

Estabilização de rejeito de mineração de ferro com cimento alcalino de cinza de casca de arroz e casca de ovo

Jonas Duarte Mota

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS - Erechim/RS, Brasil. jonasduartemota@gmail.com

Carolina Menegolla

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS - Erechim/RS, Brasil. cmenegolla@gmail.com

William Mateus Kubiaki Levandoski

Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS - Erechim/RS, Brasil. williankubi@gmail.com

Suéllen Tonatto Ferrazzo

Doutora em Engenharia Civil, UFRGS - Porto Alegre/RS, Brasil. suellenferrazzo@hotmail.com

Eduardo Pavan Korf

Doutor em Engenharia Civil, docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária - UFFS, campus Erechim/RS, Brasil. eduardo.korf@uffs.edu.br

RESUMO: Em 2019, a mineração brasileira contribuiu com aproximadamente 18,9% do processamento global de minérios, totalizando 2,4 bilhões de toneladas. Contudo, as atividades de processamento mineral geram rejeitos que, ao serem depositados em barragens, apresentam riscos potenciais de ruptura e contaminação do solo e das águas subterrâneas. Uma abordagem promissora para tratar e valorizar esses rejeitos é a estabilização/solidificação com ligantes álcali-ativados (LAA), resultantes da ativação alcalina de resíduos industriais ou agroindustriais. Nesse contexto, esta pesquisa foca na estabilização de rejeitos de mineração de ferro com um LAA derivado de cinza de casca de arroz (CCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH). O LAA é composto por uma relação CCA/CCOH de 80/20 e solução de hidróxido de sódio como ativador alcalino (2,61% NaO). Corpos de prova cilíndricos foram moldados considerando diferentes teores de LAA, teores de umidade, pesos específicos e tempos de cura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples indicam que a mistura rejeito-LAA com maior teor de ligante e peso específico apresentou maior resistência, atingindo 2,16 MPa em 28 dias. Esse aumento da resistência do rejeito com LAA sugere potenciais aplicações em projetos de engenharia, como subleito de pavimentos e assentamento de tubulações.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de mineração, Resíduos Agroindustriais, Ativação alcalina, Comportamento mecânico.

ABSTRACT: In 2019, Brazilian mining contributed approximately 18.9% of global mineral processing, totaling 2.4 billion tons. However, mineral processing activities generate tailings that, when deposited in dams, pose potential risks of rupture and contamination of soil and groundwater. A promising approach to treating and valuing these wastes is stabilization/solidification with alkali-activated binders (AAB), resulting from industrial or agro-industrial wastes. In this context, this research focuses on the stabilization of iron ore tailings with an AAB produced from rice husk ash (RHA) and hydrated eggshell lime (HEL). The AAB consists of a RHA/HEL ratio of 80/20 and a sodium hydroxide solution as the alkaline activator (2.61% NaO). Cylindrical specimens were molded considering different AAB contents, moisture content, dry unit weights, and curing times. The results of the unconfined compressive strength indicate that the tailing-AAB mixture with a higher binder content and dry unit weight showed greater resistance, reaching 2.16 MPa at 28 days. The strength enhancement observed in the tailings with AAB indicates potential applications in engineering projects, such as pavement subgrade and pipe bedding.

KEYWORDS: Mining tailings, Agro-industrial waste, Alkaline activation, Mechanical behavior.

1 INTRODUÇÃO

As reservas globais de minério de ferro totalizam aproximadamente 170 bilhões de toneladas. Do volume total de 2,4 bilhões de toneladas de minério processadas em 2019, a Austrália lidera como o maior produtor mundial, contribuindo com 36,7%, seguida pelo Brasil, que representou cerca de 18,9% da produção (De Jesus, Joaquim, 2020). No entanto, as atividades do setor de mineração têm impactos adversos significativos. Diversos resíduos, como os provenientes de atividades industriais e de mineração, são descartados em aterros e barragens, aumentando o risco de rupturas e contaminação ambiental.

