

LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR SUSTENTÁVEL

LUIZA BEATRIZ GAMBOA ARAÚJO MORSELLI¹; GUSTAVO LUIS CALEGARO²;
MARCOS ANTONIO DA SILVA³; JÉSSICA TORRES DOS SANTOS⁴; MAURÍZIO
SILVEIRA QUADRO⁵; ROBSON ANDREAZZA⁶

¹Universidade Federal de Pelotas - luiza_morselli@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – gustavocalegaro@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – marcos_silvap1@hotmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – jessica_jesantos@hotmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – mausq@hotmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – robsonandreazza@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, especialmente devido à produção de cimento Portland, representando cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (BRITO; KURDA, 2021). No Brasil, o consumo per capita de cimento ultrapassou 290 kg/habitante em 2022 (SNIC, 2022), evidenciando a necessidade de alternativas sustentáveis.

Paralelamente, o tratamento de água gera grandes volumes de lodo (Water Treatment Sludge – WTS), cuja disposição inadequada pode causar impactos ambientais significativos (RICHTER, 2001). Estudos recentes indicam que o WTS possui composição química semelhante à de materiais pozolânicos, contendo óxidos de silício, alumínio e ferro (RUVIARO et al., 2020), o que o torna um candidato promissor para uso como material cimentício suplementar (MCS).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial pozolânico do WTS calcinado em diferentes temperaturas, visando sua aplicação como MCS em substituição parcial ao cimento Portland, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade na construção civil.

2. METODOLOGIA

O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Água (ETA) Santa Bárbara, localizada em Pelotas/RS. Após a coleta, o material foi seco em estufa a 105 °C por 24 h, moído, peneirado na abertura de 0,063 mm (#230) e posteriormente calcinado por 2 h em quatro temperaturas distintas: 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C.

As amostras calcinadas foram submetidas a ensaios de caracterização físico-química, incluindo: perda ao fogo (loss on ignition - LOI); finura (material retido na peneira de 45 µm), umidade, massa específica aparente, difração de raios X (DRX): para identificação das fases minerais presentes; indicadores da reatividade pozolânica: condutividade elétrica; ensaio com cal aos sete dias; performance mecânica com cimento. Para avaliação da atividade pozolânica através da performance mecânica, foram moldadas argamassas com substituição de 25% do cimento por WTS calcinado. Os corpos de prova foram preparados com cimento CP II-F 32, areia padronizada e relação água/cimento de 0,5. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 14, 28 e 56 dias. Foram seguidos os procedimentos das normas NBR 7215:2025; NBR 12653:2014; NBR 5751: 2015.

As análises estatísticas contemplaram análises de variância (ANOVA) e correlação de Pearson.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os quatro tratamentos de lodo calcinado se mantiveram dentro das especificações das normas para materiais pozolânicos (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterizações dos materiais

| | ρ (g/cm ³) | Finura (%) | Umidade (%) | LOI (%) |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| CPII-F32 | 2,98 (\pm 0,01) ** | - | - | - |
| WTS600 | 2,78 (\pm 0,05) ^a | 5,21 (\pm 0,99) ^b | 1,14 (\pm 0,06) ^a | 5,28 (\pm 0,31) ^a |
| WTS700 | 2,66 (\pm 0,07) ^a | 11,76 (\pm 1,40) ^a | 0,61 (\pm 0,16) ^a | 1,92 (\pm 0,29) ^b |
| WTS800 | 2,75 (\pm 0,07) ^a | 15,60 (\pm 2,14) ^a | 0,73 (\pm 0,18) ^a | 1,18 (\pm 0,12) ^{bc} |
| WTS900 | 2,59 (\pm 0,09) ^a | 12,16 (\pm 1,42) ^a | 0,69 (\pm 0,51) ^a | 0,55 (\pm 1,52) ^c |
| Ca(OH) ₂ | 2,35 (\pm 0,01) ** | - | - | - |
| Norma* | - | \leq 20 (ideal: 10-15) | \leq 3 | \leq 6 |

Legenda: LOI: Loss on ignition a 950°C; ρ : massa específica aparente; *Class E; **Análises em duplicata; Letras distintas indicam diferenças significativas entre cada parâmetro (p -value < 0.05, ANOVA, Post hoc, Teste de Tukey). Fonte: MORSELLI et al. (2025).

