



**Estudo de Impacto em Materiais Compósitos  
Avançados – Avaliação numérica e experimental  
em perfis tubulares**

Mestrado em Engenharia Automóvel

Alexandre de Oliveira Neto

Leiria, novembro de 2023



**Estudo de Impacto em Materiais Compósitos  
Avançados – Avaliação numérica e experimental  
em perfis tubulares**

Mestrado em Engenharia Automóvel

Alexandre de Oliveira Neto

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Sérgio Pereira dos Santos e da Professora Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves

Leiria, novembro de 2023

# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, no ano letivo 2022/2023, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

Os meus adorados amigos e querida família foram fundamentais no apoio que me prestaram durante os momentos mais difíceis no decorrer do meu percurso académico, especialmente durante estes últimos meses mais marcantes da minha vida. Sem eles não seria de todo possível chegar onde cheguei, pois foram compreensivos, tolerantes e motivadores. Do fundo do coração, o meu obrigado.

Os meus orientadores, professores Sérgio Santos e Maria Leopoldina foram essenciais para que este longo e difícil trabalho pudesse ser realizado. São duas pessoas que guardarei na minha memória não só graças à sua ajuda e profissionalismo, mas também devido ao seu carácter, e por isso devo-lhes uma grande palavra de agradecimento pela sua paciência e orientação.

# Resumo

A utilização de materiais compósitos avançados é cada vez mais frequente em estruturas que suportam grandes esforços devido ao facto de possuírem uma elevada rigidez específica, o que permite reduzir o peso das estruturas. Os métodos de fabrico associados a este tipo de material fazem com que o elemento de reforço, a fibra, veja a sua integridade facilmente atingida com a ocorrência de pequenos impactos. O presente estudo teve como objetivo obter uma análise numérica e experimental do desempenho de perfis tubulares em polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) sujeitos a impactos transversais de baixa velocidade. Foram realizados vários ensaios numéricos de impacto em 5 tipos diferentes de empilhamentos com diferentes níveis de energia, através da definição de um gradiente, cujo primeiro nível era estudar a resistência ao dano invisível e o último a resistência ao dano visível. Dessa forma foi possível definir, para cada tubo ensaiado, o limite de energia que produz a deformação residual em cada nível. Os testes experimentais não foram realizados por motivos alheios ao autor. Conclui-se que, no que ao ensaio numérico diz respeito, que existem empilhamentos mais adequados para determinados tipos de esforços aplicados e finalidades, há uma relação direta entre a distribuição de tensões e orientação de cada lâmina do compósito, e que o empilhamento tem influência na capacidade de absorção de energia de tubos em fibra de carbono e conseqüentemente na manutenção da sua integridade.

**Palavras-chave:** Tubos, Compósitos, Impacto, Integridade, Dano.

# Abstract

The use of advanced composite materials is becoming increasingly common in structures that can withstand high stresses since they have a high specific stiffness, reducing the structures' weight. The manufacturing methods associated with this type of material mean that the reinforcing element, the fibre, is easily damaged by small impacts. This study aimed to obtain a numerical and experimental analysis of the performance of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) tubular profiles subjected to low-velocity transverse impacts. Several numerical impact tests were carried out on 5 different types of layups with different energy levels, by defining a gradient, the first level of which was to study the resistance to invisible damage and the last the resistance to visible damage. In this way, it was possible to define, for each tested tube, the energy limit that produces the residual deformation at each level. The experimental tests were not performed for reasons beyond the author's control. It can be concluded, as for the numerical test, that there are more suitable layups for certain types of applied stresses and purposes, that there is a direct relationship between the distribution of stresses and the orientation of each composite sheet, and that layup has an influence on the energy absorption capacity of carbon fibre tubes and consequently on maintaining their integrity.

**Keywords:** Tubes, Composites, Impact, Integrity, Damage.

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Organização do relatório .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Mecânica dos compósitos laminados .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. História e definição dos materiais compósitos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Constituição e classificação dos materiais compósitos .....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Fibras naturais .....	6
<b>2.3. Materiais isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos .....</b>	<b>7</b>
2.3.1. Lei de <i>Hooke</i> generalizada .....	8
<b>2.4. Estruturas de compósitos.....</b>	<b>9</b>
2.4.1. Compósitos com estrutura em sanduíche .....	13
<b>2.5. Perfis tubulares em compósito .....</b>	<b>14</b>
2.5.1. Métodos de fabrico .....	16
2.5.1.1. Pultrusão .....	16
2.5.1.2. Enrolamento filamentar .....	17
2.5.1.3. <i>Roll wrapping</i> .....	18
2.5.1.4. Entrelaçamento .....	19
<b>2.6. Materiais para compósitos e núcleos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.7. Caracterização das propriedades dos compósitos laminados .....</b>	<b>21</b>
<b>3. Comportamento de perfis tubulares .....</b>	<b>26</b>

<b>3.1.</b>	<b>Tensão de tração.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.</b>	<b>Compressão.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.</b>	<b>Flexão.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4.</b>	<b>Corte.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5.</b>	<b>Torção.....</b>	<b>30</b>
<b>3.6.</b>	<b>Impacto.....</b>	<b>31</b>
<b>3.7.</b>	<b>Diagrama de corpo livre do caso de estudo.....</b>	<b>32</b>
<b>4.</b>	<b>Critérios de falha analíticos.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.</b>	<b>Critérios de falha.....</b>	<b>33</b>
4.1.1.	Critério de falha da tensão máxima.....	35
4.1.2.	Critério da deformação máxima.....	35
4.1.3.	Critério de <i>Tsai-Hill</i> .....	36
4.1.4.	Critério de <i>Tsai-Wu</i> .....	36
<b>4.2.</b>	<b>Principais danos em compósitos.....</b>	<b>37</b>
4.2.1.	Danos em compósitos sujeitos a um impacto de baixa velocidade.....	38
<b>5.</b>	<b>Mecanismos de impacto de baixa velocidade.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.</b>	<b>Energias envolvidas num impacto.....</b>	<b>41</b>
<b>5.2.</b>	<b>Normas aplicáveis a ensaios de baixa velocidade em perfis compósitos tubulares.....</b>	<b>42</b>
5.2.1.	Teste <i>Izod</i> .....	43
5.2.2.	Teste <i>Charpy</i> .....	44
5.2.3.	Teste de impacto com pistão pneumático: <i>Split-Hopkinson Pressure Bar</i> (SHPB).....	44
5.2.4.	Teste de queda de peso.....	45
<b>5.3.</b>	<b>Técnicas de deteção de dano.....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>Estudos sobre impacto em perfis tubulares em material compósito.....</b>	<b>49</b>
<b>6.1.</b>	<b>Estudo 1.....</b>	<b>49</b>
<b>6.2.</b>	<b>Estudo 2.....</b>	<b>50</b>
<b>6.3.</b>	<b>Estudo 3.....</b>	<b>51</b>
<b>6.4.</b>	<b>Estudo 4.....</b>	<b>52</b>
<b>6.5.</b>	<b>Estudo 5.....</b>	<b>53</b>

