. (B) Distribuição granulométrica por difração a laser dos precursores, com curvas acumulada e diferencial e parâmetros característicos (d10, d50 e d90) para metacaulim (MK) e lodo de ETA (WTS). (C) Curvas TGA/DTG do WTS, destacando eventos térmicos associados à perda de água livre e ligada, à presença de matéria orgânica e à desidroxilação, que fundamentaram a seleção da temperatura de calcinação. (D) Difratogramas de raios X dos precursores (MK, lodo in natura e lodo calcinado a 700 °C), evidenciando a transformação induzida pela ativação térmica, a presença de fases cristalinas residuais e o halo amorfo associado à fração reativa. Fonte: Autoria própria.

Quadro 1: Composição química e propriedades físicas dos precursores utilizados neste estudo. Os teores de óxidos são expressos em porcentagem (%). SG refere-se à massa específica (g/cm³) e SSA à área específica superficial (m²/g) dos materiais. PF é perda ao fogo.

Materiais	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	PF	SG	SSA
MK	46.39	39.18	9.80	-	0.03	0.01	0.16	0.07	1.17	-	3.19	2.63	11.53
WTS	42.80	31.31	17.82	0.10	1.49	0.48	0.27	1.17	0.86	0.80	2.99	2.79	7.98

Fonte: o autor.

Além dos precursores sólidos, foram utilizados hidróxido de sódio (NaOH) em micropérolas, com 99% de pureza, e silicato de sódio (Na_2SiO_3) com 32% de SiO_2 e 14,60% de Na_2O.

As quantidades de matérias-primas empregadas nas formulações geopoliméricas estão apresentadas no Quadro 2. Inicialmente, os precursores sólidos (metacaulim e ou lodo de ETA), a solução de NaOH foi preparada pela dissolução do hidróxido de sódio em água 24 h antes da mistura. Em seguida, a solução de NaOH e o Na_2SiO_3 foram introduzidos em um misturador mecânico planetário., operado com velocidade de

rotação da pá de 140 ± 5 rpm e rotação planetária de 62 ± 5 rpm. Após a mistura inicial dos sólidos com os ativadores alcalinos, a água de mistura foi adicionada gradualmente. O sistema foi homogeneizado em baixa rotação por 1 min, interrompido para raspagem manual do material aderido às paredes do recipiente e, em seguida, retomado em baixa rotação por mais 4 min, totalizando 5 min de mistura. Esse procedimento assegurou adequada dispersão dos precursores e distribuição uniforme dos ativadores, produzindo pastas homogêneas para ensaios no estado fresco, moldagem e cura.

Quadro 2: Proporções de mistura das formulações geopoliméricas com substituição crescente do metacaulim por lodo de estação de tratamento de água, expressas em função da massa de metacaulim, os teores de ativadores e as razões molares resultantes.

Geopolímero	MK	WTS	NaOH	Na_2SiO_3	H_2O	SiO_2/Al_2O_3	Na_2O/Al_2O_3	Na_2O/SiO_2
GP-0WTS (100% MK)	1.00	-	0.08	0.66	0.34	2.92	0.66	0.23
GP-50WTS (50% MK + 50% WTS)	0.50	0.50	0.08	0.66	0.34	3.16	0.74	0.23
GP-100WTS (100% WTS)	-	1.00	0.08	0.66	0.34	3.47	0.83	0.24

Fonte: o autor.

Após a mistura, as pastas geopoliméricas foram inicialmente avaliadas quanto à consistência por meio do ensaio de mini-slump, conduzido de acordo com procedimento de [16] e o tempo de pega de acordo com [17]. Em seguida, as pastas foram moldadas em corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para determinação da resistência à compressão, bem como para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente, conforme [18][19].

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, as misturas geopoliméricas foram moldadas em corpos de prova prismáticos de 40 mm × 40 mm × 160 mm, conforme [20].

Após a moldagem, todos os corpos de prova foram curados em câmara de cura térmica a 25 ºC e 60% de umidade relativa até a idade de ensaio. Os ensaios mecânicos e físicos foram realizados aos 28 dias, com exceção da resistência à compressão, avaliada aos 7 e 28 dias.

