

**FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE ITUVERAVA FACULDADE DE  
FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS**

**Wesley da Silva Pereira**

**NANOTECNOLOGIA APLICADA A CONSTRUÇÃO CIVIL: VERIFICAÇÃO DA  
MELHORA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE ARTIGOS CIMENTÍCIOS  
ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO COMO AGREGADO**

**ITUVERAVA  
2020**

**WESLEY DA SILVA PEREIRA**

**NANOTECNOLOGIA APLICADA A CONSTRUÇÃO CIVIL: VERIFICAÇÃO DA  
MELHORA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE ARTIGOS CIMENTÍCIOS  
ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO COMO AGREGADO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras,  
Fundação Educacional de Ituverava para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil**

**Orientadora: prof.<sup>a</sup> MSc. Tainara Ávila  
Cristina;**

**ITUVERAVA  
2020**

**WESLEY DA SILVA PEREIRA**

**NANOTECNOLOGIA APLICADA A CONSTRUÇÃO CIVIL: VERIFICAÇÃO DA  
MELHORA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE ARTIGOS CIMENTÍCIOS  
ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO COMO AGREGADO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras,  
Fundação Educacional de Ituverava para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil**

**Ituverava, \_\_\_ de \_\_\_ de 2020.**

**Orientador(a):**

**Examinador (a):**

**Examinador(a):**

Dedico esse trabalho a memória de meu avô, Enedino Francisco da Silva, que sempre me foi um espelho de honra, sabedoria e amor.

**“Você pode saber o nome de um pássaro em todas as línguas do mundo, mas no fim das contas, você não saberá absolutamente nada sobre o que quer que seja o pássaro. Então, vamos observar o pássaro e ver o que ele faz — isso é o que conta.**

**Eu aprendi bastante cedo a diferença entre saber o nome de algo e saber de algo.”**

**Richard Feynman**

## AGRADECIMENTO

Agradeço,

A Deus por todas os erros e acertos da minha vida e pela oportunidade de tentar.

A minha mãe, Hilda de Freitas Silva, meu pai, Claudinei Figueiredo Pereira e meu irmão, Wallace da Silva Pereira, que sempre me apoiaram meus estudos e proporcionaram uma base sólida para eu lutar pelos meus objetivos.

Aos meus professores pelo conhecimento compartilhado.

A minha orientadora, Tainara Ávila Cristina, pelos fochos de sabedoria que me proporcionou durante toda a execução desse trabalho.

Ao diretor da FFCL António Luís (Toca) por se dispor a ajudar e ouvir sobre os mais diversos projetos que tive durante minha graduação.

Aos meus amigos que tornaram a jornada mais agradável.

## RESUMO

O cimento é um dos materiais mais utilizados do mundo, e tem seu consumo aumentado a cada dia. Apesar dos incontáveis benefícios dos artigos cimentícios, os mesmos possuem alguns pontos negativos que contribuem para a baixa durabilidade e versatilidade do material. Diante desses problemas, esse estudo revisou artigos e livros técnicos, a fim de avaliar a viabilidade da aplicação de nanotubos (NTC) de carbono a compósitos a base de cimento, para aumento da resistência. De modo geral, as peças de argamassa e concreto com NTC mostraram significativo aumento na resistência de tração e compressão, assim como diminuição na taxa de fissuras e melhor propagação de tensões ao ser carregadas. Por outro lado, os NTCs exigem equipamentos especiais para serem dispersos uniformemente na mistura do concreto/argamassa ou devem ser adquiridos já dispersos em meio aquoso, o que contribui para um grande aumento no valor final da peça. Adiante foram observados alguns efeitos negativos como o aumento da absorção de água por capilaridade e alteração da viscosidade desejado. As pesquisas sobre a adição de NTC a matrizes cimentícias se mostraram promissoras e uma opção viável para melhora de propriedades mecânicas, tendo os efeitos negativos no material algo fácil de ser contornado. Ademais, os valores de produção ainda são altos e a quantidade de pesquisas para tornar mais eficiente a produção, tanto dos NTCs quanto das peças que o receberão como agregado, ainda é pequena.

**Palavras-chave:** Cimento. Resistência. Nanomateriais.

## SUMMARY

Cement is one of the most used material in the world and your consumption increase every day. Even though of all the benefits of the cement article, they have been some negative points that contribute to the low durability and versatility of the material. In front of this problem, this study revised articles and technical books, with the goal to evaluate the viability of the application to carbon nanotubes by increase the resistance of concrete. By the way, the cement material with carbon nanotubes shows a significant increase in the compressive and tensile strength as well as a low tax of fissure and better load distribution. On another hand, the carbon nanotubes need specials equipment to guarantee the uniform distribution of the material in the cement/mortar mixture or the carbon nanotubes need to proper already dispersed in an especial water mixture, this fact turns the concrete/mortar with carbon nanotubes very expensive. Forward has observed some negative effects like the increase of the water-absorbing by capillarity and change in the ideal viscosity. The research about the addiction to carbon nanotubes cement base objects looks promising and a good option to improve the mechanical properties. Also, the negative effects on the material can easily be outlined. Moreover, the price of production is high yet and the number of papers to make more efficient and productive, the nanotubes synthesis and the dispersing as aggregate, are small.

**Keywords:** Cemente. Resistence.Nanomaterials.



## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratados
DQV	Deposição Química de Vapor
FFCL	Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras
Mpa	Megapascal
Nm	Nanomaterial
nm	Nanômetros
NTC	Nanotubo de Carbono
NTCMC	Nanotubo de Carbono com Múltiplas Paredes
TPa	Tetapascal

## SUMÁRIO

<b>ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Aumento da Resistência .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Dispersão do NTC em matrizes cimentícias.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Efeitos negativos no material .....</b>	<b>24</b>
<b>4.4 Viabilidade econômica .....</b>	<b>24</b>
<b>4.5 Cuidados na manipulação.....</b>	<b>25</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é de extrema importância na composição da economia de um país, está em constante crescimento e devido a sua rentabilidade e empregabilidade, recebe grandes investimentos públicos e privados. Esse fato, somado a limitação de espaço em capitais deixa evidente a necessidade de avanços na área, principalmente no campo da tecnologia dos materiais, pois é extremamente elevado o consumo de insumos, o que causa muito impacto ambiental, e novas demandas tecnológicas são exigidas oriunda dos mais diversos conceitos arquitetônicos que, devido a sua morfologia, podem se tornar inconveniente de serem construídas utilizando apenas materiais e técnicas convencionais.

