

GEOPOLÍMEROS COM RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO SECUNDÁRIA DE CHUMBO: INFLUÊNCIA DA EFLORESCÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Thiago Vinicius dos Anjos, Oscar Khoiti Ueno

INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland comum (OPC) é responsável por 5–8% das emissões globais de CO₂, liberando cerca de 830 kg por tonelada (ADESINA, 2021; MILLER *et al.*, 2024; OSTOVARI *et al.*, 2021). Em contraste, os geopolímeros podem reduzir até 80% dessas emissões ao utilizar resíduos ricos em aluminossilicatos, além de contribuir para o aproveitamento de rejeitos como metais pesados (FETOUH *et al.*, 2024; HENRIQUE *et al.*, 2014; SBAHIEH; MCKAY; AL-GHAMDI, 2023). Entre esses resíduos, a escória da fundição secundária de chumbo contém Pb e Cd, oferecendo riscos ambientais e à saúde (LIU *et al.*, 2024). Apesar do potencial de encapsulamento físico e químico pelo gel N-A-S-H (CASTILLO *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2024; JIANG *et al.*, 2024), os geopolímeros podem sofrer eflorescência, causada pela migração de álcalis e reação com CO₂, afetando estética, durabilidade e desempenho mecânico (MOKHTARI *et al.*, 2024; TAN *et al.*, 2022). Assim, este estudo busca avaliar a influência da escória de fundição secundária de chumbo em matrizes geopoliméricas, com foco na resistência, lixiviação e impacto da eflorescência.

DESENVOLVIMENTO

O metacaulim foi utilizado como precursor e ativado por uma solução alcalina na proporção 1:1 em peso, composta por NaOH 5M e Na₂SiO₃. Resíduos da fusão secundária de chumbo (<200 mesh), provenientes das empresas A, B, C e D, foram incorporados em teores de 0, 5, 10 e 15% em relação ao metacaulim. Corpos de prova cilíndricos (1" × 2") foram moldados na razão solução/metacaulim de 1:0,9, curados por 7, 14 e 28 dias e submetidos a ensaios de resistência à compressão, lixiviação e análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

RESULTADOS

De forma geral, os resultados mostraram que a incorporação de resíduos em até 10% manteve a resistência equivalente à amostra padrão, com destaque para o GP10C, que apresentou desempenho superior. Para a adição de 15% de resíduos, o comportamento foi mais dependente do resíduo: GP15A apresentou queda significativa de resistência, enquanto GP15C e GP15D atingiram valores iguais ou superiores ao padrão após 28 dias, evidenciando o potencial desses resíduos em melhorar a matriz quando incorporados em maiores teores.

Os ensaios de lixiviação (Figura 1-B) confirmaram que os resíduos A e B apresentaram melhor desempenho, com concentrações de metais abaixo dos limites da NBR, mesmo em 15%. O resíduo C manteve-se estável até 10%, mas em 15% o teor de Pb atingiu o limite estabelecido. Já o resíduo D apresentou restrições mais severas, ultrapassando o limite de Pb em 15%, indicando necessidade de limitação para atender às normas ambientais.

Nas micrografias (Figura 1 - C e D), observou-se a presença de partículas maiores inseridas na matriz geopolimérica. Em GP15A, tais partículas se apresentaram com superfícies lisas e contato próximo ao gel. Em GP15B, grãos com bordas irregulares mostraram maior interação com a matriz. Em GP15C, partículas alongadas estavam envolvidas por regiões mais densas, enquanto em GP15D destacaram-se grãos angulosos em meio a uma matriz compacta. Além disso, em algumas amostras foi possível identificar estruturas cristalinas associadas a

eflorescências, sugerindo que a formação dessas fases secundárias pode estar relacionada às diferenças de desempenho mecânico e de lixiviação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram que os geopolímeros são uma alternativa viável para a estabilização de resíduos da fundição secundária de chumbo, conciliando desempenho mecânico e segurança ambiental. Até 10% de adição de resíduos, a resistência à compressão foi mantida ou melhorada, enquanto em 15% os efeitos dependeram do tipo de resíduo, com destaque positivo para GP15C e GP15D. As análises de lixiviação confirmaram que A e B são seguros em teores elevados, enquanto C exige cautela e D deve ser limitado. As micrografias indicaram boa integração das partículas à matriz, mas também evidenciaram a ocorrência de eflorescência em alguns casos, apontando esse fenômeno como um fator que pode afetar a durabilidade e as propriedades do material.

Palavras-chave: geopolímeros; resíduos da fundição secundária de chumbo; resistência mecânica a compressão; lixiviação de metais pesados; eflorescência.