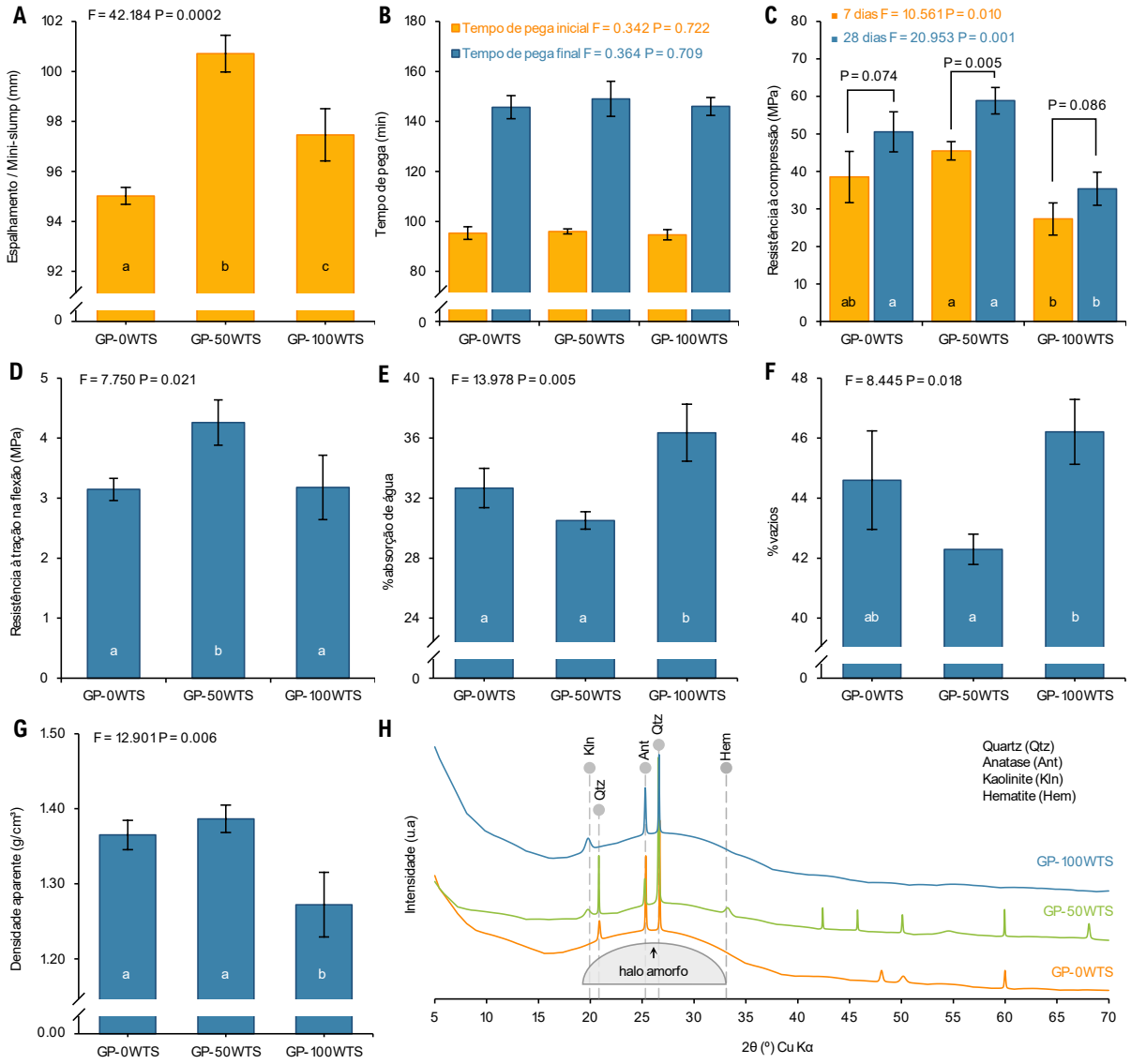
Os dados foram avaliados quanto à normalidade e homocedasticidade pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, confirmando distribuição normal e variâncias homogêneas. Assim, aplicou-se o teste t de Student para duas condições e ANOVA seguida de Tukey para três ou mais condições. Diferenças foram consideradas significativas para $p < 0.05$. Os resultados são apresentados como média ± desvio padrão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 sintetiza o desempenho no estado fresco, as propriedades mecânicas e os indicadores físicos associados à durabilidade dos ligantes geopoliméricos com substituição progressiva do metacaulim por lodo de ETA (GP-0WTS, GP-50WTS e GP-100WTS), além do DRX dos materiais endurecidos. No estado fresco, o espalhamento no mini-slump (Figura 2A) foi significativamente influenciado pela composição do

precursor, com maior fluidez para GP-50WTS, menor para a referência GP-0WTS e comportamento intermediário para GP-100WTS. Em contraste, os tempos de pega inicial e final (Figura 2B) não apresentaram diferenças significativas entre as formulações ($p > 0.05$), indicando que a cinética inicial é majoritariamente controlada pelo sistema ativador alcalino.

