

Avaliação da ecoeficiência de UHPC com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de tijolo e resíduo de vidro

Alana Rúbia Farias | alana.rf@aluno.ifsc.edu.br¹
Luiz Fernando Zambiasi Trentin | luiz.fzt@aluno.ifsc.edu.br²
Jordana Tomazi | jordanatomazie@gmail.com³
Simone Aparecida da Silva Souza | simone.silva@ifsc.edu.br⁴
Allan Guimarães Borçato | allan.borcato@ifsc.edu.br⁵

Edital nº 02/2023/PROPI – Universal
Trabalho de Pesquisa

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

Resumo:

A produção de cimento Portland é responsável por significativa emissão de CO₂, impulsionando a busca por alternativas mais sustentáveis na construção civil. Portanto este estudo avaliou a resistência à compressão e a ecoeficiência de concretos de ultra-alto desempenho (UHPC) com substituição parcial do cimento por resíduo de tijolo (RT) e resíduo de vidro (RV). Foram produzidos sete traços, sendo um de referência e os demais com substituições de 5%, 10% e 15%. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 e 28 dias, conforme a norma ASTM C109, enquanto a ecoeficiência foi avaliada com base nas emissões de CO₂ dos materiais constituintes. Os resultados indicaram que os traços com 5% de substituição apresentaram desempenho mecânico igual ou superior ao traço de referência, com destaque para o traço com RV, que atingiu aproximadamente 111 MPa aos 28 dias. Em termos ambientais, observou-se redução progressiva das emissões de CO₂, sendo os traços com 15% os mais eficientes, com valores próximos de 6,5 kg CO₂/MPa/m³. De forma geral, a incorporação de RT e RV mostrou-se viável para a produção de UHPC mais ecoeficiente, permitindo reduzir o impacto ambiental sem comprometer o desempenho mecânico.

Palavras-chave: UHPC; ecoeficiência; resíduo de tijolo; resíduo de vidro; sustentabilidade.

Introdução

A construção civil é responsável por significativa emissão de gases de efeito estufa, sendo o cimento Portland (CP) associado a cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (METWALLY *et al.*, 2025). A redução desse impacto torna-se essencial para a

¹ Egressa do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina.

² Egresso 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.

sustentabilidade do setor. O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) destaca-se por sua elevada resistência mecânica e microestrutura densa (ZHAO *et al.*, 2024). Contudo, seu alto consumo de CP, entre 800 e 1150 kg/m³, resulta em maior impacto ambiental, limitando sua sustentabilidade (ZHANG *et al.*, 2024).

A substituição parcial do CP por resíduos sólidos apresenta-se como alternativa promissora, alinhada ao conceito de ecoeficiência, que busca reduzir a pegada de carbono sem comprometer o desempenho mecânico (MARINI *et al.*, 2024). Dentre os materiais com potencial de aplicação, destacam-se o resíduo de tijolo (RT) e o resíduo de vidro (RV). O RT possui potencial pozolânico e efeito filler, enquanto o RV apresenta natureza amorfa e elevada reatividade, contribuindo para o desempenho da matriz cimentícia (NASR *et al.*, 2023). Além disso, o reaproveitamento desses resíduos reduz o descarte e a extração de matérias-primas naturais. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à compressão e a ecoeficiência na produção de UHPC com substituição parcial do CP por resíduo de tijolo (RT) e resíduo de vidro (RV).

Fundamentação teórica

O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) é um compósito cimentício avançado baseado na teoria de empacotamento denso de partículas, caracterizado por elevada resistência mecânica, baixa relação água/aglomerante e matriz com reduzida porosidade (ZHAO *et al.*, 2024). Apesar dessas propriedades, sua formulação exige elevado consumo de CP, geralmente entre 800 e 1100 kg/m³, o que resulta em maiores emissões de CO₂ e limita sua sustentabilidade (ZHANG *et al.*, 2024). Como alternativa para mitigar esse impacto, a substituição parcial do CP por materiais cimentícios suplementares (SCMs) tem sido amplamente estudada, contribuindo para o refinamento da microestrutura e a manutenção do desempenho mecânico (BIDECI *et al.*, 2024).