<b>6.6.</b>	<b>Estudo 6 .....</b>	<b>54</b>
<b>6.7.</b>	<b>Visão geral dos estudos abordados .....</b>	<b>55</b>
<b>7.</b>	<b>Definição da escolha dos provetes .....</b>	<b>56</b>
<b>7.1.</b>	<b>Critérios de definição da escolha dos provetes .....</b>	<b>56</b>
7.1.1.	Materiais .....	56
7.1.2.	Método de fabrico.....	56
7.1.3.	Diâmetro externo/interno.....	57
7.1.4.	Número de camadas, orientação e espessura.....	59
7.1.5.	Comprimento .....	61
7.1.6.	Especificações dos provetes .....	61
<b>7.2.</b>	<b>Condições do ensaio de impacto.....</b>	<b>62</b>
<b>8.</b>	<b>Análise numérica do impacto .....</b>	<b>63</b>
<b>8.1.</b>	<b>Reprodução do aparato experimental em ambiente numérico .....</b>	<b>64</b>
<b>8.2.</b>	<b>Realização de ensaios de impacto em LS-DYNA.....</b>	<b>65</b>
<b>8.3.</b>	<b>Determinação de integridade por gradientes de energia de impacto .....</b>	<b>68</b>
<b>9.</b>	<b>Análise de resultados numéricos .....</b>	<b>69</b>
<b>9.1.</b>	<b>Nível 1: Dano interno invisível .....</b>	<b>70</b>
<b>9.2.</b>	<b>Nível 2: Dano intermédio .....</b>	<b>72</b>
<b>9.3.</b>	<b>Nível 3: Dano externo visível .....</b>	<b>74</b>
<b>9.4.</b>	<b>Análise de tendências .....</b>	<b>76</b>
<b>9.5.</b>	<b>Análise da deformação máxima .....</b>	<b>77</b>
<b>9.6.</b>	<b>Análise qualitativa dos danos .....</b>	<b>81</b>
<b>10.</b>	<b>Análise experimental.....</b>	<b>84</b>
<b>11.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>85</b>
<b>11.1.</b>	<b>Conclusões do estudo numérico .....</b>	<b>85</b>
<b>11.2.</b>	<b>Propostas de trabalhos futuros.....</b>	<b>86</b>
<b>12.</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Composição dos compósitos, adaptado de [2].....	5
Figura 2.2 – a) Fibras contínuas, b) Fibras descontínuas, c) Fibras descontínuas orientadas aleatoriamente [3] .....	5
Figura 2.3 – Aplicação de compósitos de fibra natural em painéis num veículo de competição <i>Super Formula</i> (painéis acastanhados) [6].....	7
Figura 2.4 – Barra linear à tração.....	8
Figura 2.5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a deformação num material isotrópico.....	9
Figura 2.6 – Relação entre o módulo de elasticidade e a deformação num material anisotrópico.....	9
Figura 2.7 – Exemplo de orientação da fibra numa lâmina plana.....	10
Figura 2.8 – Exemplos de entrelaçados de tecidos, adaptado de [9].....	10
Figura 2.9 – Codificação de orientação dos laminados: representação de um empilhamento de lâminas [10]	12
Figura 2.10 – Exemplos de empilhamentos com diversas ordens de camadas [10].....	12
Figura 2.11 – Exemplo de empilhamento unidirecional e empilhamento quase-isotrópico, adaptado de [4]..	13
Figura 2.12 – Exemplo de um compósito com estrutura em sanduíche.....	14
Figura 2.13 – Suspensão frontal direita do veículo de <i>Formula Student</i> T-24e da equipa LART ( <i>Leiria Academic Racing Team</i> ) .....	15
Figura 2.14 – Diagrama de um perfil tubular em fibra de carbono [11] .....	16
Figura 2.15 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por pultrusão [12].....	17
Figura 2.16 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por pultrusão, adaptado de [15].....	18
Figura 2.17 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por <i>roll wrapping</i> , adaptado de [17] .....	19
Figura 2.18 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por entrelaçamento, adaptado de [18] .....	19
Figura 2.19 – Referenciais LT de cada lâmina e XY do laminado .....	21
Figura 2.20 – Referenciais LT de cada lâmina e XY do laminado, adaptado de [23].....	22
Figura 2.21 – Forma de cálculo das propriedades de uma lâmina no referencial LT [10].....	23
Figura 2.22 – Exemplo de referência para cálculo relacionado com as matrizes <b>B<sub>ij</sub></b> e <b>D<sub>ij</sub></b> .....	25
Figura 3.1 – Gráfico genérico da relação entre força e deslocamento de um material, adaptado de [26] .....	26
Figura 3.2 – Diagrama do momento provocado por uma força.....	27
Figura 3.3 – Diagrama de um provete sujeito a uma força F de tensão de tração.....	27
Figura 3.4 – Comportamento de perfis tubulares sujeitos à compressão, adaptado de [27].....	28