Figura 2: Desempenho no estado fresco, propriedades mecânicas e indicadores físico-duráveis de geopolímeros com substituição progressiva do metacaulim por lodo de ETA (WTS).



Nota: (A), Espalhamento no ensaio de mini-slump. (B), Tempos de pega inicial e final. (C), Resistência à compressão aos 7 e 28 dias. (D), Resistência à tração na flexão aos 28 dias. (E), Absorção total de água. (F), Índice de vazios. (G), Massa específica aparente. (H), Difratogramas de raios X dos geopolímeros (GP-0WTS, GP-50WTS e GP-100WTS), com identificação das fases cristalinas residuais e indicação do halo amorfo associado à fração reacional predominantemente amorfa. Valores expressos como média ± desvio padrão. Letras minúsculas diferentes dentro das colunas indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de geopolímeros para a mesma variável (ANOVA, $p < 0.05$; Tukey). No painel (C), os valores de p apresentados para cada formulação referem-se à comparação entre 7 e 28 dias (teste t). Fonte: Autoria própria.

O desempenho mecânico evidenciou diferenças mais marcantes. A resistência à compressão (Figura 2C) aumentou de 7 para 28 dias em todas as misturas, refletindo a evolução da geopolimerização. Aos 7 dias, a incorporação de WTS resultou em

menores valores em comparação à referência, sobretudo para GP-100WTS. Aos 28 dias, entretanto, GP-50WTS apresentou a maior resistência, superando a referência, enquanto GP-100WTS manteve desempenho inferior, sugerindo limitações associadas à menor reatividade e maior heterogeneidade do precursor quando empregado como substituto total. A resistência à tração na flexão (Figura 2D) também foi afetada pela composição, com melhor desempenho para GP-50WTS.

Os indicadores físicos corroboram essas tendências. A absorção de água (Figura 2E) e o índice de vazios (Figura 2F) aumentaram significativamente para GP-100WTS, enquanto GP-0WTS e GP-50WTS permaneceram em níveis semelhantes, indicando que a estrutura porosa se torna mais aberta principalmente sob substituição total. Consequentemente, a massa específica aparente (Figura 2G) foi menor em GP-100WTS, coerente com maior porosidade conectada. Assim, GP-50WTS combina ganho mecânico com manutenção de compactação e desempenho físico próximos ao sistema de referência.

O DRX dos geopolímeros endurecidos (Figura 2H) mostra a presença de um halo amorfo típico do gel geopolimérico, sobreposto por fases cristalinas residuais, com quartzo (Qtz), caulinita (Kln), anatásio (Ant) e hematita (Hem). As variações entre as formulações refletem a contribuição crescente do lodo, mantendo a fração amorfa dominante, mas com maior assinatura de fases residuais em teores mais elevados de WTS.

Os resultados indicam que o desempenho dos geopolímeros não é controlado apenas pela reatividade do precursor, mas pela sinergia entre eficiência de ativação alcalina, empacotamento de partículas e mineralogia. Embora o metacaulim seja altamente reativo, sua substituição parcial por lodo de ETA calcinado (WTS) promoveu desempenho equivalente ou superior em idades mais avançadas, especialmente em GP-50WTS, cuja resistência à compressão aumentou significativamente de 7 para 28 dias, evidenciando uma contribuição tardia, porém efetiva, do WTS para a formação do gel, em concordância com estudos que relatam cinética de dissolução mais lenta para precursores alternativos, mas participação progressiva sob ativação adequada [21][22]. Em contraste, a substituição total (GP-100WTS) resultou em menor resistência e maior porosidade aberta, atribuídas à menor homogeneidade do resíduo e à menor disponibilidade de espécies reativas de Si e Al, coerente com o menor teor de caulinita do WTS e, portanto, menor formação de metacaulinita após calcinação. Os estudos de [11][13] indicam que lodos com caulinita mais elevada tendem a se aproximar do comportamento do metacaulim, enquanto teores mais baixos favorecem estratégias de substituição parcial, o que explica o desempenho otimizado de GP-50WTS. Adicionalmente, a manutenção de absorção e porosidade em níveis comparáveis ao sistema de referência sugere que a distribuição granulométrica mais ampla do WTS contribui para um empacotamento mais eficiente, preservando a compacidade da matriz. Sob a perspectiva de gestão de resíduos, a coesão no estado fresco e a estabilidade dos tempos de pega reforçam que o WTS atua como precursor funcional, e não como fíler inerte, consolidando uma rota robusta de valorização.

