

Artigo Original (Engenharias I)

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÃO DE NANOTUBO DE CARBONO

CHARACTERIZATION OF THE MECHANICAL AND THERMAL BEHAVIOR OF PORTLAND CEMENT MORTARS WITH ADDITION OF CARBON NANOTUBE

<http://dx.doi.org/10.31072/rcf.v9i2.714>

Silênia Priscila da Silva Lemes

Mestre em Engenharias pela Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA. Coordenadora do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA. Email: s.priscilalemes@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0918-5158>.Submetido em: 03 dez. 2018. Aprovado em: 09 dez. 2018. Publicado em: 15 dez. 2018.
E-mail para correspondência: s.priscilalemes@gmail.com.

Palavras-chave:

Nanotubo de carbono
Argamassa
Propriedade mecânicas
Propriedades térmicas

RESUMO: A nanotecnologia tem proporcionado inovações significativas na ciência e na engenharia. Um material novo que vem se destacando nessa área é o nanotubo de carbono (NTC). Há recentes pesquisas aplicadas a área da construção civil sobre os benefícios deste material às argamassas no desempenho de suas propriedades mecânicas e condutividade elétrica enquanto pouco estudo na condutividade térmica. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento mecânico e térmico de argamassas com adição de NTC. Os NTC foram adicionados às argamassas, em forma de dispersão, nos teores de 0,20%, 0,30% e 0,50% em relação à massa de cimento. Para as argamassas no estado fresco, foram determinados o índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado, conforme recomendações das NBR 13276/2005 e NBR 13278/2005. A avaliação das propriedades mecânicas das argamassas, foi medida através de ensaios de resistências à tração na flexão e à compressão, seguindo recomendações da NBR 13279/2005. As propriedades térmicas foram analisadas através de termogravimetria e condutividade térmica. Além disso, foi realizado ensaio complementar de absorção de água por imersão. As argamassas com adição de nanotubo de carbono, quando comparadas com a argamassa de referência, apresentaram melhorias em algumas propriedades analisadas, como resistência à tração na flexão e absorção de água por imersão. Os resultados obtidos na resistência à compressão e nas propriedades térmicas não foram significativos, conforme análise estatística, fator como a dispersão dos NTC na matriz do cimento Portland pode ter influenciado estes resultados.

Keywords:

Carbon nanotube
Mortar
Mechanical properties
Thermal properties

ABSTRACT: Nanotechnology has provided significant innovations in science and engineering. A new material that has stood out in this area is the carbon nanotube (CNT). Recent research has been applied in the construction industry on the benefits of this material to mortars in the performance of their mechanical properties and electrical conductivity while little study on the thermal conductivity. In this context, the present research aims to analyze the mechanical and thermal behavior of mortars with addition of NTC. The NTC were added to the mortars, in the form of dispersion, in the contents of 0.20%, 0.30% and 0.50% in relation to the mass of cement. For the mortars in the fresh state, the consistency index, mass density and incorporated air content were determined, according to the recommendations of NBR 13276/2005 and NBR 13278/2005. The evaluation of the mechanical properties of the mortars was measured by tensile strength tests in flexion and compression, following the recommendations of NBR 13279/2005. Thermal properties were analyzed by thermogravimetry and thermal conductivity. In addition, a water immersion supplementation assay was performed. The results obtained in the compressive strength and in the thermal properties were not significant,

²⁰ Atribuição CC BY: Este é um artigo de acesso aberto e distribuído sob os Termos da *Creative Commons Attribution License*. A licença permite o uso, a distribuição e a reprodução irrestrita, em qualquer meio, desde que creditado as fontes originais.

according to statistical analysis, factor as the dispersion of NTC in the Portland cement matrix may have influenced these results.

1 INTRODUÇÃO

Após grandes descobertas na área de materiais, de métodos construtivos e de tecnologia, o mundo científico busca resultados inovadores a partir de duas áreas recentes: a Nanociência e a Nanotecnologia ⁽¹⁾. Economia de energia, proteção ao meio ambiente e menor uso de matérias-primas escassas são possibilidades muito concretas do desenvolvimento em Nanotecnologia que está ocorrendo atualmente.

Pesquisas realizadas nas áreas de cimento e nanotecnologia têm demonstrado que algumas adições de nano compósito ao cimento permitem modificações importantes na sua microestrutura, o que proporciona a produção de argamassas e concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis ⁽²⁾.

O nanotubo de carbono (NTC), é uma das mais novas descobertas neste meio, foram descobertos no início da década de 90 por Sumio Iijima, são macromoléculas de átomos de carbono em um arranjo hexagonal periódica com uma concha cilíndrica e caracterizada como nanotubos de parede única e os nanotubos de paredes múltiplas ⁽³⁾. A estrutura de um NTC de parede única pode ser conceituada envolvendo uma folha de grafeno em um cilindro transparente enquanto NTC de paredes múltiplas consiste em várias folhas de grafeno enrolado sobre si mesmas formando um tubo ⁽⁴⁾. Este material apresenta extraordinárias propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, propriedades de extrema importância para argamassas e concretos. Por se tratarem de partículas manométricas, os NTC também representam a possibilidade de um aumento da variabilidade granulométrica e consequente efeito filer na composição de argamassas, melhorando as propriedades mecânicas, difusidade térmica e diminuindo a porosidade, fatores que aumentam a durabilidade das argamassas e concretos ⁽³⁾.

