

## **Análise do comportamento mecânico da matriz de um compósito cimentício com adição de nanotubos de carbono (NTCs) dispersos com uso de ultrassom**

**Analysis of the mechanical behavior of the matrix of a cementitious composite with addition of disperse carbon nanotubes (CNTs) using ultrasound**

**Análisis del comportamiento mecánico de la matriz de un compuesto cementario con adición de nanotubos de carbono (NTCs) dispersos mediante ultrasonidos**

Recebido: 14/03/2022 | Revisado: 24/03/2022 | Aceito: 29/03/2022 | Publicado: 05/04/2022

### **Bruna Maria Kremer**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8665-3234>  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil  
E-mail: [bru\\_kremer@hotmail.com](mailto:bru_kremer@hotmail.com)

### **Fernanda Pacheco**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-491X>  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil  
E-mail: [fernandapache@unisinos.br](mailto:fernandapache@unisinos.br)

### **Hinoel Zamis Ehrenbring**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0339-9825>  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil  
E-mail: [hzamis@unisinos.br](mailto:hzamis@unisinos.br)

### **Roberto Christ**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972>  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil  
E-mail: [rchrist@unisinos.br](mailto:rchrist@unisinos.br)

### **Maria Angélica Thiele Fracassi**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1729-6509>  
Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, Brasil  
E-mail: [angelica@liberato.com.br](mailto:angelica@liberato.com.br)

### **Maria Fernanda Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5369-688X>  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil  
E-mail: [mariaon@unisinos.br](mailto:mariaon@unisinos.br)

### **Maria Inês Fuhr**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-0250>  
Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha, Brasil  
E-mail: [leiter.consultoria@gmail.com](mailto:leiter.consultoria@gmail.com)

### **Resumo**

Os nanotubos de carbono (NTCs) possuem uma estrutura de carbono com formato cilíndrico com diâmetro variável entre 0,4 e 10 mm. Por ser um produto muito fino, é um material com potencial de inserção em compósitos cimentícios para diminuir o número de vazios da mistura. Este trabalho tem como objetivo a adição de nanotubos de carbono em uma matriz cimentícia com cimento Portland, para a avaliação da dispersão na matriz cimentícia curada e os impactos na sua resistência mecânica. Para tal, foram elaboradas amostras contendo diferentes percentuais de nanotubos de carbono dispersos com base no do método de dispersão ultrassônica e realizados ensaios para análise. A análise se deu através de ensaios de resistência à compressão, tração na flexão e à compressão, absorção de água, índice de vazios, massa específica, absorção de água por capilaridade, e análise por Microscópio Eletrônico de Varredura, somado a técnica de EDS, nas idades de 7, 28 e 56 dias. Os resultados obtidos nesse estudo apontam para melhorias com a utilização dos nanotubos, favorecendo o comportamento mecânico das matrizes. O processo de mistura dos nanotubos no aditivo para o concreto se mostrou favorável para a sua dispersão.

**Palavras-chave:** Nanotubo de Carbono; Propriedades físicas; Porosidade; Alto desempenho.

### **Abstract**

Carbon nanotubes (CNTs) have a carbon structure with a cylindrical shape with a variable diameter between 0.4 and 10 mm. As it is a very thin product, it is a material with the potential to be inserted in cementitious composites to reduce the number of voids in the mixture. This work aims to add carbon nanotubes in a cement matrix with Portland cement, evaluating the dispersion in the cured cement matrix and the impacts on its mechanical strength. Thus, samples were prepared containing different percentages of carbon nanotubes dispersed through the ultrasonic

dispersion method and tests were performed for analysis. The analysis was carried out through tests of compressive strength, flexural and compressive strength, water absorption, void ratio, specific mass, water absorption by capillarity, and analysis by Scanning Electron Microscope, added to the EDS technique, at ages 7, 28 and 56 days. The results obtained in this study point to improvements with the use of nanotubes, favoring the mechanical behavior of the matrices. The process of mixing the nanotubes in the concrete additive proved to be favorable for its dispersion.  
**Keywords:** Carbon nanotube; Physical properties; Porosity; High performance.

### Resumen

Los nanotubos de carbono (NTC) tienen una estructura de carbono de forma cilíndrica con un diámetro variable entre 0,4 y 10 mm. Al ser un producto muy delgado, es un material con potencial para ser insertado en composites cementosos para reducir el número de vacíos en la mezcla. Este trabajo tiene como objetivo agregar nanotubos de carbono en una matriz de cemento con cemento Portland, evaluando la dispersión en la matriz de cemento curado y los impactos en su resistencia mecánica. Para ello, se prepararon muestras que contenían diferentes porcentajes de nanotubos de carbono dispersados por el método de dispersión ultrasónica y se realizaron pruebas para su análisis. El análisis se realizó mediante ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y compresión, absorción de agua, relación de vacíos, masa específica, absorción de agua por capilaridad y análisis por Microscopio Electrónico de Barrido, sumado a la técnica EDS, a los 7, 28 y 56 años. días. Los resultados obtenidos en este estudio apuntan a mejoras con el uso de nanotubos, favoreciendo el comportamiento mecánico de las matrices. El proceso de mezcla de los nanotubos en el aditivo del concreto demostró ser favorable para su dispersión.

**Palabras clave:** Nanotubo de carbono; Propiedades físicas; Porosidad; Alto desempeño.

## 1. Introdução

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil (Jo *et al.*, 2017) e sua matéria prima vem de fontes naturais, sendo conhecido o impacto ambiental causado pela sua produção. Dessa forma, deve-se extrair o máximo potencial de utilização do cimento, em estruturas que sejam tanto estáveis quanto duráveis. Uma dessas tecnologias que podem contribuir nesse sentido é a adição da nanotecnologia na dosagem de compostos cimentícios. Os nano compósitos proporcionam modificações na microestrutura tornando a produção de concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis (Marcondes, 2012). Sua utilização tem impacto relevante no empacotamento das partículas, aumentando a expectativa de durabilidade do material, contribuindo com a sustentabilidade dos produtos gerados (Celadyn, 2016).

A pesquisa sobre o uso de Nanotubos de Carbono (NTCs) em compósitos cimentícios teve início no ano de 1990, sendo caracterizado como um novo material de nanocristais de carbono composto de folhas de grafeno com dimensão nanométrica e estrutura oca, aplicando a nanotecnologia e nanociência da química a engenharia (Parveen *et al.*, 2015). Os NTCs podem ser classificados de acordo com o número de camadas de grafeno laminado, sendo de parede única e de paredes múltiplas. O comprimento dos NTCs geralmente é na ordem dos micrometros, os NTC quando juntos formam um pacote (Iijima, 2002; Shi *et al.*, 2019a). Algumas de suas propriedades tornam atrativo o seu emprego, tais como a resistência mecânica maior que a do Ferro, a densidade inferior à do Alumínio, e contanto ainda com uma estabilidade térmica de 1400 °C no vácuo (Iijima, 2002; Shi *et al.*, 2019a). Os NTCs possuem a resistência à tração alta, módulo de elasticidade e condutividade elétrica e térmica (Shi *et al.*, 2019a). Seu uso proporciona melhorias nas propriedades mecânicas podendo suportar torção e flexão sem quebrar, produzindo compósitos mais fortes e resistentes comparados aos reforçados com fibras de vidro ou de carbono (Makar & Beaudoin, 2007; Marcondes *et al.*, 2016).

Um dos problemas mais críticos da adição de NTCs na matriz cimentícia, é a dificuldade em ter uma dispersão homogênea, devido a sua escala nanométrica, é um material que se aglomera facilmente, prejudicando a mistura e sua fluidez (Lourie *et al.*, 1998; Sáez De Ibarra *et al.*, 2006). Tais danos podem decorrer do uso de teores superiores aos recomendados. Com a dosagem correta pode haver melhorias de 5,5% na resistência à compressão e aproximadamente 12% no módulo de elasticidade (Jung *et al.*, 2020). Os teores abordados em bibliografia variam na faixa entre 0,1% e 0,25%. No estudo de Melo (2009), o teor de melhor desempenho para a resistência mecânica foi de 0,3% em relação a massa de cimento. A mesma dosagem de NTC, foi utilizada por Marcondes (2015) encontrando também resultados satisfatórios. Conforme a pesquisa de

Henche (2013), o teor de adição de nanotubos com melhor desempenho foi o de 0,2%.

