SINERGIA DO RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO ECOEFICIENTE DE LC³.

Synergy of Water Treatment Plant Residue for Eco-efficient LC³ Production

Tacila Bertulino
UFPE | Recife, PE | tacila.bertulino@ufpe.br

Antônio Acácio de Melo Neto
UFPE | Recife, PE | antonio.meloneto@ufpe.br

Resumo

Este estudo investiga o efeito da cinza do lodo de estação de tratamento de água (CLETA) na hidratação de pastas de cimento com argila calcinada e calcário (LC³). Foram preparadas três amostras: cimento Portland (PC), LC³ e LC³+ (com substituição parcial por CLETA). As amostras foram analisadas por difração de raios X (DRX) e termogravimetria (ATG) após 28 dias de cura. Os resultados de DRX indicaram a presença de etringita e AFm na pasta de PC, enquanto nas misturas LC³ e LC³+ houve formação de hemicarboaluminato e monocarboaluminato. A análise termogravimétrica revelou um consumo de hidróxido de cálcio 4,25 vezes maior na pasta LC³+ em relação ao PC, indicando maior reatividade pozolânica e formação de silicato-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H). Assim, a incorporação de CLETA intensificou a hidratação e estabilização de fases alumináticas, destacando seu potencial na produção de cimentos mais sustentáveis e na valorização de resíduos industriais.

Palavras-chave: Cimento; LC³; Hidratação; Lodo ETA.

ABSTRACT

This study investigates the effect of water treatment plant sludge ash (CLETA) on the hydration of cement pastes with calcined clay and limestone (LC³). Three samples were prepared: Portland cement (PC), LC³, and LC³+ (with partial substitution of CLETA). The samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetry (TG) after 28 days of curing. The XRD results indicated the presence of ettringite and AFm phases in the PC paste, while in the LC³ and LC³+ mixtures, hemicarboaluminate and monocarboaluminate were formed. The thermogravimetric analysis revealed a calcium hydroxide consumption 4.25 times greater in the LC³+ paste compared to PC, indicating higher pozzolanic reactivity and the formation of calcium-aluminate-silicate hydrate (C-A-S-H). Thus, the incorporation of CLETA enhanced the hydration and stabilization of aluminous phases, highlighting its potential in the production of more sustainable cements and the valorization of industrial waste.

Keywords: Cement; LC³; Hydration; Water treatment plant sludge.

1 INTRODUÇÃO

A previsão de crescimento populacional para 2050 aumentará a demanda por recursos naturais e impactará o setor da construção (United Nations, 2017). A produção de cimento deve crescer 2,5 vezes até 2050, destacando a urgência de reduzir os impactos ambientais da indústria (Maskuriy et al., 2019). Estratégias sustentáveis, como a substituição de combustíveis fósseis, captura de carbono e o uso de ligantes geopoliméricos, estão sendo adotadas, assim como a utilização de resíduos industriais (Cembureau, 2013; SNIC, 2019). No Brasil, o aumento na produção de cimento e uso de pozolanas reflete a busca por materiais que reduzam as emissões de CO_2 (WBCSD, 2016). Materiais como escória e cinza volante são os mais usados, mas suas fontes são limitadas. Soluções como misturas ternárias de LC³, com 30% de argila calcinada e 15% de calcário, podem reduzir em 50% o uso de cimento Portland, diminuindo em 30 a 40% as emissões de CO_2 e mantendo ou melhorando as propriedades do cimento (Antoni et al., 2012; Avet, 2017; Scrivener et al., 2018).

Paralelamente à busca por alternativas sustentáveis para o cimento, a crescente demanda por água potável tem gerado desafios globais. No Brasil, as estações de tratamento de água (ETA) produzem até 800 milhões

