

COMPORTAMENTO DE REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO ESTABILIZADO COM LIGANTE ÁLCALI-ATIVADO ORIUNDO DE CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAL DE CASCA DE OVO

MARIA ALICE PIOVESAN^{1,2*}, WILLIAM MATEUS KUBIAKI LEVANDOSKI^{2,3},
SUÉLLEN TONATTO FERRAZZO^{2,4}, EDUARDO PAVAN KORF^{2,5}

1 Introdução

O Brasil é detentor de 19,8% das reservas mundiais de ferro e segundo maior produtor do minério com 453,7 milhões de toneladas em 2017 (DE JESUS, 2018). No entanto, as atividades de mineração geram inúmeros impactos ambientais e socioeconômicos. Por exemplo, o rompimento das barragens de rejeitos de mineração em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) atingiu corpos de água e residências e causou morte de pessoas (FREITAS; DA SILVA, 2019).

Frente a isso, buscam-se formas de valoração dos rejeitos de mineração como a estabilização química com o uso de ligantes (*e.g.*, cimento Portland). Entretanto, a cadeia produtiva deste cimento tradicional demanda de elevado consumo energético e de recursos naturais (*e.g.* calcário, areia), e libera 7-8% das emissões de gases de efeito estufa (MILLER; MYERS, 2020; OBENAU-EMLER; FALAH; ILLIKAINEN, 2020). Neste cenário, os ligantes álcali-ativados representam uma alternativa sustentável ao cimento Portland.

Ligantes álcali-ativados são produzidos a partir da ativação alcalina de fontes de aluminossilicatos (precursor) induzida por um ativador alcalino (metal alcalino) (PROVIS, 2018). Além de metacaulim, cinzas volantes e escória de alto forno, inúmeros resíduos industriais vêm sendo utilizados para desenvolvimento de cimentos alcalinos, tais como, cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA, precursor) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH, fonte de cálcio). A CBCA é um material pozolânico, podendo apresentar conteúdos de óxidos de sílica, alumínio e ferro superiores a 80% (BRUSCHI *et al.*, 2021). A CCOH é constituída por elevado teor de óxido de cálcio, podendo atingir valores acima de 90% (CONSOLI *et al.*, 2020).

¹ Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus* Erechim, **bolsista**, contato: mariaalicepiovesan@gmail.com

² Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental.

³ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, *campus* Erechim.

⁴ Doutora em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

⁵ Docente dos cursos de Engenharia Ambiental e Sanitária e Arquitetura e Urbanismo, UFFS, *campus* Erechim, **orientador**.

Na literatura, estudos que investigam a estabilização de rejeitos de mineração de ferro (RMF) com cimentos alcalinos são recentes e concentram-se na avaliação do comportamento mecânico, microestrutura (SERVI *et al.*, 2022) e análise de ciclo de vida (SALDANHA *et al.*, 2023). Nota-se que o uso de ligantes álcali-ativados na estabilização de rejeito de mineração representa um vasto campo de pesquisa, em que há inúmeras possibilidades de ligantes para serem aplicados e a lixiviação de contaminantes permanece inexplorada. Nesse sentido, a contribuição desta pesquisa é avaliar a resistência, rigidez, mineralogia e lixiviação de metais de RMF estabilizado com um ligante álcali-ativado oriundo de resíduos agroindustriais.

2 Objetivos

Avaliar resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, rigidez inicial, mineralogia e lixiviação de metais de misturas de rejeito de mineração de ferro com ligante álcali-ativado oriundo de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cal de casca de ovo hidratada.

3 Metodologia

Os materiais utilizados foram rejeito de minério de ferro (RMF), cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH). O ligante álcali-ativado (LAA) desenvolvido no grupo de pesquisa é composto por uma relação CBCA/CCOH de 80/20 com concentração molar de solução ativadora (NAOH) de 2M (TONINI DE ARAÚJO *et al.*, 2023). Para a estabilização do RMF foram avaliadas as razões RMF/LAA de 75/25 e 85/15 baseados em estudos da literatura (BRUSCHI *et al.*, 2021; RIOS *et al.*, 2017).

Com base em ensaio Proctor realizado para energia modificada, conforme D1557 (ASTM, 2012), foram estabelecidos peso específico ($13,3$ e $15,3 \text{ kN.m}^{-3} \gamma_d$) e teor de umidade fixo em 22,8% para a moldagem dos corpos de provas. Considerou-se um tempo de cura de 28 dias e temperatura de cura ambiente (23°C). Para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RCD) e rigidez inicial (G_0), o material foi compactado estaticamente em três camadas em um corpo de prova cilíndrico (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura). Os ensaios de RCS e RCD foram executados seguindo as normas NBR 12025 (ABNT, 2012) e NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente. A rigidez inicial, dada pelo módulo cisalhante inicial (G_0), foi determinada pelo equipamento Pundi Lab (+), no qual foram feitas medições dos tempos de propagação de onda de compressão e de cisalhamento

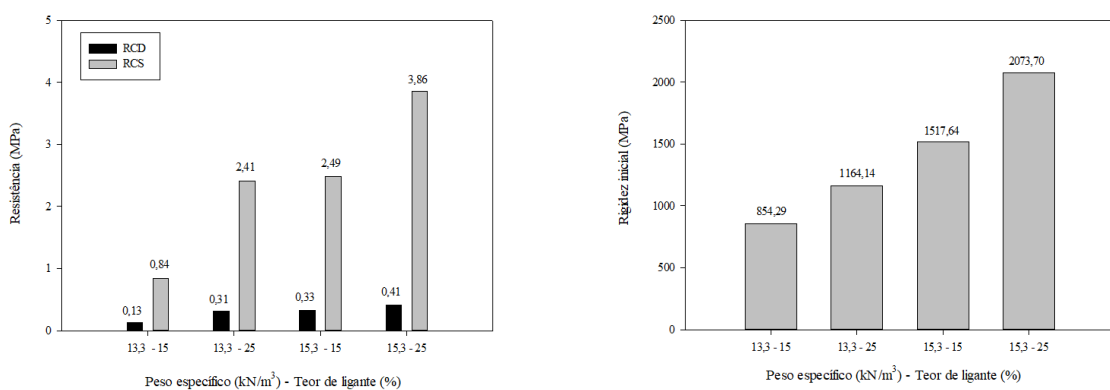
pelos corpos de prova.

