

## RESISTÊNCIA E MINERALOGIA DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO ORIUNDO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS SOB DISTINTOS TEMPOS DE CURA

**William Mateus Kubiaki Levandoski**  
Universidade Federal da Fronteira Sul  
williankubi@gmail.com

**Maria Alice Piovesan**  
Universidade Federal da Fronteira Sul  
mariaalicepiovesan@gmail.com

**Dra. Suéllen Tonatto Ferrazzo**  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
suellenferrazzo@hotmail.com

**Dr. Eduardo Pavan Korf**  
Universidade Federal da Fronteira Sul  
eduardo.korf@uffs.edu.br

Eixo 03: Engenharias

**Resumo:** A estabilização química de rejeitos de mineração se apresenta como um meio de valorização a partir da adição de agentes cimentantes. Neste contexto, ligantes oriundos da ativação alcalina de resíduos fonte de aluminossilicatos mostram-se uma alternativa promissora. O presente estudo avaliou a estabilização de rejeito da mineração de ferro (RMF) com um ligante álcali-ativado (LAA) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo, considerando distintos tempos de cura. Ensaios de resistência à compressão simples (RCS) de misturas RMF-LAA foram realizados considerando distintos tempo de cura. A mineralogia de misturas de interesse também foi investigada. A RCS de RMF-LAA é influenciada significativamente pelo tempo de cura. Uma resistência de 6,47 MPa foi atingida em 180 dias de cura. Em relação à mineralogia do material estabilizado percebeu-se o consumo de portlandita ao decorrer do tempo de cura.

**Palavras-chave:** Resíduos de mineração e agroindustriais; cimentos alcalinos; Estabilização; Valorização de resíduos.

### Introdução

Estima-se que o Brasil gera diariamente 379.000 toneladas de rejeitos de minério de ferro (FONTES et al., 2019) dispostos em 672 barragens de rejeitos, sendo 340 localizadas no estado de Minas Gerais (SNISB, 2022). Os reservatórios de barragens de rejeitos ocupam grandes áreas com considerável impacto visual durante toda a sua vida útil (FONTES et al.,

2019) e geram impactos ambientais que incluem: desmatamento (na fase de construção); poluição dos solos e poluição das águas superficiais e subterrâneas (durante a operação e após o fechamento da mina).

Entre os meios de valorizar os rejeitos de mineração, como também reduzir os riscos associados ao seu armazenamento, tem-se: isolamento dos rejeitos por capeamento; estabilização química dos rejeitos pela adição de agentes cimentantes, e a combinação dos dois métodos (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020). A estabilização química com adição de ligantes resulta em materiais com boas propriedades mecânicas que podem ser aplicados no local, em subsolo (aterro) ou para armazenamento de superfície (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017). Cal e cimento Portland são ligantes já amplamente aplicados para estabilização de solos. Entretanto, o cimento tradicional apresenta baixa resistência a ácidos, alto custo e consumo energético, bem como de emissões de CO<sub>2</sub> (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020).

Como alternativa a agentes estabilizadores convencionais, resíduos industriais que apresentam conteúdos de óxidos de cálcio e sílica, superior 70%, e óxido de alumínio, inferior à 20%, podem ser utilizados como precursores para produção de ligantes álcali-ativados (KRIVENKO, 2017). A ativação alcalina corresponde a reação entre uma fonte de aluminossilicatos (precursor) em condições alcalinas (induzidas por um ativador alcalino), que resulta em um ligante baseado em uma combinação de alcalino-aluminossilicato hidratado e/ou fases alcalino-alcalino-terroso-aluminossilicato (PROVIS, 2018). Os ativadores alcalinos aumentam o pH do meio, acelerando as reações químicas e a formação de produtos cimentantes (SARGENT, 2015), dentre os mais utilizados, hidróxido de sódio (NaOH) (PROVIS, 2018).

Como potencial precursor, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar é uma pozolana que contém óxidos de sílica, alumínio e ferro superiores a 70% (BERENGUER et al., 2020). Como fonte de cálcio, a cal de casca de ovo é composta por elevado teor cálcio, variando entre 85% e 92% (BENSAIFI et al., 2019). O aproveitamento dos materiais supracitados na produção de novos ligantes, minimiza a quantidade de resíduos depositados em aterros e reduz a extração de recursos naturais para produção de cimento Portland (FERRAZZO et al., 2023).

A ativação alcalina vem sendo explorada como uma metodologia promissora para estabilização de rejeitos, e aplicá-la no local da mineração é um aspecto positivo para a sustentabilidade. Estudos realizados com rejeitos da mineração de cobre, níquel, zinco, platina e ferro evidenciam que a cura sob maiores períodos resulta em maiores resistências e a mineralogia permanece quase inalterada (OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020). Neste contexto, verifica-se que há carência de estudos para estabilizar rejeitos de

mineração de ferro com ligantes álcali-ativados a base de resíduos, e de como potencializar esta estabilização para diferentes tempos de cura, identificando os fatores que influenciam seu desempenho mecânico e mineralogia. Assim, o presente estudo avaliou a estabilização de rejeito da mineração de ferro (RMF) com um ligante álcali-ativado (LAA) de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo, em distintos tempos de cura.

