INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA NAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DO CONCRETO

Influence of red ceramic waste on the thermomechanical properties of concrete

Aldo Ribeiro de Carvalho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, MG | aldorcarvalho@outlook.com

Beatriz Leite Sefair de Barros
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | beatriz.sefair@engenharia.ufjf.br

Marcela Martins Carrara
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | marcelamartinscarrara@gmail.com

Gabriela dos Santos Pacífico
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | gabrielapacifico13@gmail.com

Thaís Mayra de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora, MG | thais.mayra@ufjf.br

Resumo

Este estudo analisa a substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e sua influência nas propriedades termomecânicas do concreto exposto a temperaturas elevadas. Foram desenvolvidos concretos com 10% e 25% de substituição de RCV, submetidos a temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C. Os resultados indicam que a substituição de 10% apresentou melhor desempenho, com maior resistência mecânica e menor perda de massa. A adição de RCV refinou a porosidade, contribuindo para uma maior durabilidade térmica. As amostras expostas a temperaturas elevadas apresentaram redução da massa específica devido à perda de água e decomposição de compostos hidratados. A pesquisa destaca o potencial do RCV como alternativa sustentável ao cimento Portland, promovendo a redução do seu consumo e contribuindo para o desenvolvimento de uma construção civil ambientalmente mais sustentável.

Palavras-chave: Concreto; Cerâmica vermelha; Temperatura elevada; Propriedades mecânicas; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the partial replacement of Portland cement with red ceramic waste (RCW) and its influence on the thermomechanical properties of concrete exposed to high temperatures. Concretes with 10% and 25% RCW replacement were developed and subjected to temperatures of 200°C, 400°C, and 600°C. The results indicate that the 10% replacement showed the best performance, with higher mechanical strength and lower mass loss. The addition of RCW refined the porosity, contributing to greater thermal durability. Samples exposed to high temperatures showed a reduction in specific mass due to water loss and decomposition of hydrated compounds. The research highlights the potential of RCV as a sustainable alternative to Portland cement, promoting its consumption reduction and contributing to the development of a more environmentally sustainable construction industry.

Keywords: Concrete; Red ceramic waste; High temperature; Mechanical properties; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que o cimento Portland seja responsável por 8% das emissões globais de CO_2, sendo composto majoritariamente por clínquer (Turkoglu *et al.*, 2023). São diversos os estudos que investigam a mudança de composição do clínquer ou sua substituição, parcial ou total, por materiais cimentícios suplementares. Entre esses estudos, tem-se a utilização de resíduos de casca de ovo (Her *et al.*, 2022); o resíduo de óleo de palma (Hamada *et al.*, 2020) e o uso do basalto desgastado (Abdel-Latief *et al.*, 2021). Além disso, foi notado o desenvolvimento de novos ligantes, como os geopolímeros que substituem integralmente o cimento Portland dos compósitos e apresentam um desempenho ambiental mais favorável (Carvalho *et al.*, 2023).

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) é estudado como material suplementar (Hoppe Filho *et al.*, 2021)) (Jain, Gupta e Chaudhary, 2022) e foi avaliado sua substituição na massa de cimento em 5%, 10%, 15% e 20% (Silva *et al.*, 2021). No entanto, não há registros na literatura sobre o desempenho de concretos com adição de RCV quando expostos a altas temperaturas. Este trabalho busca inovar ao investigar essa lacuna, avaliando as propriedades de concretos com 10% e 25% de RCV submetidos a 200°C, 400°C e 600°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Foi adotado o cimento CP V-ARI e suas características químicas, físicas e mecânicas do cimento empregado, assim como as exigências estabelecidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018). O RCV, Figura 1, utilizado como substituição parcial do cimento, foi proveniente de obras de demolição e reforma, sendo submetido à moagem em moinho de bolas, conforme estudo de Carvalho et al. (2023), e posterior peneiramento para obter somente o material passante em peneira com abertura de 75 µm.

Figura 1: Resíduo de cerâmica vermelha moído



Fonte: Autores (2025)

Os agregados utilizados foram a areia natural do Rio Preto, em Minas Gerais, e areia artificial média, brita 0 e brita 1, provenientes de rochas calcárias, provenientes da Petra Agregados. Para a confecção dos corpos de prova utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento municipal da cidade de Juiz de Fora. Os aditivos utilizados foram o Sikament RM-300, aditivo plastificante de pega normal com alto desempenho, e Sika ViscoCrete 3535 CB, aditivo superplastificante de última geração.

