



Avaliação preliminar da ecoeficiência de concretos de ultra-alto desempenho

Débora Raquel Caldas Frank | debora.rf@aluno.ifsc.edu.br¹
Isabela Paulick Silveira | isabela.ps2009@aluno.ifsc.edu.br²
Jordana Tomazi | jordanatomazie@gmail.com³
Claudi Arianne Gomes da Fonseca | claudi.fonseca@ifsc.edu.br⁴
Rafael Andrade de Souza | ras@ifsc.edu.br⁵
Allan Guimarães Borçato | allan.borcato@ifsc.edu.br⁶

Edital nº 01/2025/PROPI - PIBIC-EM

Trabalho de Pesquisa

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

Resumo:

Este estudo avaliou a resistência à compressão em idade precoce e a ecoeficiência de concretos de ultra-alto desempenho. Duas misturas de UHPC (SA100 e MK100) e três de UHPGC (G-MK100, G-MK50 e G-CC10) foram avaliadas. A resistência à compressão foi avaliada aos 7 dias. A análise ambiental considerou energia incorporada e emissões de CO₂, em valores absolutos e normalizados pela resistência à compressão. O maior valor de resistência foi obtido pelo G-MK100 (104,67 MPa), com aumento de 27,60% em relação ao SA100 (82,03 MPa) e 17,21% em relação ao MK100 (89,30 MPa). G-MK50 (87,93 MPa) e G-CC10 (88,37 MPa) apresentaram desempenho equivalente ao MK100. Em termos ambientais, o MK100 apresentou maior impacto (5970,85 MJ/m³ e 853,14 kg.CO₂/m³). Os UHPGC reduziram significativamente esses valores, com destaque para o G-MK50, que apresentou 2982,25 MJ/m³ e 409,66 kg.CO₂/m³, correspondendo a reduções superiores a 50% em relação ao MK100, e superiores a 40% em relação ao SA100. Na análise normalizada, o G-MK100 apresentou 33,05 MJ/m³/MPa e 4,28 kg.CO₂/m³/MPa, enquanto o G-MK50 apresentou 33,92 MJ/m³/MPa e 4,66 kg.CO₂/m³/MPa, valores aproximadamente 50% inferiores aos UHPC de referência. Os resultados evidenciam que os UHPGC mantêm ou superam o desempenho mecânico em idades iniciais, com redução expressiva do impacto ambiental quando comparados ao UHPC convencional.

Palavras-chave: UHPGC; UHPC; ecoeficiência; sustentabilidade; emissões de CO₂.

Introdução

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) destaca-se por suas excepcionais propriedades mecânicas e durabilidade. Entretanto, sua produção exige elevados teores de

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.

cimento Portland, o que resulta em severos impactos ambientais e altas emissões de CO₂ (Li *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025). Como alternativa sustentável, o concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho (UHPGC) apresenta-se como alternativa ao UHPC. O UHPGC utiliza precursores ricos em aluminossilicatos, como metacaulim (MK) e escória (EC), que, quando ativados alcalinamente, reduzem significativamente a energia incorporada e a pegada de carbono (Metwally *et al.*, 2025).

Embora o uso de subprodutos industriais em geopolímeros seja amplamente reconhecido por refinar a microestrutura e promover a formação de géis ligantes densos (Metwally *et al.*, 2025), a literatura ainda apresenta lacunas quanto à avaliação comparativa direta do desempenho mecânico inicial e da ecoeficiência entre misturas de UHPC e UHPGC que combinam diferentes proporções de precursores ativos e adições inerte (Wang *et al.*, 2025).

Diante desse contexto, visando consolidar o UHPGC como uma alternativa técnica e ambientalmente superior ao UHPC convencional, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da substituição total da sílica ativa (SA) por metacaulim (MK) no UHPC, bem como investigar a influência da substituição parcial do MK por escória (EC) e por carbonato de cálcio (CC) no desenvolvimento de misturas de UHPGC.

Fundamentação teórica

O UHPC baseia-se na teoria de empacotamento denso de partículas, apresentando elevada resistência mecânica e durabilidade (Li *et al.*, 2025). Nesse sistema, a sílica ativa (SA) atua no preenchimento de vazios e na reação pozolânica, contribuindo para o refinamento da microestrutura e para a melhoria do desempenho da matriz cimentícia (Li *et al.*, 2025). Entretanto, o elevado teor de cimento Portland necessário resulta em altas emissões de CO₂ e em elevada energia incorporada (Wang *et al.*, 2025). Por outro lado, o UHPGC baseia-se na ativação alcalina de precursores ricos em aluminossilicatos, formando géis ligantes responsáveis pelo desenvolvimento da resistência e pela densificação da matriz (Metwally *et al.*, 2025). O metacaulim (MK) atua como principal fonte de silício e alumínio reativos, enquanto a escória de alto-forno (EC), contribui para a formação de fases adicionais com cálcio e para a aceleração do ganho de resistência. Além disso, o carbonato de cálcio (CC) apresenta efeito filler, promovendo o preenchimento de

vazios e atuando como sítio de nucleação, sem participação direta como ligante (Metwally *et al.*, 2025).