Mesmo com as melhorias constatadas por alguns pesquisadores, existem alguns desafios a serem enfrentados para a utilização dos nano compósitos em argamassas e concretos tais como alto custo e a dificuldade em se garantir uma dispersão eficiente na mistura.

Os artigos publicados sobre o uso de nanotubos em novos materiais referem-se, em sua maioria, a aplicações nas áreas de medicina e de eletrônicos. Poucos relatam sobre a experiência na área de engenharia civil, principalmente no tocante à adição de nanotubos ao cimento para fabricação de um novo tipo de argamassa ou concreto ⁽¹⁾.

A hipótese que gerou esta pesquisa foi a de verificar se a adição de nanotubos de carbono propicia efeitos benéficos às argamassas. O estudo inclui uma análise comparativa de argamassas fabricadas com cimento Portland de alta resistência inicial, levando-se em

conta o desempenho mecânico e térmico das misturas elaboradas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

De acordo com o objetivo proposto neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental buscando comparar mecanicamente e termicamente o desempenho de argamassas com e sem adição de nanotubo de carbono.

2.1 Materiais

Os materiais utilizados na confecção das argamassas consistem em: cimento Portland CP V-ARI de alta resistência inicial, areia natural média de origem quartzosa, água proveniente da rede pública, aditivo superplastificante com base de éter policarboxílico e nanotubo de carbono (NTC).

O nanotubos de carbono utilizado nesta pesquisa foi adquirido da empresa Timesnano, localizado na China. Trata-se de NTC de paredes múltiplas, conforme ilustra a **Figura 1**, sintetizados pelo método de deposição química a vapor ou também chamada CVD – Chemical Vapor Deposition. Comercialmente o produto é especificado com o nome de TNIM4.

Figura 11 – Nanotubo de carbono



Suas características e sua composição constam nas **Tabela 1** e **Tabela 2**, respectivamente.

Tabela 24 - Caracterização do NTC

Propriedades do Nanotubo de Carbono	
Pureza (%)	90
Diâmetro Externo (nm)	10 a 30
Diâmetro Interno (nm)	5 a 10
Comprimento (µm)	10 a 30
Densidade (g/cm ³)	2,1
Fator de Forma (L/d)	300 a 1000
Área Superficial (m ² /g)	>140
Condutividade Elétrica (s/cm)	>100
Coloração	Preto

Fonte: Fabricante

Tabela 25 - Composição do produto

Composição					
Componentes	C	Al	Fe	Ni	S
Peso (%)	88,33	4,21	0,18	0,97	0,16

Fonte: Fabricante

2.1 Dosagem das argamassas

Para o programa experimental foi fixado um traço de referência de argamassa (sem adição de NTC), para permitir a comparação deste com argamassas com adição de NTC. As dosagens estabelecidas seguem as prescrições da NBR 7215 (1997) ⁽⁵⁾, que estabelecem o traço de argamassa padrão, em peso, de 1:3 (cimento:areia) e relação água/cimento de 0,48. O teor de NTC utilizado foi de 0,25%, 0,30% e 0,50% e aditivo de 0,7% em relação à massa de cimento. A relação a/c foi fixada em 0,48 para todos os traços, para que a quantidade de água não interfira na futura comparação dos traços. O teor de aditivo foi adotado conforme recomendações do fabricante, onde o mesmo especifica que a dosagem de aditivo seja entre 0,2% a 1,0% em relação a massa de cimento. O traço utilizado, bem como a porcentagem de nanotubo correspondente, podem ser visualizados na **Tabela 3**.

Tabela 26 - Nomenclatura das dosagens de argamassas

Nomenclatura	Cimento	Areia	NTC (%)	a/c	Aditivo (%)
AR (Referência)	1	3	-	0,48	0,7
AN25	1	3	0,25	0,48	0,7
AN30	1	3	0,30	0,48	0,7
AN50	1	3	0,50	0,48	0,7

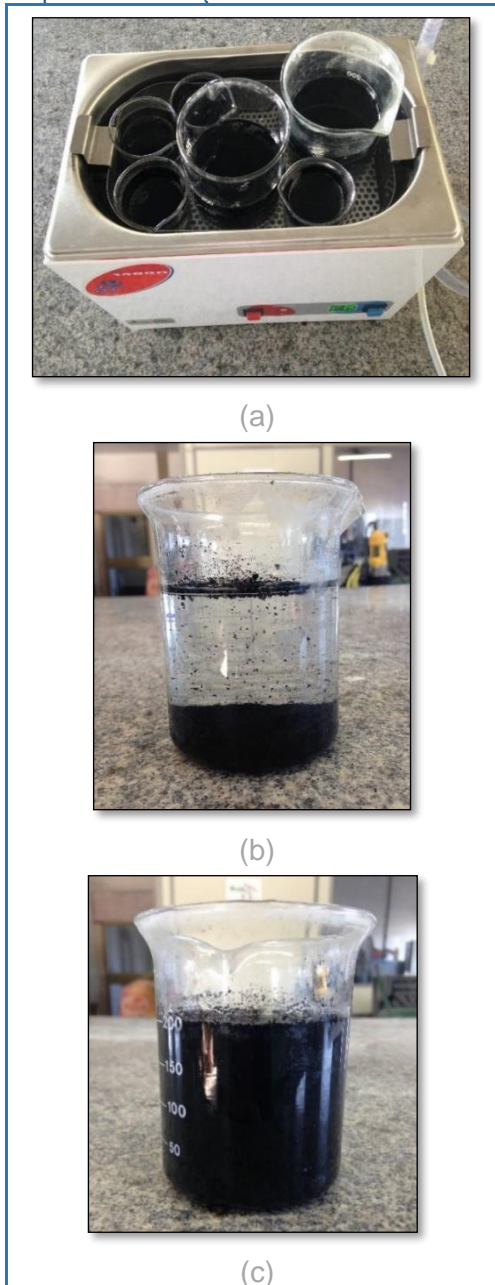
Os teores de nanotubos de carbono (NTC), foram definidos a partir da análise dos resultados de Melo ⁽¹⁾. Este autor observou que, a mistura de 0,30% de NTC apresentou melhor resistência mecânica em todas as idades analisadas em relação às porcentagens maiores. Dessa forma, decidiu-se confeccionar argamassas com adições inferiores e superiores a 0,30% de NTC.

