



Piezeletricidade e seu uso em monitoramento de estruturas

Daniel de Andrade Souza, Leidy Espinosa, Wandressa Giusti

*Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2,
no. 83 Edifício Engenharia Civil, São Paulo, SP–Brasil*

Resumo

Tradicionalmente, o monitoramento de pontes e grandes estruturas de concreto, é realizada com o posicionamento de transdutores ou strain-gages em seções críticas das armaduras, como no encontro de pilares com lajes e vigas. Essa técnica de monitoramento é por muitas vezes ineficiente, por garantir medidas de deformações pontuais, não representativas da deformação global das peças aferidas. Nesse sentido, para garantir o atendimento das condições de serviço e avaliar eventuais necessidades de retrofit em pontes e viadutos, faz-se necessário o desenvolvimento de sensores que permitam avaliar a deformação global e o desenvolvimento do processo de microfissuração em diferentes seções. Os nanotubos de carbono, devido a sua alta piezeletricidade, surgem como uma alternativa, podendo ser incorporados em diferentes tipos de matrizes, consequentemente gerando compósitos auto sensitivos, capazes de identificar desde microdanos localizados até fraturas bem desenvolvidas, ao longo da vida útil da estrutura, possibilitando a adequada predição e otimização de intervenções necessárias para prolongar sua vida útil. Nesse contexto, o presente trabalho consiste em uma revisão das propriedades dos nanotubos de carbono e sua aplicabilidade no monitoramento de estruturas, destacando diferentes experiências bem-sucedidas.

Palavras chaves: piezeletricidade, nanotubos de carbon, monitoramento de estruturas.

Abstract

Bridge structural health monitoring (SHM) is usually done by positioning strain-gages on critical rebar sections, such as beam-column intersections. Nonetheless, this technique is often deficient to guarantee the safety of the structure as it is based on single-point strains that are not representative of the structure overall deformation. In that way, to guarantee the fulfillment of the service conditions and to evaluate eventual retrofiting need in bridges and viaducts, it is necessary to develop sensors that are able to evaluate the global deformation and the microcracking process in different sections of the structure. Due to their high piezoelectricity, carbon nanotubes became an attractive alternative. They can be incorporated in different types of matrix, generating as a result auto-sensitive composites, capable of identifying a large range of deformations from localized micro-damages to well-developed fractures, throughout the service life of the structure, allowing proper prediction and optimization of interventions necessary to extend its service life. In this context, the present work consists of a review of the properties of carbon nanotubes and their applicability in the monitoring of structures, highlighting different successful experiments.

Keywords: piezoelectricity, carbon nanotubes, structural health monitoring.



1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das novas tecnologias e aperfeiçoamento das técnicas, o campo dos nanomateriais vem ganhando grande destaque, devido a possibilidade de otimização de propriedades mecânica, óticas, térmicas e elétricas à partir do aprimoramento da microestrutura de materiais convencionais [1].

Nesse sentido, a engenharia vem aproveitando esses materiais para criar nanocompósitos na busca de melhorar o comportamento a nível macro dos materiais usados na construção a partir da microestrutura. Na engenharia civil os nanocompósitos estão sendo utilizados em mistura de concreto, objetivando uma melhoria na sua resposta mecânica a esforços de tração e compressão e na redução da porosidade e conseqüentemente na sua absorção de água [2]. Nessa área, os nanotubos de carbono (CNTs) estão sendo estudados como modificadores devido a suas propriedades e o impacto que tem no comportamento do material. Os CNTs são dissolvidos e dispersos em matrizes poliméricas ou cimentícias, a melhoria das propriedades físicas e mecânicas depende da homogeneidade de dispersão do material na matriz, a qual é garantida devido a suas dimensões nanométricas e elevada área superficial com a adição de aditivos surfactantes e sonificação [2].

Paralelamente, as propriedades elétricas dos CNTs aumentam seu potencial no campo de monitoramento de estruturas de concreto [3, 4, 5, 6] mediante a utilização de filmes de nanotubos ou nanocompósitos para o monitoramento das deformações na estrutura. Devido as características piezelétricas do CNTs [3, 4, 5, 6], o material se comporta como *auto-sensitivo*, ou seja, percebe sua própria deformação ao gerar sinais elétricos que podem ser detectados e que permitem dar oportuna manutenção a estrutura e assim, prolongar sua vida útil.