Uma maneira de valorizar os rejeitos da mineração é estabilizá-los através da adição de agentes cimentantes, como os ligantes álcali-ativados (LAA) provenientes da ativação alcalina de resíduos fontes de aluminossilicatos, sendo objeto de estudo. Nesse contexto, resíduos agroindustriais com teores de óxidos de cálcio e sílica superiores a 70%, e óxido de alumínio inferior a 20%, apresentam-se como candidatos ideais para a produção de ligantes álcali-ativados (Krivenko, 2017).

A utilização da ativação alcalina tem sido investigada como uma abordagem promissora na estabilização de rejeitos de mineração, empregando diversos resíduos como precursores, tais como: cinzas volantes, escórias de alto forno, cinza proveniente da casca de arroz, resíduos de vidro moído ou de cerâmica, entre outros. Exemplos de materiais promissores para essa finalidade são a cinza da casca de arroz e a cal proveniente da casca de ovo. A CCA, em função de sua composição química (principalmente SiO_2), possui propriedades pozolânicas devido ao teor de sílica no estado amorfo ou reativa (Servi et al., 2022), sendo um potencial precursor. Já a cal proveniente da casca de ovo hidratada (CCOH) é um resíduo rico em óxido de cálcio (CaO), tornando-se uma excelente fonte de cálcio para a aplicação em LAA (Ferrazzo et al., 2023).

Assim, o presente estudo visa investigar a estabilização de rejeito da mineração de ferro com um ligante álcali-ativado oriundo de cinza de casca de arroz (CCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Proveniente de uma indústria de mineração de ferro situada em Minas Gerais, o Rejeito de Mineração de Ferro (RMF) passou por um processo de secagem a 50°C por 48 horas e foi subsequentemente peneirado (peneira de 2mm). A Cinza da Casca de Arroz (CCA) é originária de uma usina termelétrica localizada no interior do estado do Rio Grande do Sul, onde a queima da casca ocorre entre 800°C e 1000°C , sendo resfriada gradualmente em condições ambientais. O processo de preparo da cinza teve início com a secagem em estufa a 50°C por 48 horas, seguida pelo peneiramento através de uma malha 200 ($75\mu\text{m}$).

O RMF é composto principalmente por óxidos de ferro (49,3%), silício (35,1%) e alumínio (8,48%). Por sua vez, a CCOH corresponde a uma rica fonte de cálcio, equivalente a 72,9% de CaO (Levandoski, Ferrazzo, Bruschi, et al., 2023). A CCA é composta principalmente por óxidos de silício (87,6%), potássio (2,87%) e cálcio (0,88%), mostrando-se uma fonte de sílica amorfa (Pelisser et al., 2022; Reis et al., 2022).

A Casca de Ovo Hidratada (CCOH), produzida em laboratório, passou pelas seguintes etapas: a) Coleta e lavagem das cascas de ovo; b) Secagem em estufa ventilada a 50°C por 12 horas; c) Moagem em moinho de facas; d) Calcinação em forno mufla a 1050°C por 6 horas; e) Hidratação em água destilada por 48 horas; e f) Peneiramento através de uma malha 200 ($75\mu\text{m}$) (Levandoski, Ferrazzo, Bruschi, et al., 2023).

2.2 Métodos

Anteriormente desenvolvido e caracterizado pelo grupo de pesquisa, o LAA utilizado neste estudo apresenta relação CCA/CCOH de 80/20 e solução de hidróxido de sódio (1M) com concentração de álcalis de 2,61%. As demais variáveis também foram definidas previamente com base em estudos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa com RMF e cimentos alcalinos (Levandoski, Ferrazzo, Bruschi, et al., 2023). Sendo assim, foram utilizados: teor de umidade ótima em 22,8%, peso específico aparente seco em $13,3 \text{ kN/m}^3$ e $15,3 \text{ kN/m}^3$ e teor de ligante em 15 e 25%. Períodos de cura de 7 e 28 dias foram selecionados para avaliar o comportamento mecânico ao longo do tempo.

