



Avaliação preliminar da ecoeficiência de concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho com incorporação de concha marinha

Débora Raquel Caldas Frank | debora.rf@aluno.ifsc.edu.br ¹
Isabela Paulick Silveira | isabela.ps2009@aluno.ifsc.edu.br ²
Jordana Tomazi | jordanatomazie@gmail.com ³
Claudi Arianne Gomes da Fonseca | claudi.fonseca@ifsc.edu.br ⁴
Rafael Andrade de Souza | ras@ifsc.edu.br ⁵
Allan Guimarães Borçato | allan.borcato@ifsc.edu.br ⁶

Edital nº 01/2025/PROPI - PIBIC-EM
Trabalho de Pesquisa

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

Este estudo realizou uma avaliação preliminar da ecoeficiência de concretos geopoliméricos de ultra-alto desempenho (UHPGC) com incorporação de concha marinha (CM) como agregado. Foram produzidas três formulações: uma mistura de referência, sem CM (G1.00), e duas misturas com incorporação crescente desse material como agregado (G1.25 e G1.50). A resistência à compressão foi avaliada aos 7 dias, enquanto a ecoeficiência foi analisada com base na energia incorporada e nas emissões de CO₂ normalizadas pela resistência mecânica. Todas as misturas apresentaram resistência superior a 100 MPa, evidenciando o elevado desempenho mecânico dos UHPGC desenvolvidos. O traço G1.50 apresentou o melhor resultado mecânico, com resistência média de 107,27 MPa, superior à do traço de referência G1.00, que atingiu 104,67 MPa. Em termos ambientais, verificou-se redução progressiva dos indicadores normalizados com o aumento do teor de CM. O traço G1.50 apresentou os menores valores de energia incorporada e emissões de CO₂, iguais a 26,97 MJ/m³/MPa e 3,49 kg CO₂/m³/MPa, respectivamente, correspondendo a reduções de 18,1% e 18,3% em relação ao traço de referência. Os resultados indicam que a utilização de CM como agregado alternativo é uma estratégia promissora para o desenvolvimento de UHPGC mais ecoeficientes, sem prejuízo do desempenho mecânico inicial.

Palavras-chave: geopolímero; UHPGC; concha marinha; ecoeficiência; emissões de CO₂.

¹ Estudante do curso de Técnico em Edificações do Instituto Federal de Santa Catarina.

² Estudante do curso de Técnico em Edificações do Instituto Federal de Santa Catarina.

³ Egressa do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.

⁴ Servidora do Departamento Acadêmico de Construção Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.

⁵ Servidor do Departamento Acadêmico de Construção Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.

⁶ Servidor do Departamento Acadêmico de Construção Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.

Introdução

A busca por materiais cimentícios com menor impacto ambiental tem se intensificado diante da necessidade de reduzir as emissões da construção civil. Nesse contexto, o cimento Portland ocupa posição central, em razão do elevado consumo energético e das expressivas emissões de CO₂ associadas à sua produção (Zhang *et al.*, 2024). Nos concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), esse problema se agrava pelo uso de altos teores de ligantes. Como alternativa, o concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho (UHPGC) utiliza materiais com menor impacto ambiental como fonte de aluminossilicatos ativados alcalinamente (Liu *et al.*, 2026). Dessa forma, o UHPGC apresenta potencial relevante em relação ao UHPC convencional, pois pode manter elevado desempenho mecânico ao mesmo tempo em que reduz os impactos ambientais associados ao uso intensivo de cimento Portland.

Fundamentação teórica

Os geopolímeros vêm sendo estudados como ligantes alternativos ao cimento Portland por se basearem na ativação alcalina de materiais ricos em aluminossilicatos, formando matrizes com menor impacto ambiental (Marini *et al.*, 2024). No caso do UHPGC, a elevada fração de finos e a ausência de agregados graúdos favorecem a densificação da matriz e a obtenção de altas resistências mecânicas (Liu *et al.*, 2026). Entre os precursores, o metacaulim se destaca pela elevada reatividade e pela capacidade de fornecer silício e alumínio para a formação da matriz, embora sua produção também envolva impacto ambiental relevante (Metwally *et al.*, 2025).

