

ESTABILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE ZINCO COM LIGANTE À BASE DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL: UMA ABORDAGEM AMBIENTAL E REGULATÓRIA

HENRIQUE MORETTE¹, MARIA ALICE PIOVESAN², WILLIAM MATEUS
KUBIAKI LEVANDOSKI³, EDUARDO PAVAN KORF⁴

1 Introdução

Rejeitos do beneficiamento de minérios de zinco podem apresentar partículas finas e metais potencialmente tóxicos. A interação com água, oxigênio e variações de pH pode alterar as fases minerais e favorecer a liberação de contaminantes. Em rejeitos de chumbo-zinco, a mobilidade dos metais depende da mineralogia, da porosidade e das condições ambientais, exigindo caracterização prévia à disposição ou ao reaproveitamento (CHEN et al., 2023).

A estabilização e a solidificação de rejeitos de mineração com ligantes podem melhorar o comportamento mecânico e reduzir a mobilidade de contaminantes. Nos ligantes álcali-ativados, por exemplo, o ativador dissolve espécies reativas dos precursores, favorecendo a formação de produtos cimentantes que unem as partículas e podem imobilizar contaminantes (FERREIRA et al., 2023). Pompermaier et al. (2024) selecionaram um ligante com 80% de cinza de casca de arroz (CCA), 20% de cal de casca de ovo hidratada (CCOH) e solução de hidróxido de sódio (NaOH) a $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, o qual será foco deste estudo. Assim, avalia-se sua aplicação na estabilização do rejeito de mineração de zinco (RMZ), com enfoque ambiental, geotécnico e regulatório.

2 Objetivos

Avaliar preliminarmente a aplicação de um ligante álcali-ativado de CCA, CCOH e NaOH na estabilização do RMZ, considerando a caracterização físico-química dos materiais,

1 Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Erechim, **bolsista PIBIC-CNPq**; Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental - REGEOAMB; contato: mrrt_henrique@gmail.com.

2 Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, Campus Erechim; Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental; contato: mariaalicepiovesan@gmail.com.

3 Doutorando em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, Campus Erechim; Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental; contato: williankubi@gmail.com.

4 Docente dos cursos de Engenharia Ambiental e Sanitária, Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, UFFS, Campus Erechim; **orientador**; contato: eduardo.korf@uffs.edu.br.

a classificação ambiental da CCA e do RMZ, os aspectos regulatórios aplicáveis e a resistência à compressão simples das misturas após sete dias de cura.

3 Metodologia

A pesquisa compreendeu uma primeira etapa exploratória, na qual foram levantados os principais aspectos regulatórios relacionados à prevenção, ao tratamento e à destinação ambientalmente adequada do RMZ. Além disso, foi realizado um experimento para avaliar a estabilização de RMZ com ligante composto por 80% de CCA e 20% de CCOH, ativado por NaOH a $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, conforme Pompermaier et al. (2024). A CCA e o RMZ foram secos a 105°C por 48 h e peneirados em $75 \mu\text{m}$ e $2,34 \text{ mm}$, respectivamente. A CCOH foi obtida por lavagem, secagem e moagem das cascas, calcinação a 1.050°C por 6 h, hidratação por 48 h, secagem a 50°C por 48 h e peneiramento em $75 \mu\text{m}$ (POMPERMAIER et al., 2024).

As massas específicas da CCA e do RMZ foram determinadas segundo as NBR 16605 (ABNT, 2017) e 17212 (ABNT, 2025f), respectivamente; as áreas superficiais, pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET); e as granulometrias, por difração a laser e pela NBR 7181 (ABNT, 2025c). A atividade pozolânica da CCA seguiu a NBR 15895 (ABNT, 2010), e os limites de consistência e a compactação do RMZ, as NBR 6459, 7180 e 7182 (ABNT, 2025a, 2025b, 2025d). A classificação ambiental foi feita conforme as NBRs 10004, 10005 e 10006 com quantificação por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (ABNT, 2004a, 2004b, 2004c). A composição química foi determinada por fluorescência de raios X. Os dados da CCOH foram obtidos de Ferrazzo et al. (2023).