Dessa maneira, o presente artigo visa apresentar de maneira sucinta uma revisão da potencialidade de aplicação de materiais piezoelétricos, especificamente CNTs no monitoramento de estruturas, explicitando aspectos relativos à instrumentação laboratorial e aplicação em campo.



2. PIEZOELETRICIDADE – MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

A piezoelectricidade é uma propriedade comum a materiais cerâmicos e alguns poliméricos, sua manifestação ocorre através da condução de eletricidade, transmitida quando o material é submetido a uma pressão. Ao ser aplicado uma força externa, é criado um campo elétrico, gerado pela alteração da configuração eletrônica do material (i.e. polarização elétrica) a reversão do tipo de esforço aplicado, de tração para compressão por exemplo, gera uma mudança na direção do campo [7].

A Figura 1 apresenta o processo de polarização elétrica, especificando como a aplicação de tensão ao material, induz a polarização elétrica pelo alinhamento dos dipolos em uma direção comum, originando um campo elétrico orientado nessa mesma direção [7].

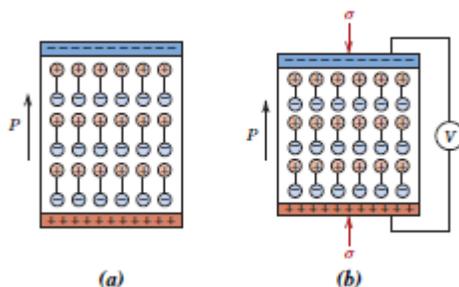


Figura 1. (a) Dipolos no interior de um material piezoelétrico. (b) Quando o material é submetido a uma tensão de compressão, é gerada uma voltagem. Fonte: Callister (2005)

Materiais piezoelétricos são caracterizados pela sua estrutura cristalina complexa, com um baixo grau de simetria, a microestrutura de alguns materiais cerâmicos e polímeros favorecem essa propriedade, que pode ser melhorada durante o processamento do material [7]. Alguns dos materiais piezoelétricos mais comuns são os titanatos de bário e chumbo, o zirconato de chumbo e o quartzo, usados em transdutores, dispositivos que convertem energia elétrica em deformações mecânicas, ou vice-versa, aplicados em sonares, microfones, alto-falantes, alarmes sonoros, dentro outros dispositivos.

Tradicionalmente, esses materiais foram utilizados para a avaliação não-destrutiva de estruturas, destacando-se os strain-gages que possuem o mesmo princípio de funcionamento dos CNTs, diferindo principalmente quanto ao *gauge factor*, que representa a variação na resistência elétrica do material piezoelétrico com sua deformação, ou seja representa a



sensibilidade do material, enquanto os strain-gages tradicionais são capazes de capturar pequenos intervalos de deformação em geral em torno de 5% [8], os CNTs são capazes de detectar desde pressões e deformações à níveis tácteis (<10 KPa) até elevadas tensões em estruturas de concreto [9].

2.1 NANOTUBOS DE CARNOBO

Os CNTs são formas alótropas de carbono ligadas entre si, por ligações covalentes. A estrutura do nanotubo consiste em uma única lâmina de grafita, enrolada na forma de tubo e com ambas extremidades fechadas com hemisférios de fulerenos (C60) [7]. O cilindro tem aproximadamente 3 nanômetros de diâmetro por 1000 nanômetros de comprimento. Na Figura 2 está representada a estrutura destes nanotubos. Marcondes [10] reconhece que a ligação dos átomos de carbono para a formação dos nanotubos é responsável pelas características do material, podendo ser classificados como nanotubos de uma parede (SWNT), formados por uma única lâmina de grafeno ou como nanotubos de parede múltiplas (MWNT), formado por uma série de camadas concêntricas. A geometria dos CNTs influenciam no seu comportamento, sendo esse determinado pelo diâmetro do tubo e pela forma como os hexágonos de átomos se orientam no plano de grafeno (isto é, nas paredes do tubo) em relação ao eixo do tubo. O CNTs pode comportar-se eletricamente como um metal ou como um semicondutor, isto está relacionado com o afastamento entre um nanotubo e outro, esse distanciamento afeta a resistividade do material.

