

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA EM COMPÓSITOS NANOESTRUTURADOS

## MECHANICAL CHARACTERIZATION IN NANOSTRUCTURED COMPOSITES

Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professora do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: marines.gomes@docente.evangelicagoianesia.edu.br

**Resumo:** Materiais compósitos são amplamente utilizados em diversos setores industriais devido a sua alta resistência e módulo de elasticidade, assim como a redução do peso que proporcionam ao substituir peças metálicas. Polímeros reforçados com fibras de carbono são comumente encontrados na indústria aeronáutica e aeroespacial, entretanto, existem desvantagens nestes sistemas de camadas tal como a susceptibilidade à fratura em regiões interlaminares, consequência da fraca compatibilidade entre a superfície da Fibra de Carbono e a matriz, gerando uma baixa adesão nesta interface. Diversos grupos de pesquisa têm trabalhado na modificação da superfície das fibras no intuito de aumentar a aderência e, entre as técnicas encontradas, o crescimento de Nanotubos de Carbono tem se mostrado um método promissor. Este trabalho apresenta uma breve explicação dos conceitos dos materiais nanoestruturados, baseados em fibras de carbono, matriz polimérica e nanotubos de carbono na sua composição. Além disso, mostra-se os ensaios mais utilizados para a caracterização mecânica de nano compósitos, os quais são: ensaio de cisalhamento interlaminar e ensaio de tenacidade à fratura.

**Palavras-chaves:** Compósitos, Nanotecnologia, Caracterização Mecânica

**Abstract:** Composite materials are widely used in various industrial sectors due to their high strength and modulus of elasticity, as well as the weight reduction they provide when replacing metal parts. Polymers reinforced with carbon fibers are commonly found in the aeronautical and aerospace industry, however, there are disadvantages in these layer systems such as the susceptibility to fracture in interlaminar regions, a consequence of the poor compatibility between the carbon fiber surface and the matrix, generating a low adherence in this interface. Several research groups have worked on modifying the surface of the fibers in order to increase adhesion and, among the techniques found, the growth of Carbon Nanotubes has shown to be a promising method. This work presents a brief explanation of the concepts of nanostructured materials, based on carbon fibers, polymer matrix and carbon nanotubes in their composition. Furthermore, the most used tests for the mechanical characterization of nanocomposites are shown, which are: interlaminar shear test and fracture toughness test.

**Keywords:** Composites, Nanotechnology, Mechanical Characterization

### INTRODUÇÃO

As fibras de carbono apresentam excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência e alto módulo de elasticidade. Porém, elas isoladas não apresentariam resistências elevadas sem uma matriz que permita transferir os esforços aplicados. Diferentes matrizes poliméricas são utilizadas para essa finalidade, as quais podem ser termorrígidas ou termoplásticas, originando um material compósito.

Atualmente existe um aumento significativo no uso de compósitos na indústria, especificamente no setor aeronáutico e aeroespacial, isto devido às vantagens que estes materiais oferecem. Uns dos fatores mais predominantes é a redução do peso, diminuindo o consumo de combustível, assim como também a sua alta resistência a fadiga e a corrosão que estes proporcionam<sup>1</sup>.

Apesar de todos os benefícios que os compósitos oferecem, a superfície lisa e quimicamente inerte da fibra de carbono (FC) inorgânica pode levar a uma fraca compatibilidade e adesão entre a fibra e a matriz, o que, por sua vez, afeta negativamente à adesão interfacial<sup>2</sup>. Para superar essas limitações, diversas pesquisas são destinadas à

modificação da superfície<sup>3</sup>. Dentro desses métodos, o revestimento de fibras com nanotubos de carbono (NTC's) tem se mostrado uma técnica promissora. Além destes possuírem excelentes propriedades elétricas e térmicas, os NTC's apresentam elevada resistência mecânica<sup>4</sup>, a qual pode ser transferida à matriz, eventualmente melhorando o desempenho do compósito.