CONCLUSÕES

O presente estudo investigou o lodo de ETA calcinado (WTS) como substituto progressivo do metacaulim em ligantes geopoliméricos, avaliando o desempenho no estado fresco, as propriedades mecânicas e os indicadores de durabilidade (permeabilidade); as principais conclusões são:

- O WTS calcinado atuou como precursor funcional em ligantes geopoliméricos.
- A substituição parcial (50%) maximizou o equilíbrio entre resistência, compacidade e trabalhabilidade.
- A substituição total (100%) aumentou porosidade/absorção e reduziu desempenho mecânico.
- O desempenho resulta da sinergia entre ativação alcalina, empacotamento e mineralogia, não só da reatividade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Museu de Geociências (MUGEO) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela realização das medições de área específica BET, das análises de distribuição granulométrica a laser e da análise termogravimétrica dos materiais. Os autores também agradecem ao Laboratório de Caracterização Química do Instituto de Geociências (UFPA) pela condução das análises de fluorescência de raios X (FRX). Ao Laboratório de Análises de Raios X, Térmica e Dielétrica do Programa de Pós-Graduação em Física da UFPA, os autores agradecem a realização das análises de difração de raios X (DRX). Por fim, os autores agradecem aos membros do grupo de pesquisa GAEMA pelas valiosas discussões técnicas e contribuições críticas que auxiliaram significativamente no desenvolvimento deste trabalho.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) exclusivamente para auxiliar na correção gramatical, no aprimoramento da clareza, da coesão e da fluidez do texto em português. A ferramenta não foi utilizada para geração, interpretação ou análise dos resultados científicos, tampouco para elaboração das conclusões do estudo. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram, editaram e validaram integralmente o conteúdo do manuscrito, assumindo total responsabilidade pela precisão, integridade, originalidade e conteúdo científico do artigo.

REFERÊNCIAS

[1] ADAM, D. World population hits eight billion — here's how researchers predict it will grow. **Nature**, 15 nov. 2022.

[2] WORLD HEALTH ORGANIZATION, (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND, (UNICEF). **Progress on household drinking-water, sanitation and hygiene**

2000–2024: special focus on inequalities. Geneva: [s.n.].

[3] AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 950–955, 2016.

[4] DEMIRBAS, A.; EDRIS, G.; ALALAYAH, W. M. Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 10, p. 999–1006, 19 maio 2017.

[5] KUMAR, K.; SHARMA, R.; GOYAL, S. K. Current practices for the management of sludge generated from common effluent treatment plants - A review. **Indian Journal of Chemical Technology**, 2025.

[6] ZUKI, N. A. M. et al. Stability and Behavior of Silicon Dioxide Nanoparticles in Wastewater. In: **Industrial Water and Waste Treatment**. Boca Raton: CRC Press, 2025. p. 385–416.

[7] KOLEY, S. et al. Sustainable water treatment: leveraging drinking water treatment sludge for enhanced water quality. **Environmental Technology**, v. 46, n. 27, p. 5525–5542, 6 dez. 2025.

[8] AHMADI, M. et al. Sludge characterization of an industrial water treatment plant, Iran. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 28–30, p. 5306–5316, ago. 2014.

[9] RUVIARO, A. S. et al. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, p. 129484, dez. 2021.

[10] SALAS, D. A. et al. Life cycle assessment of geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 170–177, nov. 2018.

[11] SANTOS, G. Z. B. et al. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of Environmental Management**, v. 249, p. 109328, nov. 2019.

[12] SUKSIRIPATTANAPONG, C. 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, maio 2015.

[13] 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, abr. 2017.

[14] RUVIARO, A. S. et al. Ternary sustainable geopolymer matrices containing metakaolin, water treatment sludge, and porcelain tile polishing residue. **Construction and Building Materials**, v. 440, p. 137412, ago. 2024.

[15] ZUNINO, F.; BOEHM-COURJAULT, E.; SCRIVENER, K. The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination. **Materials and Structures**, v. 53, n. 2, p. 44, 16 abr. 2020.

[16] WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

[17] ASTM INTERNATIONAL. **Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. West Conshohocken, PAASTM International, , 1 out. 2021.

Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C191-21>

[18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215. Portland cement - Determination of compressive strength of cylindrical test specimens**. , 2019.

[19] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778. Hardened mortar and concrete - Determination of absorption, voids and specific gravity**. , 2005.

[20] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279. Mortars applied on walls and ceilings - Determination of the flexural and the compressive strength in the hardened stage**. , 2005.

[21] JIN, H.-Z. et al. Structural and functional design of geopolymer adsorbents : a review. **Tungsten**, v. 6, n. 1, p. 48–76, 30 mar. 2024.

[22] KHAN, R. et al. Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications. **RSC Advances**, v. 15, n. 16, p. 12443–12471, 2025.