XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8274

Análise termomecânica de concretos de alto desempenho com óxido de grafeno rico em carbonila

Thermomechanical analysis of high-performance concretes with carbonyl-rich graphene oxide

Gabriela dos Santos Pacífico
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | gabrielapacifico13@gmail.com
Marcela Martins Carrara
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | marcelamartinscarrara@gmail.com
Aldo Ribeiro de Carvalho
UFOP | Ouro Preto | Brasil | aldorcarvalho@outlook.com
Marina Costa Totti
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | marinatotti26@gmail.com
Welber Gianini Quirino
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | wgquirino@ice.ufjf.br
Julia Castro Mendes
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | juliacastro.mendes@ufjf.br
Thaís Mayra de Oliveira
UFJF | Juiz de Fora | Brasil | thais.mayra@ufjf.br

Resumo

O concreto de alto desempenho apresenta elevada resistência e durabilidade, mas é mais suscetível ao *spalling* em altas temperaturas devido à sua microestrutura densa. Este estudo avaliou a adição de 0,02% de óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) nas propriedades termomecânicas do material, sob temperatura ambiente e após exposição a 300, 600 e 900°C. Foram realizados ensaios de índice de vazios, absorção de água, velocidade de pulso ultrassônico, resistência à compressão e à tração e condutividade térmica. Os resultados mostraram aumento de 26,9% na resistência à compressão em temperatura ambiente e de 42,2% após exposição a 900°C, além de redução de 58,6% na absorção de água e da condutividade térmica, indicando o potencial do CGO para melhorar o desempenho estrutural e térmico do concreto.
Palavras-chave: Óxido de grafeno. Concreto de alto desempenho. Propriedades termomecânicas.

Abstract

High-performance concrete exhibits high strength and durability but is more susceptible to spalling at elevated temperatures due to its dense microstructure. This study evaluated the effect of adding 0.02% carbonyl-rich graphene oxide (CGO) on the thermomechanical properties of the material at room temperature and after exposure to 300, 600, and 900°C. Tests were performed to determine void index, water absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive and tensile strength, and thermal conductivity. The results showed a 26.9% increase in compressive strength at room temperature and a 42.2% increase after exposure to 900°C, along with a 58.6% reduction in water absorption and lower thermal conductivity, demonstrating the potential of CGO to improve the structural and thermal performance of concrete.
Keywords: Graphene oxide. High-performance concrete. Thermomechanical properties.

Como citar:
PACÍFICO, G. S.; CARRARA, M. M.; CARVALHO, A. R.; TOTTI, M. C.; QUIRINO, W. G.; MENDES, J. C.; OLIVEIRA, T. M. Análise termomecânica de concretos de alto desempenho com óxido de grafeno rico em carbonila. ENTAC 2026. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8274

INTRODUÇÃO

O concreto de alto desempenho (CAD) caracteriza-se por elevada resistência mecânica, durabilidade e microestrutura densa, sendo produzido com baixos fatores água/cimento, alto consumo de cimento Portland, uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) e aditivos químicos [1] [2] [3]. A incorporação de sílica ativa, metacaulim e cinzas volantes contribui para a densificação do compósito por meio dos efeitos *filler* e pozolânico, promovendo a formação adicional de C-S-H e a redução da porosidade [4] [5]. Como resultado, o CAD apresenta propriedades superiores às do concreto convencional, como maior resistência à compressão, maior módulo de elasticidade e elevado desempenho em termos de durabilidade [6]. Entretanto, a baixa permeabilidade e o reduzido índice de vazios tornam o material mais suscetível ao lascamento explosivo (*spalling*) quando exposto a altas temperaturas [7] [8].

A exposição do concreto a temperaturas elevadas pode ocorrer tanto em condições de serviço quanto em situações excepcionais, como incêndios, provocando alterações químicas e microestruturais que comprometem suas propriedades mecânicas [9]. A decomposição da portlandita, a degradação do C-S-H, a dilatação térmica diferencial entre pasta e agregados e o aumento da pressão de vapor nos poros contribuem para fissuração, perda de resistência e ocorrência de *spalling* [10]. Embora o concreto apresente condutividade térmica relativamente baixa em comparação a outros materiais estruturais [11], essa característica favorece a formação de elevados gradientes térmicos e o acúmulo de tensões internas durante incêndios [12].