Na moldagem, o material (mistura RMF+LAA) foi compactado de forma estática em três camadas dentro de um corpo de prova cilíndrico, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, para atingir cada peso

específico desejado, totalizando 36 corpos de prova moldados. Após, os corpos de prova foram retirados dos moldes cilíndricos, e suas massas, diâmetros e alturas foram medidas com uma precisão de 0,01g e 0,1 mm, respectivamente. Posteriormente, foram colocados em sacos herméticos e mantidos sob condições controladas de temperatura ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) durante o tempo de cura. Com 24 horas restantes para a conclusão do processo de cura, os corpos de prova foram submersos em água para mitigar os efeitos de sucção (Consoli et al., 2011). Os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica, conforme a normativa de Resistência à Compressão Simples NBR 12025 (ABNT, 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistência à compressão simples

Nos resultados médios de RCS das misturas RMF+LAA (Figura 1) nota-se que, maiores teor de ligante, peso específico e tempo de cura resultaram em maiores resistências. Isto corrobora com o resultado do melhor tratamento de RMF-LAA (25% ligante e $15,3\text{kN/m}^3 \gamma_d$), atingindo uma RCS média de 2,16 MPa em 28 dias, o que representa um acréscimo de 61% comparado a de 7 dias (1,34 MPa).

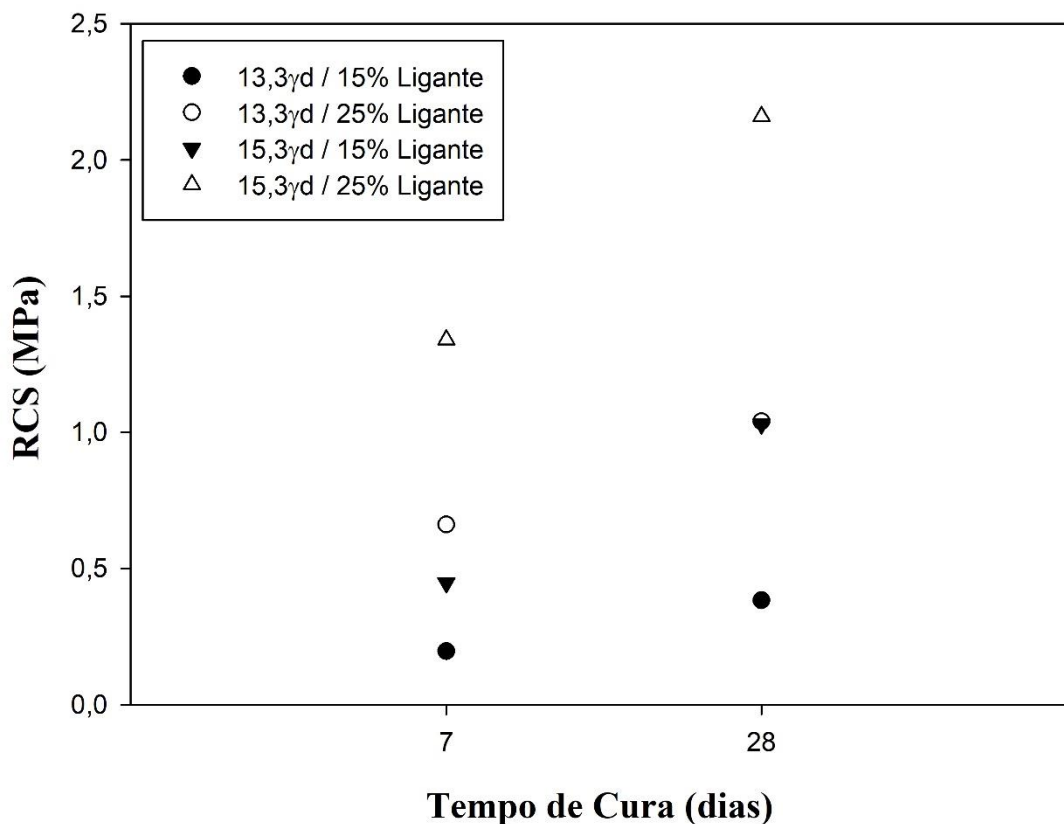


Figura 1. Resultados médios de Resistência à Compressão Simples das misturas RMF+LAA.