Existem muitas maneiras de realizar a dispersão do NTCs na matriz cimentícia, podendo ser dividido em métodos físicos e métodos químicos (Liew et al., 2016). O desafio reside na dosagem da matriz, na verificação do teor de NTC a ser utilizado, somado ao melhor método de dispersão. Conforme Melo (2009), a adição simples, sem o uso de algum método específico de dispersão, de 0,3% de NTCs na matriz de cimento, já proporcionou melhorias nas propriedades mecânicas de 34,28% na resistência à tração. Há a problemática relacionada ao teor adequado, de modo que não se formem grupos e que a atuação dos NTCs seja eficaz na matriz. Segundo Shah e Konsta-Gdoutos (2017), dosagens com adição de 0,1% de NTCs em relação ao peso do cimento, obtiveram um aumento de 56% no módulo de elasticidade do concreto. A adição de NTCs ainda acarretou o aumento a resistência a flexão em torno de 50%.

O objetivo deste trabalho é avaliar a dispersão na matriz cimentícia curada e os impactos na resistência mecânica da adição de nanotubos de carbono em uma matriz cimentícia com cimento Portland. Esse trabalho está delimitado na análise de dois percentuais de NTCs, dispersos por ultrassom, analisados em ensaios físicos e mecânicos.

O concreto é um material altamente utilizado na construção civil por apresentar propriedades satisfatórias e economicamente viáveis. O concreto de alto desempenho vem sendo estudado pois com a adição de aditivos vem apresentando melhores índices de durabilidade (Cândido et. al. 2017). Estudos envolvendo a adição de NTCs em concretos de alto desempenho estão ganhando mais destaque, buscando a melhora da dispersão na matriz cimentícia, verificando as propriedades mecânicas e a eficácia da blindagem eletromagnética com uma dosagem muito baixa de NTC (JUNG *et al.*, 2020). Estudos demonstram a melhora das propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais de construção civil reforçados com NTC (Macleod *et al.*, 2019; Shah & Konsta-Gdoutos, 2017).

Makar, *et al.* (2005), observaram no seu estudo, que a adição de NTC pode gerar um aumento na durabilidade de concretos e argamassas. A adição do nanotubo a matriz cimentícia gera pontes de aderência que se formam na microestrutura da pasta, controlando as fissuras geradas na matriz cimentícia, e como consequência promovem o aumento das resistências e diminuem a porosidade. Batiston (2012) apud Marcondes et al (2015) afirmam que os desafios para utilização dos produtos podem ser sintetizados nos seguintes itens: (a) homogeneização da distribuição dos NTCs e (b) Entender-se a interação dos NTCs com os compostos resultantes da hidratação do cimento. Na Tabela 1 constam estudos abordando a adição de NTC em uma matriz cimentícia.

**Tabela 1 - Estudos de outros autores.**

Referência	Título	Resultados
(WANG; HAN; LIU, 2013)	<i>Effect of highly dispersed CNT on the flexural toughness of cement-based composites</i>	Dispersão através do Ultrassom por 30 min. *Uso do NTC reduziu a porosidade das amostras, com uso o de 0,12% de NTC a redução foi de 20,9%.
(HU <i>et al.</i> , 2014)	<i>Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled CNTs</i>	Dispersão em solução aquosa, com quantidades variando de 0% a 0,1% em peso. Adição de 0,1 % NTC aumentou tenacidade à fratura em 26,2% e 11,4%. A adição de NTC reduziu a porosidade.
(SOBOLKINA <i>et al.</i> , 2012)	<i>Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix</i>	Os NTCs foram dispersos por sonicação por ultrassom (30, 150 e 210 min). Os NTCs foram fixados em 0,05% e 0,25% da massa do cimento. Para reduzir a tensão superficial na dispersão foram usados dois tipos de tensoativos o Brij 35 e Dodecil sulfato de sódio (SDS). A resistência à compressão da amostra Brij 35 foi 40% superior usando os CNTs mistos e em 30% usando os N-CNTs, comparada a amostra referência.
(CARRIÇO <i>et al.</i> , 2018)	<i>Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete</i>	Dispersão dos NTCs em solução aquosa através de ultrassom. A porcentagem de NTCs variou entre 0,015% e 0,1% em relação ao peso do cimento com relação a/c de 0,35, 0,45 e 0,55. Com 0,1% de NTC houve uma melhora de 21% na resistência à compressão e 12% em redução da porosidade. Na absorção capilar houve a melhoria média de 38% entre 6 e 72 horas.
(MOHSEN <i>et al.</i> , 2019)	<i>Carbon Nanotube Effect on the Ductility, Flexural Strength, and Permeability of Concrete</i>	Amostras com teor de adição de nanotubos de 0,03 e 0,08%, em relação ao traço referência, obtiveram um aumento na resistência à tração de 40%.

Fonte: Autores.

Foldyna et al. (2016) citam que métodos que podem ser favoráveis para dispersão dos NTCs sejam sua mistura em água e posterior adição na pasta de cimento, e assim, a a/c tem um papel de relevância nos traços. Assim como a dispersão em água, pode ser optado pela dispersão em aditivos químicos, tais como o superplastificante a base de policarboxilato. Esse é um material composto por polímeros de éter carboxílico, com um pH baixo. Batiston et al (2012) e Li *et al.* (2004) acreditam que o baixo pH do aditivo seja um grande aliado na dispersão dos NTCs.

Marcondes (2012) para realizar a dispersão no NTC, adicionou o nanotubo na água juntamente com o aditivo superplastificante e utilizando um equipamento de ultrassom seguiu com o processo de sonificação. O tempo de aplicação das ondas usado no estudo para atingir a dispersão ideal foi de 40 minutos. Em relação à composição química do NTCs, tem-se pelo autor, um teor de grafite sintetizada de 90%, óxido de cobalto com teor inferior a 1% e outros componentes com teor de 9%.

O NTC possui características diferentes, tendo como característica física o formato de canais tubulares ocos, podendo ser formados por uma ou mais paredes de folhas de grafeno laminados, com diâmetro entre 0,4 a 10 nm, com comprimento na escala de gama de micro ou mesmo milímetros (FERRO, 2011). Algumas características obtidas por Marcondes et al (2015) são diâmetro de 9,5nm, comprimento médio de 1,5nm, área superficial de 250-300 m<sup>2</sup>/g e densidade média de 60 g/l. Mohsen et al (2019) afirmam que o módulo é de 1200 GPa e a resistência à tração de 150 GPa.

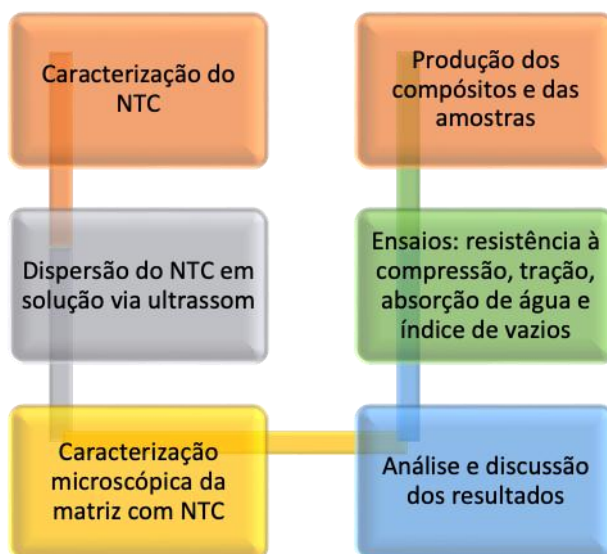
Em relação à dispersão dos NTCs, afirma-se que eles tendem a se atrair e se aglomerar, gerando um campo de força definido como Força de Van der Waals. Sua dispersão possui muito potencial no aumento da resistência mecânica e módulo de elasticidade, quando utilizado da forma correta (Jung *et al.*, 2020). O tipo de aditivo empregado para realizar a dispersão do nanotubo é de suma importância. Collins et al (2012) avaliaram a dispersão, (a) dispersão sem usar aditivo, (b) dispersão em um agente arrastador de ar e (c) dispersão em um aditivo a base de policarboxilato. Segundo os autores, na amostra em que a dispersão foi realizada sem usar aditivo, mesmo com o método de ultrassom, é possível notar pontos de aglomeração de NTCs na amostra após a cura. Na dispersão em um agente arrastador de ar é possível observar alguns pontos com pouca dispersão do nanotubo. O inverso ocorreu na amostra com dispersão em aditivo a base de policarboxilato, tendo dispersão mais uniforme de NTCs, comparando com as outras duas amostras e a nenhuma aglomeração é visível.

