

Avaliação de concreto com nanotubos de carbono de múltiplas paredes funcionalizados e não funcionalizados submetidos a altas temperaturas

Evaluation of concrete with functionalized and non-functionaized multi-wall carbon nanotubes subjected to high temperatures

Júlia Gargiulo Duarte Barra, Engenheira, Universidade Federal de Juiz de Fora

julia.gdbarra@gmail.com

Aldo Ribeiro de Carvalho, Mestre, Universidade Federal de Ouro Preto

aldorcarvalho@outlook.com

Edlaine Feital Barbosa Motta, Mestre, Universidade Federal de Juiz de Fora

edlainefbm@hotmail.com

Indhira Oliveira Maciel, Doutora, Universidade Federal de Juiz de Fora

indhira@fisica.ufjf.br

Thais Mayra de Oliveira, Doutora, Universidade Federal de Juiz de Fora

thais.mayra@ufjf.br

Número da sessão temática da submissão – [03]

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de nanotubos de carbono de paredes múltiplas no concreto de alto desempenho, visando contribuir para o avanço técnico-científico, dada a escassez de pesquisas sobre nanomateriais em matrizes cimentícias. Para isso, foram produzidos concretos classe 50 (50 MPa) com nanotubos funcionalizados e não funcionalizados, expostos a diferentes temperaturas: ambiente, 300°C, 600°C e 900°C. Para a confecção dos corpos de prova com nanotubos, estes foram dispersos em solução aquosa através da dispersão ultrassônica. Os testes avaliaram resistência à compressão, resistência à tração, massa específica, absorção e velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que o concreto com nanotubos não apresentou melhorias significativas em relação ao concreto de referência, com propriedades semelhantes em resistência e absorção. Conclui-se que a principal causa para os resultados obtidos foi a dificuldade de dispersão dos nanotubos ao concreto, que depende de técnicas mais avançadas, além também de mais estudos na área dos nanomateriais.

Palavras-chave: Concreto; Nanotubos de Carbono; Propriedades Termomecânicas

Abstract

This study aimed to evaluate the feasibility of using multi-walled carbon nanotubes in high-performance concrete, aiming to contribute to technical-scientific advancement, given the scarcity of research on nanomaterials in cementitious matrices. For this purpose, class 50 concretes (50 MPa) were produced with functionalized and non-functionalized nanotubes, exposed to different temperatures: room temperature, 300°C, 600°C and 900°C. To prepare the specimens with nanotubes, these were dispersed in aqueous solution through ultrasonic dispersion. The tests evaluated compressive strength, tensile strength, specific mass, absorption and ultrasonic pulse speed. The results showed that the concrete with nanotubes did not present significant improvements in relation to the reference concrete, with similar properties in strength and absorption. It is concluded that the main cause for the results obtained was the difficulty of dispersing the nanotubes in the concrete, which depends on more advanced techniques, in addition to further studies in the area of nanomaterials.

Keywords: Concrete; Carbon Nanotubes; Thermomechanical Properties

1. Introdução

O concreto é o material mais utilizado nas construções brasileiras e sua qualidade deve ser acompanhada durante a execução do projeto (Carvalho *et al.*, 2023b). Para isso, devem ser estudadas as propriedades deste material, com a elaboração de um traço ideal, a fim de aprimorar características como sua resistência à tração, compressão, capacidade de deformação e susceptibilidade à fissuração (Lopes *et al.*, 2022).

Um dos requisitos exigidos ao concreto é sua resistência quando submetido ao calor, uma vez que essa condição pode deteriorar sua estrutura e comprometer sua durabilidade (Oliveira, 2006). Nesse aspecto, são diversas as situações que podem exigir que o concreto trabalhe em elevadas temperaturas, como infraestrutura industrial, dutos, e em situações de incêndio (Oliveira, 2006).