A resistência ao cisalhamento interlaminar é uma propriedade que se vê influenciada diretamente pela presença dos NTC's, como é mostrado em alguns trabalhos de pesquisa. Por exemplo, Feng et al.<sup>5</sup> realizaram a deposição de NTC's em feixes de fibras de carbono curtas, obtendo uma melhora de 108% na resistência ao cisalhamento interlaminar. Em outro trabalho recente, Chaudhry et al.<sup>2</sup> obtiveram um aumento de 32% dispersando uniformemente NTC's na superfície de tecidos de fibra de carbono. Kim et al.<sup>6</sup> demonstraram a necessidade de adesão dos NTC's às fibras para obter os ganhos na resistência ao cisalhamento.

No presente trabalho são apresentados os conceitos necessários para o entendimento desses materiais

nanoestruturados, assim como os ensaios mais utilizados e indicados para a caracterização dessa classe de materiais.

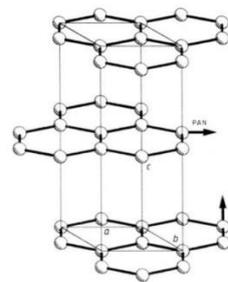
### Revisão Bibliográfica:

O termo compósito é utilizado quando dois ou mais fases homogêneas são combinadas, gerando um material heterogêneo, com propriedades superiores em comparação aos elementos de origem independentes. Atualmente, o termo compósitos é altamente utilizado em materiais que contêm fibras com alta resistência, embutidas numa matriz com uma resistência menor. Essa matriz tem como função manter a geometria e transmitir para as fibras as cargas aplicadas na peça. O resultado é um material com um desempenho mecânico superior ao da matriz isolada<sup>1</sup>.

Existem diversos tipos de reforço, como por exemplo: fibras naturais, fibra de vidro, fibra de aramida, fibra de carbono, entre outras. Ademais, estas fibras podem ser definidas pela orientação: unidirecionais, bidimensionais ou multidimensionais. Por outro lado, vários materiais são utilizados como matriz, e estes podem ser: matrizes cerâmicas, matrizes metálicas e matrizes poliméricas.

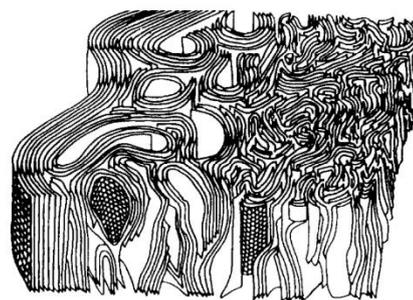
Dentro da família de matérias de carbono inorgânico, temos a grafite, formado por folhas de grafeno, que consistem numa estrutura hexagonal com átomos de carbono, e estas folhas são empilhadas paralelamente criando uma estrutura grafítica<sup>7</sup>. A figura 1 apresenta a célula unitária do grafite, cuja estrutura conta com ligações covalente na estrutura da própria folha de grafeno, e ligações fracas de Van der Waals entre estas folhas<sup>8</sup>.

As fibras de carbono são obtidas da decomposição térmica (pirólise) de materiais como poliacrilonitrila, rayon e piche, sob condições controladas, e destinadas à fabricação de materiais compósitos avançados<sup>9</sup>.



**Figura 1:** Célula unitária da Grafite

Na Figura 2 é mostrada a microestrutura da fibra de carbono, apresentada por Johnson<sup>9</sup>, a qual é uma estrutura de natureza fibrilar, imitando a estrutura fundamental da fibra polimérica precursora. Este esquema mostra como a amplitude da ondulação é maior no centro e menor perto da superfície da fibra, existindo vazios em forma de agulha entre os cristalitos na região externa da fibra e, nessa região, os planos das camadas são paralelos à superfície<sup>10</sup>.



**Figura 2:** Estrutura da Fibra de Carbono proposta por Johnson<sup>8</sup>.

Algumas propriedades dos compósitos, como resistência ao impacto, fluência em altas temperaturas, resistência a corrosão ou ataque químico, são determinadas pela matriz. Dentro do grupo das matrizes poliméricas mais usadas, encontram-se dois tipos principais: termorrígidas e termoplásticas. A principal diferença encontra-se no comportamento em altas temperaturas, enquanto os termoplásticos reagem como um fluido acima de certo nível de temperatura, os termorrígidos se degradam sem passar pelo estado fluido quando são aquecidos<sup>11</sup>.