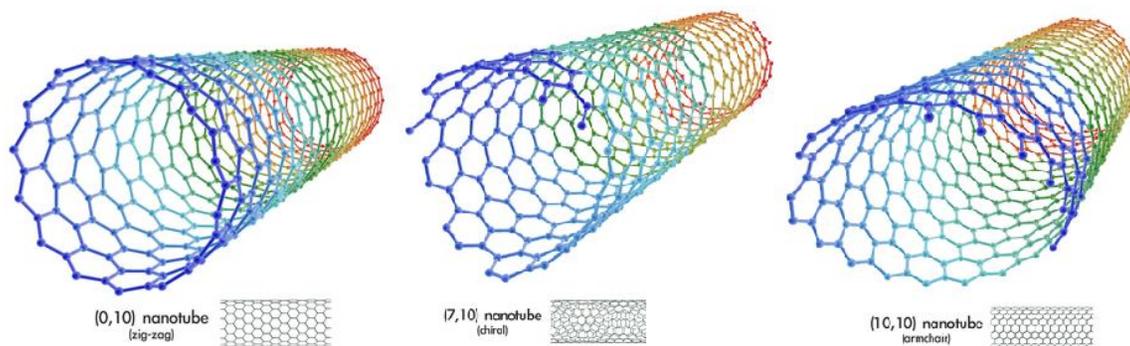


Figura 2. Estrutura de nanotubos de carbono[11].



A disposição dos átomos na nanoestrutura garante propriedades mecânicas excepcionais aos CNTs, resistindo a tensões elevadas, sustentam altos níveis de deformação elástica e possuem elevada rigidez elástica, cerca de 1 TPa [4, 9, 10, 12]. Paralelamente também possuem propriedades térmicas e elétricas bastante significativas, sendo estáveis termicamente a 750°C, ainda apresentam condutividade térmica duas vezes superior ao diamante e condutividade elétrica 1000 vezes superior ao cobre [12].

Essas propriedades garantem uma ampla gama de futuras aplicações aos CNTs, dentre elas a alta condutividade e a piezoelectricidade possibilita uma alta aderência desse material a soluções arrojadas para o monitoramento de estruturas, mesmo com a progressão das fissuras e início do processo de fratura. O tunelamento elétrico garante o fluxo contínuo de elétrons entre os nanotubos, devido a sua alta condutividade em relação aos diferentes tipos de matrizes, como exposto na Figura 3.

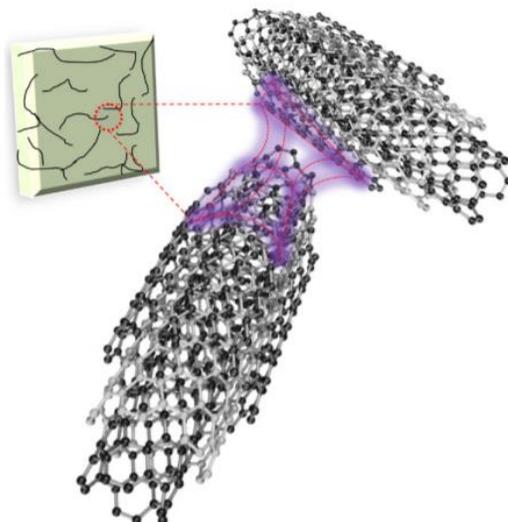


Figura 3. Tunelamento Elétrico entre dois nanotubos dispersos em um compósito [9].

3. APLICAÇÃO: NANOTUBOS DE CARBONO EM MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Diversas técnicas vêm sendo estudadas na literatura para garantir a boa dispersão dos CNTs na zona de interesse. A incorporação como filler em matrizes cimentícias se mostrou



inviável devido à alta área superficial e tendência de aglomeração desse material. Assim, com a progressão dos estudos duas técnicas se mostraram viáveis: o tratamento de polímeros com CNTs, permitindo a criação de filmes para o tratamento de superfícies e a incorporação de CNTs em soluções com uso de aditivos químicos e misturadores de alta potência e sonificação [13], sendo incorporado a mistura na pasta de cimento, proporcionando a avaliação de deformações no volume da peça.

Como mencionado, a alta sensibilidade dos CNTs e a capacidade de identificar deformações desde pressões tácteis até tensões em grandes estruturas como pontes ou barragens, garante um amplo campo de aplicações para os nanotubos, podendo ser utilizados em aplicações biológicas, na engenharia civil e em aplicações de engenharia aeronáutica.

Ubertini *et al.* [14] otimizou a técnica de dispersão de CNTs proposto por Coppola *et al.* [4] em matrizes cimentícias, como demonstrado na Figura 4, conseguindo avaliar a frequência natural de uma viga de concreto moldada com CNTs dispersos na pasta.

