



APROVEITAMENTO DO LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO ANIL PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO

USE OF SLUDGE GENERATED IN THE ANIL SEWAGE TREATMENT PLANT FOR CONCRETE PRODUCTION

Luana Eloi C. Santos^{1*}, Josilene L. S. Pereira¹, Antonio Ernandes M. Paiva¹, Gustavo de M. Brandão², Ezequiel J. de F. Raposo² e José Elias M. Lopes³.

1 - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais - PPGCTM, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), São Luís, MA, Brasil.

2 - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), São Luís, MA, Brasil.

3 - Programa de Pós-graduação em Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), São Luís, MA, Brasil.

luanaeloi@acad.ifma.edu.br

RESUMO

Este estudo explora o potencial da utilização de cinzas de lodo de estações de tratamento de esgoto como substituição parcial do cimento Portland na produção de concreto, visando abordar questões ambientais e promover a sustentabilidade na indústria da construção civil. O lodo, proveniente da ETEAnil em São Luís/MA, foi seco, calcinado a 450°C e 650°C, processado em cinzas e incorporado ao cimento Portland CP IV em proporções variadas (2,5%, 5% e 7,5%). Os corpos de prova de concreto resultantes foram avaliados por meio de ensaios de consistência, medições de resistência à compressão axial aos 7, 14 e 28 dias, bem como análises de DRX e FTIR. Os resultados indicaram que o desempenho ótimo foi alcançado com 2,5% de cinzas calcinadas a 450 °C, que demonstraram resistências à compressão de 15,7 MPa em 7 dias, 19,9 MPa em 14 dias e 18,9 MPa em 28 dias, atingindo aproximadamente 86-90% da resistência do concreto de referência. As cinzas calcinadas a 650 °C a 7,5% também atenderam aos padrões para concreto não estrutural. Técnicas analíticas confirmaram a presença de fases cristalinas e grupos hidroxila ligados ao silício, indicando atividade pozolânica. A reutilização de aproximadamente 260 kg/dia de cinzas de lodo não apenas reduz o descarte em aterros sanitários, mas também diminui o consumo de cimento e as emissões de CO₂ associadas, destacando a viabilidade ambiental e técnica dessa abordagem para práticas sustentáveis de gestão de resíduos urbanos e construção.

Palavras-chave: lodo de esgoto, cinza de lodo, concreto sustentável.

ABSTRACT

This study explores the potential of using ash from sewage treatment plants as a partial replacement for Portland cement in concrete production, aiming to address environmental issues and promote sustainability in the construction industry. The sludge, from ETEAnil in São Luís/MA, was dried, calcined at 450°C and 650°C, processed into ash and incorporated into Portland cement CP IV in varying

proportions (2.5%, 5% and 7.5%). The resulting concrete specimens were evaluated by means of consistency tests, axial compressive strength measurements at 7, 14 and 28 days, as well as XRD and FTIR analyses. The results indicated that optimum performance was achieved with 2.5% fly ash calcined at 450 °C, which demonstrated compressive strengths of 15.7 MPa at 7 days, 19.9 MPa at 14 days and 18.9 MPa at 28 days, achieving approximately 86-90% of the strength of the reference concrete. The 7.5% fly ash calcined at 650 °C also met the standards for non-structural concrete. Analytical techniques confirmed the presence of crystalline phases and hydroxyl groups bound to silicon, indicating pozzolanic activity. The reuse of approximately 260 kg/day of sludge fly ash not only reduces landfill disposal but also decreases cement consumption and associated CO₂ emissions, highlighting the environmental and technical feasibility of this approach for sustainable urban waste management and construction practices..

