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.v21i1.8285

Estudo comparativo da reatividade de cinzas de lodo de esgoto via FRX e Ensaio de Chapelle Modificado para aplicação em matrizes cimentícias

Comparative study of the reactivity of sewage sludge ash via XRF and Modified Chapelle Test for application in cementitious matrices.

Marielle Vieira Felix Rocha
Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) | São Carlos - SP | Brasil E-mail:marielle.felix@gmail.com
Haroldo Dias Flauzino Neto
Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) | São Carlos - SP | Brasil |E-mail: haroldoflauzino@ufg.br
Bruno Luís Damineli
Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP)| São Carlos - SP | Brasil | E-mail:bruno.daminelli@usp.br
Oswaldo Cascudo
Escola de Engenharia Civil e Ambiental – EECA da Universidade Federal de Goiás (UFG)| Goiânia - Goiás |E-mail:o.cascudo@gmail.com

Resumo

A gestão do lodo de esgoto é um desafio ambiental crítico, representando até 60% dos custos operacionais das estações de tratamento. Este estudo avalia o potencial uso das Cinzas de Lodo de Esgoto (CLE) como material cimentício suplementar, comparando como o material reage de forma pozolânica através de verificação do potencial químico via Fluorescência de Raios X (FRX) e pelo método de avaliação da pozolanicidade efetiva pelo ensaio de Chapelle Modificado. A metodologia empregou um planejamento experimental (DOE) com calcinação em variadas temperaturas: 800, 900 e 1000°C com variados tempos de retenção (30, 60 e 90 min). Os resultados indicam que a CLE atende aos requisitos da NBR 12653 (Materiais Pozolânicos), com soma de óxidos (SiO2+Al2O3+Fe2O3) de 74,7%, acima dos 70% exigidos por norma para que o material seja considerado uma pozolana. Contudo, foi observado que a reatividade pozolânica decresce em temperaturas superiores a 800°C devido à cristalização de fases minerais e processos de sinterização, que reduzem a fração amorfa. O trabalho valida a viabilidade da CLE na economia circular, identificando o binômio térmico ótimo para maximizar a ecoeficiência em matrizes cimentícias.

Palavras-chave: Cinza de lodo de esgoto. Atividade pozolânica. FRX. Chapelle Modificado. Sustentabilidade.

Abstract

Sewage sludge management is a critical environmental challenge, representing up to 60% of the operational costs of treatment plants. This study evaluates Sewage Sludge Ash (SSA) as a supplementary cementitious material, comparing its chemical potential via X-Ray Fluorescence (XRF) and effective reactivity through the Modified Chapelle test. The methodology employed

an experimental design (DOE) with calcination at 800, 900, and 1000°C (30, 60, and 90 min). Results indicate that SSA meets NBR 12653 requirements, with an oxide sum ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$) of 74.7%. However, pozzolanic reactivity decreases at temperatures above 800°C due to the crystallization of mineral phases and sintering processes, which reduce the amorphous fraction. The work validates the feasibility of SSA in the circular economy, identifying the optimal thermal binomial to maximize eco-efficiency in cementitious matrices.

Keywords: Sewage sludge ash. Pozzolanic activity. XRF. Modified Chapelle. Sustainability.

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada intensificou a produção de resíduos sanitários, tornando o lodo de esgoto um passivo ambiental de escala global. Estima-se que a produção mundial de lodo seco ultrapasse 30 milhões de toneladas anuais, enquanto o Brasil contribui com aproximadamente 300 mil toneladas/ano [1]. A gestão desse subproduto é onerosa, podendo comprometer até 60% do custo operacional das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) [2].

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) estabelece a hierarquia de prioridades na gestão de resíduos, privilegiando a reciclagem e a valorização energética antes da disposição final em aterros [3]. A incineração controlada surge como uma alternativa tecnológica robusta, permitindo a redução de até 90% do volume do resíduo e a geração da Cinza de Lodo de Esgoto (CLE) [4].

