



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Resistência Mecânica de Argamassas de Cimento Portland Fabricado com Nanotubos de Carbono

Lucas Ladeira¹, Prof. José Márcio Calixto², Prof. Luiz Orlando Ladeira³, Tarcizo C. de Souza⁴, Ana Elisa Dias⁵

¹ UFMG / DEES / lucasladeira.eng@gmail.com

² UFMG / DEES / calixto@dees.ufmg.br

³ UFMG / ICEx / ladeira@fisica.ufmg.br

⁴ UFMG / CTNanotubos / tarcizocruz@ctnanotubos.com.br

⁵ UFMG / DEMC / anaelisa.dias@hotmail.com

Resumo

Com o advento das inovações na ciência e engenharia, proporcionadas pela nanotecnologia, um material surge como candidato à melhoria do desempenho de materiais à base de cimento Portland: o nanotubo de carbono. O presente trabalho utiliza nanotubos de carbono (NTC) sintetizados diretamente sobre o clínquer de cimento Portland, num processo contínuo e que contribui para sua produção em larga escala. Pesquisas recentes sobre o assunto mostraram ganhos significativos de desempenho de matrizes de cimento Portland com nanotubos de carbono em relação a matrizes produzidas com cimento Portland comum. Esses resultados sugerem a possibilidade de utilização desse tipo de cimento em concretos de alto desempenho e auto adensável. Neste cenário, este estudo visa analisar a resistência à compressão e à tração de argamassas de cimento Portland fabricado com nanotubos de carbono por processo contínuo. Diferentes teores de NTC foram utilizados a fim de verificar a influência deste material no comportamento mecânico. As resistências foram avaliadas em diferentes idades de forma a verificar também a influência dos NTC sobre a evolução das propriedades ao longo do tempo. Análises comparativas dos resultados de resistência das argamassas fabricadas usando cimento Portland comum e cimento contendo nanotubos de carbono também foram realizadas.

Palavras-chave

Nanotubos de carbono; matrizes de cimento; compressão; tração; desempenho.

Introdução

O interesse pelo estudo e desenvolvimento sistemático de objetos e dispositivos na escala nanométrica teve seu marco inicial associado à palestra proferida em 1959 pelo físico americano Richard Feynman, intitulada "Há muito espaço lá em baixo". Nessa palestra, ele sugeriu que um dia o homem conseguiria manipular objetos de dimensões atômicas e assim construir estruturas de dimensões nanométricas segundo sua vontade.

Desde então, a nanociência e a nanotecnologia vêm se tornando cada vez mais estudadas devido a uma grande expectativa de que os materiais nano-estruturados possam causar um grande impacto na melhoria da qualidade de vida das pessoas e na preservação do meio ambiente.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

A nanociência abrange pesquisas e implementações em nanotecnologia em vários setores científicos, como engenharia, física, química, biologia, eletrônica, computação e medicina. A nanotecnologia trabalha com uma visão em escala atômica, molecular e macromolecular com o intuito de melhorar ou criar novos materiais, dispositivos e sistemas com propriedades e aplicações que buscam superar os existentes. Dessa maneira, a nanociência e a nanotecnologia têm como objetivo, respectivamente, a compreensão e o controle da matéria na escala nanométrica.

A metodologia de manipulação da matéria átomo a átomo, denominada nanotecnologia, trabalha com uma escala na ordem de um nanômetro (nm) e equivale a um bilionésimo de metro (10^{-9} metro), atingindo a ordem de grandeza de átomos e moléculas. Um átomo mede cerca de dois décimos de um nanômetro e o diâmetro de um fio de cabelo humano mede cerca de 30.000 nanômetros.

As propriedades dos materiais em escala nanométrica são regidas pelas leis da física quântica onde existe a dualidade partícula/onda, diferentemente quando a perspectiva é macroscópica, onde as leis da física clássica são válidas. Mudanças pequenas a nível atômico podem gerar grandes mudanças nas propriedades químicas, físicas e mecânicas de um determinado material.