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados no mundo devido a facilidade de moldagem e alta resistência a compressão apresentada pelas matrizes que o tem como base. Apenas no Brasil são consumidas dezenas de toneladas do material todos os anos. Não obstante, é possível encontrar edificações de concreto armado em estado avançado de degradação, que necessitam de grande esforço para serem recuperadas e trazidas de volta ao estado limite de serviço. Fatos como este torna evidente os pontos negativos apresentados pelas matrizes cimentícias, sendo os principais a baixa resistência a tração, grande quantidade de fissuras, alta taxa de deformação após a cura, difícil reforma e manutenção.

Frente a esses problemas, algumas tecnologias se mostraram promissoras dentre elas o uso de Nanomateriais na composição do material. Nanotecnologia consiste na criação e manuseio de materiais em escala nanométrica, 1 nm (um nanômetro) é igual a  $10^{-9}$ m (dez elevado a menos nove metros), os materiais em escala tão reduzida apresentam novas propriedades inexistentes em escala macroscópica. Por exemplo, é possível tornar inerte materiais instáveis, isolantes materiais condutores ou atingir resistências dezenas de vezes maiores que a do aço.

Diante da diversidade de técnicas e materiais frutos de pesquisas no campo nanométrico, os nanotubos de carbono (NTC) se destacam pelas surpreendentes propriedades apresentadas, sendo algumas delas a alta condutibilidade elétrica, resistência a tração superior à do aço e resistência extrema ao calor. O nanotubo de carbono consiste em folhas de grafeno que são enroladas no formato cilíndrico, podem possuir de 30 a 100 nanômetros de espessura e podem ser simples (possuir apenas uma camada) ou possuir multicamadas. Esse fator junto a maneira como o material é enrolado influencia diretamente as propriedades finais.

Os NTC podem ser usados como um agregado em matrizes cimentícias. Ao utilizar esse material inteligente, é possível aumentar a resistência a compressão e significativamente a

resistência a tração do concreto e argamassa. Ainda é possível melhorar a trabalhabilidade, impermeabilidade e diminuir a fissuração da peça, o que influencia diretamente na vida útil da edificação e diminuir drasticamente a necessidade de manutenção, corrigindo de maneira satisfatória os pontos negativos das peças cimentícias.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Apesar da grande gama e versatilidade dos materiais convencionais, muitas vezes é necessário levar a tecnologia deles ao extremo devido aos novos desafios apresentados pela construção civil. Aldred (2010) registrou esse fenômeno na construção do atual maior edifício do mundo (2020) Burj Khalifa em Dubai, que devido aos seus 828 metros de altura exigiu que o concreto utilizado fosse plástico e com granulometria adequada o suficiente para ser bombeado por até 601 metros de altura mantendo a alta resistência (entre 60 e 80 MPA).

Não obstante é necessário encontrar novas tecnologias que possam suprir as demandas arquitetônicas, estruturais e ambientais de maneira mais eficiente e econômica. Frente a essas questões, a nanociência e nanotecnologia são importantes campos a serem considerados (TOMKELSKI, SCREMIN, FAGAN, 2019).

O prêmio Nobel Feynman (1.918 – 1.988) introduziu pela primeira vez o conceito de nanotecnologia em seu artigo “There’s a Plenty of room at the bottom” (1959), onde ele comparou esse novo campo da física aos estudos revolucionário dos também Prêmios Nobel Kamerlingh Onnes (1.853-1.929), sobre as propriedades de materiais em baixas temperaturas, e Percy Bridgman (1.882-1.961), sobre o comportamento de materiais sob alta pressão. Desde então o estudo dessa ciência tem crescido na área da física, química e biologia. (BENELMEKKI, 2019)

Nanomaterial consiste em um objeto com, ao menos, uma de suas dimensões físicas menor que algumas dezenas de nanômetros (um nanômetro consiste na bilionésima parte de um metro). Um objeto tão pequeno é composto por uma quantidade relativamente baixa de átomos, para efeito de comparação, um grão de areia possui, em torno de  $3,012 \times 10^{22}$  átomos. Benelmekki (2019), citando Norrio Taniguchi (1974), esclarece que a nanotecnologia não é apenas diminuir continuamente as dimensões de um objeto até a escala manométrica, o processo envolve criar, manipular e controlar as estruturas, através da redução da massa ou tornando o material um grupo único de átomos.

Melo e Pimenta (2004) ressaltam que o grande motivador para o desenvolvimento de objetos em escala tão pequena (algumas dezenas de nanômetros) é o fato de que novas propriedades físicas e químicas, ausentes no mesmo material em tamanho mais elevado, são observáveis. Os autores ainda atribuem essas novas propriedades à 2 principais fatores, sendo: objetos tão pequenos estão mais suscetíveis aos efeitos quânticos, que são, portanto, manifestados com mais evidência nessa escala. E ao efeito que o material apresenta devido a

quantidade de átomos em contato com a superfície em relação a quantidade de átomos contidos no seu volume. Esse segundo fator é relevante justamente porque os átomos na superfície podem participar de todas as interações com o meio.

Segundo Benelmekki (2019) a nanotecnologia teve um grande crescimento devido aos interesses da indústria no tamanho de transistores e componentes que, ao se tornarem cada vez menores, possibilitam uma maior capacidade de processamento e menor consumo de energia, pois mais componentes podem ser agrupados em pequenos volumes.

