


Análise comparativa da resistência à tração na flexão e à compressão de argamassa enriquecida com nanotubos de carbono

Comparative analysis of the flexural tensile strength and compression of mortar enriched with carbon nanotubes

Análisis comparativo de la resistencia a la tracción en flexión y a la compresión de mortero enriquecido con nanotubos de carbono

Aláide Marta dos Santos 

Universidade Federal de Ouro Preto; Escola de Minas; Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções. Ouro Preto (MG), Brasil.

Viviany Geraldo 

Universidade Federal de Itabubá; *Campus* de Itabira; Instituto de Engenharias Integradas. Itabira (MG), Brasil.

Jordânio Samuel Siqueira 

Universidade Federal de Itabubá; Instituto de Física e Química; Curso de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia. Itabira (MG), Brasil.

Claudio Ernani Martins Oliveira* 

Universidade Federal de Itabubá; *Campus* de Itabira; Instituto de Engenharias Integradas. Itabira (MG), Brasil. cemo@unifei.edu.br

Evandro Augusto de Moraes 

Universidade Federal de Itabubá; *Campus* de Itabira; Instituto de Ciências Puras e Aplicadas. Itabira (MG), Brasil.

Rovadávia Aline de Jesus Ribas 

Universidade Federal de Ouro Preto; Escola de Minas; Depart. de Engenharia Civil; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto (MG), Brasil.

* Autor correspondente.

CRedit**Contribuição de autoria:**

Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Software; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação - revisão e edição: SANTOS, A. M.; GERALDO, V.; RIBAS, R. A. J.; Concepção; Curadoria de dados; Análise; Metodologia; Software; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: OLIVEIRA, C. E. M.; Concepção; Análise; Coleta de dados; Software; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: MORAIS, E. A.; Análise; Coleta de dados; Software; Visualização; Redação – rascunho original: SIQUEIRA, J. S.;

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – APQ-01836-22.

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Livia Santana (Editora Associada); Joara Cronemberger (Editora Associada); Vanda Alice Garcia Zanoni (Editora Associada); Sophia S. Carvalho (Assistente editorial).

Resumo

Este estudo investiga a influência da adição de nanotubos de carbono não tratados (NTC) nas propriedades de consistência, resistência à compressão e à tração na flexão de corpos de prova cilíndricos (NBR 7215:2019) e prismáticos (NBR 13279:2005) produzidos com argamassa enriquecida com NTC. Também é analisada a compatibilidade entre os resultados de resistência à compressão obtidos por duas metodologias distintas. Análises morfológicas dos NTC e das argamassas foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura. A incorporação de NTC reduziu a consistência do produto fresco e a resistência à compressão dos corpos prismáticos. Contudo, as resistências à tração na flexão dos corpos prismáticos e à compressão dos corpos cilíndricos não apresentaram variações significativas. A alta variabilidade nos valores de resistência dos corpos de prova com NTC sugere uma dispersão não homogênea dos nanotubos. A variabilidade na resistência à compressão dos corpos prismáticos também foi atribuída ao procedimento da norma, que exige ensaio após a ruptura por flexão.

Palavras-Chave: Nanotubos de carbono; Tração na flexão; Compressão; Argamassa nanoestruturada.

Abstract

This study investigates the influence of untreated carbon nanotubes (CNTs) on the consistency, compressive strength, and flexural tensile strength of cylindrical (NBR 7215:2019) and prismatic (NBR 13279:2005) test specimens produced with CNT-enriched mortar. It also analyzes the compatibility of compressive strength results obtained using two distinct testing methodologies. Morphological analyses of the CNTs and mortars were performed using Scanning Electron Microscopy (SEM). The incorporation of CNTs reduced the consistency of the fresh product and the compressive strength of the prismatic test specimens. However, the flexural tensile strength of the prismatic specimens and the compressive strength of the cylindrical specimens did not show significant changes. The high variability in the strength values of the specimens with CNTs suggests a non-homogeneous dispersion of the nanotubes. The variability in the compressive strength of the prismatic specimens was also attributed to the procedure specified by the standard, which requires testing after the specimen's bending failure.

Keywords: Carbon nanotubes; Flexural strength; Compressive strength; Nanostructured mortar.

Resumen

Este estudio investiga la influencia de la adición de nanotubos de carbono no tratados (NTC) en las propiedades de consistencia, resistencia a la compresión y a la tracción en flexión de cuerpos de prueba cilíndricos (NBR 7215:2019) y prismáticos (NBR 13279:2005), producidos con mortero enriquecido con NTC. También se analiza la compatibilidad entre los resultados de resistencia a la compresión obtenidos mediante dos metodologías diferentes. Se realizaron análisis morfológicos de los NTC y del mortero mediante Microscopía Electrónica de Barrido. La incorporación de NTC redujo la consistencia del producto fresco y la resistencia a la compresión de los cuerpos prismáticos. Sin embargo, las resistencias a la tracción en flexión de los cuerpos prismáticos y a la compresión de los cuerpos cilíndricos no presentaron cambios significativos. La alta variabilidad en los valores de resistencia de los cuerpos con NTC sugiere una dispersión no homogénea de los nanotubos. La variabilidad en la resistencia a la compresión de los cuerpos prismáticos también se atribuyó al procedimiento de la norma, que exige realizar el ensayo tras la ruptura por flexión.

Palabras clave: Nanotubos de carbono; Tracción en flexión; Resistencia a la compresión; Mortero nanoestructurado.