Para a avaliação mecânica, foram moldadas misturas contendo 15% de ligante em relação à massa seca total, com peso específico seco de $7,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$. A relação líquido/sólido (L/S) foi avaliada nos níveis 0,70, 0,75 e 0,80. Foram produzidos dois corpos de prova para cada condição, obtendo-se resultados em duplicata. Após sete dias de cura, determinou-se a resistência à compressão simples (RCS) segundo a NBR 12025 (ABNT, 2012a).

4 Resultados e Discussão

A análise regulatória evidenciou que o gerenciamento do RMZ deve articular prevenção, tratamento e destinação ambientalmente adequada. Nesse contexto, a estabilização é importante porque busca melhorar a resistência do material e reduzir a mobilidade de contaminantes, condições necessárias para avaliar alternativas de disposição em pilhas de

rejeitos. Os instrumentos sintetizados na Tabela 1 não definem uma dosagem específica para o ligante, mas estabelecem responsabilidades e requisitos de segurança que orientam a comprovação conjunta do desempenho geotécnico e ambiental do RMZ estabilizado. As principais propriedades físico-químicas dos materiais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Síntese dos instrumentos regulatórios aplicáveis

Instrumento	Principal diretriz	Relação com o estudo
Lei nº 12.305/2010 (PNRS)	Prevê prevenção, tratamento, destinação ambientalmente adequada e plano de gerenciamento dos resíduos de mineração.	Fundamenta a caracterização, o tratamento e a destinação do RMZ.
Leis nº 12.334/2010 e nº 14.066/2020 (PNSB)	Definem responsabilidades, instrumentos de segurança e restrições para barragens de mineração.	Incentivam alternativas que reduzam a dependência de barragens.
NBR 13028-3 (ABNT, 2025e)	Define requisitos de projeto e segurança para pilhas de rejeitos desaguados.	Requer comprovação do desempenho geotécnico e da segurança ambiental.

Tabela 2. Propriedades físico-químicas dos materiais

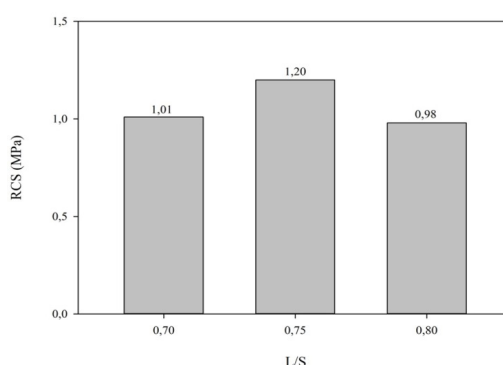
Propriedade	CCA	CCOH	RMZ
Massa específica das partículas ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,21	2,24	2,47
Área superficial específica ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	12,98	4,18	34,92
Índice de atividade pozolânica ($\text{mg Ca(OH)}_2\cdot\text{g}^{-1}$)	510	–	–
Limite de liquidez (%)	–	–	83,93
Limite de plasticidade (%)	–	–	67,82
Índice de plasticidade (%)	–	–	16,12
Peso específico seco máximo ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	–	–	8,32
Umidade ótima (%)	–	–	76,18
Fração granulométrica predominante	Silte (55%)	–	Silte (80,18%)

