

LIGANTE AUTOATIVADO A PARTIR DO VIDRO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E CAL DE CASCA DE OSTRAS HIDRATADA *

**CAROLINA MENEGOLLA^{1,2}, WILLIAM MATEUS KUBIAKI LEVANDOSKI^{2,3},
MARIANA KROGEL⁴, JONAS DUARTE MOTA⁵, GIOVANI JORDI BRUSCHI^{6,2},
ARTHUR FIALHO^{7,2}, EDUARDO PAVAN KORF^{8,2}**

1 Introdução

O crescimento da geração de energia solar fotovoltaica tem impulsionado a substituição de módulos ao final de sua vida útil, aumentando a quantidade de resíduos destinados ao descarte. Entre os componentes desses módulos, o vidro representa aproximadamente 70–75% da massa total e possui elevado teor de sílica amorfa, tornando-se um material com potencial para aplicação em sistemas cimentícios alternativos (IRENA; IEA-PVPS, 2016; Alzeer et al., 2022).

Paralelamente, a produção de cimento Portland permanece como uma das principais fontes industriais de emissão de dióxido de carbono (CO₂), motivando o desenvolvimento de ligantes produzidos a partir de resíduos industriais e agroindustriais. Nesse contexto, materiais ricos em sílica amorfa têm sido amplamente estudados como precursores cimentícios devido à sua capacidade de formar produtos hidratados quando associados a fontes adequadas de cálcio (Provis; Bernal, 2014).

Entre os resíduos com potencial de valorização destaca-se a casca de ostra, constituída predominantemente por carbonato de cálcio. Após calcinação e hidratação, esse material pode fornecer cálcio suficiente para promover reações de autoativação, eliminando a necessidade de

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

2 Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental – REGEOAMB

3 Doutorando em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, *campus* Erechim, contato: williankubi@gmail.com

4 Doutoranda em Engenharia Civil, UFRGS, contato: marianakrogel@hotmail.com

5 Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus* Erechim, contato: jonasduartemota@gmail.com

6 Doutor em Engenharia Civil, UFFS, *campus* Erechim, contato: gio.bruschi@gmail.com

7 Acadêmico do curso de Arquitetura e Urbanismo, UFFS, *campus* Erechim, contato: arthurfialho@gmail.com

8 Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia, docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus* Erechim, contato: eduardo.korf@uffs.edu.br

*Identificação do subprojeto: “AVANÇOS TECNOLÓGICOS NO DESENVOLVIMENTO DE LIGANTE AUTOATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS”

ativadores alcalinos comerciais, cujo elevado custo e impacto ambiental ainda limitam a aplicação em larga escala de ligantes alternativos.

Embora existam estudos envolvendo resíduos vítreos e resíduos de origem marinha em materiais cimentícios, ainda são escassas as pesquisas voltadas ao desenvolvimento de ligantes autoativados produzidos exclusivamente a partir de vidro de módulos fotovoltaicos e cal de casca de ostra hidratada. Dessa forma, a utilização conjunta desses resíduos representa uma alternativa promissora para a produção de materiais cimentícios mais sustentáveis, promovendo simultaneamente a valorização de resíduos e a redução do consumo de matérias-primas convencionais.

2 Objetivos

Avaliar a viabilidade técnica de um ligante autoativado produzido a partir de pó de vidro de módulos fotovoltaicos (PGP) e cal de casca de ostra hidratada (HOSL), analisando a influência da relação PGP/HOSL, da relação sólido/líquido e do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples. Adicionalmente, investigar os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento da resistência por meio de análises microestruturais e mineralógicas.

3 Metodologia

O pó de vidro de módulos fotovoltaicos (PGP) e a cal de casca de ostra hidratada (HOSL) foram produzidos conforme a metodologia descrita por Krogel et al. (2025). Resumidamente, o vidro proveniente de módulos fotovoltaicos descartados foi submetido à moagem e peneiramento, enquanto as cascas de ostra passaram por calcinação seguida de hidratação para obtenção da cal.