Nesse contexto, a incorporação de nanomateriais em compósitos cimentícios tem sido amplamente investigada como estratégia para mitigar danos térmicos e aprimorar o desempenho mecânico e microestrutural [13] [14] [15]. Recentemente, avanços nos métodos de síntese de óxido de grafeno (GO) permitiram o desenvolvimento do óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO), cujas propriedades físico-químicas podem ser ajustadas por abordagens oxidativas inovadoras [16]. A elevada área superficial específica do CGO e a predominância de grupos funcionais carbonila favorecem sua interação com os produtos de hidratação do cimento, atuando como sítios de nucleação para o gel C-S-H, refinando a estrutura de poros e reduzindo a porosidade capilar. Além disso, o nanomaterial contribui para o fortalecimento da zona de transição interfacial (ZTI) entre pasta e agregados, promovendo uma distribuição mais homogênea das tensões e dificultando a propagação de microfissuras. Essas modificações microestruturais podem resultar em maior resistência mecânica, menor

permeabilidade e maior estabilidade após exposição a temperaturas elevadas. Até o momento, os estudos com esse nanomaterial concentram-se em concretos da classe C35 e na avaliação de sua dosagem ideal em temperatura ambiente [17] [18]. Em comparação ao GO convencional, o CGO apresenta maior concentração de grupos carbonila, o que favorece interações químicas mais intensas com os produtos de hidratação do cimento, promovendo maior nucleação de C-S-H e resultando em uma microestrutura mais densa e refinado. Assim, o presente estudo inova ao avaliar as propriedades do CAD com incorporação de CGO após exposição a diferentes gradientes de temperatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

O cimento empregado foi o CP V-ARI, selecionado por seu elevado teor de clínquer, maior finura e rápida evolução de resistência, o que favorece a avaliação do efeito isolado do CGO na matriz cimentícia [19]. Utilizaram-se agregados naturais caracterizados conforme a NBR 7211 [20], sílica ativa como adição mineral para promover a densificação da matriz e melhorar o desempenho mecânico, além de aditivos plastificante e superplastificante, a fim de garantir adequada trabalhabilidade e dispersão do nanomaterial [21] [22].

O CGO foi sintetizado pelo grupo NANO-UFJF e fornecido em suspensão aquosa, com concentração de 5mg/mL. A suspensão foi dispersa por ultrassonicação durante 60 minutos, utilizando um sonificador de potência 140W, procedimento adotado para minimizar a aglomeração das nanopartículas. O procedimento de síntese e a caracterização do CGO seguiram a metodologia descrita por Lima [23], que evidenciou a predominância de grupos funcionais carbonila. A identificação dos grupos funcionais foi realizada por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), e sua quantificação por espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS), evidenciando a predominância de grupos carbonila.

A água presente na suspensão aquosa de CGO foi contabilizada no cálculo da relação água/cimento. A suspensão foi incorporada diretamente à mistura durante o preparo do concreto, promovendo a dispersão do nanomaterial na matriz cimentícia. A dosagem do concreto foi definida com base em estudos prévios sobre concretos de alto desempenho contendo nanomateriais, adotando-se o teor de 0,02% de CGO por apresentar o melhor desempenho mecânico em pesquisas anteriores [17] [18].

PROGRAMA EXPERIMENTAL E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Inicialmente, foram produzidos dois traços: um concreto de referência, sem adição de nanomaterial (C-REF), e um concreto contendo 0,02% de CGO em relação à massa de cimento (C-CGO), a composição dos traços é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Traços de referência (C-REF) e com adição CGO (C-CGO).

	Cimento	Areia Natural	Brita 0	Fator a/c	Consumo de cimento (Kg/m³)	Aditivo Plastif. (%)	Aditivo Superplast. (%)	Sílica Ativa (%)	CGO (%)
C-REF	1	1,175	1,189	0,4	545	0,2	0,25	12	0
C-CGO	1	1,175	1,189	0,4	545	0,2	0,25	12	0,02

Fonte: os autores.