A síntese dos nanomateriais pode ser dividida em dois métodos chamados “de baixo para cima” que consiste em construir o material a partir de seus átomos e moléculas, pode-se controlar tanto as propriedades físicas quanto químicas resultantes do material. E o método “de cima para baixo” que elimina o excesso de material de uma amostra maior, “polindo” o mesmo até adquirir o tamanho físico desejado (MELO E PIMENTA,2004) (Benelmekki, 2019)

Alves (2004) destacou importantes área de aplicação dos nanomateriais, sendo algumas delas a indústria automotiva e aeronáutica que possibilita materiais mais leves, reforçados, resistentes contra impacto, tinta que não sofra o impacto de salinidade etc. Indústria química e de materiais com novos catalisadores, ferramentas extremamente resistentes, fluidos inteligentes que servem como lubrificante, entre outros. Indústria farmacêutica, biotecnológica e biomédica traz novos medicamentos, próteses biocompatíveis com órgão humanos, sensores laboratoriais sobre chip etc. Outros setores como indústria eletrônica, setor de instrumentação, setor de energia também são diretamente influenciados.

Na construção Civil a nanotecnologia é mais explorada para potencializar as propriedades mecânicas do material alterando diretamente sua estrutura atômica em escala nanométrica ou através da adição de nanomateriais ao receptor como impureza (BENELMEKKI, 2019). Gopalakrishnan K. *et al* (2011) demonstram que a nanotecnologia torna possível otimizar o comportamento e a performance dos materiais, permitindo maior durabilidade, resistência, produtividade as construções, além de reduzir o impacto ambiental. Alguns importantes processos de melhoria em materiais foram citados por Sabihuddin (2004), entre eles se destacam o estudo das reações de hidratação, e da reatividade das cinzas vulcânicas no concreto que pode ter sua deficiência, baixa resistência inicial, resolvida com a adição de Nano-sílica, além de receber aumento na resistência aos 28 dias.

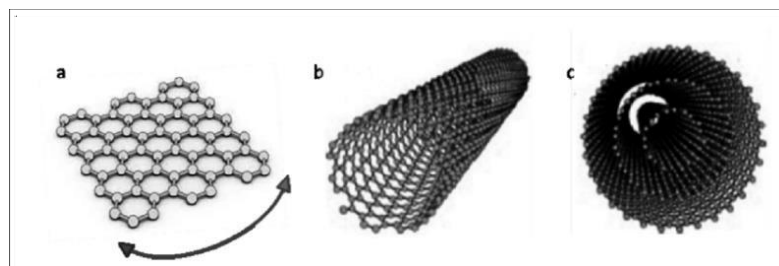
A nanotecnologia também é muito aplicada para monitorar condições de serviço da estrutura, como capturar dados sobre a temperatura e consumo de energia, assim como monitorar a segurança ao registrar os deslocamentos e aumento da abertura de fissuras, por exemplo. Currie (2015) demonstrou que é possível utilizar nano sensores com tecnologia

wireless para monitorar o anel de fundação de uma turbina de vento, e constatou significativa movimentação vertical durante turbulências e durante a ligação e desligamento da turbina.

No que se refere a aplicação de materiais inteligentes em artefatos cimentícios, os benefícios podem ser muito significativos, pois, segundo Carvalho R. C. (2019), artefatos de cimento (argamassa, concreto etc.) apresentam baixa resistência a tração, grande taxa de trincas e deformações após a cura, difícil reforma e manutenção e é bom condutor de calor e som. Para Gopalakrishnan K. *et al* (2011) a nanotecnologia é ideal para resolver esses problemas. Apesar dos pontos desfavoráveis, o cimento é um dos materiais mais consumidos no mundo. No Brasil, segundo o Banco de Dados – CBIC apenas no ano de 2014 foram produzidas mais de 71 mil toneladas de cimento Portland (BANCO DE DADOS CBIC, 2014)

Do crescente interesse pelos estudos em escala nanométrica que podem ser aplicadas na construção civil atuando, principalmente, nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, um notável fruto foi a sintetização dos Nanotubos de carbono (NTC) demonstrados pela primeira vez por Iijima (1.991). Essa descoberta multidisciplinar abriu novas fronteiras para a química e física. Como descrito por Filho e Fagan (2007) os NTC são, de modo simplificado, folhas de grafite(grafeno) enroladas no formato de cilindros, com até 100 nm de espessura Figura 1.

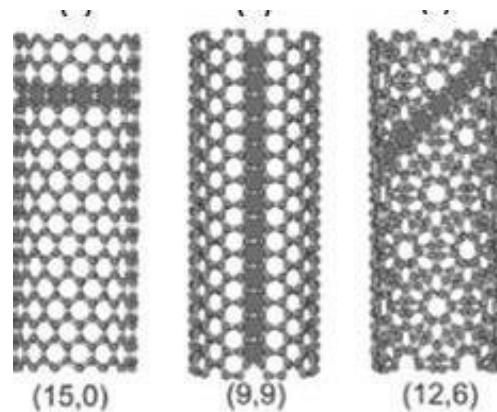
**FIGURA 1:** a) Folha de Grafeno; b) Nanotubos com Parede Única; c) Nanotubo com Múltiplas Paredes.



**Fonte:** MACHADO *ET AL*, 2014.

Esses tubos podem possuir uma ou mais paredes, sendo classificados como múltiplas paredes ou parede simples e a maneira como esse grafeno é enrolado influencia diretamente nas propriedades do material, Figura 2.

**FIGURA 2:** Diferentes Maneiras de Enrolar a folha de Grafeno.



**Fonte:** FILHO E FAGAN, 2007.

Quanto aos meios de síntese dos nanotubos de carbono, Jauris *et al* (2011) cita os métodos mais utilizados para a produção de NTCs como sendo: ablação a laser, monóxido de carbono de alta pressão, descarga de arco elétrico e deposição química de vapor (DQV).

A técnica de síntese DQV produz os NTC através da decomposição de gases contendo átomos de carbono em atmosfera inerte e utilizando um catalisador metálico que, geralmente, são de ferro, cobalto ou níquel. Jauris *et al* (2011) ainda destaca que essa técnica é muito utilizada pois apresenta maior facilidade no controle das principais propriedades por conta da possibilidade de manusear facilmente a temperatura, catalizador, vazão dos gases com carbono e tempo de síntese. Esse método beneficia a produção em larga escala.