1 Introdução

Os materiais cimentícios desempenham um papel crucial no âmbito da construção civil, e o constante crescimento desse setor impulsiona pesquisas relacionadas a novos materiais (Bai *et al.*, 2018). Estudos indicam, por exemplo, que a introdução de nanomateriais em matrizes cimentícias resulta em aprimoramentos nas propriedades mecânicas do compósito, decorrentes do preenchimento dos vazios entre as partículas da matriz (Neville; Brooks, 2013; Sousa, 2017; Rashad, 2017; Liu; Hong; Reza Mohammadian, 2023).

Os nanotubos de carbono (NTC) ganharam grande destaque a partir de sua observação pelo físico japonês Sumio Iijima através de Microscopia Eletrônica de Varredura (Iijima, 1991). Essas estruturas de carbono são sintetizadas em formato cilíndrico em escala nanométrica (Marcondes *et al.*, 2015), e têm despertado interesse na comunidade científica devido às suas propriedades elétricas, térmicas e mecânicas singulares, possibilitando diversas aplicações. Entre essas propriedades, destaca-se sua elevada resistência mecânica à compressão, superior inclusive à do aço (Chaipanich *et al.*, 2010). Sua resistência à tração pode atingir 98,9 GPa (Chang *et al.*, 2010). Na construção civil, a incorporação de NTC em compósitos cimentícios pode resultar em ganhos de resistência à compressão, à tração e redução da porosidade. No entanto, para alcançar esses ganhos, é imperativo que os NTC estejam uniformemente dispersos na mistura (Xie; MAI; Zhou, 2005; Song; Hong; Choi, 2020; Ribeiro; Silva; Gleize, 2022; Carvalho *et al.*, 2023).

Quando os NTC são dispersos homogeneamente em matrizes porosas, como argamassas, preenchem os espaços vazios entre as partículas da matriz, exercendo um efeito de ponte sobre as trincas e melhorando a resistência à tração (Makar; Margeson; Luh, 2005; Danoglidis *et al.*, 2016). Há trabalhos demonstrando que a introdução de 0,2% NTC produzidos a partir da metodologia “*in situ*” sobre areia, argila ou rejeito de mineração resultam em aumentos de até 30% da resistência à tração da argamassa (Geraldo *et al.*, 2020; Costal *et al.*, 2023; Carvalho *et al.*, 2023).

Li, Wang e Zhao (2007) demonstraram a relação entre a incorporação de uma pequena porção de NTC, equivalente a 0,5% da massa do cimento, e um aumento da resistência à flexão entre 10% e 25%, além de um incremento de 19% na resistência à compressão das argamassas. Hawreen, Bogas e Dias (2018) conduziram uma avaliação da resistência à flexão de argamassas aos 28 dias, variando a quantidade de NTC entre 0,1% e 1%, e testando diferentes relações água/cimento (a/c) de 0,35, 0,45, 0,5 e 0,55. Com 0,1% de NTC e uma relação a/c de 0,50, os autores observaram um aumento de 19% na resistência à flexão em comparação com a argamassa de referência. Suas conclusões indicam que o uso de aditivos superplastificantes favorece a dispersão dos NTC em argamassas de baixa relação a/c. Esses achados reforçam a relevância da adição de NTC para aprimorar as propriedades mecânicas das argamassas cimentícias.

A incorporação de NTC sem nenhum tratamento adicional em compósitos cimentícios pode aumentar a porosidade da amostra devido ao efeito de interferência da reação de hidratação dos NTC mal dispersos (Song; Hong; Choi, 2020) e, conseqüentemente, piorar os parâmetros de resistência mecânica. Essa piora está associada à não homogeneidade dos NTC na mistura cimentícia. Manzur *et al.* (2016), por exemplo,

obtiveram uma diminuição de 14,3% na resistência à compressão ao incorporarem um teor de 0,5% de NTC em argamassa.

O principal desafio para uma incorporação homogênea dos NTC nas argamassas está relacionado à sua natureza hidrofóbica. O caráter hidrofóbico, ocasionado pela presença de forças atrativas chamadas de interações de Van der Waals, resulta em aglomeração de NTC quando incorporados em uma matriz de partículas de tamanho macro, como cimento (Ribeiro; Guindani; Gleize, 2024). A aglomeração dos NTC pode causar um efeito contrário ao desejado, isto é, a piora das propriedades mecânicas do compósito formado. Para obter uma boa dispersão dos NTC na mistura, recomenda-se a utilização de aditivos ou métodos específicos de dispersão. Métodos como ultrassonicação, funcionalização física com surfactantes e funcionalização química com ácidos proporcionam melhorias na dispersão e interação dos NTC com a matriz (Monteiro, 2018). Contudo, esses métodos demandam o uso de equipamentos e estruturas laboratoriais avançados, além de mão de obra super qualificada, o que pode representar um custo elevado para as atividades da construção civil. Isso dificulta a disseminação da incorporação de NTC como uma técnica viável para a obtenção de argamassas enriquecidas com esse material (Rashad, 2017). A busca por um método simplificado de dispersão dos NTC na matriz torna-se, portanto, essencial para possibilitar aplicações economicamente viáveis e eficazes (Jang; Kawashima; Yin, 2016).

Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento das argamassas produzidas com adição de NTC, sem a utilização de aditivos e/ou a aplicação de métodos de dispersão, por meio da ruptura de corpos de prova cilíndricos e prismáticos para análise de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, bem como do índice de consistência no estado fresco. Sua maior contribuição é demonstrar a importância da boa dispersão de NTC para agregar valor às propriedades de argamassa e consequente, aplicação da nanotecnologia na construção Civil. Sua originalidade consiste em uma análise dos valores obtidos de resistência à compressão de corpos prismáticos, após tração na flexão, e de corpos cilíndricos, por compressão axial, além da relação desses valores resistência com a dispersão heterogênea dos nanotubos de carbono e possíveis micro trincas produzidas nos corpos de prova prismáticos pré-ensaiados para tração na flexão.