O progresso na construção civil, na indústria aeroespacial e automotiva, no setor de energia e na medicina passa pela criação e o desenvolvimento de novos materiais compostos agrupados com melhores propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Os nanomateriais de carbono, tais como os nanotubos de carbono (NTC), nanofibras de carbono (NFC) e o grafeno, têm atraído, recentemente, um grande interesse científico devido às suas propriedades, tais como a resistência à tração, módulo de elasticidade, condutividade elétrica e térmica e baixo peso específico. Estes materiais são considerados candidatos promissores para ser a próxima geração de materiais multifuncionais e de alto desempenho.

Uso de NTC em compósitos de cimento

Durante o processo de hidratação do cimento Portland, é formado o composto silicato de cálcio hidratado, ou C-S-H, que preenche os poros da matriz. O C-S-H é o principal responsável pelas propriedades mecânicas da matriz de cimento endurecida, mas é frágil e possui baixa resistência à tração (GLEIZE, 2007).

Alterações em escalas mais finas da matriz permitirão reforçar a estrutura do C-S-H, reduzindo a porosidade capilar e, conseqüentemente, diminuindo a formação e propagação de fissuras. Segundo GLEIZE (2007):

“A maioria dos avanços no desempenho dos materiais cimentícios conseguidos nas últimas décadas deve-se à otimização dos empilhamentos granulares e, sobretudo, à redução da porosidade capilar...”

De acordo com SANTRA *et al.* (2012) os NTC e as NFC são uns dos melhores materiais para reforço das matrizes de cimento Portland, não somente por sua resistência, mas também devido ao seu tamanho (variando de 1 nm de diâmetro até 10 μ m de comprimento).

LUDVIG (2011) concluiu que a adição de NTC a uma matriz cimentícia resultou em efeitos positivos nas resistências à compressão e tração, com teores de NTC entre 0,1 e 0,3% em relação à massa de cimento anidro. Os melhores resultados atingidos para um clínquer nano-

estruturado, em corpos de prova de argamassas, foi 14,9% de aumento na resistência à tração na flexão e 43,1% de aumento na resistência à compressão, aos 28 dias, comparado ao corpo de prova de referência, sem nanotubos.

De acordo com PAULA (2014), o teste *t-Student* entre as médias de compressão aos 28 dias demonstrou, em um nível de confiança de 95%, que as médias de resistência à compressão da pasta sem NTC são menores que as médias da pasta de cimento classe G contendo NTC em no mínimo 14% e no máximo 22%, para teores de NTC de 0,1 e 0,3%. Para a resistência à tração por compressão diametral de pasta de cimento classe G, aos 28 dias as pastas com NTC nas proporções estudadas apresentaram um valor de resistência à tração por compressão diametral 62% em média superior ao valor da média da pasta sem NTC, também para teores de NTC de 0,1 e 0,3%.

MAKAR, MARGESON e LUH (2005) afirmam que os NTC influenciam no controle da fissuração, uma vez que, pelo seu tamanho e proporções inseridas à matriz, se distribuem de forma melhor do que as fibras usadas comumente como reforço. Segundo os autores, a propagação de fissuras é interrompida de modo muito mais rápido em uma matriz contendo nanotubos, fazendo com que as fissuras geradas apresentem aberturas menores. Sendo assim, espera-se que os reforços com NTC produzam compósitos mais resistentes, rígidos e duráveis do que os materiais tradicionais usados para tal fim. Através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar a presença de NTC entre as fissuras da pasta (Figura 1).

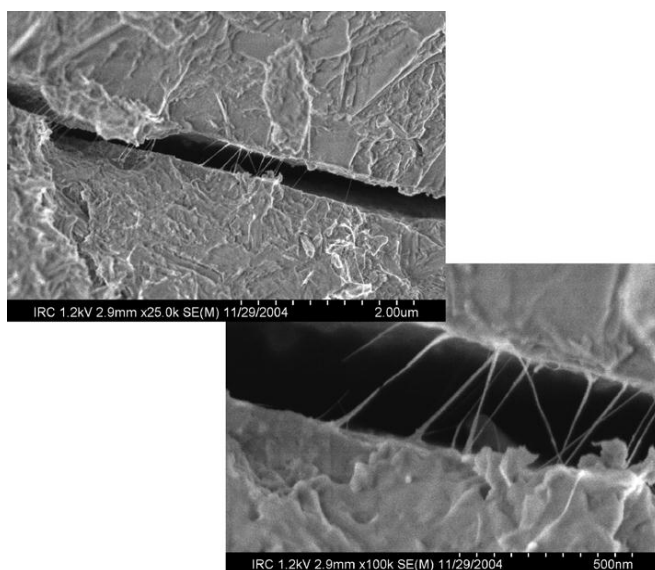


Figura 1 – MEV da pasta de cimento contendo NTC.
Fonte: Adaptado MAKAR, MARGESON e LUH (2005).