Por outro lado, a concha marinha tem sido investigada como material alternativo em matrizes cimentícias e geopoliméricas por apresentar elevada concentração de carbonato de cálcio (Her *et al.*, 2024). Sua incorporação pode contribuir para o preenchimento de vazios, o refinamento da estrutura porosa e a densificação da matriz, a depender da composição, do teor utilizado e do processamento adotado (Gu *et al.*, 2024). Além disso, a análise sob a ótica da ecoeficiência, com base em energia incorporada e emissões de CO₂ normalizadas pela resistência à compressão, tem ganhado relevância, embora ainda sejam limitados os estudos com UHPGC e resíduos biogênicos marinhos (Metwally *et al.*, 2025).

Procedimentos metodológicos

O metacaulim (MK) foi utilizado como precursor. O ativador alcalino foi formulado a partir de silicato de sódio, hidróxido de sódio e água, nas proporções em massa de 80,85%, 6,40% e 12,75%, respectivamente. Os agregados utilizados foram areia natural (0,075 mm a 0,300 mm) e concha marinha (CM) (0,300 mm a 1,20 mm). A CM foi obtida de um calcário comercial produzido a partir de conchas marinhas. Três misturas de UHPGC foram produzidas (Tabela 1). A mistura G1.00 foi adotada como referência, sem incorporação de CM. Nos traços G1.25 e G1.50, esse material foi introduzido em teores de 25% e 50% em relação à massa de areia natural. Assim, buscou-se avaliar, de forma preliminar, a influência da incorporação de CM como agregado sobre a formulação do sistema geopolimérico.

Tabela 1 – Misturas de UHPGC avaliadas.

Dosagem (kg/m³)				
ID	MK	Ativador	Areia	CM
G1.00	516,13	548,95	1065,08	-
G1.25	470,17	500,08	970,25	242,56
G1.50	431,73	459,19	890,93	445,46

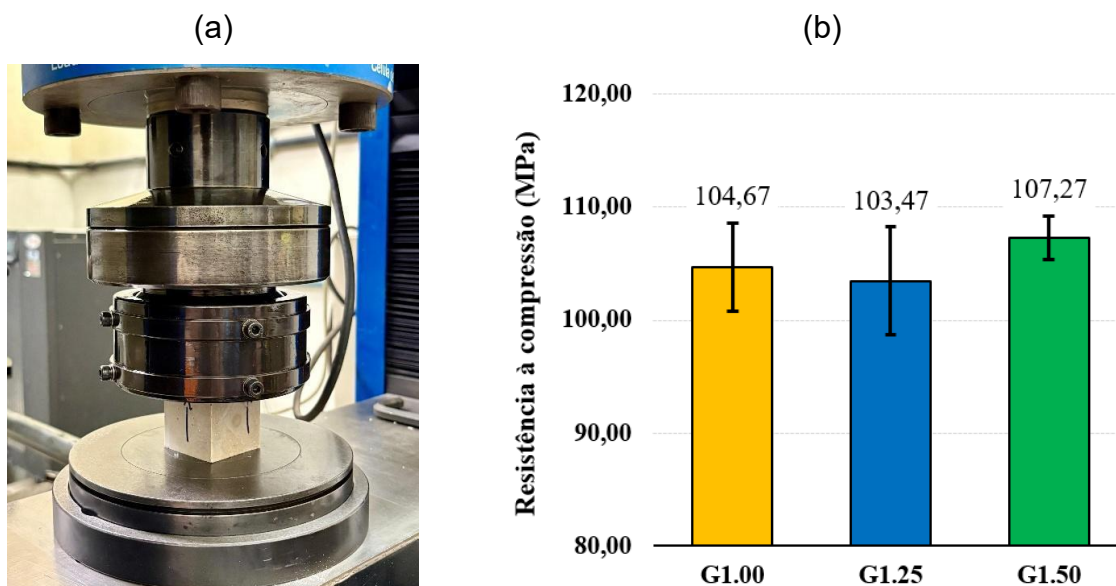
Fonte: elaborada pelo autor.