A CCA apresentou 90,9% de SiO_2 e a CCOH, 72,9% de CaO (FERRAZZO et al., 2023), caracterizando fontes silicosa e cálcica para o ligante. No RMZ, predominaram SO_3 (23,6%), SiO_2 (21,6%), Fe_2O_3 (15,5%) e CaO (13,3%), além de ZnO (3,78%) e PbO (1,37%). A CCA foi classificada como resíduo Classe II A, devido à presença de Al e Mn no extrato solubilizado. O RMZ foi classificado como Classe I — perigoso, devido à presença de Cd e Pb no lixiviado e As, Ba, Mn, Pb, Se e Zn no solubilizado, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Após sete dias, as relações L/S de 0,70, 0,75 e 0,80 apresentaram valores médios de RCS de 1,01, 1,20 e 0,98 MPa, respectivamente, obtidos a partir de dois corpos de prova por condição (Figura 1). A relação L/S de 0,75 apresentou a maior RCS, 18,8% e 22,4% superior às relações 0,70 e 0,80, respectivamente. Em 0,70, a menor quantidade de líquido pode ter limitado a homogeneização; em 0,80, o excesso pode ter elevado a porosidade (FERREIRA et

al., 2023). A RCS de 1,20 MPa foi próxima aos 1,34 MPa de Levandoski et al. (2025), embora esse estudo tenha usado 25% de ligante, peso específico seco de $15,3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ e outro rejeito. A NBR 12253 exige 2,1 MPa aos sete dias para solo-cimento em pavimentos (ABNT, 2012b); embora não aplicável diretamente ao RMZ, o critério confirma a L/S de 0,75 como a condição mais promissora e ainda passível de otimização.

Figura 1. Resistência à compressão simples das misturas após sete dias de cura



5 Conclusão

Os resultados desta etapa preliminar indicam que a estabilização do RMZ com CCA, CCOH e NaOH deve integrar os requisitos regulatórios com o desempenho geotécnico e ambiental. As composições silicosa da CCA e cálcica da CCOH confirmam sua função como precursores, enquanto a classificação do RMZ como Classe I — perigoso exige controle da mobilidade de contaminantes. A relação L/S de 0,75 apresentou o melhor desempenho, com RCS de 1,20 MPa aos sete dias, e deve ser priorizada em ensaios de cura prolongada, lixiviação e solubilização para verificar a viabilidade ambiental e geotécnica.

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459:2025: Solos — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.
- _____. ABNT NBR 7180:2025: Solos — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.
- _____. ABNT NBR 7181:2025: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025c.
- _____. ABNT NBR 7182:2025: Solos — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025d.
- _____. ABNT NBR 10004:2004: Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

- _____. ABNT NBR 10005:2004: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.
- _____. ABNT NBR 10006:2004: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.
- _____. ABNT NBR 12025:2012: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.
- _____. ABNT NBR 12253:2012: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.
- _____. ABNT NBR 13028-3:2025: Mineração — Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Parte 3: Disposição de rejeitos desaguados em forma de pilha. Rio de Janeiro: ABNT, 2025e.
- _____. ABNT NBR 15895:2010: Materiais pozolânicos — Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado — Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. ABNT NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. ABNT NBR 17212:2025: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro: ABNT, 2025f.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 3 ago. 2010a.
- BRASIL. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 21 set. 2010b.
- BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 1 out. 2020.
- CHEN, T. et al. A critical review on the migration and transformation processes of heavy metal contamination in lead-zinc tailings of China. **Environmental Pollution**, v. 338, 122667, 2023.
- FERRAZZO, S. T. et al. 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, 131313, 2023.
- FERREIRA, F. A. et al. Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, v. 364, 129931, 2023.
- KUBIAKI LEVANDOSKI, W. M. et al. Mechanical strength, mineralogical characteristics and leaching behavior of iron ore tailings stabilized with alkali-activated rice husk ash and eggshell lime binder. **Minerals**, v. 15, n. 6, 567, 2025.
- POMPERMAIER, C. L. et al. Stabilization of waste foundry sand with alkali-activated binder: mechanical behavior, microstructure and leaching. **Construction and Building Materials**, v. 444, 137772, 2024.

Palavras-chave: Álcali-ativação; ligante álcali-ativado; resistência à compressão; economia circular.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2025-0267

Financiamento: PIBIC-CNPq.