Como já é sabido, os materiais compósitos têm uma ampla gama de aplicações em vários campos econômicos. Compósitos avançados são extensamente empregados em aeronaves de transporte comercial e militar, que comparados com os metais, têm vantagens como alta resistência e rigidez. Uma das grandes vantagens está na economia no peso de 10 a 60%, e essa redução de peso auxilia na redução de consumo de combustível, assim como aumento do alcance, carga útil, manobrabilidade e velocidade nas aeronaves<sup>12</sup>.

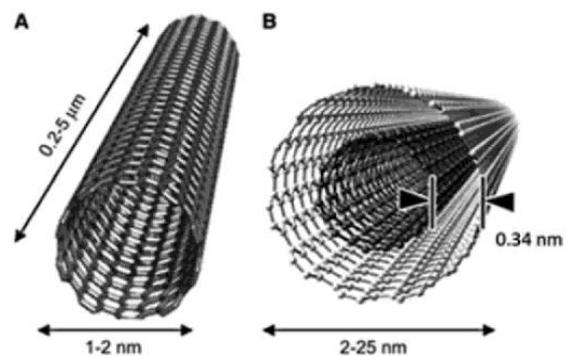
Os compósitos com fibras de carbono como reforço foram introduzidos no ano 1970, utilizados em aeronaves militares estadunidenses como o F-16 e F-18. Logo, a Airbus efetivou a primeira fabricação de aviões comerciais aplicando materiais compósitos em aproximadamente 10% do peso, iniciando com a aeronave A310 em 1987. A partir disso, o uso de materiais compósitos continuou crescendo, e atualmente as maiores aeronaves de transporte comercial, o Airbus 380 e o Boeing 787, são construídas com 25% e 50% em peso de compósitos, respectivamente<sup>13</sup>. Na Figura 3 podem-se observar os materiais usados no Boeing 787, e os compósitos ocupam 50%.



**Figura 3:** Materiais usados na fabricação da aeronave Boeing 787<sup>14</sup>.

A partir da descoberta do buckminsterfulereno ( $C_{60}$ ) em 1985, os cientistas mostraram um maior interesse no estudo em nanomateriais<sup>15</sup>. Foi Iijima<sup>16</sup> em 1991, o primeiro a descobrir, usando o mesmo processo para produzir  $C_{60}$  (arco elétrico), que o núcleo central de depósito catódico continha uma variedade de estruturas gráficas, incluindo os nanotubos de carbono (NTC).

A estrutura atômica dos NTC's consiste em átomos de carbono ligados covalentemente, compostos por orbitais híbridos  $sp^2$ , originando uma matriz hexagonal (folha de grafeno) enrolada em forma de tubo<sup>17</sup>. Os nanotubos podem ser de estruturas com parede única (*Single Walled Carbon Nanotube* – SWCNT), mostradas na Figura 4.A, ou com paredes múltiplas (*Multi Walled Carbon Nanotube* – MWCNT), ilustrados na Figura 4.B<sup>18</sup>.



**Figura 4:** Diagrama esquemático mostrando as dimensões típicas de comprimento, diâmetro e distância de separação de: (A) *Single Walled Carbon Nanotube* (SWCNT) e (B) *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT)<sup>19</sup>.

Muitas das propriedades dos nanotubos são extremas, entre elas está a elevada condutividade elétrica e térmica<sup>20</sup>, isto devido à estrutura atômica.

Outra propriedade bastante explorada dos NTC's é a alta resistência mecânica. A alta resistência à tração está diretamente relacionada ao grafeno, e a forma cilíndrica do nanotubo fornece estabilidade

estrutural<sup>21</sup>. Considerando o nanotubo como um material uniforme, o módulo de elasticidade pode superar o valor de 1 TPa, dependendo das dimensões: comprimento, diâmetro interno e externo<sup>22</sup>.

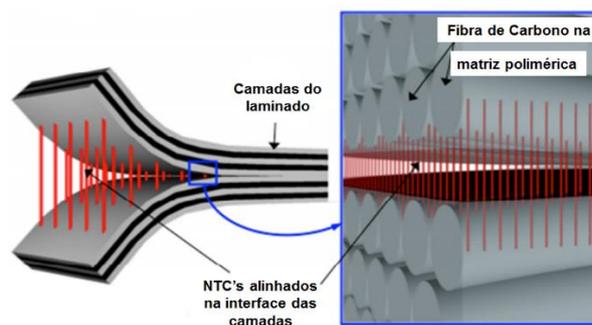
Todas essas excelentes propriedades tornam os NTC's fortes candidatos para o desenvolvimento de novos materiais, como por exemplo Compósitos Nanoestruturados ou Nanocompósitos.