A calcinação do WTS promoveu alterações significativas em sua composição. A perda ao fogo diminuiu com o aumento da temperatura, indicando maior eliminação de matéria orgânica (Tabela 1). De acordo com os resultados, o lodo a 600°C (WTS600) demonstrou possuir mais finos e o lodo a 800°C (WTS800) menos, de acordo com a análise de finura. Com relação à análise de perda ao fogo (LOI), o WTS600 apresentou maior perda ao fogo, ou seja, maior constituição de matéria orgânica. A perda ao fogo foi inversamente proporcional à temperatura de queima dos lodos.

Na análise de condutividade elétrica (Figura 1 a), o aumento da perda de condutividade elétrica demonstra a fixação do hidróxido de cálcio pelo material pozolânico, ou seja, demonstra o potencial pozolânico.

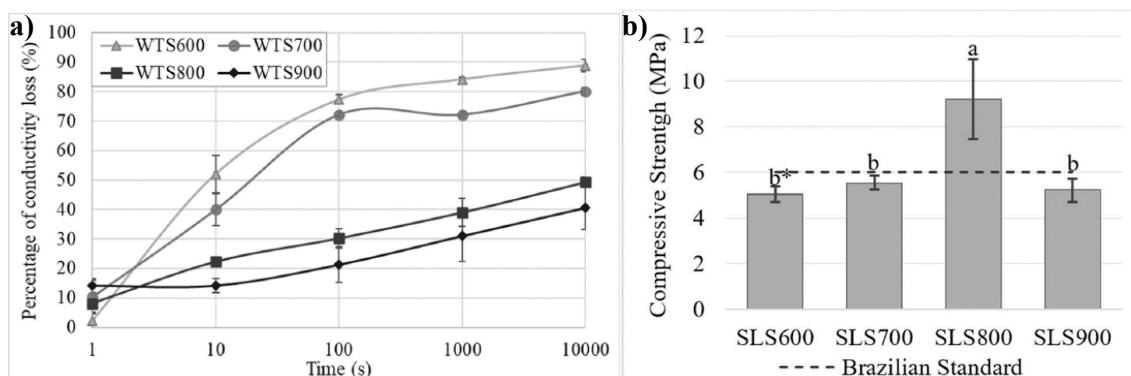


Figura 1. Gráficos de perda de condutividade elétrica dos lodos calcinados conforme o tempo (a); e compressão das argamassas com cal e lodo aos sete dias (b). Fonte: MORSELLI et al. (2025).

A perda de condutividade foi diretamente proporcional à temperatura de queima, ou seja, o WTS600 apresentou maior perda de condutividade (88,85%), seguido por WTS700, WTS800 e WTS900. A argamassa com cal e WTS800 (SLS800) apresentou maior valor de resistência à compressão aos sete dias (Figura 1 b) e foi a única que se enquadrou na norma brasileira.

Já na análise de resistência mecânica das argamassas com cimento, onde o lodo substituiu 25% de cimento (Figura 2), o desempenho variou conforme o tempo de cura: aos 7 dias, o WTS600 apresentou resistência superior à amostra controle, indicando rápida reação pozolânica; aos 28 dias, todas as amostras com WTS superaram a resistência da amostra controle, com destaque para o WTS600, que apresentou 46% de ganho; aos 56 dias, o WTS800 manteve crescimento contínuo, enquanto o WTS600 apresentou queda, sugerindo que sua reatividade é mais intensa em idades iniciais. A análise estatística confirmou correlação significativa entre a redução da condutividade elétrica e o aumento da resistência mecânica, corroborando com estudos anteriores (BASTOS et al., 2019; PAYÁ et al., 2001).

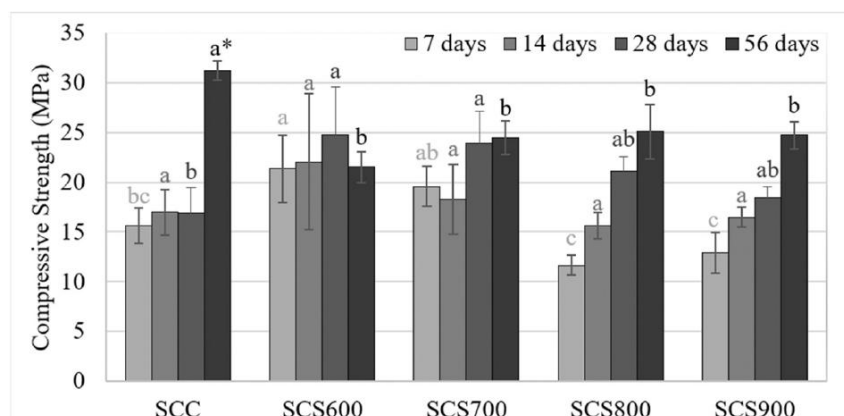


Figura 2. Resistência à compressão de amostras com cimento versus tempo. *Letras diferentes indicam a diferença estatística entre as amostras (Tukey, valor de $p < 0,05$). Fonte: MORSELLI et al. (2025).