O método de dispersão ultrassônica é o mais utilizado para dispersar os NTC, sendo um método de avaliação não destrutivo. Esse método utiliza um transmissor ultrassônico que emiti ondas ultrassônicas, gerando assim uma enorme energia ultrassônica, cavitando e esfoliando os nanotubos, dispersando assim em uma solução aquosa. Segundo Koshio (2001) pode ser utilizado para dispersão dos NTCs em água, óleo ou polímeros. Metaxa et al. (2013) em seu estudo, indicaram que a dispersão através de energia ultrassônica foi o método de dispersão mais eficaz.

## 2. Metodologia

As etapas desse estudo experimental foram definidas seguindo a sequencia: (a) caracterização do NTC por Microscopia eletrônica de varredura (MEV); (b) dispersão do NTC em solução por meio do método de ultrassom; (c) caracterização microestrutural da matriz com inserção de NTC a fim de verificar a dispersão do material inerte; (d) confecção das amostras com teores de NTC entre 0,08 e 0,15%, além da amostra referência (REF); (e) determinação da resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias; determinação da resistência à tração, índices físicos e de absorção capilar aos 7 e 28 dias; (f) por fim, análise dos resultados. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma da pesquisa.

**Figura 1** – Fluxograma do programa experimental para realização da pesquisa.



Fonte: Autores.

## 2.1 Materiais utilizados

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo CP II F-40 da Votorantim Cimentos, sem pozalanas, dado que essas já constam no traço da matriz. Sua massa específica foi de 3,08 g/cm<sup>3</sup>. A areia utilizada neste estudo foi a Areia fina extraída de rio de origem quartzosa, com massa unitária de 1.574,84 kg/m<sup>3</sup> e massa específica de 2.612,43 kg/m<sup>3</sup>. A obtenção da granulometria da areia, apresentada na Tabela 2, obtida de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A cinza volante é oriunda de usina termoelétrica, no município de Candiota/RS. Sua massa específica é de 2.200,0 kg/m<sup>3</sup>. A sílica ativa utilizada é da marca Tecnosil, com massa específica de 2,22 g/cm<sup>3</sup>, teor de SiO<sub>2</sub> maior de 90% e com superfície obtida por BET de 19.000 m<sup>2</sup>/kg. O aditivo superplastificante com acelerador de pega usado na pesquisa foi fornecido pela empresa Construrohr, da marca GCP tipo ADVA 518. Na Tabela 3 segue algumas especificações do aditivo utilizado, oriundas do fabricante do produto.

**Tabela 2** - Determinação Granulométrica da Areia.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Passada Acumulada (%)
4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	0,00	0,00	0,00	100,00
1,2	0,00	0,00	0,00	100,00
0,6	0,00	0,00	0,00	100,00
0,3	11,50	3,28	3,28	96,72
0,15	245,70	70,12	73,40	26,60
Fundo	93,20	26,60	100,00	0,00
Total	350,40	100,00	176,68	

Fonte: Autores.

**Tabela 3** - Propriedades do Aditivo Superplastificante.

Dados Técnicos	
Função	Aditivo superplastificante para concreto
Base Química	Policarboxilato
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
Ações	Redutor de água tipo 2 e acelerador de pega
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,060-1,180

Fonte: GCP (2021).

O nanotubo de carbono usado neste estudo foi fornecido por pesquisadores da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha. Na Tabela 4 segue algumas características oriundas do fornecedor.

**Tabela 4** - Características do Nanotubo de Carbono.

Dados Técnicos			
Fabricante	XFNano	Aspecto	Pó
Pureza	> 90 %	Cor	Preto
Elementos	Carbono 92,65 %	Diâmetro externo	> 50 nm
	Níquel 2,76 %	Diâmetro interno	5-15 nm
	Ferro 0,23 %	Comprimento	10-20 µm
	Enxofre 0,12 %		

Fonte: *XFNano* (2021).

Para a comprovação dos dados fornecidos pelo fornecedor foram realizados dois ensaios. O primeiro utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), buscando verificar as dimensões do NTC do presente estudo. Na Tabela 5 seguem as características oriundas destes dois ensaios.

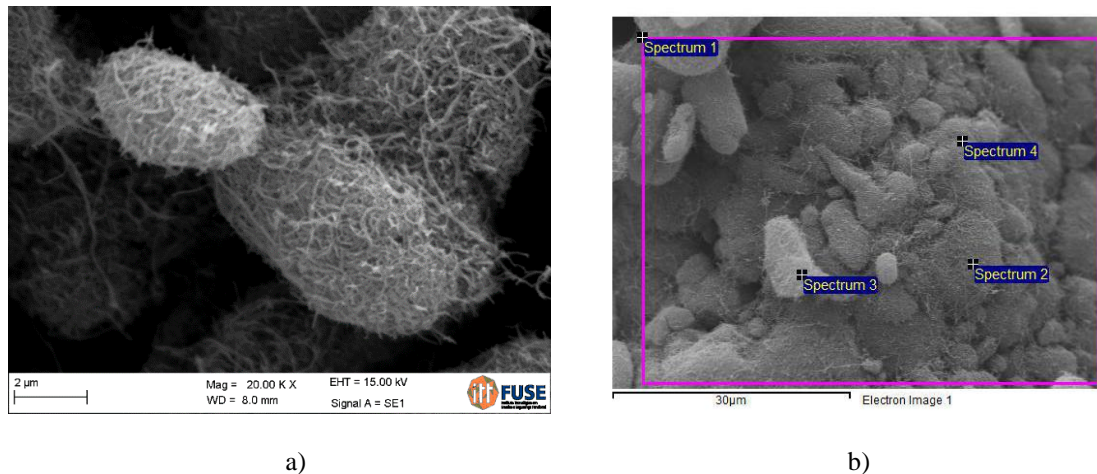
**Tabela 5** - Características do Nanotubo de Carbono (MEV e EDS).

Dados Técnicos	
Fabricante	XFNano
Pureza	> 98 %
Elementos	Carbono 98,95 % e Níquel 1,05%
Aspecto e cor	Pó, em cor preta
Diâmetro e comprimento	D de ~ 50 nm e C de ~ 10-20 µm

Fonte: Autores.

O segundo ensaio consiste na análise química qualitativa do NTC, feita através da Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), que identifica todos os componentes químicos que a amostra usada possui, e o seu grau de pureza. Na Figura 2 é apresentado o NTC usado neste trabalho. Na Figura 2a pode-se observar o NTC usado nesse estudo ainda no formato e pó, sem nenhum tipo de dispersão, na Figura 2b os pontos para coleta da análise química do NTC, onde foi possível verificar o nível de pureza dele.

**Figura 2** - Microscopia eletrônica de varredura e espectros de análise no EDS.



Fonte: Autores.

## 2.2 Proporções entre os materiais

Foram moldadas três diferentes misturas, nomeadas como dosagens REF; NTC 0,08 e NTC 0,15. O traço REF, trata-se da referência para as análises comparativas. O traço NTC 0,08 tem adição de 0,08% de NTC em relação ao cimento e o traço NTC 0,15 com teor de 0,15%. Os teores de adição do NTC tiveram como base os estudos realizados por Sobolkina *et al.* (2012) e Carriço *et al.* (2018).