Um método eficiente que permite a funcionalização dos NTC é o crescimento dos NTC diretamente nos grãos do cimento (LADEIRA et al., 2008 e NASIBULIN et al., 2009). Além de resolver parte do problema de dispersão, esse processo contribui para uma considerável redução do custo de fabricação. Esse método de crescimento de NTC está sendo usado no laboratório do CTNanotubos e foi aprimorado de modo que a produção seja contínua, garantindo uma maior produção e qualidade. O cimento nano-estruturado utilizado para a confecção das argamassas do presente trabalho foi produzido dessa maneira.



Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise comparativa, em termos de resistência à compressão e à tração, do desempenho de argamassas de cimento Portland fabricado com NTC comparando com o cimento Portland comum. Os NTC são sintetizados, no próprio laboratório de pesquisa, diretamente sobre o clínquer num processo contínuo. Esta nova forma de introduzir os NTC em matrizes cimentícias reduz significativamente o custo de produção, visto que o clínquer de cimento funciona como elemento suporte para a síntese dos nanotubos, além de permitir a produção industrial em larga escala de um novo cimento nano-estruturado para uso na indústria da construção civil.

Serão analisadas, após 7 e 28 dias de hidratação das argamassas, a resistência à compressão e à tração, comparando o comportamento de argamassas de referência e outras com diferentes teores de NTC.

Metodologia

Visando focar na influência da presença de NTC sobre o comportamento estrutural do corpo de prova, a dosagem e moldagem das argamassas foram iguais para todos, com exceção do teor de NTC que foi o único parâmetro variável. Testes de compressão axial e compressão diametral foram executados a fim de se obter as respectivas resistências à compressão e tração. Os tempos de cura dos corpos de prova até as datas dos ensaios foram de 7 e 28 dias e, além da dosagem de referência sem NTC, foram fabricadas mais 3 diferentes argamassas, variando somente o teor de NTC. Para cada idade e teor de NTC, foram rompidos 4 corpos de prova à compressão axial e 4 à compressão diametral, totalizando 64 corpos de prova moldados.

Corpos de prova

Corpos de prova cilíndricos de argamassa com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento foram moldados, empregando-se cimento Portland, fabricado com NTC, bem como também sem NTC, seguindo as indicações da NBR 7215:1996. Para os corpos de prova contendo NTC, o seu teor em relação à massa de cimento foi variável: 0,1, 0,2 e 0,3% e adotou-se a nomenclatura conforme Tabela 1. O traço da argamassa foi composto, em massa, de uma parte de cimento e três de areia normalizada (areia conforme NBR 7214:2015), e com relação água/cimento de 0,48. O cimento utilizado foi o CPIII 40 RS fornecido pela InterCement.

Tabela 1 – Nomenclatura adotada.

REF	Argamassa de referência (sem NTC)
NTC 0,1%	Argamassa contendo 0,1% de NTC
NTC 0,2%	Argamassa contendo 0,2% de NTC
NTC 0,3%	Argamassa contendo 0,3% de NTC

Foi necessário o uso de aditivo para garantir a dispersão dos NTC na matriz cimentícia, já que os NTC têm tendência a se agregar. O aditivo utilizado foi o TEC-MULT 829 SPX fabricado pela GRACE – RheoSet®, que funciona como dispersante e plastificante, à base de lingossulfonatos.

