

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE LIGANTE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO E CINZA DE CASCA DE ARROZ*

HENRIQUE MORETTE ^{1,2}, MARIA ALICE PIOVESAN ^{2,3}, WILLIAM MATEUS
KUBIAKI LEVANDOSKI ^{2,4}, EDUARDO PAVAN KORF ^{2,5}

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o ligante mais amplamente utilizado no mundo, sendo altamente durável em condições normais de serviço. No entanto, apresenta baixa resistência química a contaminantes ácidos, e sua durabilidade pode ser comprometida em função do ambiente de exposição, bem como dos materiais constituintes e agregados utilizados. Dentre os principais mecanismos de deterioração de materiais cimentícios, destaca-se o ataque por sulfatos, que provoca fissuração e redução significativa da resistência mecânica (Pereira *et al.*, 2023). Além disso, a cadeia produtiva do cimento Portland é associada à intensa extração de recursos naturais, elevado consumo energético e considerável emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa (Chen *et al.*, 2025).

Nesse contexto, cimentos à base de magnésio têm sido estudados como alternativas mais sustentáveis, mostrando-se promissores para aplicações em tecnologias ambientais. A reação entre o óxido de magnésio (MgO) e sílica amorfa resulta na formação de fases de silicato hidratado de magnésio (M–S–H), um ligante análogo ao silicato de cálcio hidratado (C–S–H), principal produto de hidratação do cimento Portland (Sreenivasan *et al.*, 2024). O gel M–S–H é uma substância amorfa, de baixo pH, grande área superficial específica e menor porosidade em relação ao C–S–H — características que favorecem a adsorção de metais pesados e o encapsulamento de sulfatos (Zhang *et al.*, 2020).

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus* Erechim, **Bolsista**, contato: mrtt_henrique@gmail.com

² Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental.

³ Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, *campus* Erechim.

⁴ Doutorando em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, *campus* Erechim.

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

* Subprojeto: Estudo de condições para estabilização de rejeito de mineração com ligante álcali-ativado oriundo de resíduos agroindustriais.

A cinza de casca de arroz (CCA) é um resíduo gerado pela combustão da casca de arroz utilizada como biomassa. Rica em sílica amorfa, apresenta grande potencial como precursor de baixo custo na formulação de materiais cimentícios à base de sílica (Pode, 2016). Estudos disponíveis na literatura destacam as propriedades favoráveis dos ligantes à base de magnésio e sua aplicabilidade na estabilização/solidificação de diferentes tipos de resíduos perigosos (Wang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Contudo, o uso da CCA como fonte de sílica nesse tipo de cimento ainda constitui uma lacuna pouco explorada.

Diante desse contexto, este trabalho busca desenvolver e avaliar um ligante formulado a partir de óxido de magnésio e cinza de casca de arroz, visando sua aplicação futura no tratamento de rejeitos de mineração e outros resíduos perigosos.

2 OBJETIVOS

Avaliar a influência da relação MgO/CCA e do teor do aditivo hexametáfosfato de sódio (SHMP) no desenvolvimento de um ligante à base de óxido de magnésio e cinza de casca de arroz, bem como caracterizar sua composição química, mineralogia e microestrutura.

3 METODOLOGIA

Os materiais utilizados no estudo foram óxido de magnésio (MgO), cinza de casca de arroz (CCA) e hexametáfosfato de sódio (SHMP). Para avaliar o desempenho do ligante, foi conduzido um experimento fatorial multinível, considerando como variáveis independentes a relação MgO/CCA (0,43; 0,66; 1,00; 1,50) e o teor de SHMP (1%, 2%, 3% e 4%). A influência dessas combinações sobre a resistência à compressão simples (RCS) foi analisada por meio de análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). A melhor combinação de fatores foi identificada pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, e um modelo generalizado foi empregado para a construção da superfície de resposta e análise dos efeitos das variáveis. A relação água/sólido (A/S), a temperatura e o tempo de cura foram mantidos constantes em 0,8, 23 °C e 7 dias, respectivamente.

A dosagem dos materiais para a moldagem dos corpos de prova foi calculada com base na massa teórica de 60 g e nas proporções preestabelecidas. Após a pesagem, os componentes foram homogeneizados pelo método *one part* e moldados em cilindros de PVC com 37

mm de diâmetro e 74 mm de altura. Os corpos de prova permaneceram nos moldes durante o período de cura, sob temperatura controlada de 23 ± 2 °C por 7 dias. Após esse período, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, conforme os procedimentos descritos na norma ASTM C39/C39M (ASTM, 2021).