2.2 MÉTODOS

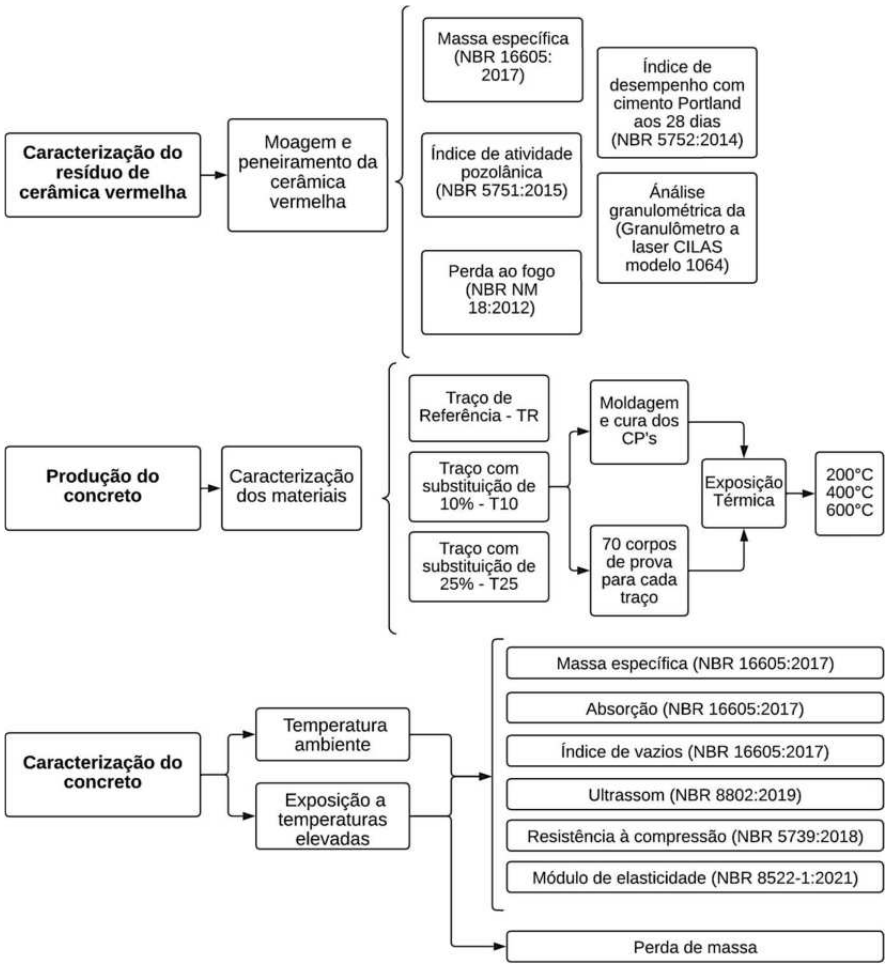
Para o desenvolvimento do concreto foram desenvolvidos 70 corpos de prova de cada traço estudado, que são apresentados na Tabela 1. Os métodos de caracterização dos concretos são apresentados na Figura 2. Para a exposição térmica foi utilizada uma mufla Up Brasil com taxa de aquecimento de 0,5°C/min e o tempo de exposição após o atingimento da temperatura máxima (200°C, 400°C e 600°C) foi de 60 minutos, conforme recomendações da RILEM (2000).

Tabela 1: Traços adotados

Materiais / Identificação	Cimento	Cerâmica Vermelha	Areia Artificial	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Fator água/cimento	Aditivo plastificante/ superplastificante (%)
Traço de Referência	1	0	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50/0,25
T10 – Substituição de 10%	0,9	0,1	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50/0,37
T25 – Substituição de 25%	0,75	0,25	0,436	1,307	0,701	1,635	0,38	0,50/0,50

Fonte: Autores (2025)

Figura 2: Fluxograma metodológico



Fonte: Autores (2025)