2.2 Mistura das argamassas

Para a mistura da argamassa de referência (AR) seguiu-se as recomendações da NBR 7215 (1996) ⁽⁵⁾. Já para as argamassas com adição de NTC, é necessário que os nanotubos sejam adicionados às argamassas em forma de dispersão aquosa para aumentar sua eficiência. Essa foi uma das principais conclusões de Marcondes ⁽²⁾ que constatou a importância que a dispersão possui na redução de desvio padrão das amostras estudadas por ele. Para a dispersão dos nanotubos de carbono, foi utilizado um aparelho de ultrassom de imersão.

A metodologia e procedimentos de dispersão foi baseada nos estudos de Marcondes ⁽²⁾ e Borba ⁽³⁾, que consiste em adicionar água no equipamento e

condicionar béqueres com a solução a ser dispersa no seu interior. Primeiramente, é calculado a porcentagem de água, aditivo e NTC a ser utilizado na solução a ser dispersa. Após, mistura-se os componentes em um béquer, em seguida o béquer com a mistura foi colocado no aparelho de ultrassom de imersão (**Figura 2a**).

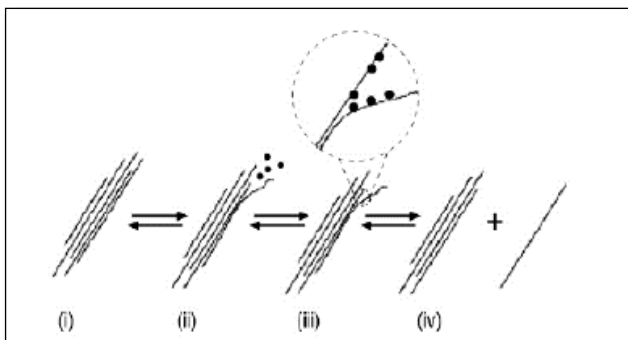
Figura 12 - Componentes e processo de dispersão da solução

O tempo de aplicação das ondas foi de 2 horas. A imagem da Figura 2 (b) apresenta o momento antes da realização do processo de dispersão e a imagem da Figura 2 (c), após as 2 horas do processo de dispersão. É possível notar que após o término da dispersão, a solução apresenta aspecto mais homogêneo. Após a

dispersão da solução, os procedimentos para a produção das argamassas com NTC foram os mesmos utilizados nas argamassas de referência.

Borba⁽³⁾, relata que o ultrassom tem papel fundamental na dispersão dos nanotubos de carbono. Ele atua criando uma tensão de cisalhamento entre os NTC, facilitando a entrada do tensoativo entre os mesmos, e conseqüentemente a sua separação, como é ilustrado na **Figura 3**.

Figura 13 - Mecanismos de separação dos nanotubos de carbono em uma dispersão estabilizada com tensoativo



Fonte: Vaisman et al., 2006

2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram utilizados moldes prismáticos metálicos com as seguintes dimensões de (4x4x16) cm. A moldagem dos CP's foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 13279 (2005) ⁽⁶⁾. Para cada tipologia de traços, foram moldados 9 (nove) corpos de prova, ou seja, totalizando 36 (trinta e seis) corpos de prova.

Para o ensaio de absorção de água foram utilizados moldes cilíndricos com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (1996) ⁽⁵⁾. Para o desenvolvimento dos ensaios de condutividade térmica, foram moldadas placas com dimensões de (30x30x5) cm, para cada traço foram moldados 3 (três) placas, o processo de moldagem utilizado, foram os mesmos para os corpos de prova prismáticos.

A desforma dos corpos de prova foram realizadas após 24 horas. Posteriormente, os corpos de provas foram curados em uma câmara úmida à temperatura de (23+/- 2) °C e umidade relativa do ar superior a 95%, conforme a NBR 5738 (2003) ⁽⁷⁾.

2.4 Caracterização das argamassas

As argamassas foram caracterizadas no seu estado fresco, quanto ao índice de consistência e a densidade de massa e teor de ar incorporado, e estado endurecido, quanto a resistência à tração na flexão e à compressão, absorção de água por imersão,

condutividade térmica e termogravimetria. A descrição da metodologia aplicada a cada ensaio encontra-se descrita nos itens subsequentes.

2.4.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

O índice de consistência das argamassas foi determinado segundo recomendações da NBR 13276 (2005) ⁽⁸⁾. O ensaio foi utilizado para avaliar a influência da incorporação dos nanotubos de carbono nas argamassas no estado fresco, portanto, a relação água/cimento foi fixada em 0,48 para não influenciar nos resultados.

