

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GLEYSON DO NASCIMENTO OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DE FIOS DE NANOTUBOS DE CARBONO COMO
ELEMENTOS DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE
ESTRUTURAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

GLEYSON DO NASCIMENTO OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DE FIOS DE NANOTUBOS DE CARBONO COMO
ELEMENTOS DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE
ESTRUTURAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Bravo Fereda

Cornélio Procópio

2016



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gleyson do Nascimento Oliveira

Utilização de fios de Nanotubos de Carbono como elementos de Monitoramento da Integridade de Estruturas em materiais compósitos

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:50hs do dia 17/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Fereda - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Celso Naves de Souza - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Romeu Rony Cavalcante da Costa - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família e meus amigos de Presidente Prudente por todo o apoio dado durante a graduação, desde os momentos mais difíceis e até momentos de conquistas.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador neste trabalho, prof. Dr. Amauri Bravo Ferneda pelos conselhos e ensinamentos dados tanto nas aulas como neste trabalho e até mesmo para minha carreira futura.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos do Paraná que enfrentaram o curso ao meu lado sempre dando força um ao outro.

Agradeço também ao meu orientador da pesquisa de verão, prof. Dr. Jandro L. Abot por ter me dado à oportunidade de realizar a pesquisa dentro de seu laboratório sobre a sua supervisão e orientação durante o período da pesquisa e mesmo após esse período. E também gostaria de agradecer a todos do Laboratório de Materiais Inteligentes na *The University Catholic of America* por todo o apoio dado nessa pesquisa.

Agradeço a minha orientadora na *The University of Alabama in Huntsville*, a senhora Anita Rathz por toda a preocupação e suporte com a adaptação de todos durante o tempo que estávamos nessa universidade. E todos os meus amigos do Alabama, que sem dúvidas, fizeram a experiência do intercambio muito mais divertida e proveitosa.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro dado durante o programa Ciência Sem Fronteiras na qual essa pesquisa foi realizada.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank my Family and friends from Presidente Prudente for all the support that they gave me during my undergraduate studies, from the hardest moments to the greatest.

I would also like to thank my advisor in this final paper, Dr. Amauri Bravo Ferneda for all his advices in the classes that I took with him, for this paper and in my future career. It sure helped me a lot.

I would like to thank my friends in Parana that were by my side facing the same problems along the course and cheering each other up along the way.

I would like to thank my advisor in my summer research program, Dr. Jandro L. Abot for giving me the opportunity to work in his laboratory and for all his guidance and advices on the project and even after the project. I would also like to thank to everybody that worked at the Intelligent Materials Laboratory at The Catholic University of America and was involved in this research project for all support and help that they gave us.

I would like to express my gratitude to my advisor at The University of Alabama in Huntsville, Ms. Anita Rathz for all the support she gave us when we moved there and throughout the whole time we were there, and also to all the friends that I made in Alabama that made the whole experience a lot more fun and enjoyable.

I would like to thank CAPES for the sponsorship during the Science Without Borders that allowed me to work on this project.

RESUMO

OLIVEIRA, Gleyson Do N. Utilização de fios de Nanotubos de Carbono como elementos de Monitoramento da Integridade de Estruturas em materiais compósitos. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Devido à necessidade de se desenvolver materiais mais resistentes e mais leves surgiram os materiais compósitos, que são aplicados em diversas áreas da engenharia como, por exemplo, aeronáutica, mecânica, naval, civil entre outras. Porém esses materiais são sujeitos a falhas catastróficas devido a suas propriedades interlaminares, sendo assim, alguns métodos de monitoramento da integridade de estruturas tem sido desenvolvidos. Este trabalho abordará um desses métodos, onde serão utilizados Nanotubos de Carbono para localizar e identificar falhas no interior do material. Os Nanotubos de Carbono foram escolhidos devido a suas propriedades piezoresistivas. A avaliação desta estrutura será feita a partir de um ensaio de flexão de três pontos, onde se avaliará as mudanças nas resistências elétricas dos Nanotubos de Carbono.

Palavras-chave: Compósitos, Nanotubos de Carbono, piezoresistividade, sensores de falha.

Abstract

OLIVEIRA, Gleyson Do N. Carbon Nanotubes yarns used as Structural Health Monitoring sensors in composite materials. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

The composites materials were created due to the need of lighter and stiffer materials. These kinds of materials have a large range of applications in engineering such as aerospace, civil, mechanical and others. However these materials can fail and collapse the whole structure due to its interlaminar properties. In order to predict and monitor the properties of a structure, a method called Structural Health Monitoring (SHM) has been created and studied. In this paper, one method of SHM will be used, which will use Carbon Nanotubes yarns to identify and locate failures within the structure. The Carbon Nanotubes yarns have a piezoresistive property which makes them very interesting to this kind of study. The composite sample will be tested using a Three Point Bending test and the change in the electrical resistivity of Carbon Nanotube yarns will be evaluated during the test.

Keywords: Composites, Carbon Nanotubes, piezoresistivity, Structural Health Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas Tensão x deformação.	4
Figura 2 - Representação do diagrama da classificação dos materiais compósitos.	6
Figura 3 - Representação das orientações das fibras em um material de reforço.	7
Figura 4 - Representação de um compósito assimétrico com as fibras em diferentes orientações.	8
Figura 5 – Representação do processo de empilhamento manual.	11
Figura 6 - Representação do processo de fabricação por spray.	11
Figura 7 - Representação do processo de moldagem por bolsas de vácuo.	12
Figura 8 - Representação das formas de enrolamentos filamental.	13
Figura 9 - Representação do processo de Pultrusão de materiais compósitos.	13
Figura 10 – Representação dos mecanismos de falha em compósitos.	14
Figura 11 - Representação dos materiais utilizados na construção do Boeing 787.	16
Figura 12 - Representação das paredes em um NTC.	17
Figura 13 - Fio de NTC visto a partir de um microscópio eletrônico de varredura.	19
Figura 14 - Representação esquemática do processo de descarga por arco elétrico.	20
Figura 15 - Representação do processo de ablação por Laser.	20
Figura 16 - Representação do processo de Deposição química a vapor.	21
Figura 17 – Bobina de NTC com aproximadamente 10 m.	21
Figura 18 - Tipos de Ensaio de Flexão.	24
Figura 19 - Representação da malha de fibra de vidro sendo cortada na medida da amostra. .	26
Figura 20 - Representação da configuração da camada central do compósito.	27
Figura 21 - Camada central do compósito.	28
Figura 22 - Resina Epóxi de duas partes utilizada.	29
Figura 23 - Plataforma de pressão utilizada na cura do compósito já preparada.	30
Figura 24 - Equipamentos Utilizados no teste.	32
Figura 25 - Amostra posicionada e pronta para o teste.	33
Figura 26 - Representação da variação da resistência dos NTCs durante o teste.	35
Figura 27 - Adaptação da representação dos sensores na amostra de compósito com as cores do Gráfico.	35

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	3
2.1.1 Definição do material compósito.....	3
2.1.2 Classificação Dos Materiais Compósitos.....	5
2.1.3 Materiais De Reforço	6
2.1.4 Matrizes.....	9
2.1.5 Métodos De Fabricação De Materiais Compósitos.....	10
2.1.6 Principais falhas em Materiais Compósitos.....	13
2.1.7 Aplicações De Materiais Compósitos.....	15
2.2 FIOS DE NANOTUBOS DE CARBONO.....	17
2.2.1 Nanotubos De Carbono.....	17
2.2.2 Propriedades Dos Nanotubos De Carbono.....	17
2.2.3 Processo De Fabricação Dos Nanotubos De Carbono.....	19
2.3 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURA.....	22
2.4 ENSAIO DE FLEXÃO TRÊS PONTOS.....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 NORMAS UTILIZADAS	25
3.2 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DA AMOSTRA.....	25
3.3 PREPARAÇÃO E TESTE DA AMOSTRA.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38
Referências	39
ANEXO A.....	43

1 INTRODUÇÃO

O estudo de materiais compósitos pode não ser uma tarefa muito fácil, sendo assim, prever seu comportamento em diversas aplicações e durante seu tempo de uso se torna trabalhoso. Alguns estudos nessa área têm sido desenvolvidos em diversas partes do mundo por pesquisadores das mais diversas áreas. Uma forma de monitorar o comportamento desses materiais será estudada nesse trabalho, através de sensores que serão integrados ao laminado de compósito criado.

Dentre os possíveis sensores existentes para a realização do Monitoramento de Integridade Estrutural, neste trabalho foram escolhidos os sensores de fios de Nanotubos de Carbono integrados a estrutura do material escolhido para o ensaio. Os Nanotubos de Carbono permitem detectar qualquer dano na estrutura do material integrado através da sua propriedade piezoresistiva.

No presente trabalho, um laminado de compósito de fibra de vidro será construído e integrado com alguns sensores de fios de Nanotubos de Carbono e esta amostra será submetida a um teste de flexão para verificar a funcionalidade dos sensores.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo, monitorar falhas no interior de uma amostra pequena de material compósito, para assim poder estudar a viabilidade em partes e peças maiores. O grande objetivo do estudo do monitoramento da integridade de estruturas de compósito é poder prever falhas catastróficas através falhas menores.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Realizar um estudo sobre os materiais compósitos, seus constituintes, características, métodos de fabricação e aplicações.

- Realizar estudo sobre os Nanotubos de Carbono e entender como suas propriedades podem ser aplicadas como sensores de falhas em diversas áreas da engenharia.
- Construir e testar uma amostra de compósito integrada com Nanotubos de carbono para analisar o comportamento destes como sensores de falha.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Diante da necessidade constante do desenvolvimento de materiais com melhores performances e propriedades mais adequadas para cada uso, muito materiais tem sido criados e estudados.

Um dos tipos de material que está em bastante evidência atualmente, são os materiais compósitos que apresentam grandes vantagens sobre outros materiais em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, nas áreas aeronáutica e aeroespacial.

2.1.1 Definição do material compósito

Segundo o dicionário Michaelis (2015), a palavra “compósito” significa algo composto de vários elementos distintos, sendo assim, Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 1), definem que um material contendo dois ou mais constituintes ou fases distintas podem ser considerados materiais compósitos. Os autores ainda afirmam que apesar de materiais metálicos e materiais plásticos (poliméricos) também possuírem mais de um constituinte, como por exemplo, impurezas, aditivos entre outros, estes não são considerados materiais compósitos devido a estes constituintes não alterarem tão significativamente as propriedades do material.

Ainda segundo Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 2), materiais compósitos são compostos de uma ou mais fases descontínuas juntamente com uma fase contínua, onde a fase descontínua se apresenta com uma dureza e resistência maior que a fase contínua. A fase descontínua do material compósito recebe o nome de material de reforço e a fase contínua é chamada de matriz. A figura 1 mostra a curva tensão versus deformação típica dos materiais das fibras e matrizes.

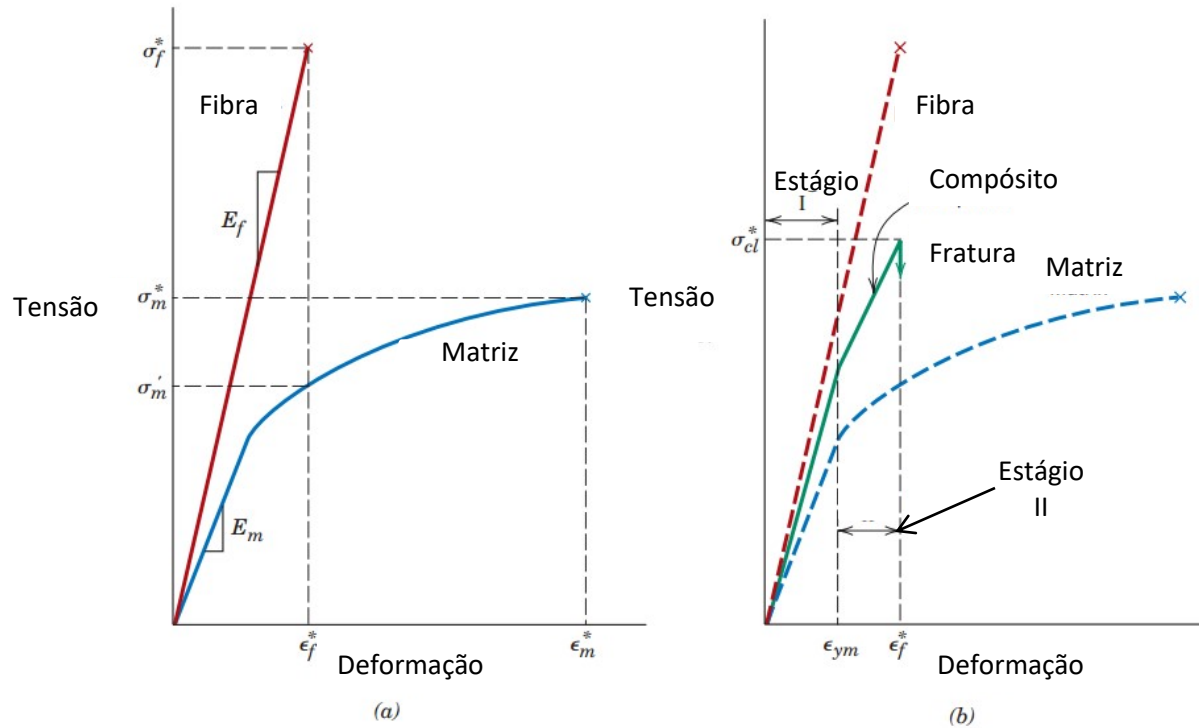


Figura 1 - Curvas Tensão x deformação. (a) Típica curva de tensão x deformação dos materiais utilizados como fibras (comportamento frágil) e matrizes (comportamento dúctil). (b) Curva tensão x deformação de materiais compósitos.