de litros de lodo diariamente (Ruviaro et al., 2021). O lodo de ETA (LETA) contém SiO_2 e Al_2O_3 reativos e baixas concentrações de álcalis, sendo ideal para uso como material cimentício suplementas (Ahmad; Ahmad; Alam, 2016; Bohórquez González et al., 2020). O Roadmap Tecnológico do Cimento do Brasil propõe a redução do uso de clínquer, destacando materiais alternativos até 2050 (WBCSD, 2018). A incorporação do CLETA no cimento contribui para oito Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS: 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15 e 17). O uso do LETA no cimento foi experimentado em 1994, quando o lodo foi combinado com calcário para formar a farinha do clínquer, mas com desempenho mecânico insatisfatório (Tay; Show, 1994). Desde 1997, a calcinação de lodo de esgoto tem sido mais explorada no Brasil sendo investigada sua utilização na substituição do cimento (Morales, 1997), e estudos como o de Hagemann et al. (2019) mostram a viabilidade de substituir até 30% de LETA no concreto de LC³. Contudo, ainda existem lacunas no entendimento das misturas de LC³, especialmente sobre o potencial sinérgico do CLETA. Este artigo visa preencher essas lacunas, investigando seu efeito na hidratação de pastas LC³ e promovendo a sustentabilidade na produção de cimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O cimento CPV ARI (ASTM tipo III) da Cimento Nacional foi usado. A argila da Votorantim Cimentos (40% preta, 60% amarela) foi seca por 24h e calcinada a 800°C por 1h, para evitar a calcinação incompleta, bem como para obter a reatividade pozolânica (Fernandez; Martirena; Scrivener, 2011). A composição incluiu argila calcinada e calcário na proporção 2:1, com 2% de sulfato de cálcio bi-hidratado (98% pureza). O lodo foi coletado da ETA Pirapama (Recife, PE), o maior sistema de abastecimento do estado, com produção de 5,13 m³/s e geração diária de 93 toneladas, sendo 90% proveniente da decantação. Após secagem ao ar livre por sete dias, foi seco em estufa a 100°C por 24 horas. Em seguida, foi calcinado a 700°C em forno Linn High Therm KK 260 (10°C/min) por 180 minutos antes do resfriamento. A Tabela 1 apresenta a composição química dos materiais e detalha as três amostras analisadas, incluindo as quantidades respectivas utilizadas na preparação das pastas.

Tabela 1 - Composição química e quantidades dos materiais empregadas na preparação das pastas.

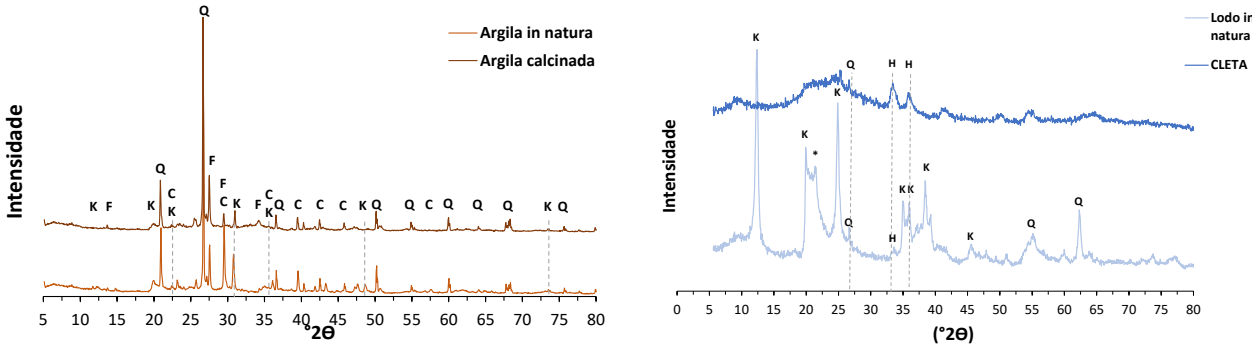
Óxidos (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	P. F.
Argila	46,12	14,66	5,29	17,03	2,35	2,01	3,60	0,16	0,15	7,45
CLETA	40,55	40,20	12,21	0,08	0,25	0,15	0,33	0,18	0,29	4,55

Quantidades dos materiais empregadas na preparação das pastas.							
Amostra	Cimento (g)	Argila (g)	CLETA (g)	Calcário (g)	Sulfato de cálcio (g)	SP* (g)	Água (g)
PC	40,00	-	-	-	-	2,00	16,00
LC³	21,20	12,00	-	6,00	0,80	2,00	16,00
LC³⁺	21,20	-	12,00	6,00	0,80	2,00	16,00

Fonte: A autora (2025).

A Figura 1 apresenta o difratograma do lodo, da argila in natura e de ambas calcinadas, mostrando uma forte presença de caulinita. Este mineral, responsável pela formação da fase metacaulim amorfa após calcinação, não é identificado de forma distinta no DRX, mas sua presença é indicada pela ausência de picos característicos, sugerindo atividade pozolânica nas CLETA. Essa interpretação é reforçada pela observação de um halo amorfo entre 20 e 30º (2θ) nas amostras calcinadas. O teor de caulinita, calculado pelo método tangente (Scrivener; Snellings; Lothenbach, 2016), revelou que a CLETA contém 70,17% de caulim, enquanto a argila apresenta 19,60%.