Os teores de ar incorporado em cada argamassa foram determinados de acordo com a NBR 13278 (2005) ⁽⁹⁾. Esta mesma norma estabelece o método para determinação da densidade de massa. Os resultados são referidos na forma de densidade de massa considerando o volume de vazios e densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios.

2.4.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão nas argamassas foram realizados de acordo com a NBR 13279 (2005) ⁽⁶⁾.

Primeiramente, os corpos de prova foram rompidos a tração na flexão e, na sequência, fazendo-se o uso das suas metades, os mesmos foram rompidos à compressão axial. Os corpos de provas foram ensaiados nas idades de 7, 14 e 28 dias onde, foram rompidos 3 corpos de prova em cada idade.

A **Figura 4** apresenta a instrumentação dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão.

Figura 14 - Instrumentação dos ensaios: (a) Resistência à tração na flexão; (b) Resistência à compressão

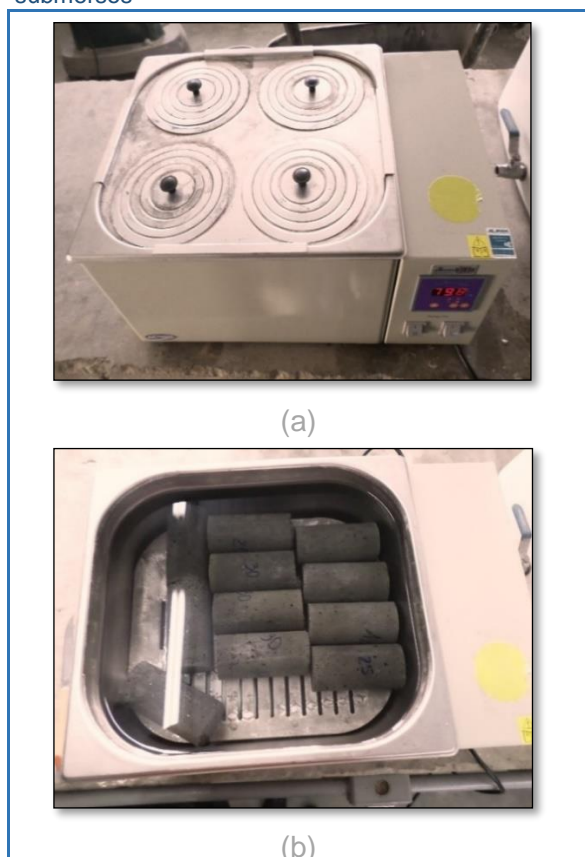


(a)



A absorção de água das argamassas, foi obtido por meio de imersão, conforme NBR 9778 (2005) ⁽¹⁰⁾. Para a realização deste ensaio foram utilizados 3 (três) corpos de prova para cada traço, ensaiados aos 28 dias. A **Figura 5** mostra uma das etapas de execução do ensaio durante a saturação, em que os corpos de prova encontram-se totalmente submersos em água. Visou obter com esse ensaio, um indicativo quanto à durabilidade das argamassas estudadas.

Figura 15 - Ensaio de absorção por imersão: (a) equipamento banho maria; (b) corpos de prova submersos



Na sequência foram determinadas algumas propriedades térmicas das argamassas como, condutividade térmica e análise termogravimétrica. O ensaio da condutividade térmica foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 15220 (2003) ⁽¹¹⁾. Foram ensaiadas três placas por traço, aos 28 dias de idade. Os valores da condutividade térmica foram obtidos com recurso a um aparelho do tipo Laser Comp modelo Fox 300, à temperatura de 20°C e 45°C, conforme ilustra a **Figura 6**.

Figura 16 - Instrumentação do ensaio de condutividade térmica: (a) Visão geral do ensaio; (b) Visão aproximada do corpo de prova no aparelho



De maneira a auxiliar nas análises da condutividade térmica, as argamassas foram caracterizadas através das curvas de termogravimetria. Para a realização deste ensaio, foram coletadas amostras após os ensaios de compressão, na idade de 28 dias, e as mesmas foram moídas. A curva de TGA foi obtida utilizando equipamento, modelo TGA 50H acoplado com analisador térmico TA60WS, ambos da marca Shimadzu, conforme ilustrado na **Figura 7**. As

amostras de argamassa foram aquecidas a uma taxa de 10 °C/min, iniciando na temperatura ambiente até atingir a temperatura de 1000 °C, em atmosfera de nitrogênio.

Figura 17 - Equipamento termogravimétrico



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco e estado endurecido, encontram-se apresentados nas subseções a seguir. Além disso, apresenta-se uma análise dos resultados encontrados visando atingir o objetivo principal da pesquisa.

3.1 Caracterização das argamassas

A Tabela 4 apresenta os valores para relação água/cimento, teor de aditivo e índice de consistência das argamassas. Conforme o esperado, quanto maior a quantidade de finos proporcionados as argamassas, menor o índice de consistência e, por consequência, menor a sua trabalhabilidade.

Tabela 27 - Índice de consistência das argamassas

Traços	Relação a/c	Teor de Aditivo (%)	Índice de consistência (mm)
TRAÇO AR	0,48	0,70	248
TRAÇO AN25	0,48	0,70	236
TRAÇO AN30	0,48	0,70	232
TRAÇO AN50	0,48	0,70	226

A perda de consistência nas argamassas com incorporação de finos está ligada ao fato de que a quantidade de água e aditivo para amassamento permaneceu constante. Para manter a trabalhabilidade seria necessário aumentar o consumo de água ou aditivo devido à elevada superfície específica dos nanotubos de carbono. No entanto, neste trabalho optou-se por fixar a quantidade de água em 0,48 e de aditivo em 70% em todos os traços de argamassas.

