

Investigação das propriedades mecânicas de argamassas de cimento portland com a adição de nanotubos de carbono em diferentes concentrações e dispersões

Investigation of the mechanical properties of portland cement mortar with the addition of carbon nanotubes at different concentrations and dispersions

Luiz Fernando O. Silva

Graduando do curso de Engenharia Civil (UNIPAM).

E-mail: luizfos@unipam.edu.br

Sandra Lúcia Nogueira

Professora orientadora (UNIPAM).

E-mail: sandraln@unipam.edu.br

Resumo: Nanotubos de carbono (NTC) são folhas de grafeno enroladas de maneira a formar uma peça cilíndrica com diâmetro próximo de 1 nm. Este trabalho apresenta uma investigação dos efeitos da adição de NTC em argamassas de cimento Portland. Analisaram-se dois tipos de dispersão: uma manual e outra por meio do banho de ultrassom com 1% surfactante Lauril Éter Sulfato de Sódio. Verificaram-se, para cada tipo, 4 dosagens diferentes de NTC, 0%, 0,2%, 0,3% e 0,4%, em relação à massa de cimento. A concentração 0,3% de NTC foi a que mostrou melhores resultados juntamente com a dispersão de ultrassom.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Nanotubos. Carbono. Resistência. Argamassa.

Abstract: Carbon nanotubes (CNTs) are graphene sheets rolled up to form a cylindrical piece with a diameter close to 1nm. This work presents an investigation of the effects of the addition of CNTs on Portland cement mortars. Two types of dispersions were analyzed: one manual and another through the ultrasonic bath with 1% surfactant Sodium Lauryl Ether Sulfate. It was verified 4 different dosages of CNT, 0%, 0.2%, 0.3% and 0.4% for each type, in relation to the mass of cement. The concentration of 0.3% CNT was the one which showed better results along with the ultrasonic dispersion.

Keywords: Nanotechnology. Nanotubes. Carbon. Resistance. Mortar.

1 INTRODUÇÃO

O termo “nano” tem aparecido reiteradamente nas mídias e em pesquisas científicas, relacionado com as palavras nanociência e nanotecnologia. O lado mais perceptível da nanotecnologia está associado ao desenvolvimento de novos materiais, a fim de se reduzirem gastos em energia, proteger o meio ambiente e diminuir o uso de

matérias-primas escassas (VALADARES, 2005).

O número de aplicações em diversas áreas é a principal peculiaridade dessa nova tecnologia, que está cada vez mais ganhando espaço dentro de laboratórios de pesquisas de universidades e empresas. O mercado total de produtos que incorporam a nanotecnologia foi de US\$ 135 bilhões em 2007 e cresceu rapidamente, com expectativa de atingir valores próximos a US\$ 3,3 trilhões em 2018. No Brasil, planeja-se alcançar cerca 1% do mercado mundial, que significa cerca de US\$ 33 bilhões (TNS, Antimicrobial Solutions; MCTI, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação).

Pesquisas desenvolvidas com essa temática mostram que a adição de nanocompósito ao cimento permite alterações relevantes na sua microestrutura, o que resulta em argamassas e concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis (LEMES, 2016).

De acordo com Melo (2009), o prefixo nano é usado na ciência para designar um bilionésimo. Assim, um nanômetro (símbolo nm) é um bilionésimo de metro. Como referência, um átomo mede cerca de dois décimos de um nanômetro e o diâmetro de um fio de cabelo humano aproxima-se de 30.000 nanômetros.

As pesquisas e estudos que focaram a adição de Nanotubo de Carbono na construção civil, especialmente no concreto, defrontaram-se com dois obstáculos: o custo alto com a fabricação ou obtenção do NTC (Nanotubo de Carbono) e a dificuldade de se encontrar um modo de dispersão efetivo do NTC nas misturas.