Figura 3.5 – 3 Point Bending Test [29] .....	29
Figura 3.6 – Diagrama exemplificativo de um esforço de corte num perfil tubular .....	30
Figura 3.7 – Diagrama exemplificativo de um esforço de torção num perfil tubular [32] .....	31
Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre do caso de estudo.....	32
Figura 4.1 – Comparação entre teoria e testes experimentais da WWFE entre vários critérios de falha, adaptado de [37] .....	34
Figura 4.2 – Danos induzidos a um compósito sujeito a um impacto de baixa velocidade, adaptado de [41] .....	39
Figura 5.1 – Aparato exemplo do teste <i>Izod</i> , adaptado de [48] .....	44
Figura 5.2 – Aparato exemplo do teste SHPB, adaptado de [50] .....	45
Figura 5.3 – Máquina para testes de queda de peso [51].....	46
Figura 6.1 – Aparato experimental do estudo 1 [53].....	50
Figura 6.2 – Metodologia de testagem do estudo 3, adaptado de [55] .....	51
Figura 6.3 – Comparação entre resultados experimentais e testes de elementos finitos [56] .....	52
Figura 6.4 – Tipos de empilhamentos estudados, adaptado de [57] .....	53
Figura 8.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho de simulação numérica .....	63
Figura 8.2 – Modelação do aparato experimental no programa SolidWorks .....	64
Figura 8.3 – Aparato experimental final no LS-DYNA .....	64
Figura 8.4 – Realce da separação das 12 camadas do tubo .....	65
Figura 9.1 – Comparação da curva F-D entre tipos de tubos no nível 1 .....	71
Figura 9.2 – Comparação da curva E-T entre empilhamentos no nível 1 .....	71
Figura 9.3 – Comparação da curva F-D entre tipos de tubos no nível 2.....	72
Figura 9.4 – Comparação da curva E-T entre empilhamentos no nível 2.....	73
Figura 9.5 – Comparação da curva F-D entre tipos de tubos no nível 3.....	74
Figura 9.6 – Comparação da curva E-T entre empilhamentos no nível 3.....	75
Figura 9.7 – Variação da percentagem de energia elástica com a energia crítica de impacto .....	76
Figura 9.8 – Variação da energia crítica de impacto com a deformação plástica.....	77
Figura 9.9 – Vista de topo da deformação máxima principal no tubo tipo A.....	78
Figura 9.10 – Vista de topo da deformação máxima principal no tubo tipo B .....	79
Figura 9.11 – Vista de topo da deformação máxima principal no tubo tipo C .....	79
Figura 9.12 – Vista de topo da deformação máxima principal no tubo tipo D.....	80

Figura 9.13 – Vista de topo da deformação máxima principal no tubo tipo E.....	80
Figura 9.14 – Comparação entre danos causados aos provetes consoante o nível de energia.....	81

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação dos tipos de materiais como reforço, matriz e núcleo [20] .....	20
Tabela 6.1 – Resumo das especificações dos provetes dos estudos semelhantes abordados.....	55
Tabela 7.1 – Variação do diâmetro externo e interno consoante os estudos abordados .....	57
Tabela 7.2 – Orientação dos laminados dos estudos 1 e 5.....	59
Tabela 7.3 – Especificações finais dos provetes.....	61
Tabela 8.1 – Parâmetros de simulação no LS-DYNA.....	66
Tabela 8.2 – Parâmetros do MAT055. Variáveis não representadas significa que os seus valores são os definidos por defeito.....	67
Tabela 8.3 – Parâmetros do MAT001. Variáveis não representadas significa que os seus valores são os por defeito.....	67
Tabela 8.4 – Parâmetros do MAT024. Variáveis não representadas significa que os seus valores são os por defeito.....	67
Tabela 9.1 – Gradientes de energia resultantes para cada tipo de empilhamento.....	70
Tabela 9.2 – Valores de pico máximo de força e deformação plástica consoante o tipo de tubo no primeiro nível.....	71
Tabela 9.3 – Variação da energia elástica absorvida com o tipo de tubo no primeiro nível.....	72
Tabela 9.4 – Valores de pico máximo de força e deformação plástica consoante o tipo de tubo no segundo nível.....	73
Tabela 9.5 – Variação da energia elástica absorvida com o tipo de empilhamento no segundo nível .....	74
Tabela 9.6 – Valores de pico máximo de força e deformação plástica consoante o tipo de empilhamento no terceiro nível.....	75
Tabela 9.7 – Variação da energia elástica absorvida com o tipo de empilhamento no terceiro nível.....	76

## Lista de siglas e acrónimos

ACI International	American Concrete Institute International
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Carbon fibre-reinforced polymer
$E_c$	Energia cinética
$E_{pg}$	Energia potencial gravítica
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
ISO	International Organization for Standardization
LART	Leiria Academic Racing Team
SAE International	Society of Automotive Engineers International
SHPB	Split-Hopkinson Pressure Bar
WWFE	World-Wide Failure Exercise

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O presente Estudo de Impacto em Materiais Compósitos Avançados – Avaliação numérica e experimental em perfis tubulares, visa a análise de vários tipos de empilhamentos do laminado e na sua influência quando sujeito a impactos de baixa velocidade num perfil tubular em material compósito. A utilização de materiais compósitos avançados é cada vez mais frequente em estruturas que suportam grandes esforços, pois possuem uma rigidez específica elevada, o que permite reduzir o peso das estruturas. No entanto, quando sujeitos a alguns cenários de carregamentos específicos, estes podem apresentar danos comuns como a delaminação e a fissuração da fibra e/ou da matriz, especialmente sob impactos, em particular de baixa velocidade, os quais são muito comuns em condições de serviço frequentes, resultando em consequências que são frequentemente ignoradas por não serem identificáveis a olho desarmado.

Os métodos de fabrico associados a este tipo de materiais fazem com que o elemento de reforço, a fibra, veja a sua integridade facilmente atingida com a ocorrência de pequenos impactos. Logo, o correto dimensionamento destes componentes estruturais é chave para o seu eficaz desempenho a longo prazo, especialmente sob cargas reduzidas ou impercetíveis, mas potencialmente danosas. Como tal, pretende-se com o presente trabalho:

- Contribuir para avanços no correto dimensionamento de perfis tubulares em material compósito;
- Contribuir para a compreensão do efeito dos empilhamentos em tubos sujeitos a impactos de baixa velocidade;
- Alargar o conhecimento sobre o campo em evolução dos materiais compósitos laminados com funções estruturais.

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal do presente estudo é avaliar perfis tubulares numericamente. Para se atingir o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Rever os modelos de comportamento mecânico de perfis tubulares em material compósito;
- Definir provetes tubulares em compósito laminado para a realização de testes de impacto;
- Estudar mecanismos de impacto sofridos pelos provetes e consequente influência na integridade estrutural do elemento compósito;
- Analisar os resultados obtidos através dos ensaios de impacto do nível de integridade resultante no compósito laminado (avaliação numérica e experimental);
- Comparar os resultados experimentais com os obtidos através da análise pelo método dos elementos finitos;
- Estudar a relação entre níveis de impacto e manutenção da integridade estrutural do material.