Fonte: Callister Jr. (2007, p. 587)

A combinação de materiais de reforço (fibras ou partículas) e matriz para a formação de um compósito resulta em um material que possui propriedades especiais que não são encontradas em nenhum dos seus constituintes isoladamente. (LEVY NETO e PARDINI, 2006, p.2). Os fatores que medem o quanto cada constituinte contribuirá no compósito final são a fração volumétrica e fração do peso. Esses fatores são dados pelas equações de 1 a 4:

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (1)$$

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (2)$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f \quad (3)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} W_m \quad (4)$$

Onde,

- W_f define a fração do peso do material de reforço em relação ao compósito total
- ρ_f define a densidade do material de reforço utilizada no compósito.
- V_f define a fração volumétrica de material de reforço em relação ao volume do compósito.
- ρ_c define a densidade do compósito.
- W_m define a fração do peso da matriz em relação ao compósito total.
- ρ_m define a densidade da matriz utilizada no compósito.
- V_m define a fração volumétrica de matriz em relação ao volume do compósito.

Vale ressaltar que os resultados obtidos nas equações de 1 a 4 são valores adimensionais e geralmente são tratados em termos de porcentagem para representar um determinado parâmetro da seção transversal do material, nesse caso a fração do peso ou volumétrica da fibra e matriz.

Segundo Carneiro e Teixeira (2008, p. 55) os materiais compósitos podem ter comportamentos anisotrópicos, ortotrópicos ou quase isotrópicos. Isso ocorre devido à dependência das propriedades do compósito com as propriedades do material de reforço. Os autores ainda afirmam que este é o componente mais rígido e resistente deste tipo de material, sendo assim, desempenham um papel determinante no material obtido, diante disso, fatores como tipo, orientação e direção das fibras se tornam extremamente importantes no material.

A utilização de materiais compósitos apresenta grandes vantagens em suas aplicações, porém, segundo Bernardi (2003, p. 15) para se caracterizar o desempenho potencial de um material compósito, muitas variáveis devem ser consideradas.

2.1.2 Classificação Dos Materiais Compósitos

Uma forma de classificar e estudar os materiais compósitos é através do agrupamento de acordo com a geometria do material de reforço (fibra ou partícula) utilizado, isso pode ser explicado devido ao mecanismo de enrijecimento do compósito

(fortalecimento) depender basicamente deste fator (Agarwal, Broutman e Chandrashekhara, 2006, p. 3).

Segundo Levy Neto e Pardini (2006, p. 3), pode-se ainda classificar os materiais compósitos como sintéticos e naturais. Os autores ainda constroem um diagrama mostrando a classificação dos materiais compósitos sintéticos e naturais (os materiais compósitos naturais nessa classificação são retratados como os encontrados no corpo humano), esse diagrama pode ser visto na figura 2. Porém, neste trabalho o foco será em materiais compósitos sintéticos.

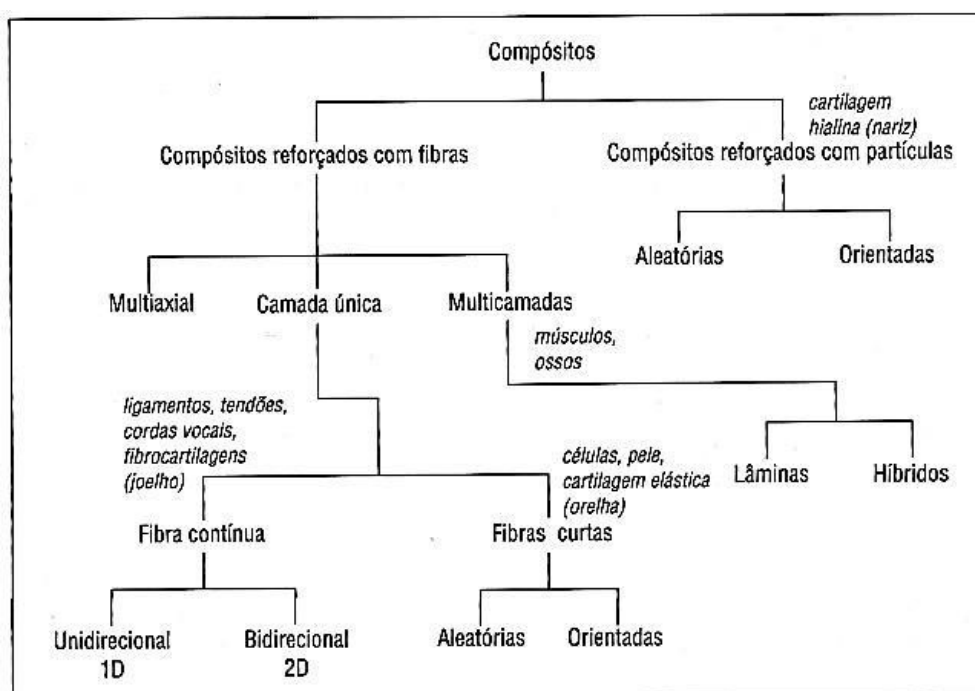


Figura 2 - Representação do diagrama da classificação dos materiais compósitos.

Fonte: Levy Neto e Pardini (2006, P.4).

2.1.3 Materiais De Reforço

Como já definido por Carneiro e Teixeira (2008, p. 55), os materiais de reforço desempenham um papel fundamental na construção de um compósito e nas suas propriedades. Ainda segundo os autores, esse material de reforço (fibras ou partículas) deve ser selecionado de modo que corresponda às necessidades de sua aplicação sejam elas de resistência mecânica, rigidez, durabilidade e etc.

Da Silva (2014, p. 14) define que um material de reforço pode ter as seguintes orientações e formas:

- Partículas aleatórias.
- Fibras descontínuas unidirecionais.
- Fibras descontínuas aleatórias
- Fibras contínuas unidirecionais.
- Fibras contínuas “*crossply*” (bidirecionais) também chamadas de fibras cruzadas.
- Fibras contínuas multidirecionais.

A figura 3 representa a orientação dessas fibras.

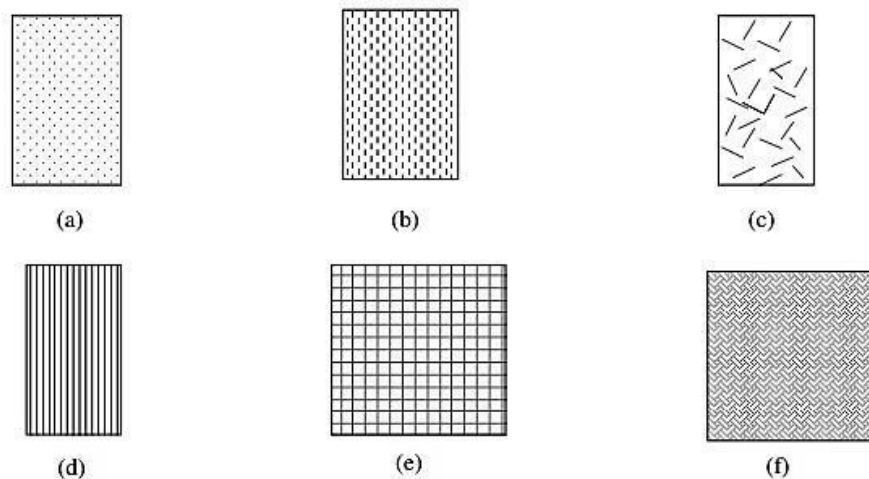


Figura 3 - Representação das orientações das fibras em um material de reforço. Os itens representados são (a) Partículas aleatórias, (b) Fibras descontínuas unidirecionais, (c) Fibras descontínuas aleatórias, (d) Fibras contínuas unidirecionais, (e) Fibras contínuas “*crossply*” (ou cruzadas), (f) Fibras contínuas multidirecionais.

Fonte: Da Silva (2014, p. 14).

Os materiais de reforço, neste caso fibras, mais utilizados na fabricação de compósitos segundo Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 7) são as fibras de Carbono, fibras de Vidro (tipo S e tipo E), fibras de Aramida (Kevlar 49) e fibras de Boro. Dentre as fibras citadas, uma das mais importantes ainda segundo os autores, é a fibra de vidro do tipo E que devido ao seu baixo custo quando comparada as demais fibras, se torna a mais utilizada, no entanto, eles ainda destacam as fibras de carbono, Aramida e Boro por apresentarem maiores valores de rigidez.

Em uma aplicação real de materiais compósitos, diversas solicitações podem estar presentes, e, estas podem ocorrer na direção longitudinal ou transversal das fibras ou até mesmo como um esforço de cisalhamento sobre o compósito, para aumentar a resistência desse material a esses tipos de solicitação e torná-los aplicáveis nesses casos, durante o empilhamento as camadas de materiais de reforços pode-se variar o ângulo entre as direções das fibras. Para determinar qual o ângulo necessário para maximizar a resistência do compósito na aplicação em estudo, alguns cálculos são realizados e dependendo da solicitação aplicada pode ser necessária a aplicação de iterações numéricas para a caracterização do compósito. Da Silva (2014, p. 46) salienta que o empilhamento dessas camadas pode ser realizado de modo simétrico em torno do plano central, ou de forma assimétrica. O autor ainda afirma que, compósitos com empilhamento assimétricos possuem um efeito combinado (acoplado) entre extensão e flexão, e que esse efeito torna a resposta não uniforme, o que faz com que os empilhamentos simétricos sejam mais utilizados.

Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 214) nos apresenta o exemplo de compósito mostrado na figura 4, onde as camadas estão empilhadas com diferentes direções.

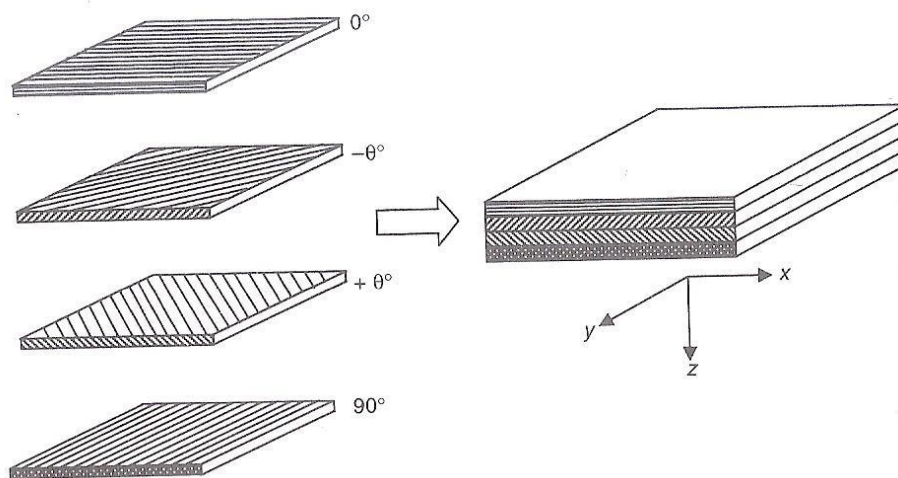


Figura 4 - Representação de um compósito assimétrico com as fibras em diferentes orientações.
Fonte: Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 214)

Os autores ainda apresentam como identificar as orientações das camadas no compósito, a nomenclatura deve mostrar as direções de todas as camadas entre colchetes e são representadas da seguinte forma:

$$[\theta_1 \theta_2 \dots \theta_k]$$

Sendo assim, o exemplo da figura 4 tem a seguinte codificação.

$$[0^\circ - \theta^\circ \theta^\circ 90^\circ]$$

2.1.4 Matrizes

Para Levy Neto e Pardini (2006, p. 2) o papel desempenhado pela matriz como constituinte de um material compósito é tão importante quanto o do material de reforço, pois, a matriz é responsável por aglutinar, proteger e estabilizar geometricamente as fibras dentro do compósito. Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 30) salientam que a matriz ainda tem a função de transmitir a carga entre uma fibra e outra.

A escolha da matriz que será utilizada na construção do compósito, um dos fatores que se deve levar em consideração é o ambiente em que o compósito será exposto (Carneiro e Teixeira, 2008, P. 55).

Os materiais mais utilizados como matrizes são os materiais de base polimérica, metálica e cerâmica. Levy Neto e Pardini (2006, p. 2) afirmam que os materiais utilizados como matrizes não apresentam um bom desempenho estrutural em dois ou mais aspectos quando isolados. Alguns desses aspectos são: resistência mecânica, resistência à corrosão, rigidez, tenacidade e baixa massa específica.

Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 31) apresentam que as matrizes poliméricas são as mais aplicadas em compósitos, pode-se atribuir o grande uso às vantagens apresentadas, como por exemplo: baixo custo, fácil processamento, boa resistência química, e baixa densidade. Apesar das vantagens, este tipo de matriz também apresenta algumas desvantagens como: baixo módulo de elasticidade, baixas

temperaturas de operação e baixa resistência mecânica. Os autores ainda definem que dentre as matrizes poliméricas, as mais utilizadas são:

- Resina de Poliéster: Essa matriz apresenta densidade entre 1,1 e 1,4 g/cm³. O processo de cura dessa matriz é realizado a temperatura ambiente e pode ser realizado ou não sobre pressão.
- Resina de Epóxi: Esta matriz apresenta densidade entre 1,2 e 1,3 g/cm³. O processo de cura poderá ocorrer à temperatura ambiente ou a alta temperatura, os agentes de cura determinarão esse processo.
- Outros polímeros termoendurecíveis: Outras matrizes que podem ser utilizadas são ésteres de vinil, poliamidas e fenólicas. Essas matrizes possuem densidades entre 1.12 e 1.46 g/cm³. Seus processos de cura variam de uma para a outra.

2.1.5 Métodos De Fabricação De Materiais Compósitos

A fabricação de materiais compósitos pode ocorrer de diversas formas, o que determinará a melhor forma de fabricação será a sua aplicação e sua geometria. Dentre as técnicas de fabricação pode-se citar:

- Empilhamento manual: Esta é a técnica mais antiga e a mais amplamente utilizada na fabricação de compósitos, uma vez que pode ser aplicada desde pequenas até grandes peças de compósito. Consiste basicamente de um molde, onde os materiais de reforço e a matriz são colocados manualmente. Nesse processo, rolos podem ser utilizados para compactar e remover possíveis lacunas do interior da amostra. (Agarwal, Broutman e Chandrashekhara 2006, p. 43 – 44). A figura 5 apresenta esse processo.

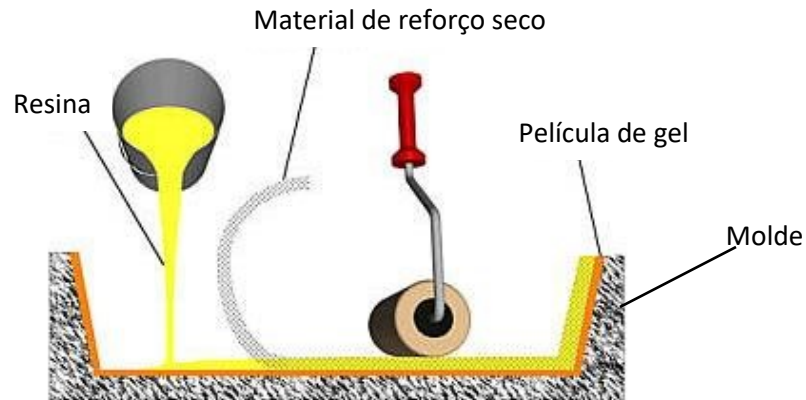


Figura 5 – Representação do processo de empilhamento manual.
 Fonte: Nissen.

- Fabricação por Spray: Este é um processo parcialmente mecanizado do empilhamento manual, Consiste basicamente em aplicar resina e fibra de vidro picada simultaneamente em um molde aberto. A fibra é alimentada na forma de filamentos para a máquina e esta possui um dispositivo picador para possibilitar a aplicação da fibra. (Agarwal, Broutman e Chandrashekhara 2006, p. 44).

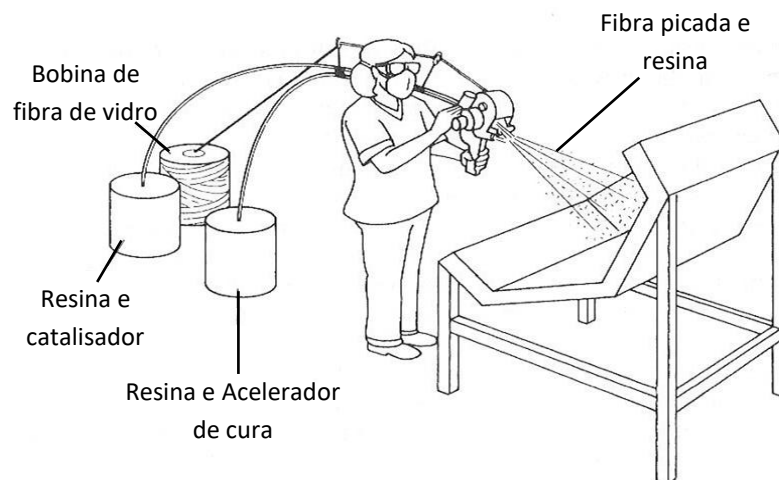


Figura 6 - Representação do processo de fabricação por spray.
 Fonte: Agarwal, Broutman e Chandrashekhara (2006, p. 45).

- Processos de molde por bolsas de vácuo: Este processo consiste basicamente em posicionar as camadas do material de reforços no molde e

cobri-las com um diafragma flexível ou uma bolsa (feita a partir de plástico para bolsa a vácuo). Além do material a ser utilizado no compósito, esse método ainda requer alguns outros, como separadores, tecido absorvedor do excesso de resina (ou malhas de infusão), plástico para bolsa vácuo, tecido canalizador e fita selante dupla-face. (Agarwal, Broutman e Chandrashekhara 2006, p. 46).

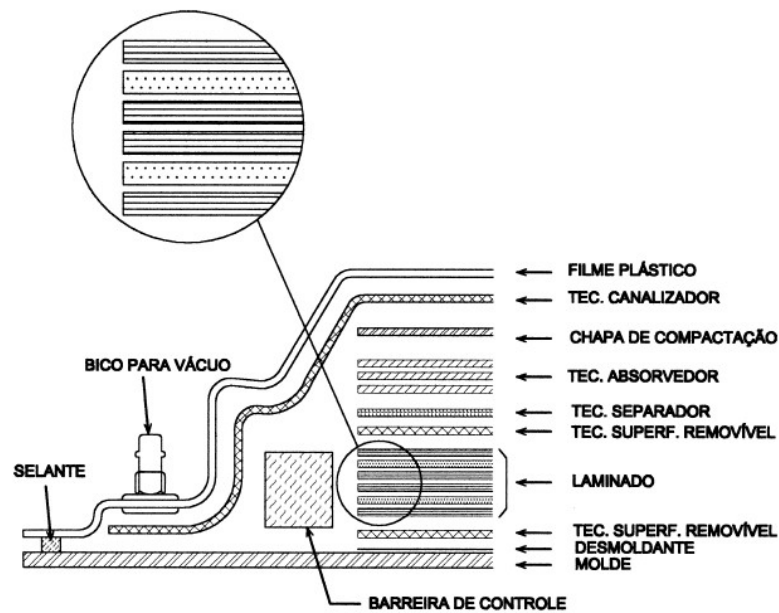


Figura 7 - Representação do processo de moldagem por bolsas de vácuo.
Fonte: Candido, Almeida e Rezende (2000, p. 35)

- Enrolamento filamental: Este processo é comumente utilizado para construir vasos de pressão, tanques de armazenamento e tubos de encanamento. É relativamente simples e consiste em um material de reforço contínuo (filamento simples ou fio) sendo enrolados em torno de um molde rotativo. A dimensão das peças geradas nesse processo pode atingir um ou dois metros de diâmetro, e as peças geradas podem ser fechadas ou não. (Hoa, 2009, p. 205).

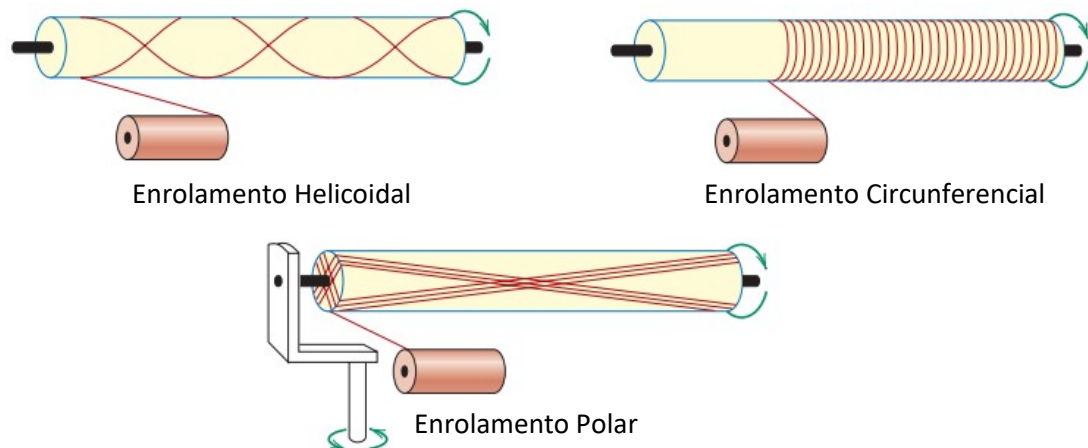


Figura 8 - Representação das formas de enrolamentos filamentar.
 Fonte: Callister Jr. (2007, p. 610)

- Pultrusão: Oferece alta produtividade, podendo chegar a metros por minuto, sendo assim, pode-se obter partes a baixo custo devido às fibras em feixe possuírem um custo menor que as demais formas. Este processo tem sido utilizado para fabricar elementos estruturais de compósito de baixo custo, sendo assim, a alta qualidade do compósito obtido não é um requisito importante nesse processo. (HOA, 2009, p. 234)

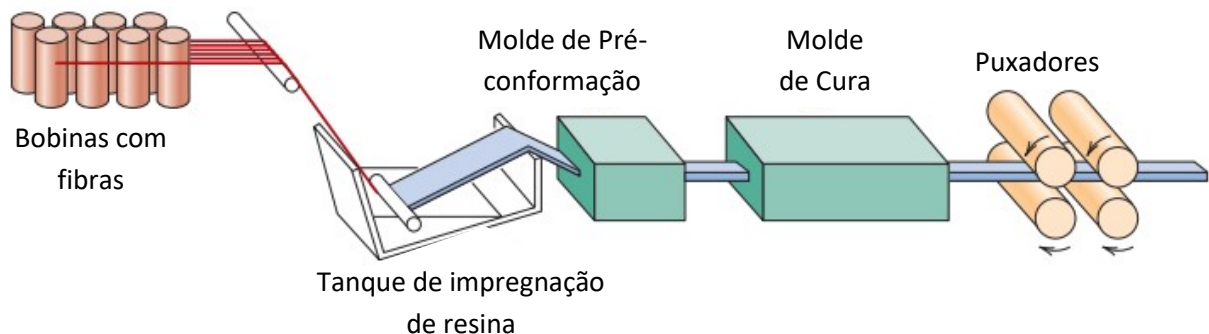


Figura 9 - Representação do processo de Pultrusão de materiais compósitos.
 Fonte: Callister Jr. (2007, p. 608)

2.1.6 Principais falhas em Materiais Compósitos

Conforme afirmam Tita, De Carvalho e Dos Santos (2002, p. 2) os modos de falha que podem ocorrer em materiais compósitos, se tornam complexos devido à

própria natureza desse tipo de material, isso ocorre porque diversos mecanismos estão envolvidos e estes evoluem simultaneamente. Sendo assim, os autores afirmam que as falhas em materiais compósitos podem ser classificadas como intralaminar (dentro de cada lamina/camada de compósito) e interlaminar. Alguns dos mecanismos de falhas intralaminares citados pelos autores são.

- Arrancamento da fibra da matriz (*Pull out*).
- Descolamento entre fibra e matriz (*Debonding*).
- Fratura da fibra (*Fiber Fracture*).
- Falha da matriz (*Matrix Fracture*).

Os autores ainda definem as falhas interlaminares que podem ocorrer como sendo basicamente a delaminação entre as camadas do compósito, ou seja, o processo de separação entre duas camadas adjacentes. A figura 10 representa alguns dos mecanismos de falhas em materiais compósitos.

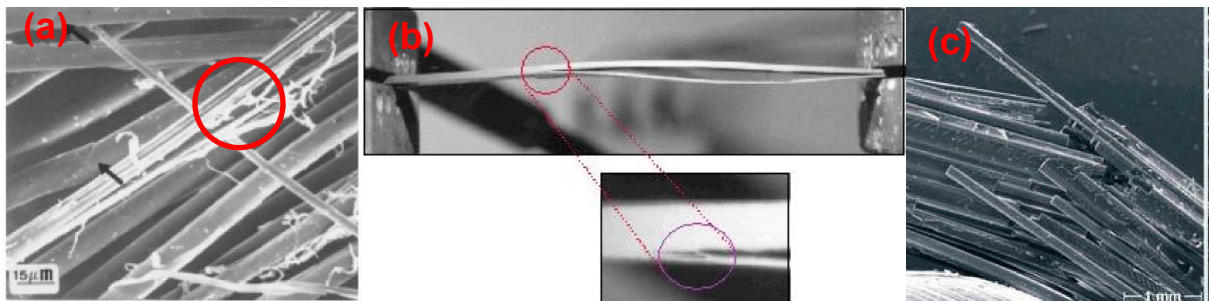


Figura 10 – Representação dos mecanismos de falha em compósitos. (a) Arrancamento da fibra da matriz. (b) Delaminação. (c) Fratura da fibra.