## **Materiais Métodos**

Os materiais utilizados nesta pesquisa e respectivas abreviações foram: rejeito de mineração de ferro (RMF); cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA); cal de casca de ovo hidratada (CCOH) e hidróxido de sódio (NaOH). O ligante álcali-ativado (LAA), desenvolvido e caracterizado por Araújo et al. (2023), é composto por uma relação CBCA/CCOH de 80/20, com concentração molar de solução ativadora (NaOH) de 1M e respectiva concentração de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) de 2,61%. Em relação a mistura RMF/LAA, definiram-se valores fixos para: teor de ligante, peso específico seco, teor de umidade e temperatura de cura. Sendo assim, avaliou-se a razão RMF/LAA 75/25, com base em estudos anteriores (BRUSCHI et al., 2021; CONSOLI et al., 2021), e peso específico seco ( $\gamma_D$ ) 15,3 kN.m<sup>-3</sup> e teor de umidade inicial das misturas (w) em 22,8% obtidos a partir de ensaios Proctor (ASTM, 2012).

A moldagem dos corpos de provas seguiu os procedimentos de subcompactação: material compactado estaticamente em três camadas em um corpo de prova cilíndrico (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura). O ensaio de resistência à compressão simples (RCS), avaliou o desempenho das misturas com tempo de cura de 7, 28, 60, 180 e 365 dias (a 23°C), seguindo a metodologia NBR 12025 (ABNT, 2012), sendo executado em uma prensa automática de capacidade de 100 t. A mineralogia das misturas para os tempos de cura de 28, 180 e 365 dias, foi avaliada por meio de Difractometria de raios-X (DRX). Após o ensaio de RCS, realizou-se a extração de amostras dos corpos de prova e subsequente processo de paralisação das reações químicas, conforme metodologia proposta por Caicedo (2020). As análises de DRX foram realizadas em um difratômetro de raios-X [marca *Siemens - BRUKER AXS*, modelo D-5000].

## **Resultados e Discussões**

Nos resultados de RCS para RMF-LAA (Figura 1) nota-se que, ao passar do tempo ocorre um incremento significativo nas resistências. De forma geral, os tratamentos RMF-LAA de 7 e 28 apresentaram baixa variação de resistência, 3,14 e 3,86 MPa, respectivamente. Entretanto, quando comparados com os tratamentos de longo prazo (acima de 60 dias) é possível observar um expressivo acréscimo. O melhor tratamento de RMF-LAA atingiu uma RCS de 6,47 MPa

em 60 dias. Após os 60 dias de cura, observou-se uma estagnação no ganho de resistência para os tratamentos com 180 e 365 dias.

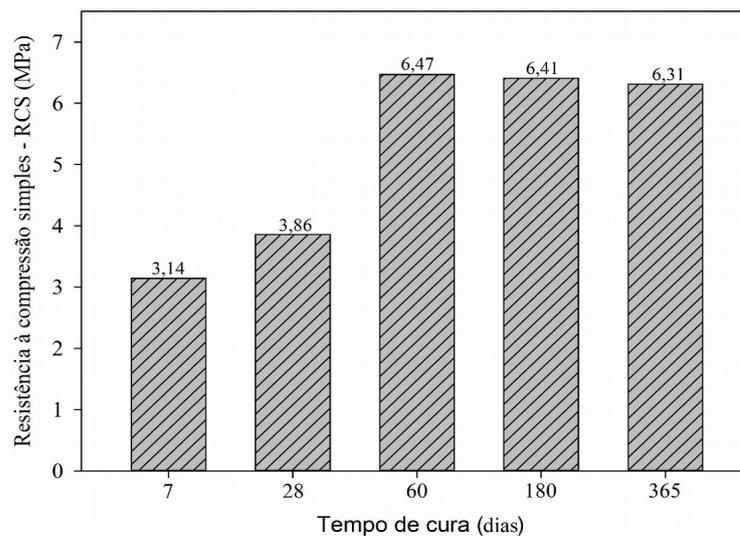


Figura 1. Resultados de RCS para misturas RMF-LAA para 7, 28, 60, 180 e 365 dias.

O tempo de cura influencia de forma positiva na RCS das misturas RMF-LAA, em que produtos cimentantes continuam a se formar, ao longo do tempo, contribuindo para ganhos de resistência. A maior variação de ganho de resistência foi possível observar entre os tratamentos de 28 e 60 dias, resultando no incremento de resistência de 68%. Resultados similares foram também observados em trabalhos de estabilização de rejeitos com distintos ligantes álcali-ativados (BRUSCHI et al., 2021; SALDANHA et al., 2023).

Na Figura 2 são apresentados os difratogramas das misturas RMF-LAA nos períodos de cura de 28, 180 e 365. As amostras apresentam fases semicristalinas e cristalinas, que compartilham a presença de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e goethita ( $\text{Fe}_3\text{O}(\text{OH})$ ) (presentes no RMF), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (oriundos do RMF e CBCA) e portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (oriunda da CCOH). Observa-se também, que a portlandita vai sendo consumida em função das interações com os aluminossilicatos, ao longo do tempo (7 para 365 dias), formando produto cimentante, o que corrobora a influência destes fatores, conforme observado no comportamento mecânico das misturas RMF-LAA (PALOMO et al., 2007).