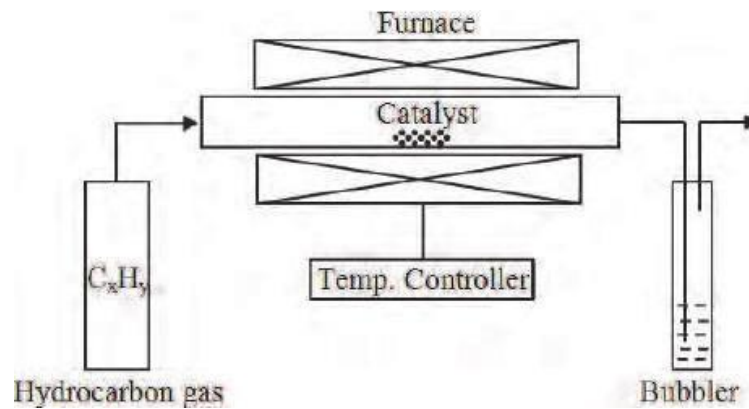
Comparado com os demais métodos, Karthikeyan, Mahalingam e Karthik (2009) afirmam que a DQV é mais simples e econômica para a síntese de NTC em temperatura relativamente baixa. Ademais, acrescentam que a DQV é versátil, pois pode ser executado com uma grande diversidade de hidrocarbonetos em diferentes estados físicos. As propriedades do NTC podem ser mais precisamente controladas, devido, como já citado, a possível utilização de diversos substratos diferentes, que permite que o material cresça em formatos variados.

O método DQV consiste em forçar um vapor de hidrocarboneto por um tubo contendo um tipo de metal utilizado como catalizador. O tubo é aquecido, geralmente, entre 600 e 1200

°C para decompor o gás. O material é coletado após o resfriamento a temperatura ambiente do produto. A figura 3 mostra um diagrama esquemático da produção do NTC pelo método da deposição química de vapor (KARTHIKEYAN, MAHALINGAM E KARTHIK, 2009).



**FIGURA 3:** Diagrama da Produção de NTC por Deposição Química



Fonte: KUMAR *ET AL*, 2010.

A formação de NTC com única ou multicamadas depende do tamanho dos grãos do catalisador.

As propriedades dos NTC chamam atenção pela alta eficiência. Alguns exemplos são: a capacidade de transportar uma corrente elétrica de alta intensidade muito superior à do cobre, resistência a tensão até vinte vezes superior à do aço, se mantém estável até 3000 °C, entre outras propriedades que podem ser aproveitadas na construção civil. (TRINDADE, 2011).

Desde a 1ª vez que o NTC foi sintetizado, já era esperado que o material possuísse propriedades mecânicas extremamente elevadas assim como de outros derivados do carbono como o grafite. Antes mesmo de haver amostras suficientes de NTC para os testes, já existia uma série de trabalhos estimando o módulo de Young do material através de simulação computacional. O módulo médio estimado pairava em torno de 1 TPa, e independia do tipo do NTC e do diâmetro (COLEMAN *ET AL*, 2006)

Muitos métodos indiretos foram utilizados para estimar as propriedades mecânicas dos NTC, até que, em 1997, a primeira medição direta foi feita por Wong *et al* (1997). Para tal, um microscópio de força atômico foi utilizado em uma amostra de NTC de múltiplas camadas. Os resultados médios encontrados por Wong (1997) foram de 1,28 TPa para o módulo de Young e para a máxima curva de força 14,2±8 GPa (COLEMAN *ET AL*, 2006)

Resultados para as propriedades mecânicas dos NTC destacados por Sahoo *et al* (2010) podem ser observados na tabela 1.

**TABELA 1:** Propriedades de Diferentes Tipos de Nanotubos de Carbono.

PROPRIEDADES	NTC PAREDE ÚNICA	NTC PAREDES DUPLAS	NTC PAREDES MÚLTIPLAS
Força de Tração (GPa)	50 - 500	23 - 63	out/60
Módulo de Elasticidade (TPa)	Aprox. 1	-	0,3 - 1
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,3 - 1,5	1,5	1,8 - 2,0
Condutividade Elétrica (S/m)	Aprox. 10 <sup>6</sup>		
Estabilidade Térmica	> 700 °C		
Diâmetro típico	1 nm	Aprox. 2 nm	Aprox. 20 nm
Área de superfície Específica	10 - 20 m <sup>2</sup> /g		

Fonte: SAHOO ET AL (2010)

Melo *et al* (2011) em sua pesquisa sobre adição física de NTC e aditivo à base de melamina formaldeído em argamassa fabricada com CP V-ARI obteve resultados positivos, mostrando que com a adição de apenas 0,30% de NTC, em relação ao peso do cimento, é possível aumentar a resistência a tração em até 21% aos 28 dias. Um resultado parecido foi obtido por Li, Wang e Zhao (2004) que utilizaram uma quantidade de NTC igual a 0,5% do peso do cimento e obtiveram um aumento de 25% na resistência a tração da argamassa. Esses resultados reforçam o potencial do NTC de dificultar o aparecimento de fissuras na peça de concreto, pois melhora a resistência a tração e conseqüentemente aumentar a vida útil e diminuir a necessidade de manutenção, visto que, a exposição da armadura e posterior corrosão é um dos principais problemas encontrados em edificações de variadas idades.

Adiante, Marcondes (2012) demonstra que juntamente do aumento na resistência a tração é possível, com 95% de confiança, aumentar a resistência a compressão do concreto em até 37% em comparação a um traço de referência. Em contrapartida, Melo *et al* (2011) utilizando amostra com aditivo de melamina não observou aumentos significativo na resistência a compressão (aumento menor que 5%), que pode ser resultado da ligação entre o aditivo e os NTC. Os resultados de aumento na compressão trazem a possibilidade de economia em cimento que, apesar da inviabilidade econômica atual de se trocar cimento por NTC, no futuro com uma produção em grande escala de nanotubos de carbono pode se tornar viável.