Para alcançar uma plasticidade adequada para moldagem, a relação  $a/agl$  foi de 0,30 para todos os traços. O aditivo superplastificante foi usado no teor de 3% em relação ao cimento, para os três traços. A ordem de mistura contou primeiramente com os materiais secos na argamassadeira, sendo areia, cimento, sílica ativa, cinza volante e misturados por 3 minutos. Após, foi adicionado 90% da água da mistura e misturado por mais 4 minutos. Passado esse tempo foi adicionado os 10% restantes da água e misturado por mais 4 minutos. Para finalizar a mistura foram adicionados os NTCs dispersos no aditivo superplastificante nas amostras contendo NTCs e somente o aditivo superplastificante na amostra de referência, por aproximadamente 5 minutos. Na Tabela 6 apresentam-se as composições avaliadas.

**Tabela 6** – Proporção dos materiais em massa.

Material	REF	NTC 0,08	NTC 0,15
Cimento	1,00	1,00	1,00
Sílica	0,58	0,58	0,58
Cinza Volante	0,87	0,87	0,87
Areia	2,31	2,31	2,31
A/agl	0,30	0,30	0,30
Nanotubo de Carbono	0,00	0,08	0,15

Fonte: Autores.

## 2.3 Ensaios experimentais

Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido. A consistência das misturas foi obtida conforme a ABNT NBR 13276:2016. Considerando o uso dos NTCs no concreto, definiu-se sua dispersão no aditivo superplastificante, a base de policarboxilato. Para tal, os NTCs foram adicionados ao aditivo químico, e utilizado um equipamento de dispersão ultrassônica. A velocidade de aplicação de energia ultrassônica foi uniforme por 2 horas e em temperatura ambiente. A lavadora ultrassônica tem frequência de 25 kHz. No estado endurecido foi utilizado um fragmento de amostra analisado na

microscopia eletrônica de varredura, com idade de 56 dias. Determinou-se a resistência à tração na flexão e à compressão conforme a ABNT NBR 13279:2005, em uma máquina universal de testes, aos 7 e 28 dias.

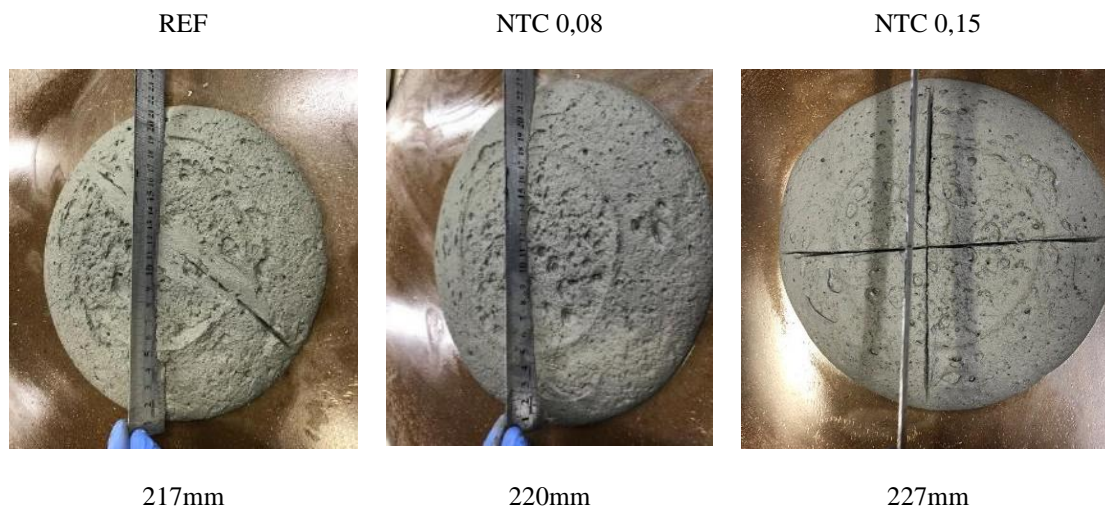
Para as amostras cilíndricas, a resistência à compressão foi obtida experimentalmente pela ABNT NBR 5739:2018. A análise foi realizada nas idades de 7, 28 e 56 dias. Foram realizados os ensaios de índices físicos de absorção de água, índice de vazios, massa específica, conforme a ABNT NBR 9778:2005 e de absorção de água por capilaridade pela ABNT NBR 9779:2013, nas idades de 7 e 28 dias.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Índice de consistência

Para cada dosagem foram realizadas três medições do diâmetro e obtido o valor médio, que consta na Figura 3, assim como, o aspecto da mistura. Conforme os resultados obtidos, a trabalhabilidade das amostras com adição de NTCs tem grande influência na sua consistência. Conforme Marcondes (2015) o uso da técnica de dispersão por ultrassom e a boa dispersão dos NTCs no aditivo traz uma melhora no abatimento. Medeiros *et al.*, (2015) afirmam que quanto maior o percentual de NTCs na matriz cimentícia, menor se torna a trabalhabilidade da amostra, tornando-a mais consistente, resultado diferente do obtido nesse estudo. Tal melhoria pode ter sido proporcionada pelo processo citado de dispersão. Além disso, há de ser citado, que o percentual de NTCs utilizado nessa pesquisa foi muito reduzido, e pode não ter impacto no abatimento gerado, uma vez que, conforme percebe-se, os valores obtidos são muito semelhantes entre si, e não impactariam em termos de aplicação.

**Figura 3** – Aspecto das misturas após a realização do ensaio de determinação do índice de consistência.



Fonte: Autores.

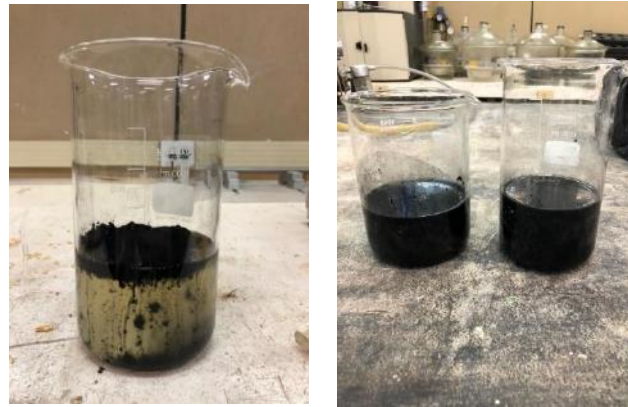
#### 3.2 Análise visual da dispersão do Nanotubo de Carbono

Na Figura 4a é possível observar o NTC no aditivo superplastificante sem nenhum tipo de dispersão e na Figura 3b, o NTC no aditivo superplastificante após a dispersão. Como pode-se perceber, o uso da técnica para dispersão possibilitou o espalhamento do material na mistura, o que impacta consequentemente na sua distribuição na matriz e no desempenho a ser conferido em termos dos benefícios mecânicos. As referidas imagens se assemelham ao resultado apontado por Collins *et al.* (2012) que testou vários métodos de dispersão e as amostras que não foram dispersas pelo método de ultrassom apresentaram aglomerados na mistura e por Marcondes (2012) que utilizou para a dispersão do NTC um aditivo superplastificante a base de policarboxilato e o aparelho de ultrassom. Segundo o autor, um dos motivos da escolha desse aditivo foi o fato de ele possuir



um pH baixo e pesquisas já vem demonstrando que a funcionalização do NTCs nesse meio seja um aliado na dispersão dos NTCs (LI *et al.* 2004). Como já pontuado, essa dispersão pode ter favorecido de modo que os NTCs não tenham impactado na trabalhabilidade da mistura.