O objetivo deste artigo é realizar uma caracterização comparativa da CLE produzida sob diferentes condições de calcinação (800, 900 e 1000°C), confrontando a técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) — que indica o potencial químico teórico — com o ensaio de Chapelle Modificado, que quantifica a reatividade efetiva. Busca-se compreender como o binômio temperatura-tempo influencia a transição entre fases amorfas e cristalinas, determinando a viabilidade do resíduo como adição mineral ativa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica realizada nas bases Science Direct e CAPES revela uma consolidação científica do tema do uso de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral. O autor Poon, Chi-sun destaca-se como a maior referência internacional sobre o tema, com 14 artigos publicados e 53 citações identificadas no período de 2021 a 2022 [5]. Os estudos convergem para a compreensão de que a reatividade da CLE está intrinsecamente ligada à sua superfície específica e ao teor de fases amorfas.

As adições minerais atuam na matriz cimentícia através da reação pozolânica: materiais sílico-aluminosos reagem com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), subproduto da hidratação do clínquer, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário [6]. Esse mecanismo refina a estrutura de poros e aumenta a durabilidade das matrizes. O quadro 1 apresenta a síntese de estudos sobre o comportamento térmico e a pozolanicidade da CLE.

Quadro 1: Comparativo de estudos nacionais e internacionais sobre a CLE

Autor	Temp. Queima	Tam. Partícula	Principal Conclusão sobre Pozolanicidade
Zhou et al. (2024) [7]	800 °C	N/C	Atividade pozolânica máxima em 800°C por 2h.
Xia, Yan et al. (2023) [8]	850 °C	< 75 µm	Atividade moderada; inibição inicial de C3S.
Li, Bin et al. (2024) [9]	800 °C	75 µm	Baixa atividade devido a fases cristalinas.
Basto et al. (2018) [10]	600 - 700 °C	26 µm	Classificadas como pozolanas pela NBR 12653.
Geyer (2001) [11]	800 °C	10 µm	Índice de atividade pozolânica de 76%.
Santana (2022) [12]	800 °C	26 µm	Reatividade maximizada entre 700 e 800 °C.

Fonte: adaptado de Rocha [16].

METODOLOGIA

O lodo foi coletado na ETE Buena Vista (Goiânia-GO), oriundo de leitos de secagem, conforme figura 1. O processamento inicial compreendeu a secagem em estufa a 105°C por 24 horas, seguida de moagem em Aparelho Los Angeles por 45 minutos (ciclos de 15 min) para pulverização do resíduo [16].

Figura 1 - Coleta de lodo de esgoto na ETE Buena Vista – GO



Fonte: Rocha [16]

O plano experimental de incineração seguiu 9 condições, variando temperatura (3 temperaturas foram testadas) e tempo de retenção no forno (3 tempos testados):

CLE800 (30, 60 e 90 min);

CLE900 (30, 60 e 90 min);

CLE1000 (30, 60 e 90 min).