3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados da densidade de massa e do teor de ar incorporado das argamassas estão apresentados na Tabela 5. Verifica-se que ocorre uma diminuição no valor da densidade de massa, conforme se adiciona nanotubo de carbono. Este material possui a granulometria mais fina que o cimento, preenchendo assim, os vazios entre o cimento.

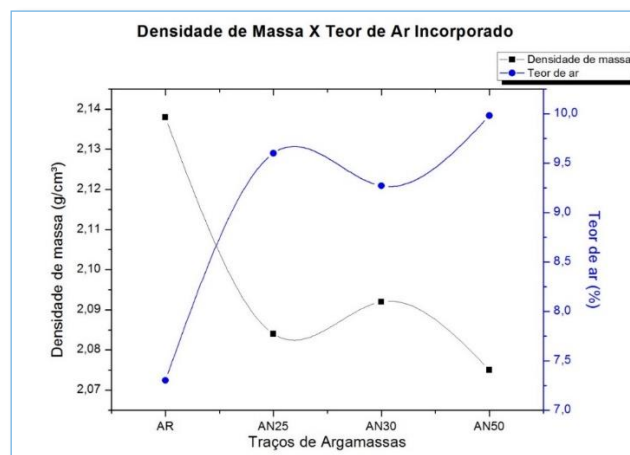
Tabela 28 - Densidade de massa das argamassas

Argamassas	AR	AN25	AN30	AN50
Densidade de massa (g/cm ³)	2,138	2,084	2,092	2,075
Teor de Ar Incorporado (%)	7,30	9,60	9,27	9,98

Nota-se também, que conforme se adiciona maiores porcentagens de nanotubos de carbono às composições, obtém-se um maior percentual de teor de ar incorporado em relação à mistura sem nanotubo, o que já era igualmente esperado.

A Figura 8 compara os dados da densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas, distribuídos em um histograma, para melhor ilustrar os resultados.

Figura 18 - Densidade de Massa X Teor de ar Incorporado



Observando a Figura 8, percebe-se que os resultados obtidos nessas duas propriedades das argamassas confirmam que existe uma relação inversamente proporcional entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado, pois, quanto menor a densidade de massa, maior o teor de ar incorporado.

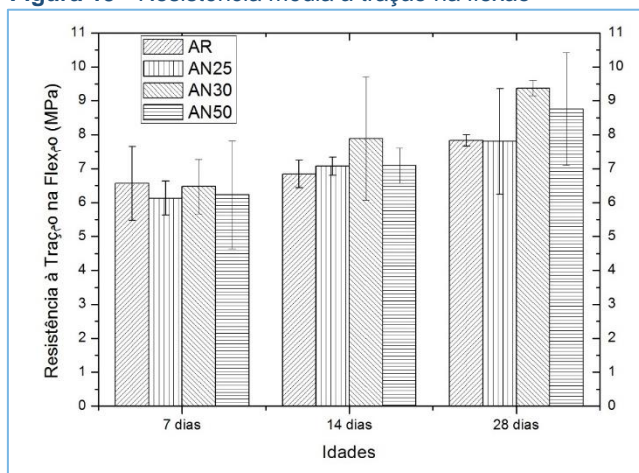
3.3 Resistência à tração na flexão

Na Figura 9 são mostrados os dados da resistência média à tração na flexão, distribuídos em um histograma, para a argamassa de referência (sem adição de NTC) e com adição de NTC, nas proporções de 0,25%, 0,30% e 0,50%. Ao analisar a figura, é possível notar que a resistência à tração na flexão com

adição de nanotubo de carbono, aos 7 dias, foram menores que a amostra de referência. Porém, não

apresentam variações significativas comparadas à argamassa de referência.

Figura 19 - Resistência média à tração na flexão



Nota-se também, a evolução da resistência à tração na flexão ao longo do tempo. Onde nas idades de 14 e 28 dias, as argamassas com nanotubos apresentaram valores superiores à de referência. Na idade de referência (28 dias), a amostra AN30 apresentou maior ganho de resistência à tração na flexão – em torno de 20%, seguida pela AN50, com aproximadamente 12%. Nesta idade, a resistência da argamassa AN25 foi praticamente igual à da amostra de referência. Portanto, a argamassa AN30, com 0,30% de nanotubo

foi a que apresentou melhor desempenho nas idades estudadas. Reforçando assim, o indício apresentado por Melo ⁽¹⁾, uma faixa “ótima” para inserção de nanotubos em matrizes de cimento, faixa esta que deve estar próxima aos 0,30% de nanotubo.

Para validação dos resultados encontrados no ensaio de tração na flexão, foi empregado o software ASSISTAT para análise estatística. Na **Tabela 6** apresenta a Análise de Variância (ANOVA) para resistência à tração na flexão, para idade de 28 dias.

Tabela 29 - Análise de Variância para tração na flexão

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	p
Tratamentos	3	5,17769	1,7259	4,8742 *	0,0325
Resíduo	8	2,83273	0,35409		
Total	11	8,01043			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < ,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($,01 \leq p < ,05$)

ns não significativo ($p \geq ,05$)

De acordo com análise estatística realizada pode ser considerada significativa, esta hipótese foi testada com o nível de confiabilidade de 95%, ou seja, existe apenas 5% de probabilidade de erro.