A mistura com o melhor desempenho mecânico foi comparada com uma amostra curada por 180 dias (w de 22,8%; γ_d de 15,3 kN.m⁻³; 25% de LAA; 23°C) em relação à lixiviação de metais e microestrutura. O ensaio de lixiviação seguiu os procedimentos da NBR 10005 (ABNT, 2004) e a mineralogia foi avaliada por meio da técnica de difratometria de raios X (DRX).

4 Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta os resultados de RCS, RCD e G_0 para RMF combinado com diferentes teores de LAA e peso específico. Verifica-se que o aumento do teor de ligante e peso específico resultam em maiores valores de resistência e rigidez. Tais resultados se devem ao aumento das reações cimentantes com o incremento do teor de ligante aliado ao aumento de área de contato entre as partículas em função da menor porosidade (*i.e.*, maior peso específico). Comportamentos semelhantes são encontrados em estudos envolvendo a estabilização de rejeitos de mineração a partir de ligantes álcali-ativados (BRUSCHI *et al.*, 2021; SERVI *et al.*, 2022). Além disso, ambas misturas curadas a 28 dias e 180 dias não apresentaram diferenças mineralógicas, sendo os minerais constituintes: quartzo, hematita, caulinita, calcita, goethita e portlandita.

Figura 1: RCS, RCD e G_0 para misturas RMF-LAA com 28 dias de cura a 23°C e 22,8% de umidade



Fonte: os autores

A Tabela 1 apresenta a composição química do extrato lixiviado do melhor tratamento de RMF-LAA (γ_d de 15,3 kN.m⁻³; 25% de LAA) curado por 28 dias em comparação a mesma mistura submetida ao tempo de cura de 180 dias. Verifica-se que os extratos lixiviados de ambas misturas RMF-LAA (28 dias e 180 dias) atendem aos limites estabelecidos pelo Anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004), ou seja, não apresentam toxicidade. Além disso, ambos lixiviados

cumprem integralmente os limites de qualidade de águas subterrâneas da CONAMA 460 (CONAMA, 2013), sendo um ótimo resultado sob a perspectiva de desempenho ambiental.

Tabela 1: Composição química dos extratos lixiviados de misturas RMF-ligante alternativo (mg.L⁻¹)

Metal	RMF-LAA 28 dias	RMF-LAA 180 dias	Resíduos		Normativas	
			RMF	CBCA	NBR 10004 – Anexo F	CONAMA 460 ¹
Ag	0,000	0,000	0,005	0,000	5	0,05
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	-	3,5
As	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,01
Ba	0,155	0,000	0,000	0,077	70	0,7
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000	0,5	0,005
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	5	0,05
Cu	0,000	0,023	0,000	0,000	-	2
Fe	0,000	0,000	0,000	0,000	-	2,45
Hg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,1	0,001
Mn	0,025	0,000	1,609	4,925	-	0,4
Pb	0,000	0,000	0,000	0,060	1	0,01
Se	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,01
Zn	0,000	0,000	0,000	0,095	-	1,05

¹Valores orientadores para água subterrânea (CONAMA, 2013)

Fonte: os autores

5 Conclusão

Neste estudo verificou-se que maior teor de ligante e maior peso específico influenciam de forma positiva nos valores de RCS, RCD e G₀ das misturas RMF-LAA. Ambas misturas curadas por 28 e 180 dias não apresentam diferenças mineralógicas e nem toxicidade.

Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D1557-12e1**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/ m³)). Pennsylvania, 2012.

BRUSCHI, G. J. et al. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 06021007, 2021.

CONAMA. Resolução N° 460, de 30 de dezembro de 2013. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, p. 1–2, 2013.

CONSOLI, N. C. et al. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 06020018, 2020.

DE JESUS, C. A. G.; JOAQUIM, L. G. Sumário Brasileiro Mineral 2018: Ferro. **Agência Nacional de Mineração**, p. 1–3, 2018.

FREITAS, C. M.; DA SILVA, M. A. Work accidents which become disasters: mine tailing dam failures in Brazil. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 17, n. 1, p. 21–29, 2019.

MILLER, S. A.; MYERS, R. J. Environmental Impacts of Alternative Cement Binders. **Environmental Science & Technology**, v. 54, p. 677–686, 2020.

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, p. 118470, 2020.

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

RIOS, S. et al. Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains. **International Journal of Geomechanics**, v. 17, n. 3, p. 04016087, 2017.

SALDANHA, R. B. et al. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130008, 2023.

SERVI, S. et al. 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**, v. 349, p. 128770, 2022.

TONINI DE ARAÚJO, M. et al. Strength, Mineralogy, Microstructure, and Statistical Analysis of Alkali-Activated Sugarcane Bagasse Ash–Eggshell Lime Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 6, p. 04023107, 2023.

Palavras-chave: Resíduos industriais e de mineração; Ativação alcalina; Comportamento mecânico; Mineralogia; Toxicidade.

N° de Registro no sistema Prisma: PES 2022 – 0209

Financiamento: CNPq