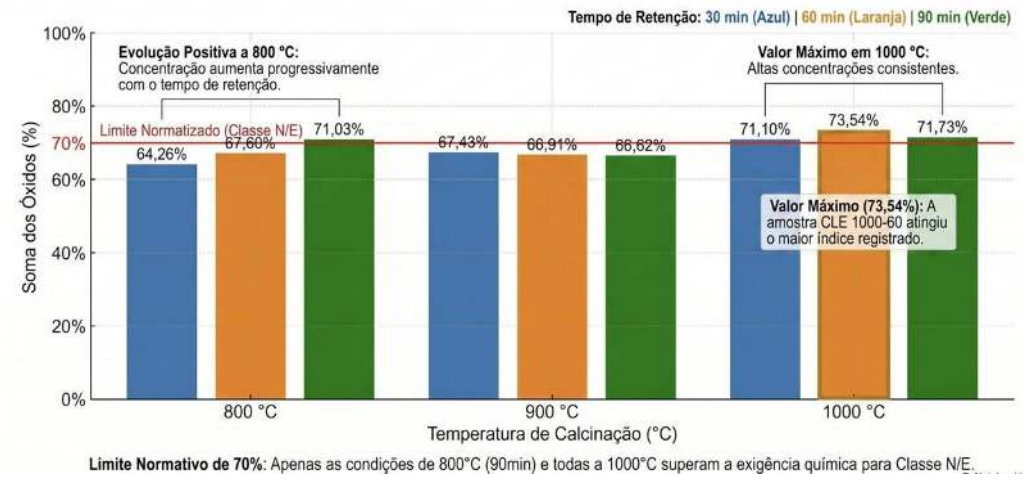
A calcinação ocorreu em forno mufla com rampa de aquecimento controlada para garantir a estabilidade das amostras: 5°C/min até 300°C (patamar de 10 min para oxidação estável da matéria orgânica), seguida de uma rampa de 15°C/min até a temperatura final de destino (800, 900 e 1000°C) [16]. Esta taxa de 15°C/min foi selecionada para equilibrar a eficiência energética e a preservação das fases amorfas reativas, evitando a cristalização prematura, o material foi disposto em cadinhos resistentes à altas temperaturas com aproximadamente 100g de amostra por etapa de calcinação.

Para a caracterização química via FRX, as amostras foram fundidas com tetraborato de lítio (proporção 1:9) a 1000°C. A reatividade pozolânica foi quantificada pelo ensaio de Chapelle Modificado (NBR 15895), medindo o consumo de miligramas de Ca(OH)2 por grama de CLE [13].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química por fluorescência de raios X (FRX) indicaram que todas as amostras de cinzas de lodo de esgoto apresentaram elevados teores de óxidos potencialmente pozolânicos, principalmente SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. Conforme apresentado na Figura 2, a soma desses óxidos variou de aproximadamente 64,26% a 73,54%, observando-se tendência de aumento com a elevação da temperatura de calcinação, sobretudo para as amostras tratadas a 1000 °C.

Figura 2 - Comparação entre a soma dos óxidos x temperatura

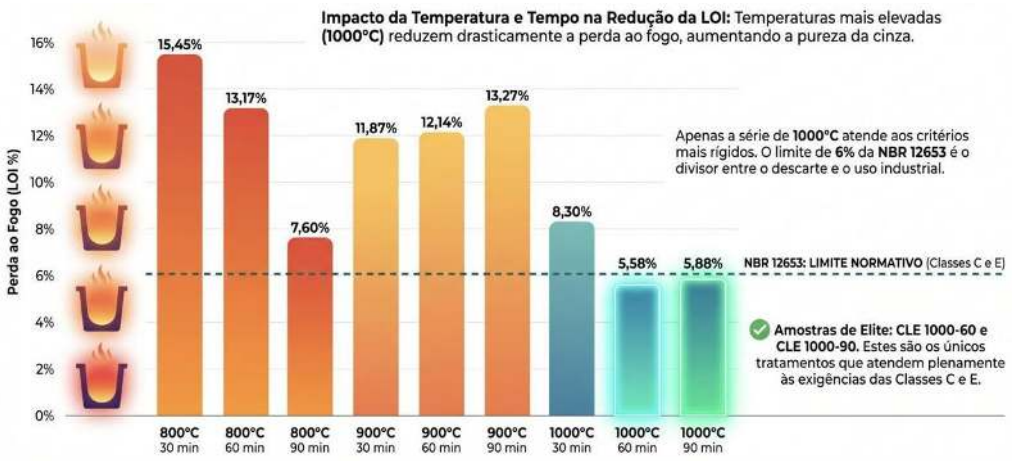


Fonte: Autores (2026)

Destaca-se que as amostras CLE 1000-60 (73,54%) e CLE 1000-90 (71,73%) atingiram valores superiores ao limite mínimo de 70% estabelecido pela NBR 12653: Materiais Pozolânicos [14], indicando elevado potencial pozolânico sob o ponto de vista químico. As demais amostras apresentaram valores próximos, porém inferiores a esse limite, situando-se na faixa de 64% a 69%, o que sugere potencial reativo moderado.