Figura 1 - Difratograma dos materiais, mostrando a presença de fases identificadas como quartzo (Q), caulinita (K), feldspato (F), hematite (H), calcita (C) e cristobalita (*).



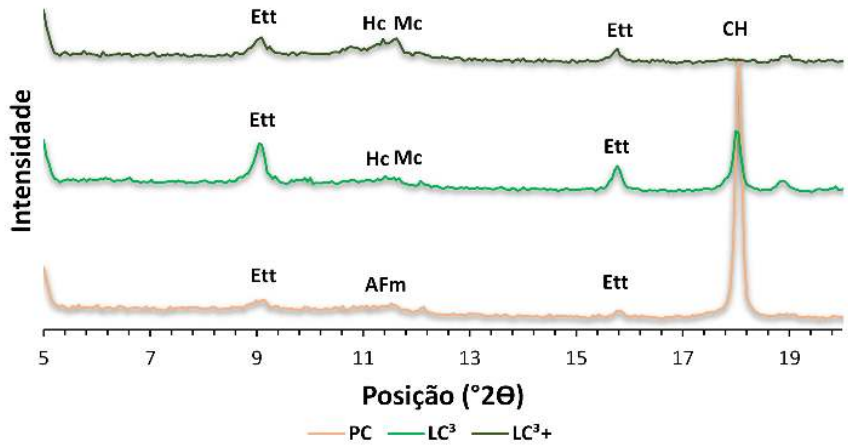
Fonte: A autora (2025).

Após a moldagem, os corpos de prova foram congelados em nitrogênio líquido, fragmentados e liofilizados. As amostras foram moídas, peneiradas e analisadas por difração de raios X (DRX) e termogravimetria (ATG). A DRX foi realizada no difratômetro Rigaku D/max-2200, com radiação CuKα, operando a 40 kV e 20 mA, em uma varredura de 5 a 20°2θ, com passo de 0,05°2θ, velocidade de 2°2θ/s e tempo de contagem de 0,575 s/passo. A ATG foi conduzida com aquecimento de 10 °C/min, de 30 a 1000 °C, sob fluxo de 40 mL/min, utilizando cadinho de alumina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

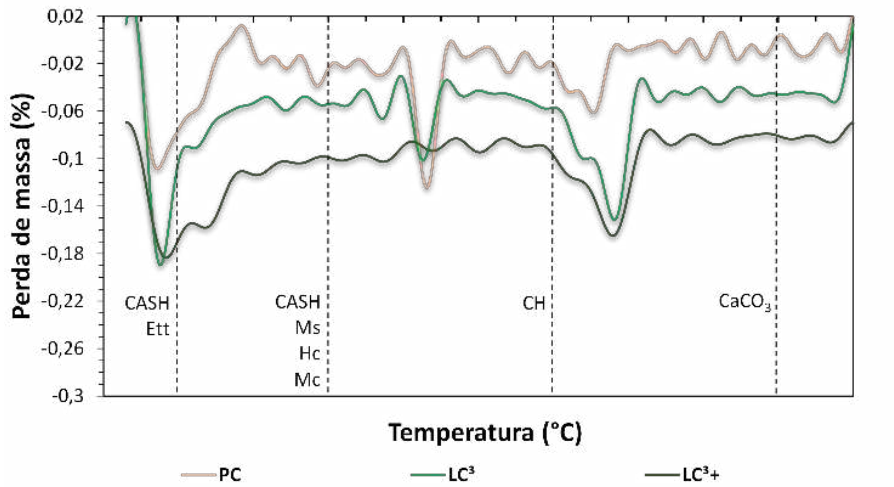
O difratograma da Figura 2 revela a presença de etringita (9,8° 2θ) e monossulfato de alumínio-ferrítico na pasta de PC aos 28 dias. Em contraste, nas misturas de LC³ e LC³+, observa-se a presença de carbonato de cálcio, evidenciada pela formação de hemicarboaluminato e monocarboaluminato. A dissolução dos íons carbonato na solução favorece a estabilização dessas fases aluminíticas hidratadas, promovendo a formação de carboaluminatos de cálcio (Georget et al., 2022; Omrani et al., 2025).

Figura 2 - Difratograma das pastas, mostrando a presença de fases identificadas como etringita (Ett), monossulfato de alumínio-ferrítico (AFm), hemicarboaluminato (Hc), monocarboaluminato (Mc), hidróxido de cálcio (CH).



Fonte: A autora (2025).