2 Material e métodos

2.1. Matéria-prima

Os corpos de prova (CP) foram confeccionados utilizando cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI. A água empregada foi proveniente do Sistema de Abastecimento de Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Itabira, MG. Como agregado miúdo, foram utilizadas quantidades equivalentes de quatro granulometrias distintas de areias comerciais, seguindo o padrão ISO, com números de peneiras de 16, 30, 50 e 100 mm, fornecidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Os nanotubos de carbono empregados foram do tipo "paredes múltiplas" e produzidos por deposição química de vapor no Laboratório de Nanotecnologia Aplicada da Universidade Federal de Itajubá Campus-Itabira, sob condições atmosféricas de pressão positiva dentro do

reator, usando 500SCCM de Argônio durante todos o processo e 300SCCM de Etileno para a síntese, por 25min.

2.2. Preparo das amostras

Foram produzidas duas categorias de argamassas: uma isenta de NTC, denominada argamassa de referência (Ref.) com traço 1:3:0,5 (cimento, agregado miúdo e água); e outra com substituição de 0,2% da massa de cimento por NTC (Ref./NTC). Os NTC foram utilizados em sua forma “*as-grown*” (como feitos), ou seja, sem nenhum tratamento adicional após a produção.

A produção das argamassas seguiu as especificações da norma NBR 16738:2019. Primeiramente, a água foi adicionada à cuba da argamassadeira desligada (Figura 1a). Em seguida, ainda com a argamassadeira desligada, o cimento foi incorporado (Figura 1b). Sob velocidade baixa e controlada de 700 rpm, deu-se início ao processo de mistura. Após 30 segundos, o agregado miúdo foi adicionado gradualmente (Figura 1c). A produção da argamassa Ref./NTC seguiu o mesmo procedimento exceto pelo fato de que os NTC foram incorporados após a mistura do cimento (Figura 1d).

O ensaio de índice de consistência, também conhecido como ensaio de Flow Table (Figura 2), foi realizado 6 vezes para cada traço (Ref. e Ref./NTC), sendo 6 o número de vezes que cada traço foi produzido para preencher os moldes prismáticos (Seção 2.3). A obtenção do índice de consistência é regida pela NBR 13276:2016 e consiste em preencher com argamassa um molde metálico em forma de tronco de cone (Figura 2a), centralizado em mesa de fluência. Após o arrasamento, retira-se o molde do tronco de cone na direção vertical (Figura 2b) e aciona-se o mecanismo para que o tampo da mesa suba e caia trinta vezes em 30 segundos. O diâmetro da argamassa espalhada na mesa é medido em três pontos distintos após a última queda da mesa (Figura 2c). A média dessas medidas é o índice de consistência da argamassa: quanto maior o índice, mais fluido é o material.

Figura 1: Produção de argamassa em argamassadeira.

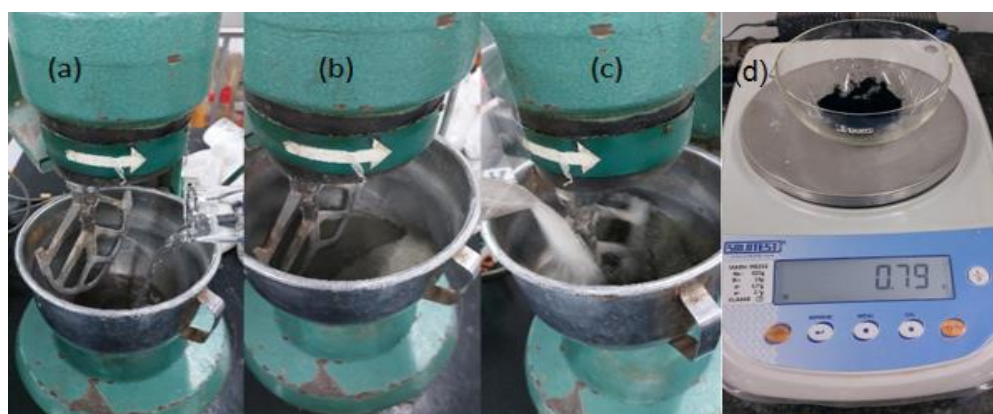


Figura 2: Determinação do índice de consistência das argamassas.



2.3. Moldagem dos corpos de prova

As argamassas frescas foram inseridas em moldes de aço padronizados, com três divisões horizontais de dimensões 40 x 40 x 160 (mm), resultando em 18 corpos de prova prismáticos destinados à avaliação da tração na flexão e compressão em cada idade analisada (Figura 3a). Adicionalmente, foram moldados 19 corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para a análise da resistência à compressão axial (Figuras 3b e 3c).

A determinação da resistência à tração na flexão e à compressão em corpos prismáticos (Figura 4a) foi conduzida conforme a NBR 13279:2005. Os ensaios consistiram, primeiramente, na determinação da resistência à tração na flexão (Figuras 4b). Após o rompimento dos corpos de prova prismáticos, com as duas metades resultantes (36 para cada idade analisada), foi realizado o ensaio de resistência à compressão, utilizando uma máquina de teste universal modelo EMICDL 20000. As amostras foram avaliadas nas idades de 7 (Ref.) e 28 dias (Ref. e Ref./NTC).

Figura 3: Moldagem dos corpos de prova.



Figura 4: Procedimento do ensaio de resistência à tração na flexão e compressão.



Após a retirada do tanque de cura, o diâmetro médio da seção transversal dos corpos de prova cilíndricos (Figura 5a) foi medido utilizando-se três pares de pontos distintos para calcular sua área de seção transversal. O ensaio de resistência à compressão em corpos cilíndricos (Figura 5b) foi conduzido na idade de 28 dias, de acordo com as especificações da NBR 7215:2019.