O teor de aditivo é um parâmetro essencial para se obter a dispersão ótima dos NTC na matriz cimentícia. O parâmetro que permitiu avaliar o teor ótimo de aditivo necessário é a viscosidade plástica (VP) da pasta, que é inversamente proporcional à dispersão de um fluido. Essa análise foi feita com o auxílio de um viscosímetro rotativo (Figura 2b), modelo 3500LS da marca Chandler™, usando pastas de cimento com teor água/cimento de 0,48 preparadas em um misturador também da marca Chandler™ (Figura 2a).



Figura 2 – a) Misturador b) Viscosímetro.

Fonte: Adaptado SOUZA (2015).

Foram analisadas 7 tipos de pastas de cimento, onde o valor do teor de aditivo em relação à massa de cimento foi variado em 0,05 pontos percentuais para cada amostra, partindo de 0,20 à 0,50%. Através da análise das leituras do viscosímetro e usando a metodologia adotada por SOUZA (2015), foi possível traçar uma curva de tendência que relaciona o teor de aditivo com a viscosidade plástica do fluido (Figura 3).

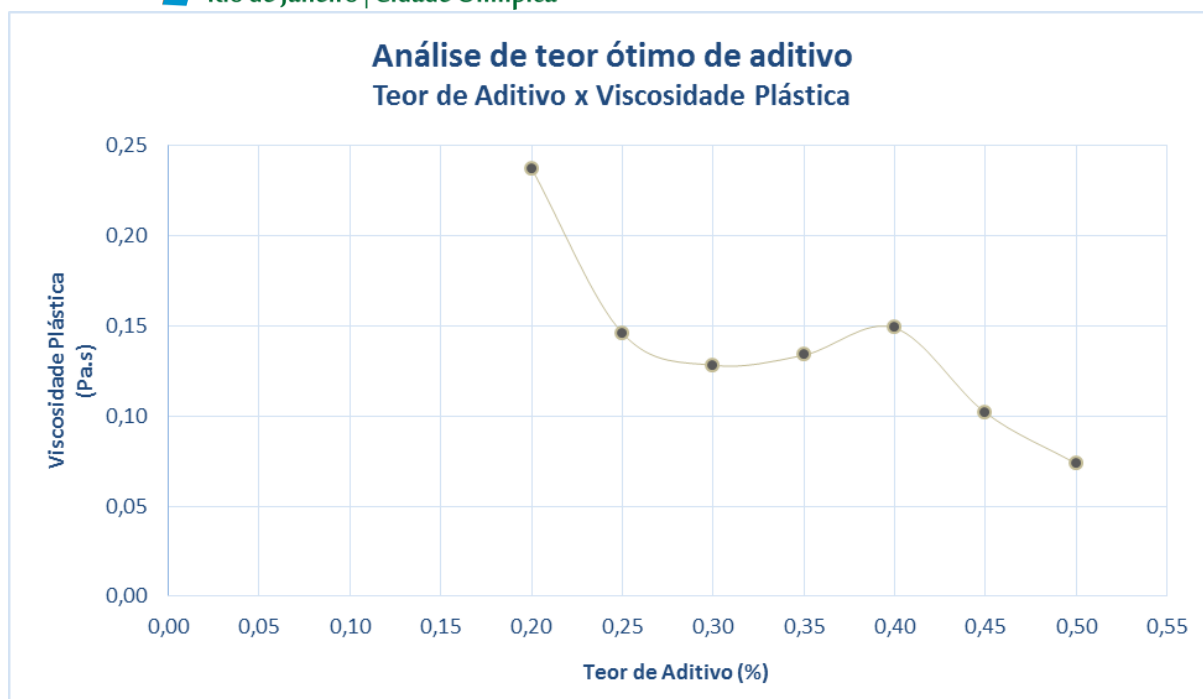


Figura 3 – Teor de Aditivo x Viscosidade Plástica.

O teor ótimo de aditivo obtido foi 0,30% e esse foi usado para a dosagem das argamassas. Não foram considerados os menores valores de VP para teores de aditivo maiores que aproximadamente 0,43%, pois o comportamento da pasta apresentou segregação e aumento considerável no tempo de pega. Segundo SOUZA (2015) e PAULA (2014), a presença dos NTC não afeta o comportamento reológico das pastas, logo não foi necessário fazer essa análise de viscosidade em pastas contendo NTC.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com sacos de linhagem molhados e, após 48 h da moldagem, foram desmoldados e colocados em um tanque para cura submersa em água com cal (CaO), retirados somente no dia do ensaio.