### **3 METODOLOGIA**

No presente trabalho foram realizadas coletas objetivas de dados que se concentram em números e estatísticas, a fim de comparar as propriedades de matrizes de base cimentícia com adição de nanotubos de carbono como agregado. Adiante, foi abordada uma análise qualitativa de artigos e livros científicos, tendo por objetivo entender mais profundamente e trazer mais familiaridade a possíveis alterações das propriedades mecânicas de objetos cimentícios adulterados com diferentes quantidades nanotubos. Além do mais, procurou-se trazer clareza sobre o processo de dispersão dos NTC e viabilidade econômica da produção das peças de concreto/argamassa.

## 4 RESULTADO E DISCUSSÃO

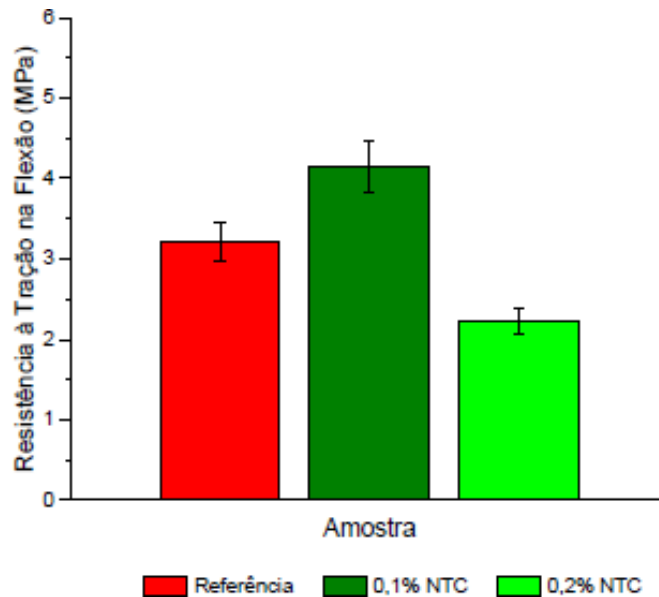
### 4.1 Aumento da Resistência

Corpos de provas de concreto com adição de NTC de experimentos como os de Melo *et al* (2011), mostraram considerável aumento na resistência tanto na compressão quanto na tração. Li, Wang e Zhao (2004) atribuem o aumento na resistência do compósito cimentício à melhora da estrutura do material. Os pesquisadores pontuam que a interação entre a superfície dos NTC e dos produtos gerados pela reação de hidratação do cimento (C – S – H e Hidróxido de cálcio) produzira uma ligação mais resistente e melhora a distribuição de cargas na peça.

Outro fator que corrobora para o aumento da resistência do concreto é a diminuição da porosidade. Marcondes (2012) demonstrou que a resistência a compressão do concreto com NTC aumenta conforme a absorção de água por imersão diminui. O pesquisador salienta que a diminuição da absorção de água por imersão tem relação direta com a porosidade. Madhavi *et al* (2013), utilizando nanotubos de carbono com múltiplas camadas também observaram aumento na resistência a compressão. Semelhante à Marcondes (2012) o aumento na resistência foi atribuído a diminuição da porosidade na peça, eles pontuaram que os NTCMP (Nanotubos de carbono com múltiplas paredes) preenchem os nanovazios do concreto o que torna o mesmo mais resistente a fissuração durante o carregamento. Ademais, o alto módulo de elasticidade do NTC também pode ter influenciado na melhora da resistência.

Abbasi *et al* (2016) demonstram um aumento na resistência a compressão e flexão de, respectivamente, 32 e 28%, com a adição de 0,5% de NTCMP em matriz de base de metacaulim. Os pesquisadores atribuem esse aumento a um comportamento de ponte desempenhado pelos NTCs, que pode ter limitado a propagação de microfissuras na peça, assim como a boa ligação entre os nanotubos e o material base.

Os efeitos mecânicos de matrizes cimentícias ao receber NTC diretamente na composição, sem que haja um preparo para melhorar a dispersão do material, é extremamente variável e incerta, visto que os nanotubos tendem a se aglomerar e criar pontos de fortalecimento específicos, que, portanto, não beneficia as propriedades peça como um todo. Esse fenômeno fica evidente na figura 4 que mostra a medição de corpos de prova com a adição de 0,1 e 0,2% de NTC sem utilizar a funcionalização para dissipar o material. É possível observar que houve considerável diferença de resistência a tração entre as amostras com 0,1 para 0,2%, que pode ser atribuído a esse fenômeno de aglomeração (LUZ, 2018)

**FIGURA 4:** Efeito da Adição de NTC sem Funcionalização.

Fonte: LUZ (2018)

A Tabela 2 mostra alguns resultados de melhora da resistência a compressão e tração obtidos com a adição de nanotubos de carbono de múltiplas camadas em matrizes cimentícias. Tais amostras foram comparadas com corpos de prova de referência que não recebeu qualquer adição de NTC.

**TABELA 2:** Resistência a compressão e tração.

AUTOR	ANO	TRAÇO DE REFERÊNCIA SEM NTC (MPa)		% DE NTC	TIPO DE NTC	RESISTÊNCIA	DISP. APENAS COM ULTRASSOM (Mpa)	ADICIONADO DIRETAMENTE NA MISTURA (Mpa)	APENAS FUNCIONALIZADO (Mpa)	ULTRASSOM + FUNCIONALIZAÇÃO (MPa)
		COMPRESSÃO	TRAÇÃO							
MARCONDES <sup>1</sup>	2012	25,77	3,29	0,3	NTCMP*	COMPRESSÃO TRAÇÃO	35,08 3,92	30,55 3,86	33,25 3,49	- -
MADHIAVI ET AL <sup>1</sup>	2013	38,22	2,27	0,015	NTCMP	COMPRESSÃO	-	-	-	41,48
				TRAÇÃO		2,97				
				COMPRESSÃO		45,18				
				TRAÇÃO		3,3				
0,03	COMPRESSÃO	49,18								
0,045	TRAÇÃO	3,775								
LI ET AL <sup>2</sup>	2004	52,27	-	0,5	NTCMP	COMPRESSÃO	-	-	62,13	-
						TRAÇÃO	-	-	-	-