Sendo assim, esse projeto tem como tema a investigação dos efeitos da adição de nanotubos de carbono em argamassas de cimento Portland, a fim de se testarem diferentes modos de dispersão e concentração do NTC.

Tendo em vista a constante demanda por novos materiais na construção civil e a escassez de matérias-primas, muitos trabalhos mostram a Nanociência e a Nanotecnologia como um grande potencial. O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de novos revestimentos, polímeros, alvenarias e fibras com características excepcionais em relação às já existentes são um exemplo de seu potencial.

A sílica ativa já é muito usada para redução da porosidade de concretos, com foco em ganhos mecânicos. Com adição de partículas em nano-escala, espera-se que um melhor preenchimento de vazios presentes em concretos e em argamassas, tendo-se ganhos em características mecânicas, como o aumento de F_{ck} (Resistência à compressão) e melhoramento na retração do concreto, evitando-se a propagação de fissuras no processo de cura.

A investigação da adição de NTC em argamassas de cimento Portland possibilitará o encaminhamento de resultados mais promissores e benéficos à sociedade e a pesquisadores.

Nesse contexto, uma investigação das propriedades mecânicas da argamassa de cimento Portland com diferentes concentrações e formas de dispersão do nanotubo nas misturas faz-se necessária, a fim de se buscar um novo material para a área da construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (PETRUCCI, 1978).

Mehta e Monteiro (2014) completam a definição, ressaltando que o cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcios hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição de moagem.

Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sintetizado, que é produzido quando uma mistura de matérias-primas com proporção adequada é aquecida sob altas temperaturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Petrucci (1978), o cimento Portland também é constituído por certo número de compostos, cujas reações são a origem do processo de endurecimento. Consequentemente, antes de estudar os mecanismos de endurecimento, é necessário analisar a natureza das reações desses compostos com a água.

2.2 REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO

Os compostos presentes no Portland são anidros, mas, quando postos em contato com a água, reagem com ela, formando produtos hidratados. Petrucci (1978) define a hidratação do cimento como uma transformação de anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis.

Petrucci (1978) também verifica que, na hidratação, há formação de uma camada de gel em torno dos grãos dos compostos de anidros, de maneira que, na zona de transição (zona intermediária entre o cristal primário e o gel), a solução é supersaturada em relação aos compostos. As variações de soluto e água fazem com que se gere um gradiente de concentração, originando uma pressão osmótica que vai trazer a ruptura do gel, expondo novas áreas do composto de anidro à ação da água.

É notável que a função dos cimentos em mistura com a água é aglomerar partículas e ligá-las pela formação de produtos hidratados, com desenvolvimento de resistência mecânica e, após o endurecimento, resistir à sua ação, daí ganhando o nome de ligante hidráulico (CINCOTTO, 2011). No estado fresco, a mistura deve ser coesa e ter a capacidade de ser trabalhada e moldada para demais atividade.

À medida que o processo de hidratação se desenvolve, acontecem mudanças na microestrutura da pasta de cimento ou no concreto. “Nos primeiros minutos e nas primeiras horas, as mudanças são muito rápidas; após há primeira semana, tornam-se mais lentas. No entanto, o processo de hidratação continua durante meses e anos” (MELO, 2009).

Além dos sólidos, a pasta de cimento hidratada contém muitos tipos de vazios que têm uma influência importante em suas propriedades. Os mais presenciais são os

vazios capilares, que representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada, e o ar incorporado, que representa uma pequena quantidade de ar aprisionada na pasta de cimento durante a mistura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dessa forma, do mesmo jeito que o processo de hidratação bem realizado contribui para melhorias nas propriedades mecânicas, os acréscimos de partículas muito finas também contribuem bastante para um melhor desempenho da estrutura, visto que colaboram para o fechamento dos vazios capilares da pasta de cimento.