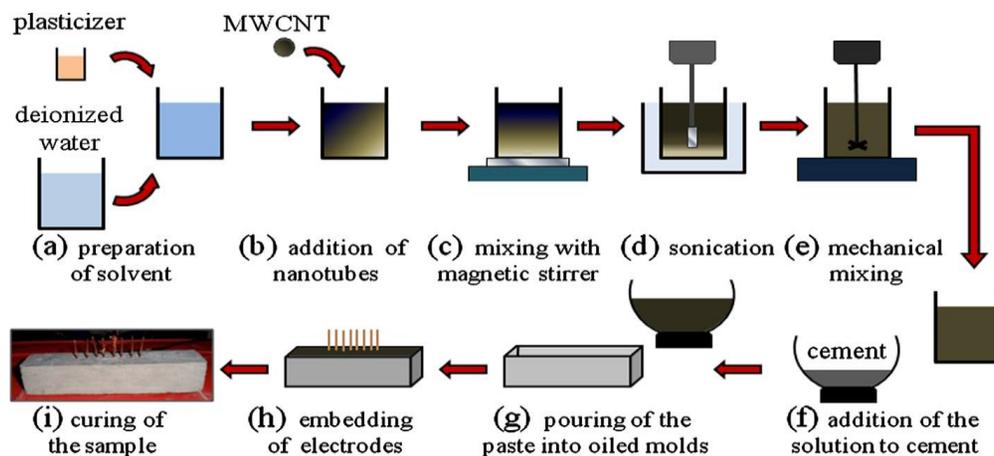


Figura 4. Dispersão dos Nanotubos na produção de concreto [13].

Apesar do grande avanço na dispersão de nanotubos em matrizes cimentícias, atualmente o principal campo de investigação desses materiais, refere-se ao monitoramento de estruturas próximas ao fim de vida útil. Nesse sentido, pesquisadores da Universidade de Delaware geraram grandes contribuições à área como parte de uma série de campanhas experimentais inseridas no escopo de um projeto de reabilitação de pontes no estado [15].



Dentre as pesquisas desenvolvidas, destaca-se a utilização de resinas de epóxi e CNT no monitoramento de esforços de flexão em vigas de concreto e monitoramento na resistências à fadiga de estruturas metálicas [15]. Foram avaliadas uma série de pontes, dentre elas a ponte DelDOT 1678-006, construída na década de 1960, nela foram encontradas diversas fissuras por fadiga nas transversinas na região próxima aos apoios como demonstrado na Figura 5.



Figura 5. a) Ponte DelDOT 1678-006. b) Fissuração por fadiga na região próxima aos apoios. c) Furos para impedir a progressão das fissuras [15].

Tradicionalmente quando esse tipo da patologia é identificada em peças metálicas são executados furos com diâmetro de 28.6 mm para impedir a propagação das fissuras, como exposto na Figura 5c. No entanto essa técnica não possui grande eficácia, visto que na mesma região da ponte foi necessário a execução de furos em 2011 e em 2013. Nesse sentido, pesquisadores da universidade de Delaware avaliaram em laboratório, o uso de resina resina Epóxi/CNT (ISS) para o monitoramento de fadiga como a reabilitação de estruturas que sofrem com esse tipo de deformação. Diferentes peças metálicas foram instrumentadas e observou-se que o uso do ISS levou a um aumento de cerca de 550% em relação a solução tradicional, como demonstrado na Figura 6.