Procedimentos metodológicos

Foram utilizados como matérias-primas: cimento Portland CP V-ARI (CP), sílica ativa (SA) comercial densificada, metacaulim (MK) obtido a partir da calcinação de caulim comercial a 850 °C por 6 h, escória (EC) proveniente de uma empresa siderúrgica e carbonato de cálcio (CC) de alta pureza adquirido comercialmente. 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. Um superplastificante (SP) à base de policarboxilato foi utilizado nas misturas de UHPC. Areia natural (partículas < 0,150 mm) foi utilizada como agregado. A Tabela 1 apresenta as misturas avaliadas.

Tabela 1 – Misturas avaliadas.

Dosagem (kg/m ³)									
ID	CP	SA	MK	EC	CC	Ativador	Areia	SP	Água
SA100	885,75	132,86	-	-	-	-	1107,18	20,37	195,57
MK100	883,37	-	132,50	-	-	-	1104,21	40,63	186,92
G-MK100	-	-	517,89	-	-	550,83	1068,72	-	-
G-MK50	-	-	262,43	262,43	-	558,25	1083,12	-	-
G-CC10	-	-	466,61	-	51,85	551,43	1069,88	-	-

Fonte: elaborada pelo autor.

Dois traços de UHPC foram avaliados, nos quais a variável consistiu na substituição total da SA por MK, visando analisar o efeito de diferentes materiais pozolânicos. Adicionalmente, foram produzidos três traços de UHPGC, com: (i) substituição de 50% do MK por EC e (ii) substituição de 10% do MK por CC. Dessa forma, avaliou-se o efeito de materiais com atividade pozolânica e de caráter inerte nos geopolímeros, bem como a influência de diferentes pozolanas no UHPC.

O procedimento de mistura foi idêntico para ambos os materiais cimentícios. Inicialmente, os materiais secos foram homogeneizados por 1 min. Em seguida, adicionou-se a água ou ativador, promovendo a mistura dos aglomerantes por mais 2 min. Posteriormente, o agregado foi incorporado, mantendo-se a mistura por 2 min adicionais.

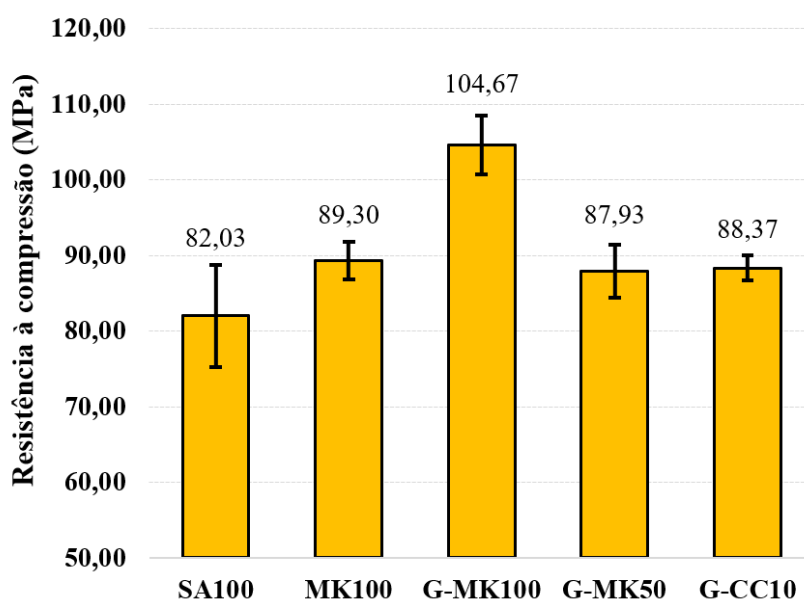
Após a preparação, o material foi moldado em corpos de prova cúbicos de 40 mm, sendo o adensamento realizado em três camadas, com 30 golpes por camada. Ao final, os moldes foram selados para evitar a perda precoce de umidade.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, sendo submetidos à cura úmida no caso do UHPC e à cura seca no caso do UHPGC. Aos 7 dias, realizou-se o ensaio de resistência à compressão conforme a ASTM C109 (2021), utilizando três corpos de prova por mistura, sendo o resultado expresso pela média. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de sustentabilidade, na qual os valores de energia incorporada e emissões de CO₂ de cada matéria-prima foram obtidos na literatura e posteriormente normalizados pela resistência à compressão aos 7 dias.