O preparo do concreto ocorreu em misturador mecânico e moldagem se deu em corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm seguindo as prescrições normativas e cura até os 28 dias [24].

Após a cura, os corpos de prova foram submetidos a ciclos térmicos em forno Mufla da marca Up Brasil, com taxa de aquecimento de 1°C/min e patamar isotérmico de 180 minutos [25]. Após resfriamento natural, realizaram-se ensaios de índice de vazios, absorção de água e massa específica [26], velocidade de pulso ultrassônico [27], resistência à compressão [28], tração por compressão diametral [29], módulos de elasticidade [28] e condutividade térmica. Os resultados foram analisados estatisticamente por meio de ANOVA one-way, adotando-se nível de significância de 5%.

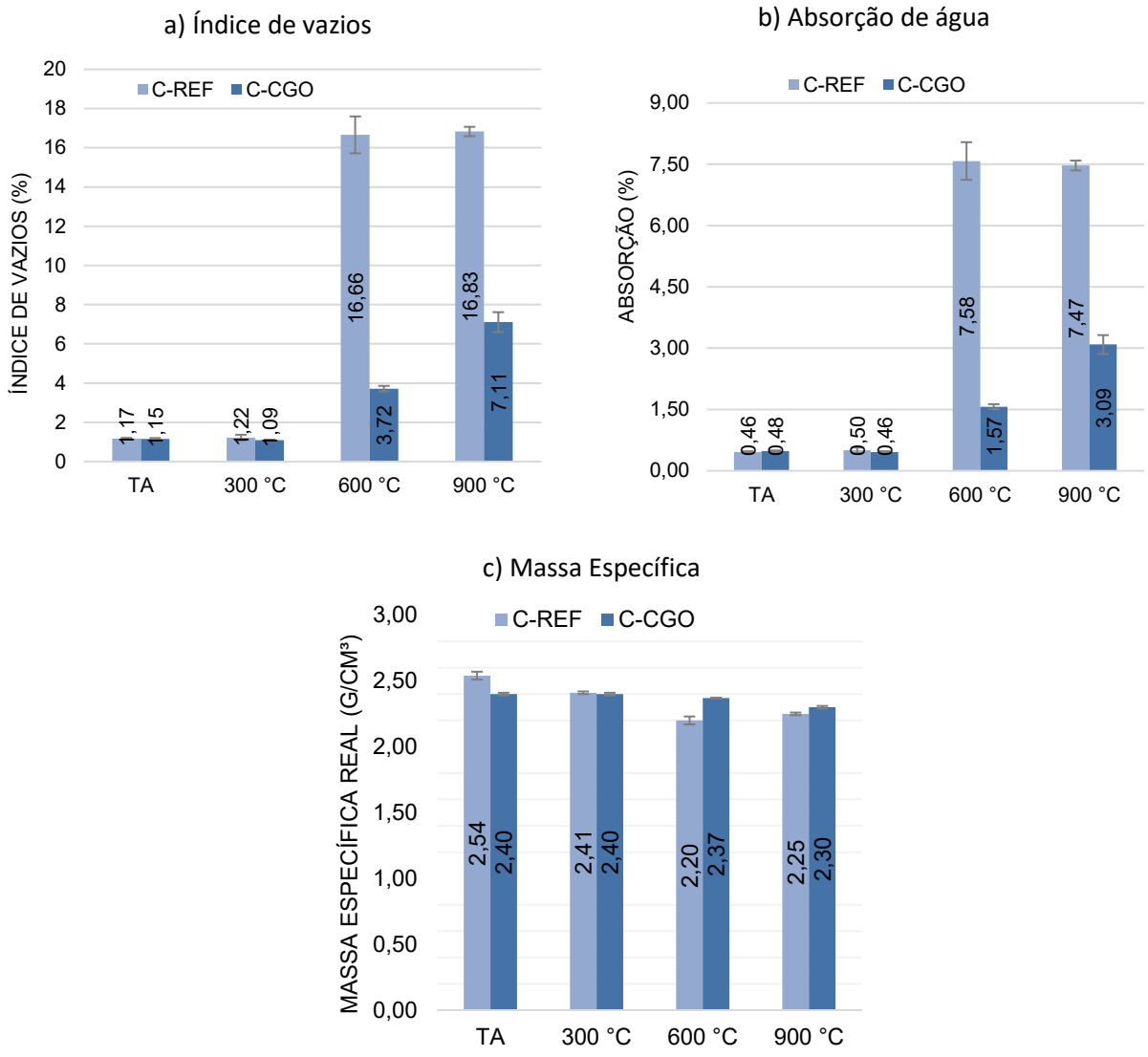
RESULTADOS E DISCUSSÕES

ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA

A Figura 1 apresenta os resultados de índice de vazios, absorção de água e massa específica. Observa-se que o aumento da temperatura de exposição promoveu elevação significativa no índice de vazios e na absorção de água. A 900°C, em relação à temperatura ambiente (TA), o índice de vazios apresentou aumento de 16,17% a 900°C, enquanto a absorção de água aumentou 7,12%. Nessa mesma condição, observa-se que o concreto de referência (C-REF) apresentou absorção significativamente superior (7,47%) em comparação ao concreto com CGO (3,09%), evidenciando a maior resistência deste último à degradação térmica e à formação de poros conectados.