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA

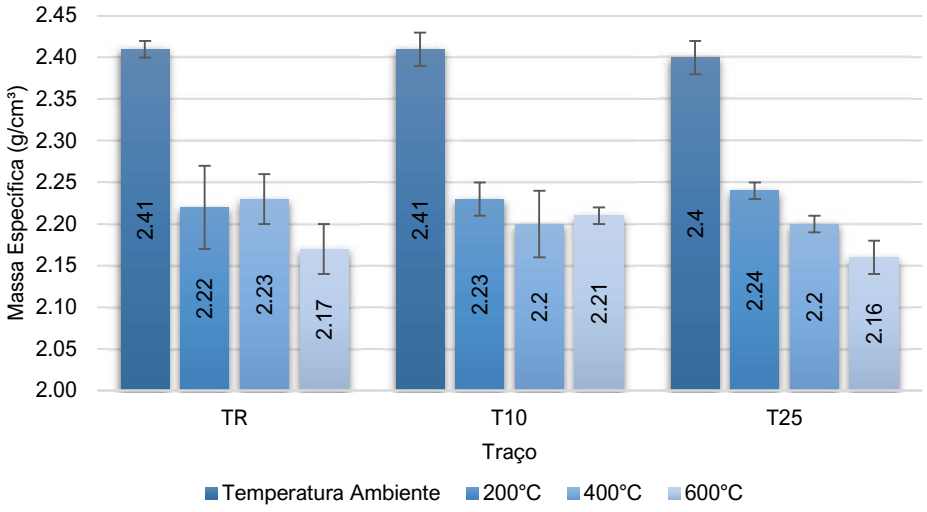
O RCV estudado apresenta massa específica de 2,66 g/cm³, superior a valores reportados na literatura para o mesmo material, como 2,35 g/cm³ (Samadi *et al*., 2020), 2,53 g/cm³ (Brekailo *et al*., 2022) e 2,57 g/cm³ (Lotero, Moncaleano e Consoli, 2023). A atividade pozolânica com cal, medida aos 7 dias, foi de 6,3 MPa, classificando-o como material pozolânico, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), que exige um índice de atividade superior a 6 MPa nesse período. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) materiais pozolânicos tipo N apresentem perda ao fogo inferior a 10% e índice de desempenho com cimento igual ou superior a 75%. Com base nesses critérios, o RCV pe um material pozolânico N (ABNT, 2014).

Quanto à distribuição granulométrica, o diâmetro médio das partículas é de 16,00 µm, com diâmetros correspondentes a 10%, 50% e 90% das partículas em 1,36 µm, 12,07 µm e 38,57 µm, respectivamente. Estudos prévios relatam granulometrias semelhantes, como 10% das partículas inferiores a 1,63 µm (Lausseuguette *et al*., 2019) e 83,8% abaixo de 45 µm (Lotero, Moncaleano e Consoli, 2023).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A Figura 3 apresenta a massa específica dos concretos desenvolvidos