ILUSTRAÇÕES

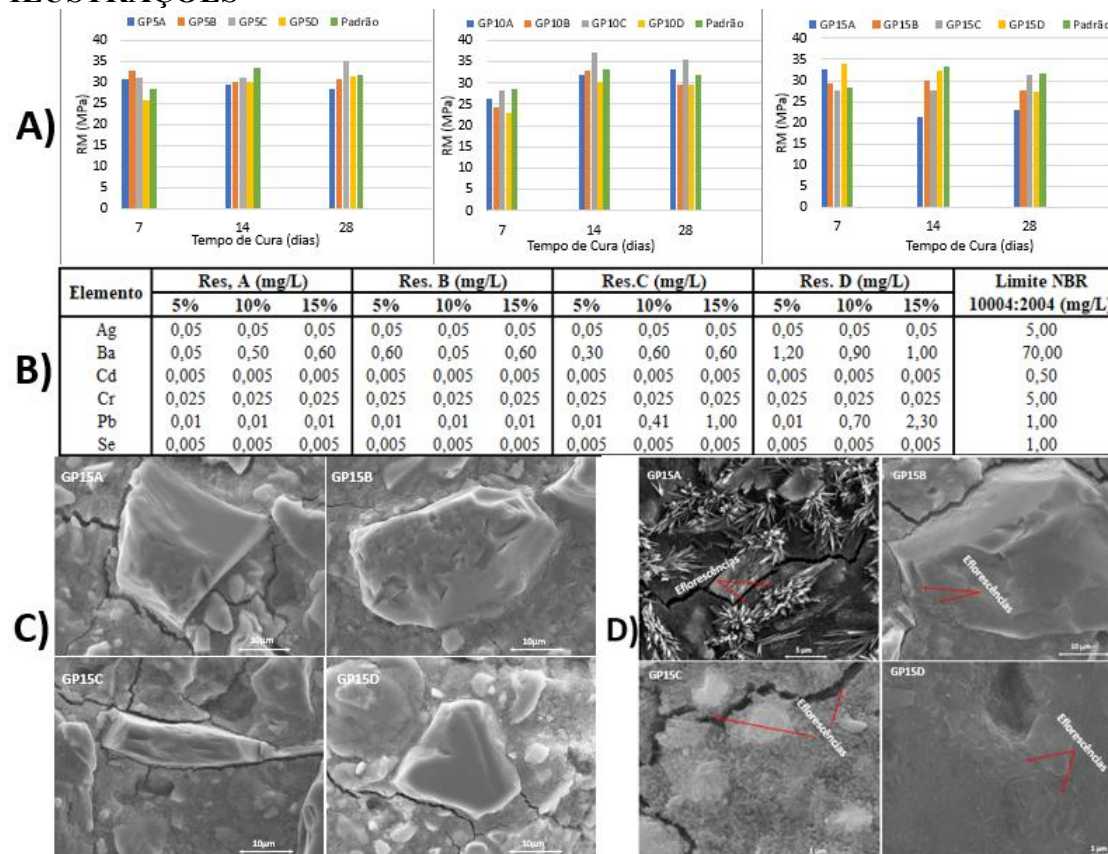


Figura 1. Em A), temos os resultados das análises de RMC para as concentrações de 0,5, 10 e 15% de resíduo e em B), os resultados dos ensaios de lixiviação para as amostras após a geopolimerização, C) Imagens MEV para as amostras com a adição de 15% dos resíduos A, B, C e D, em D) imagens MEV mostrando eflorescências nas amostras. Fonte: Autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADESINA, Adeyemi. Performance and sustainability overview of sodium carbonate activated slag materials cured at ambient temperature. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 3, 16 jan. 2021.
- CASTILLO, Hengels et al. State of the art of geopolymers: A review. *E-Polymers*, v. 22, n. 1, p. 108–124, 1 jan. 2022.
- CHEN, Conglin et al. Micro-assessment of heavy metal immobilization within alkali-activated copper tailings-slag geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, v. 149, 1 maio 2024.
- FETOUH, H. A. et al. Geopolymers as sustainable alternates for portland cement in constructive concrete: systematic review. *Alexandria Journal of Science and Technology*, v. 0, n. 0, p. 22–35, 22 jul. 2024.
- HENRIQUE, Paulo et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). *Ambiente Construído*, v. 14, n. 2, p. 153–168, jun. 2014.
- JIANG, Jie et al. Synthesis of tailing slurry-based geopolymers for the highly efficient immobilization of heavy metals: Behavior and mechanism. *Applied Clay Science*, v. 247, 1 jan. 2024.
- LIU, Jianwei et al. Multiple pathway exposure risks and driving factors of heavy metals in soil-crop system in a Pb/Zn smelting city, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 459, p. 142523, 25 jun. 2024.
- MILLER, Sabbie A. et al. Cement and Alternatives in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 18 out. 2024.
- MOKHTARI, Pozhhan et al. Investigation of geopolymer efflorescence durability problems: Causes and possible solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 107, n. 8, p. 5364–5382, 1 ago. 2024.
- OSTOVARI, Hesam et al. From Unavoidable CO₂ Source to CO₂ Sink? A Cement Industry Based on CO₂ Mineralization. *Environmental Science & Technology*, v. 55, p. 1–17, 18 mar. 2021.
- SBAHIEH, Sami; MCKAY, Gordon; AL-GHAMDI, Sami G. Comprehensive analysis of geopolymer materials: properties, environmental impacts, and applications. *Materials*, v. 16, n. 23, 1 dez. 2023.
- TAN, Jiawei et al. Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, v. 58, p. 105001, 15 out. 2022.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Thiago Vinicius dos Anjos

MODALIDADE DE BOLSA: PROIP/UDESC (IP)

VIGÊNCIA: 01/09/2024 a 31/08/2025 – Total: 12 meses

ORIENTADOR(A): Oscar Khoiti Ueno

CENTRO DE ENSINO: CEPLAN

DEPARTAMENTO: Departamento de Tecnologia Industrial

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharia de Materiais e Metalúrgica / Materiais não Metálicos

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Influência dos resíduos de escória, provenientes da reciclagem secundária de baterias em materiais cerâmicos

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP3280-2021