Dentro dos compósitos, vem se formando um novo conjunto chamado nanocompósitos, termo usado quando um dos reforços tem dimensões menores que 100 nm. O desenvolvimento desse tipo de materiais vem acompanhado com a evolução da nanotecnologia, a qual estuda as propriedades de estruturas com tamanho de 1 a 100 nm e desenvolve formas de aproveitar essas propriedades.

Os nanocompósitos são materiais multifásicos e essas fases podem ser inorgânicas-inorgânicas, inorgânicas-orgânicas ou orgânicas-orgânicas, e o material resultante pode ser amorfo, cristalino ou semicristalino. Eles conseguem melhorar as propriedades mecânicas, eletrônicas, magnéticas e ópticas, não exibidas pelas fases individuais<sup>23</sup>.

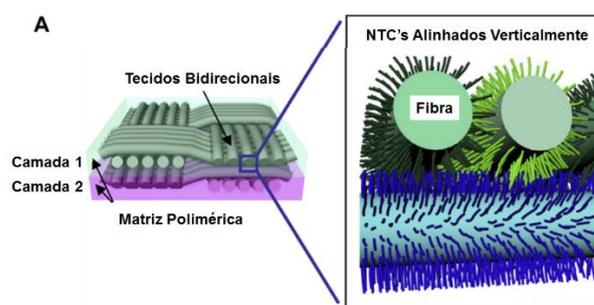
Dentro dos trabalhos de pesquisa, os NTC's mostraram excelentes candidatos para reforçar ainda mais as propriedades dos compósitos<sup>24</sup>. Uma das vantagens do uso de NTC's é a possibilidade de melhorar várias propriedades simultaneamente<sup>25</sup>.

Existem várias maneiras de incorporar os nanotubos no compósito, uma delas é adicionando-os na matriz polimérica antes da confecção do compósito. Neste caso, a função dos NTC's é auxiliar na resistência mecânica da matriz. Uma técnica proposta é chamada "nanocostura" (em inglês, "*nanostitching*"), onde os NTC's são colocados entre as camadas de laminados do compósito, a fim de ser absorvidos pela matriz polimérica<sup>26</sup>, como ilustrado na Figura 5.



**Figura 5:** Ilustração do conceito de Nanostitching<sup>26</sup>.

Outro método proposto na literatura, é a formação da interface fibra-matriz depositando NTC's radialmente nas fibras de tecidos unidirecionais ou bidirecionais, originando uma "fibra difusa" (do inglês *fuzzy fiber*)<sup>27</sup> como mostrado na Figura 6. Este processo permite uma maior área de contato e adesão entre a fibra e a matriz, reforçando as regiões interlaminares e intralaminares, e consequentemente aumentando a resistência interfacial e tenacidade do material.

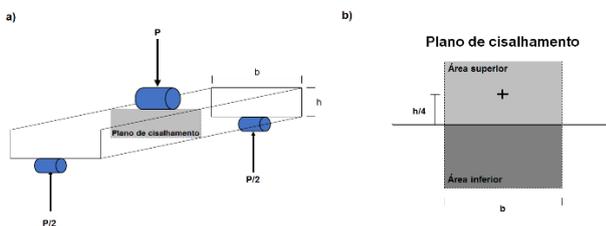


**Figura 6:** Ilustração esquemática da Fuzzy Fiber no nanocompósito<sup>28</sup>

De fato, as propriedades proeminentes dos NTC's, como módulo de elasticidade maior que 1 TPa e resistência a tração acima de 63 GPa<sup>29</sup>, fazem deles aliados interessantes para aumentar as propriedades mecânicas dos compósitos em direções diferentes à da fibra. Se as cargas aplicadas no compósito são transferidas aos nanotubos, o módulo do compósito deve ser similar ao de compósitos com fibras curtas, com módulo e resistência elevados. Além disso,

teríamos uma grande área de superfície, aumentando a área de contato entre a fibra e a matriz<sup>30</sup>. Diversos ensaios mecânicos podem ser grandes aliados para verificar as novas propriedades mecânicas quando NTC's são inseridos nas estruturas dos compósitos, entre os testes mais utilizados temos: ensaio de cisalhamento interlaminar e ensaio de tenacidade à fratura.