Ensaaios

Os testes de compressão axial foram realizados na máquina de ensaios universal DL 20.000 da EMIC®, usando célula de carga de 200kN. O ensaio e o cálculo da resistência à compressão foram executados de acordo com as prescrições da NBR 5739:2007.

A calibragem da célula de carga de 200kN da máquina DL 20.000 foi aferida para cargas maiores que 40 kN e ensaios preliminares indicaram que as cargas de ruptura para o teste de compressão diametral são menores que esse valor. Logo, para os ensaios de compressão diametral, optou-se por utilizar a máquina DL 10.000 com célula de carga de 100kN, onde a aferição da máquina foi feita a partir de 20 kN, compatível com a carga de ruptura dos corpos de prova nesse ensaio. A norma NBR 7222:2011 foi seguida para a execução dos ensaios de compressão diametral e para o cálculo da resistência à tração. Os parâmetros dos ensaios de compressão axial e diametral podem ser visualizados na Tabela 2.



Tabela 2 – Parâmetros dos ensaios de compressão axial e diametral.

Velocidade de ensaio	0,5	mm/min
Velocidade de retorno	100	mm/min
Limite de deslocamento	50	mm
Critério de colapso	15	%

Considerando pequenas diferenças nas medidas dos corpos de prova, os respectivos diâmetros foram medidos quatro vezes: duas medidas, perpendiculares entre si, a 2 cm de distância da borda de um dos lados e mais duas medidas a 2 cm da outra borda. Da mesma maneira, duas medidas também foram feitas para o comprimento de cada corpo de prova. A média aritmética dos diâmetros e comprimentos foi adotada para os cálculos das tensões atuantes. Para garantir a uniforme distribuição das tensões, os corpos de prova submetidos à compressão axial foram capeados usando enxofre e, para o ensaio à compressão diametral, foi usado um aparato que permite a centralização e também a adequada transferência de carga ao corpo de prova durante o ensaio (Figura 4).



Figura 4 –Montagem para ensaio de tração por compressão diametral.

Resultados

Os corpos de prova foram testados em ensaios de compressão axial e compressão diametral, permitindo o cálculo, respectivamente, das resistências à compressão e à tração das argamassas. Também foram calculados os seguintes parâmetros amostrais: média, desvio padrão, coeficiente de variação e ganho/redução de resistência (em relação à referência). Os resultados se apresentam nas Tabelas 3 e 4 e Figuras 5 e 6.

Tabela 3 – Resistência à compressão das argamassas.

Idade	Parâmetros	REF	NTC 0,1%	NTC 0,2%	NTC 0,3%
7 dias	Resistência média (MPa)	28,56	27,02	26,20	26,65
	Desvio padrão	0,59	0,75	0,46	3,29
	Coef. de variação (%)	2,07	2,78	1,74	12,33
	% ganho/redução	-	-5,4%	-8,2%	-6,7%
28 dias	Resistência média (MPa)	35,97	35,50	36,86	38,59
	Desvio padrão	1,01	0,65	1,23	0,76
	Coef. de variação (%)	2,80	1,83	3,34	1,98
	% ganho/redução	-	-1,3%	2,5%	7,3%