Figura 3: Massa específica

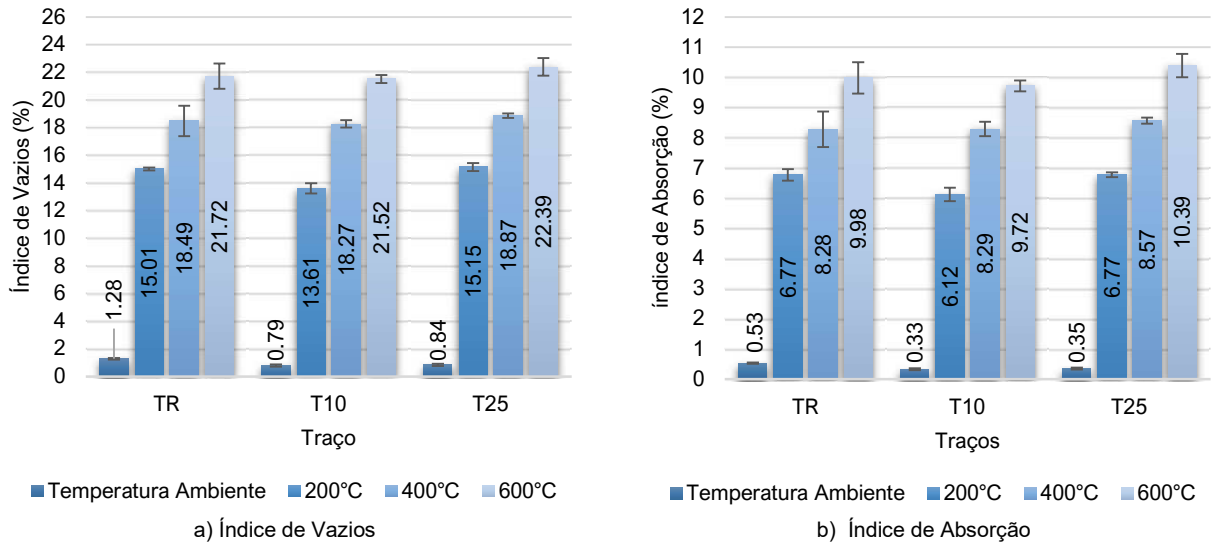


Fonte: Autores (2025)

Nas temperaturas avaliadas, não foram observadas diferenças significativas nas massas específicas dos traços. Essas variações insignificantes resultam do equilíbrio entre a redução da massa específica do concreto, devido à substituição parcial do cimento por um material de menor densidade, e o aumento ocasionado pelo refinamento da porosidade devido à adição de pozolana. Esse comportamento é consistente com estudos anteriores, nos quais a substituição de até 40% do cimento por material cerâmico, em temperatura ambiente, não apresentou alterações expressivas (Sales e Alferes Filho, 2014).

As Figura 4a e b comparam os índices de vazios e absorção dos concretos, respectivamente. Os traços com RCV apresentam índices de vazios e absorção reduzidos devido ao refinamento da porosidade Aos 200°C, o traço T10 apresenta os menores valores para ambas as propriedades, cerca de 9% inferiores ao TR, enquanto não se observam diferenças significativas entre os traços TR e T25 nessa mesma temperatura.

Figura 4: Índice de vazios e de absorção



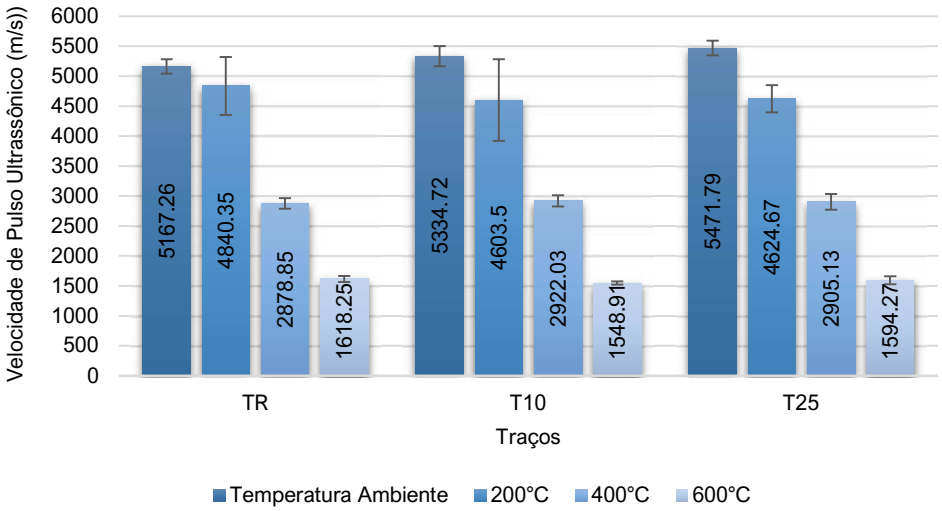
Fonte: Autores (2025)

Caso esses parâmetros fossem os únicos determinantes da durabilidade, o traço T10 apresentaria o melhor desempenho (Dyer, 2015) (Bolina, Tutikian e Helene, 2019). Aos 400°C e 600°C, as propriedades não diferem entre os traços, pois ocorre a decomposição dos produtos de hidratação e sucessivo surgimento de fissuras. Na Figura 4b, observa-se um acréscimo acentuado no índice de vazios até 200°C, causado pela

rápida perda de água livre até 80°C e pela perda de água capilar e fisicamente adsorvida entre 80°C e 200°C, o que intensifica a porosidade do concreto.