## 1.3. Organização do relatório

O presente relatório está organizado em 11 capítulos distintos:

- **Capítulo 1:** Enquadramento, objetivos do tema abordado e organização do presente documento;
- **Capítulo 2:** Apresentação dos principais fundamentos sobre mecânica dos compósitos laminados, onde se aborda a história, constituição, estruturas, geometrias e caracterização de materiais compósitos;
- **Capítulo 3:** Apresentação do comportamento de perfis tubulares quando sujeitos a cargas, e um diagrama de corpo livre do caso de estudo em análise;
- **Capítulo 4:** Identificação dos principais critérios de falha e danos em compósitos;
- **Capítulo 5:** Identificação dos mecanismos de impacto de baixa velocidade;
- **Capítulo 6:** É apresentada uma revisão bibliográfica de diversos estudos pertinentes para o presente estudo;

- **Capítulo 7:** É definida a metodologia utilizada na obtenção dos provetes utilizados no presente estudo;
- **Capítulo 8:** Apresenta-se a análise numérica do impacto a baixas velocidades;
- **Capítulo 9:** É efetuada uma análise de resultados numéricos obtidos;
- **Capítulo 10:** Os testes experimentais são abordados;
- **Capítulo 11:** São apresentadas as principais conclusões do presente trabalho.

## **2. Mecânica dos compósitos laminados**

No presente capítulo é explorada a mecânica intrínseca dos compósitos laminados, começando pela história e definição dos materiais compósitos e avançando para explorar diversos fatores, desde a constituição e classificação até as características específicas de estruturas, perfis tubulares, materiais para compósitos e núcleos, culminando na importante caracterização das propriedades. Cada subcapítulo contribui para a compreensão e complexidade e características dos compósitos laminados.

### **2.1. História e definição dos materiais compósitos**

Os materiais compósitos não são algo recente, datando até milhares de anos atrás. Aproximadamente em 3400 a.c., madeira, lama e palha serviram de materiais compósitos no dia a dia. Armas convencionais da época, como um arco mongol, viram a sua performance ser melhorada graças à utilização de materiais compósitos, onde as combinações de madeira com tendões de vaca perfaziam a parte elástica desse componente [1].

Um material é compósito quando a sua constituição é composta por dois ou mais materiais diferentes combinados ao nível macroscópico, resultando num outro material com propriedades únicas. As notáveis diferenças químicas e/ou físicas entre os materiais estão na base da motivação para a combinação dos mesmos, sendo que o novo material terá características distintas e de desempenho superior ao de cada um em separado.

### **2.2. Constituição e classificação dos materiais compósitos**

Numa definição mais técnica, um compósito é um material constituído por um reforço e uma matriz, onde o reforço está embutido na matriz (Figura 2.1). Os reforços são tipicamente fibras, mas também podem ser partículas ou apresentar-se noutras configurações (fibras curtas, longas, mantas, ...).

As características dos compósitos são influenciadas pela geometria, propriedades e distribuição dos seus constituintes. Geralmente, a sua designação deriva do tipo de material utilizado como matriz.

## Composição dos compósitos

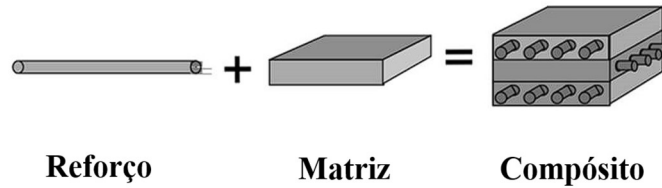


Figura 2.1 – Composição dos compósitos, adaptado de [2]

Graças ao meio providenciado pela matriz, o constituinte que atua em conjunto com a mesma são as fibras, que são tipicamente um material ortotrópico. Consistem em milhares de filamentos em que cada um tem dimensões entre cinco a quinze micrómetros, e podem ser contínuas, descontínuas, ou descontínuas orientadas aleatoriamente (Figura 2.2), entre outras orientações que posteriormente serão abordadas.

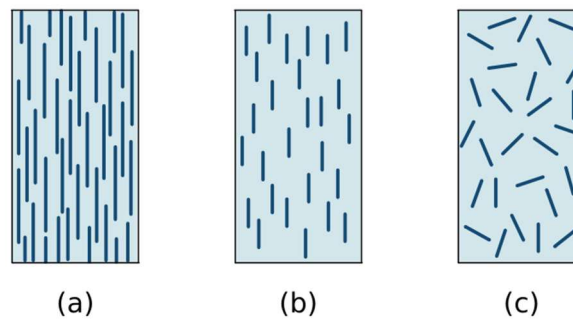


Figura 2.2 – a) Fibras contínuas, b) Fibras descontínuas, c) Fibras descontínuas orientadas aleatoriamente [3]

As fibras contínuas são tipicamente alinhadas numa direção específica dependendo da aplicação, utilizadas frequentemente para conduzir a propriedades mecânicas melhoradas no compósito, tais como a resistência e a rigidez. Por outro lado, as fibras descontínuas têm comumente um alinhamento relativamente aleatório e não proporcionam o mesmo nível de desempenho mecânico (com um custo inferior às fibras contínuas). As principais fibras utilizadas são a fibra de vidro, aramida, carbono, boro e carbetto de silício [4].

A função da matriz, material isotrópico, é não só distribuir e manter em posição as fibras, mas também transmitir os esforços mecânicos aplicados, bem como atuar como meio de proteção dos desafios do meio ambiente circundante (humidade, radiação, etc..), sendo de extrema importância nas propriedades mecânicas do compósito. As suas propriedades, como a sua resistência, tenacidade e rigidez, têm influência direta nessas propriedades gerais do

compósito. Como exemplo de matrizes temos as poliméricas (resinas termoplásticas), minerais e metálicas, as quais estão entre as mais comuns.

### **2.2.1. Fibras naturais**

Uma área que tem vindo a ser explorada recentemente é a aplicação de fibras naturais como constituição do reforço devido à crescente preocupação com o impacto ambiental das fibras sintéticas.

As fibras sintéticas poliméricas são derivadas de combustíveis fósseis não renováveis e a sua produção pode gerar emissões nocivas e poluentes, assim como o facto de não serem biodegradáveis.

Por outro lado, as fibras naturais são derivadas de plantas e animais, sendo renováveis e biodegradáveis. A sua produção requer significativamente menos energia do que as fibras sintéticas e gera menos emissões. Além disso, as fibras naturais são frequentemente cultivadas e processadas localmente, o que reduz a pegada de carbono associada ao seu transporte. Adicionalmente, os compósitos de fibras naturais têm menor densidade e menor condutividade térmica do que os compósitos de fibras sintéticas. Estas características tornam-nas adequadas para utilização numa vasta gama de produtos e podem melhorar o desempenho global dos compósitos, sendo cada vez é mais frequente encontrar tais materiais na indústria automóvel.