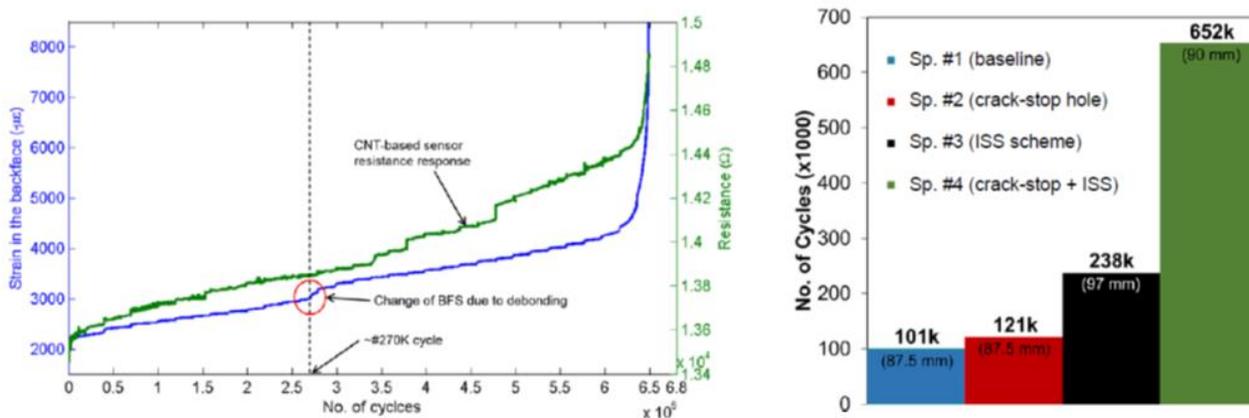


Figura 6. a) Diferença de sensibilidade da resina CNT/epoxi (ISS) e do clip-gage. b) Aumento na resistência à fadiga de peças metálicas com uso da resina (ISS) [15].

No escopo do mesmo projeto também foi verificado, o uso da resina Epóxi/CNT para o monitoramento de esforços de flexões em de concreto. As vigas receberam um tratamento com o uso da resina, em uma tela de fibras de vidro fixada a face inferior da viga, como mostrado na Figura 7, sendo verificado a maior sensibilidade desse arranjo comparando-se ao uso de strain-gages convencionais.



Figura 7. Preparação da superfície da viga com a aplicação de tela de fibra de vidro, tratada com a resina de epóxi/CNT [13].

Na Figura 8 apresentam-se os resultados do monitoramento das cargas, deflexão da viga (flecha), deformações medidas com os strain-gages e o sinal elétrico medido com a resina epóxi/CNTs. Foi possível verificar novamente que os CNTs são mais confiáveis e sensíveis que os strain-gages, identificados pelo menor nível de ruído (*signal to noise ratio*), o que indica que se o monitoramento da mesma área fosse realizado utilizando apenas strain-



gages, seriam gerados altos níveis de ruídos, sendo necessário o uso de programas altamente sofisticados para eliminar a maior dispersão dos sinais causados pelos strain-gages; e em casos extremos gerando sinais não-representativos da deformação em grandes estruturas.

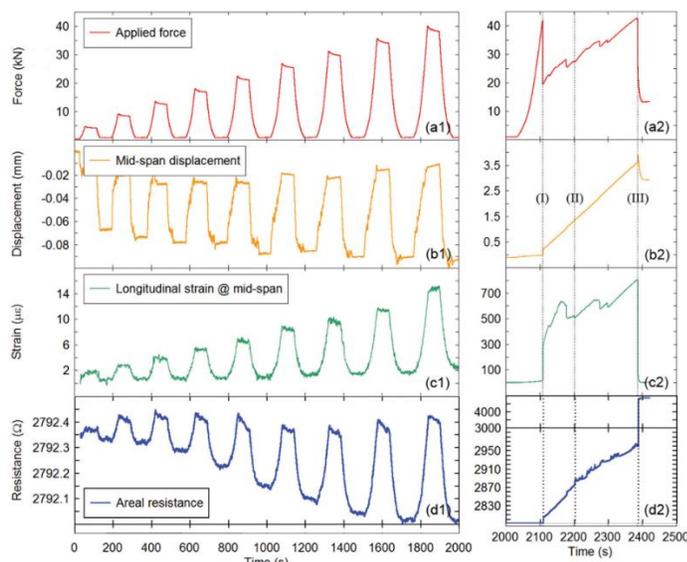


Figura 8. Dados coletados durante o experimento [13].

A Figura 8 indica que após o rompimento da peça (a partir de 2000 segundos), as medidas do strain-gage diferem totalmente da deflexão da viga, o que indica a perda de aderência do sensor, enquanto que os nanotubos por se caracterizarem como um sensor disposto em toda face inferior da viga, continuam a apresentar medições confiáveis e coerentes com a flecha da viga.