**Figura 4** – (A) Nanotubo colocado no superplastificante sem dispersão e (b) Nanotubo de carbono após a dispersão.



(a)

(b)

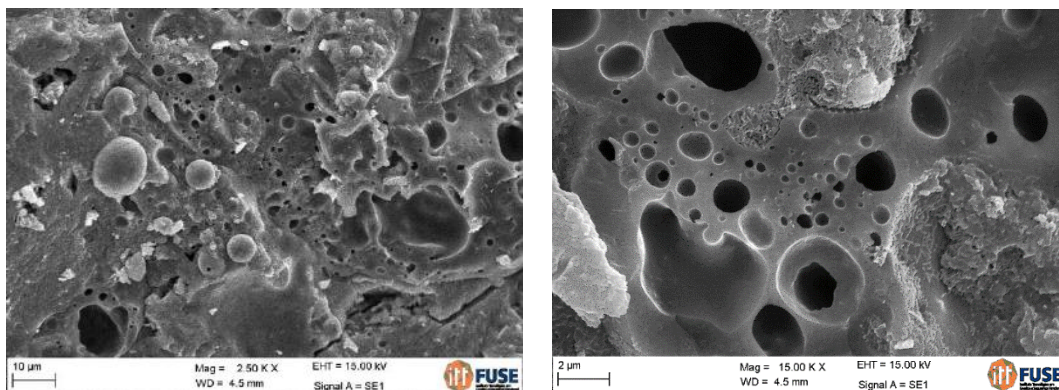
Fonte: Autores.

### 3.3 Estado endurecido

#### 3.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

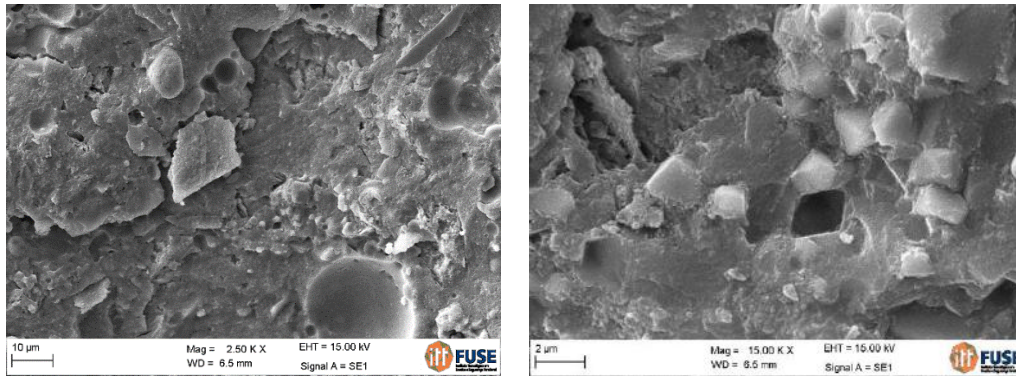
Na Figura 5 consta a amostra de referência. Na Figura 6 tem-se a amostra com a adição de 0,08% de NTCs e a Figura 7 é referente ao traço contendo 0,15% de NTC é possível observar através do uso do MEV as imagens microscópicas das amostras aos 56 dias de cura.

**Figura 5** - Amostra de Referência- (a) magnificação de 2,5kX e (b) magnificação de 15kX.



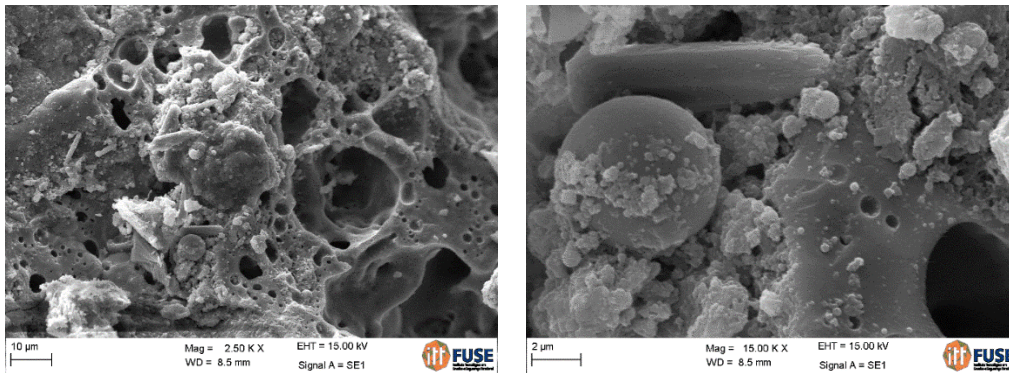
Fonte: Autores.

**Figura 6** - Amostra contendo 0,08% de NTC - (a) magnificação de 2,5kX e (b) magnificação de 15kX.



Fonte: Autores.

**Figura 7** - Amostra contendo 0,15% de NTC- (a) magnificação de 2,5kX e (b) magnificação de 15kX.



Fonte: Autores.

Na Figura 5 amostra de referência observa-se a presença de alguns vazios que podem ter interferido no resultado de absorção de água que aos 7 dias ficou em torno de 16% maior que os traços contendo NTCs. Adhikary *et al.* (2021) que testaram o uso de nanotubos em concretos leves falam que a sua dispersão na matriz reduz a absorção de água, o que vai ao encontro dessa percepção no ensaio microestrutural realizado.

Na Figura 6 pode-se observar que os vazios se encontram preenchidos como esperado, não foram encontrados indícios de aglomerações de NTCs. Além disso, é possível pontuar que as imagens obtidas e apresentadas nessa figura se assemelham as imagens de MEV obtidas por Hassan, Elkad e; Shaaban (2019). Na Figura 7 é possível observar alguns vazios, mas nenhum indício de aglomerações de NTCs foi encontrado, apesar dos vazios nas amostras os resultados obtidos no ensaio de compressão aos 56 dias apontaram para um aumento de 23,6% em relação ao traço de referência. Mohsen *et al.* (2019) em seu estudo demonstraram que as amostras contendo a adição de NTCs entre 0,03 e 0,08% obtiveram melhores dispersões. No entanto os traços contendo a adição entre 0,15 e 0,25% de NTCs obtiveram menos aglomerações e os vazios preenchidos com NTCs. Os traços contendo a adição entre 0,15 e 0,25% mesmo sendo mais densas, quando comparado com os traços contendo entre 0,03 e 0,08% obtiveram valores de permeabilidade maiores.

### 3.4 Resistência à tração na flexão e à compressão nas amostras prismáticas

Os ensaios de determinação da resistência à tração na flexão e à compressão foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, em triplicata. Os valores obtidos nos traços são apresentados na Tabela 7, destacando-se a resistência à tração média e desvio padrão máximo.

**Tabela 7** - Valores obtidos de Tração na Flexão- valores médios e desvio máximo absoluto.

Idade (dias)	$f_t$ (MPa)		
	REF	NTC 0,08	NTC 0,15
7	2,0 ± 0,2	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1
28	2,3 ± 0,1	2,7 ± 0,1	2,6 ± 0,1

Fonte: Autores.

Comparando com o traço de referência, o traço contendo 0,08% de NTC obteve um aumento de 16,5% na resistência à tração na flexão aos 28 dias. Aos 7 dias os traços com adição de NTCs não obtiveram aumento de resistência quando comparados com o traço de referência. Todas as amostras apresentaram progressão entre os resultados aos 7 e os ensaios aos 28 dias, como era esperado. No estudo de Mohsen *et al.* (2019) as amostras com teor de adição de nanotubos de 0,03 e 0,08%, em relação ao traço referência, obtiveram um aumento na resistência à tração de 40%, sendo superior ao incremento percebido no presente estudo. Complementarmente, cabe destacar que o benefício percebido nesse estudo não apresentou relação linear entre o percentual de uso de NTC e o resultado verificado de resistência à tração.

Os valores obtidos de resistência à compressão nos traços são apresentados na Tabela 8, destacando-se a resistência à compressão média e desvio padrão máximo. Também conforme a norma orientativa, quando o desvio absoluto máximo for superior a 0,5 MPa, é calculada uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, identificando-o no relatório de ensaio, com asterisco.

**Tabela 8** - Valores obtidos de Compressão- valor médio e desvio máximo absoluto.

Idade (dias)	$f_{c,prisma}$ (MPa)		
	REF	NTC 0,08	NTC 0,15
7	43,5 ± 0,4	45,0 ± 0,5	40,8 ± 0,5
28	69,4 ± 0,5	73,9 ± 0,5	72,7 ± 0,4

Fonte: Autores.