No entanto, aspetos como fraca durabilidade, pobre resistência mecânica a temperaturas elevadas, superior absorção de humidade, mas especialmente piores propriedades mecânicas nomeadamente na resistência ao impacto tornam as fibras naturais aplicáveis a distintas aplicações comparativamente às fibras sintéticas [5].

É espectável que a sua utilização continue a crescer à medida que os consumidores e as indústrias se tornem mais conscientes do seu impacto ambiental, desenvolvendo este tipo de reforço de tal forma a minimizar os seus pontos fracos, especialmente para a indústria automóvel.

Dito isso, a empresa suíça *BComp* tem sido uma de algumas especializadas no desenvolvimento de reforços com fibras naturais para aplicações automóveis, desportos motorizados, marítimas e lazer, para componentes cujo objetivo seja decoração, aplicações

pouco exigentes em termos de resistência ao impacto e tendo a sustentabilidade como objetivo primário.

Na Figura 2.3 é possível visualizar a utilização de painéis compósitos de fibra natural num veículo de competição *Super Formula*, onde a sua função é cobrir alguns componentes mecânicos do veículo.



**Figura 2.3 – Aplicação de compósitos de fibra natural em painéis num veículo de competição *Super Formula* (painéis acastanhados) [6]**

Os compósitos de fibras naturais são cada vez mais utilizados em estruturas não muito complexas, e no que diz respeito a estruturas tubulares, ainda existe pouco desenvolvimento, devido à referida baixa resistência ao impacto, mas também à dificuldade da correta dispersão e alinhamento das fibras dentro da matriz. Em determinados métodos de fabrico de perfis tubulares, o produto final facilmente apresenta reduzidas propriedades mecânicas, principalmente as que dependem da fonte, forma de armazenamento e natureza das fibras [7].

Nos dias de hoje, os tipos de fibras naturais comumente utilizadas são o linho, o cânhamo, a juta, o sisal, entre outras, existindo um constante desenvolvimento para poder utilizar diferentes materiais para diferentes aplicações.

### **2.3. Materiais isotrópicos, anisotrópicos e ortotrópicos**

O material pode definir-se por uma substância ou matéria da qual algo é constituído, existindo diferentes tipos passíveis de classificação: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Podem ainda ser categorizados consoante a sua deformação aquando da variação da direção dos carregamentos a que estão sujeitos.

Um material isotrópico é aquele que, independentemente da direção em que possa sofrer um carregamento, a sua resistência e rigidez mantêm-se, causando, portanto, deformações idênticas em qualquer direção.

Um material anisotrópico é caracterizado por apresentar diferentes propriedades mecânicas em todas as diferentes direções, o oposto da isotropia. Estes podem ser sólidos, líquidos ou gases.

Um material ortotrópico é um tipo de material anisotrópico que apresenta resultados de deformação idênticos e previsíveis em três direções (eixos ortogonais), mutuamente perpendiculares, causados por um estímulo. De entre as suas características destaca-se o facto de serem constituídos por estruturas longas e finas, como fibras.

Um compósito, ao combinar um material isotrópico (na matriz) e um ortotrópico (no reforço) dá origem a um material com qualidades que nenhum dos dois possui individualmente, sendo geralmente um material com propriedades anisotrópicas. No entanto, por exemplo, existe a possibilidade de agrupar várias camadas de fibra de tal forma que o material final resultante adquira propriedades quase-isotrópicas. No subcapítulo 2.4 serão explorados esses tipos de possibilidades.

### 2.3.1. Lei de *Hooke* generalizada

A lei de *Hooke* generalizada estabelece uma relação de proporcionalidade direta entre a deformação e tensão (*stress* e *strain*) numa barra linear sujeita a esforços de tração (Figura 2.4) [8].

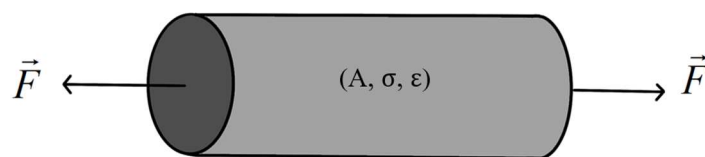


Figura 2.4 – Barra linear à tração

Onde:

- $\sigma$  = Tensão [Pa];
- $F$  = Força Aplicada [N];
- $A$  = Área [m<sup>2</sup>];

- $E$  = Constante de proporcionalidade (módulo de elasticidade) [Pa];
- $\varepsilon$  = Deformação [ ].

Num material isotrópico, devido ao facto de as propriedades serem constantes em qualquer direção, quando é aplicado um carregamento axial a tensão será constante, pois o módulo de elasticidade e a deformação também são constantes. Ou seja, há uma relação diretamente proporcional entre a deformação e a tensão aplicada (Figura 2.5).

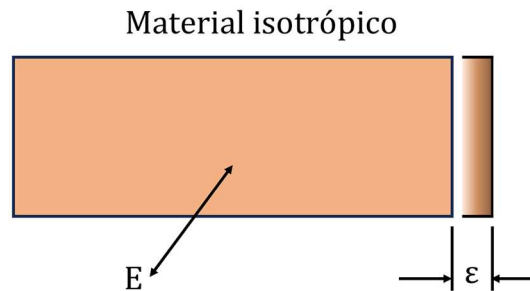


Figura 2.5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a deformação num material isotrópico

Quando é aplicado um carregamento axial num material anisotrópico (Figura 2.6), que apresenta propriedades distintas em diferentes direções, graças à variação do módulo de elasticidade a tensão será igualmente variável, apesar da deformação causada ser igual no caso do material isotrópico.

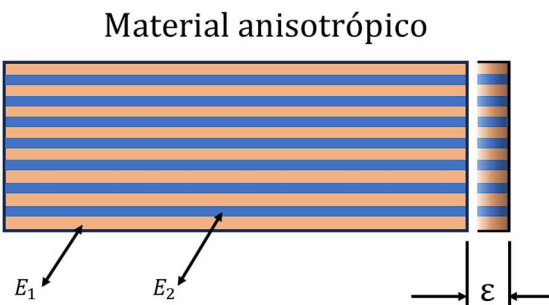


Figura 2.6 – Relação entre o módulo de elasticidade e a deformação num material anisotrópico

## 2.4. Estruturas de compósitos

Os materiais compósitos laminados consistem em camadas de pelo menos dois materiais diferentes que estejam unidos, em que uma lâmina (também apelidada de camada ou folha) é a base da sua construção. Numa lâmina, as fibras contínuas (a que serão dadas maior ênfase nesta dissertação) podem ser dispostas de determinadas formas.