Diante da susceptibilidade das estruturas a danos quando expostas a altas temperaturas, torna-se imperativo o estudo de materiais que possam aprimorar a resistência do concreto, tanto quando submetido a situações de incêndio quanto a situações de altas temperaturas diversas, como por exemplo em indústrias. Nesse contexto, diversos materiais tem sido investigados na construção civil, como o uso de ligantes geopoliméricos (Carvalho *et al.*, 2023; Carvalho *et al.*, 2025), ou mesmo a adoção de nanotecnologia que desenvolve materiais mais leves e resistentes a altas temperaturas (Lima, Silva e Silva, 2017; Baloch *et al.*, 2018)

Nesse contexto, os nanotubos de carbono são uma nanotecnologia que começou a ser estudada no início da década de 1990, em virtude de seus potenciais benefícios mecânicos, bem como da redução do número de vazios e do aumento da durabilidade do concreto (Kremer *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2025). São estruturas cilíndricas formadas por folhas de grafeno, podendo apresentar configuração em paredes simples ou múltiplas, além de estarem disponíveis no formato funcionalizado ou não-funcionalizado (Silva, 2019).

Os nanotubos de carbono (CNTs) podem ser utilizados na forma não funcionalizada (CNT) ou funcionalizada (CNT-F). Estruturalmente, esses nanomateriais podem apresentar parede única ou múltiplas paredes formadas por folhas de grafeno enroladas (Silvestro e Gleize, 2020).

Entre essas configurações, os nanotubos de múltiplas paredes são os mais empregados, devido à maior viabilidade de produção em larga escala e ao menor custo em comparação aos de parede única (Rashad, 2017).

A funcionalização dos CNTs consiste em um tratamento que visa modificar sua superfície, com o objetivo de aumentar a reatividade química e melhorar a dispersão, especialmente em meios aquosos (Osório, 2008). Esse processo pode ocorrer por vias covalentes ou não covalentes (Silva, 2019).

Na funcionalização covalente, são introduzidos grupos funcionais diretamente na estrutura dos nanotubos, promovendo alterações em suas propriedades físico-químicas e aumentando a interação com a matriz cimentícia (Borges, 2019). Já na funcionalização não covalente, utilizam-se surfactantes que se adsorvem à superfície dos CNTs. Esses compostos possuem uma porção hidrofílica e outra hidrofóbica, permitindo envolver os nanotubos e formar estruturas estáveis em suspensão, o que favorece sua dispersão (Vaisman, Wagner e Marom, 2006).

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades termomecânicas de concretos contendo nanotubos de carbono de múltiplas paredes, submetidos às temperaturas de ambiente, 300 °C, 600 °C e 900 °C. Adicionalmente, o estudo busca comparar o desempenho dessas misturas com um concreto de referência, bem como analisar a influência da utilização de nanotubos funcionalizados e não funcionalizados nas propriedades do compósito.

2. Materiais e Método

2.1 Materiais utilizados, moldagem, cura e aquecimento dos corpos de prova

O traço de concreto utilizado é da Classe 50, onde espera-se uma resistência de projeto de 50 MPa e foi anteriormente estudado por Carvalho et al. (2024) como pode ser observado no Quadro 1. Além disso, a escolha da concentração de nanotubos se baseou no trabalho de Xiaobin et al. (2020) onde foram estudados concretos com adições de nanotubos de carbono em até 0,15%. Nesta pesquisa, o desempenho mecânico ótimo foi identificado com a essa mesma concentração de 0,15% em relação a massa de cimento. Salienta-se que esta proporção foi utilizada tanto para os traços com nanotubos funcionalizados quanto não-funcionalizados.

Quadro 1: Misturas de concreto utilizadas na pesquisa.

Mistura	Cimento	Areia natural	Brita 0	Relação água/cimento	Microsilica (%)	Aditivo plastificante (%)	Aditivo superplastificante (%)	Nanotubos de carbono (%)	Consumo de cimento (kg/m³)
Amostras de referência	1	1,175	1,819	0,401	12	0,2	0,5	0	545
Amostras com nanotubos funcionalizados	1	1,175	1,819	0,401	12	0,2	0,5	0,15	545
Amostras com nanotubos não-funcionalizados	1	1,175	1,819	0,401	12	0,2	0,5	0,15	545

Fonte: Os autores (2026).