Comparando com o traço de referência, o traço contendo 0,08% de NTC obteve um aumento de 3,5% na resistência à compressão aos 7 dias e um aumento de 6,6% aos 28 dias. Aos 7 dias, os traços com adição de NTCs não obtiveram aumento de resistência quando comparados com o traço de referência. O traço contendo 0,15% de NTC obteve um aumento de 4,8% na resistência aos 28 dias quando comparado com o traço de referência. Ressalta-se que a utilização dos NTCs não impactou de modo diretamente proporcional em relação ao percentual e os resultados de compressão, resultado também percebido na análise da tração.

Com a adição de 0,30% de NTC em relação ao cimento, em seu estudo, Knuth *et al.* (2016) obteve um aumento de 12% na resistência à tração na flexão e à compressão, quando comparado com a amostra de referência. Aos 7 dias, Lemes & Felix, (2016) em seu estudo obtiveram no traço de referência valores de resistência à tração e à compressão superiores aos traços com adição de NTC. Já aos 14 e 28 dias essa tendência mudou, os traços com a adição de NTC obtiveram ganhos na resistência. O traço contendo 0,30% de NTC obteve uma melhora de 20% aos 28 dias em relação ao traço de referência.

### 3.5 Resistência à compressão das amostras cilíndricas

Os valores obtidos nos traços são apresentados na Tabela 9, destacando-se a resistência à compressão média e potencial, ou seja, o maior valor entre as amostras.

**Tabela 9** - Valores obtidos de Compressão- valor médio e desvio máximo absoluto.

Idade (dias)	$f_{c,cilindrico}$ (MPa)		
	REF	NTC 0,08	NTC 0,15
7	49,0 ± 1,3	46,4 ± 2,9	46,5 ± 2,1
28	73,6 ± 0,9	68,6 ± 8,9	69,5 ± 4,1
56	72,8 ± 2,9	84,3 ± 2,6	89,6 ± 3,8

Fonte: Autores.

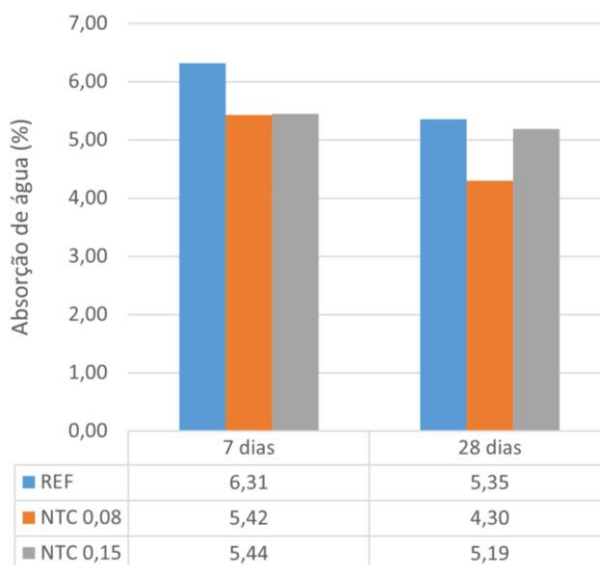
Analisando os ensaios obtidos aos 7 dias, percebe-se que a amostra referência apresentou resistência superior as demais, com valores obtidos de 98% e 95,4% do valor da referência para os traços NTC 0,08 e NTC 0,15, respectivamente.

Observando os resultados obtidos aos 28 dias, nota-se que o traço de comportamento superior passa a ser do traço NTC 0,08, resultado compatível com o obtido nos resultados de resistência à tração. Em relação à contribuição na resistência e os teores de uso, o estudo de Lelusz (2014), no qual foram utilizados os teores de 0,06 e 12% de NTC em argamassas, os autores perceberam comportamento superior no traço 0,06, sendo, portanto, semelhantes aos resultados obtidos nessa pesquisa se referida a idade de 28 dias. Outra semelhança a ser citada em relação ao estudo do presente autor, é que ele também obteve valores superiores na amostra de referência quando avaliados os 7 dias. Jung *et al.* (2020) obtiveram melhorias de 5,5% na resistência à compressão com a adição de 0,5% de NTCs e Medeiros *et al.* (2015) apontaram para um aumento na resistência à compressão de 27% com a adição de 0,40% de NTC, em seu estudo o traço contendo 0,50% obteve resultados semelhantes ao traço de referência (sem adição de NTC). Aos 56 dias, os resultados obtidos com o traço NTC 0,08 e NTC 0,15 obtiveram um aumento de 15,8% e 23,6% em relação ao traço de referência.

### 3.6 Absorção de água total e por capilaridade, índice de vazios, massa específica

Os valores médios obtidos das três amostras para os índices físicos de absorção de água, índice de vazios e massa específica das composições avaliadas são apresentados na sequência. Os resultados relativos aos ensaios de absorção de água para os diferentes traços estão representados na Figura 8.

**Figura 8** - Resultados obtidos de absorção de água (valores médios).

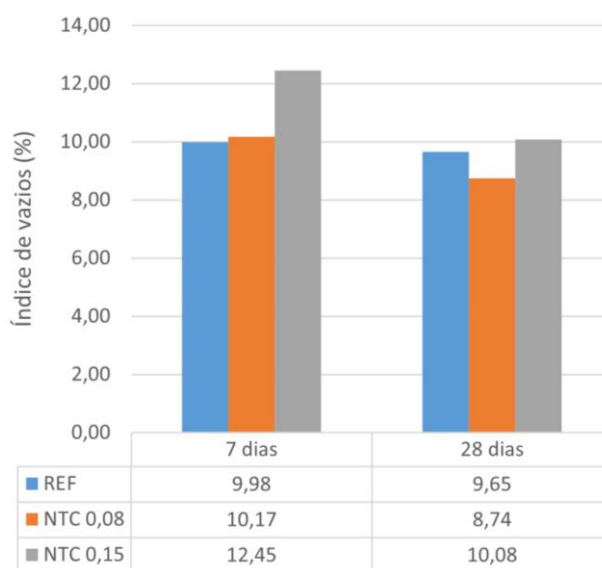


Fonte: Autores.

Conforme é observado, aos 7 dias as amostras contendo a adição de nanotubos de carbono de 0,08% e 0,15% apresentaram a absorção de água 16,4% e 16,0% menor que a amostra de referência sem a adição de nanotubos de carbono. Aos 28 dias as amostras contendo 0,08% de nanotubos de carbono apresentou a absorção de água de 24,4% menor que a amostra de referência, a amostra contendo 0,15% de nanotubos de carbono apresentou um percentual de 6% menor que a amostra de referência, ficando semelhante a amostra de referência. Quando comparamos com os resultados de resistência à compressão aos 28 dias o traço contendo 0,08% de NTCs apresenta um aumento na resistência à compressão e a diminuição da absorção de água.

Em seu estudo, Marcondes (2015) obteve melhorias na absorção de água com a adição de 0,30 % de NTCs, chegando em uma redução de 3,9% para as amostras com dispersão quando comparado com a amostra de referência. Knuth *et al.* (2016) indicaram como resultado em seu estudo o aumento da absorção de água no traço contendo a adição de 0,30% de NTCs. Esse resultado pode estar relacionado com a possibilidade de falhas na dispersão dos NTCs na matriz cimentícia gerando poros de maior tamanho conforme pode ser visto em sua análise de MEV. Em seu estudo, Carriço *et al.* (2018), avaliaram um traço contendo a adição de 0,10% de NTCs que apresentou melhor desempenho quando comparado ao traço de referência obtendo uma melhora de 12% na absorção de água. Dando continuidade as análises dos índices físicos, a Figura 9 ilustra os valores obtidos dos resultados de índices de vazios dos traços.