Figura 3 - Derivada de perda de massa (DTG) da pasta, mostrando a presença de etringita (Ett), hemicarboaluminato (Hc), monocarboaluminato (Mc), hidróxido de cálcio (CH), calcita (C) e silicato-aluminato de cálcio hidratado (*).



Fonte: A autora (2025).

Além disso, nas pastas de cimento, é possível identificar picos mais acentuados de hidróxido de cálcio em 18° 2θ. Esses picos tornam-se progressivamente menos intensos nas pastas de LC³ e LC³+, o que indica o avanço da reação pozolânica. Nessa reação, o metacaulim presente reage com o hidróxido de cálcio, consumindo-o ao longo do tempo. Na pasta de LC³+, os picos de hidróxido de cálcio são ainda menos intensos, indicando maior reatividade pozolânica. Essa diferença pode estar associada ao maior teor de caulinita na CLETA, que, após calcinação, favorece a formação de metacaulim e aumenta a reatividade da mistura.

Essa observação é confirmada pela análise termogravimétrica (Figura 3), onde a derivada da curva revela uma perda de massa mais acentuada na pasta de PC durante a decomposição do hidróxido de cálcio (400–500°C), com uma perda de massa de 4,16%. Já nas pastas de LC³ e LC³+, a perda de massa observada é de 1,89% e 0,98%, respectivamente, indicando um maior consumo de hidróxido de cálcio na pasta de LC³+. Esse resultado sugere uma maior reatividade pozolânica nessa amostra, favorecendo a formação de produtos mais estáveis, como o silicato-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), cuja quantidade aumentou de 4,76% no LC³ para 8,31% no LC³+. Assim, a pasta de LC³+ contém menos hidróxido de cálcio disponível para decomposição térmica, confirmando a maior eficiência das reações de hidratação e pozolânicas.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a incorporação do CLETA em pastas de LC³ intensificou a reação pozolânica, promovendo maior consumo de hidróxido de cálcio e estabilização de fases alumináticas hidratadas. A presença de carbonato favoreceu a formação de hemicarboaluminato e monocarboaluminato, enquanto a redução progressiva dos picos de hidróxido de cálcio confirmou o avanço da hidratação.

A análise termogravimétrica revelou que a pasta de LC³+ apresentou um consumo de hidróxido de cálcio 4,25 vezes maior em relação ao cimento Portland, resultando em maior formação de C-A-S-H e redução da disponibilidade de hidróxido de cálcio na matriz. Assim, os resultados destacam o potencial do CLETA na produção de cimentos mais sustentáveis, reduzindo a pegada de carbono e valorizando resíduos industriais.

REFERÊNCIAS

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.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012.

AVET, F. H. **Investigation of the grade of calcined clays used as clinker substitute in Limestone Calcined Clay Cement (LC³)**. Thesis— École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2017.

BOHÓRQUEZ GONZÁLEZ, K. et al. Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, v. 23, 1 jun. 2020.

CEMBUREAU. **The role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy**. Bruxelas: CEMBUREAU, 2013. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneconomy_2013-09-01.pdf.>. Acesso em: 11 mar. 2025.

GEORGET, F. et al. Stability of hemicarbonate under cement paste-like conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 153, 1 mar. 2022.

HAGEMANN, S. E. et al. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 916–926, 20 mar. 2019.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1st edition ed. CRC Press, 2016.

MASKURIY, R. et al. Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective. **Economies**, v. 7, n. 3, 4 jul. 2019.

MORALES, G. Aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de material pozolânico. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas.**, v. 18/20, p. 39–45, 1997.

OMRANI, I. A. N. et al. Limestone calcined clay (LC^3) cement: Ice content profile and calcium carbonate reaction vs pore structure and mechanical properties development. **Journal of Building Engineering**, v. 100, 15 abr. 2025.

RUVIARO, A. S. et al. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, 10 dez. 2021.

SANTOS, G. Z. B. et al. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of Environmental Management**, v. 249, 1 nov. 2019.

SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC^3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. March 2017, p. 49–56, 2018.

SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Brasília: SNIC, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf.>. Acesso em: 11 mar. 2025.

TAY, J.-H.; SHOW, K.-Y. Municipal Wastewater Sludge as Cementitious and Blended Cement Materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 16, p. 39–48, 1994.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables**. New York: Working Paper No. ESA/P/WP/248., 2017.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative (CSI) Cement Industry Energy and CO_2 Performance Getting the Numbers Right (GNR)**. Genebra: WBCSD, 2016.