Um ensaio comumente utilizado para o estudo da resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos é o ensaio de cisalhamento interlaminar. Esse ensaio é baseado na norma ASTM D2344/D2344M e consiste em apoiar a amostra em dois roletes de 3 mm de diâmetro, com uma razão de espessura/vão de 1:4. Logo é aplicada uma carga  $P$  com um rolete de 6 mm de diâmetro, numa velocidade constante<sup>31</sup>. O funcionamento do ensaio está esquematizado na Figura 7.



**Figura 7:** Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento interlaminar e b) o plano central de cisalhamento.

A maneira mais indicada de interpretar este ensaio, é usar a clássica teoria do feixe. Nesta teoria, assume-se que a tensão de cisalhamento é distribuída parabolicamente ao longo do plano de cisalhamento, indicado na Figura 7.a, com um valor máximo no centro<sup>32</sup>. A tensão de cisalhamento tem a seguinte expressão:

$$\tau = \frac{VQ}{It}$$

Onde ' $V$ ' representa a carga cisalhante aplicada, ' $Q$ ' o momento da área, ' $I$ ' o momento de inercia e ' $t$ ' a

largura do feixe no plano de cisalhamento. Relacionando estes parâmetros com as dimensões do corpo de prova específico para este ensaio, como mostrado na Figura 7.b, onde  $h$  representa a espessura e  $b$  a largura da amostra, a definição destes parâmetros fica da seguinte forma:

$$V = \frac{P}{2} ; Q = A * \frac{h}{4} ; I = \frac{bh^3}{12} ; t = b$$

Por tanto, a expressão utilizada para calcular a tensão de cisalhamento ( $F^{sbs}$ ) no ensaio é a seguinte:

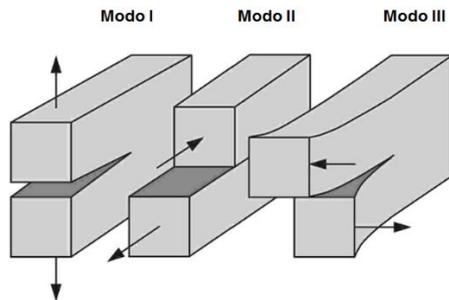
$$F^{sbs} = 0.75 * \frac{P}{b * h}$$

Nota-se também, na Figura 7, como a análise deste ensaio está direcionada para o plano central da amostra, o qual é submetido à tensão máxima de cisalhamento, com esforços de compressão nas camadas superiores e esforços de tração nas camadas inferiores. A delaminação entre as camadas é originada pela liberação de tensões concentradas no plano cisalhante. O intuito da utilização dos NTC's entre as camadas é aumentar a resistência ao cisalhamento do material.

A capacidade de resistir à propagação de trincas é caracterizada pela tenacidade à fratura interlaminar de um material, e essa propriedade depende de vários fatores. Em compósitos poliméricos, estes fatores incluem as propriedades interfaciais entre a fibra e matriz, o tipo de carga (tração e cisalhamento), as condições ambientais (temperatura e umidade) e a taxa de carga. Há também uma correlação entre a tenacidade dos polímeros puros e a tenacidade interlaminar dos compósitos associado<sup>33</sup>.

Existem três formas de carga que podem ser aplicadas a um compósito com uma pré-trinca, ilustradas na Figura 8. No modo I a carga é aplicada perpendicular ao plano da trinca, tendendo a propagar esta trinca através desse mesmo plano. O modo II corresponde a

um cisalhamento na direção da trinca, deslizando uma face contra a outra. Por último, o modo III indica um cisalhamento fora do plano da trinca. O modo I é ensaio mais indicado para analisar a tenacidade à fratura de nanocompósitos.