Portanto, conclui-se que houve diferença significativa na inclusão de NTC na argamassa de referência. Tal resultado corrobora a boa atuação dos nanotubos de carbono à tração, fazendo com que ocorra melhoria significativa no ponto mais fraco da argamassa, que é sua resistência à tração.

Além da dispersão do nanotubo na matriz, o aumento obtido na resistência à tração na flexão, também pode estar ligada ao seu fator de forma (L/d), relação entre o comprimento e diâmetro do nanotubo.

Espera-se que, quanto maior for o comprimento dos nanotubos, melhor será a ligação entre os grãos da matriz do cimento, uma vez que os NTC podem agir

como pontes entre fissuras e poros. Melo⁽¹⁾, ao realizar o ensaio de resistência à tração, conseguiu aproximadamente um acréscimo de 34% na resistência para argamassas com teor de 0,30% de NTC em relação a amostra de referência.

Li⁽¹²⁾ conseguiu um aumento de 25% na resistência para argamassas com teor de 0,50% de NTC tratados, valores estes próximos aos encontrados neste estudo. Em contrapartida, Batiston⁽¹³⁾, conseguiu ganhos menores na resistência, sendo o maior em torno de 5%.

O autor justifica a diferença no valor obtido em função do fator de forma dos NTC, uma vez que o mesmo utilizou nanotubos com fator de forma de, no máximo, 375, enquanto Melo ⁽¹⁾ usou valor mínimo de 8000 e Li ⁽¹²⁾ usaram valor próximo a 50000.

No presente estudo, foi utilizado NTC com fator de forma de 1000, fato este que pode ter influenciado nos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

A **Tabela 7**, mostra algumas faixas de valores obtidas por alguns autores, além da adotada neste trabalho.

Tabela 30 - Fatores de forma de nanotubos de carbono

Parâmetro	Nesta pesquisa (2016)	Li <i>et al.</i> (2005)	Batiston (2007) (tipo 1)	Batiston (2007) (tipo 2)	Batiston (2007) (tipo 3)	Melo
d (nm)	10 - 30	10 - 30	40 - 60	40 - 70	240 - 500	10 - 100
L (µm)	10 - 30	0,5 - 500	0,5 - 2	5 - 15	5 - 40	800 - 900
L/d	300 - 1000	17 - 50000	17 - 50	125 - 375	10 - 166	8000 - 90000

3.4 Resistência à compressão

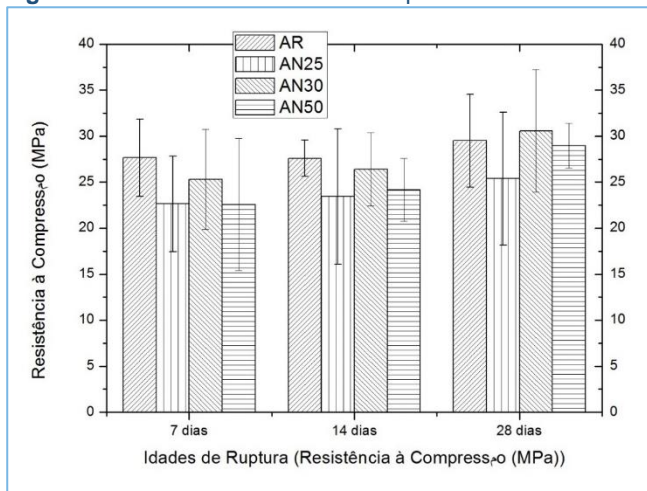
Na **Figura 10** são mostrados os dados da resistência média à compressão, distribuídos em um histograma. Ao analisar, é possível notar que, de maneira geral, a resistência das amostras com adição de NTC, nas idades estudadas, foram inferiores a amostra AR. Somente a amostra AN30, aos 28 dias, obteve um acréscimo de 3,66% em relação a amostra AR.

Porém, de acordo com a análise estatística, não houve diferença significativa entre as misturas com NTC e a referência.

Batiston ⁽¹³⁾, em sua pesquisa sobre incorporação de NTC em matriz de cimento Portland, ao realizar o ensaio de compressão, também não obteve diferença significativa entre as misturas com NTC e a referência, principalmente para as misturas com nanotubos sem funcionalização, onde apresentaram um decréscimo na resistência quando se aumentou o teor de nanotubos, indicando que a maior concentração de nanotubos reduz a dispersão e promove a heterogeneidade da matriz, propiciando a formação de zonas mais frágeis que facilitam a ruptura do material.

Em compensação, Melo ⁽¹⁾, conseguiu ganhos maiores na resistência a compressão, sendo o maior em torno de 12% para a amostra CN30.