A elevação na concentração dos óxidos majoritários (*SiO*2+*Al*2*O*3+*Fe*2*O*3) com o incremento térmico é resultado da sinergia entre a combustão da fração orgânica evidenciada pela queda da Perda ao fogo (LOI) que é o indicador crítico de reatividade e pureza química das cinzas, apresentada na Fig 3 e a volatilização de componentes inorgânicos instáveis. Observou-se que o *SO*3 foi reduzido de 1,30% para teores abaixo do limite de detecção na amostra CLE 1000-60, indicando que a purificação mineral da cinza em altas temperaturas vai além da simples queima de carbono, envolvendo também a saída de sulfatos e elementos traço como o Zinco.

Figura 3 - Perda ao fogo (LOI) da cinza de lodo de esgoto (CLE)



Fonte: Autores (2026)

Para o ensaio de Chapelle Modificado foram selecionadas amostras específicas correlacionadas ao desempenho químico e contemplam diferentes condições de calcinação, permitindo avaliar o efeito da temperatura e do tempo de residência na reatividade pozolânica. A amostra CLE 800-30 foi incluída para investigar o efeito da elevada perda ao fogo (15,45%) na atividade química, enquanto a CLE 800-90 foi selecionada por apresentar o melhor desempenho químico entre as condições de menor temperatura, atendendo aos requisitos normativos para materiais pozolânicos. Por outro lado, a amostra CLE 1000-60 foi escolhida por representar a condição de maior conformidade com a NBR 12653, atendendo simultaneamente aos critérios de soma de óxidos e perda ao fogo, sendo considerada a principal candidata para aplicação em matrizes cimentícias. Por fim, a amostra CLE 1000-90 foi incluída com o objetivo de avaliar o efeito de condições térmicas mais severas na reatividade do material, permitindo analisar possíveis limitações associadas ao aumento do tempo de calcinação.

Os resultados do ensaio de Chapelle Modificado (Figura 3) revelam que a reatividade efetiva é sensível ao binômio temperatura-tempo. Embora se observe uma zona de transição a 900 °C com reatividade reduzida, a amostra incinerada a 1000 °C por 60 minutos apresentou o maior índice de fixação (535,51 mg/g), superando com folga o limite mínimo de 436 mg $Ca(OH)_2/g$ estabelecido por [17]. Este resultado é coerente com a caracterização química, pois esta amostra concilia a maior soma de óxidos reativos (73,54%) com a maior pureza mineral (menor LOI de 5,58%). Contudo, a Figura 3 destaca o 'ponto de virada' térmico na amostra CLE 1000-90: mesmo com alta soma de óxidos (71,73%), ela sofreu uma queda drástica para 97,78 mg/g. Esse comportamento confirma que o tempo prolongado a 1000 °C promove a cristalização da sílica amorfa em fases inertes como o quartzo, conforme apontado por [18], anulando o potencial pozolânico do material apesar de sua conformidade química.

Figura 3 - Relação entre temperatura de calcinação e reatividade pozolânica por Chapelle



Fonte: Autores (2026)

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a reatividade pozolânica das cinzas de lodo de esgoto não pode ser avaliada exclusivamente com base em sua composição química global. A análise por fluorescência de raios X (FRX) indicou que amostras calcinadas a temperaturas mais elevadas, especialmente a condição 1000°C, apresentaram maiores teores de óxidos potencialmente reativos ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), atendendo aos critérios estabelecidos pela NBR 12653.