Fonte: (a) Naglis e D’Almeida (1998, p. 58). (b) Straton e Pelegri (1999). (c) Brauer (2008)

Porém, para determinar se o compósito ainda pode ser utilizado ou não, alguns critérios de falhas devem ser empregados. Angélico (2009, p. 24) define que a partir do cálculo das tensões e/ou deformações em um sistema de coordenadas, é possível aplicar alguns desses critérios que podem ser:

- Falha na primeira camada: Neste critério de falha considera-se que o compósito falhou quando ocorre a falha da primeira camada.
- Falha na última camada: Neste critério a falha do compósito só ocorre quando a última carga for aplicada sobre o compósito, porém, este método ainda consiste

na aplicação das leis de degradação das propriedades mecânicas, uma vez que as falhas são progressivas e redistribuem os esforços pelas camadas.

2.1.7 Aplicações De Materiais Compósitos

Materiais compósitos tem ampla aplicabilidade em diversas áreas da engenharia. As áreas onde se pode encontrar esse tipo de material são: na engenharia civil, mecânica, aeroespacial, biomédica entre outras. Isso pode ser explicado devido a grande versatilidade apresentada por estes em relação a outros materiais, Tita, De Carvalho e Dos Santos (2002, p. 1) destacam algumas das vantagens apresentadas como sendo:

- Alta rigidez e resistência mecânica associadas ao baixo peso.
- Versatilidade na moldagem do perfil projetado.
- Redução de custos iniciais e de operação.

Dentre as áreas citadas, a aeroespacial, é umas das áreas que utiliza uma maior quantidade desse tipo de material em uma construção. Isso porque o fato de este material apresentar um menor peso quando comparado a materiais metálicos é um grande atrativo para esta indústria. A empresa de construção de aeronaves Boeing, é uma das que utiliza amplamente materiais compósitos e investe em sua pesquisa e desenvolvimento. Para exemplificar esse investimento por parte da empresa, pode-se citar o investimento de US\$ 1 bilhão realizado em 2016 na construção de um centro de desenvolvimento de asas feitas com materiais compósitos, este centro é o *777X Composite Wing Center* (Centro de Asas de compósito), na cidade de Everett, no estado americano de Washington. (Boeing, 2016)

Segundo Hale (2008, p. 18), na construção do Boeing 787, cerca de 50% de todos os materiais utilizados são compósitos, sendo esta a aeronave comercial construída pela empresa que mais se utiliza deste tipo de material. A figura 11 mostra a representação esquemática dos materiais utilizados nesta aeronave.

De que é feito o novo Boeing 787

Avião utiliza materiais compostos que o tornam mais leve, econômico e seguro

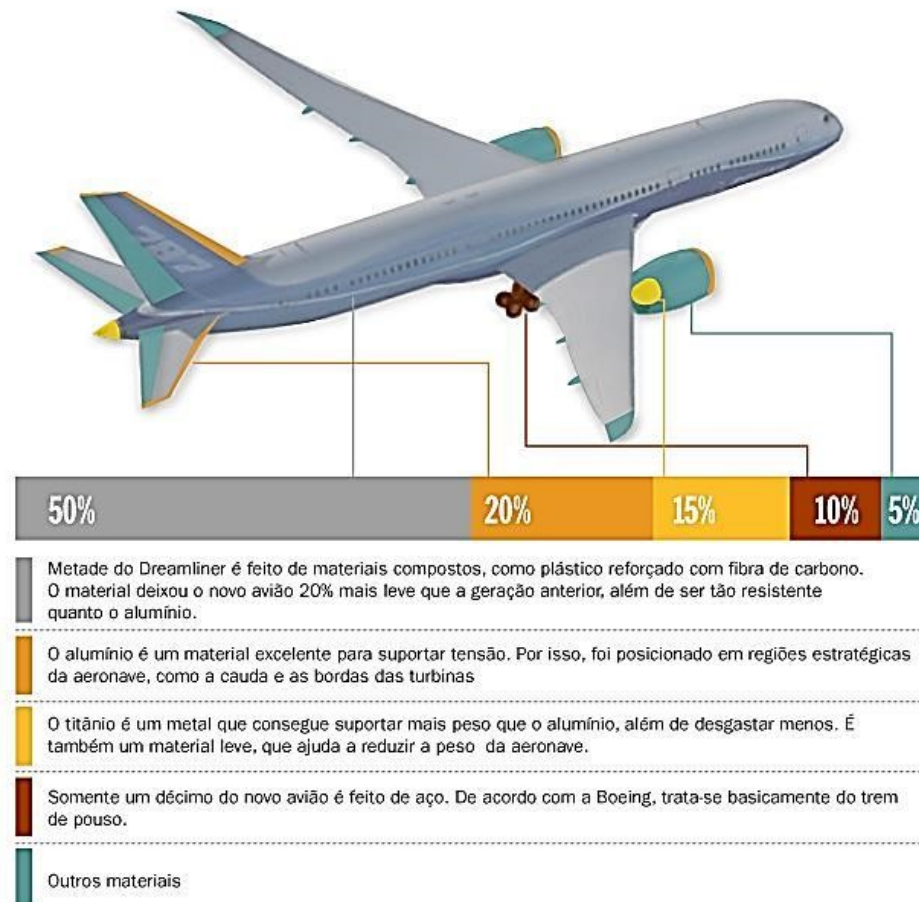


Figura 11 - Representação dos materiais utilizados na construção do Boeing 787.
Fonte: Pires (2016).

Hale (2008, p. 18) afirma ainda que a utilização dessa grande quantidade de materiais compósitos nessa aeronave reduziu em média 20% do peso da mesma quando comparada a projetos convencionais feitos de alumínio. Outra vantagem apresentada está na manutenção dos componentes dessa aeronave, que apresentam uma frequência muito menor que de outros projetos, nos diversos tipos de manutenção.

2.2 FIOS DE NANOTUBOS DE CARBONO

2.2.1 Nanotubos De Carbono

Para Da Silva (2014, p. 20) o carbono é um dos elementos químicos mais abundantes e interessantes na natureza. Este elemento pode formar estruturas que resultam em diferentes geometrias, hibridizações e complexidades. Um exemplo de diferentes estruturas geradas a partir do carbono é o grafite e o diamante.

Na década de 1990, descobriu-se que o carbono também podia se organizar de modo a formar tubos longos, cilíndricos e concêntricos (Da Silva, 2014, p. 20). Esses tubos são atualmente chamados de Nanotubos de Carbono ou ainda NTC (*Carbon Nanotubes, CNTs*).

O NTC pode ser fabricado de modo a possuir uma, duas ou múltiplas paredes. Da Silva (2014, P. 20) explica que essas paredes são formadas por folhas de grafeno enroladas entre si, onde estas podem ser ou não fechadas. A figura 12 representa a formação das paredes em um nanotubo.

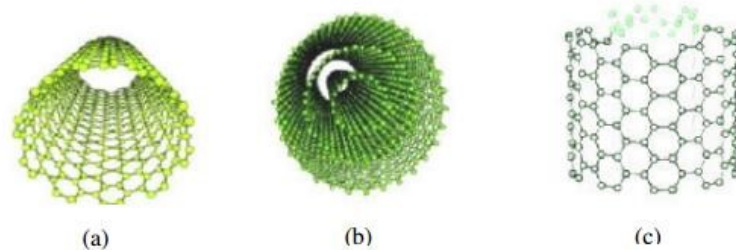


Figura 12 - Representação das paredes em um NTC. (a) parede simples, (b) múltiplas paredes e (c) parede dupla.

Fonte: Da Silva (2014, P.21).

2.2.2 Propriedades Dos Nanotubos De Carbono

Algumas das propriedades mecânicas apresentadas por Le (2016, p. 1), mostram que o Módulo de Elasticidade dos NTCs podem ser maiores que o alumínio (70 GPa) e do aço (210 GPa), variando entre 70 e 350 GPa.

Uma das características mais importante e mais buscada nos NTCs é e sua piezoresistividade, que é a variação na resistência elétrica do NTC sob a aplicação de uma deformação mecânica no mesmo. Lekawa-Raus, Koziol e Windle (2014, p. 11214) explicam que dependendo do raio do NTC e do modo de deformação aplicada, a condutividade do NTC pode aumentar, diminuir ou permanecer inalterada. Este é um grande atrativo dos NTCs, pois, essa piezoresistividade possibilita a utilização destes como sensores de deformação.

De forma geral e em nível microscópico, Lekawa-Raus, Koziol e Windle (2014, p. 11214) definem que as diversas respostas obtidas dos NTCs podem ser explicadas através das distorções das próprias lacunas e das mudanças nas bandas de gap do NTC, alterando assim a resistência elétrica.

Outros fatores que alteram a resistência elétrica do NTC foram apresentados por Bajar (2015, p. 4) e esses fatores são:

- Ângulo de rotação do fio: Maiores ângulos de rotação são geralmente preferidos, pois permitem mais voltas de NTC por unidade de comprimento, o que aumenta o contato entre os NTCs aumentando também sua condutividade.
- A espessura do NTC: Esse fator altera tanto as propriedades mecânicas quanto elétricas do NTC. A resistência é influenciada e é diretamente proporcional ao diâmetro do fio.

A figura 13 mostra a parede de um fio de NTC em nível microscópico. As imagens foram feitas através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

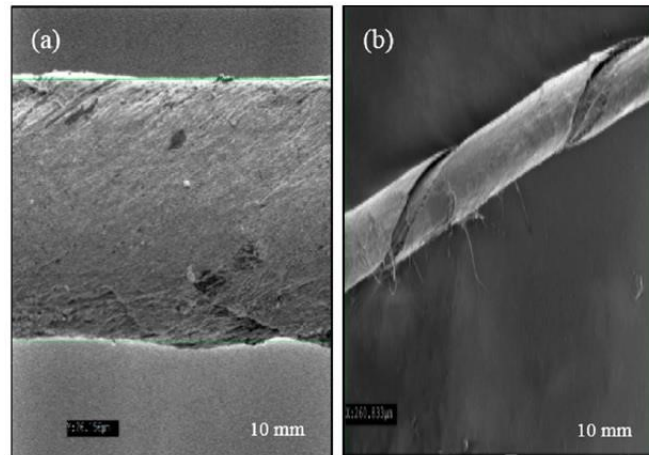


Figura 13 - Fio de NTC visto a partir de um microscópio eletrônico de varredura. (a) fio de NTC em repouso. (b) fio de NTC sobre tensão.
 Fonte: Anike, Bajar e Abot (2016. P. 3)

Na figura 13 pode-se ver nos itens a e b como são as paredes de um NTC quando em repouso, e como a mesma responde sobre uma solicitação, nesse caso a uma tração. No item b da figura 12 é possível identificar facilmente a forma em espiral das folhas de grafeno que formam as paredes desse NTC.

2.2.3 Processo De Fabricação Dos Nanotubos De Carbono

Como já citado por Bajar (2015, p. 2), os processos de fabricação dos fios de NTC tem grande influencia nas suas propriedades mecânicas e elétricas, isso porque a estrutura atômica desse NTC vai depender do processo utilizado.

Da Silva (2014, p. 21) apresenta que os métodos de fabricação dos fios de NTC, tem sido os mais diversos, sabendo disso, o autor destaca alguns desses métodos e os explica da seguinte forma:

- **Descarga por arco elétrico:** Este método se baseia na geração de um arco elétrico entre dois eletrodos cilíndricos de grafite, onde esses eletrodos tem diâmetros entre 6 e 10 mm e utiliza ainda uma vaporização de carbono a partir de um precursor sólido. Este processo deve ser realizado em uma câmara de aço, com gases inertes (Hélio e Argônio) e pressão reduzida. A representação deste processo é dada na figura 14.

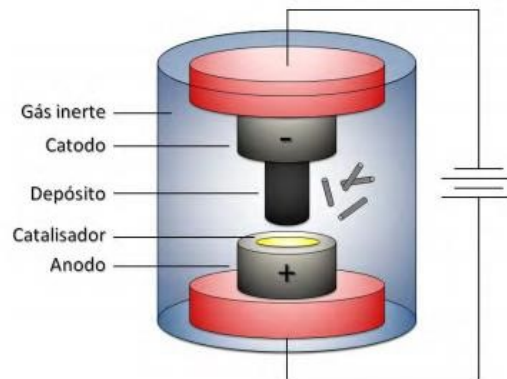


Figura 14 - Representação esquemática do processo de descarga por arco elétrico.
Fonte: Moraes (2013, p. 14).

- Ablação¹ por laser: Este método, assim como o de descarga por arco elétrico, também utiliza a vaporização de carbono a partir de um precursor sólido e os gases inertes. Este processo consiste em colocar grafite em um tubo de quartzo, elevar a sua temperatura e preenche-lo com gases inertes, com isso, focaliza-se o laser sobre o alvo de grafite, e este varre a superfície do alvo mantendo a superfície de vaporização sempre lisa e uniforme. A este processo está representado na figura 15.

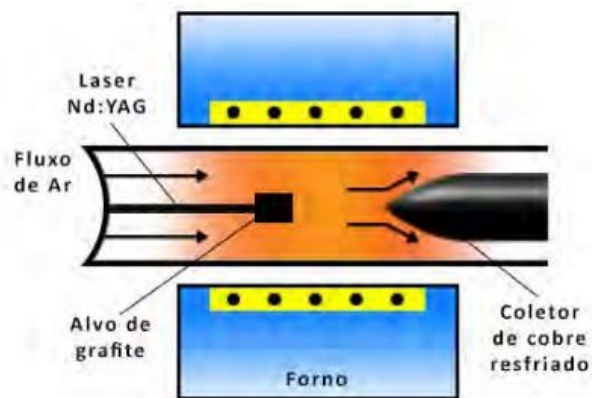


Figura 15 - Representação do processo de ablação por Laser.
Fonte: Moraes (2013, p. 15).