Esse comportamento está associado principalmente à evaporação da água presente nos poros e à formação de microfissuras na matriz cimentícia em função da exposição a elevadas temperaturas [30] [31]. O concreto com 0,02% de CGO apresentou variações menos acentuadas, indicando possível refinamento da estrutura de poros. Em temperatura ambiente e 300°C não houve diferença estatística significativa entre os traços. Entretanto, nas temperaturas de 600°C e 900°C, o concreto com incorporação de CGO apresentou desempenho ligeiramente superior em relação ao traço de referência, evidenciado pelos menores valores de índice de vazios, com aumento de 2,57% e 5,96%, respectivamente.

Figura 1: Resultados de ensaios de a) Índice de vazios, b) absorção de água e c) massa específica.



Fonte: os autores.

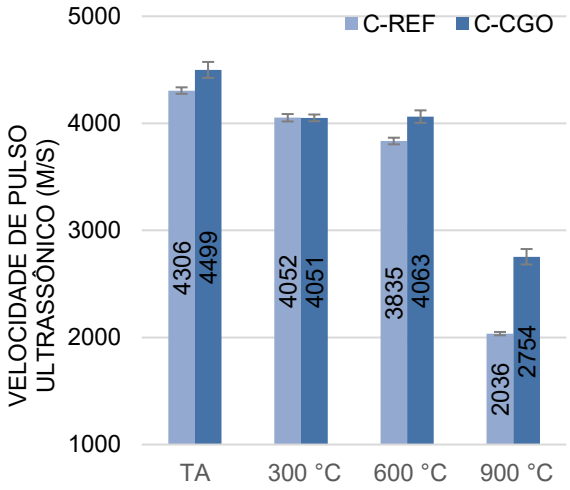
Nota-se na Figura 1c que a massa específica apresentou pequenas variações com o aumento da temperatura. As reduções observadas estão associadas à evaporação de

água interna e à formação de poros durante o aquecimento [30]. O concreto com CGO apresentou menor variação em temperaturas elevadas. Esse comportamento sugere uma microestrutura mais densa e estável, em concordância com estudos anteriores que reportam que a incorporação de óxido de grafeno promove refinamento da estrutura de poros, redução da porosidade total e formação de produtos de hidratação mais densos na matriz cimentícia [32].

VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Na Figura 2, nota-se que a VPU reduz com o aumento da temperatura, indicando aumento da porosidade e da fissuração interna [33] e em conformidade com os dados apresentados no ensaio de índice de vazios. Os concretos com CGO apresentaram valores iguais ou superiores ao concreto de referência. Esse comportamento sugere uma microestrutura mais densa, conforme também foi aferido no ensaio de massa específica (Figura 1 c). As diferenças tornam-se mais evidentes em temperaturas mais elevadas, indicando uma menor degradação.