O resíduo de tijolo (RT) e o resíduo de vidro (RV) destacam-se como materiais promissores. O RT apresenta comportamento pozolânico a longo prazo, aliado ao efeito filler, promovendo o preenchimento dos vazios e a densificação da matriz (NASR *et al.*, 2023). O RV finamente moído possui estrutura rica em sílica amorfa, favorecendo sua reatividade e atuação pozolânica (METWALLY *et al.*, 2025). A utilização conjunta desses resíduos contribui para a formação de produtos de hidratação adicionais, a partir do

consumo de hidróxido de cálcio, resultando em uma microestrutura mais refinada. A eficiência dessa abordagem pode ser avaliada pela ecoeficiência, expressa pela relação entre emissões de CO₂ e resistência mecânica (kg CO₂/MPa·m³) (ZHANG *et al.*, 2024), sendo fundamental para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis (MARINI *et al.*, 2024).

Procedimentos metodológicos

O resíduo de tijolo (RT) foi obtido a partir de blocos cerâmicos descartados em uma indústria cerâmica, enquanto o resíduo de vidro (RV) foi proveniente de uma indústria metalúrgica, que utiliza esferas de vidro no processo de jateamento de estruturas metálicas. Ambas as indústrias estão localizadas no Oeste Catarinense. Inicialmente, ambos os materiais foram submetidos à secagem em estufa a 100°C, seguida de peneiramento em malha de 0,075 mm (#200). O CP utilizado foi o cimento Portland CP V-ARI. A partir dessa base, foram formulados sete traços de UHPC, sendo um traço de referência e os demais contendo substituições parciais do CP por RT ou RV, nos teores de 5%, 10% e 15% em massa, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Misturas de UHPC.

Dosagem (kg/m ³)								
ID	CP	RT	RV	SF	Areia	Água	SP	w/b
REF	844,8	-	-	211,2	1056,0	177,2	31,7	0,18
T05	801,1	42,2	-	210,8	1054,1	176,9	31,6	0,18
T10	757,6	84,2	-	210,4	1052,2	176,6	31,5	0,18
T15	714,2	126,0	-	210,0	1050,2	176,2	31,5	0,18
V05	800,4	-	42,2	210,6	1053,2	176,7	31,6	0,18
V10	756,2	-	84,2	210,1	1050,3	179,3	31,5	0,18
V15	712,3	-	126,0	209,5	1047,5	175,8	31,4	0,18

Fonte: elaborada pelo autor (2026)

Um aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilatos foi utilizado na produção do UHPC. O processo de produção envolveu a homogeneização dos materiais constituintes, seguida da moldagem dos corpos de prova em moldes cúbicos de 50 mm. Após um período inicial de 24 horas, procedeu-se à desmoldagem das amostras, que foram

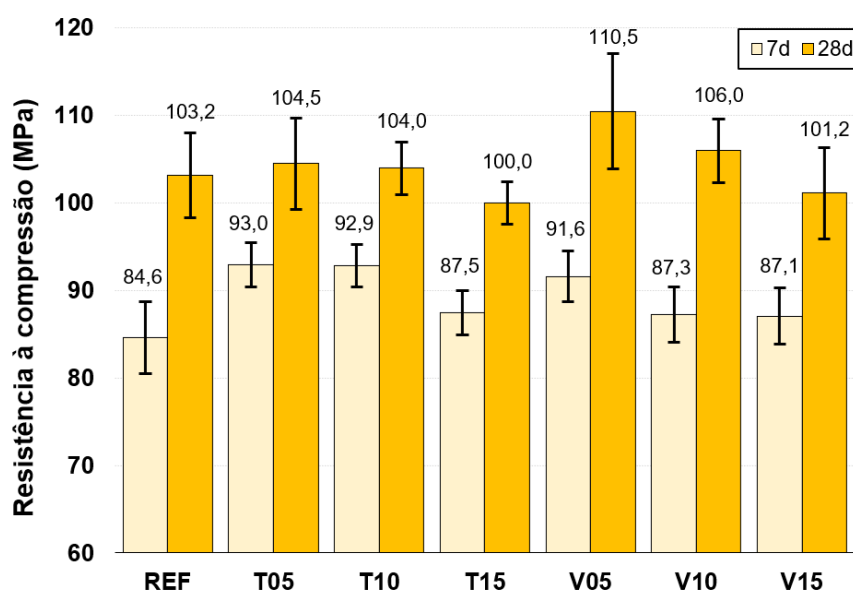
então mantidas em regime de cura submersa em água saturada com cal até as idades de ensaio.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM C109 (ASTM, 2021), sendo avaliadas quatro amostras para cada traço em cada idade. A avaliação da ecoeficiência foi conduzida com base em dados reportados na literatura.