Keywords: *sewage sludge, sludge ash, sustainable concrete.*

INTRODUÇÃO

A expansão do saneamento básico no Brasil é essencial para a saúde pública e para o cumprimento da Lei nº 14.026/2020, que fixa metas de universalização. Entretanto, persistem fortes assimetrias regionais: enquanto a média nacional de coleta e tratamento de esgotos é de apenas 56 %, estados do Norte e Nordeste, como o Maranhão, encontram-se muito abaixo desse patamar [1]. Essa lacuna infraestrutural não só contamina corpos hídricos, mas também gera volumes significativos de lodo de esgoto cujo manejo inadequado agrava passivos ambientais. O lodo proveniente de estações de tratamento constitui um resíduo orgânico-mineral de elevado volume e potencial toxicológico. Seu envio a aterros sanitários acarreta custos crescentes e desperdiça recursos com valor latente [2]. A literatura internacional, por sua vez, aponta soluções de valorização material, notadamente a conversão termoquímica do lodo em cinzas com propriedades pozolânicas, aptas a atuar como material cimentício suplementar [3][4]. Na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Anil, em São Luís/MA, empregam-se reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) como etapa primária. Esses reatores, reconhecidos pelo baixo custo operacional [5], estabilizam a matéria orgânica, mas geram lodo residual cujo descarte convencional ameaça a qualidade do solo e das águas subterrâneas. Estimativas locais apontam produção média de cerca de 260 kg de lodo por dia, valor expressivo diante da restrição de áreas de disposição. No âmbito da engenharia de materiais, a calcinação controlada do lodo entre 450 °C e 650 °C produz cinzas ricas em fases amorfas reativas, capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂) presente na matriz cimentícia, gerando compostos adicionais de caráter cimentício [6]. Quando incorporadas em proporções de até 7,5 % em massa de cimento, tais cinzas podem manter o desempenho mecânico exigido para concretos não estruturais, ao mesmo tempo em que reduzem a demanda energética associada à produção de cimento Portland [7]. Essa estratégia oferece ganhos ambientais diretos: desvia resíduos de aterros, diminui a extração de calcário e reduz emissões de CO₂ ligadas ao clínquer, além de inserir práticas de economia circular no setor da construção. Estudos preliminares indicam que a substituição de 2,5 % de cinza calcinada a 450 °C preserva até 90 % da resistência à compressão do concreto-referência aos 14 dias, atendendo à NBR 12655 para aplicações não estruturais. Neste cenário, o presente trabalho propõe caracterizar o lodo da ETE Anil, otimizar sua calcinação e avaliar o desempenho dos concretos resultantes em termos de consistência, resistência mecânica e análise mineralógica (DRX e FTIR). Ao estreitar as necessidades locais de saneamento com demandas globais de redução de carbono, a pesquisa oferece um caminho tecnicamente viável e ambientalmente estratégico para transformar um passivo urbano em recurso de alto valor agregado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo e diagnóstico da geração de lodo

A ETE Anil, em São Luís/MA, atende parte significativa da capital (população aproximada de 1.037.775; área 583,063 km²). Operada pela CAEMA, sua geração de lodo (M_{lodo}) foi estimada em aproximadamente 260 kg/dia, calculada a partir de vazão média (Q), concentração de DQO (CDQO), fator de conversão (k) e coeficiente de formação de sólidos ($Y_{\text{SS/DQO}}$) pela equação:

$$M_{\text{lodo}} \text{ (kg SS/d)} = Y_{\text{SS/DQO}} \times Q \times \text{CDQO} \times k \quad (1)$$

Análises preliminares do lodo in natura

Em maio de 2024, o lodo coletado foi submetido a análises físico-químicas pelo Laboratório de Físico-Química de Alimentos e Água da UEMA, seguindo APHA (2012). Foram avaliados 18 parâmetros (pH, sólidos dissolvidos, turbidez, metais, Nitrogênio, coliformes etc.).

Incineração

O lodo seco foi incinerado em forno mufla KK260.16/60.1060 (1,8 kW) por 12 h (incluindo estabilização), em três faixas de temperatura (450 °C, 650 °C e 950 °C) para assegurar degradação orgânica completa e inativação de microrganismos.

Maceramento e peneiramento

Após resfriamento, as cinzas foram maceradas manualmente em almofariz de porcelana e peneiradas na malha #120 (0,125 mm) para uniformizar granulometria e aproximar do cimento Portland.

Caracterização física e química das cinzas do lodo por DRX e FTIR

Empregou-se DRX no cimento, agregados e cinzas obtidas a diferentes temperaturas para identificar fases cristalinas predominantes. Já a Espectroscopia no Infravermelho com FTIR (aparelho IRAffiniy-1, 45 scans, resolução 2,0, faixa 4700–340 cm⁻¹), foi realizada misturando amostra com KBr (1:100), para identificar grupos funcionais em insumos do concreto e nas cinzas a cada temperatura.