Em cada lâmina, a orientação tem por base o ângulo das mesmas em relação a um diferencial relativo. Na Figura 2.7 observa-se um exemplo da orientação da fibra numa lâmina.

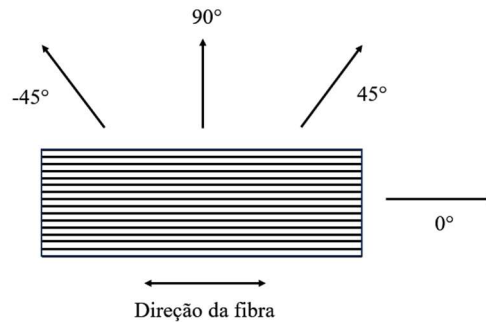


Figura 2.7 – Exemplo de orientação da fibra numa lâmina plana

Abordando alguns exemplos típicos, numa lâmina, nada impede que fibras contínuas sejam sobrepostas e entrelaçadas numa disposição orientada a 0° e 90°, criando o que se denomina de tecido 1x1 simples, facilitando o manuseamento, ao invés de fibras individuais orientadas a 0°.

Um tecido sarja possui as fibras dispostas na diagonal, com ângulos tipicamente entre 30° e 45°, encontrando-se na Figura 2.8 alguns tipos de configurações de entrelaçados comuns. Dessa forma, consoante as orientações de cada tecido, existem determinadas disposições que serão mais adequadas para suportar determinados carregamentos.

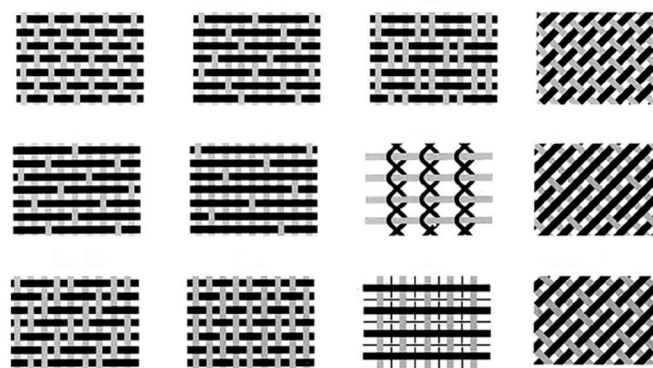


Figura 2.8 – Exemplos de entrelaçados de tecidos, adaptado de [9]

A combinação de diversas lâminas forma um laminado, em que o mesmo pode ser formado por diversos materiais com diversas orientações não só nas lâminas, mas também dos próprios laminados. Como exemplo, se um laminado estiver a ser utilizado numa aplicação estrutural, podem ser colocadas camadas de um material mais resistente e rígido, como a

fibra de vidro ou fibra de carbono, nas camadas exteriores, enquanto um material mais flexível e resistente ao impacto, como espuma ou borracha, pode ser colocado nas camadas intermédias. Isto cria um laminado que é simultaneamente resistente e capaz de resistir a impactos.

Do ponto de vista das vantagens da sua utilização, as diferentes disposições das fibras num laminado permitem que uma vasta gama de propriedades, tais como uma excelente relação entre peso e resistência, flexibilidade e condutividade térmica, sejam adaptadas aos requisitos específicos da aplicação. Isto torna os laminados materiais versáteis que podem ser utilizados em muitas indústrias e aplicações diferentes.

No entanto, a anisotropia, a absorção de humidade comprometedoras das propriedades mecânicas e a delaminação (separação das lâminas num compósito) são exemplos de algumas desvantagens destes materiais. A suscetibilidade a falhas catastróficas quando um defeito específico atinge determinada escala é também uma desvantagem, mas especialmente a dificuldade de inspeção de danos nas camadas não visíveis é um fator a ter em consideração se se pretender manter a longevidade da integridade das peças, em particular quando a sua função é suportar frequentemente elevadas cargas mecânicas. Os aspetos anteriormente mencionados podem ocorrer mesmo quando um laminado é corretamente fabricado, não obstante, podem ser acelerados por eventuais erros humanos de fabrico. Esses erros podem ser de várias naturezas, tais como uma mistura errónea ou cura imprópria da resina como matriz, incorreta disposição e espessura das lâminas, manuseamento pouco prudente ou pessoal não qualificado, ou a realização de um processo de cura da junção do reforço e matriz com temperatura ou duração errados.

De forma a entender as possibilidades de formação e a correta identificação de um empilhamento (conjunto de lâminas), há que compreender a utilização da nomenclatura comumente empregada para a codificação e orientação dos laminados.

Para identificar o empilhamento utiliza-se a seguinte nomenclatura (equação 1):

$$[\theta_1 / \theta_2 / \dots / \theta_n], \text{ com } \theta_n = \text{ângulo da lâmina } n \text{ [}^\circ\text{]} \quad (1)$$

Pode observar-se na Figura 2.9 a representação de um empilhamento de lâminas, tendo identificado devidamente cada uma, segundo a nomenclatura apresentada na equação 1.

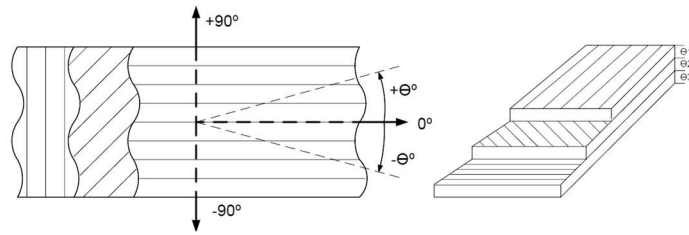


Figura 2.9 – Codificação de orientação dos laminados: representação de um empilhamento de lâminas [10]

A ordem das camadas do empilhamento é traduzida pelos ângulos apresentados, não obstante existirem formas de simplificação, como múltiplos e formas condensadas, para empilhamentos mais numerosos que apresentem seqüências de orientações idênticas (Figura 2.10).