Os nanotubos de carbono utilizados na pesquisa foram dispersos em solução aquosa. Para isso, os nanotubos foram, inicialmente, adicionados a metade do volume total de água do traço, juntamente com 0,1% de aditivo policarboxilato. Posteriormente, a solução foi submetida à sonificação por um período total de duas horas, utilizando o homogeneizador ultrassônico. Em seguida, o traço composto por cimento, areia, brita, sílica ativa e a quantidade restante de água foi preparado em um misturador mecânico. Após atingir a homogeneização, a água contendo os nanotubos foi adicionada à mistura, e os materiais foram novamente homogeneizados.

O preparo das amostras foi dividido em três etapas: a primeira correspondeu à moldagem de corpos de prova de referência, sem adição de nanotubos de carbono; a segunda, à moldagem com adição de nanotubos funcionalizados (NTC-F); e a terceira, com adição de nanotubos não funcionalizados (NTC-NF). A moldagem foi realizada em moldes cilíndricos de 5 × 10 cm, por meio da compactação em quatro camadas, cada uma adensada com 30 golpes de soquete metálico. Em seguida, a superfície foi nivelada com uma espátula, e os corpos de prova foram dispostos em câmara úmida por 72 horas. Após esse período, foram desmoldados e submersos em água até completarem 28 dias de cura. Após a etapa de cura, as amostras foram submetidas a temperaturas de 300 °C, 600 °C e 900 °C, utilizando uma mufla Up Brasil, com taxa de aquecimento de 0,5 °C/min. O tempo de exposição na temperatura máxima foi de 60 minutos.

2.2 Caracterização dos concretos desenvolvidos

Para a avaliação dos concretos de referência, com a adição de nanotubos funcionalizados e não funcionalizados, foram realizados ensaios de resistência à compressão (ABNT, 2018) e resistência à tração (ABNT, 2011), utilizando uma prensa hidráulica, além da determinação da velocidade de pulso de onda ultrassônica (ABNT, 2019), por meio do aparelho Proceq Pundit Lab, e dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios (ABNT, 2009).

3. Resultados e Discussões

3.1 Ensaio de massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de massa específica da amostra seca, absorção e índice de vazios dos corpos de prova de referência, com nanotubos funcionalizados e nanotubos não-funcionalizados são apresentados Figura 1.

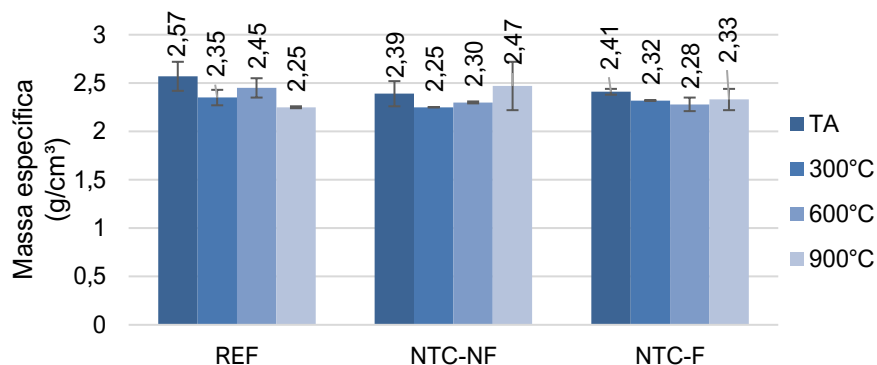


Figura 1: Massa específica para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

Após efetuados os ensaios, nota-se que os valores obtidos de massa específica dos concretos de referência de alto desempenho se aproximam muito dos concretos com nanotubos, não apresentando grandes diferenças. Além disso, ocorre uma alteração à medida que os corpos de prova são submetidos a temperaturas maiores, isso pois, em razão do aquecimento, há perda de massa no concreto e assim aumento de sua porosidade (Carvalho *et al.*, 2024). Com relação aos concretos com nanotubos de carbono, sejam eles funcionalizados ou não-funcionalizados, observa-se que a diferença de massa específica à medida que a temperatura aumenta é ligeiramente menor do que nos concretos de referência. A Figura 2 ainda apresenta as perdas de massa dos concretos a partir de seu aquecimento, onde é notado que não houve alterações significativas nas perdas de massa dos concretos com nanotubos quando comparados aos concretos de referência.