Caracterização dos insumos do concreto de referência

Determinou-se o traço para concreto C25 (NBR 12655:2015; NBR 6118:2023), visando 25 MPa aos 28 dias, com $a/c = 0,54$ e slump alvo de 90 ± 20 mm (NM 67:1998). A composição final foi de: Cimento 340 kg/ m³; Água 182 l/m³; Areia 715 kg/ m³; brita 0 1.050 kg/ m³. Produziram-se corpos de prova cilindros de 60 mm Ø × 100 mm h, curados em água (23 ± 2 °C) e ensaiados por compressão (NBR 5739).

Estudo dos Agregados e do Aglomerante

Nesta etapa, avaliou-se o cimentício e os agregados para estabelecer parâmetros comparativos ao concreto com cinza de lodo. No cimento CP IV 32, realizou-se o ensaio de início de pega (NBR NM 65:2003) para confirmar sua rigidez adequada ao traço de 25 MPa. A areia natural (agregado miúdo) foi analisada granulometricamente (NBR NM 52:2001), verificando módulo de finura, distribuição de tamanhos e massa específica, garantindo compacidade e resistência ideais. A brita 0 (agregado graúdo) passou por curva granulométrica, quantificação de finos e determinação de massa unitária (NBR NM 53:2001), comprovando conformidade com limites normativos e boa aderência à pasta cimentícia.

Estudo de Compressão Axial

Nos corpos de prova (60 mm Ø × 100 mm h), curados em água (23 ± 2 °C), fez-se ensaio de compressão axial (pressão em prensa EMIC 300 kN) às idades de 7, 14 e 28 dias (NBR 5738:2015), acompanhando o desenvolvimento de resistência e fornecendo referência para comparações com concretos com cinza de lodo.

Viabilidade econômica da produção de cinzas do lodo

Foram considerados: consumo energético do forno (1,8 kW), tempo de incineração (12 h/ciclo), custo da energia elétrica, mão de obra operacional (3 h/ciclo para incineração, maceração e peneiramento), despesas de manutenção e insumos, rendimento médio de cinzas (até 5 kg por ciclo) e preços dos materiais convencionais (cimento, areia, brita e água). O custo de produção de cinzas de lodo, em R\$/kg, fica:

$$C_{cinza} = (P_{forno} \times t_{inc} \times C_{elec}) + (t_{mo} \times C_{mo}) + C_{add} / M_{cinza} \quad (2)$$

Em seguida, o custo do concreto convencional (R\$/m³), aproximado pela soma dos insumos, pode ser escrito como:

$$C_{conv} = C_{cimento} \times Q_{cimento} + C_{areia} \times Q_{areia} + C_{brita} \times Q_{brita} + C_{agua} \times Q_{agua} \quad (3)$$

onde C_x o preço unitário de cada material (R\$/unidade) e Q_x é a quantidade usada por m³ de concreto. Assim, para comparar a viabilidade econômica, basta avaliar se:

$$C_{cinza} \times (\text{kg de cinza necessários por m}^3) \leq C_{conv} \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise físico-química e microbiológica do Lodo da ETE Anil

A caracterização físico-química e microbiológica do lodo da ETE é essencial para avaliar sua viabilidade como insumo na construção, pois identifica composições, estabilidade e riscos sanitários. Esses dados orientam a temperatura de incineração para mineralização completa e ajustam parâmetros como pH, influenciando o desempenho do concreto com cinzas de lodo. A Tabela 1 mostra esses resultados e os compara com a literatura.

Tabela 1: Análise físico-química e microbiológica do lodo coletado na ETE anil.

Parâmetros	CONAMA (2011)	Estação de Tratamento de Esgoto
------------	---------------	---------------------------------

	(VMP)*	Resultados	Londrina-PR (Burgos et al. 2015)	Reator UASB (Silva et al., 2021)
pH	5,0 a 9,0	6,73	6,8	7,02
Temperatura (°C)	30°	20,8°		
Sólidos totais (ppm)	-	1,7		74
Condutividade (µJ/cm)	-	3.403		
Alcalinidade total (mg/L)	-	0,0		518,37
Turbidez (NTU)	100	307,3	26.700	70,0
Fósforo total (mg/L)	0,05	73,41		
Manganês (mg/L)	0,1	30	1.234	
Ferro (mg/L)	5	50,1	ND	
Alumínio (mg/L)	0,2	8	0.085	
Cromo total (mg/L)	0,05	50	ND	
Nitrato (mg/L)	10	11		0,27
Nitrito (mg/L)	1	3,6		0,46
Nitrogênio (mg/L)	13,3	36,4		
Sulfeto (mg/L)	0,3	8		10,47
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	4.000	2,4x10 ⁴	6,6x10 ⁵	
Coliformes totais (NMP/100mL)	-	2,4x10 ⁴	9,8x10 ⁴	