O procedimento de mistura foi mantido constante para todas as formulações. Inicialmente, o MK foi misturado com o ativador por 2 minutos. Posteriormente, o material resultante foi misturado com os agregados por mais 2 minutos. Após a mistura, o material foi moldado em corpos de prova cúbicos de 40 mm, sendo o adensamento realizado com 30 golpes distribuídos em 3 camadas. Ao final da moldagem, os moldes foram vedados para reduzir a perda de umidade nas primeiras idades. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, envelopados em filme de PVC e submetidos à cura ambiente. A resistência à compressão foi avaliada aos 7 dias de idade (ASTM C109, 2021) em 3 corpos de prova para cada mistura. Os dados da análise de sustentabilidade, incluindo energia incorporada e emissões de CO₂, foram retirados da literatura.

Resultados e discussões

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Figura 1. Observa-se que todas as misturas atingiram valores superiores a 100 MPa, o que confirma o elevado desempenho mecânico dos UHPGC produzidos. O traço G1.00 apresentou resistência média de 104,67 MPa, enquanto o traço G1.25 atingiu 103,47 MPa. Por outro lado, o traço G1.50 apresentou o maior valor entre as formulações avaliadas, com 107,27 MPa. Esse resultado indica que a incorporação de CM não comprometeu a resistência nas primeiras idades avaliadas. De modo geral, como a CM tem caráter inerte na matriz geopolimérica, o comportamento observado indica que sua incorporação pode ter melhorado o empacotamento de partículas do sistema, promovendo resistência à compressão equivalente, mesmo com a redução do ligante.

Figura 1 – (a) Ensaio de resistência à compressão; (b) Resistência à compressão aos 7 dias de idade.

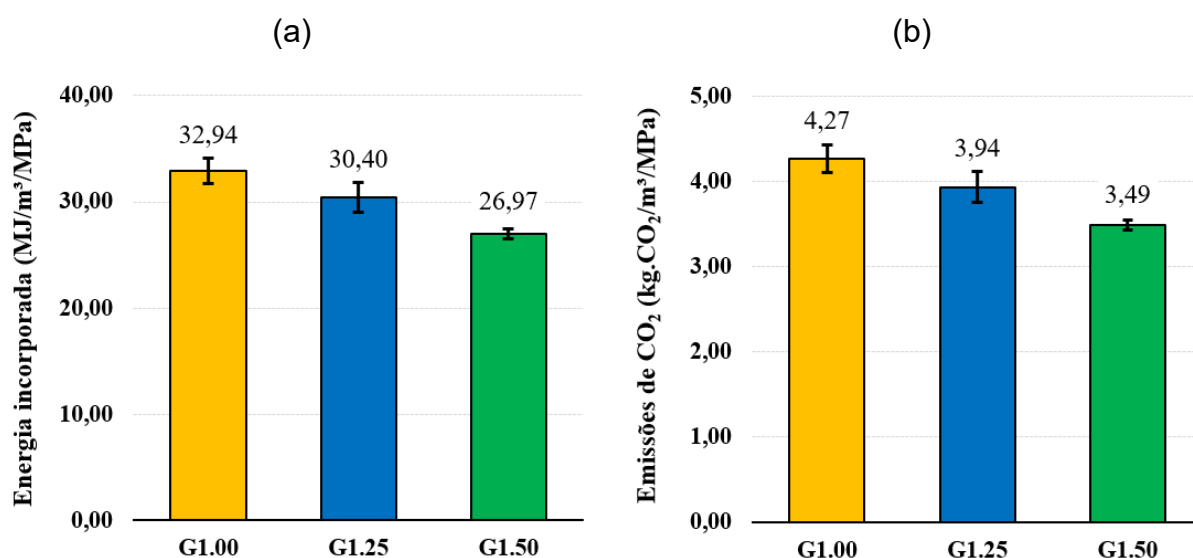


Fonte: Os autores (2026).