Apenas as amostras de Ref. foram avaliadas na idade 7 dias, unicamente para demonstrar a já esperada alta resistência inicial do cimento CPV-ARI. As amostras Ref./NTC, por sua vez, foram analisadas apenas na idade 28 dias pois é a idade adotada nas referências utilizadas neste trabalho.

Figura 5: Corpos de prova cilíndricos capeados (5a) e submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial (5b).



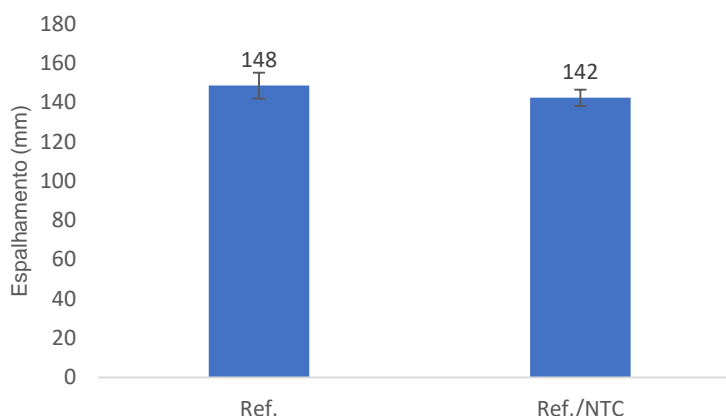
3 Resultados e discussão

3.1 Índice de consistência

O índice de consistência médio, considerando 6 repetições para cada traço, é apresentado na Figura 6. Os resultados indicaram uma diminuição na consistência da argamassa enriquecida com NTC, sendo esse fenômeno associado à incorporação de finos na mistura e à manutenção da relação água/cimento constante (Macleod *et al.*, 2020) A inclusão de materiais finos em escala nanométrica na formulação de pastas de

cimento resulta na redução do espalhamento, assim como na diminuição do teor de ar incorporado (Ribeiro; Silva; Gleize, 2022). Isso ocorre, pois, os NTC possuem uma elevada área superficial específica e promovem a densificação da matriz cimentícia por meio do efeito *filler*, reduzindo a consistência da mistura (Kang; Seo; Park, 2015).

Figura 6: Consistência das argamassas.



3.2 Resistência à tração na flexão e à compressão em corpos de prova prismáticos

Os corpos de prova prismáticos Ref., sem nanotubos, foram avaliados na idade de 7 dias para analisar a evolução da resistência do cimento CPV-ARI, classe de alta resistência inicial. Sua resistência à tração na flexão (Figura 7) aos 7 dias (8,42 MPa) já era cerca de 85 % do valor obtido aos 28 dias (9,87 MPa). Da mesma maneira, a resistência à compressão aos 7 dias era cerca de 82 % da resistência aos 28 dias (Figura 8). Esses resultados são condizentes com a classe de cimento utilizada que apresenta alta resistência nas idades iniciais. Na Figura 8 também é possível verificar que a resistência média à compressão de Ref. aos 7 dias foi maior que 34 MPa, mínimo estabelecido pela NBR 7215:2019.

A resistência média à tração na flexão dos corpos prismáticos, para 28 dias de cura (Figura 7), foi discretamente maior nos corpos prismáticos com NTC. Esses resultados foram obtidos considerando 10 CP de Ref. (8 CP descartados) e 6 CP de Ref./NTC. (12 CP descartados). Os corpos de prova descartados foram eliminados da análise pois a diferença entre sua resistência individual e a média do grupo de análise era maior que 0,3 MPa, como preconizado pela NBR 13279:2005. Isso indica uma maior variabilidade das resistências individuais de Ref./NTC que pode ser atribuída à uma dispersão não homogênea dos NTC adicionados “*as-grown*”, como também observado por Manzur *et al.* (2016). Utilizando esse mesmo valor de referência (0,3 MPa), verifica-se que a diferença entre as resistências médias de Ref. e Ref./NTC (9,87 MPa e 9,93 MPa, respectivamente) é desprezível.

Para analisar a compressão em corpos prismáticos, a NBR 1379:2005 estabelece que a resistência individual de um corpo de prova e a média do conjunto deve ser menor que 0,5 MPa, caso contrário o corpo de prova deve ser eliminado do conjunto. Assim, observando a Figura 8, verifica-se que a incorporação de NTC piorou a resistência à

compreensão em relação a Ref. O resultado de Ref./NTC aos 28 dias (36,84 MPa, 27 CP descartados) foi 22 % menor que o de Ref. (47,45 MPa, 24 CP descartados) e até mesmo menor que o de Ref. aos 7 dias (8,42 MPa, 29 CP descartados). Atribui-se esse resultado à má dispersão do nanomaterial que potencializa a presença de micro trincas nos corpos de prova. Uma vez que a medida da resistência à compressão de corpos prismáticos é realizada após a ruptura por tração à flexão, a presença dessas micro trincas pode também ser a responsável pela grande variabilidade dos resultados de resistência a compressão em corpos prismáticos, evidenciada pelo também grande número de corpos de prova eliminados da análise.

Figura 7: Resistência à tração na flexão.

