

ÁLCALI – ATIVAÇÃO COM LIGANTE ORIUNDO DE RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL DE CASCA DE OVO PARA MELHORAMENTO DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO

CAROLINA MENEGOLLA^{1,2}, JONAS DUARTE MOTA^{2,3}, GIOVANI JORDI BRUSCHI⁴, EDUARDO PAVAN KORF^{2,5}

1 Introdução

Os solos residuais cobrem cerca de 38% da superfície da Terra, o que resulta em sua ampla utilização em diversas obras de engenharia (Oliveira, 2011). Estes solos são essenciais tanto para servir de base para construções quanto como material em estradas, aterros sanitários e barragens de terra (Diemer et al., 2008). Eles são conhecidos por suas propriedades de alta drenagem, altos índices de vazios e uma leve cimentação natural entre suas partículas (Marques, Consoli, Sousa, 2014).

A compactação de solos residuais pode quebrar a cimentação natural, diferentemente dos solos finos. Neste caso, a estabilização química de solos residuais compactados com adição de cimento Portland e cal resulta em materiais com boas propriedades mecânicas, adequados para uso no local (Basha et al., 2005).

Como uma alternativa sustentável aos estabilizadores convencionais, tem-se os cimentos álcali-ativados, os quais são desenvolvidos a partir da incorporação de resíduos agroindustriais como precursores (Miller, Cunningham, Harvey, 2019). Este processo utiliza ativadores alcalinos para elevar o pH do meio, acelerando as reações pozolânicas e as ligações cimentícias (Sargent, 2015). O hidróxido de sódio (NaOH) é um dos ativadores mais utilizados devido à sua capacidade de produzir materiais com uma maior relação de Ca/Si (Fernández-Jiménez et al., 2023).

Resíduos agroindustriais, como as cinzas da casca de arroz, são altamente pozolânicos e quimicamente reativos, podendo empregar-se como precursores (Pelissaro et al., 2023; Pelisser et al., 2023). Outro material com potencial para álcali-ativação é a cal da casca de ovo, que contém uma alta concentração de óxido de cálcio, variando entre 85% e

¹Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, bolsista, *campus Erechim RS*, contato: cmenegolla@gmail.com

²Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental.

³Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus Erechim RS*.

⁴Doutor em Engenharia Civil, UFRGS, Brasil.

⁵Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia, docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus Erechim*, Orientador, contato: eduardo.korf@uffs.edu.br

92% (Tonini de Araújo et al., 2024). A utilização desses resíduos em ligantes, tanto como precursores quanto como fonte de cálcio, não apenas reduz a quantidade de resíduos em aterros, mas também diminui a extração de recursos naturais necessários para a produção do cimento Portland, comumente utilizado como um tradicional agente cimentante em solos (Huntzinger, Eatmon, 2009).

2 Objetivos

Avaliar a viabilidade do processo de álcali-ativação de um sistema de cal de casca de ovo hidratada (CCOH) e a cinza de casca de arroz (CCA) para o melhoramento de solo residual de basalto (SRB), além de caracterizar suas propriedades mineralógicas e de desempenho ambiental.

3 Metodologia

O SRB foi coletado em talude de uma empresa de britagem em Erechim, RS. A CCOH foi produzida em laboratório, a partir de cascas de ovos, passando por lavagem, secagem, trituração, calcinação, peneiramento, hidratação e secagem. A CCA e o SRB foram secos a 105°C por 48 horas. A dosagem do ligante álcali-ativado (LAA) de CCA e CCOH foram definidas com base em estudos com esses materiais (Pompermaier *et al.*, 2024). O planejamento experimental considerou três variáveis: teor de LAA de 10 e 25 %, tempos de cura de 7 e 28 dias e peso específico seco de 14 kN/m³ e 15,0 kN/m³, mantendo a umidade constante em 29%. Corpos-de-prova foram moldados e curados em sacos plásticos a 23±2°C, com variação de 3% nos índices físicos e após imersão em água foram testados para resistência à compressão simples (RCS), conforme a NBR 12025 (ABNT, 2004). A lixiviação de metais e a mineralogia foi avaliada utilizando corpos de prova com melhores resultados em RCS. Após o período de cura, foram rompidos, peneirados e submetidos aos ensaios de lixiviação, conforme NBR 10005 (ABNT, 2004b), sendo a concentração dos extratos comparados com os limites do anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a). A mineralogia foi avaliada por difração de raios-X (DRX).

4 Resultados e Discussão

Por meio da análise da Figura 1, que relaciona a RCS para tempos de cura de 7 e 28 dias, percebe-se que o maior tempo de cura resultou em maiores resistências. O mesmo efeito positivo na resistência é observado na Figura 2, para o peso específico seco.

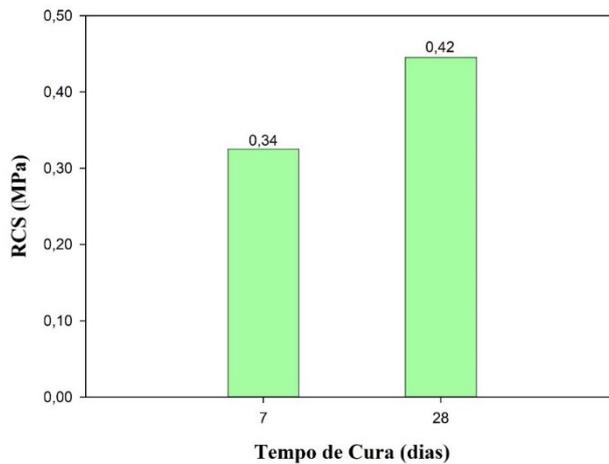


Figura 1. RCS médios em relação ao tempo de cura.