¹ Ablação: Remoção de material.

- Deposição química a vapor: Essa técnica é resultado do desenvolvimento das outras duas técnicas já citadas, onde nesse processo os NTCs se formam a partir da reação da decomposição de um gás ou vapor precursor, juntamente com um catalisador metálico em atmosfera inerte. A figura 16 apresenta a representação desse processo.

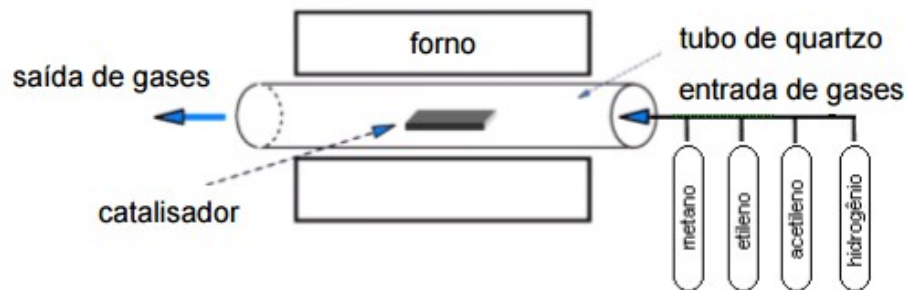


Figura 16 - Representação do processo de Deposição química a vapor.
Fonte: De Oliveira (2009, p. 13).

Depois de finalizada a fabricação, o NTC é vendido em bobinas como mostrado na figura 17. O NTC utilizado neste trabalho possui um diâmetro de aproximadamente 30 μm com uma espira de 30°. Le (2016, p. 5) adverte que devido as suas dimensões, o NTC deve ser manuseado com o devido cuidado para não danificá-lo.

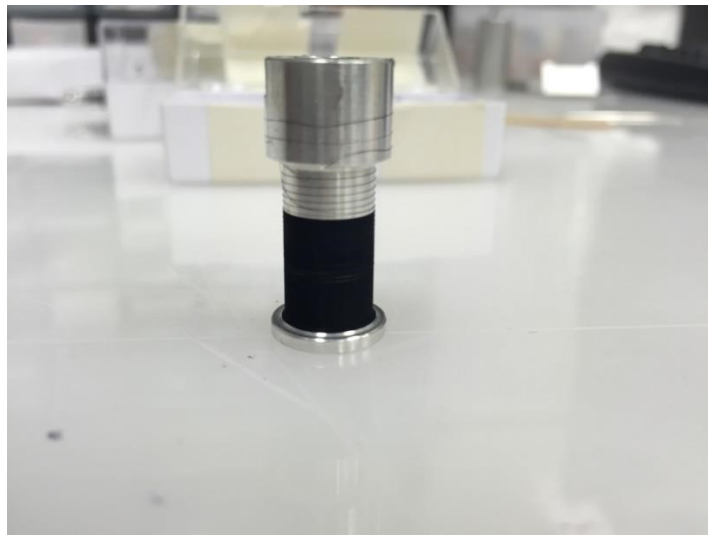


Figura 17 – Bobina de NTC com aproximadamente 10 m.
Fonte: Autoria Própria.

2.3 MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURA

Segundo Chang (2000, p. XX) o maior objetivo das equipes de manutenção, fabricantes e usuários finais é monitorar a integridade de uma estrutura continuamente e em tempo real. O autor ainda afirma que a habilidade de acompanhamento do comportamento de uma estrutura pode reduzir e evitar falhas catastróficas e assim ainda reduzir custos e estoques. Esse acompanhamento da estrutura ao longo do tempo é chamado de Monitoramento da Integridade Estrutural (ou do inglês *Structural Health Monitoring, SHM*).

Hall² (1999 apud FRANCO, 2009, p. 20) define o processo de Monitoramento da Integridade de Estruturas como sendo basicamente a aquisição, a validação e análise de dados sobre as condições da estrutura. Franco (2009, p. 20) simplifica que esse sistema pode ser denotado como a habilidade de identificar e analisar mudanças em uma estrutura visando a melhoria da qualidade e a redução de custos.

O sistema de monitoramento é composto de redes de sensores para aquisição de dados e processadores internos que empregam um algoritmo para monitorar a estrutura no tempo (FRANCO, 2009, p. 20).

Maio (2011, p. 22) apresenta que a vantagem proporcionada pela utilização do monitoramento de estrutura é a possibilidade de se detectar e identificar possíveis danos em seu estágio inicial, evitando o colapso de estruturas. Ainda segundo Maio (2011, p. 22) o Monitoramento da Integridade de Estruturas pode ser estudado de duas formas, conhecidas como problema direto e inverso. O autor os descreve da seguinte forma.

- Problema direto: um modelo matemático é desenvolvido e o sinal deste deve ser confrontado com o resultado obtido através da estrutura real, para se verificar a presença de danos. Este tipo de abordagem é geralmente utilizado em estruturas mais simples que podem ser modeladas analiticamente de forma mais fácil.

² HALL, S. R. The effective management and use of structural health data. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2, 1999, Stanford University, **Proceedings...** Stanford, 1999a. p. 265 - 275.

- Problema inverso: Esta abordagem se baseia na comparação dos sinais medidos da estrutura em momentos distintos, onde, o dano é detectado a partir de alterações nos sinais.

Dentre os diversos métodos de monitoramento e modos de atuação Maio (2011, p. 23) os classifica em quatro níveis crescentes de dificuldade de implementação sendo eles:

- Nível 1: Detectar a existência de falhas.
- Nível 2: Detectar e localizar as falhas.
- Nível 3: Detectar, localizar e quantificar a falha.
- Nível 4: Detectar, localizar, quantificar a falha e estimar o tempo de vida restante.

Além dos quatro níveis apresentados, Maio (2011, p. 23) ainda apresenta mais três níveis que são utilizados juntamente com materiais inteligentes, esses níveis são:

- Nível 5: Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para autodiagnóstico de falhas estruturais.
- Nível 6: Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto reparo da estrutura.
- Nível 7: Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

A aplicação do Monitoramento da Integridade de Estruturas feitas de materiais compósitos se torna mais difícil do que em estruturas metálicas devido a alguns fatores sendo eles, a anisotropia apresentada por materiais compósitos, a condutividade das fibras e a falhas por impacto que ocorrem abaixo da camada superior do compósito, fazendo que não seja possível a detecção desta falha imediatamente. (FRANCO, 2009, p. 20).

Dentre as áreas em que o Monitoramento da Integridade de Estruturas é aplicado, Franco (2009, p. 20) destaca a área aeroespacial, mecânica e civil. O autor ainda salienta que a indústria aeroespacial é uma das que mais investe neste tipo de monitoramento devido à possibilidade de falhas catastróficas ocorrerem acarretando, na maioria das vezes, em acidentes graves.

2.4 ENSAIO DE FLEXÃO TRÊS PONTOS

Segundo Sideridis e Papadopoulos (2004, p. 63) o teste de flexão tem sua popularidade devido a sua simplicidade. Os autores citam como exemplo, o teste em uma amostra de compósito, onde os requisitos para este teste são mais simples que para um teste de tração.

O mecanismo desse ensaio é explicado por Zolin (2010, p. 66), onde, ele afirma que a informação mais importante adquirida a partir desse teste é a indicação qualitativa da ductilidade do material. O autor ainda explica que, o tipo de aplicação será o responsável por determinar a que tipo de sollicitação as fibras superiores e inferiores estarão sujeitas (tração ou compressão). A figura 18 representa os dois tipos de testes que podem ser aplicados.

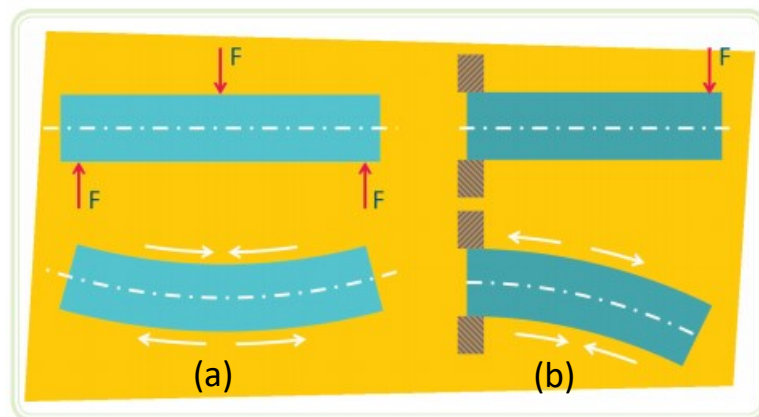


Figura 18 - Tipos de Ensaio de Flexão. (a) Flexão em uma viga bi apoiada. (b) Flexão em uma viga bi engastada.

Fonte: Zolin (2010, p. 67)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos de construção e teste da amostra de compósito analisada foram realizados no Laboratório de Materiais Inteligentes³ na *The Catholic University of America* em *Washington, DC (District of Columbia)* sobre a supervisão e orientação do professor Dr. Jandro L. Abot⁴.

3.1 NORMAS UTILIZADAS

Para o ensaio dessa amostra de compósito a norma utilizada foi a ASTM D7264 que instrui testes de flexão com compósitos. Apesar de seguir a norma, alguns pontos da mesma tiveram de sofrer adequações para que possibilitassem a construção e teste dos sensores de Nanotubos de Carbono na amostra de maneira satisfatória.

3.2 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DA AMOSTRA

A amostra a ser construída e analisada, é feita com camadas de malha de fibra de vidro bidirecional e com uma matriz de resina Epóxi Toolfusion® 1A/1B. Antes de iniciar a construção da amostra de compósito, todas as camadas a serem utilizadas devem ser cortadas precisamente na medida da amostra para assim evitar possíveis delaminações nas bordas e deformações na amostra. Para essa amostra, 32 camadas de fibra de vidro e 8 camadas de fibra de carbono seriam necessárias. Na figura 19 é possível ver como é feito o corte das fibras de vidro utilizadas na amostra.

³ Intelligent Materials Laboratory: <http://faculty.cua.edu/abot/iml.htm>

⁴ Professor e Pesquisador responsável pelo Laboratório de Materiais Inteligentes na *The Catholic University of America*. Mais informações em: <http://engineering.cua.edu/faculty/profiles/abot.cfm>

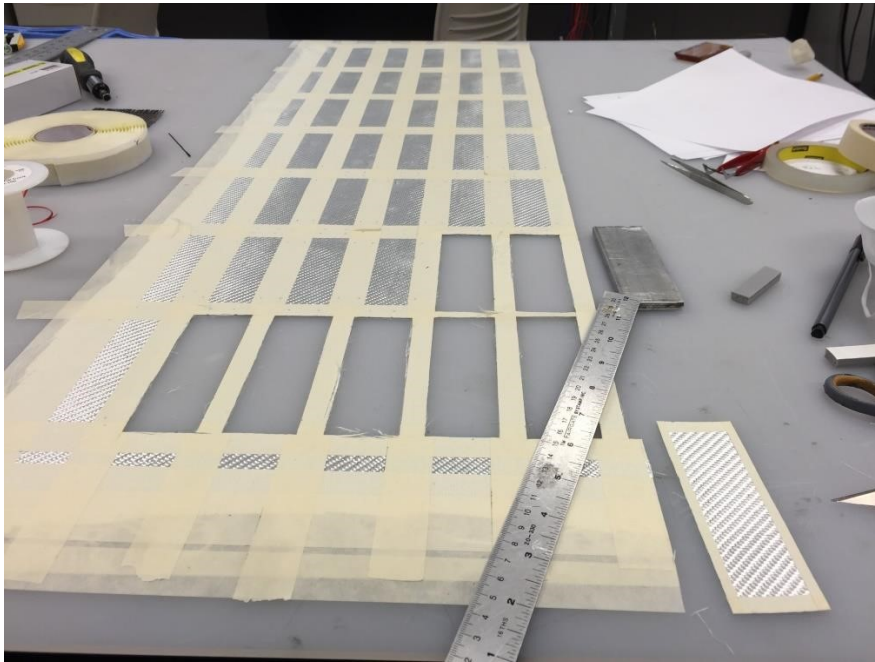


Figura 19 - Representação da malha de fibra de vidro sendo cortada na medida da amostra. Fonte: Cortesia de Adam Circle (2016).

Na figura 19 tem-se a utilização de fita adesiva durante o processo de corte das camadas de fibra ainda sem impregnação. Essa fita é utilizada com intuito de facilitar o corte, mantendo a precisão na geometria e também mantendo a integridade da fibra cortada, evitando assim que os feixes sejam desfeitos e desfiem. A fita facilita ainda a marcação das medidas para o corte, que é feito utilizando um cortador rotativo manual.

Na construção dessa amostra, as camadas de fibra de carbono serão utilizadas como malhas de infusão. Segundo Abot et al. (2014, p. 219) as malhas de infusão tem função de manter a fração volumétrica das fibras em torno de 65% do compósito absorvendo o excesso de resina, essas malhas de infusão também podem são chamadas de tecidos absorvedores, como mostrado na figura 7.