Figura 2: Resultados de ensaios de velocidade de pulso ultrassônico.



Fonte: os autores.

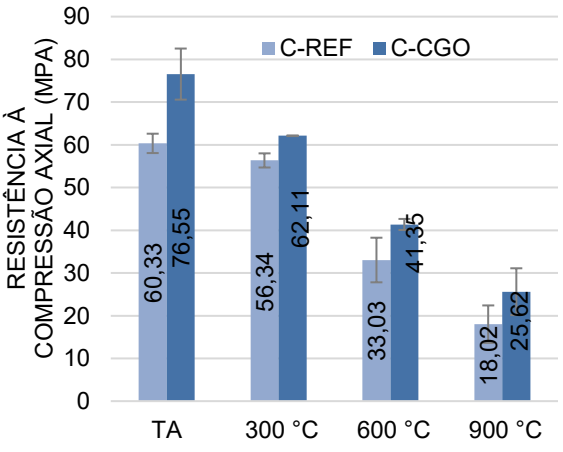
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 3 mostra que o concreto com CGO apresentou resistência à compressão superior em temperatura ambiente, atribuída ao efeito de nucleação e à densificação da matriz cimentícia, fenômenos amplamente reportados para nanomateriais à base de grafeno, que atuam como sítios de nucleação e promovem o refinamento da estrutura de poros e da zona de transição interfacial (ZTI) [34] [30]. Além disso, a elevada área superficial e a presença de grupos funcionais oxigenados favorecem

interações com os hidratos do cimento, resultando em uma matriz mais coesa. Esse refinamento microestrutural também contribui para reduzir a concentração de tensões na zona de transição interfacial (ZTI), retardando a nucleação e a propagação de microfissuras durante o carregamento mecânico. Após a exposição às temperaturas elevadas, embora ambos os concretos tenham apresentado redução de resistência devido à decomposição dos produtos de hidratação, o concreto com CGO manteve maiores resistências residuais em todas as temperaturas avaliadas. Esse comportamento indica que a matriz mais densa formada pela incorporação do nanomaterial reduz os efeitos da degradação térmica, preservando parcialmente a integridade estrutural do compósito. Com o aumento da temperatura ocorreu redução significativa da resistência em ambos os traços.

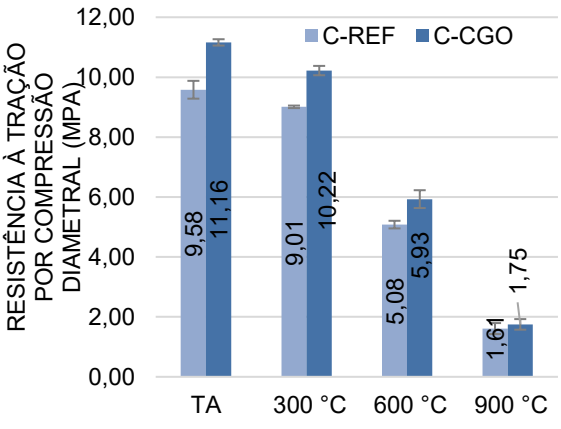
Na Figura 4, nota-se que a resistência à tração diminuiu com o aumento da temperatura devido à formação de fissuras internas e degradação da matriz [31]. Em temperatura ambiente, o concreto com CGO apresentou resistência superior ao C-REF. Nas temperaturas elevadas não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os traços. Mesmo após aquecimento, o concreto com CGO manteve valores superiores ao concreto de referência, o que indica maior estabilidade mecânica após exposição térmica.

Figura 3: Resultados de ensaios de resistência a compressão axial.



Fonte: os autores.

Figura 4: Resultados de ensaios de resistência a compressão diametral.



Fonte: os autores.