Entretanto, os resultados do ensaio de Chapelle modificado demonstraram que a maior concentração desses óxidos não implica, necessariamente, maior reatividade pozolânica. A amostra CLE 1000-60, que apresentou elevada conformidade química, também exibiu o maior índice de atividade pozolânica, evidenciando coerência entre os parâmetros químico e reativo. Por outro lado, a amostra CLE 1000-90, apesar de atender aos critérios de composição química, apresentou uma redução significativa na reatividade, indicando que condições térmicas mais severas podem comprometer o desempenho pozolânico.

Adicionalmente, amostras calcinadas a temperaturas mais baixas, como CLE 800-90, apresentaram elevada reatividade mesmo com valores de soma de óxidos próximos ao limite normativo, sugerindo que fatores como a presença de fases amorfas e o grau de desordem estrutural desempenham papel determinante na atividade pozolânica.

Dessa forma, os resultados indicam que a reatividade das cinzas está diretamente relacionada não apenas à composição química, mas também às condições de calcinação, especialmente temperatura e tempo de residência, que influenciam a formação e preservação de fases amorfas reativas.

Conclui-se que a condição 1000°C por 60 minutos representa um ponto ótimo de processamento, conciliando elevada conformidade química e máxima reatividade pozolânica. Em contrapartida, tempos prolongados de calcinação tendem a reduzir a reatividade, possivelmente em função de processos de recristalização.

Por fim, destaca-se a importância da utilização conjunta de técnicas de caracterização química e ensaios de reatividade, como o método de Chapelle, para uma avaliação mais completa do potencial de aplicação das cinzas de lodo de esgoto em matrizes cimentícias.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram a ferramenta de IA NotebookLM no auxílio da geração de imagens. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] KRÜGER, J. E. et al. **Gestão de lodo de esgoto no Brasil**. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

[2] IWAKI, M. Y. **Processamento e disposição final de lodos de ETE**. São Paulo: Sabesp, 2018.

[3] BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.

[4] LYNN, A. J. et al. Sustainable management of sewage sludge ash. **Waste Management**, v. 35, p. 105-112, 2015.

[5] POON, C. S. Bibliometric analysis of sewage sludge ash research. **Journal of Cleaner Production**, v. 310, 2022.

[6] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

[7] ZHOU, Y. et al. Pore structure and compressive strength of alkali activated mortar with sewage sludge ash. **Automation in Construction**, 2024.

[8] XIA, Y. et al. Hydration of ternary blended cements with sewage sludge ash and limestone. **Construction and Building Materials**, 2023.

[9] LI, B. et al. Coupling effects of sewage sludge and recycled fine aggregate on the properties of geopolymer. **Materials**, 2024.

[10] BASTO, P. A. D. et al. Caracterização e determinação da pozolanicidade de cinzas de lodo de tratamento de esgoto. **Revista de Engenharia Civil UFPE**, 2018.

[11] GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da cinza de lodo de esgoto como adição ao concreto**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre, 2001.

[12] SANTANA, L. **Revisão sistemática sobre o uso de cinza de lodo de esgoto**. Salvador: UFBA, 2022.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método de Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

[15] BASTO, P. A. D. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de ETE**. Recife: UFPE, 2018.

[16] ROCHA, M. V. F., Pontes, J. N. R., Oliveira, A. M. de, Cascudo, O., & Damineli, B. L. (2025). **Cinzas de lodo de esgoto em concretos ecoeficientes: uma revisão da literatura para produção de adição mineral - temperatura de calcinação e a sua relação com a pozolanicidade – pesquisas de 2014 a 2024.** *Conexões - Ciência E Tecnologia*, *19*, e025036. https://doi.org/10.21439/conexoes.v19.4045.

[17] RAVERDY M, Brivot F, Paillere A M, Dron R, 1980. **Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituents secondaires.** Paris: 7e Congrès International de la Chimie des Ciments'. Proceedings. 1980, Paris.

[18] TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; ABDALLA, E. M.; ABDELZAHER, M. A. **Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash.** ISRN Chemical Engineering, v. 2012, Article ID 487037, 2012.