Uma camada de fibra de vidro deve ser selecionada para ser utilizada como camada central da amostra de compósito, onde, nesta camada estarão os sensores e a delaminação gerada como mostrado na figura 20. Com intuito de gerar um defeito (delaminação) na amostra, um pedaço de teflon com 25 mm por 15 mm é posicionada e colada no centro da camada central da amostra (item b da figura 20). Após o posicionamento do defeito na amostra, os fios de Nanotubos de Carbono (NTC) foram inseridos transversalmente (a direção da maior dimensão da falha e amostra) na

camada central (item a da figura 20). Esses fios de NTC têm a função de sensores que monitoram o crescimento da falha longitudinalmente no compósito. Esses sensores foram posicionados através de um ponto de costura através de um feixe da malha nos cantos. A configuração da camada central do compósito após a adição dos sensores é mostrada na figura 20.

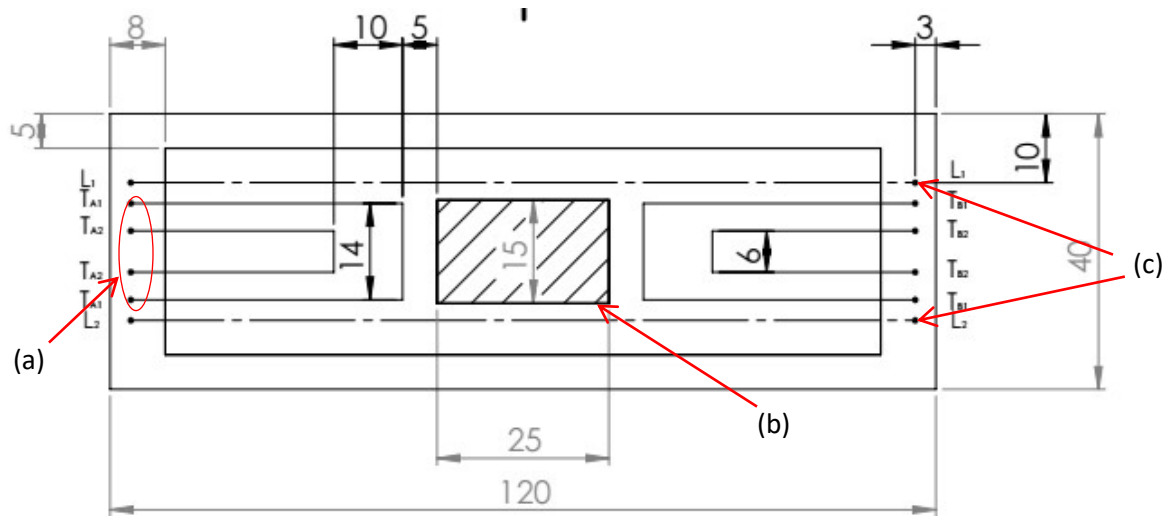


Figura 20 - Representação da configuração da camada central do compósito. (a) NTC transversais colocados na camada central. (b) Delaminação intencional adicionada. (c) NTC costurado através das oito camadas centrais.

Fonte: Abot et. al. (2016, p. 6).

O desenho mais detalhado da amostra pode ser encontrado no ANEXO A.

Além dos dois sensores transversais de cada lado da delaminação gerada, dois sensores longitudinais foram adicionados à amostra. Porém, esses sensores foram costurados através das oito camadas centrais da amostra sendo estes mostrados pelo item d da figura 20. A costura através das camadas foi feita utilizando uma agulha comum e um dispositivo de fixação desenvolvido no laboratório. Isso foi feito para garantir que mesmo que a delaminação ocorresse em alguma outra camada diferente da central por algum outro defeito de fabricação, os sensores seriam capazes de colher os dados para monitorar a falha. Nesta amostra, os pontos (de costura) estão distantes uns dos outros cinco feixes da fibra de vidro.

Para possibilitar a leitura dos dados gerados pelos fios de NTCs, fios foram adicionados à amostra e a ligação entre os NTCs e os fios foi feita através da BARE Conductive® Electric Paint (item a da figura 21), que é uma tinta condutiva que quando curada é responsável pelo contato entre o fio e o NTC. A tinta nesse tipo de amostra é curada com calor, onde a amostra fica 5 minutos a uma temperatura de 100 °C. Sendo assim, após essa etapa do processo, a camada central do compósito estará como mostrado no item b da figura 21.

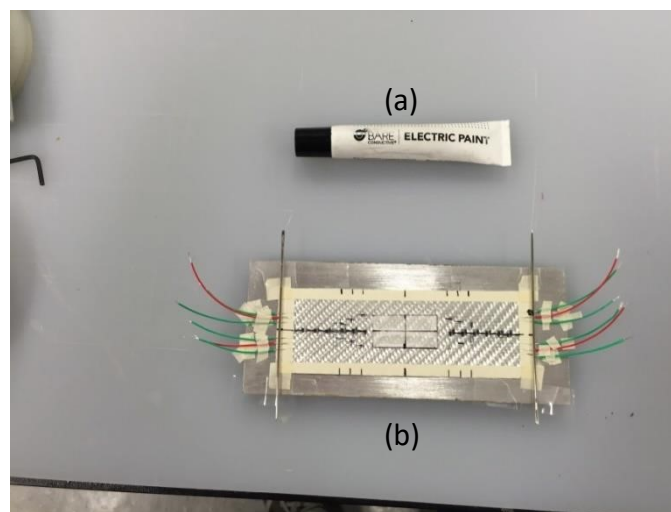


Figura 21 - Camada central do compósito. (a) Tinta condutiva BARE Conductive® Electric Paint. (b) Camada central do compósito com a delaminação, NCTs transversais e fios externos posicionados.

Fonte: Autoria Própria.

A configuração de fios e NTCs mostrada no item b figura 21 foi alterada devido à proximidade entre os fios, que fez com que os contatos acabassem tocando os outros sensores (NTC e fio), sendo assim, optou-se por retirar o segundo NTC de cada lado, resultando na configuração mostrada na figura 20. Analisando ainda o item b da figura 21, pode-se notar a utilização de duas hastes metálicas fixadas ao dispositivo de fixação, essas hastes foram adicionadas à montagem para ajudar na fixação e posicionados sobre os NTCs durante o processo de construção dos contatos.

A matriz utilizada é uma resina Epóxi ToolFusion™ 1A e 1B, onde, seu processo de cura é feito a temperatura ambiente. A folha de dados (*data sheet*) desta resina apresenta que a partir do processo de cura por molde com bolsas de vácuo já é

possível se obter compósitos laminados com a mesma qualidade dos laminados curados em altos-fornos. Esta resina é composta de duas partes, e a razão entre Epóxi e o endurecedor é 5:1, as partes que compõem esta matriz estão representadas na figura 22.

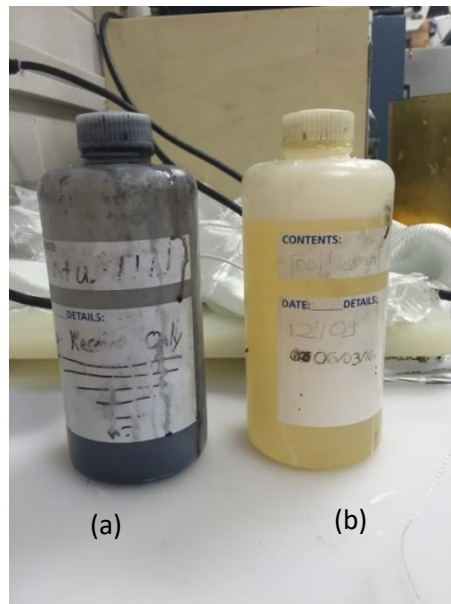


Figura 22 - Resina Epóxi de duas partes utilizada. (a) Epóxi. (b) Endurecedor.
Fonte: Autoria própria.

A preparação da resina para a impregnação consiste basicamente em juntar as duas partes respeitando as razões entre elas, sendo esta 5 partes de Epóxi pra 1 parte de endurecedor (5:1), e mistura-las manualmente até que haja a homogeneização entre as partes. Para evitar o surgimento de bolhas no interior da resina, a mesma deve ser misturada lentamente. Para essa amostra foram preparadas 60 g de resina, onde, foram 50 g de Epóxi e 10 g de Endurecedor.

Para poder iniciar a impregnação das camadas pela resina, deve-se antes preparar o dispositivo (plataforma) mostrado no item a da figura 23, na qual a amostra será curada. A plataforma de pressão foi coberta com uma camada de teflon (item b da figura 23) para facilitar a retirada da amostra da plataforma. Para impregnar as camadas, uma barreira de controle é construída com fitas de espuma com as medidas da amostra (item c da figura 23), essa barreira de controle tem como função manter as camadas de fibras de vidro e de carbono alinhadas e manter a resina na amostra

durante o processo de cura. A plataforma de pressão após preparada e antes do início do empilhamento do laminado está mostrada na figura 23.

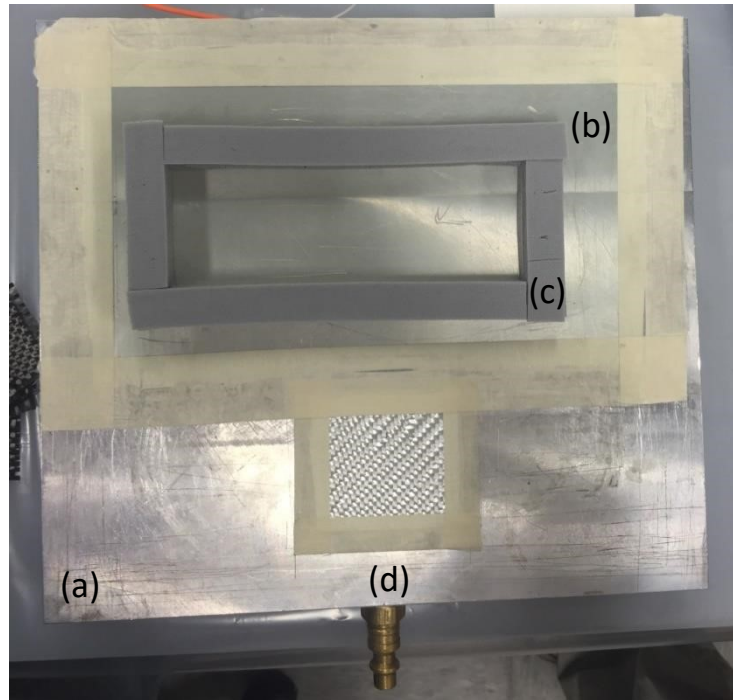


Figura 23 - Plataforma de pressão utilizada na cura do compósito já preparada. (a) Plataforma de pressão. (b) cobertura de teflon sobre a plataforma. (c) Barreira de controle para as camadas de fibra de vidro e carbono. (d) conexão para a bomba de vácuo. Fonte: Autoria Própria.

A construção começa com quatro camadas de malhas de infusão (*bleeders*) de fibra de carbono e uma camada de separador (para facilitar a retirada das malhas de infusão do laminado após a cura), que nessa amostra foi utilizada uma malha de nylon. Após as malhas de infusão e o separador serem posicionadas dentro da barreira de controle, pode-se começar a construção da amostra. A impregnação das camadas de fibra de vidro, nesse caso, foi feita manualmente sendo a resina aplicada em uma camada por vez. Depois da impregnação da décima segunda camada de fibra de vidro, deve-se preparar a amostra para o posicionamento das 8 camadas centrais com o NTC, onde o processo para essas camadas ocorrerá de forma diferente as demais, nesta parte da impregnação deve-se distribuir uma quantidade suficiente de resina, nas camadas imediatamente anterior e posterior, para impregnar todas as 8 camadas as centrais. Com a impregnação de todas as camadas da amostra, deve-se repetir o

processo anterior ao da impregnação, porém, com a ordem inversa, colocando o separador primeiro e as malhas de infusão depois.

A preparação do processo de cura começa com o posicionamento de uma malha de fibra de algodão (tecido canalizador) sobre a amostra para absorver o excesso de resina do compósito. Uma camada de plástico para bolsa a vácuo foi cortada para cobrir toda a plataforma de pressão. Para selar a bolsa e a camada de teflon que cobre o prato de pressão, uma camada de fita selante dupla-face foi utilizada. A cura dessa amostra é feita à temperatura ambiente e consiste em uma etapa de vácuo de 2 horas e uma de pressão de 2 horas (tempos determinados por procedimentos experimentais).

Quando a bomba de vácuo é ligada, deve-se verificar se não há vazamento na linha. O processo de aspiração é aplicado durante o processo de cura com o intuito de remover qualquer volatilidade da resina e a pressão no dispositivo de cura (fora da bolsa) é aplicada através de ar comprimido e tem o intuito de consolidar a amostra de compósito.

3.3 PREPARAÇÃO E TESTE DA AMOSTRA

Para estudar o comportamento do crescimento da falha dentro desse compósito, a amostra foi submetida a um teste de flexão de três pontos. O ensaio foi realizado em uma MTS Criterion 43 (item e da figura 21) com uma célula de carga de 30 kN. O ensaio é monitorado e controlado através do *software* MTS Testworks 4 (item b da figura 24) e os dados são obtidos a uma frequência de 1 Hz.

Para identificar o comportamento piezoresistivo dos sensores no compósito, um chassis de aquisição de dados da *National Instruments* (NI) modelo 1978 (DAQ) (item d da figura 24) foi utilizado. Este chassis foi equipado então com uma placa NI 9219. O DAQ foi combinado com um multímetro digital NI 4072 (item c da figura 24) montada em um chassis NI PXI 1033. A diferença entre esses equipamentos está na capacidade de aquisição das informações, onde, a maior resistência possível de se obter com o DAQ é da ordem de 10.5 k Ω e no multímetro digital essa resistência é de 1 M Ω .