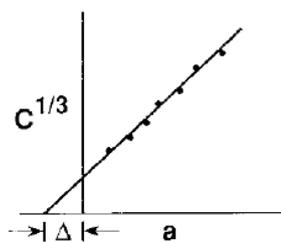


**Figura 8:** Os três modos de carga que podem ser aplicados numa pré-trinca<sup>34</sup>.

Para calcular a taxa de liberação de energia de deformação ( $G_{Ic}$ ) no modo I existem três métodos, e neste trabalho utilizou-se o método recomendado pela norma ASTM D5528<sup>35</sup>, o MBT (*modified beam theory*). A expressão usada é a seguinte:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)}$$

Onde  $P$  é a carga,  $\delta$  o deslocamento do ponto de carga,  $b$  a largura da amostra,  $a$  comprimento da delaminação e  $\Delta$  é utilizado para corrigir a rotação do feixe, o qual não é formado perfeitamente durante o ensaio. Este valor pode ser determinado gerando uma plotagem de mínimos quadrados da raiz cúbica do  $C^{1/3}$  (relação entre o deslocamento do ponto de carga e a carga aplicada,  $C=\delta/P$ ), como demonstrado na Figura 9.



**Figura 9:** Gráfico utilizado para determinar “ $\Delta$ ” na Teoria de Feixe Modificado<sup>35</sup>.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Apesar dos materiais compósitos serem cada vez mais utilizados em diferentes setores industriais, existe ainda uma razão limitante: a resistência mecânica em outras direções diferentes à direção da fibra. Com a chegada dos nanomateriais tornou-se possível aumentar a resistência mecânica dos compósitos, e assim aumentar a área de aplicação desses materiais na indústria. Os NTC's mostraram-se grandes aliados para esse objetivo, além de alterar certas características como por exemplo a condução elétrica do material. A facilidade e rapidez dos processos de produção dos NTC's incrementa ainda mais o interesse da comunidade científica para o estudo e aplicação dentro de diferentes áreas.

Em virtude da criação de materiais nanoestruturados ser uma estratégia ainda muito nova, é necessário o estudo das propriedades mecânicas, e assim demonstrar que essa técnica não altera outras características intrínsecas nos compósitos. O ensaio de resistência ao cisalhamento e o ensaio de tenacidade à fratura são métodos extremamente interessantes no momento de estudar o comportamento dos NTC's nos compósitos, principalmente porque estudam as camadas interlaminares do material.

Embora existam diversos estudos que demonstraram o aumento significativo nas propriedades mecânicas na utilização de NTC's nos compósitos, esses materiais são relativamente novos e requerem uma ampla análise e verificação para serem utilizados em grande escala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. **GAY, D.** Composite materials: design and applications. 3.ed. . Florida, United States: CRC Press, Taylor & Francis, 2014. p. 3-10.

2. **CHAUNDHRY, M. S.; CZEKANSKI, A.; ZHU, Z. H.** Characterization of carbon nanotube enhanced interlaminar fracture toughness of woven carbon fiber reinforced polymer composite. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 131-132, p. 1–27, 2017.
3. **THOSTENSON, E. T. et al.** Carbon nanotube/carbon fiber hybrid multiscale composites. *Journal of Applied Physics*, v. 91, n. 9, p. 6034–6037, 2002.
4. **Popov, V. N.** Carbon nanotubes: properties and application. *Material Science and Engineering R*, v. 43, p. 61–102, 2004.
5. **FENG, L. et al.** Compressive and interlaminar shear properties of carbon/carbon composite laminates reinforced with carbon nanotube-grafted carbon fibers produced by injection chemical vapor deposition. *Materials Science and Engineering A*, v. 626, p. 449–457, 2015.
6. **KIM, K. J. et al.** Microstructure and bonding strength of carbon nanotubes directly grown on a carbon fiber substrate. In: *EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, 15., 2012, Italia. *Proceedings...* 2012. p. 1–6.
7. **INAGAKI, M. et al.** Carbon alloys: novel concepts to develop carbon science and technology. United Kingdom: Elsevier, 2003. p. 7.
8. **JOHNSON, D. J.** Structure-property relationships in carbon fibres. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 20, p. 286–291, 1987.
9. **BAJPAI, P.** Carbon fibre from lignin. India: Springer Briefs in Materials, 2017. p. 1.
10. **EDIE, D. D.** The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers. *Carbon*, v. 36, n. 4, p. 345–362, 1998.
11. **PASCAULT, J. P. et al.** Thermosetting polymers. New York, United States: Marcel Dekker, 2002. p. 1.
12. **WANG, R.-M.; ZHENG, S.-R.; ZHENG, Y.-P.** Introduction to polymer matrix composites. *Polymer Matrix Composites and Technology*, p. 12–14, 2011.
13. **MALLICK, P. K.** Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. 2.ed. New York, United States: Marcel Dekker, 2007. p. 6–10.
14. **ERO MAGAZINE. HALE, J.** Boeing 787 from the Ground Up A, 2006. Disponível em: [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/AERO\\_Q406.pdf](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406.pdf). Acesso em: 11 set. 2018.
15. **REN, Z.; LAN, Y.; WANG, Y.** Aligned carbon nanotubes: physics, concepts, fabrication and devices. United States: Springer, 2013. p. 10.
16. **IJIMA, S.** Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, p. 56–58, 1991.
17. **ODOM, T. W. et al.** Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes. *Nature*, v. 391, p. 62–64, 1998.
18. **IJIMA, S.; ICHIHASHI, T.** Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, v. 363, p. 603–605, 1993.
19. **ZHANG, Q.** Carbon nanotubes and their applications. United States: Pan Stanford Publishing, 2012. p. 3–39.
20. **DAI, H.** Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties. *Accounts of*