2.3 A INSERÇÃO DE NANOMATERIAIS EM MATRIZ DE CIMENTO PORTLAND

Muitos artigos e pesquisas científicas já realizadas comprovam o bom desempenho de nanopartículas quando incorporadas em argamassas de cimento e a concretos. Por conta do seu tamanho muito pequeno, tais partículas contribuem para o preenchimento de vazios, conseqüentemente, para a melhoria de diversas propriedades desses materiais.

Gillani (2017) comprova essa questão da melhora nas propriedades mecânicas do concreto com a adição de pequenas frações de MWCNTs (*Multi-walled carbon nanotubes*) em matrizes de concreto. Contudo, todos os seus benefícios são dependentes do modo de dispersão, tamanho, relação de aspecto e pureza do nanomaterial.

Esse aumento de resistência pode ser explicado por três motivos:

- quando uma pequena quantidade de nanopartículas é uniformemente dispersa na pasta de cimento, as nanopartículas agem como um núcleo de ligação forte ao cimento hidratado e contribuem para a hidratação do cimento devido a sua alta atividade, o que é favorável para a resistência mecânica;
- as nanopartículas presentes nos produtos hidratados irão impedir o crescimento de cristais, como o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), o que favorece a resistência mecânica;
- as nanopartículas preencherão os poros da pasta de cimento, tornando-a mais densa e aumentando, assim, a resistência, de modo similar ao efeito da sílica ativa (GILLANI, 2017).

2.4 NANOTUBOS DE CARBONO

Comparado aos outros elementos químicos existentes, o carbono é certamente um dos mais importantes para a existência do ser humano. A humanidade tem feito uso de compostos de carbono há vários anos, tanto na fabricação de vestuário (peles e tecidos) quanto na de combustíveis (carvão, petróleo e madeira) (MELO, 2009).

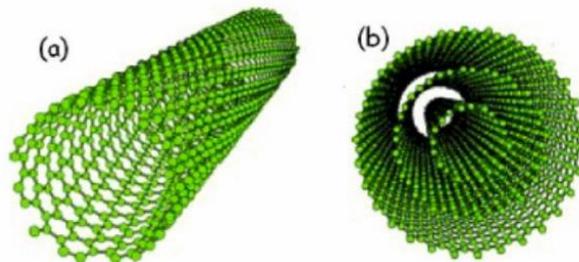
Os nanotubos de carbono (NTC) são formados apenas por elementos de carbono num arranjo hexagonal, os quais se enrolam em forma de cilindro. Segundo o CDTN (Centro de desenvolvimento de tecnologia nuclear), a ligação carbono-carbono é a mais forte encontrada na natureza (MARCONDES, 2012).

2.4.1 Características dos Nanotubos de Carbono

Há várias formas de se realizarem as ligações de carbono para formação dos nanotubos. Essa forma de ligação, juntamente com sua geometria, sua purificação e seu diâmetro, é responsável pelo desempenho do material, conseqüentemente, da melhoria de suas propriedades.

Do ponto de vista estrutural, existem dois tipos de nanotubos de carbono: os de parede simples, constituídos por uma única folha de grafeno enrolada sobre si mesma para formar um tubo cilíndrico, e os de paredes múltiplas, que compreendem um conjunto de nanotubos de carbono coaxiais, com várias folhas de grafeno enroladas em forma de tubo (MARCONDES, 2012). Na figura 1, mostra-se a diferença dos NTC de paredes simples dos de paredes múltiplas.

Figura 1- Estrutura do nanotubo de carbono de parede simples (a) e estrutura de um NTC de paredes múltiplas (b)



Fonte: Zarbin, (2007)

De acordo com Zarbin (2007), os nanotubos de carbono de paredes múltiplas são constituídos de 2 a 40 camadas de grafeno concêntricas, que se distanciam entre si por 0,34 nm; normalmente apresentam diâmetro de 10 a 50 nm com comprimentos maiores que 10 micrômetros, sendo que suas propriedades estão diretamente ligadas ao número de camadas e ao seu diâmetro interno. Já os nanotubos de parede simples são mais finos, e apresentam diâmetro variando entre 1 e 5 nm, sendo formados por uma única folha de grafeno.