A Figura 5 apresenta a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nos traços de concreto. Em temperatura ambiente, o traço T25 exibiu a maior velocidade, seguido por T10 e TR. Essa velocidade diminui com o aumento do índice de vazios, uma vez que as ondas se propagam pelo meio sólido. Assim, traços com RCV, caracterizados por poros mais refinados, apresentam velocidades superiores. Com o aumento da temperatura, observa-se uma redução progressiva na velocidade. Aos 600°C, a velocidade diminui cerca de 70% em relação à temperatura ambiente, devido ao maior índice de vazios, conforme também notado por Demirel e Kelestemur (2010).

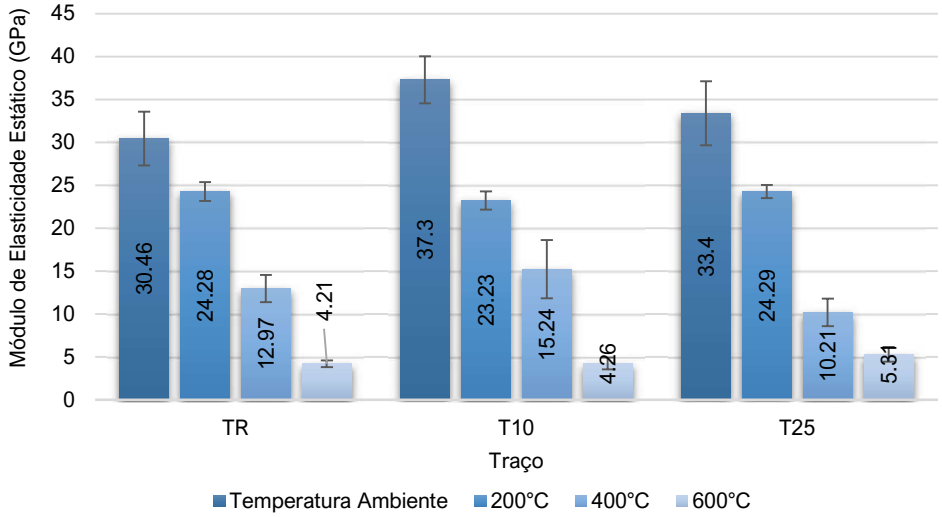
Figura 5: Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas



Fonte: Autores (2025)

A Figura 6 apresenta os módulos de elasticidade dos traços de concreto. A maior variação foi observada em temperatura ambiente, especialmente ao comparar T10 e T25 com TR. Em temperaturas elevadas, as diferenças entre os traços são insignificantes, indicando que a adição de RCV não afeta a rigidez do concreto em altas temperaturas. Observa-se uma redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura, devido ao acréscimo de vazios gerado pelo aquecimento.

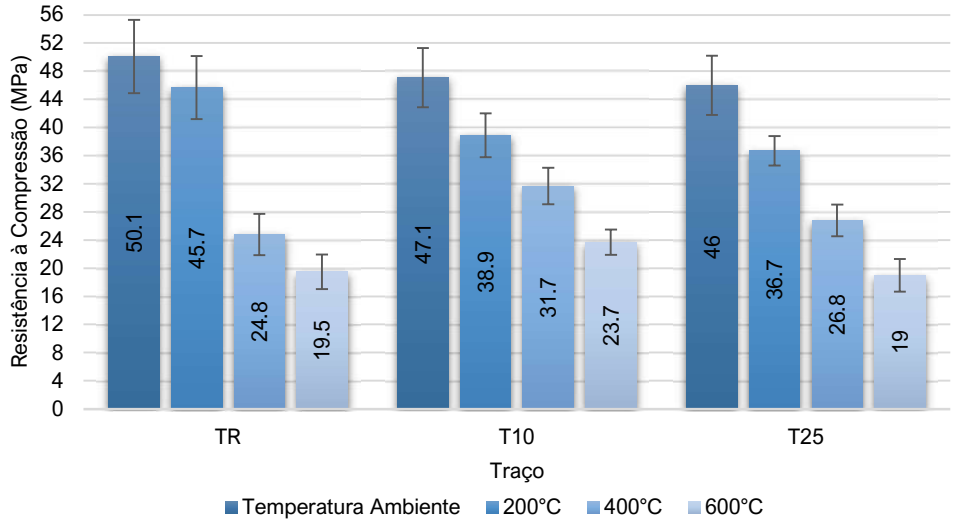
Figura 6: Módulo de elasticidade



Fonte: Autores (2025)