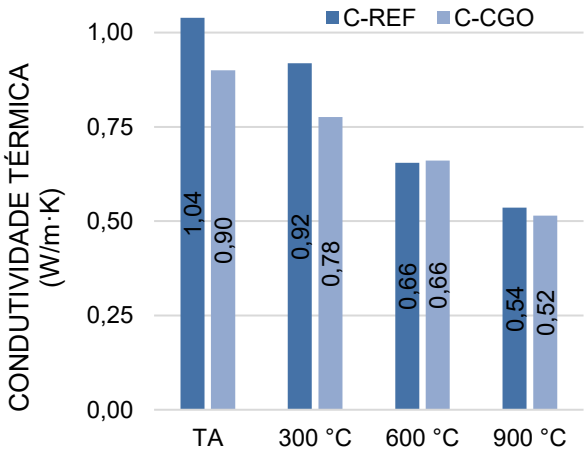
A manutenção simultânea de maiores resistências à compressão e à tração indica que a incorporação de CGO melhora não apenas a capacidade resistente do concreto, mas também sua capacidade de redistribuir tensões após a formação das primeiras

microfissuras, aspecto particularmente importante em concretos submetidos a elevadas temperaturas.

CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os resultados indicam a redução da condutividade térmica com o aumento da temperatura em ambos os concretos, associada à evaporação da água e à formação de poros e microfissuras no material [35]. Conforme Figura 5, o concreto com 0,02% de CGO apresentou menor condutividade em TA (≈13,5%) e a 300°C (≈15%) em relação ao C-REF, enquanto em 600°C e 900°C não foram observadas diferenças significativas. Essa redução pode estar relacionada à reorganização da estrutura de poros e ao refinamento dos poros que dificultam a transferência de calor [36]. Estudos anteriores também relatam comportamento semelhante, associando a presença de nanomateriais ao refinamento da microestrutura e à menor condução térmica em compósitos cimentícios [37].

Figura 5: Resultados de ensaios de condutividade térmica.



Fonte: os autores.

A análise conjunta dos ensaios evidencia uma tendência consistente entre as propriedades avaliadas. Os menores valores de índice de vazios e absorção de água observados no concreto com CGO indicam uma matriz cimentícia mais densa, resultado que se refletiu nos maiores valores de velocidade de pulso ultrassônico, uma vez que a propagação das ondas é favorecida em materiais com menor quantidade de descontinuidades internas. Essa melhoria microestrutural também se traduziu em maiores resistências à compressão e à tração, especialmente em temperatura ambiente, e em melhor desempenho residual após a exposição às temperaturas elevadas. Da mesma forma, a redução da condutividade térmica sugere uma estrutura de poros mais refinada, contribuindo para retardar a transferência de calor para o interior do concreto e, consequentemente, minimizar os mecanismos de degradação térmica. Em conjunto, os resultados indicam que a incorporação de CGO promove modificações microestruturais capazes de influenciar simultaneamente o desempenho físico, mecânico e térmico do concreto de alto desempenho.

CONCLUSÕES

A incorporação de 0,02% de óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) demonstrou influência positiva no desempenho do concreto de alto desempenho avaliado neste estudo. Em temperatura ambiente, o concreto com CGO apresentou melhorias nas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à compressão e à tração, associadas ao efeito de nucleação e ao refinamento da microestrutura da matriz cimentícia.

Após a exposição a temperaturas elevadas (300°C, 600°C e 900°C), verificou-se redução das propriedades mecânicas e alterações físicas em ambos os concretos, comportamento esperado devido à degradação dos produtos de hidratação e possivelmente ao surgimento de microfissuras. No entanto, o concreto com CGO apresentou melhor desempenho residual, menores perdas de massa e variações menos acentuadas em parâmetros físicos, indicando maior estabilidade microestrutural após os ciclos térmicos.

Além disso, observou-se redução da condutividade térmica nas matrizes contendo CGO, principalmente em temperatura ambiente e a 300°C, sugerindo uma transferência de calor mais gradual no interior do compósito. Esse comportamento pode estar associado ao refinamento da estrutura de poros e à reorganização da rede porosa promovida pela presença do nanomaterial, e pode ter contribuído para os menores efeitos de degradação observados.