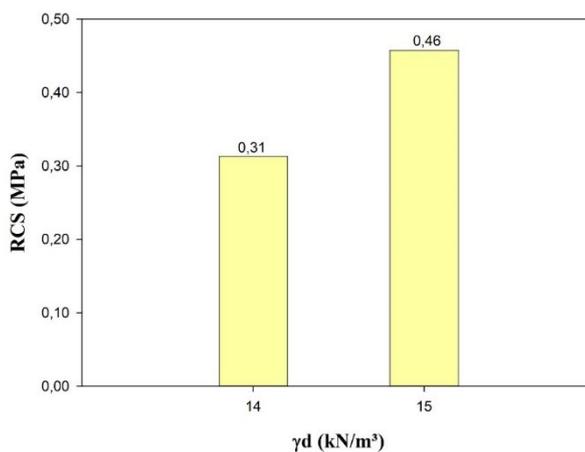


Figura 2. RCS médios em relação ao peso específico seco.

As amostras que alcançaram o desempenho mecânico mais favorável foram aquelas com 28 dias de cura e peso específico de 15 kN/m³ em que os resultados médios apresentados nos gráficos corroboram essa afirmação. O aumento do peso específico seco reduziu a porosidade, elevando a resistência devido ao maior atrito e intertravamento das partículas. Um período de cura prolongado intensificou a cimentação, reforçando a resistência (Consoli et al., 2018; Ferrazzo et al., 2023).

O SRB e a CCA são classificados como Classe IIA - Não Perigoso- Não inerte. Na análise dos extratos lixiviados, a mistura LAA-SRB com desempenho mecânico mais favorável não lixiviou acima dos limites de toxicidade. A análise mineralógica da mistura LAA-SRB é composta por quartzo (SiO₂) e hematita (Fe₂O₃) oriundos do SRB e CCA e a

calcita (CaCO_3) presente no SRB. A Portlandita (Ca(OH)_2), originalmente na composição da CCOH (Consoli *et al.*, 2020), foi consumida já em 7 dias de tempo de cura, indicando a formação dos géis cimentantes foi efetiva e foi o responsável pelas altas RCS obtidas.

5 Conclusão

O ligante álcali-ativado oriundo de resíduo industrial (CCA) com cal de casca de ovo hidratada (CCOH) via ativação alcalina contribuiu para a melhoria da resistência do solo residual basáltico, com potencial para substituir agentes cimentantes tradicionais. Além disso, a mineralogia das misturas LAA-SRB confirmou a formação de géis cimentantes e o bom desempenho ambiental, devido a inexistência de lixiviação de metais acima dos limites de toxicidade.

Referências Bibliográficas

- ABNT. (2012). *NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., & Muntohar, A. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19, 448–453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Bruschi, G., Santos, C., Tonini de Araujo, M., Tonatto Ferrazzo, S., Marques, S., & Consoli, N. (2021). Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003949](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003949).
- Consoli, N. C., da Silva, A. P., Nierwinski, H. P. & Sosnoski, J. (2018). Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings—Cement mixes. *Can. Geotech. J.* 55, 486–494.
- Diemer, F., Specht, L., & Consoli, N. (2010). Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS percolando água e óleo diesel. *Revista Teoria e Prática Na Engenharia Civil*.
- Dos Santos, C. P., Bruschi, G. J., Mattos, J. R. G. & Consoli, N. C. (2022). Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane. *Transp. Geotech.* 32, 100704.
- Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I., Maltseva, O., & Palomo, A. (2023). Sustainable Cements: Hybrid Alkaline Cements Overview. In J. I. Escalante-Garcia, P. Castro Borges, & A. Duran-Herrera (Eds.), *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 626–639). Springer International Publishing.
- Ferrazzo, S. T., Tonini de Araújo, M., Bruschi, G. J., Korf, E. P., Levandoski, W. M. K., Pereira dos Santos, C., & Consoli, N. C. (2023). Metal encapsulation of waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder: Batch and column leaching tests. *Journal of Environmental Management*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119287>
- Huntzinger, D. N.; Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 7, p. 668–675.

- Marques, S. F. V.; Consoli, N. C.; Sousa, J. A. e. (2014). Testing cement improved residual soil layers. *Journal of materials in civil engineering*, v. 26, n. 3, p. 544-550.
- Miller, S. A.; Cunningham, P. R.; Harvey, J. T. (2019). Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 146, n. March, p. 416–430.
- Oliveira, C. P. *Comportamento mecânico de um solo residual naturalmente cimentado*. (2011). Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Pelisser, G., Tonatto Ferrazzo, S., Mota, J., Santos, C., Pelisser, C., Dalla Rosa, F., Korf, E. P. (2023). Rice husk ash-carbide lime as an alternative binder for waste foundry sand stabilization. *Environmental Science and Pollution Research*, 30. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25117-8>
- Pompermaier, Claudio Luiz *et al.* Stabilization of waste foundry sand with alkali-activated binder: Mechanical behavior, microstructure and leaching. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 444, p. 137772, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824029143>.
- Sargent, P. (2015). The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In: *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. [s.l: s.n.]. p. 555–604.
- Tonini de Araujo, M., Tonatto Ferrazzo, S., Consoli, N., & Rocha, C. (2024). Environmental, economic, and social impacts of sugar cane bagasse and eggshell wastes for soil stabilization. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32299-w>
- Trevizan Pelissaro, D., Zago, A., Tonatto Ferrazzo, S., Bruschi, G., & Dalla Rosa, F. (2023). Curing conditions effect on the stabilization of recycled asphalt pavement with alkali-activated metakaolin and rice husk ash-derived activator. *Road Materials and Pavement Design*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2276421>

Palavras-chave: Solos residuais; Estabilização química; Cimento Álcali-ativado; Resistência à compressão simples.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2023-0071

Financiamento: UFFS