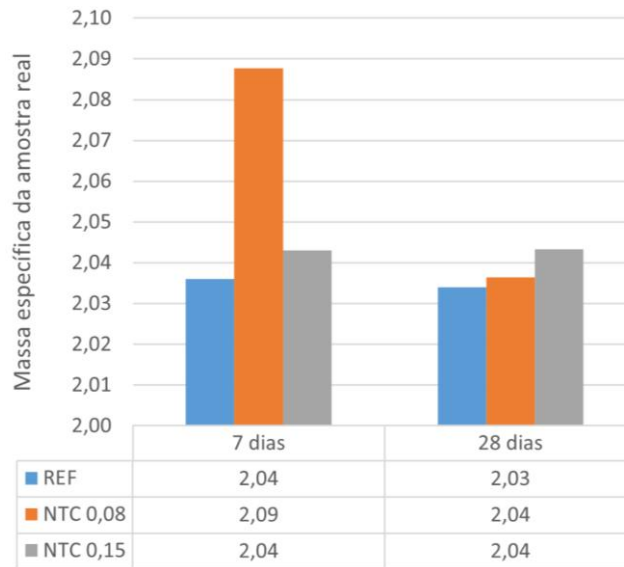
**Figura 9 - Resultados dos índices de vazios.**



Fonte: Autores.

Um comportamento inverso é observado quando comparado com a absorção de água se observou para o índice de vazios. Aos 7 dias o traço referência e o traço NTC 0,08 apresentam resultados semelhantes, enquanto o NTC 0,15 apresenta um valor 19,8% maior que o traço referência. Aos 28 dias o traço NTC 0,08 apresentou uma diminuição de 10,8% do valor de índices de vazios quando comparado com o traço de referência e apresentou um aumento de 2,1% no resultado de resistência à compressão. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a formação dos produtos de hidratação do cimento se dá pela redução dos vazios, ampliando assim a resistência mecânica dos traços. Na Figura 10 são apresentados os resultados da massa específica real dos traços.

**Figura 10 - Resultados da massa específica real.**

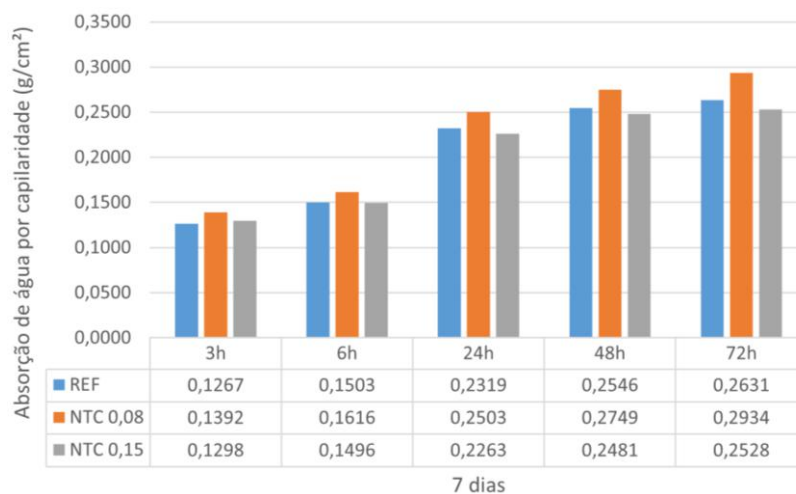


Fonte: Autores.

Aos 7 dias os resultados do traço NTC 0,08 apresenta um aumento 2,3% da massa específica real quando comparado com a amostra de referência. Aos 28 dias os traços NTC 0,08 e NTC 0,15 obtiveram um pequeno aumento de 0,3% e 0,7% comparado ao traço de referência. Quando falamos de durabilidade esses fatores se tornam um índice muito importante, pois com a redução dos vazios a probabilidade de a amostra absorver a água diminui evitando assim a probabilidade de problemas na estrutura como a corrosão de armaduras. Amostras com menos vazios tendem a ser mais resistentes.

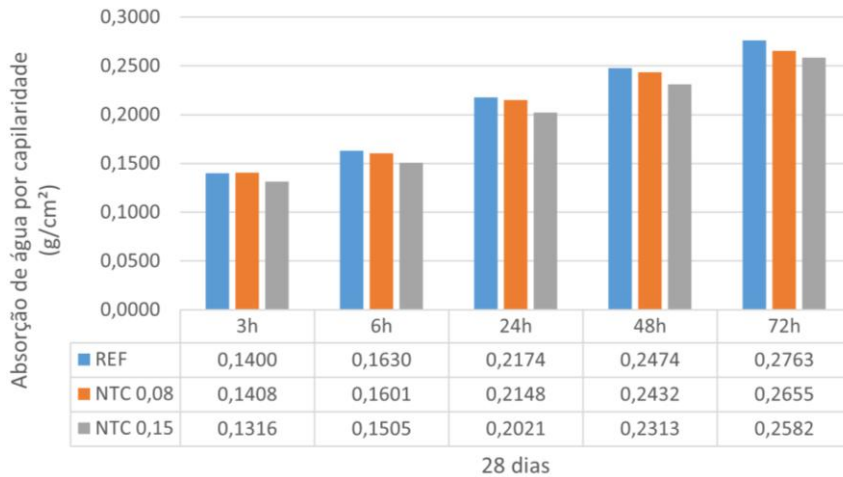
Os valores médios obtidos das três amostras para os índices físicos de absorção de água por capilaridade das composições avaliadas são apresentados na sequência. Os resultados relativos aos ensaios de absorção de água por capilaridade aos 7 dias e 28 dias para os diferentes traços estão representados nas Figuras 11 e 12.

**Figura 11 - Resultado obtido na Absorção por Capilaridade – 7 dias.**



Fonte: Autores.

**Figura 12** - Resultado obtido na Absorção por Capilaridade – 28 dias.



Fonte: Autores.

Conforme é observado, aos 7 dias as amostras contendo a adição de nanotubos de carbono de 0,15% apresentaram a absorção de água por capilaridade 2,4% a 3,9% menores entre as 24 e 72 horas de ensaio comparado a amostra de referência sem a adição de nanotubos de carbono. Aos 28 dias as amostras contendo 0,08% de nanotubos de carbono apresentaram a absorção de água por capilaridade 1,2% a 3,9% entre as 6 e 72 horas de ensaio menor que a amostra de referência, a amostra contendo 0,15% de nanotubos de carbono apresentou um percentual entre 6,0% e 7,7% menor que a amostra de referência.

#### 4. Considerações Finais

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam e apontam a melhora das características mecânicas e índices físicos nas amostras que contêm a adição de NTC. Destacando que tais melhoras tem ligação direta com a boa dispersão dos NTCs na matriz cimentícia. Em relação as análises realizadas através do MEV, no traço referência observa-se a presença de alguns vazios que podem ter interferido no resultado do ensaio de absorção de água que aos 7 dias ficou em torno de 16% maior que os traços contendo NTCs. No traço NTC 0,08 pode-se observar que os vazios se encontram preenchidos como esperado, não foram encontrados indícios de aglomerações de NTCs. Nas imagens do traço NTC 0,15 é possível observar alguns vazios, mas nenhum indício de aglomerações de NTCs foi encontrado, apesar dos vazios nas amostras os resultados obtidos no ensaio de compressão aos 56 dias apontaram para um aumento de 23,6% em relação ao traço de referência.

No ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão aos 7 dias os traços com adição de NTC não obtiveram aumento de resistência quando comparados com o traço de referência, já aos 28 dias o traço contendo 0,08% de NTC obteve um aumento de 16,5% na resistência à tração na flexão. Na resistência à compressão, quando comparando com o traço de referência, o traço contendo 0,08% e 0,15% de NTC obtiveram um aumento de 6,6% e 4,8% na resistência aos 28 dias quando comparado com o traço de referência. Em relação aos resultados obtidos da resistência à compressão percebe-se que aos 7 dias a amostra referência apresentou resistência superior as demais, com valores obtidos de 98% e 95,4% do valor da referência para os traços NTC 0,08 e NTC 0,15, respectivamente. Aos 28 dias, nota-se que o traço de comportamento superior passa a ser do traço NTC 0,08, com um ganho de 2,2%, resultado compatível com o obtido nos resultados de resistência à tração. Aos 56 dias, os resultados obtidos com o traço NTC 0,08 e NTC 0,15 obtiveram um aumento de 15,8% e 23,6% em relação ao traço de referência.