Figura 20 - Resistência média à Compressão

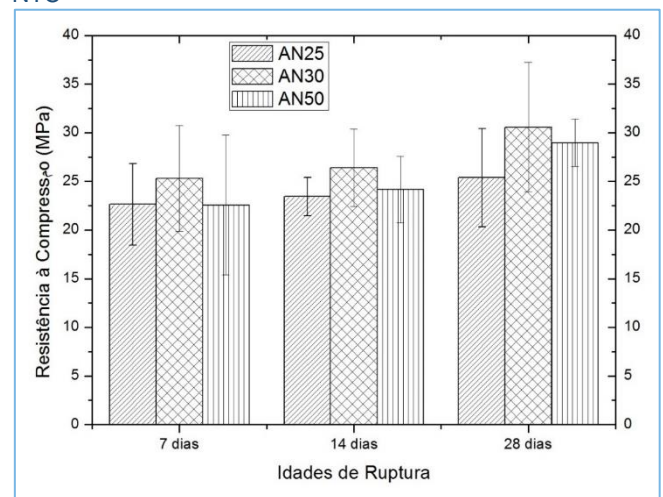


O autor relata, que quando a dispersão é bem realizada, o nanotubo se mistura a pasta de forma homogênea, fazendo interligações com o silicato de cálcio hidratado e com o próprio grão da mistura, sem ocorrer aglomerações pontuais, fato este, que contribui para obtenção de um material mais resistente.

Ao comparar as amostras com adição de NTC, na **Figura 11**, observa-se para todas as idades estudadas, que a mistura AN30, com 0,30% de adição, obteve o melhor desempenho.

O bom resultado encontrado para o traço AN30 pode representar, assim como ocorreu na resistência à tração por flexão, que há uma faixa ideal de porcentagem de nanotubos a ser adicionado na matriz de cimento, para que haja melhorias significativas em suas propriedades.

Figura 21 - Resistência à Compressão das argamassas com NTC



3.5 Absorção de água por imersão

Os resultados médios da absorção de água, para os traços estudados, estão representados na **Tabela 8**. Onde, observa-se uma pequena melhora na propriedade para as argamassas com adição de NTC, chegando até 3,18% menor que a amostra de referência.

Tabela 31 - Absorção de água das argamassas

Argamassas	AR	AN25	AN30	AN50
Absorção de água (%)	8,80	8,60	8,52	8,68

Marcondes ⁽²⁾ desenvolveu um estudo sobre absorção de concretos com adição de NTC, o autor realizou este mesmo ensaio e constatou que houve uma melhora nesta propriedade para as amostras com adições, o mesmo relatou que este fato pode estar relacionado ao aumento de poros capilares ou a uma melhora na distribuição dos poros, reduzindo a macro porosidade e aumentando a micro porosidade, devido ao nanotubo possuir uma granulometria mais fina que

o cimento, ocasionando uma matriz cimentícia mais compacta. No entanto, para esta comprovação se faz necessário a realização de outros ensaios que não foram abordados nesta pesquisa, como ensaio de porosidade de mercúrio que é capaz de quantificar melhor o tamanho dos poros.

3.6 Condutividade térmica

Através do método fluxométrico foi determinado a condutividade térmica das argamassas com e sem adição de nanotubo de carbono, cujos valores constam na **Tabela 9**.

Tabela 32 - Condutividade Térmica das argamassas

Material	Condutividade Térmica (λ)	% ganho/redução	Coefficiente de Variação (%)	Desvio Padrão (%)
AR	0,5407 \pm 0,0272	-	2,385	0,013
AN25	0,5665 \pm 0,0223	4,77	1,847	0,011
AN30	0,5652 \pm 0,0232	4,53	1,877	0,011
AN50	0,5824 \pm 0,0091	7,71	0,701	0,0041

Nota-se que os resultados do ensaio de condutividade térmica para as argamassas com adição de NTC obtiveram valores superiores que a amostra de referência. Importante salientar que conforme se aumentou a porcentagem de NTC na argamassa, a condutividade térmica também aumentou, chegando a 7,71% maior que a argamassa sem adição, o que já era esperado.

Porém, de acordo com análise estatística, não houve diferença significativa entre as amostras com adição de NTC e a amostra de referência. O fato de ser utilizado no máximo 0,50% de nanotubo de carbono em relação a massa de cimento, pode ter contribuído para que essa diferença da condutividade térmica não seja significativa.

Billig⁽¹⁴⁾, em sua pesquisa sobre compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono, realizou uma investigação da propriedade térmica e determinou a condutividade térmica das amostras, o mesmo adicionou 1% e 2% de NTC em relação ao cimento. Conforme o autor, não houve diferença significativa entre as misturas com NTC e a referência. Li et al.⁽¹⁵⁾ propuseram um sistema de autodegelo de rodovias, os autores desenvolveram um sistema em que o pavimento é aquecido por uma camada de fonte térmica e, o calor, conduzido até a superfície por camadas condutoras.

Para essa camada condutora, foram produzidos compósitos a base de cimento onde, adicionou-se nanotubos de carbono nas proporções de 1%, 3% e 5% em relação a massa do cimento. De acordo com os autores, os coeficientes de condutividade térmica para os três tipos de amostras, são todos mais elevados que a amostra sem adição.

Também constataram que o aumento da condutividade térmica não é incrementado com adições maiores que 3% de NTC, indicando que o aumento da condutividade não está associado somente no aumento de porcentagem de nanotubo de carbono, mas também na sua dispersão uniforme. Pois, com o aumento da proporção de NTC, torna-se mais difícil a sua dispersão.