DRX das Cinzas do Lodo

A análise de DRX das cinzas calcinadas a 450 °C, 650 °C e 950 °C mostrou picos intensos de quartzo (2θ - 27°) e picos menores de hematita e calcita, sem evidência de fases amorfas. À medida que a temperatura aumenta, os picos cristalinos tornam-se mais nítidos, indicando maior grau de cristalização e menor reatividade pozolânica. As cinzas a 650 °C apresentam equilíbrio entre cristalinidade (estabilidade) e reatividade suficiente para aplicações em concretos não estruturais.

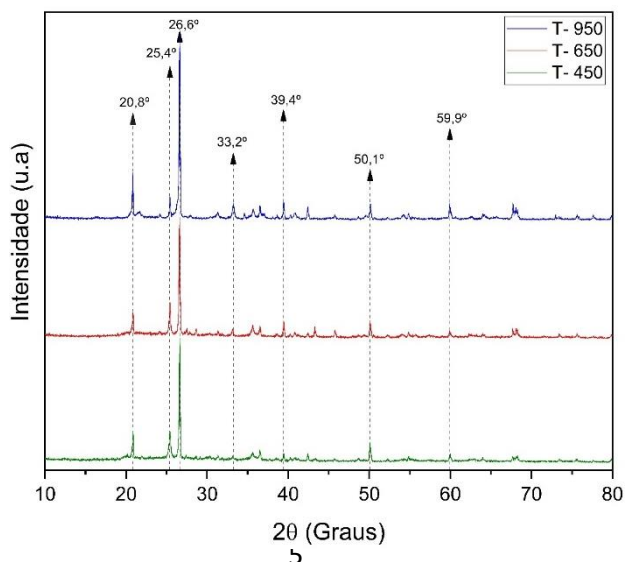


Figura 1- Difratoograma DRX das cinzas obtidas do lodo em diferentes temperaturas de calcinação (450 °C e 650 °C).

Espectroscopia infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das cinzas do Lodo

Os espectros de FTIR das cinzas calcinadas a 450 °C, 650 °C e 950 °C revelam bandas de hidroxilas (3 400–3 600 cm^{-1}), carbonatos (1 400 cm^{-1}), silicatos (1 000–1 100 cm^{-1}) e óxidos metálicos (500–600 cm^{-1}), evidenciando umidade residual, formação de calcita e potencial pozolânico. Com o aumento da temperatura, há redução na intensidade das bandas de $-\text{OH}$ e CO_3^{2-} , indicando desidroxilação e decomposição de carbonatos, confirmando maior estabilização química. As cinzas a 650 °C, apesar de menor reatividade, apresentam estrutura adequada para uso como adição mineral em concretos não estruturais, equilibrando reatividade e estabilidade.

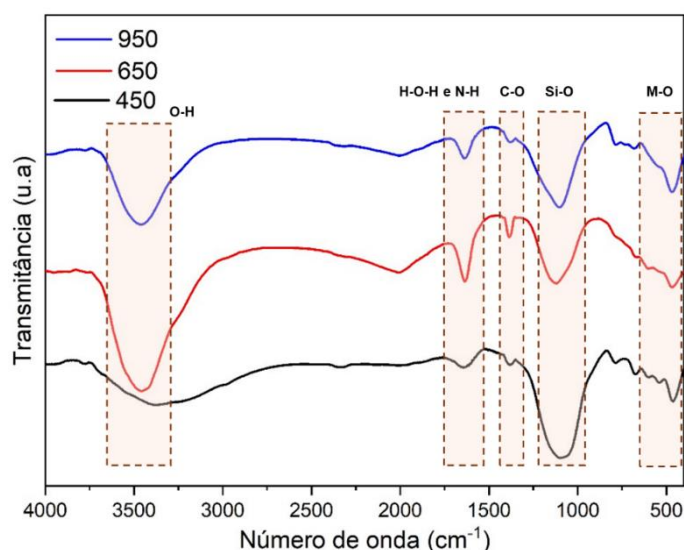


Figura 2- FTIR das cinzas do Lodo obtidos em diferentes temperaturas.