Resultados e discussões

Os resultados do ensaio de resistência à compressão (Figura 1) mostram que os traços de UHPGC apresentaram desempenho mecânico superior em relação aos traços de UHPC.

Figura 1 – Resistência à compressão aos 7 dias.



Fonte: Os autores (2026).

Aos 7 dias, o SA100 atingiu 82,03 MPa, enquanto o MK100 apresentou 89,30 MPa, representando um aumento de 8,86%. Entretanto, o traço G-MK100 obteve a maior resistência à compressão, com 104,67 MPa, representando aumentos de 27,60% em relação ao SA100 e 17,21% em relação ao MK100. Por outro lado, os traços G-MK50 e G-CC10 apresentaram resistências de 87,93 MPa e 88,37 MPa, respectivamente, valores próximos ao MK100, com reduções inferiores a 2% em relação a esse UHPC.

Quanto à energia incorporada total (Tabela 2), os UHPGC apresentaram reduções expressivas. Em relação ao SA100, as reduções foram de 32,08% para o G-MK100, 41,44% para o G-MK50 e 34,40% para o G-CC10. Quando comparados ao MK100, essas reduções foram ainda mais significativas, alcançando 42,07%, 50,05% e 44,04%, respectivamente. Resultado semelhante foi observado para as emissões totais de CO₂, com reduções de 44,23% para o G-MK100, 49,06% para o G-MK50 e 45,61% para o G-CC10 em relação ao SA100.

Tabela 2 – Análise de sustentabilidade aos 7 dias.

ID	Energia incorporada		Emissões de CO ₂	
	Total (MJ/m ³)	Normalizada (MJ/m ³ /MPa)	Total (kg.CO ₂ /m ³)	Normalizada (kg.CO ₂ /m ³ /MPa)
SA100	5092,82	62,08	804,21	9,80
MK100	5970,85	66,86	853,14	9,55
G-MK100	3459,21	33,05	448,47	4,28
G-MK50	2982,25	33,92	409,66	4,66
G-CC10	3341,12	37,81	437,39	4,95

Fonte: elaborada pelo autor (2026).

Entretanto, a análise normalizada pela resistência à compressão evidencia, de forma mais clara, a ecoeficiência dos UHPGC. O G-MK100 reduziu a energia incorporada normalizada em 46,76% em relação ao SA100 e 50,57% em relação ao MK100, além de reduzir as emissões normalizadas de CO₂ em 56,33% e 55,18%, respectivamente. O G-MK50 apresentou o melhor desempenho ambiental absoluto, com 33,92 MJ/m³/MPa e 4,66 kg.CO₂/m³/MPa, associado à menor energia incorporada e à menor emissão total entre todos os traços. Assim, os resultados demonstram que os UHPGC permitiram mitigar significativamente os impactos ambientais sem comprometer o desempenho mecânico aos 7 dias, destacando-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente superior ao UHPC.

Considerações finais

Os resultados demonstraram que a substituição do cimento Portland por precursores ativados alcalinamente não comprometeu o desempenho mecânico inicial.

Em termos ambientais, verificaram-se reduções expressivas na energia incorporada e nas emissões de CO₂, tanto em valores absolutos quanto normalizados pela resistência. Os traços G-MK50 e G-MK100 apresentaram os melhores desempenhos ecoeficientes.

De forma geral, os UHPGC mostraram-se tecnicamente viáveis e ambientalmente superiores aos UHPC convencionais. Assim, estudos futuros devem investigar a incorporação de resíduos regionais, visando ampliar a aplicabilidade e a sustentabilidade desses materiais.

Referência ao fomento recebido

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

LI, X.; ZOU, Y.; DAI, X.; YANG, J.; ZHANG, Z. Durability of ultra-high-performance concrete in aggressive environments: A comprehensive review of material, interface, structure and enhancement. **Journal of Building Engineering**, v. 115, p. 114486, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114486>.

METWALLY, G. A. M.; ELEMAM, W. E.; MAHDY, M.; GHANNAM, M. A comprehensive review of metakaolin-based ultra-high-performance geopolymer concrete enhanced with waste material additives. **Journal of Building Engineering**, v. 103, p. 112019, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112019>.

WANG, D.; ZHANG, Z.; SHI, C.; WANG, Y.; REN, Q.; NING, C.; LIU, X.; JIANG, Z. Comparison study of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC) and ultra-high performance concrete (UHPC): mechanical properties, durability and carbon emissions. **Composites Part B: Engineering**, v. 307, p. 112903, 2025. DOI: [10.1016/j.compositesb.2025.112903](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112903).