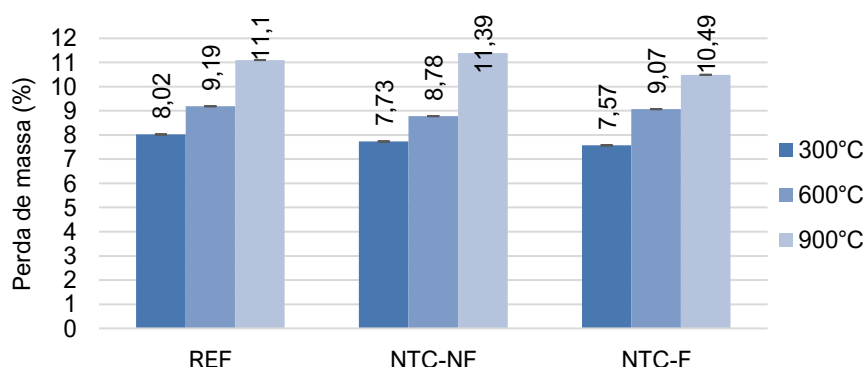


Figura 2: Perda de massa para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

O índice de absorção pode ser observado na Figura 3. Nota-se que os concretos com nanotubos possuem maior absorção de água que os concretos de referência, isto ocorre devido a existência de poros de maiores dimensões, ou ainda em maior quantidade. Ressalta-se que esta propriedade é importante pois macroporos são regiões de fragilidade que vão afetar as resistências mecânicas do concreto. É observado um grande aumento da absorção nos concretos submetidos a 900°C, tanto com nanotubos quanto sem, em razão da microfissuração que ocorre no material quando submetido a altas temperaturas.

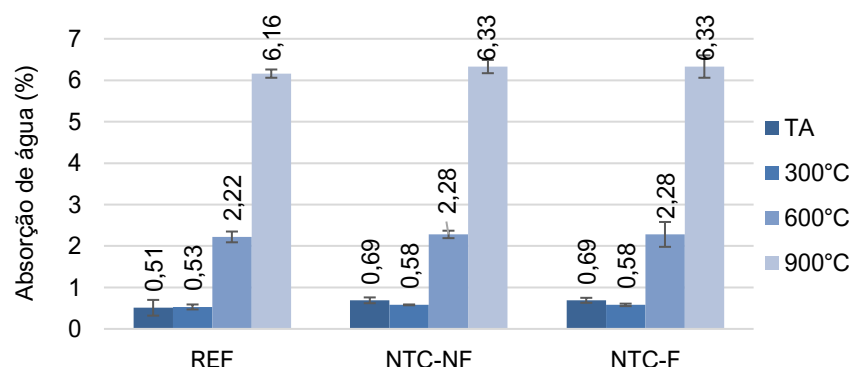


Figura 3: Resultados de absorção de água para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

Dessa forma, ao contrário do estudo de Lopes et al. (2022) a diminuição do índice de absorção a partir da adição de nanotubos de carbono não ocorreu nos ensaios efetuados, resultando também em aumento do índice de vazios nos concretos com nanotubos. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 4.