Foi empregado um planejamento experimental fatorial completo contemplando quatro relações mássicas PGP/HOSL (1,5; 2,33; 4,0 e 9,0), quatro relações sólido/líquido (0,475; 0,500; 0,525 e 0,550) e quatro períodos de cura (7, 14, 28 e 63 dias), totalizando 64 combinações experimentais, executadas em duplicata. Os corpos de prova cilíndricos (37 mm × 74 mm) foram moldados e curados em câmara úmida sob temperatura controlada (23 ± 2 °C). A resistência à compressão simples foi determinada conforme a ABNT NBR 12025.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey, considerando nível de confiança de 95%, com o objetivo de identificar a influência dos fatores

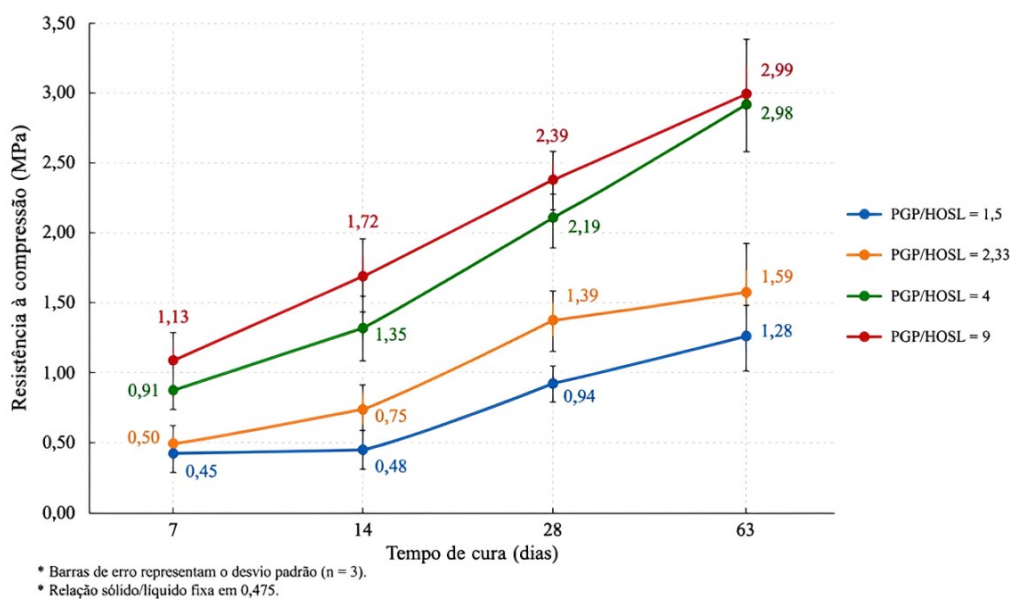
experimentais sobre o desempenho mecânico.

Para compreender os mecanismos de endurecimento do ligante, amostras representativas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia (MEV-EDS).

4 Resultados e Discussão

Por meio dos dados médios de resistência à compressão simples (Figura 1) para relação S/L de 0,475, verificou-se que a resistência aumentou com o tempo de cura para todas as misturas avaliadas. Observa-se ainda que as maiores resistências foram obtidas para as maiores relações PGP/HOSL, indicando que o aumento da proporção de vidro fotovoltaico exerceu influência mais significativa no desempenho mecânico do sistema. Entretanto, o desenvolvimento da matriz cimentante depende da atuação conjunta da sílica amorfa presente no vidro e da disponibilidade de cálcio fornecida pela HOSL.

Figura 1. Resistência média à compressão em função do tempo de cura para as diferentes relações PGP/HOSL.