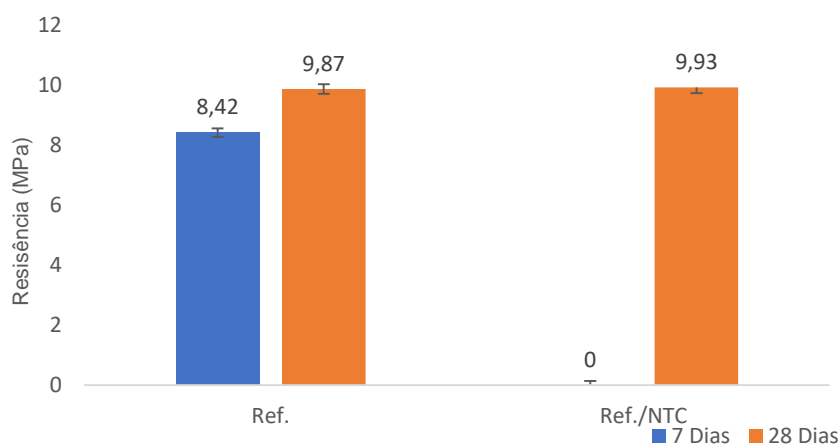
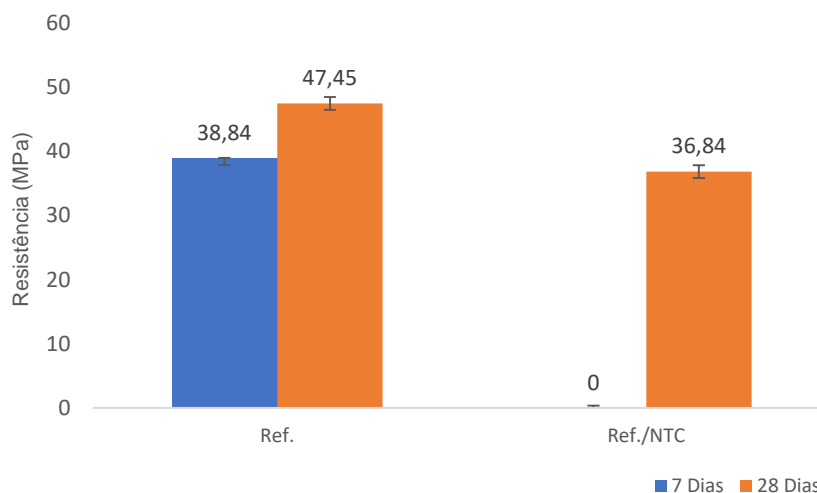


Figura 8: Resistência à compressão (corpo de prova prismático).

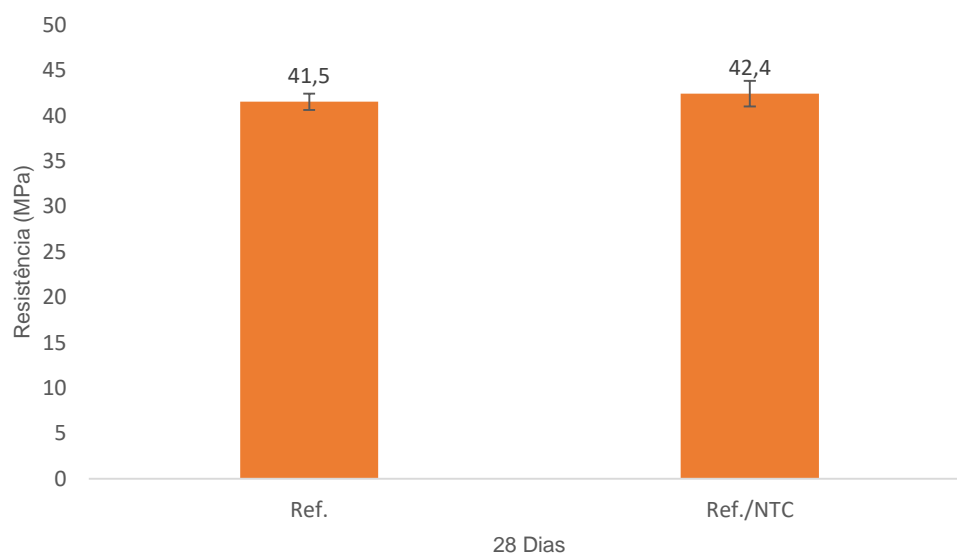


3.3 Resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos

A NBR 7215:2019 determina que um corpo de prova deve ser eliminado se a sua resistência à compressão axial apresentar diferença maior que 6 % comparada à resistência média do conjunto. A Figura 9 apresenta os resultados de compressão axial,

onde se observa que a incorporação de NTC “*as-grown*” na formulação das argamassas aumentou a resistência mecânica de Ref./NTC (42,4 MPa, 13 CP descartados) em cerca de 2% comparado ao traço de referência (41,5 MPa, 7 CP descartados). Essa variação é menor que o limite de 6% adotado na regra de eliminação de CP, indicando que os valores podem ser considerados estatisticamente iguais. Contudo, o número de corpos de prova Ref./NTC eliminados durante a análise de Ref./NTC é quase o dobro de Ref., indicando mais uma vez a grande variabilidade de valores de resistência individual apresentada pela argamassa com nanotubos de carbono. De fato, dentre os corpos de prova eliminados, Ref./NTC apresentou valores de resistência à compressão individuais menores que 35 MPa, o que não foi observado no caso de Ref.

Figura 9: Resistência à compressão axial (corpo de prova cilíndrico).



3.4 Resistência à compressão – comparação entre métodos

O valor médio de resistência à compressão dos corpos cilíndricos de Ref. foi 13% menor que o obtido para os corpos prismáticos. Por sua vez, O valor médio de resistência à compressão dos corpos cilíndricos de Ref./NTC foi 15% maior que o obtido para os corpos prismáticos. Isso indica que os resultados obtidos utilizando os dois métodos não foram equivalentes. Como forma de avaliar a validade desta afirmação, aplicou-se as regras de eliminação de corpos de prova adotadas pela NBR 13279:2005 e pela NBR 7215:2019. Desta vez, porém, estas regras foram aplicadas aos valores médios apresentados nas Figuras 8 e 9.