De forma geral, os resultados indicam que a adição de CGO contribui para o desenvolvimento de CAD com propriedades mecânicas aprimoradas e melhor comportamento térmico, demonstrando potencial para aplicações estruturais em condições em que o material possa estar sujeito a temperaturas elevadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), à UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) e à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP (Universidade de São Paulo) pela infraestrutura laboratorial e pelos recursos materiais disponibilizados. Expressamos também nossa gratidão às instituições que forneceram apoio financeiro para a realização deste trabalho: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

DECLARAÇÃO

Durante a confecção deste artigo os autores utilizaram o ChatGPT para verificação e aperfeiçoamento gramatical. Após a utilização da(s) ferramenta/serviço, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIA

[1] R. Christ, B. Tutikian e F. Pacheco, “Estudo comparativo entreconcretos de alto desempenhoe compósitos cimentíciosavançados,” *Ibracon - Revista Concreto & Construções,* nº 79, 2015.

[2] R. Supritha, P. Prasath, S. Alan, B. C. Bhatt, B. A. Dubay e S. Kaliappan, “Comparative study between high performance concretes and advanced cementitious composites,” *Materials Today: Proceedings,* September 2023.

[3] J. Z. Schiavon, P. M. Borges, S. R. d. Silva e J. J. d. O. Andrade, “Análise das propriedades mecânicas e microestruturais de concretos de alto desempenho contendo nanossílica e sílica ativa,” *Revista Matéria,* vol. 26, 2021.

[4] S. Patil, H. S. Rao e V. G. Ghorpade, “The influence of metakaolin, silica fume, glass fiber, and polypropylene fiber on the strength characteristics of high performance concrete,” *Materials Today: Proceedings,* vol. 80, pp. 577-586, 2023.

[5] P. R. Kumar e D. Harikrishna, “Strength and microstructural characterization of silica fume blended concrete with increased curing period,” *Materials Today: Proceedings,* May 2024.

[6] A. Paul e E. John, “Study on the optimisation of cement and binder content to develop a sustainable high-performance concrete,” *Materials Today: Proceedings,* December 2023.

[7] A. R. d. Carvalho, A. H. G. Casali, G. d. S. Júnior, R. P. Pita, M. C. R. Farage e T. M. d. Oliveira, “Analysis of the thermomechanical behavior of different concretes with vermiculite and submitted to elevated temperatures,” *REM, Int. Eng. J.,* vol. 77, nº 3, jul.sep 2024.

[8] M. N. Mohammad Khaled al-Bashiti, “What can we learn from over 1000 tests on fire-induced spalling of concrete? A statistical investigation of critical factors and unexplored research space,” *Construction and Building Materials,* vol. 403, November 2023.

[9] S. Liu, W. Zheng, X. Hou e Y. Wang, “Research on the residual compressive properties of concrete with preload after sustained high temperatures,” *Structures,* vol. 65, 2024.

[10] J. Guo, W. Tian, X. Cheng e W. Yun, “Study on the evolution of concrete pore structure and moisture transfer mechanism after high temperature based on different sequence NMR technology,” *Construction and Building Materials,* vol. 422, April 2024.

[11] A. Nobre, “Tudo sobre condutividade térmica dos metais (fórmula e tabela),” 2025. [Online]. Available: https://acosnobre.com.br/. [Acesso em 2025].

[12] L. M. Martins, “Investigação do comportamento de matrizes cimentícias quando expostas a altas temperaturas,” 2024.

[13] A. M. Onaizi, G. F. Huseien, N. H. A. S. Lim, M. Amran e M. Samadi, “Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review,” *Construction and Building Materials,* vol. 306, 2021.

[14] Y. Liu, X. Zhong e H. R. Mohammadian, “Role carbon nanomaterials in reinforcement of concrete and cement; A new perspective in civil engineering,” *Alexandria Engineering Journal,* vol. 72, 2023.