4. CONCLUSÕES

O comportamento dos nanotubos de carbono apresentado nesse trabalho baseado na revisão das referências, mostrou que é possível sua utilização no monitoramento de construções civis, porém as técnicas de dispersão e aplicação precisam ser aprimoradas para aproveitar o potencial do material. Contudo, o material apresenta características que beneficiam sua aplicação:

- Avaliação auto-sensitiva no volume da peça ou em uma grande área, contrapõe-se aos strain gages (medição pontual);



- Maior estabilidade das medições (menor nível de ruído à campos eletromagnéticos);
- Podem ser aplicados a estruturas pré-existentes, com geometria complexa, em reabilitação;
- Podem ser adicionados à matriz cimentícia, durante sua produção - Devido a suas dimensões nanométricas, os nanotubos de carbono apresentam elevada área superficial, sua aplicação tem sido um desafio, devido a forma como é produzido, pode gerar aglomerados e não ficar totalmente disperso na mistura, causando distorções na leitura do sensor;
- Utilização em armaduras ou cabos de protensão – identificação de áreas que apresentam corrosão e maior confiabilidade na detecção de microdanos - Facilitando sua localização, colaborando para manutenção e vida útil da estrutura;
- Nanotubos de carbono estão sendo muito explorados por pesquisadores devido a serem materiais funcionais e inteligentes, por sua capacidade de apresentar propriedades diferenciadas como, resistência mecânica, eletroquímica, piezoresistividade e outras propriedades físicas (condutividade elétrica e térmica).

5. REFERÊNCIAS

1. SIMON SANCHEZ, P. Self-sensing features of fiber reinforced composites - Analysis by means of carbon nanotubes. Master Thesis – Politecnico di Milano, Lecco, 2018.
2. MARCONDES, C. G. N.; MEDEIROS, M. H. F.; MARQUES FILHO, J. y HELENE, P. Nanotubos de carbono em concreto de cimento portland: Influência da dispersão nas propriedades mecânicas e na absorção de água. Revista ALCONPAT, volume 5 n. 2, p. 97-114. 2015.
3. RANA, S; SUBRAMANI, P.; FANGUEIRO, R. AND GOME, A. A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. AIMS Materials Science, 3(2), pp. 357-379. 2016.



4. COPPOLA, L.; BUOSO, A.; CORAZZA, F. Electrical Properties of Carbon Nanotubes Cement Composites for Monitoring Stress Conditions in Concrete Structures. *Applied Mechanics and Materials*. 2011.
5. VIDIVELLI, B. ASHWINI, B. A study on carbon nanotube (cnt) in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 05, 2018.
6. WEN, S.; Chung, D.D.L. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. *Carbon*, 45. Pp. 710–716. 2007.
7. CALLISTER, Jr. W.D. *Fundamentos da Ciência de Materiais: Uma abordagem integrada. Livros técnicos e científicos*. Rio de Janeiro, 2005. 2ª Edição.
8. ABOT, J. L.; ANIKE, J. C. Structural health monitoring using carbon nanotube fibers. *Nanotube Superfiber Materials (Second Edition), Science, Manufacturing, Commercialization Micro and Nano Technologies*. p.219-238. 2019
9. DOSHI, S. M.; THOSTENSON, E. T. Thin and Flexible Carbon Nanotube-Based Pressure Sensors with Ultrawide Sensing Range. *ACS Sens.*, 2018, 3 (7), pp 1276–1282. DOI: 10.1021/acssensors.8b00378
10. MARCONDES, C. G N. Adição de nanotubos de carbono em concretos de Cimento portland – absorção, permeabilidade, Penetração de cloretos e propriedades mecânicas. 2012 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Curitiba, Paraná 2012.
11. MOHAMED, H. A. Carbon Nanotubes. Department Physics, Education Faculty for pure Science. Kirkuk University. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Hussen_Mohammed/publication/329529317_Carbon_Nanotube/links/5c0e44a1299bf139c74dd563/Carbon-Nanotube?origin=publication_detail
12. LAU, K.T.; HUI, D. The revolutionary creation of new advanced materials – carbon nanotube composites. *Composites: part B* 33 (2002) 263 – 277.
13. SCHUMACHER, T.; THOSTENSON, E. T. Development of structural carbon nanotube–based sensing composites for concrete structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol 25, Issue 11, 2014.



14. UBERTINI, F.; MATERAZZI A. L.; D’ALESSANDRO, A.; LAFLAMME, S. Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nanotube cement-based sensors. *Engineering Structures* 60 (2014) 265–275.
15. WYNN, J.; AHMED, S.; SCHUMACHER, T.; MCCONNELL, J.; THOSTENSON, E. *Holistic Rehabilitation of Fatigue-Cracks in Steel Bridge Members Using Carbon Nanotube-Based Composites: A Feasibility Study*. Delaware Center for Transportation. University of Delaware, 2016.