Na análise de início e de fim de pega (Figura 2 a), observa-se que a argamassa com WTS600 (SCS600) obteve o menor tempo para ambas as análises, o que corrobora com os resultados de desempenho mecânico inicial mais acentuado, em comparação aos outros tratamentos e com os resultados de perda de condutividade e resistência mecânica aos 28 dias (Figura 3 b). Demonstrando assim, que a atividade pozolânica foi inversamente proporcional a temperatura de calcinação dos lodos.

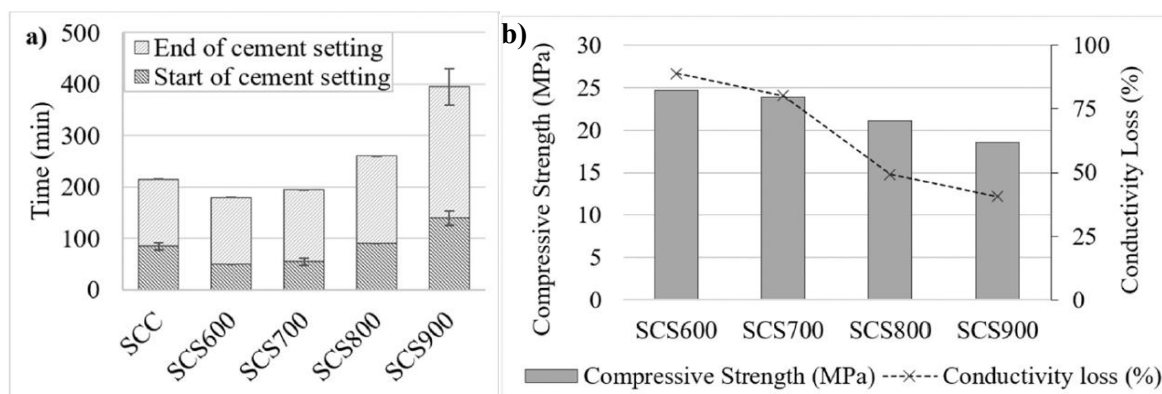


Figura 3. Gráfico de início e fim de pega (a) e relação entre resistência à compressão e condutividade elétrica aos 10.000s. Fonte: MORSELLI et al. (2025).

Esses resultados indicam que o WTS calcinado pode ser utilizado como material cimentício suplementar, substituindo parcialmente o cimento, com

destaque para o WTS800, que alia desempenho técnico e conformidade normativa. O WTS600, embora energeticamente mais eficiente, apresenta limitações na análise com cal. Os resultados estão em consonância com outros trabalhos da literatura (BASTOS et al., 2019; GASTALDINI et al., 2015; RUVIARO et al., 2020; YANG et al., 2023).

4. CONCLUSÕES

O reaproveitamento do lodo de ETA como material cimentício suplementar é uma alternativa viável e sustentável para a construção civil. A calcinação do WTS confere propriedades pozolânicas ao material, permitindo sua aplicação em substituição parcial ao cimento Portland. O WTS800 demonstrou ser o mais adequado para uso comercial, atendendo às exigências normativas e apresentando desempenho consistente. Já o WTS600, embora promissor em termos ambientais, requer estudos adicionais para garantir sua estabilidade a longo prazo.

Este estudo contribuiu para a valorização de resíduos e para a redução dos impactos ambientais da construção civil, alinhando-se aos princípios da economia circular.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTOS, P. A.; SAVASTANO JUNIOR, H.; MELO NETO, A. A. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103410, 2019.
- BRITO, J. de; KURDA, R. Low carbon cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 123558, 2021.
- GASTALDINI, M. F.; HENGGEN, M. C. C.; GASTALDINI, F. D.; DO AMARAL, M. B.; ANTOLINI, T.; COLETTI, M. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 338–346, 2015.
- MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G. d.; SANTOS, J. T. d.; SILVA, J. K. P. da; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R.. Water treatment sludge as a sustainable cement material in Brazil. **Construction And Building Materials**, v. 484, p. 141770, jul. 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141770>.
- PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; VELÁZQUEZ, S. Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 41–49, 2001.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de ETA**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- RUVIARO, A. S.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, C. A. M. Utilização de lodo de ETA como material cimentício suplementar. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 243–260, 2020.
- SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2022**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.
- YANG, J.; REN, Y.; CHEN, S.; ZHANG, Z.; PANG, H.; WANG, X.; LU, J. Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130027, 2023.