

## DESENVOLVIMENTO DE LIGANTE ÁLCALI-AATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

CAROLINA MENEGOLLA<sup>1,2\*</sup>, MARIANA KROGEL<sup>3</sup>, EDUARDO PAVAN KORF<sup>2,4</sup>

### 1. Introdução

A produção de cimento Portland comum é um dos maiores desafios ambientais da atualidade, respondendo por aproximadamente 5% a 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Chen et al., 2022; Walkley e Provis, 2019). Esse impacto decorre principalmente do processo de calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis em altas temperaturas, o que reforça a urgência por alternativas sustentáveis (Shukla et al., 2022). Neste contexto, os cimentos alcalinos (CA) emergem como solução promissora por incorporarem resíduos industriais como matéria-prima, diminuindo o impacto ambiental gerado pela construção civil.

Diante disso, este estudo concentra-se na valorização de dois resíduos: o vidro de módulos fotovoltaicos (VMF) e a cal hidratada de casca de ostra (CHCO). O VMF compõe cerca de 90% da massa dos painéis solares descartados (Maia e Varella, 2022), cuja vida útil varia entre 25 e 30 anos. Projeções indicam que, até 2030 o volume descartado poderá atingir 9,6 milhões de toneladas no mundo (Spellmeier et al., 2022). A combinação com CHCO, produzida por calcinação acima de 800°C, apresenta vantagens técnicas e ambientais: enquanto o VMF oferece 70-80% de sílica amorfa, a CHCO contribui como uma fonte suplementar de cálcio, compensando o baixo teor de óxido de cálcio e alumínio do VMF, favorecendo a formação dos géis cimentantes (Liu et al., 2022; Ferreira et al., 2023).

Este estudo avalia as melhores condições de dosagem desses resíduos para o desempenho mecânico no desenvolvimento de um CA, identificando a presença dos géis cimentantes e o desempenho ambiental do cimento por meio de ensaios de lixiviação.

### 2. Objetivos

<sup>1</sup>Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, **Bolsista**, *campus Erechim-RS*, contato: cmenegolla@gmail.com

<sup>2</sup>Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental – REGEOAMB

<sup>3</sup>Doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia, docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus Erechim-RS*, **Orientador**

O objetivo do estudo é avaliar o desempenho mecânico e ambiental de um cimento alcalino produzido a partir de resíduos de VMF e CHCO.

### 3. Metodologia

A pesquisa utilizou como matérias-primas o pó de vidro fotovoltaico (VMF) e a cal hidratada de casca de ostra (CHCO). O VMF foi obtido a partir de módulos solares danificados, descomissionados por meio de rompedor mecânico e peneirados para obtenção de partículas com granulometria  $\leq 850 \mu\text{m}$ . A CHCO foi produzida em laboratório por calcinação das cascas de ostra a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , seguida de hidratação, moagem manual em almofariz de porcelana e peneiramento. Como ativador alcalino, foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) com 97% de pureza, dissolvido em água destilada.

O planejamento experimental investigou a influência da concentração de NaOH (1, 3 e 5 M), do tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e da razão VMF/CHCO (1,5; 2,33; 4; 9). As misturas foram moldadas em cilindros de PVC (37 mm diâmetro  $\times$  74 mm altura), submetidas à vibração manual para eliminação de vazios, e curadas a temperatura controlada ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Após cada período de cura, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, conforme a ASTM C39/C39M (ASTM, 2020) e os melhores resultados foram submetidos análises de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), para identificação de géis cimentantes formados.

Para avaliar o comportamento ambiental do CA produzido os ensaios de lixiviação foram realizados nos pontos com melhor desempenho mecânico e para cada tempo de cura, seguindo a NBR 10005 (ABNT, 2004). A quantificação de metais nos lixiviados foi feita por ICP-OES, utilizando padrões certificados. Os resultados foram comparados com os limites da NBR 10004 (ABNT, 2004), EPA (USEPA, 1992), CONAMA 460 (CONAMA, 2013), Lista Holandesa (Ministerie Van Volkshuisvesting, 2000) e EPA (USEPA, 2022), avaliando o potencial de liberação de metais oriundos dos resíduos.

### 4 Resultados e Discussão

#### 4.1 Resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados de RCS indicam que o cimento ativado (CA) à base de resíduos fotovoltaicos atingiu resistência mecânica de até 1,52 MPa aos 28 dias de cura. As misturas com razões VMF/CHCO de 2,33 e 4 demonstraram o melhor desempenho mecânico, destacando-se como potencial ligante para estabilização de materiais geotécnicos, como areias e rejeitos. A análise por FTIR revelou a predominância do gel C-S-H (silicato de cálcio

hidratado). A alta alcalinidade ( $\text{pH} > 12$ ) e a presença de cálcio inibiram a formação do gel N-A-S-H, que requer condições de pH mais baixo. Aos 28 dias, há o início da desaluminação do gel C-A-S-H e a formação de silicatos amorfos (García Lodeiro et al., 2011).