2.4.2 Dispersão de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias

Homogeneizar a distribuição dos NTC em matrizes cimentícias é um dos maiores desafios para os pesquisadores atualmente. Foldyna (2016) relata que os NTCs podem se dissolver em solução ou rasgar em pequenos pedaços se for utilizada força agressiva.

Foldyna (2016) analisa também que uma boa dispersão pode ser conseguida por meio do uso de misturador ultrassônico com surfactantes em solução aquosa, com tempo e quantidade de energia específica. O melhor desempenho mecânico já registrado de NTC em pastas de cimento foi com energia de ultrassom de 20 J/mL por unidade NTC para cimento (C/c) com 84% de dispersão máxima.

3 METODOLOGIA

A produção das argamassas de cimento Portland, os ensaios destrutivos de resistência à compressão, a flexão e os métodos de dispersão dos NTCs com a sua inclusão nas argamassas foram realizados no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção e no Laboratório de Ciência e Tecnologia dos Materiais, do Centro Universitário de Patos de Minas.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

Para produzir os primeiros corpos de provas, foi utilizado o cimento Portland CP-V ARI, que tem uma alta resistência inicial e maior valor de finura. O uso desse cimento também minimiza retardamentos de pega, quando do emprego de aditivo. Como não possui cinza pozzolânica e contém maior quantidade de clínquer em sua composição, elimina-se mais uma variável do estudo, já que materiais pozzolânicos podem interagir com os NTC e interferir nos resultados. (MELO, 2009)

O cimento CP-V ARI, segundo a ABNT NBR 5733 (1991), tem como definição:

Aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. (ABNT, 1991, p.2).

3.1.2 Areias

Para a confecção dos corpos de provas, foram utilizadas as areias normativas disponibilizadas pelo laboratório de resistência dos materiais, seguidas as recomendações da ABNT NBR 7215 (1996).

3.1.3 Nanotubo de Carbono (NTC)

Os nanotubos que foram utilizados nesta pesquisa são de paredes múltiplas (MWCNT- *Multi-walled carbon nanotubes*), com 90% Carbon Basis.

3.2 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

Para o projeto experimental, foi fixado um traço de referência sem a adição de NTC, a fim de se fazer a comparação com argamassas que tenham o NTC na mistura.

A norma ABNT NBR 7215 (1996) dispõe da dosagem a ser usada no ensaio, como mostrado na tabela 1, porém esse volume de materiais resulta em apenas 6 corpos de provas 5x10. Entretanto, esta pesquisa precisa de 9 corpos de provas 4x4x16 (por traço), sendo assim, por meio de regra de três, foi adaptada a quantidade de

materiais necessários para o volume de 9 corpos de provas (por traço), como mostra a tabela 2.

Tabela 1- Quantidade de Materiais para confecção de 6 corpos de provas 5x10

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia fração grossa	468 ± 0,3
Areia fração média grossa	468 ± 0,3
Areia fração média fina	468 ± 0,3
Areia fração fina	468 ± 0,3

Fonte: ABNT NBR 7215 (1996)

Por fim, totalizaram-se quatro traços diferentes a fim de se realizar, no final dos testes, a comparação de suas propriedades.

Tabela 2: Quantidade de Materiais (g) para confecção dos 9 corpos de provas (por traço)

Material	Traço REF	Traço 0,2%	Traço 0,3%	Traço 0,4%
Cimento Portland	1220,35	1220,35	1220,35	1220,35
Água	586,7	586,7	586,7	586,7
Areia fração grossa	915,26	915,26	915,26	915,26
Areia fração média grossa	915,26	915,26	915,26	915,26
Areia fração média fina	915,26	915,26	915,26	915,26
Areia fração fina	915,26	915,26	915,26	915,26
NTC	0	2,44	3,66	4,88

Fonte: Autor

Assim como os aditivos, a quantidade de NTC foi calculada em relação à massa de cimento. Os teores de nanotubos de carbono (NTC) foram definidos a partir da análise dos resultados de Melo (2009). A autora observou que a adição de 0,30% de NTC foi a que apresentou mais resistência mecânica em todas as idades analisadas. Por esse motivo, adaptaram-se valores abaixo e acima de 0,30% de NTC.