[15] D. Hwangbo, D.-H. Son, H. Suh, J. Sung, B.-I. Bae, S. Bae, H. So e C.-S. Choi, “Effect of nanomaterials (carbon nanotubes, nano-silica, graphene oxide) on bond behavior between concrete and reinforcing bars,” *Case Studies in Construction Materials,* vol. 18, 2023.

[16] A. H. d. Lima, C. T. Tavares, C. C. S. d. Cunha, N. C. Vicentini, G. R. Carvalho, B. Fragneaud, I. O. Maciel, C. Legnani, W. G. Quirino, L. F. C. d. Oliveira, F. Sato e J. P. A. d. Mendonça, “Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide,” *The European Physical Journal B,* vol. 93, June 2020.

[17] M. M. C. G. d. S. P. A. C. R. T. M. Natâny Pinho Rosa, “Influência da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila nas propriedades mecânicas do concreto,” em *ENTAC*, 2024.

[18] A. R. d. Carvalho, M. M. Carrara, G. d. S. Pacífico, N. P. Rosa, L. Leal, M. C. Totti, N. C. Vicentini, A. H. d. Lima, W. G. Quirino e T. M. d. Oliveira, “Evaluation of mechanical properties and determination of the optimal concentration of a new carbonyl-rich graphene oxide in cementitious composites,” *Case Studies in Construction Materials,* p. e05184. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05184, 2025.

[19] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos,” 2018.

[20] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação,” 2022.

[21] K. Gong, Z. Pan, A. H. Korayem, L. Qiu, D. Li, F. Collins, C. M. Wang e W. H. Duan, “Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste,” *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 27, pp. 1-6, 2015.

[22] SIKA, “Ficha do Produto - Sika ViscoCrete® GL 51,” Osasco, 2024.

[23] A. H. d. Lima, “Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno e Aplicações em Eletrônica Orgânica.,” Juiz de Fora, 2017.

[24] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.,” 2019.

[25] S. Han, M. S. Hossain, T. Ha e K. K. Yun, “Graphene-oxide-reinforced cement composites mechanical and microstructural characteristics at elevated temperatures,” *Nanotechnology Reviews,* vol. 11, December 2022.

[26] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica,” 2009.

[27] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.,” 2021.

[28] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão,” 2021.

[29] A. B. D. N. T. ABNT, “NBR 7222: Concreto e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos,” 2011.

[30] B. Ren, E. Bai, X. Luo, T. Wang e Z. Wang, “Impact mechanical properties and pore structure of graphene oxide concrete at high temperature,” *Journal of Building Engineering,* vol. 85, May 2024.

[31] P. Rao, J. Prakash, R. Alexander, M. Shinde e K. Dasgupta, “Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete,” *Diamond and Related Materials,* vol. 147, 2024.

[32] b. Z.-Y. Hu, i. Wan, Y.-J. D. Y.-H. S. h.-P. Gu, u. Ma e i.-J. Dong, “A Review of the Impact of Graphene Oxide on Cement Composites,” *MDPI,* 2025.

[33] E. F. B. Motta, A. R. d. Carvalho, J. G. D. Barra, I. O. Maciel e T. M. d. Oliveira, “Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes,” *Journal of Building Engineering,* vol. 96, 2024.

[34] L. H. L. Q. A. H. K. G. L. J. Z. F. G. C. D. L. W. D. C. M. W. Zhu Pan, “Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite,” *Monash Centre for Electron Microscopy (MCEM),* 2015.

[35] K.-H. Kim, S.-E. Jeon, J.-K. Kim e S. Yang, “An experimental study on thermal conductivity of concrete,” *Cement and Concrete Research,,* vol. 33, p. 363–371, 2003.

[36] J. C. Mendes, R. R. Barreto, A. C. B. d. Paula, F. P. d. F. Elói, G. J. Brigolini e R. A. F. Peixoto, “On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites,” *Cement and Concrete Composites,* 2019.

[37] H. Liu, Y. Fan, Z. Hang, J. Yang, C. Feng, Y. Su e G. J. Weng, “Hybrid micromechanical modelling and experiments on temperature-dependent thermal conductivity of graphene reinforced porous cement composites,” *Journal of Building Engineering,* vol. 86, 2024.