O *software* utilizado para monitorar a resistência da amostra durante o teste foi o NI LabVIEW Signal Express (item a da figura 24), adquirindo dados com uma taxa de 1 Hz.

Com a amostra posicionada no dispositivo de fixação da MTS, os cabos de aquisição do DAq e do multímetro digital foram conectados aos fios da amostra. A figura 24 mostra a montagem geral dos equipamentos utilizados no teste.

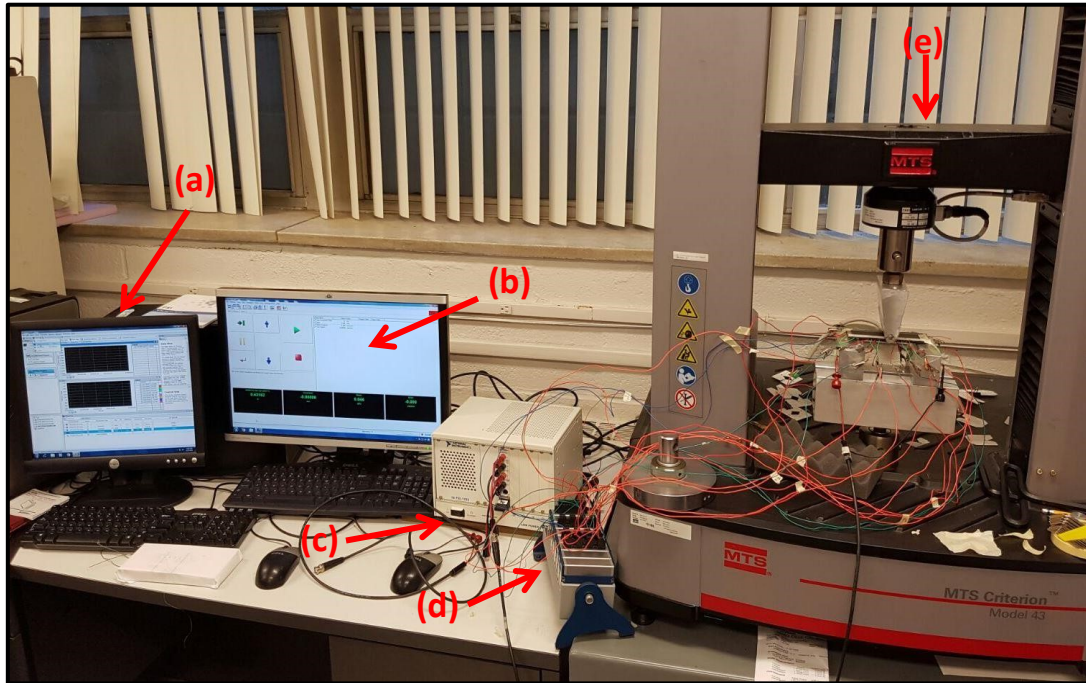


Figura 24 - Equipamentos Utilizados no teste. (a) Computador monitorando através do NI LabVIEW Signal Express. (b) Computador monitorando e controlando o teste com o MTS Testworks 4. (c) Multímetro Digital NI 4072. (d) Chassis de Aquisição NI 1978 equipado com placas NI 9219. (e) Máquina de ensaio flexão MTS Criterion 43.

Fonte: Abot et. al. (2016, P. 8).

A amostra de compósito posicionada na máquina de testes pode ser vista em mais detalhes na figura 25, onde, já se pode ver a célula de carga calibrada (em contato) para o início do teste.

Os apoios e o aplicador de carga são compostos por rolos e estes foram cobertos por uma camada de teflon para evitar qualquer interferência desses componentes nos resultados mostrados pelos Nanotubos de Carbono.

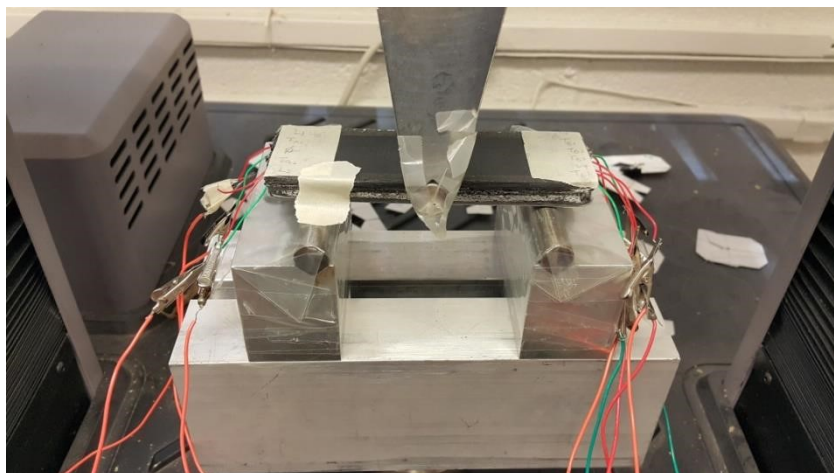


Figura 25 - Amostra posicionada e pronta para o teste.
Fonte: Cortesia de Pedro Silva (2016).

O teste é executado deslocando-se a célula de carga do aparato mostrado na figura 25 e os dados devem ser coletados até que todos os sensores falhem ou até que a amostra atinja uma deformação pré-determinada o que ocorrer primeiro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar os testes, foram verificadas as resistências de cada sensor (conjunto NCT e fio) para se certificar que todos os sensores estivessem funcionando corretamente, no entanto, após essa verificação constatou-se que um dos sensores havia quebrado durante o processo de cura da amostra e ao tentar recuperar esse sensor, o fio do mesmo foi danificado e perdido. Esse era o sensor T_{A2} (representado na figura 27 pela cor amarela), que era um sensor transversal e externo, sendo assim, julgou-se pela continuidade do teste devido a este se tratar de um sensor externo e com uma dimensão não muito significativa.

Idealmente o teste deveria ser executado até que todos os sensores falhassem, porém, o último sensor a falhar na amostra foi o T_{B2} o que ocorreu em aproximadamente 12 minutos e 40 segundos (760 segundos). Devido a grande deformação da amostra, o teste foi finalizado antes do sensor T_{A1} se romper, totalizando um tempo de teste de 13 minutos e 56 segundos (836 segundos).

Durante o teste, a partir dos valores parciais observados e mostrados no software, já era possível notar a propagação da falha sequencialmente, confirmando que o teste e a montagem da amostra atendiam as expectativas, porém o comportamento dos sensores ainda não havia sido totalmente quantificado.

Após os valores das resistências serem adquiridos pelo software NI LabVIEW Signal Express, os mesmo foram exportados para o software Microsoft Excel e foi dado início ao tratamento dos dados. Como o intuito desse teste era verificar o comportamento dos NTCs, os dados utilizados para análise foram as variações das resistências (ΔR) durante o tempo. O comportamento analisado dos NTCs está representado na figura 26, onde ainda pode se ver o perfil da carga aplicada ao longo do tempo.

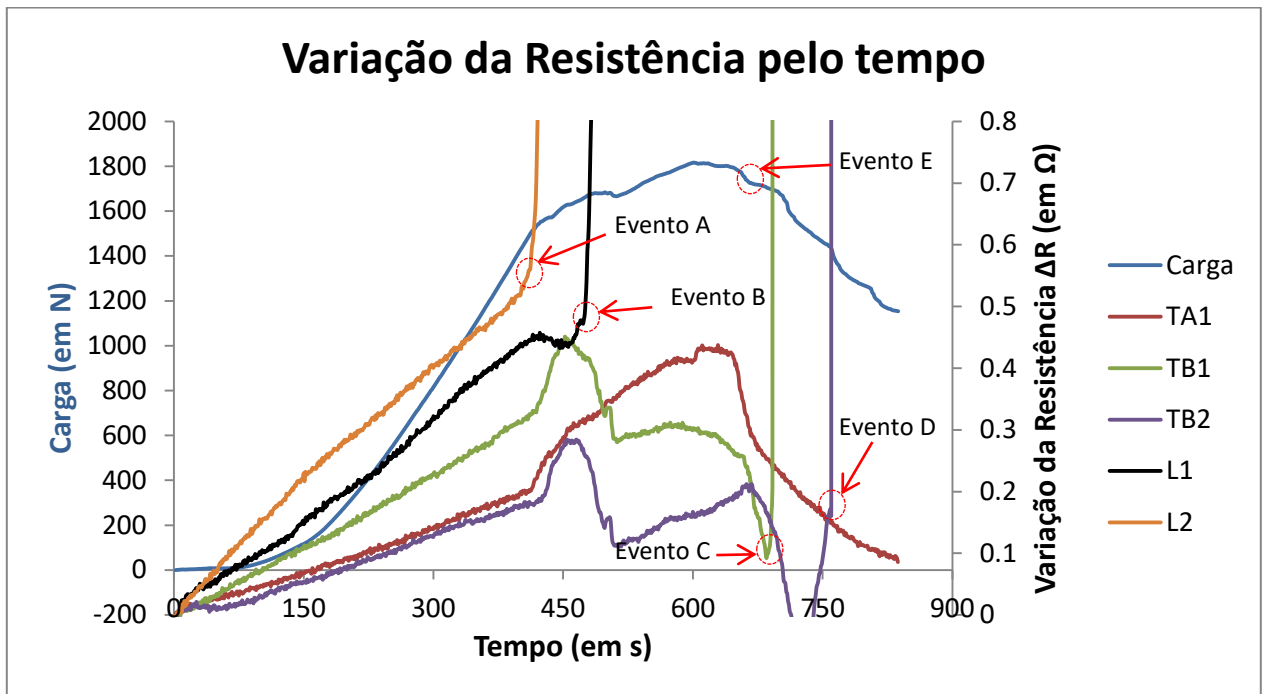


Figura 26 - Representação da variação da resistência dos NTCs durante o teste.
 Fonte: Autoria Própria.

Com objetivo de facilitar a identificação dos sensores no gráfico da figura 26, adaptou-se a figura 10 identificando cada sensor pelas cores de suas curvas.

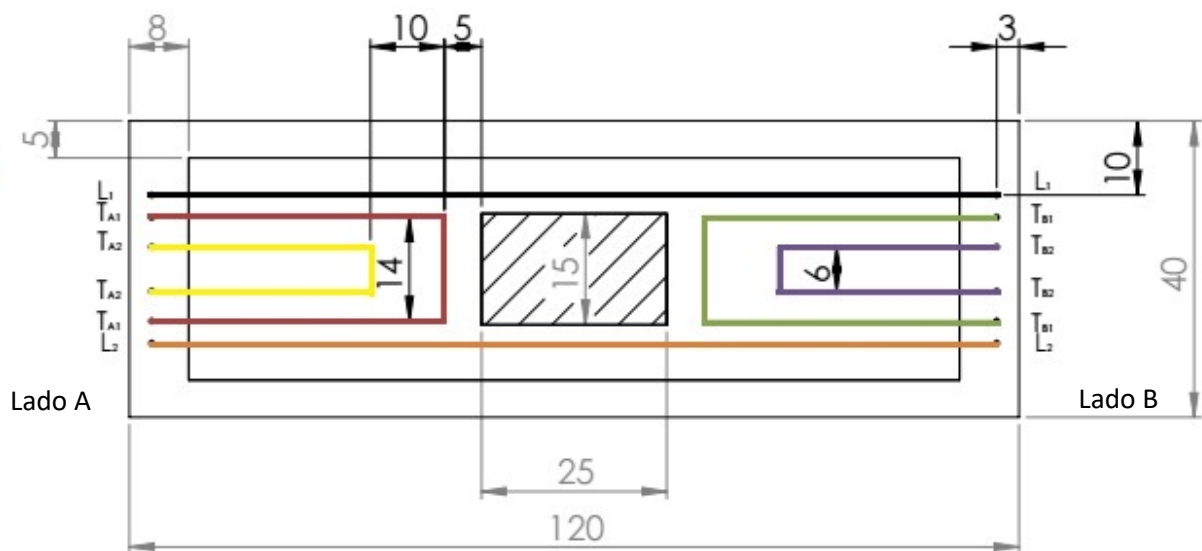


Figura 27 - Adaptação da representação dos sensores na amostra de compósito com as cores do Gráfico.
 Fonte: Adaptado de Abot et. al. (2016, p. 6).

O critério de determinação da falha do sensor é observado a partir da variação de sua resistência, sendo assim, diz-se que o sensor falhou quando o mesmo apresenta uma variação muito grande e repentina na sua resistência. As falhas estão representadas no gráfico mostrado na figura 26 e são chamadas de eventos com índices entre A e D para destacar o momento em que as mesmas ocorreram.

A partir do gráfico mostrado na figura 26, pôde-se notar que apenas 4 dos 5 sensores que estavam funcionando no início do teste falharam. Isso ocorreu porque a falha se propagou para o lado B da amostra atingindo os sensores T_{B1} e T_{B2} , a delaminação pode ainda ter se propagado para o lado A, porém não atingiu o sensor antes da amostra sofrer uma deformação muito grande e o teste ser interrompido.