<sup>1</sup> Concreto

<sup>2</sup> Pasta de Cimento

\* Nanotubos de Carbono com Múltiplas Paredes

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

## 4.2 Dispersão do NTC em matrizes cimentícias

Os nanotubos de carbono encontram-se normalmente aglomerados o que dificulta a dispersão do material na mistura e causa falhas na peça de concreto. Segundo Melo *et al* (2011) esse comportamento se dá pelo fato de os NTC serem hidrofóbicos, ou seja, o material tende a repelir as partículas de água e se aglomerar como demonstrado na Figura 5. A alta força de ligação, justificada pela grande superfície de contato, entre os NTC pode também ser um motivo que contribui para a dificuldade em se dispersar o material.

**FIGURA 5:** NTC em Meio Aquoso



Fonte: MARCONDES, 2012

Novos átomos podem ser ligados ou adsorvido na superfície do NTC, isso resulta em variações nas propriedades originais. As propriedades eletrônicas são, geralmente, o principal alvo desse processo de funcionalização. Além do mais, a interação de átomos externos com o NTC pode ser covalente (interação forte) ou não-covalente (interação fraca) (FILHO E FAGAN, 2007)

Fagan (2007) pontua que um importante exemplo de interação não-covalente envolvendo os nanotubos de carbono é a solubilização do material através da utilização de cadeias poliméricas. A interface hidrofóbica dos NTCs é destruída pelas propriedades hidrofóbicas das moléculas poliméricas, essa reação permite que os NTC possam se dispersar com mais facilidade em meio aquoso.

No que se refere a ligações covalentes o NTC, por ser altamente estável, apenas um grupo seletivo de elementos podem interagir com o material (FILHO E FAGAN, 2007). Dessa forma, é possível que alterar as propriedades do NTC através de ligações covalente não seja tão interessante para a construção civil, pois com a diminuição das opções e aumento na complexidade do processo, o preço do produto final também é aumentado o que dificulta a utilização em grande escala como é demandado pela construção.

Existem vários métodos utilizados para melhorar a homogeneização dos NTC em matrizes cimentícias, entre eles se destaca a funcionalização que consiste em um processo

químico onde moléculas específicas são anexadas na superfície dos nanotubos de modo a facilitar a dispersão. Um exemplo é a adição de radicais carboxilas que, em meio alcalino, como de fato as pastas cimentícias costumam ser, pode melhorar a dispersão por conta da eletro-repulsão e ainda, segundo Batiston *et al* (2010) favorece a interação com C-S-H um dos principais produtos do cimento hidratado.

O ultrassom, Figura 6, é outra técnica muito eficiente para quebrar aglomerações de partículas, consiste na utilização de ondas ultra-sônicas que geram tensões de cisalhamento capazes de quebrar a força de ligação entre partículas dispostas em suspensão aquosa e não aquosa. Um surfactante é utilizado juntamente ao ultrassom para reduzir a tensão superficial, permitindo assim que o material se espalhe melhor pela amostra.

**FIGURA 6:** Aparelho de Ultrassom



**Fonte:** Ultrasonic Processor for Small and Medium Volume Application. Disponível em: [sonics.com/liquid-processing/product/vibra-cell-processors/vc-505-vc-750/](https://sonics.com/liquid-processing/product/vibra-cell-processors/vc-505-vc-750/). Acesso em: 22 out. 2020.

### 4.3 Efeitos negativos no material

Alguns efeitos indesejados podem ser observados em amostras de concreto após a adição de NTC à mistura. Inicialmente, a piora na consistência das amostras foi uma das características em comum entre todos os experimentos, como demonstrado por Marcondes (2012) houve uma redução considerável no abatimento, e essa redução está relacionado diretamente ao método de dispersão utilizado como mostra a tabela 3.

**TABELA 3:** Relação entre o abatimento e a técnica de dispersão

AMOSTRAS	REFERÊNCIA	AMOSTRA COM NTC		
		ULTRASSOM	SEM DISPERSÃO	LÍQUIDO COMPRADO JÁ DISPERSO
ABATIMENTO (cm)	20	18	7	3

Fonte: MARCONDES, 2012

Aumento na absorção de água por capilaridade é outro ponto negativo observado em amostras onde o NTC está presente. Esse fenômeno pode causar prejuízos tanto estético quanto funcional ao concreto. Uma possível justificado consiste na teoria de haver conversão de macro poros em micro poros capilares no concreto, assim como a uniformização desses micros poros sob a amostra de concreto.

Por fim, a profundidade na penetração do cloreto é um efeito negativo observado em amostras de concreto com NTC. Esse fato deve ser cuidadosamente estudado antes de se aplicar NTC em artigos cimentícios, visto que, geralmente, o cimento é associado ao aço, por conta de sua deficiência (baixa resistência a tração), e a passagem de íons de cloreto através do cobrimento de concreto é extremamente nocivo ao aço por conta da corrosão que diminui a seção transversal do material e, conseqüentemente, a resistência geral da peça. Marcondes (2012) através de seus experimentos, comprovou que amostras de concreto com NTC possuem considerável valor de cargas passantes de íons de cloreto, o pesquisador explica que esse fenômeno pode ser causado pela alta condutividade elétrica dos NTC.