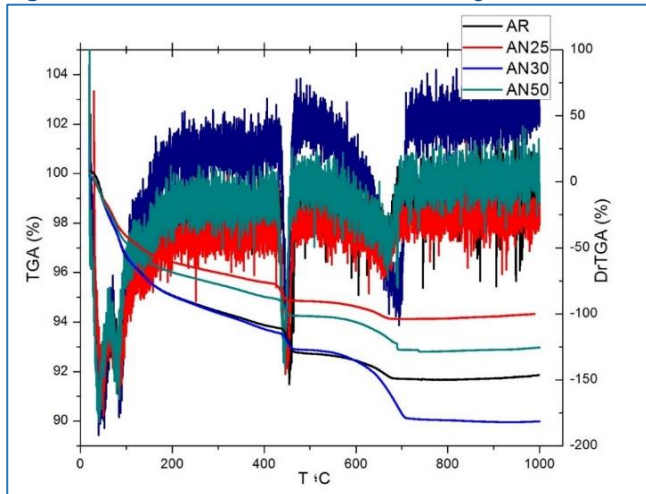
O calor de condução de compósito de cimento e NTC é dominado pelo transporte de fônons e elétrons e é extremamente sensível a microdefeitos e a interfaces fracas, porque os fônons e elétrons frequentemente são dispersos nos locais de tais defeitos. Concluindo, os autores consideraram que o percentual adequado para incorporar no sistema de autodegelo de rodovias foi de 3% de NTC, possuindo um coeficiente de condutividade térmica de 2,83 W/(m.K), aproximadamente 79% maior que a condutividade térmica do compósito de referência que foi de 1,58 W/(m.K).

3.7 Análise termogravimétrica (TGA) das argamassas

A termogravimetria foi utilizada para verificar a estabilidade térmica e a degradação das argamassas. A **Figura 12** apresenta o perfil das curvas das análises térmicas das argamassas com e sem adição de nanotubo de carbono.

As curvas de TGA e DrTGA mostram reações típicas que ocorrem na matriz de cimento quando sujeita a um aumento de temperatura progressiva desde a temperatura ambiente até 1000 °C.

Figura 22 - Curvas de TGA e DrTGA das argamassas



Observa-se que as curvas termogravimétricas das argamassas apresentaram três principais picos endotérmicos. O primeiro pico ocorre entre a temperatura ambiente e aproximadamente 95°C, correspondendo a perda de massa na decomposição de alguns hidratos como silicato de cálcio (C-S-H) e etringita. O segundo pico situa-se entre 435 °C de 450 °C, essa perda corresponde à hidratação de um grupo de CH como a portlandita.

Entre as faixas de temperatura de 650 °C e 700 °C, temos o terceiro pico, esta perda de massa está associada a decomposição do carbonato de cálcio como calcita, quando o carbonato é aquecido, produz dióxido de carbono (CO₂), também conhecido por gás carbônico. Ao comparar as curvas de TGA e DrTGA das argamassas com adição de NTC com a

argamassa de referência, pode-se observar que praticamente não há diferença qualitativa entre as mesmas. Onde não foi possível identificar perda de massa correspondente ao NTC.

4 CONCLUSÕES

As argamassas de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono na porcentagem de 0,30%, fora a que apresentou o melhor desempenho mecânico e térmico, entre as argamassas fabricadas, mostrando que as adições de nanotubos são eficientes no reforço de argamassas de cimento Portland. Pode-se concluir também, que pode haver uma faixa ótima para incorporação de nano partículas nos compósitos a base de cimento Portland. No presente estudo esta faixa ficou entre 0,30% e 0,50% em relação ao cimento.

Cabe lembrar que mais ensaios devem ser realizados com investigações mais específicas para o uso de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios. Isto se faz necessário para ampliar o campo de utilização dos nanotubos. Além disso, estas conclusões são derivadas da análise dos resultados deste trabalho e que devem ser confirmadas e avaliadas por estudos adicionais.

REFERÊNCIAS

1. Melo VS. Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland. [Dissertação]. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.
2. Marcondes CGN. Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – Absorção, permeabilidade, penetração de claretos e propriedades mecânicas. [Dissertação]. Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná; 2012.
3. Borba APB, Matsunaga AS, Franczak LR. Uso de nanotubos de carbono na confecção de argamassas de reparo: Efeito nas propriedades mecânicas e absorção de água. [Trabalho de conclusão de curso]. Curitiba: Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná; 2013.
4. Collins F, Lambert J, Duan WH. The influences of admixtures on dispersion, workability, and strength of carbon nanotube – OPC paste mixtures. *Cement Concrete Comp.* 2012; 34:201-207.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1997.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência: NBR 13276. Rio de Janeiro, 2005.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278. Rio de Janeiro, 2005.
9. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005.
10. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.
11. Associação Brasileira de Normas Técnicas (BR). Desempenho térmico de edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico: NBR 15220. Rio de Janeiro, 2003.
12. Li H, Xiao HG, Ou JP. Mechanical behavior and microstructure of cement composites mortar with nanoplase. *Cem Concr Res.* 2005; 46:1239-1245.
13. Batiston ER. Incorporação de nanotubos de carbono em matriz de cimento Portland. [Tese]. Florianópolis: Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina; 2012.

14. Billig JD. Compósito cimentício reforçados com nanotubos de carbono: Investigação das propriedades térmicas, elétricas e piezoresistivas. [Trabalho de conclusão de curso]. Porto Alegre: Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2013.

15. Li H, Zhang Q, Xiao H. Self-deicing road system with a CNFP high-efficiency thermal source and MWCNT/cement-based high-thermal conductive composites. Cold Reg Sci Technol. 2013, 86: 22-35.

Como citar (Vancouver)

Lemes SPS. Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubo de carbono. Rev Cient Fac Educ e Meio Ambiente [Internet]. 2018;9(2): 734-744. doi: <http://dx.doi.org/10.31072/rcf.v9i2.714>