3.3 DISPERSÃO DOS NTC

A proposta feita foi a dispersão dos NTC de duas formas: no primeiro método (Dispersão 1), os NTC foram manualmente dispersos na água e logo dirigidos ao recipiente com todos os seus componentes (areias e cimento) já misturados; o segundo método (Dispersão 2), foi realizado com o uso do equipamento Banho Ultrassom modelo 03350. Usando-se a energia de ultrassom, pesquisadores como Melo (2009) e Marcondes (2012) obtiveram melhor resultado.

Nessa primeira etapa, foi feita a Dispersão 1, totalmente manual. Foram colocados, em um béquer, 500 mL de água e, em outro béquer, 86,7 mL de água. O

NTC foi pesado, encaminhado aos 500 mL de água e misturado por 5 minutos; em seguida, encaminhado para o recipiente que comportava todos os materiais secos (areias e cimento) já misturados, como mostra a figura 2; por fim, foram usados os 86,7 mL de água para lavar o béquer.

Figura 2: Materiais secos já misturados



Fonte: Autor

3.4 ENSAIOS

Para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, foram utilizados moldes prismáticos metálicos com dimensões de 4x4x16 cm.

As elaborações dos corpos de prova seguiram as recomendações estabelecidas pela ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005). A quebra dos corpos e o estudo dos dados foram realizados em 3 idades, 7, 14 e 28 dias, e, para cada data, foram ensaiados 3 corpos de provas de cada traço.

Ressalta-se que todas essas etapas foram repetidas, pois foram analisados dois tipos de dispersão do NTC, totalizando-se 63 corpos de provas.

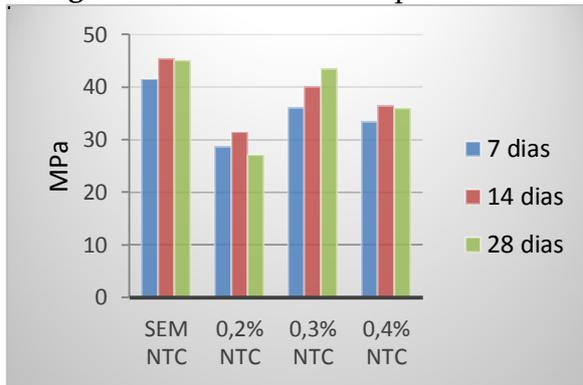
4 RESULTADOS

O estudo almejou analisar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração em argamassas de cimento Portland, com a adição de Nanotubos de Carbono de paredes múltiplas (*MWCNT- Multi-walled carbon nanotubes*), com 90% Carbon Basic.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A TRAÇÃO

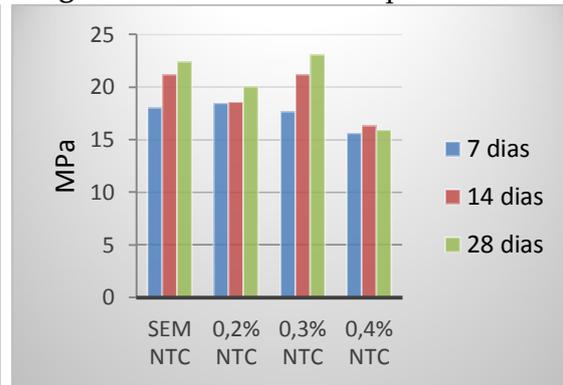
Para realizar os ensaios de resistência à compressão e à tração, foi utilizada uma Prensa Universal EMIC, obtendo-se os seguintes resultados.