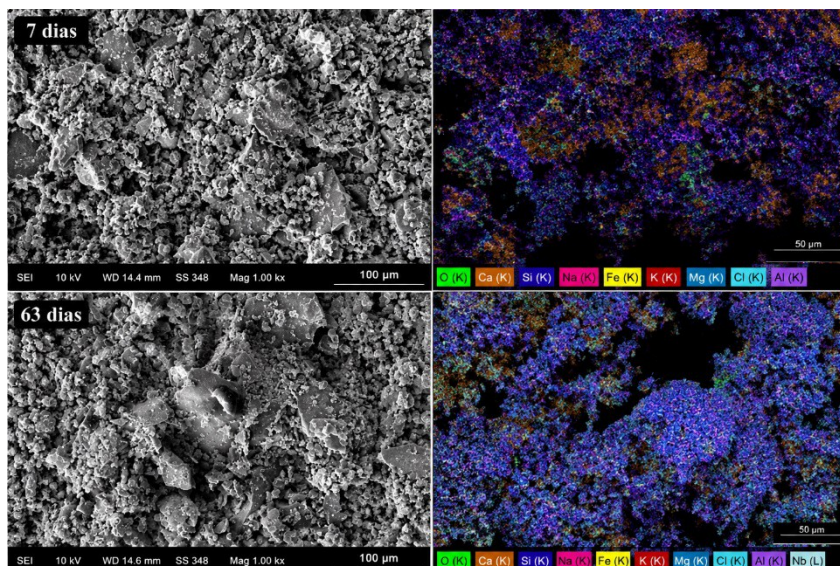
A análise estatística (ANOVA) demonstrou que o tempo de cura foi o fator de maior influência sobre a resistência mecânica, seguido da relação PGP/HOSL e da relação

sólido/líquido. A maior resistência média foi obtida para a mistura com PGP/HOSL = 9, relação sólido/líquido de 0,475 e 63 dias de cura, atingindo 2,99 MPa. Embora esse resultado não tenha diferido estatisticamente da mistura com PGP/HOSL = 4 (2,98 MPa), a relação 9 apresenta maior potencial para valorização do resíduo vítreo, tornando-se a condição mais promissora do ponto de vista ambiental.

Ensaio realizados apenas com pó de vidro e água resultaram em baixas resistências e perda de coesão dos corpos de prova, demonstrando que a presença da HOSL é indispensável para o desenvolvimento das reações de endurecimento.

As análises de MEV-EDS (Figura 2) evidenciaram uma matriz mais compacta aos 63 dias de cura em comparação às amostras iniciais, indicando a formação de produtos cimentantes compatíveis com o ganho progressivo de resistência observado nos ensaios mecânicos. Os resultados obtidos por DRX e FTIR corroboraram esse comportamento, confirmando a evolução das reações de autoativação do sistema e indicando a formação de produtos cimentantes tais como gel C-S-H e portlandita.

Figura 2. Micrografias representativas das amostras aos 7 e 63 dias de cura.



5 Conclusão

Os resultados demonstraram a viabilidade técnica do ligante autoativado produzido com pó de vidro de módulos fotovoltaicos e cal de casca de ostra hidratada. A condição ótima foi obtida para a relação PGP/HOSL igual a 9, relação sólido/líquido de 0,475 e 63 dias de cura,

atingindo resistência média de 2,99 MPa. As análises microestruturais corroboraram os resultados mecânicos, evidenciando a evolução da matriz cimentante ao longo da cura. Assim, o sistema apresenta potencial para valorização simultânea de resíduos e para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ALZEER, M.; MACHT, F.; LUDWIG, H. Recycled photovoltaic glass as supplementary cementitious material: a review. *Journal of Building Engineering*, v. 57, 2022.

DENG, R. et al. End-of-life management of photovoltaic modules: a review of recycling technologies and resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 190, 2024.

End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Abu Dhabi: IRENA, 2016.
INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA-PVPS).

Krogel, M., Levandoski, W. M. K., Bruschi, G. J., Ferrazzo, S. T., Consoli, N. C., Korf, E. P. (2026). Novel alkali-activated binder from photovoltaic module glass and oyster shells: insights into mechanical, chemical, and molecular properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-24789>

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, p. 299–327, 2014.

Palavras-chave: ligante autoativado; vidro fotovoltaico; casca de ostra; resistência à compressão; valorização de resíduos.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2025-0234

Financiamento