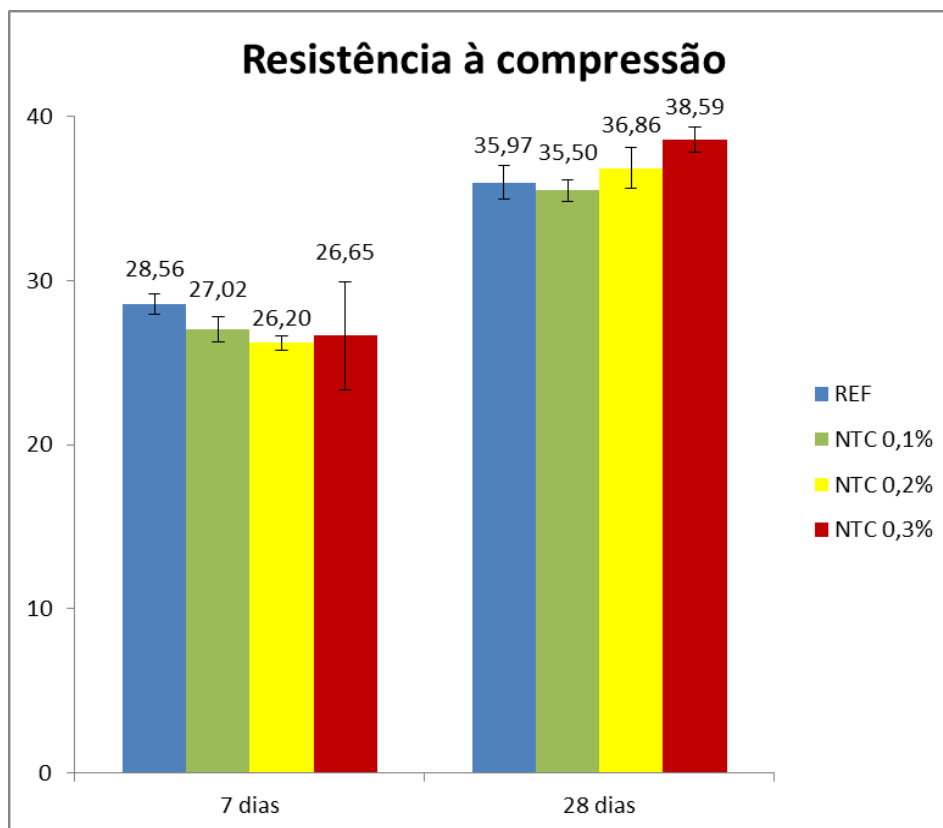


Figura 5 – Comparação da resistência à compressão. Valores em MPa.



Tabela 4 – Resistência à tração das argamassas.

Idade	Parâmetros	REF	NTC 0,1%	NTC 0,2%	NTC 0,3%
7 dias	Resistência média (MPa)	1,93	2,34	2,07	2,07
	Desvio padrão	0,15	0,18	0,36	0,28
	Coef. de variação (%)	7,64	7,59	17,46	13,71
	% ganho/redução	-	20,7%	7,3%	6,8%
28 dias	Resistência média (MPa)	2,71	3,05	3,77	3,04
	Desvio padrão	0,14	0,29	0,35	0,41
	Coef. de variação (%)	5,11	9,53	9,35	13,44
	% ganho/redução	-	12,4%	39,1%	12,1%

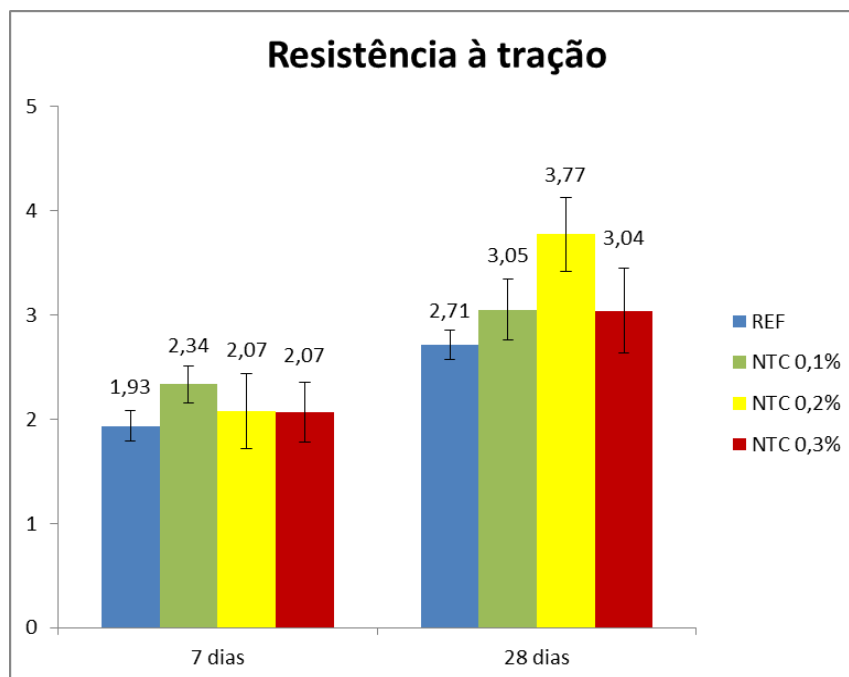


Figura 6 – Comparação da resistência à tração. Valores em MPa.