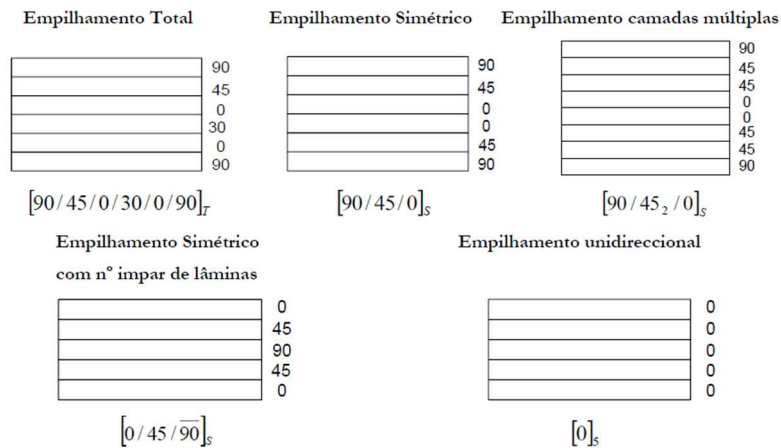


Figura 2.10 –Exemplos de empilhamentos com diversas ordens de camadas [10]

Organizando diversas lâminas em diferentes orientações é possível criar um laminado com propriedades mecânicas distintas para a aplicação desejada, bem como obter uma maior resistência na direção do carregamento. A orientação das fibras tem um impacto direto nas propriedades mecânicas do laminado.

Quando um carregamento é aplicado na direção das fibras unidirecionais, podem esperar-se bons resultados relativamente ao deslocamento, pois na sua direção as fibras são extremamente resistentes [4]. Sabendo isso, naturalmente surge uma ideia de dispor, num laminado, as lâminas em todas as orientações para que, independentemente da direção de um carregamento, a peça seja o mais resistente possível. Por outro lado, isso seria pouco prático de implementar no momento da manufatura.

Assim sendo, em placas planas, uma prática comum é construir o laminado com a orientação  $[0/90/+45/-45]_S$  (Figura 2.11). Portanto, partindo do princípio em que, quando a uma fibra

unidirecional é aplicada uma força perpendicular à mesma esta não apresenta grandes resultados a nível de comportamento mecânico, com o desenvolvimento dessa lógica de construção conseguiu-se obter um compósito que apresenta praticamente as mesmas deformações em qualquer direção no seu próprio plano: um material quase-isotrópico, onde a resistência à tração e compressão é similar. A utilização de camadas com orientações na ordem de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  (inclusive) providenciam uma maior resistência a esforços de corte.

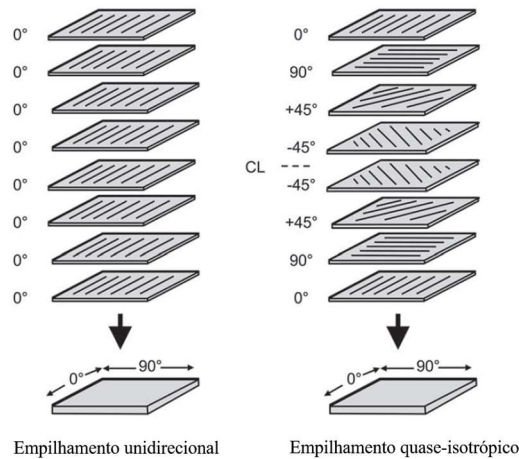


Figura 2.11 – Exemplo de empilhamento unidirecional e empilhamento quase-isotrópico, adaptado de [4]

Por outro lado, existe um aspeto que pode ser problemático. Em termos de cargas perpendiculares ao laminado, independentemente do número de lâminas e das suas orientações, as eventuais propriedades quase-isotrópicas não terão influência pois não é possível orientar uma lâmina verticalmente num único laminado. Sendo assim, existem técnicas utilizadas para aumentar a resistência à flexão do mesmo.

#### 2.4.1. Compósitos com estrutura em sanduíche

Este tipo de compósitos laminados são uma classe especial onde diferentes tipos de materiais são unidos, de forma que o material final detenha a funcionalidade desejada. Geralmente, é constituído por múltiplas camadas de material e um núcleo ensanduichado por esse laminado, onde a sua junção é promovida por um adesivo (Figura 2.12). A estrutura visa minimizar a fragilidade de um laminado simples.

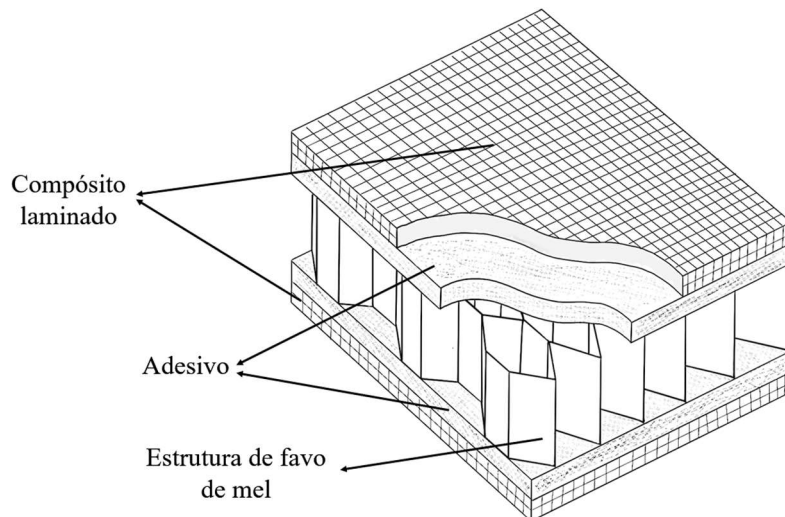


Figura 2.12 – Exemplo de um compósito com estrutura em sanduíche

Os laminados que conformam o núcleo são concebidos para transferir as forças para o mesmo. O adesivo utilizado deve ter resistência suficiente para resistir às tensões criadas pela transferência de forças interior. O material utilizado como núcleo (no caso da Figura 2.12 é uma estrutura de favo de mel) é leve e providencia resistência e rigidez à estrutura, bem como o suporte para que as lâminas e o adesivo possam estar em devido contacto. Esse contacto é importante para que o material final apresente uma resistência global uniforme.

As combinações dos diferentes tipos de materiais providenciam uma vantagem estrutural ao material final, isto porque individualmente o desempenho do laminado e do núcleo é inferior à combinação dos mesmos.