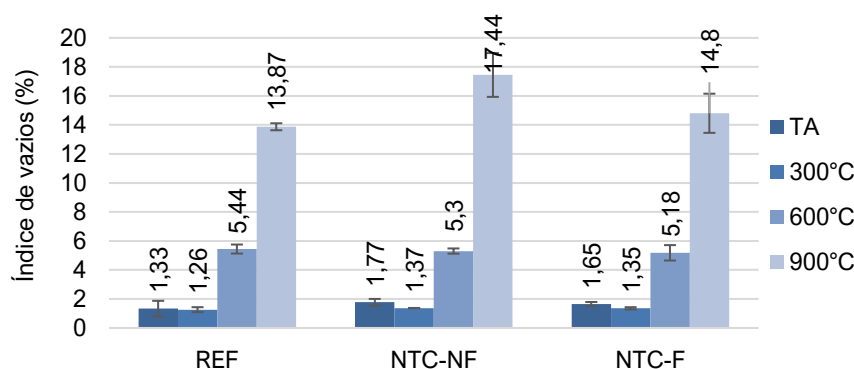


Figura 4: Resultados de índice de vazios para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

3.2 Ensaio de compressão e tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de compressão e tração dos corpos de prova de referência, com nanotubos funcionalizados e nanotubos não-funcionalizados podem ser observados na Figura 5 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

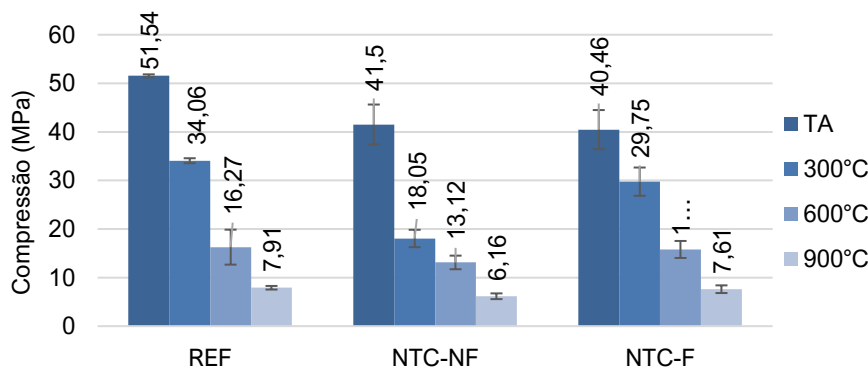


Figura 5: Resultados de compressão para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

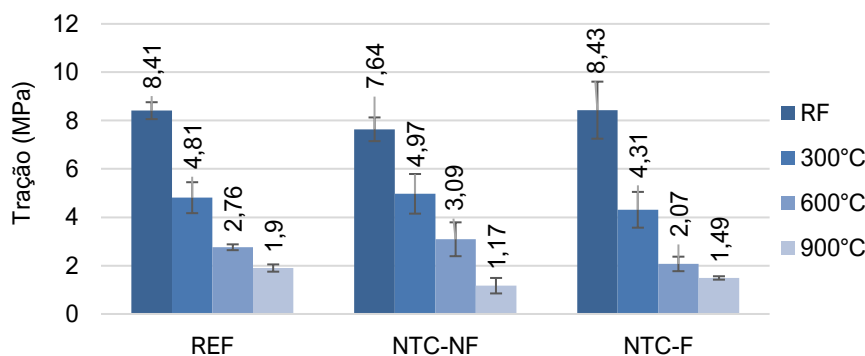


Figura 6: Resultados de tração para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

A partir dos resultados de compressão obtidos, nota-se que os concretos com nanotubos de carbono apresentaram piores resultados de resistência à compressão e tração. Estes resultados podem ser compreendidos a partir da dificuldade de dispersão dos nanotubos ao concreto, afetando sua resistência. Koshio et al. (2001) apud Marcondes, Medeiros, et al. (2015) estudaram a importância da dispersão ultrassônica dos nanotubos na melhoria da mistura destes ao concreto, mas nos ensaios efetuados não foi possível observar grandes melhorias, o que corrobora para a interpretação de que a dispersão ultrassônica não foi suficiente para tornar a mistura homogênea. Uma vez que o material formado é heterogêneo, não ocorre o aumento uniforme de resistência como é preconizado na literatura disponível até o presente momento.