O incremento na quantidade de ligante nas misturas desencadeou a formação de uma maior quantidade de produtos cimentantes, resultando diretamente na maximização da RCS. Já o aumento no peso específico aparente seco proporcionou um aumento nos pontos de contato entre as partículas devido à redução da porosidade, intensificando a mobilização de atrito e o intertravamento, contribuindo, assim, para um acréscimo na resistência. Por sua vez, o maior período de cura possibilitou que produtos cimentantes continuassem a se desenvolver ao longo do tempo, resultando em incremento da RCS.

Em comparação com o outro estudo realizado pelo grupo de pesquisa (Levandoski, Ferrazzo, Bruschi, et al., 2023; Levandoski, Ferrazzo, Piovesan, et al., 2023), utilizando o RMF e ligante de Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA) com CCOH, obtiveram-se, da mesma forma que neste trabalho, os resultados de melhor RCS com os maiores teores de ligantes testados (25%) e de peso específico seco (15,3 kN/m³), atingindo uma RCS de 3,14 MPa em 7 dias (23°C). A RCS observada pelos autores é maior do que observado neste estudo, pois o ligante CBCA+CCO possui óxidos de ferro (13,83%) e alumínio (5,76%) que contribuem para a formação de géis cimentantes e consequente aumento de RCS, além da CBCA possuir maior índice de atividade pozolânica do que a CCA.

4 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados e resultados, apresentam-se as seguintes considerações finais:

- a) A adição do ligante CCA+CCOH ao rejeito de mineração de ferro proporcionou uma mistura com desempenho mecânico satisfatório, observando-se que maiores teores de ligante, peso específico e tempo de cura estão associados a maiores valores de Resistência à Compressão Simples. A mistura com melhor comportamento mecânico atingiu uma RCS média de 2,16 MPa em 28 dias a 23°C, representando um acréscimo de 61% comparado a de 7 dias (1,34MPa);
- b) A incorporação do LAA conferiu ao RMF, um comportamento mecânico satisfatório em termos de resistência, indicando potenciais aplicações em obras da engenharia como subleito de pavimentos e assentamento de tubulações, etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Bolsa PIBIC e de Produtividade em Pesquisa - Nível II), CAPES (bolsa de doutorado) e à UFFS (Bolsa PIBIC e apoio para realização do trabalho).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 12025: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Consoli, N. C., Dalla Rosa, A., Saldanha, R. B. (2011). Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 7, p. 864–870.

De Jesus, C. A. G.; Joaquim, L. G. (2020). Sumário Brasileiro Mineral 2020: Ferro. *Agência Nacional de Mineração*, p. 1–3.

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>

Krivenko, P. (2017). 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.

Levandoski, W. M. K., Ferrazzo, S. T., Bruschi, G. J., Consoli, N. C., & Korf, E. P. (2023). Mechanical and microstructural properties of iron mining tailings stabilized with alkali-activated binder produced from agro-industrial wastes. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42999-x>

Levandoski, W. M. K., Ferrazzo, S. T., Piovesan, M. A., & Korf, E. P. (2023). Resistência e microestrutura de rejeito de mineração de ferro estabilizado com cimento álcali-ativado oriundo de resíduos agroindustriais. *X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 1*(ABMS), 356–361.

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>

Reis, J. B., Pelisser, G., Levandoski, W. M. K., Ferrazzo, S. T., Mota, J. D., Silveira, A. A., & Korf, E. P. (2022). Experimental investigation of binder based on rice husk ash and eggshell lime on soil stabilization under acidic attack. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11529-6>

Servi, S., Lotero, A., Silva, J. P. S., Bastos, C., & Consoli, N. C. (2022). Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. *Construction and Building Materials*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>