Resultados e discussões

A Figura 1 apresenta os resultados de resistência à compressão. De modo geral, a incorporação de resíduos alterou diretamente a resistência à compressão. Aos 7 dias, os traços T05 e T10 atingiram 93,0 e 92,9 MPa, correspondendo a acréscimos de 9,9% e 9,8% em relação ao REF.

Figura 1 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.



Fonte: elaborada pelo autor (2026)

O traço T15 também foi superior ao REF, com aumento de 3,4%. Para o resíduo de vidro (RV), V05 apresentou 91,6 MPa, com incremento de 8,3%, enquanto V10 e V15 registraram aumentos de 3,2% e 3,0%, respectivamente. Aos 28 dias, todos os traços apresentaram ganho de resistência em relação aos 7 dias. Em comparação ao REF, T05 e

T10 apresentaram acréscimos de 1,3% e 0,8%, respectivamente, enquanto T15 apresentou redução de 3,1%. Entre os traços com RV, V05 apresentou a maior resistência à compressão, com 110,5 MPa, valor 7,1% superior ao REF. Além disso, o traço V10 também superou o REF em 2,7%. Assim, observa-se que o teor de 5% foi o mais favorável para ambos os resíduos.

A ecoeficiência (Tabela 2) foi superior nos traços com resíduos em relação ao REF nas duas idades analisadas. Aos 7 dias, o melhor resultado foi obtido por T10, com valor nominal de 7,53 CO₂/MPa/m³, o que representa redução de 17,5% em relação ao REF, que apresentou 9,13 CO₂/MPa/m³. Aos 28 dias, o melhor desempenho foi observado em V15, com valor nominal de 6,54 CO₂/MPa/m³, correspondendo a redução de 12,7% frente ao REF, cujo valor foi de 7,49 CO₂/MPa/m³. Esses resultados evidenciam que a substituição parcial do CP por resíduos melhorou a ecoeficiência do UHPC, com destaque para o percentual de 15% de substituição aos 28 dias para ambos resíduos.

Tabela 2 – Avaliação da ecoeficiência dos UHPC.

ID	CP (%)	Resíduo (%)	Total CO ₂ (kg/m ³)	7 dias CO ₂ /MPa/m ³	28 dias CO ₂ /MPa/m ³
REF	100	0	772,2	9,13	7,49
T05	95	5	735,7	7,92	7,04
T10	90	10	699,3	7,53	6,72
T15	85	15	663,0	7,58	6,63
V05	95	5	735,1	8,02	6,65
V10	90	10	698,1	8,00	6,59
V15	85	15	661,3	7,59	6,54

Fonte: elaborada pelo autor (2026)

Considerações finais

Os resultados demonstraram que a substituição parcial do CP por resíduos de tijolo e vidro é tecnicamente viável em matrizes de UHPC. Em termos mecânicos, os melhores desempenhos foram obtidos com 5% de substituição, com destaque para V05 aos 28 dias, que atingiu 110,5 MPa e superou o traço de referência em 7,1%. Teores mais elevados reduziram o ganho mecânico, embora a maioria dos traços tenha mantido desempenho próximo ou superior ao REF. Sob o ponto de vista ambiental, todos os traços com resíduos

apresentaram melhora na ecoeficiência, com redução da razão $\text{CO}_2/\text{MPa}/\text{m}^3$ em ambas as idades. Assim, conclui-se que a incorporação desses resíduos constitui estratégia promissora para reduzir o consumo de CP e melhorar o desempenho ambiental do UHPC.

Referência ao fomento recebido

Esta pesquisa recebeu fomento do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por meio do Edital nº 02/2023/PROPPI – Universal.

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.

BIDECI, Ö. S.; BIDECI, A.; ASHOUR, A. Utilization of Recycled Brick Powder as Supplementary Cementitious Materials—A Comprehensive Review. **Materials**, Basel, v. 17, 637, 2024. DOI: 10.3390/ma17030637.

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. DOI: 10.1016/j.asej.2024.102926.

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. DOI: 10.1016/j.jobee.2025.112019.

NASR, M. S. et al. Influence of mechanical activation on the behavior of green high-strength mortar including ceramic waste. **Materials Science-Poland**, v. 41, n. 4, p. 41-56, 2023. DOI: 10.2478/msp-2023-0046.

ZHANG, X. et al. Trends toward lower-carbon ultra-high performance concrete (UHPC) – A review. **Construction and Building Materials**, v. 420, 135602, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135602.

ZHAO, J. et al. Hybrid fiber reinforced ultra-high performance coal gangue geopolymer concrete (UHPGC): Mechanical properties, enhancement mechanism, carbon emission and economic analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 96, 110428, 2024. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.110428.