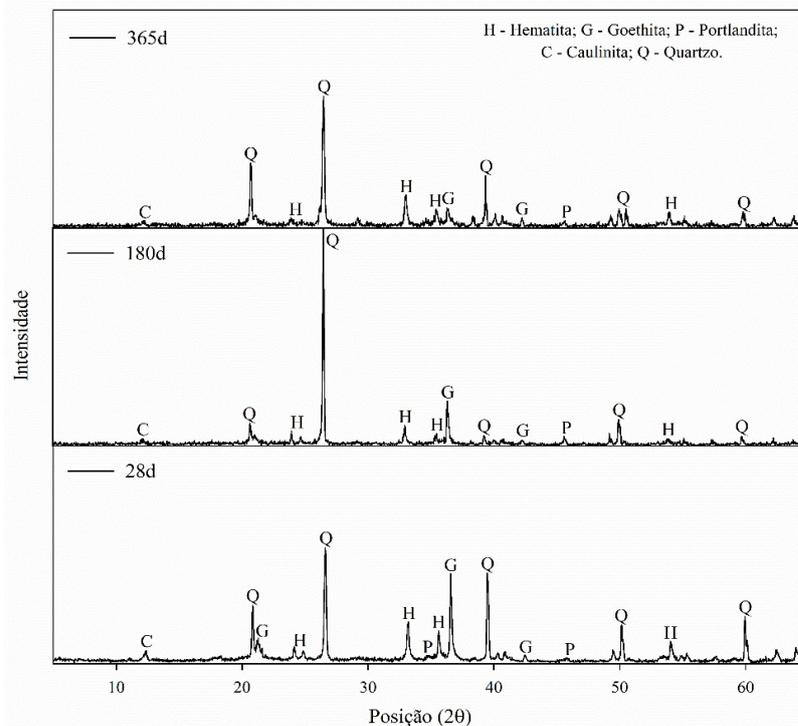


Figura 2. Difratoformas de amostras RMF-LAA para 28, 180 e 365 dias.

## Considerações Finais

A partir dos ensaios e análises realizados, observa-se que maiores tempos de cura resultaram em maiores resistências. A mistura com melhor comportamento atingiu 6,47 MPa aos 60 dias, o que representa um acréscimo de 68% comparado a de 28 dias. Ao longo de incremento de tempo de cura de RMF-LAA, identificou-se o consumo de portlandita e a manutenção dos minerais constituintes, como hematita, goethita, quartzo e caulinita.

## Referências

- ARAÚJO, M. T. DE; FERRAZZO, S. T.; BRUSCHI, G. J.; SILVA, G. J. B.; CONSOLI, N. C. Strength, mineralogy, microstructure and statistical analysis of alkali-activated sugarcane bagasse ash-eggshell lime pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. In press, p. 1–11, 2023.
- ASTM. D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3ASTM International, p. 1–14, 2012.</sup>
- BENSAIFI, E.; BOUTELDJA, F.; NOUAOURIA, M. S.; BREUL, P. Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. **Transportation Geotechnics**, v. 20, n. May, 2019.
- BERENGUER, R. A.; CAPRARO, A. P. B.; DE MEDEIROS, M. H. F.; CARNEIRO, A. M. P.; DE OLIVEIRA, R. A. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103655, 2020.
- BRUSCHI, G. J.; DOS SANTOS, C. P.; TONINI DE ARAÚJO, M.; FERRAZZO, S. T.; MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical

Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 06021007, 2021.

CONSOLI, N. C.; DAASSI-GLI, C. A. P.; RUVEN, C. A.; LOTERO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; LOURENÇO, D. E. Lime–Ground Glass–Sodium Hydroxide as an Enhanced Sustainable Binder Stabilizing Silica Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 10, p. 06021011, 2021.

FERRAZZO, S. T.; TONINI DE ARAÚJO, M., BRUSCHI, G. J.; CHAVES, H. M., KORF, E. P.; CONSOLI, N. C. Mechanical and environmental behavior of waste foundry sand stabilized with alkali-activated sugar cane bagasse ash-eggshell lime binder. **Construction and Building Materials**, v. 383, p. 131313, 2023.

FONTES, W. C.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; ANDRADE, L. C. R.; SEGADÃES, A. M.; PEIXOTO, R. A. F. Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 111–121, 2019.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 475–493, 2017.

KRIVENKO, P. Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v. 8, n. 3, p. 323–333, 2017.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 246, 2020.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; KOVALCHUK, G.; ORDOÑEZ, L. M.; NARANJO, M. C. Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2958–2966, 2007.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

SALDANHA, R. B.; CAICEDO, A. M. L.; DE ARAÚJO, M. T.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; SILVA, J. P. S.; CONSOLI, N. C. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, 2023.

SARGENT, P. 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.

SNISB. Barragens Registradas no Sistema. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança das Barragens - SNISB**, 2022.