A Figura 7 apresenta a resistência à compressão dos traços de concreto em diferentes temperaturas. Em temperatura ambiente e a 200°C, o TR possui maior resistência, enquanto os traços T10 e T25 apresentam valores 15% e 20% inferiores, respectivamente. Contudo, a 400°C e 600°C, o traço T10 alcança a maior resistência, seguido por T25 e TR, indicando que a substituição de 10% do cimento por RCV melhora a resistência à compressão em temperaturas elevadas.

Figura 7: Resistência à compressão

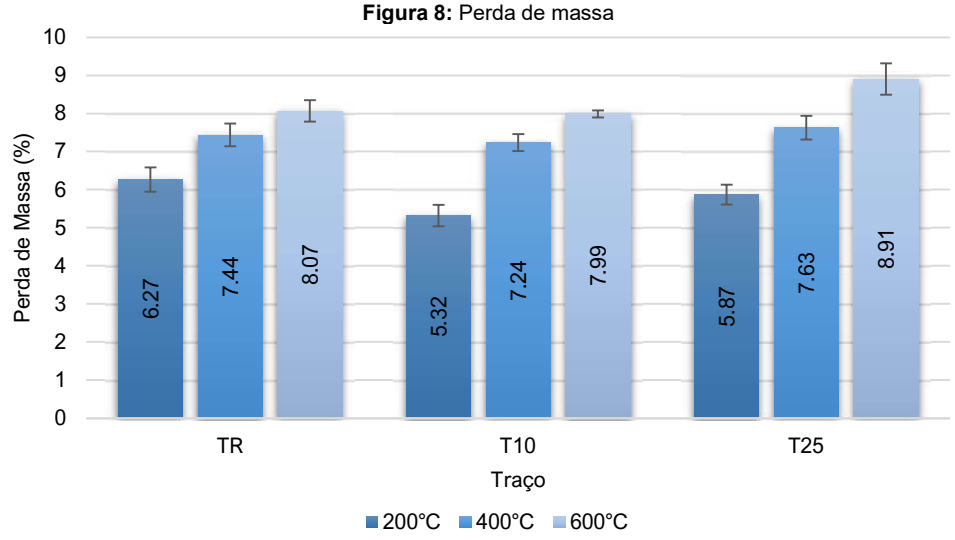


Fonte: Autores (2025)

Os resultados demonstram que o uso de RCV no traço T10 gera concretos com maior resistência em altas temperaturas, tornando-o aplicável em edificações sujeitas a condições térmicas extremas, como plantas industriais. A Figura 7 também evidencia uma relação direta entre resistência e temperatura, com queda acentuada no traço TR, especialmente entre 200°C e 400°C. Isso ocorre devido à dissociação do hidróxido de cálcio no cimento Portland até 400°C. Embora a decomposição do hidróxido de cálcio não cause perdas críticas de resistência, sua expansão durante o resfriamento agrava a fissuração e reduz a resistência. Nos traços com material cerâmico, a reação pozolânica diminui a quantidade de hidróxido de cálcio, resultando em maior resistência a partir de 400°C.

A Figura 8 ilustra a perda de massa dos traços com o aumento da temperatura. Até 200°C, a perda é mais acentuada, causada pela evaporação rápida da água livre (até 80°C) e pela perda de água capilar e adsorvida (entre 80°C e 200°C), conforme também indicado na Figura 4. Entre 200°C e 600°C, a perda de massa ocorre em menor intensidade, resultante da decomposição do hidróxido de cálcio e da evaporação da água quimicamente combinada nos silicatos de cálcio hidratados.

Figura 8: Perda de massa



Fonte: Autores (2025)

O traço T10 apresenta consistentemente os menores valores de perda de massa, cerca de 15% inferior ao TR a 200°C. Aos 400°C e 600°C, o traço T25 registra a maior perda de massa, enquanto TR e T10 apresentam valores 10% inferiores a T25 na maior temperatura. O desempenho superior do traço T10 deve-se ao refinamento da porosidade proporcionado pela adição de pozolana na quantidade ideal, que reduz a liberação de vapor e a perda de massa durante o aquecimento. Esses resultados reforçam o potencial do

RCV como substituto parcial do cimento Portland, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland em concretos.