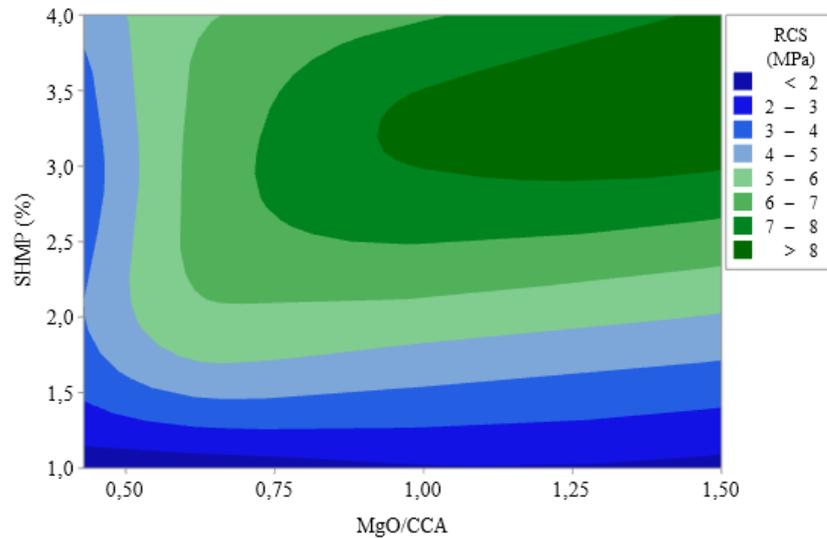
Para interromper as reações químicas após a ruptura, as amostras destinadas às demais análises foram imersas em acetona por 48 horas e, posteriormente, secas em estufa a 40 °C por 24 horas (Caicedo, 2020). As formulações com relação MgO/CCA de 1,5 e diferentes teores de SHMP (1%, 2%, 3% e 4%) foram analisadas quanto à identificação de grupos funcionais, por meio de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); à composição mineralógica, por Difração de Raios X (DRX); e à microestrutura, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o gráfico da superfície de contorno para a RCS. As menores resistências foram observadas nas amostras com apenas 1% de SHMP, independentemente da relação MgO/CCA utilizada, não havendo diferença estatística significativa entre elas, conforme o teste de Tukey. Esse resultado indica que a baixa concentração de SHMP foi insuficiente para inibir a formação de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e garantir a liberação adequada de íons Mg^{2+} no sistema, comprometendo a formação do gel M–S–H (Jia *et al.*, 2016).

As combinações que resultaram em resistências intermediárias envolveram teores de SHMP entre 2% e 4% e relações MgO/CCA variando de 0,66 a 1,0, sugerindo que o aumento tanto do teor de SHMP quanto da proporção de MgO em relação à CCA contribuiu para a elevação da resistência mecânica.

A maior RCS foi obtida na formulação com 4% de SHMP e relação MgO/CCA de 1,5. No entanto, segundo as comparações realizadas pelo teste de Tukey, essa formulação não apresentou diferença estatística significativa em relação às misturas com 3% de SHMP e relações MgO/CCA de 1,5 e 1,0. Esse comportamento sugere que o sistema atinge uma condição de equilíbrio favorável à formação do gel M–S–H com a razão MgO/CCA igual a 1,0. Além disso, a Figura 1 indica que o teor de SHMP exerce maior influência sobre a resistência à compressão do que a variação na relação MgO/CCA.

Figura 1. Superfície de contorno para a RCS

Fonte: Os autores

Os espectros de FTIR das amostras com relação MgO/CCA de 1,5 sugerem a formação progressiva do gel M–S–H com o aumento do teor de SHMP, evidenciada pela redução das bandas atribuídas à brucita e à sílica amorfa, e pela intensificação das bandas correspondentes aos grupos –OH e H–O–H (Abdel-Gawwad *et al.*, 2018). As imagens de MEV/EDS, revelaram a transição para uma matriz mais densa e homogênea com o aumento do SHMP, corroborando a hipótese de formação gradual do gel. Por outro lado, os difratogramas obtidos por DRX apresentaram padrões semelhantes entre si, com predominância dos picos de brucita e cristobalita, sem evidência clara da formação de M–S–H.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, observou-se que tanto a razão MgO/CCA quanto o teor de SHMP influenciam positivamente o desenvolvimento da resistência do ligante, sendo o teor de SHMP o fator mais determinante. As análises de FTIR e MEV/EDS indicaram a formação progressiva do gel M–S–H, corroborando a efetividade da combinação dos materiais na promoção de uma matriz cimentante mais consolidada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWWAD, H. A. *et al.* Combined impact of silicate–amorphicity and MgO–reactivity on the performance of Mg–silicate cement. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 78–85, 2018.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **C39/C39M - 21**: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA, 2021.

CAICEDO, M. A. L. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. 2020. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

CHEN, H. *et al.* 200 years of Portland cement: Technological advancements and sustainability challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 486, p. 1–19, 2025.

JIA, Y. *et al.* Role of sodium hexametaphosphate in MgO/SiO₂ cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 63–71, 2016.

PEREIRA, E. *et al.* Combined effect of alkali-aggregate reaction (AAR) and internal sulfate attack (ISA): Microstructural and porous structure modifications of portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 1–15, 2023.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468–1485, 2016.

SREENIVASAN, H. *et al.* A critical review of magnesium silicate hydrate (M–S–H) phases for binder applications. **Cement and Concrete Research**, v. 178, p. 1–27, 2024.

WANG, L. *et al.* Novel synergy of Si–rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 695–706, 2019.

ZHANG, T. *et al.* Immobilization of radionuclide ¹³³Cs by magnesium silicate hydrate cement. **Materials**, v. 13, n. 1, p. 1–17, 2020.

Palavras-chave: Silicato Hidratado de Magnésio (M–S–H); Cimento Alternativo; Resistência à Compressão Simples; Caracterização Microestural.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES 2024 – 0512

Financiamento