#### 4.2 Lixiviação

A Tabela 1 apresenta as concentrações de metais lixiviados do CA para 7, 14 e 28 dias de cura, comparadas aos resíduos originais (VMF e CHCO) e aos limites das normativas. Os extratos lixiviados das amostras de CA atenderam aos limites da NBR 10004 e EPA (toxicidade), mas excedeu valores do CONAMA 460, Lista Holandesa e EPA (potabilidade) para Ba, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn em um ou mais tempos de cura. Os valores de Cu e Ni superaram também as concentrações observadas nos resíduos. Observou-se encapsulação de Ag, Fe, Hg e Mn já aos 7 dias e de Se aos 28 dias de cura.

Tabela 1. Concentrações de metais lixiviados do CA para cada tempo de cura.

Metal	Pontos avaliados <sup>(1)</sup>			Resíduos		Normativas				
	7 dias	14 dias	28 dias	VMF	CHCO	NBR 10004 – Anexo F <sup>(3)</sup>	EPA <sup>(3)</sup>	CONAMA 460 <sup>(4)</sup>	Lista Holandesa <sup>(4)</sup>	EPA <sup>(5)</sup>
	Identificação do ponto avaliado <sup>(2)</sup>									
	2,33 5	4,00 1	2,33 3							
Ag	*	*	*	0,0001	*	5	5	0,05	-	-
Al	*	0,0011	0,0378	0,0162	0,0031	-	-	3,5	-	-
As	0,0007	0,0004	0,0005	0,0008	0,0009	1	5	0,01	0,01	0,01
Ba	<b>0,1872</b>	0,05	0,0328	0,0033	<b>0,2794</b>	70	100	0,7	<b>0,05</b>	2
Cd	<b>0,0016</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,001</b>	<b>0,0014</b>	0,5	1	0,005	<b>0,0004</b>	0,005
Co	0,0004	0,0018	0,001	0,0009	*	-	-	0,07	0,02	-
Cr	*	0,002	0,004	<b>0,0036</b>	<b>0,0143</b>	5	5	0,05	<b>0,001</b>	<b>0,1</b>
Cu	<b>0,0377</b>	0,0042	0,0043	0,0041	*	-	-	2	<b>0,015</b>	1,3
Fe	*	*	*	0,8835	*	-	-	2,45	-	-
Hg	*	*	*	<b>0,0677</b>	*	0,1	0,2	<b>0,001</b>	<b>0,00005</b>	<b>0,002</b>
Mn	*	*	*	0,0154	*	-	-	0,4	-	-
Mo	0,0013	0,0009	0,0025	0,0007	0,0018	-	-	0,07	0,005	-
Ni	<b>0,033</b>	<b>0,0434</b>	0,0008	0,0013	0,0003	-	-	<b>0,02</b>	<b>0,015</b>	-
Pb	<b>0,0105</b>	0,0046	0,0001	<b>0,3444</b>	*	1	5	<b>0,01</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>
Se	0,004	0,0024	*	0,0068	*	1	1	0,01	-	0,05
Zn	<b>0,0972</b>	<b>0,0942</b>	0,0034	<b>0,0997</b>	<b>0,3106</b>	-	-	1,05	<b>0,065</b>	-
pH	13,31	13,3	13,19	5,43	12,85					

\* Não detectado. Os valores em negrito representam concentrações que excederam os limites das normas.

<sup>1</sup> O ponto avaliado corresponde aos pontos de melhores resistências.

<sup>2</sup> A estrutura de identificação das amostras dos pontos avaliados foi 'concentração de VMF/CHCO\_NaOH'.

<sup>3</sup> Concentração máxima de metais para características de toxicidade.

<sup>4</sup> Valores orientadores para as águas subterrâneas.

<sup>5</sup> Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária.

De modo geral, o elevado pH das misturas ( $\text{pH} > 13$ ) reduziu a solubilidade de metais como Ag, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni e Pb, favorecendo seu encapsulamento (Zhang et al., 2016), efeito potencializado pela imobilização de íons pelos produtos de hidratação da álcali-ativação, que resultou no encapsulamento total de Cu, Ni e Pb até 14 dias de cura. Metais anfotéricos, como Ba, Cr e Zn, são capazes de reagir em meio ácido ou básico (Ferrazzo et al., 2023), o que explica sua maior instabilidade.

O Cr foi parcialmente encapsulado e manteve-se abaixo dos limites normativos, enquanto Ba e Zn excederam limites aos 7 dias devido à instabilidade inicial da matriz, mas

apresentaram redução posterior associada à formação de géis cimentantes (Komonweeraket et al., 2015). O Ba, especificamente, apresentou encapsulamento complexo por co-precipitação com outros metais, como o Cr, e lixiviação anfotérica (Pereira dos Santos et al., 2025). Esses resultados indicam que a lixiviação está diretamente relacionada à estabilidade química e ao desempenho mecânico da matriz.