Resistência à compressão axial

A análise de DRX das cinzas calcinadas a 450 °C, 650 °C e 950 °C mostrou picos intensos de quartzo ($2\theta - 27^\circ$) e picos menores de hematita e calcita, sem evidência de fases amorfas. À medida que a temperatura aumenta, os picos cristalinos tornam-se mais nítidos, indicando maior grau de cristalização e menor reatividade pozolânica. As cinzas a 650 °C apresentam equilíbrio entre cristalinidade (estabilidade) e reatividade suficiente para aplicações em concretos não estruturais.

Tabela 2: Resultados de resistência dos corpos de prova moldados sem (0%) e com as substituições de 2,5%, 5% e 7,5% de cinza de Lodo a 450°C e 650°C.

Temperatura (°C)	Cinzas do lodo (%)	Dias de rompimento			Médias*
		7	14	28	
450	0,00	13,17±1,77 ^{ab}	12,05±1,69 ^{ab}	16,05±3,69 ^{ab}	13,76^a
	2,5	9,19±4,59 ^b	14,57±1,70 ^{ab}	18,28±2,43^a	14,01^a

	5,0	12,41±2,00 ^{ab}	12,69±2,73 ^{ab}	15,68±3,87 ^{ab}	13,60^a
	7,5	10,65±2,56 ^{ab}	12,32±2,48 ^{ab}	15,95±3,17 ^{ab}	12,97^a
	2,5	13,81±3,41 ^{ab}	11,67±3,90 ^{ab}	11,68±7,07 ^{ab}	12,39^a
650	5,0	9,61±1,47 ^b	9,50±5,02 ^b	15,02±3,43 ^{ab}	11,37^a
	7,5	12,20±2,61 ^{ab}	12,27±2,43 ^{ab}	17,78±2,40^a	14,09^a
	Médias*	15,73^a	12,17^b	11,31^b	

CONCLUSÕES

As cinzas de lodo a 450 °C (2,5 %) e a 650 °C (7,5 %) alcançaram médias de resistência comparáveis ou superiores ao concreto-referência (18,28 MPa e 17,78 MPa aos 28 dias, respectivamente). Entretanto, a substituição parcial (2,5 %, 5 % e 7,5 %) elevou o custo do concreto entre 31,6 % e 94,5 % em relação ao convencional, em grande parte devido ao consumo energético e ao processamento manual das cinzas. Apesar do acréscimo de custo, o reaproveitamento das cinzas reduz significativamente resíduos em aterros e contribui para metas ambientais e de economia circular. Para viabilizar economicamente a aplicação em escala maior, recomenda-se otimizar o ciclo de incineração (fontes alternativas de energia) e aumentar a produção, diluindo custos fixos. Em síntese, a incorporação parcial de cinzas de lodo revela potencial técnico-térmico e ambiental, mas demanda ajustes operacionais e financeiros para ser competitiva. O equilíbrio entre desempenho mecânico satisfatório e viabilidade econômica define o caminho para adoção da tecnologia em concreto não estrutural.

REFERÊNCIAS

- [1] MINIER, P. et al. Can sewerage be considered safe management of human feces? City and Environment Interactions, v. 19, 1 ago. 2023.
- [2] ZHANG, J.; MA, L. Comparative environmental sustainability study of an improved sewage sludge treatment and sludge reuse system based on emergy analysis in China. Applied Water Science, v. 11, n. 9, 2021. DOI: 10.1007/s13201-021-01478-2.
- [3] JAMSHIDI, M. et al. Mechanical performance and capillary water absorption of sewage sludge ash concrete (SSAC). International Journal of Sustainable Engineering, v. 5, n. 3, p. 228–234, set. 2012.
- [4] MULOPO, J. A systematic overview of current advancements for chemical, material, and energy production using sewage sludge for industrial ecology and sustainability transition. Environmental Sustainability, v. 7, n. 1, p. 5–29, 27 fev. 2024.
- [5] SEGHEZZO A', Lucas et al. A REVIEW: THE ANAEROBIC TREATMENT OF SEWAGE IN UASB AND EGSB REACTORS Bioresource Technology. [S.l.: S.n.].
- [6] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.
- [7] GUO, S. et al. Performance and microstructure of sustainable cementitious materials mixed by municipal sewage sludge ash, slag, and fly ash. Construction and Building Materials, v. 367, p. 130028, 27 fev. 2023.