Visando analisar se realmente houve variação de resistência das argamassas com o uso de NTC na matriz cimentícia, foi feito o teste estatístico *t-Student* para duas amostras, com nível de confiança de 95%, comparando resultados de corpos de prova de determinado teor de NTC com a respectiva argamassa de referência. Através desse estudo estatístico, constatou-se que somente existiu ganho de resistência à compressão para a argamassa NTC 0,3% em 28 dias, aumentando em 7,3%, comparando com a referência. Para o caso de resistência à tração, foi



constatado um ganho de 20,7% para a argamassa NTC 0,1% em 7 dias de hidratação e 39,1% para NTC 0,2% em 28 dias.

Conclusões

Os resultados obtidos nesse estudo permitem avaliar que o uso de argamassa de cimento Portland fabricado com NTC apresenta ganhos em relação à resistência, comparando com o cimento Portland comum, resultado que também foi obtido em pesquisa de outros autores, LUDVIG (2011), PAULA (2014) e SOUZA (2015). A viabilidade do uso desse material em escala industrial se torna tangível com o novo processo de síntese contínua, desenvolvido pelo CTNanotubos.

O ganho de resistência à compressão com o uso de NTC, quando houve, se mostrou muito baixo e somente ocorreu a 7 dias de hidratação. O ganho de resistência à tração em 39,1% a 28 dias de hidratação da argamassa com 0,2% de NTC em sua composição faz com que o uso desse material seja promissor. Atualmente, o termo alto desempenho estrutural, no caso do concreto, está relacionado à alta resistência e durabilidade e o uso de cimento Portland fabricado com NTC surge como um promissor material de alto desempenho.

Referências

- GLEIZE, Philippe J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2. cap. 50, p. 1659-1685.
- LADEIRA, L. O.; SILVA, E. E.; DE OLIVEIRA, S.; LACERDA, R. G.; FERLAUTO, A. S.; ÁVILA E.; LOURENÇON, E. Processo de síntese contínua e em larga escala de nanotubos de carbono sobre o clínquer de cimento e produtos nanoestruturados, Brazilian Patent, INPI 014080002727 (30.04.2008).
- LUDVIG, P.; CALIXTO, J. M.; LADEIRA, L.O.; GASPAS, I. P. Using Converter Dust to Produce Low Cost Cementitious Composites by in situ Carbon Nanotube and Nanofiber Synthesis. *Materials*, 4, p. 575-584, 2011.
- MAKAR, J. M.; BEAUDOIN, J. J. Carbon nanotubes and their application in the construction industry. In: 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction, 2003, Paisley, Scotland. Disponível MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications. In: 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, 2005, Vancouver, B.C.
- NASIBULIN, A. G.; SHANDAKOV, S. D.; NASIBULINA, L. I.; CWIRZEN, A.; MUDIMELA, P. R.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; GRISHIN, D. A.; GAVRILOV, Y. V.; MALM, J. E. M.; TAPPER, U.; TIAN, Y.; PENTTALA, V.; KARPPINEN, M. J.; KAUPPINEN, E. I. A novel cement-based hybrid material. *New Journal of Physics*, v. 11, p. 1-11, 2009.
- PAULA, J. N. Comportamento Mecânico e Reológico de Pastas de Cimento Fabricado com Nanotubos de Carbono Crescidos em Clínquer de Cimento Portland para Poços de Petróleo. Belo Horizonte, 2014.
- SANTRA, A.; BOUL, P. J.; PANG, X. Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties. SPE 156937. SPE International Oilfield Nanotechnology Conference, Noordwijk, Holanda, 12-14.06, 2012.
- SOUZA, T. C. C. Síntese Contínua e Caracterização de Cimento Portland Fabricado com Nanotubos de Carbono. Belo Horizonte, 2015.