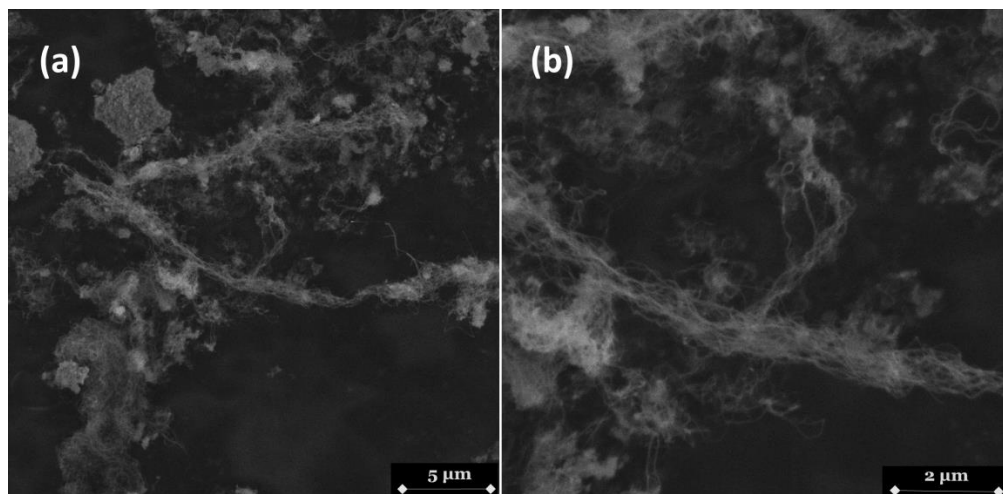
Ao aplicar a utilizada pela NBR 13279:2005, as diferenças absolutas entre as resistências médias dos corpos de Ref. prismáticos (47,45 MPa) e cilíndricos (41,5 MPa) e a média desses dois valores (44,5 MPa) são, ambas, maiores que 0,5 MPa. Ao aplicar a regra de eliminação de corpos de prova utilizada pela NBR 7215:2019, a diferença percentual entre as resistências médias dos corpos prismáticos e cilíndricos e a média desses dois valores são, ambas, maiores que 6%. Por sua vez, as diferenças entre as resistências médias dos corpos de Ref./NTC prismáticos (36,84 MPa) e cilíndricos (42,4 MPa) e a média desses dois valores (39,6 MPa) são, ambas, maiores que 0,5 MPa. Essas diferenças são também, ambas, percentualmente maiores que 6%.

Desta forma, independente da regra de eliminação adotada como parâmetro estatístico, considera-se que as duas metodologias forneceram valores de resistência à compressão estatisticamente diferentes. Uma vez que ficou evidenciado que os nanotubos incorporados “*as-grown*” se dispersam de forma heterogênea, é possível admitir que a dispersão nos corpos prismáticos tenha ocorrido de forma a enfraquecer a sua estrutura (Figura 8) e que nos corpos cilíndricos a dispersão ocorreu sem causar grandes mudanças nos valores de resistência (Figura 9).

3.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os NTC utilizados neste trabalho foram produzidos via deposição química de vapor (CVD), são da ordem de 30 nm de diâmetro externo e compridos da ordem de 45 μm , além de apresentar uma pureza de cerca de 98%. A Figura 10 apresenta os NTC em imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de diferentes magnificações.

Figura 10: Imagem de MEV de NTC em diferentes magnificações.



Na Figura 11 (a, b), percebe-se que a argamassa apresentou um grande número de agulhas de etringita aos 7 dias o que evidencia a hidratação do cimento em seu estágio inicial. Contudo, aos 28 dias de cura, observa-se que a amostra adquiriu maior densidade e que não se observa mais tantas agulhas (Figura 11 (c, d)). Em outras palavras, a argamassa atingiu uma condição similar à de uma estrutura de cura consolidada.

Na Figura 12, percebe-se que, mesmo após 28 dias, a argamassa nanoestruturada apresentou morfologia similar à de referência no início da hidratação (7 dias), o que indica que a incorporação de nanotubos “*as-grown*” e sua dispersão não homogênea podem ter provocado mudanças na taxa de hidratação da matriz. Esse resultado concorda com Song, Hong e Choi (2020) e pode ser outro motivo, além da aglomeração e da presença de micro trincas, para a queda de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos.

Figura 11: Imagem de MEV das argamassas de referência nas idades de 7 (a, b) e 28 dias (c, d).