### 4.4 Viabilidade econômica

Os custos envolvendo o melhoramento de materiais utilizando NTC ainda é muito elevado, justamente por conta do preço do NTC e do investimento necessário para que o material seja disperso adequadamente na pasta de cimento ou concreto. Esse fato inviabiliza sua utilização em massa mesmo considerando seus benefícios. Marcondes (2012) mostrou em



seu experimento que uma amostra de concreto com NTC previamente disperso em meio aquoso pode custar até 18 vezes o valor de um concreto convencional. O preço do NTC de parede simples altamente puro, no ano de 2005, variava de U\$60,00 a U\$200,00, sendo produzido nacionalmente por U\$30,00 pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em parceria com a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEB) (Oliveira, 2005)

#### **4.5 Cuidados na manipulação**

Com o aumento na produção e manipulação de nanomateriais, questões sobre o impacto destes na saúde humana e meio ambiente começaram a surgir, discussões sobre inflamações pulmonares ou até mesmo câncer foram levantadas. Muito pouco se sabe sobre os efeitos da nanotecnologia no organismo de seres vivos o que traz muito ceticismo na utilização dos nanomateriais. Essa desconfiança é impulsionada, principalmente, pela carência de estudos sobre o assunto (SAVOLAINEN, 2010).

Por conta de sua pequena dimensão os Nm podem ter facilidade em penetrar através da pele, podendo aumentar sua toxicidade, visto que, a reatividade do material é, em geral, maior que comparado a sua macro versão (P)

Os nanomateriais não são um grupo uniforme, possuindo dimensões e morfologias variadas, esse fato acrescenta grandes complicações aos estudos sobre a segurança de seu uso, exigindo metodologias preventivas variadas. Apenas de NTC existem cerca de 50.000 variedades diferentes, esse fato salienta a diversidade de técnicas existentes que resultam em diferentes nanomateriais que devem ser analisados individualmente quanto a nocividade (SCHULTER ET.AL, 2009).

Uma das principais preocupações está no fato de o Nm (nanomaterial) poder ter grande concentração em locais de trabalho, assim mantendo funcionários expostos a absorver o composto pelas vias aéreas, assim como a contaminação da água. Para Colvin (2003) é mais provável que os trabalhadores absorvam esse produto através da pele em decorrência do tato ou por ingestão oral, visto que, a maioria dos Nm são produzidos e processados em via aquosa. (SAVOLAINEN, 2010)

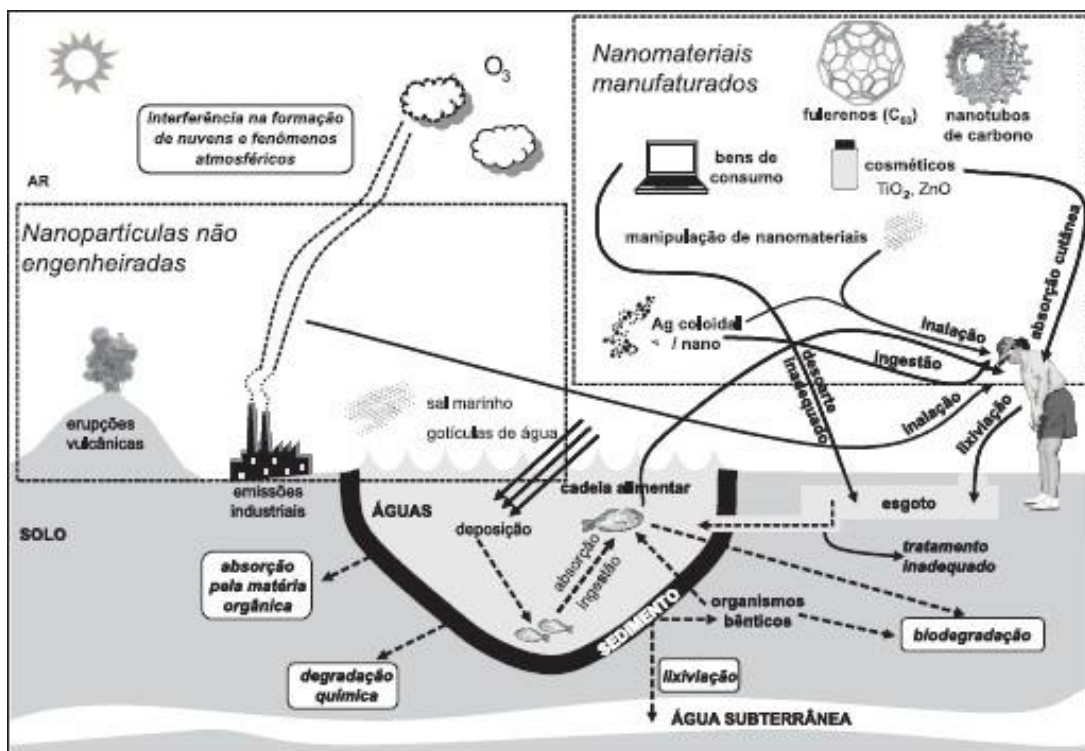
Os nanotubos de carbonos são muitas vezes produzidos como materiais de alta toxicidade. Ademais, Huczko e Lange (2014) demonstraram através de testes dermatológicos que o NTC não causa nenhum tipo de irritação a pele ou alergia e nenhuma precaução especial deve ser tomada ao manusear os NTCs. Apesar da conclusão, os pesquisadores salientam que é necessário mais dados, pois devido as suas características físicas, os NTCs supostamente, podem ter comportamentos semelhantes ao da amônia, o que pode ser prejudicial ao ser humano

(HUCZKO E LANGE, 2014). Paschoalino *et al* (2010) acrescenta que a toxicidade de Nm de carbono pode ter relação com produtos químicos que são adicionados em sua superfície, como carboxilas, para o alterar propriedades.

As principais rotas do Nm no meio ambiente são pela água, atmosfera, solo e sedimento. Estudos demonstram intoxicação em organismos aquáticos, como as daphnia Magna e E. coli por  $TiO_2$ , constatando a geração de radicais reativos quando o  $TiO_2$  é exposto a raio UV ou solar. Também foi observado impacto a comunidades microbacterianas quando adicionado pequenas quantidades de fulereno em seu eco sistema (PASCHOALINO ET AL, 2010)

A figura 7 demonstra um esquema ilustrativo das principais rotas, fontes e possíveis meios de intoxicação ambiental e humana por Nm.