Em relação à energia incorporada normalizada pela resistência à compressão, a Figura 2a mostra redução com o aumento do teor de concha marinha. O melhor resultado foi obtido por G1.50, com 26,97 MJ/m³/MPa, seguido por G1.25, com 30,40 MJ/m³/MPa, e

G1.00, com 32,94 MJ/m³/MPa. Em comparação com G1.00, as reduções foram de 7,7% para G1.25 e 18,1% para G1.50. Esses resultados indicam melhora do desempenho energético das misturas com concha marinha.

Figura 2 – (a) Energia incorporada aos 7 dias; (b) Emissões de CO₂ aos 7 dias.



Fonte: Os autores (2026).

Um comportamento semelhante foi observado para as emissões de CO₂ normalizadas, apresentadas na Figura 2b. O melhor resultado foi obtido por G1.50, com 3,49 kg CO₂/m³/MPa, seguido por G1.25, com 3,94 kg CO₂/m³/MPa, e G1.00, com 4,27 kg CO₂/m³/MPa. Em relação ao traço de referência, as reduções foram de 7,7% para G1.25 e 18,3% para G1.50. Esses resultados confirmam o melhor desempenho ambiental das misturas com concha marinha, com destaque para o traço G1.50.

Considerações finais

Os resultados obtidos indicam que a incorporação de concha marinha em UHPGC é tecnicamente viável e ambientalmente promissora nas condições avaliadas. Todas as misturas apresentaram resistência à compressão superior a 100 MPa aos 7 dias, demonstrando que a substituição parcial da areia natural por concha marinha não

comprometeu o desempenho mecânico inicial. Destaca-se o traço G1.50, que apresentou a maior resistência média à compressão, igual a 107,27 MPa. Do ponto de vista ambiental, verificou-se redução progressiva da energia incorporada e das emissões de CO₂ normalizadas com o aumento do teor de concha marinha. Em relação ao traço de referência, o G1.50 reduziu a energia incorporada em 18,1% e as emissões de CO₂ em 18,3%. Assim, conclui-se que a concha marinha apresenta potencial como agregado alternativo em UHPGC, contribuindo para a produção de formulações de alto desempenho com menor impacto ambiental.

Referência ao fomento recebido

Esta pesquisa recebeu fomento do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por meio do Edital nº 01/2025/PROPPI - PIBIC-EM.

Referências

ASTM INTERNATIONAL. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). **ASTM C109/C109M-21**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

GU, X. *et al.* Optimizing the pore structure and permeability of calcined clay limestone cement through shell powder. **Journal of Building Engineering**, v. 91, 109582, 2024.

HER, S. *et al.* Exploring the potential of pulverized oyster shell as a limestone substitute in limestone calcined clay cement (LC3) and its implications for performance. **Construction and Building Materials**, v. 425, 135918, 2024.

LIU, C. *et al.* Multiscale characterization of microstructure and micromechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC). **Construction and Building Materials**, v. 512, 145311, 2026.

MARINI, L. *et al.* An analysis of the environmental effects of three types of concrete: Ready-mixed, reactive powder, and geopolymer. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, 102926, 2024.

METWALLY, G. A. M. *et al.* A comprehensive review of metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete enhanced with waste material additives. **Journal of Building Engineering**, v. 103, 112019, 2025.

ZHANG, X. *et al.* Trends toward lower-carbon ultra-high performance concrete (UHPC) - A review. **Construction and Building Materials**, v. 420, 135602, 2024.