Figura 1: Resistência à compressão SD



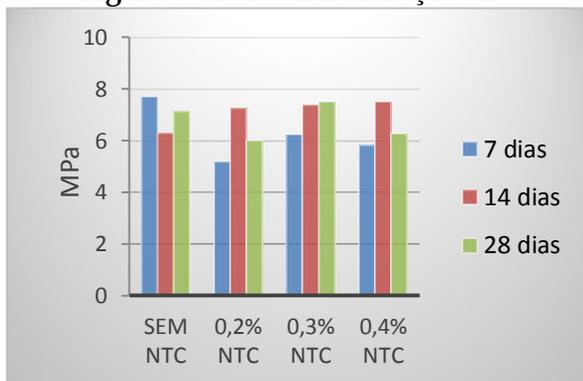
Fonte: Autor

Figura 2: Resistência à compressão CD



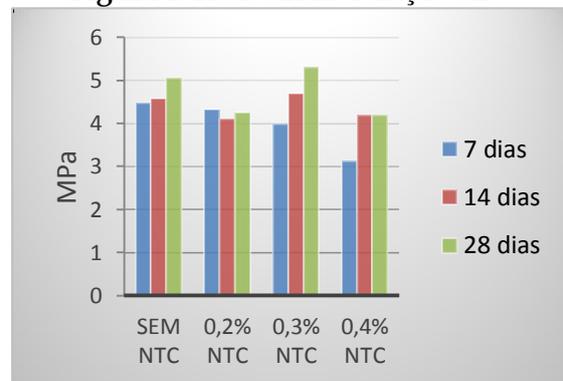
Fonte: Autor

Figura 3: Resistência à tração SD



Fonte: Autor

Figura 4: Resistência à tração CD



Fonte: Autor

Fica evidente que a dispersão com banho de ultrassom influenciou os resultados. As figuras 1 e 3 mostram os resultados da etapa 1 da pesquisa (sem dispersão), em que o traço REF apresentou melhores propriedades mecânicas que os demais. Em relação às diferentes concentrações de NTC, a que se mostrou mais promissora nesta etapa foi o traço com 0,3% de NTC, visto que, na resistência à compressão aos 28 dias, foi alcançado um valor de 43,5 MPa, ficando pouco atrás do traço REF que, na mesma idade, chegou aos 45,8 MPa.

Na segunda etapa (com dispersão através do banho ultrassom e uso do surfactante), o traço com 0,3% de NTC mostrou melhores resultados aos 28 dias, conseguindo alcançar 23,06 MPa na sua resistência à compressão, ficando acima dos demais traços.

Além disso, na segunda etapa também foi possível notar um crescimento maior de resistência mecânica quando comparado o Traço REF e o Traço com 0,3%. O traço REF teve um crescimento de 19,22%; já o traço com 0,3% de NTC teve um crescimento de 23,28%.

Julga-se que as propriedades mecânicas abaixaram relativamente quando se compara o Traço REF com e sem dispersão, devido ao uso do Surfactante Lauril Éter Sulfato de Sódio nos traços com dispersão, pois o surfactante incorporou ar nos corpos

de provas.

4.2 DISPERSÃO DOS NANOTUBOS DE CARBONO

A dispersão com o uso do banho ultrassônico teve resultados satisfatórios, pelo fato de que todo o material foi disperso na água, como mostra a figura 5, ou seja, a dispersão se mostrou importante para garantir uma molhagem prévia e eficiente da área das partículas de nanotubos de carbono.

No entanto, a dispersão manual do NTC na água não teve resultados positivos como previsto. As partículas de NTC não se ligaram com as partículas de água, como mostra a figura 6. Por esse motivo, em alguns corpos de provas, os resultados ficaram oscilando, visto que os NTC tendem a se aglomerar em determinadas áreas dos corpos de prova, assim o local de quebra dos corpos de prova pode ou não ter a presença de NTC.