**FIGURA 7:** Rotas do Nanomaterial no Meio Ambiente.



Fonte: Paschoalino *et al*, 2010.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos materiais revisados, é possível concluir que é necessário encontrar novos meios de aumentar a durabilidade e resistência de matrizes cimentícias. Foi observado que a adição de pequenas porções de NTC (0,3 a 0,5% do peso do cimento utilizado) pode aumentar significativamente a resistência da peça, além de melhorar a dispersão de cargas. Ademais, o NTC é um material difícil de trabalhar e pode exigir cuidados especiais para evitar contaminação, além de exigir métodos específicos para garantir a dispersão do mesmo na mistura da argamassa/concreto o que torna o valor final do compósito muito mais elevado que um material convencional sem NTC.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, S. M. *et al.* Microstructure and mechanical properties of a Metakaolinite-based geopolymer nanocomposite reinforced with carbon nanotubes. **Ceramics International**, v. 42, n. 14, p. 15171-15176, nov./2016.
- ALDRED, James. Burj Khalifa : a new high for highperformance concrete. **ICE**, Scotland, v. 163, n. 1, p. 66-73, mai./2010.
- ALVES, Oswaldo Luiz. Nanotecnologia, nanociência e nanomateriais: quando a distância entre presente e futuro não é apenas questão de tempo. **Parcerias Estratégicas**, Brasília-DF, v. 9, n. 18, p. 23-40, ago./2004.
- BANCO DE DADOS CBIC. **Produção Mensal de cimento - por UF, Grandes Regiões e Total Brasil**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>. Acesso em: 31 jul. 2020.
- BENELMEKKI, Maria. **Nanomaterials**: The original product of nanotechnology. 1.ed.Swansea UK: Morgan & Claypool Publishers, 2019. p. 1-2.
- CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos - Br: Edufscar, 2019. p. 21-22.
- COLEMAN, J. N. *et al.* Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. **Carbon**, v. 44, n. 9, p. 1624-1652, ago./2009.
- COLVIN, Vicki L. The potential environmental impact of engineered nanomaterials. **Nature Biotechnology**, USA, v. 21, n. 10, p. 1166-1170, out./2003.
- CURRIE, M. *et al.* Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete foundations. **Renewable Energy**, Reino Unido, v. 83, p. 1131-1138, mai./2015.
- FILHO, A. G. D. S; FAGAN, Solange Binotto. Funcionalização de Nanotubos de Carbono. **Quim. Nova**, Brasil, v. 30, n. 7, p. 1695-1697, set./2007.
- GOPALAKRISHNAN, K. *et al.* **Nanotechnology in Civil Infrastructure**: A Paradigm Shift. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2011. p. 1-5.
- HUCZKO, A; LANGE, H. CARBON NANOTUBES: EXPERIMENTAL EVIDENCE FOR A NULL RISK OF SKIN IRRITATION AND ALLERGY. **Fullerene Science and Technology**, v. 9, n. 2, p. 247-250, mai./2001.
- IJIMA, Sumio. Helical microtubules of graphitic carbon. **NATURE**, Ibaraki , v. 354, n. 1, p. 56-58, nov./1991.
- JAUROS, I. *et al.* Produção de Nanotubos de Carbono Via Técnica de Deposição Química de Vapor. **Disciplinarum Scientia**, v. 12, n. 1, p. 125-137, 2011.

LI, Geng Ying; WANG, Pei Ming; ZHAO, Xiaohua. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Elsevier, BRR**, v. 43, n. 6, p. 1239-1245, mai./2005.

LUZ, G. D. *et al.* Effect of pristine and functionalized carbon nanotubes on microstructural, rheological, and mechanical behaviors of metakaolin-based geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, Florianópolis, SC, Brazil, v. 104, p. 1-7, mai./2019.

MACHADO, I. R. L. *et al.* Nanotubos de carbono: potencial de uso em medicina veterinária. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 10, p. 1823-1829, out./2014.

MARCONDES, C. G. N. *et al.* Adição de Nanotubos de Carbono em Concreto de Cimento Portland: Absorção, Permeabilidade, Penetração de Cloreto e Propriedades Mecânicas. **ALCONPAT**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 96-113, abr./2012.

MELO, C. P. D; PIMENTA, Marcos. Nanociência e nanotecnologia . **Parcerias estratégicas**, Brasília - DF, v. 9, n. 18, p. 9-21, ago./2004.

MELO, V. S. *et al.* DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND CONTENDO NANOTUBOS DE CARBONO E ADITIVO DE MELAMINA. **Construindo** , Belo Horizonte, v. 3, n. 2, p. 21-26, dez./2011.

OLIVEIRA, Marcos De. Nanotubos no mercado. **Pesquisa**, v. 1, n. 118, p. 62-67, dez./2005. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/nanotubos-no-mercado/>. Acesso em: 11 out. 2020.

S.KARTHIKEYAN; MAHALINGAM, P.; KARTHIK, M.. Large Scale Synthesis of Carbon Nanotubes. **Journal of Chemistry**, v. 6, n. 1, p. 1-12, jan./2009.

SABIHUDDIN, Syed. Application of Nanotechnology in Civil Infrastructure. **Int. Journal of Engineering Research and Applications**, Badnera Amravati, v. 4, n. 3, p. 92-95, mar./2014.

SAHOO, N. G. *et al.* Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. **Progress in Polymer Science**, v. 35, n. 7, p. 837-867, jul./2010.

SAVOLAINENA, K. *et al.* Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies: A review. **Elsevier**, Finlândia, v. 269, n. 2, p. 92-104, jan./2010.

TOMKELSKI, Mauri Luís; SCREMIN, Greice; FAGAN, Solange Binotto. Ensino de Nanociência e Nanotecnologia: perspectivas manifestadas por professores da educação básica e superior. **Ciência e Educação**, Bauru, v. 25, n. 3, p. 665-683, jan./2019.

TRINDADE, J. F. E. NANOTUBOS DE CARBONO: PROPRIEDADES E FUNCIONALIZAÇÃO. **Egitania Scientia**, Coimbra, v. 9, n. 11, p. 9-11, nov./2011.

WONG, Eric W.; SHEEHAN, Paul E.; LIEBER, Charles M.. Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes. **Science** , v. 277, n. 5334, p. 1971-1975, set./1997.