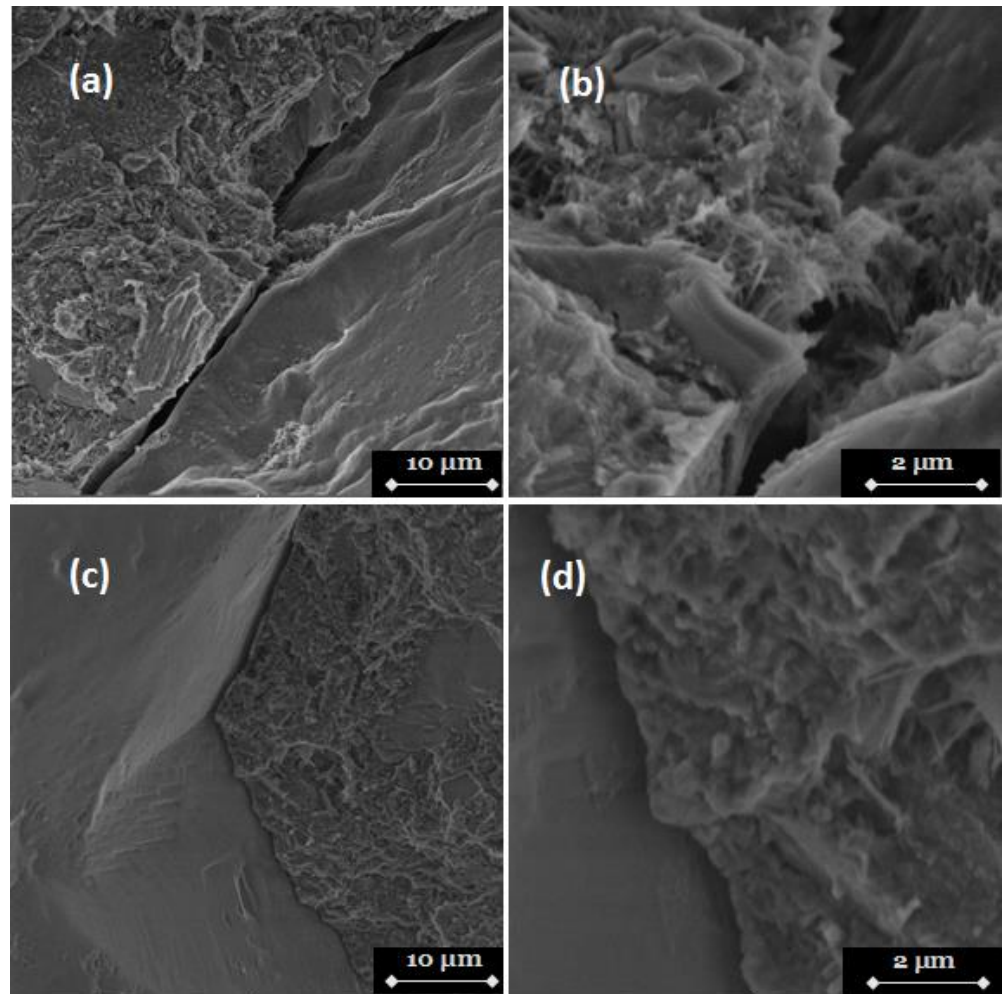
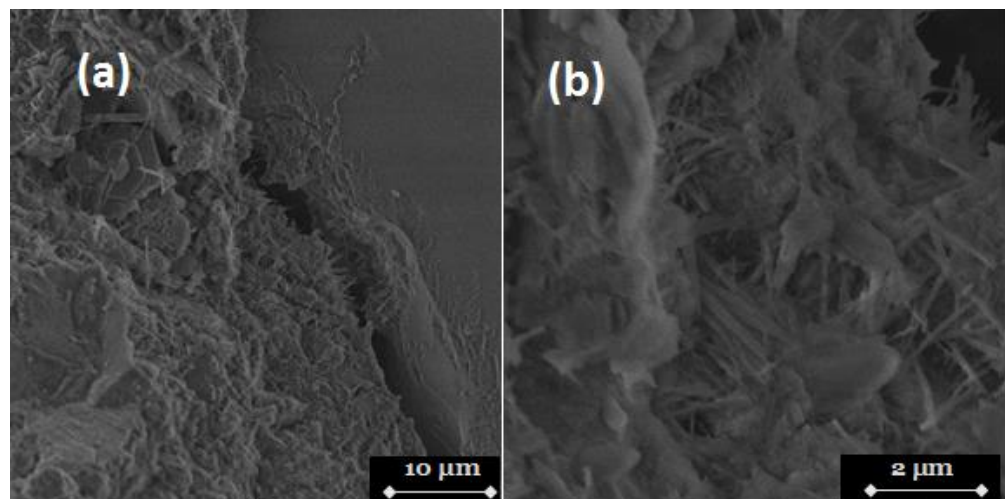


Figura 12: Imagem de MEV das argamassas com NTC 28 dias.