Um importante papel dos nanotubos dispersos no concreto é o preenchimento dos vazios e a formação de microporos. Dessa forma, os nanotubos auxiliam a reter água no concreto e não permitem que essa substância evapore rapidamente do compósito quando submetido a elevadas temperaturas (Hawreen, Bogas e Kurda, 2019). Como a dispersão foi ineficiente no presente estudo, não houve microporos distribuídos de forma homogênea pelo concreto desenvolvido, resultando em regiões de fragilidade quando analisado em altas temperaturas. Em função dessa ocorrência, não é possível notar uma diferenciação apreciável de resistência à compressão e tração entre os concretos com nanotubos e os de referência de alto desempenho, quando submetidos a elevadas temperaturas.

3.3 Ensaio de velocidade da onda ultrassônica

Os resultados dos ensaios de velocidade de propagação da onda ultrassônica estática dos corpos de prova de referência de alto desempenho, com nanotubos funcionalizados e nanotubos não funcionalizados são apresentados na Figura 7.

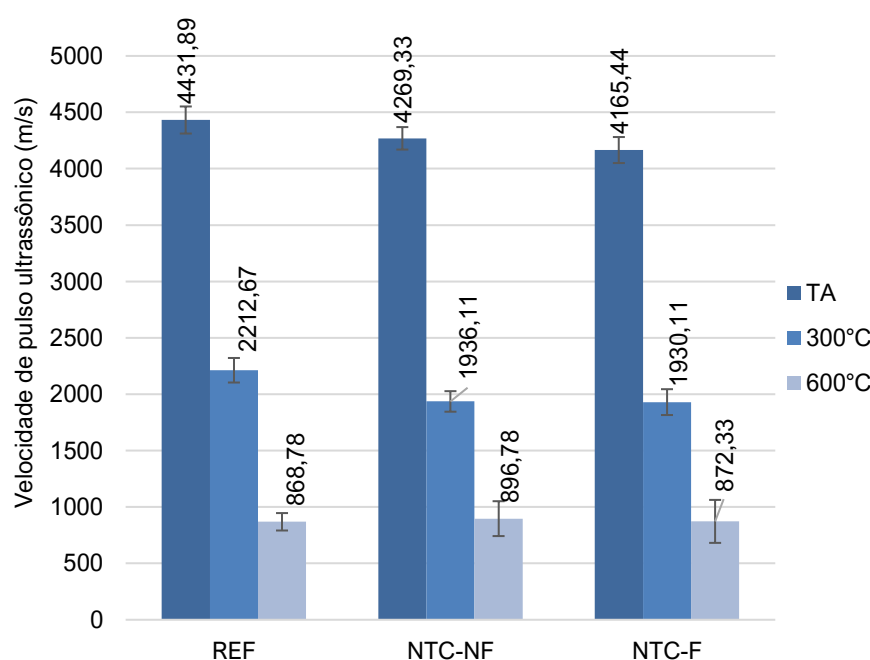


Figura 7: Resultados de velocidade de pulso ultrassônico para concretos de referência, com nanotubos funcionalizados e não-funcionalizados. Fonte: Os autores (2026).

Em concretos submetidos à temperatura ambiente, a velocidade de propagação ultrassônica dos concretos com nanotubos apresentaram resultados próximos aos concretos de referência. Os concretos com nanotubos apresentaram velocidades ligeiramente menores, mas com pouca diferença. A redução dessa velocidade é coerente com o ensaio de absorção de água. Uma vez que existindo mais poros ou poros maiores, a velocidade de propagação do ultrassom tende a ser menor.

Para as temperaturas de 300° e 600° foi possível perceber uma maior redução da velocidade, em razão do aumento das microfissuras e do número de vazios. Por causa disso, os corpos de prova submetidos a 900° apresentaram muitas fissurações, impedindo a leitura do aparelho de ultrassom.

4. Conclusões

O estudo avaliou o desempenho de concretos de alto desempenho com adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados quando submetidos a altas temperaturas. Observou-se que, a 300°C, os nanotubos funcionalizados melhoraram a resistência à compressão residual, enquanto em outras propriedades, como perda de massa e massa específica, não houve diferenças significativas, exceto a 900°C, onde o aumento no índice de vazios levou a maior absorção. Ensaio de compressão e tração não apresentaram

ganhos de resistência, e, em alguns casos, até houve redução, devido à má dispersão dos nanotubos na matriz.