Figura 5: Dispersão do NTC na água com utilização do banho ultrassônico



Fonte: Autor

Figura 6: Dispersão manual do NTC na água



Fonte: Autor

Os resultados mostraram que houve dispersão adequada com a aplicação de

energia ultrassônica e que os Nanotubos de Carbono de paredes múltiplas podem reforçar a matriz de cimento ao aumentarem a quantidade de C-S-H e reduzirem a porosidade.

5 CONCLUSÃO

Nos ensaios de resistência à compressão e flexão sem o uso do banho ultrassom, os NTC não se mostraram bem sucedidos, visto que o traço referencial revelou uma melhor resistência mecânica; os traços com adições de NTC mostraram maior variação e maior desvio padrão. Isso se justifica pelo fato de que houve concentração dos NTC em variadas partes da argamassa.

Pode-se concluir que a forma de dispersar os NTC na água influencia suas propriedades mecânicas. Prova-se isso porque o traço 0,3% mostrou um crescimento de resistência, nas idades de 7 a 28 dias, 4,06% maior que o traço REF. Comparando-se suas resistências à compressão aos 28 dias, o traço 0,3% obteve resistência 3,2% maior que o traço REF. Acredita-se que, ao se analisar idades mais prolongadas, os NTC irão demonstrar resultados ainda mais satisfatórios.

REFERÊNCIAS

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7214**: areia normal para ensaios de cimento. Rio de Janeiro 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

CINCOTTO, Maria Alba. Reações de hidratação e pozolânicas: introdução. In: HELENE, Paulo *et al.* **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: Geraldo Cechella Isaia, 2011. cap. 11, p. 381-382. v. 1.

FOLDYNA, Josef; FOLDYNA, Vladimír; ZELEĚÁK, Michal. **Dispersion of carbon nanotubes for application in cement composites**. 2016. 6 p. Artigo científico - ICMEM, International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, República Tcheca, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 25 fev. 2018.

GILLANI, Syed Shujat *et al.* **Improving the mechanical performance of cement composites by carbon nanotubes addition**. 2017. 7 p. Artigo científico (XXXIV Italian Group of Fracture Conference)- Mirpur University of Science and Technology,

University of Science and Technology, Urbino, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 24 fev. 2018.

LEMES, P.S. L. **Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubo de carbono**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016.

MARCONDES, Carlos Gustavo Nastari. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland: absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas**. 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado) - UFP, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<https://goo.gl/GNPLUN> >. Acesso em: 24 fev.2018.

MEHTA, P. Kumar. Cimentos Hidráulicos: cimento Portland. In: MEHTA, P. Kumar ; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Califórnia, Berkeley, Estados Unidos: Nicole Pagan Hasparyk, 2014. cap. 6, p. 217-218. v. 1.

MEHTA, P. Kumar ; MONTEIRO, Paulo J. M. Microestrutura e propriedades do concreto endurecido: vazios na pasta de cimento hidratada. In: MEHTA, P. Kumar ; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Califórnia, Berkeley, Estados Unidos: Nicole Pagan Hasparyk, 2014. cap. 2, p. 32-34. v. 1.

MELO, Valquíria Silva. **Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

PETRUCCI, Eladio G. R. Cimento Portland: hidratação do cimento. In: PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1978. cap. 3, p. 12-13. v. 1.

VALADARES, Eduardo Campos. O Potencial gigantesco do infinitamente pequeno: o nanomundo em Evidência. In: VALADARES, Eduardo Campos; ALVES, Esdras Garcia; CHAVES, Alaor Silverio. **Aplicações da Física Quântica: do transistor à nanotecnologia**. [S.l.]: Livraria da Física, 2005. cap. 4, p. 51-52. v. 1.

ZARBIN, A. J. G. Química de nano materiais. **Quím. Nova**, Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, v. 30, n. 6, p. 1469-1479, 2007. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol30No6_1469_15-S07432.pdf. Acesso em: 25 fev. 2018.