Nota-se também que os sensores longitudinais costurados pelas oito camadas centrais são os primeiros a falhar (Eventos A e B na figura 26). Isso pode ser explicado devido a esses sensores se mostrarem os mais sensíveis a qualquer delaminação que ocorra na amostra. A falha desses sensores foi de grande importância para o teste, pois, mostra a capacidade destes de identificar delaminações no material antes mesmo que as alterações das propriedades mecânicas da amostra possam ser notadas de forma significativa. Isso pode ser visto através da curva da carga aplicada no momento em que esta começa a decrescer, o que acontece somente no evento E, ou seja, por volta de 600 segundos após o início do teste, sendo que os sensores falharam em 386 e 474 segundos após o início do teste.

Pode-se perceber a propagação da falha a partir da delaminação inserida na construção que se dirigiu na direção do lado B da amostra e nota-se a falha sequencial dos sensores T_{B1} e T_{B2} representados na figura 27 pelas cores verde e roxa respectivamente, com um intervalo de aproximadamente 70 segundos entre eles.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da realização desse trabalho pôde-se compreender um pouco mais sobre as características dos materiais compósitos, como suas principais propriedades, seus constituintes e efeitos no compósito final e algumas de suas aplicações, na aviação por exemplo. Estudou-se também sobre os Nanotubos de Carbono a fim de se compreender mais sobre as propriedades e alguns de seus métodos de fabricação. Em adição, foi analisada a viabilidade dos NTCs como sensores de falha.

A capacidade dos sensores em identificar delaminações foi comprovada neste trabalho, antes mesmo que estas alterem as propriedades mecânicas do material. Esse resultado viabiliza prever falhas catastróficas através de falhas menores. A possibilidade de identificar a propagação de falhas através desses sensores utilizando a configuração transversal foi observada, pois pôde-se notar as falhas dos sensores em sequência, permitindo avaliar a integridade da estrutura empregada.

A partir dos resultados obtidos foi possível comprovar o êxito na integração dos NTCs na amostra de compósito, uma vez que os mesmos identificaram a delaminação da amostra antes da mesma ser notada na variação da carga aplicada. De um modo geral, comprovou-se a aplicabilidade dos Nanotubos de Carbono como sensores de falha, a partir do monitoramento da integridade da estrutura no interior da amostra construída.

Com a realização desse trabalho pôde-se monitorar a integridade de estruturas através a integração de Nanotubos de Carbono, atingindo assim o objetivo geral proposto. Assim como o objetivo geral, tem-se também que os objetivos específicos foram atingidos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo foi possível ver a aplicabilidade e o comportamento desses sensores em amostras de pequenas dimensões, porém, ainda deve-se estudar a aplicação e viabilidade desse monitoramento por este tipo de sensores em estrutura maiores, isso porque a fabricação dos materiais com NTCs integrados, principalmente compósitos, é muito sensível o que pode danificar os sensores facilmente como visto na preparação da amostra para este teste. A sensibilidade na fabricação faz com que seja necessário um manuseio cuidadoso o que resulta em um maior tempo de preparação do material.

Com relação aos Nanotubos de Carbono, ainda deve-se estudar a sua aplicação em compósitos formados a partir de outras fibras como na fibra de carbono, por exemplo, para que seja possível a aplicação desses sensores neste tipo de fibra, os NTCs devem ser revestidos com material isolante devido à condutividade desse tipo de fibra. Para esses sensores serem aplicados em grande escala, deve-se também estudar e desenvolver novos métodos de fabricação que baixem o seu custo de produção.

Referências

ABOT, Jandro L. et al. Localized Detection of Damage in Laminated Composite Materials Using Carbon Nanotube Yarns Sensors. *Journal of Multifunctional Composites*. 2014. Disponível em: <<http://dpi-journals.com/index.php/JMC/article/view/1661>>. Acesso em: 21 set. 2016.

ABOT, Jandro L. et al. Precise monitoring of damage evolution in laminated composite materials using integrated carbon nanotube fiber sensors: experimental results and validation for Proceedings of the American Society for Composites 31st Conference. In: American Society for Composites Conference, 31., 2016, Williamsburg. **Anais...** Williamsburg: ASC Conference, 2016.

AGARWAL, Bhagwan D.; BROUTMAN, Lawrence J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and performance of Fiber Composites**. Nova Delhi: John Wiley & Sons, Inc. 2006.

ANGÉLICO, Ricardo A. **Avaliação de Modelos de Falhas Progressivas Para Estruturas em Material Compósito**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

ANIKE, Jude C.; BAJAR, Angeline.; ABOT, Jandro L. Time-Dependent Effects on the Coupled Mechanical-Electrical Response of Carbon Nanotube Yarns under Tensile Loading. *Journal of Carbon Research*. 02 fev. 2016. Disponível em:<<http://www.mdpi.com/2311-5629/2/1/3>>. Acesso em: 13 set. 2016.

BAJAR, Angeline M. **Hysteresis and Time-Dependent Effects on the Coupled Mechanical-Electrical Response of Carbon Nanotube Yarns Subject to Tensile Loading**. 2015. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). The Catholic University of America, Washington, DC, 2015.

BERNARDI, Stefania T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes reforçadas com fibra de Aramida Kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

BRAUER, et al. **Fracturing of phosphate glass fibre/polymer composite**. 2008. 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.brauergroup.uni-jena.de/Research/Composites.html>>. Acesso em: 02 out. 2016.

BOEING. **\$1 Billion 777X Composite Wing Center Opens**. Disponível em: <<http://www.boeing.com/features/2016/05/777x-composite-wing-center-05-16.page>>. Acesso em: 13 set. 2016.

CALLISTER Jr., William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. John Wiley & Sons, Inc. 2007.

CANDIDO, Geraldo M.; ALMEIDA, Sérgio F. M.; REZENDE, Mirabel C. Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 10, n. 1, p. 31 – 41, 2000.

CARNEIRO, Luiz A. V.; TEIXEIRA, Ana M. A. J. **Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção**. Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_quad_2008/propr_caract_compostos_compositos.pdf>. Acesso em: 09 set. 2016.

CHANG, Fu-Kuo. **Structural Health Monitoring**. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc. 2000.

DA SILVA, Henrique P. **Comportamento Mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados**. 2014. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

DE OLIVEIRA, Bianca L. **Síntese de Nanotubos de Carbono (NTC) por Deposição Química de Vapor empregando Fe/CaCO₃ e Fe/NTC como catalisador**. 2009. 117 f. Dissertação (Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FRANCO, Vitor R. **Monitoramento da Integridade em Estruturas Aeronáuticas**. 2009. 205 f. Dissertação (Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2009.

HALE, Justin. Boeing 787 from the Ground Up. **Aero**. 2008. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article_4.pdf>. Acesso em: 13 set. 2016.

HOA, Suong V. **Principles of the manufacturing of Composite Material**. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc. 2009.

LE, Huy H. **Piezoresistive Response of Integrated CNT Yarns under Compression and Tension: The Effect of Lateral Constraint**. 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). The Catholic University of America, Washington, DC, 2016.

LEKAWA-RAUS, Agnieszka; KOZIOL, Krzysztof K. K.; WINDLE, Alan H. Piezoresistive Effect in Carbon Nanotubes Fibers. **ACS Nano**, v. 8, n. 11, p. 11214 – 11224, 22 out. 2014.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L.C., **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher Ltda, 2006.

MAIO, Carlos E. B. **Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

_____. **Michaelis Dicionário da Língua Portuguesa**. São Paulo: Editora Melhoramentos, 2015. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=composito>>. Acesso em: 10 set. 2016.

MORAES, Marina B. **Estudo da Aplicação de Nanotubos de Carbono para Supercapacitores**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

NAGLIS, Marcelo M. M.; D'ALMEIDA, José R. M. Avaliação dos Modos de Falha sob Impacto de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por fibras. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. p. 54 – 60, 1998.

NISSEN, Thomas. **Hand Lay-up**. 1 ilustração, color. Disponível em: <<http://www.designinsite.dk/htmlsider/inspinfo.htm>>. Acesso em: 01 out. 2016.

PIRES, Marco T. Novas Tecnologias transformam Boeing 787 em 'avião dos sonhos'. **Veja**. 6 maio 2016. Ciência. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/ciencia/novas-tecnologias-transformam-boeing-787-em-aviao-dos-sonhos/>>. Acesso em: 13 set. 2016.

SIDERIDIS, E.; PAPADOPOULOS, A. Short-Beam and Three-Point-Bending Tests for the Study of shear and Flexural Properties in Unidirectional-Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2004. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.20382/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.com.br&purchase_site_license=LICENSE_DENIED>. Acesso em: 22 set. 2016

STRATTON, Amy L.; PELEGRI, Assimina A. Investigation of interlayer and intralayer delaminations. **The Rutgers Scholar: An Electronic Bulletin of Undergraduate Research**. 1999. Disponível em: <<http://rutgersscholar.rutgers.edu/volume01/pelestra/pelestra.htm>>. Acesso em: 02 out. 2016.

TITA, Volnei; DE CARVALHO, Jonas; DOS SANTOS, Neilor. Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos utilizando o método dos elementos finitos. In:

Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2., 2002, João Pessoa. **Anais eletrônicos...** João Pessoa: CONEM, 2002. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema01/CPB0100.PDF>>. Acesso em: 20 set. 2016.

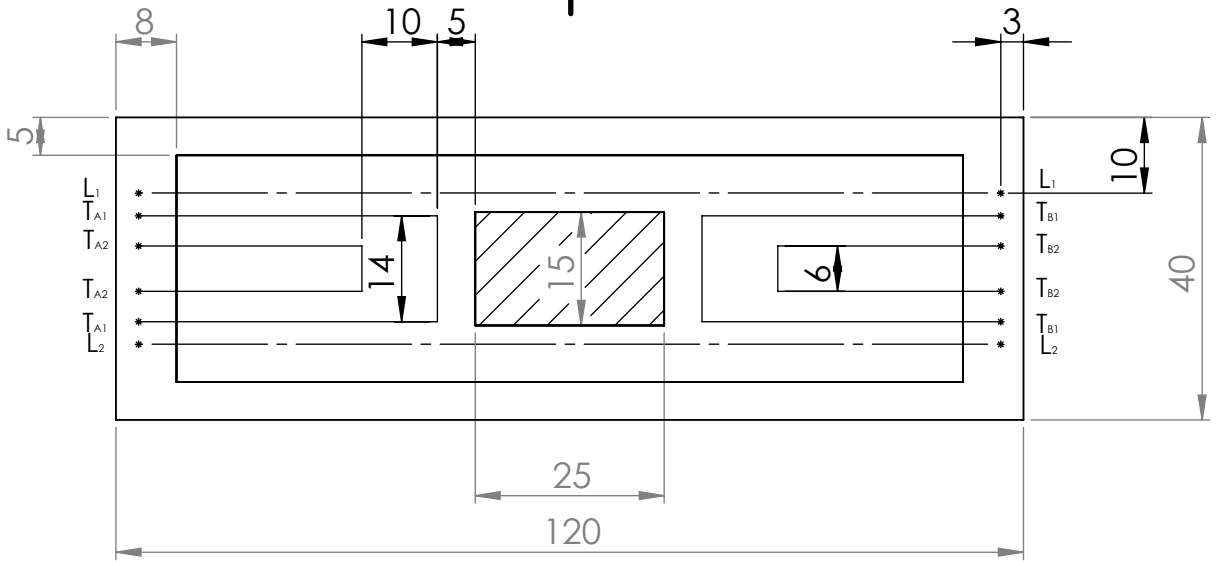
ZOLIN, Ivan. **Ensaaios Mecânicos e Análises de Falhas**. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. Santa Maria. 2010.

ANEXO A – Representação detalhada da amostra de compósito estudada

4 3 2 1

F

F

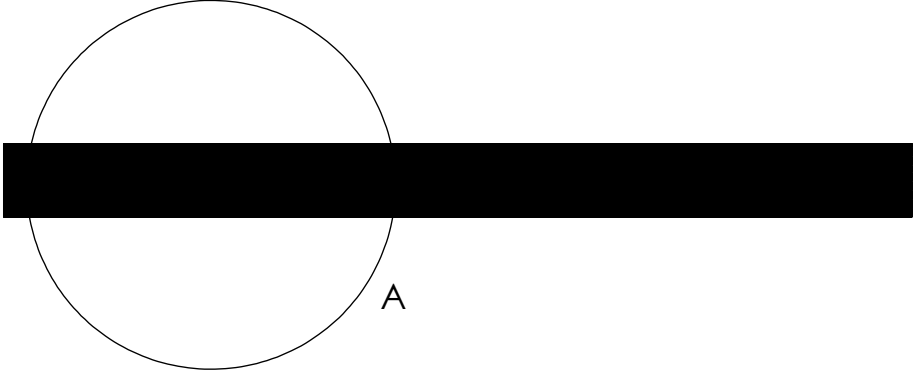


E

E

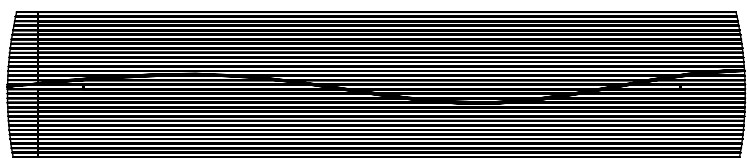
D

D



C

C



DETAIL A
SCALE 2 : 1

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO. **Sample_3_latest** A4

WEIGHT:

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

A

A