4 Conclusões

A utilização da nanotecnologia no setor da construção civil é uma forma de potencializar a qualidade dos materiais tornando-os mais duráveis e resistentes. A incorporação de nanotubos de carbono na matriz cimentícia sem o uso de nenhum tratamento ou método específico de dispersão é uma forma de agregar valor aos materiais e, conseqüentemente, contribuir com a redução da utilização de recursos naturais. Entretanto, é relevante destacar que a incorporação de nanotubos de carbono como feitos em compósitos cimentícios pode impactar negativamente em sua resistência mecânica se não forem adequadamente dispersos na matriz cimentícia. A aglomeração ou má dispersão dos nanotubos pode prejudicar seu papel de reforço. A adição de nanotubos de carbono como feitos pode, por exemplo, resultar em alterações de trabalhabilidade no estado fresco e de resistência mecânica no estado endurecido. Neste estudo verificou-se uma piora da trabalhabilidade, representada pela diminuição do índice de consistência. Verificou-se também que, estatisticamente, não houve aumento da resistência à tração na flexão de corpos prismáticos (menos de 1%), e nem aumento da resistência à compressão de corpos cilíndricos (2,19%). Contudo, analisando os corpos de prova prismáticos, verificou-se uma diminuição significativa da resistência à compressão. A disparidade de resultados de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos foi atribuída à presença de micro trincas geradas durante o ensaio de tração na flexão. Essa heterogeneidade estrutural nos corpos de prova ficou evidente ao se observar a quantidade de corpos de prova de argamassa nanoestruturada que foram descartados durante o ensaio de tração na flexão tanto do traço de referência como do traço com nanotubos de carbono. Esse efeito foi ainda potencializado pela dispersão heterogênea dos nanotubos de carbono e à mudança da taxa de hidratação do cimento na presença dessas nanoestruturas, observada a partir de imagens de microscopia eletrônica. Esses resultados reafirmam a importância da busca por métodos de dispersão de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias para que seja possível usufruir de suas propriedades na construção civil.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Universidade Federal de Itajubá por cederem a infraestrutura necessária para a execução deste trabalho. À CAPES e à FAPEMIG (APQ-01836-22) pelo auxílio financeiro.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- BAI, S.; JIANG, L.; Xu N.; JIN M.; JIANG, S. Improvement of Mechanical and Electrical Properties of Graphene/Cement Composite due to Enhanced Graphene Dispersion through the Addition of Silica Fume, **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 433-441, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>.
- CARVALHO, J. C. L.; COSTAL, G. Z.; DE MORAIS, E. A.; OLIVEIRA, C. E. M.; SIQUEIRA, J. S.; DA SILVA, E. E.; OLIVEIRA, C. A. S.; FILHO, F. M.; SILVA, G. J. B.; GERALDO, V. Synthesis and application of carbon nanotubes grown directly on pozzolanic clay. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 25, n. 186, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05822-2>.
- CHAIPANICH, A.; NOCHAIVA, T.; WONGKEO, W.; TORKITTIKUL, P. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 4-5, p. 1063–1067, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.039>.
- CHANG, C.; HSU, I.; AYKOL, M.; HUNG, W.; CHEN, C.; CRONIN, S. B. A New Lower Limit for the Ultimate Breaking Strain of Carbon Nanotubes, **ACS Nano**, v. 4, n. 9, p. 5095-5100, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/nn100946q>.
- COSTAL, G. Z.; CALDERÓN-MORALES, B. R. S.; CARVALHO, J. C. L.; SILVA, E. E.; MORAIS, E. A.; MACHADO, L. F.; OLIVEIRA, C. A. S.; MOURA FILHO, F.; GERALDO, V. CNT grown in situ from iron ore tailings: simple dispersion and environmental sustainability, **Journal of Nanoparticle Research**, v. 25, n. 199, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05846-8>.
- DANOGLIDIS, P. A.; KONSTA-GDOUTOS, M. S.; GDOUTOS, E. E.; SHAH, S. P. Strength, energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars, **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 265-274, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.049>.
- GERALDO, V.; OLIVEIRA, S.; SILVA, E. E.; OLIVEIRA, C. A. S.; CUNHA, R. M. A.; OLIVEIRA, R. F. P.; OLIVEIRA, C. E. M.; MORAIS, E. A. Synthesis of carbon nanotubes on sand grains for mortar reinforcement, **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119044>.
- HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; DIAS, A. P. S. On the mechanical and shrinkage behavior of cement mortars reinforced with carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 459-470, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.146>.
- IJJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, n. 6348, p. 56-58, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1038/354056a0>.
- JANG, S.H.; KAWASHIMA, S.; YIN, H. Influence of carbon nanotube clustering on mechanical and electrical properties of cement pastes. **Materials**, v. 9(4), n. 220, 2016 DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9040220>.

- KANG, S. T. K.; SEO, J. Y.; PARK, S. H. The characteristics of CNT/Cement composites with acid-treated MWCNTs, **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, n. 1, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/308725>.
- LI, G.; WANG, P.; ZHAO, X. Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, **Cement Concrete Comp.** v. 29, n. 5, p. 377-382, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011>.
- LIU, Y.; ZHONG, X.; REZA MOHAMMADIAN, H. Role of carbon nanotubes in reinforcing the interfacial transition zone and impermeability of concrete under different water-to-cement ratios. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 649-656, 2023; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.025>.
- MACLEOD, A. J. N.; FEHERVARI, A.; GATES, W. P.; GARCEZ, E. O.; ALDRIDGE, L. P. COLLINS, F. Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture. **Construction and Building Materials**, v.247, n. 118524, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118524>.
- MANZUR, T.; YAZDANI, N.; EMON, M.; BASHAR, A. Potential of carbon nanotube reinforced cement composites as concrete repair material, **Journal of Nanomaterials**, v. 2016, n.1, p. 1-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1421959>
- MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. Carbon nanotube/cement composites-early results and potential application. **Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications**, p. 1-10, Vancouver, 2005.
- MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; MARQUES FILHO, J.; HELENE, P. Nanotubos de carbono em concreto de cimento Portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. **Alconpat**, v. 5, n. 2., p. 97-114, 2015. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000200097&lng=es&tlng=pt.. Acesso em 29 set. 2024.
- MONTEIRO, A. R. **Dispersão mecânica de NTCs de carbono com cimento Portland**. 2018. f. 156. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2018.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**, Porto Alegre: Bookman, 2ª ed, 2013.
- RASHAD, A. M. Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials, **Construction. Building. Materials**, v. 153, pp. 81-101, 2017 DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.07.089](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.089).
- RIBEIRO, A. V. S.; SILVA, J. M.; GLEIZE, P. J. P. Análise da dispersão de NTCs de carbono de paredes múltiplas com diferentes aditivos dispersantes, **Revista Matéria**, v.27, n.3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0063>
- RIBEIRO, A. V. S.; GUINDANI, E. N.; GLEIZE, P. J. P. Analysis of Portland cement consumption reduction by using functionalized multiwalled carbon nanotubes in

mortars. **Structures and Materials Journal**, v.17, n.2, 2024. DOI:
<https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000200004>.

SONG, C.; HONG, G.; CHOI, S. Effect of dispersibility of carbon nanotubes by silica fume on material properties of cement mortars: Hydration, pore structure, mechanical properties, self-desiccation, and autogenous shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120318, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120318>.

SOUSA, I. P. S. **Obtenção de nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

XIE, X.; MAI, Y.; ZHOU, X. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. **Materials Science and Engineering R**, v. 49, n. 4, p. 89 – 112, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.002>.