Em relação aos ensaios de durabilidade, aos 7 dias os traços contendo a adição de NTCs de 0,08% e 0,15% apresentaram a absorção de água 16,4% e 16,0% menor quando comparado ao traço de referência. Aos 28 dias as amostras

contendo 0,08% e 0,15% de nanotubos de carbono apresentaram a diminuição na absorção de água de 24,4% e 6% em relação ao traço de referência. Um comportamento inverso é observado quando comparado o índice de vazios com a absorção de água. Aos 7 dias o traço referência e o traço NTC 0,08 apresentam resultados semelhantes, enquanto o NTC 0,15 apresenta um valor 19,8% maior que o traço referência. Aos 28 dias o traço NTC 0,08 apresentou uma diminuição de 10,8% do valor de índices de vazios quando comparado com o traço de referência e apresentou um aumento de 2,1% no resultado de resistência à compressão.

Em relação a massa específica, aos 7 dias o traço NTC 0,08 apresentou um aumento de 2,3% da massa específica real quando comparado com a amostra de referência. Aos 28 dias os traços NTC 0,08 e NTC 0,15 obtiveram um pequeno aumento de 0,3% e 0,7% comparado ao traço de referência. Os resultados de absorção de água por capilaridade o traço NTC 0,15 aos 7 dias apresentou uma redução de 2,4% a 3,9% entre as 24 e 72 horas de ensaio comparado ao traço referência. Aos 28 dias o traço NTC 0,08 e NTC 0,15 apresentaram uma diminuição na absorção de água por capilaridade de 1,2% a 3,9% e 6,0% e 7,7% entre as 6 e 72 horas de ensaio.

## Referências

- ABNT NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.
- ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.
- ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.
- ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
- ABNT NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
- ABNT NBR 9779:2013 - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade
- ABNT NBR 13279:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
- ABNT NBR 13276:2016 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.
- Adhikary, S.K *et al.* (2021) Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11
- Batiston, E. R. (2012) Incorporação de nanotubos de carbono em matriz de cimento portland. 1–152
- Cariço, A. *et al.* (2018) Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121–133.
- Celadyn, W. (2016) Innovative Structural Systems. v. 1, n. International Scientific Workshops „Innovative Structural Systems in Architecture” (ISSA2016) November 3-5, 2016, Wrocław, Poland, 2016.
- Collins, F., Lambert, J., & Duan, W. H. (2012) The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 201–207
- De Medeiros, M. H. F. *et al.* (2015) Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. *Revista Materia*, 20(1), 127–144
- Ferro, G. Carbon nanotube cement composites. Convegno Nazionale IGF XXI. Anais...2011
- Foldyna, J., Foldyna, V., & Zelenak, M. (2016) Dispersion of carbon nanotubes for application in cement composites. *Procedia Engineering*, 149, 94–99
- Hassan, A., Elkady, H., & Shaaban, I. G. (2019) Effect of Adding Carbon Nanotubes on Corrosion Rates and Steel-Concrete Bond. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12
- Henche, D. (2013) Composto Cimentício de Alta Resistência com Adição de Nanotubos de Carbono.
- Hu, Y. *et al.* (2014) Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 70, 332–338
- Iijima, S. (2002) Carbon nanotubes: Past, present, and future. *Physica B: Condensed Matter*, 323, 1–5
- Jo, B. W. *et al.* (2017) Strength and durability assessment of portland cement mortars formulated from hydrogen-rich water. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Jung, M. *et al.* (2020) Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE). *Cement and Concrete Research*, 131, 106017



- Knuth, R.D, Margarete, R.F.G, Silva, R.M.E, & Knuth, F. A. (2016) reforço em compósito de cimento portland através da adição de nanotubos de carbono de paredes múltiplas. 140–144.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010) Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1052–1059.
- Koshio, A. *et al.* (2001) Uma maneira simples de reagir quimicamente Nanotubos de carbono de parede simples com materiais organicos usando a ultrasonificação. 1, 361–363
- Lelusz, M. (2014) Carbon nanotubes influence on the compressive strength of cement composites. *Technical Transactions*, v. 2014, n. Civil Engineering Issuet 1-B (5) 5–11
- Lemes, Felix. (2016) Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento portland com adição de nanotubo de carbono. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil. 22° CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, Brasil, (2), 4033–4044.
- Li, H., Xiao, H. Gang, Ou, & Ping. J. (2004) A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 435–438, 2004.
- Liew, K. M., Kai, M. F., & Zhang, L. W. (2016) Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 301–323
- Lourie, O., Cox, D. M., & Wagner, H. D. (1998) Buckling and collapse of embedded carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 81(8), 1638–1641.
- Macleod, A. J. N. *et al.* (2019) Quantitative microstructural characterisation of Portland cement-carbon nanotube composites using electron and x-ray microscopy. *Cement and Concrete Research*, 123, 105767
- Makar, J. M., Margeson, J. C., & Luh, J. (2005) Carbon nanotube / cement composites - early results and potential applications. *Construction*, 2005.
- Makar, J.M, & Beaudoin, J. J. (2007) Carbon Nanotubes and Their Application in the Construction Industry. (Institute for Research in Construction, National Research Council Canada 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario, 368
- Marcondes, C. G. N., Medeiros, M. H. F., & Marques Filho, J., H. P. (2016) Carbon Nanotubes in Portland cement concrete: Influence of dispersion on mechanical properties and water absorption. *Alconpat Journal*, 5, 1–16.
- Marcondes, C. (2012) Adição De Nanotubos De Carbono Em Concretos De Cimento Portland – Absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas. 3, 143, 2012.
- Marcondes, C. (2015) Nanotubos de carbono em concreto de cimento portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. *Alconpat*, 4, 140–156
- Medeiros, M. H. F. *et al.* (2015) Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono ( NTC ): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão Portland cement composites with carbon nanotubes ( CNT ) addition : Properties in freshly state and compressive strength. *Revista Matéria*, 20(1), 127–144
- Mehta, P., & Monteiro, P, (2014) CONCRETO-Microestrutura- Propriedades e Materiais. v. 4, 2014.
- Melo, V. S. (2009) Nanotecnologia Aplicada ao Concreto: Efeito da Mistura Física de Nanotubos de Carbono em Matrizes de Cimento Portland. 146.
- Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S., & Shah, S. P. (2013) Carbon nanofiber cementitious composites: Effect of debulking procedure on dispersion and reinforcing efficiency. *Cement and Concrete Composites*, 36(1), 25–32.
- Mehta, P. K. *et al.* (2008) Microestrutura, propriedades e materiais. *Microestrutura do Concreto*, v. 37, n. 9, p. 21–202, 2008.
- Mohsen, M. O. *et al.* (2019) Carbon nanotube effect on the ductility, flexural strength, and permeability of concrete. *Journal of Nanomaterials*, 1–12,
- Parveen, S. *et al.* (2015) Microstructure and mechanical properties of carbon nanotube reinforced cementitious composites developed using a novel dispersion technique. *Cement and Concrete Research*, 73
- Saez de Ibarra, Y. *et al.* (2006) Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 203(6), 1076–1081
- Shah, S. P., & Konsta-Gdoutos, M. S. (2017) Uncoupling Modulus of Elasticity and Strength. *Concrete International*, 39(11), 37–42.
- Shi, T. *et al.* (2019a) Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites – A review. *Construction and Building Material*.
- Shi, T. *et al.* (2019b) FTIR study on early-age hydration of carbon nanotubes-modified cement-based materials. *Advances in Cement Research*, 31(8), 353–361
- Sobolkina, A. *et al.* (2012) Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1104–1113, 2012.
- Wang, B., Han, Y., & Liu, S. (2013) Effect of highly dispersed carbon nanotubes on the flexural toughness of cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 46, 8–12