4 CONCLUSÕES

O estudo abordou a substituição parcial do cimento Portland por RCV em concretos expostos a temperaturas elevadas, inovando ao caracterizar o comportamento desses materiais em condições extremas, algo ainda inexplorado na literatura. Os ensaios indicaram que o RCV possui atividade pozolânica adequada, com índice de desempenho de 98% e índice de atividade pozolânica com cal de 6,3 MPa. Constatou-se que a adição do resíduo reduziu o abatimento do concreto, mesmo com o uso de superplastificante, e que a substituição de 10% (traço T10) apresentou o melhor desempenho geral, conciliando resistência mecânica e estabilidade térmica em temperaturas de até 600°C. Além disso, foi observada uma redução progressiva da massa específica das amostras com o aumento da temperatura, devido à perda de massa e à porosidade gerada pelo aquecimento. As perdas de massa mais significativas ocorreram até 200°C, pela liberação de água livre e capilar, e entre 200°C e 600°C, pela decomposição de hidróxido de cálcio e evaporação de água combinada.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) e à UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) pela estrutura laboratorial e pelos recursos materiais. Agradecemos às instituições que ofereceram apoio financeiro para este trabalho: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), bolsa de doutorado concedida a Aldo Ribeiro de Carvalho, código de financiamento 001 e bolsa de mestrado concedida a Gabriela dos Santos Pacífico; e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), auxílio APQ-01904-22 para Thaís Oliveira. Por fim, agradecemos ao grupo de pesquisa ATIVE-CNPq pelo apoio e colaboração.

REFERÊNCIAS

ABDEL-LATIEF, M. A. K. et al. A new insight upon the use of weathered basalt as alternative raw material in Portland clinker production. **Ain Shams Engineering Journal**, 2021. 885-896.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. ABNT. Rio de Janeiro. 2012.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. ABNT. Rio de Janeiro. 2014.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. ABNT. Rio de Janeiro. 2014.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5751:** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. ABNT. Rio de Janeiro. 2015.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. ABNT. Rio de Janeiro. 2017.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. ABNT. Rio de Janeiro. 2018.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT. Rio de Janeiro. 2018.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8802:** Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. ABNT. Rio de Janeiro. 2019.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e deformação. ABNT. Rio de Janeiro. 2021.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BREKAILO, F. et al. Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack. **Cleaner Materials**, March 2022.

CARVALHO, A. R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, August 2023.

DEMIREL, B.; KELESTEMUR, K. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. **Fire Safety Journal**, 2010. 385-391.

DYER, T. **A Durabilidade do Concreto**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna LTDA, 2015.

HAMADA, H. M. et al. The use of palm oil clinker as a sustainable construction material: A review. **Cement and Concrete Composites**, n. 106, 2020.

HER, S. et al. Feasibility study on utilization of pulverized eggshell waste as an alternative to limestone in raw materials for Portland cement clinker production. **Construction and Building Materials**, n. 324, 1 February 2022.

HOPPE FILHO, J. et al. Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, 2021.

JAIN, P.; GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. A literature review on the effect of using ceramic waste as supplementary cementitious materials in cement composites on workability and compressive strenght. **Materials Today: Proceedings**, n. 65, 2022. 871-876.

LAUSSEUGUETTE, E. et al. Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems. **Journal of Cleaner Production**, 20 February 2019.

LOTERO, A.; MONCALEANO, C. J.; CONSOLI, N. C. Alkali-activated red ceramic wastes-carbide lime blend: An alternative alkaline cement manufactured at room temperature. **Journal of Building Engineering**, April 2023.

RILEM. Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages. **RILEM TC 129-MHT:** Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 4: Tensile strength. Viena (Áustria): [s.n.], 2000.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, January 2014. 113-125.

SAMADI, M. et al. Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. **Journal of Cleaner Production**, September 2020.

SILVA, H. T. D. et al. Reuse of red ceramic waste in the production of concrete for civil construction. **Research, Society and Development**, 2021.

TURKOGLU, M. et al. Effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the performance of one-part alkali-activated hybrid slag/clinker composites. **Journal of Building Engineering**, 26 February 2023.