- Chemical Research, v. 35, n. 12, p. 1035–1044, 2002.
21. **JORIO, A.; DRESSELHAUS, M. S.; DRESSELHAUS, G.** Carbon nanotubes: advanced topics in the synthesis, structure, properties and applications. United States: Springer, 2008. p. 5–10.
  22. **TREACY, M. M. J.; EBBESEN, T. W.; GIBSON, J. M.** Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, v. 381, p. 678–680, 1996.
  23. **ORIAKHI, C. O.** Polymer nanocomposition approach to advanced materials. *Journal of Chemical Education*, v. 77, n. 9, p. 1138–1146, 2000.
  24. **AYATOLLAHI, M. R. et al.** Effect of multi-walled carbon nanotube aspect ratio on mechanical and electrical properties of epoxy-based nanocomposites. *Polymer Testing*, v. 30, p. 548–556, 2011.
  25. **HOLLERTZ, R. et al.** Improvement of toughness and electrical properties of epoxy composites with carbon nanotubes prepared by industrially relevant processes. *Nanotechnology*, v. 22, p. 1–9, 2011.
  26. **VILLORIA, R. G. et al.** In-plane strength enhancement of laminated composites via aligned carbon nanotube interlaminar reinforcement. *Composites Science and Technology*, v. 133, p.1-13, 2016.
  27. **POZEGIC, T. R. et al.** Low temperature growth of carbon nanotubes on carbon fibre to create a highly networked fuzzy fibre reinforced composite with superior electrical conductivity. *Carbon*, v. 74, p. 319–328, 2014.
  28. **WICKS, S. S.; VILLORIA, R. G.; WARDLE, B. L.** Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, v. 70, p. 20–28, 2010.
  29. **HARRIS, P. J. F.** Carbon nanotube composites. *International Materials Reviews*, v. 49, n. 1, p. 31–43, 2004.
  30. **SCHADLER, L. S.; GIANNARIS, S. C.; AJAYAN, P. M.** Load transfer in carbon nanotube epoxy composites. *Applied Physics Letters*, v. 73, n. 26, p. 3842–3844, 1998.
  31. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)** ASTM D2344/D2344M: standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and laminates. United States, 2016. 8 p.
  32. **RYDER, G. H.** Strength of materials. 3.ed. New York, United States: Springer, 1969. p. 119-122.
  33. **SMILEY, A. J.; PIPES, R. B.** Rate effects on mode I interlaminar fracture toughness in composite materials. *Journal of Composite Materials*, v. 21, p. 670–687, 1987.
  34. **ANDERSON, T. L.** Fracture mechanics: fundamentals and applications. 4.ed. Florida, United States: CRC Press, Taylor & Francis, 2017. p. 45.
  35. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)** ASTM D5528: standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. United States, 2007. 12 p.