A pesquisa enfrentou desafios na moldagem e nos ensaios, causados pela baixa trabalhabilidade e dificuldade de homogeneização dos nanotubos, o que gerou distribuição irregular, aumentando a heterogeneidade do concreto. Apesar do uso de dispersão ultrassônica, a técnica não garantiu boa uniformidade. Além disso, a comparação entre nanotubos funcionalizados e não funcionalizados foi dificultada por diferenças nas propriedades dos materiais e pela dificuldade de obtenção, tanto logística quanto financeira.

Mesmo com essas limitações, o estudo contribui de forma inédita à área de nanotecnologia aplicada a compósitos cimentícios, especialmente ao comparar os dois tipos de nanotubos em um único experimento. Espera-se que os resultados incentivem o desenvolvimento de concretos mais resistentes a condições extremas na construção civil.

Referências

ABNT. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção da água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2009. (9778).

ABNT. **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. [S.l.]. 2011. (7222).

ABNT. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos**. Rio de Janeiro. 2018. (5739).

ABNT. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. [S.l.]. 2019. (8802).

BALLOCH, W. L. et al. Effect of Elevated Temperatures on Mechanical Performance of Normal and Lightweight Concretes Reinforced with Carbon Nanotubes, 2018.

BORGES, L. A. **Desempenho de concretos produzidos com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer**. Belo Horizonte. 2019.

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**, 3 November 2023. 133078. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>.

CARVALHO, A. R. D. et al. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, 2023b. 217-239. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>.

CARVALHO, A. R. D. et al. Analysis of the thermomechanical behavior of different concretes with vermiculite and submitted to elevated temperatures. **REM, Int. Eng. J.**, 77, n. 3, jul.sep 2024.

CARVALHO, A. R. D. et al. 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, December 2025. e05184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05184>.

CARVALHO, A. R. D. et al. Exploratory literature review and scientometric analysis of artificial intelligence applied to geopolymeric materials. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2025.

HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; KURDA, R. Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2019. Disponível em: <<https://www.springerprofessional.de/en/mechanical-characterization-of-concrete-reinforced-with-differen/17083852>>.

KREMER, B. M. et al. Análise do comportamento mecânico da matriz de um compósito cimentício com adição de nanotubos de carbono (NTCs) dispersos com uso de ultrassom. **Research, Society and Development**, 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/28066/24901>>.

LIMA, Y. D. O.; SILVA, A. D.; SILVA, G. S. D. Potencial dos Nanotubos de Carbono no Setor da Construção Civil. **Cadernos de Graduação**, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cdgexatas/article/view/4402/2252>>.

LOPES, J. P. et al. Influência de nanotubos de carbono sobre o desempenho de concreto e de concreto reforçado com fibras (CRF). **Matéria (Rio de Janeiro)**, 2022.

MARCONDES, C. G. N. et al. **Nanotubos de carbono em concreto de cimento Portland. Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água**. [S.l.]. 2015.

OLIVEIRA, T. A. D. C. P. D. **Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2006.

OSÓRIO, A. G. **Funcionalização de nanotubos de carbono e sua utilização como reforço em matriz de hidroxiapatita**, Porto Alegre. Porto Alegre. 2008.

RASHAD, A. M. Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials. **Construction and Building Materials**, 30 October 2017. 81-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.089>.

SILVA, J. M. D. **Análise temporal da dispersão de nanotubos de carbono para aplicação de cimento Portland**. Porto Alegre. 2019.

SILVA, J. M. D. **Análise temporal da dispersão de nanotubos de carbono para aplicação em pastas de cimento Portland**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2019.

SILVESTRO, L.; GLEIZE, P. J. P. Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths of Portland cement-based materials: A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, 20 December 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120237>.

VAISMAN, L.; WAGNER, H. D.; MAROM, G. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. **Advances in Colloid and Interface Science**, 21 December 2006. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.007>.

XIAOBIN, S. et al. Bond behavior between steel bars and carbon nanotube modified concrete. **Construction and Building Materials**, 2020.