## 5 Conclusão

Conclui-se que o cimento alcalino, produzido a partir de resíduos de vidro fotovoltaico (VMF) e cal hidratada de casca de ostra (CHCO), pode ser utilizado em aplicações geotécnicas, como por exemplo estruturas de contenção leve, aterros sanitários e camadas de base de sub-pavimentos, alcançando resistência à compressão de 1,52 MPa após 28 dias de cura. A CHCO, além de auxiliar na formação do gel cimentante C-S-H, tem o potencial de encapsular metais ao longo do tempo de cura. Assim, este estudo demonstra o potencial de valorização dos resíduos de VMP e CHCO para produção de cimentos alcalinos alternativos, contribuindo também para a redução dos impactos ambientais associados ao cimento Portland.

## Referências Bibliográficas

- ABNT NBR 10004; Resíduos Sólidos—Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Rio Janeiro, Brasil, 2004.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM C39/C39M-20: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: [https://www.astm.org/c0039\\_c0039m-21.html](https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html). Acesso em: 11 ago. 2025.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução nº 460, de 30 de dezembro de 2013. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 31 dez. 2013. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=676](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=676). Acesso em: 5 fev. 2025.
- CHEN, P.; SHI, W.; LIU, Y.; CAO, X. Déficit de taxa de deslizamento particionado por sistema de dobramento de falhas na zona de falha ativa de Haiyuan, Planalto Tibetano Nordeste. *Journal of Structural Geology*, v. 155, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104516>.
- FERRAZZO, S. T.; ARAÚJO, M. T. de; BRUSCHI, G. J.; KORF, E. P.; LEVANDOSKI, W. M. K.; SANTOS, C. P. dos; CONSOLI, N. C. Metal encapsulation of waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder: Batch and column leaching tests. *Journal of Environmental Management*, v. 348, 15 dez. 2023, 119287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119287>.
- FERREIRA, F. A.; DESIR, J. M.; LIMA, G. E. S.; PEDROTI, L. G.; CARVALHO, J. M. F.; LOTERO, A.; CONSOLI, N. C. Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais do cimento álcali-ativado de casca de ovo, cal/cinza de casca de arroz. *Construction and Building Materials*, v. 364, p. 129931, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129931>.
- GARCÍA-LODEIRO, I. et al. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 9, p. 923-931, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>. Acesso em: julho de 2025.
- KOMONWEERAKET, K.; CETIN, B.; BENSON, C. H.; AYDILEK, A. H.; EDIL, T. B. Leaching characteristics of toxic constituents from coal fly ash mixed soils under the influence of pH. *Waste Management*, v. 38, p. 174-184, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.018>.

LIU, S. et al. Sustainable use of waste oyster shells in cementitious materials. *Materials*, v. 15, n. 14, p. 4886, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15144886>. Acesso em: julho de 2025.

MAIA, A. G. F.; VARELLA, F. K. de O. M. Potencial de conservação de energia de 66 a 76% com descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.21708/issn27635325>. Acesso em: julho de 2025.

PEREIRA DOS SANTOS, C.; BRUSCHI, G. J.; TONATTO FERRAZZO, S.; KUBIAKI LEVANDOSKI, W. M.; PAVAN KORF, E.; CONSOLI, N. C. Leaching Behavior of Alkali-Activated Gold Tailings Over Wetting–Drying Cycles. *Indian Geotechnical Journal*, v. 55, n. 1, p. 176–190, 2025.

SPELLMEIER, J. P.; ROSA, C. B.; RIGO, P. D.; SILUK, J. C. M.; SANTOS, P. A. dos. Fatores críticos de sucesso para a competitividade do final da vida útil de módulos fotovoltaicos (2022).

SHUKLA, P. R. et al. Mudanças Climáticas 2022: Mitigação das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Resumo para Formuladores de Políticas. [S. l.]: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: julho de 2025.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). *Método 1311: Procedimento de Lixiviação Característica de Toxicidade*. Agência de Proteção Ambiental dos EUA: Boston, MA, EUA, 1992.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). *Água subterrânea e água potável de 2022: Regulamentos nacionais de água potável primária*. Disponível em: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>. Acesso em: 4 fev. 2025.

VROM, *Lista Holandesa. Valores Alvo e de Intervenção Neerlandeses, Ministério dos Contratos Públicos e do Ordenamento do Território e do Ambiente*. Diário do Governo dos Países Baixos, 2000.

WALKLEY, B.; PROVIS, J. L. Espectroscopia de ressonância magnética nuclear em estado sólido de cimentos da *Materials Today Advances*. *Materials Today Advances*, v. 1, 100007, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.100007>.

ZHANG, Y.; CETIN, B.; LIKOS, W. J.; EDIL, T. B. Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash. *Fuel*, v. 184, p. 815-825, 15 nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.089>.

**Palavras-chave:** Cimentos alcalinos; pó de vidro de módulos fotovoltaicos; resíduos agroindustriais.

**Nº de Registro no sistema Prisma:** PES 2024 - 0515

**Financiamento**