Estes tipos de estruturas têm como vantagens a sua muito elevada relação rigidez/peso e elevada relação resistência à flexão/peso, bem como boas propriedades de isolamento térmico. Adicionalmente, algumas combinações providenciam excelentes características de absorção de energia mecânica, resistência à fadiga e isolamento acústico. Por outro lado, o elevado custo, a tendência à delaminação, vulnerabilidade ao impacto e complexidade do design (i.e., escolha de materiais correta para suportar os esforços da aplicação desejada) são alguns dos aspetos negativos. Tendo em conta os pontos fortes e fracos, ainda assim podem ser encontrados nas indústrias civil, marinha, aeroespacial e automóvel.

## 2.5. Perfis tubulares em compósito

Os compósitos podem tomar diversas formas geométricas, consoante o pretendido. Um perfil tubular em compósito é uma estrutura tubular fabricada a partir de materiais compósitos.

Este tipo de estruturas são resultado de uma natural evolução dos laminados planares, pois com o avanço da tecnologia e a crescente necessidade de construções leves e resistentes, formas geométricas mais complexas começaram a ser exploradas. Podem ser perfis tubulares de secção circular, quadrangulares ou retangulares. A sua espessura é determinada pelas cargas a suportar consoante a aplicação.

Na indústria automóvel, a tendência é serem cada vez mais utilizados. Geralmente são encontrados em estruturas de chassis, carroçarias, peças de motores, interiores, mas especialmente em suspensões (Figura 2.13), tais como braços de suspensão, particularmente em veículos de competição.



**Figura 2.13 – Suspensão frontal direita do veículo de *Formula Student T-24e* da equipa *LART (Leiria Academic Racing Team)***

Os motivos para os perfis tubulares serem escolhidos para essas aplicações prendem-se com o facto de serem muito resistentes à flexão, tração e compressão, apresentando baixo peso e boa relação custo-benefício: a sua forma geométrica permite uma distribuição de cargas de forma mais eficiente. Adicionalmente, são resistentes à corrosão e intempéries, o que os torna ideais para uso em ambientes externos. Para se maximizarem tais vantagens, é necessário um cuidado especial durante o seu fabrico e manutenção, de modo a garantir a segurança e integridade estrutural, mas especialmente na sua fase de dimensionamento.

Fundamentalmente, um perfil tubular em material compósito não deixa de ser um laminado composto por lâminas com várias orientações possíveis. A Figura 2.14 ilustra isso mesmo, onde está representado um empilhamento genérico através do processo de fabrico *de roll wrapping* a título de exemplo.

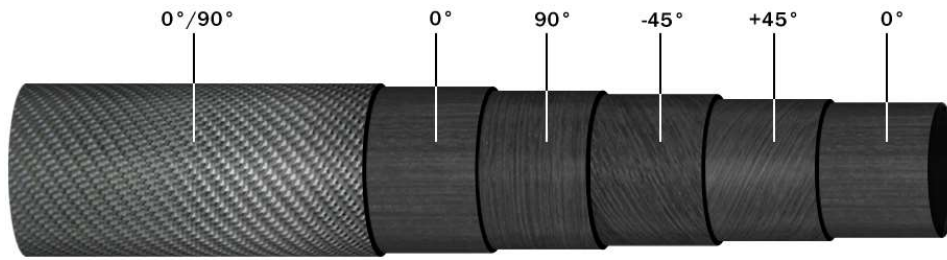


Figura 2.14 – Diagrama de um perfil tubular em fibra de carbono [11]

### 2.5.1. Métodos de fabrico

Quando se dimensiona um tubo com um determinado empilhamento, o método de fabrico pelo qual vai ser fabricado deve ser tido em conta pois poderão existir limitações na obtenção de determinados ângulos das lâminas.

Assim como as propriedades das placas variam de acordo com a orientação das fibras e o processo de fabrico, os tubos também apresentam variações dependendo da composição de sua estrutura, dos tipos de resinas e fibras utilizados e da orientação destas. Podem ser fabricados utilizando diferentes técnicas de produção. Os perfis tubulares são estruturas ocas difíceis de fabricar devido ao facto da necessidade de aplicar pressão em ambos os lados do laminado, do lado interno e do externo. Os processos de fabrico mais comuns serão abordados de seguida, e são a pultrusão, enrolamento filamentar, *roll wrapping* e entrelaçamento (em inglês *pultrusion*, *filament winding*, *roll wrapping* e *braiding*, respetivamente).

#### 2.5.1.1. Pultrusão

A pultrusão é o processo mais comum de fabrico de estruturas tubulares em material compósito. Consiste em puxar as fibras de reforço embebidas na matriz (resina) através de uma fiação ou molde, cujos materiais são selecionados consoantes as propriedades necessárias para a aplicação desejada. Seguidamente, é necessário aquecer controladamente o molde para que se obtenham propriedades uniformes, onde é provocada a cura da resina pelo processo de polimerização. As características próprias do molde possibilitam a obtenção de uma determinada geometria específica do perfil e com um bom acabamento superficial. O processo termina com o corte do perfil obtido para o comprimento desejado.

O processo é adequado para produção em massa e de peças compridas, com um custo de manufatura relativamente baixo, e a quantidade de resina pode ser devidamente controlada.

Por outro lado, o custo do molde é elevado e as peças apresentam baixa resistência à torção (Figura 2.15).

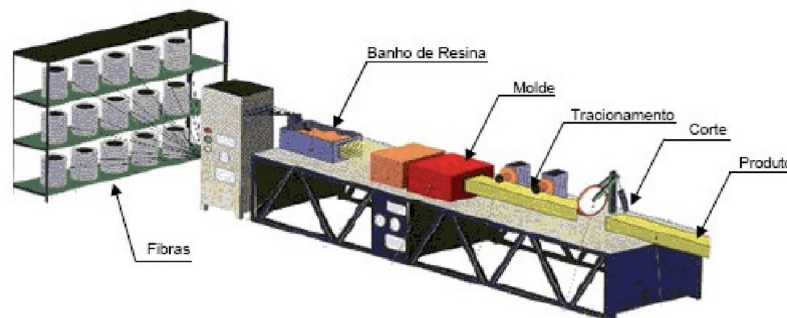


Figura 2.15 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por pultrusão [12]

### 2.5.1.2. Enrolamento filamental

Outro processo igualmente comum é o enrolamento filamental. Na base do seu processo está o enrolamento de filamentos sob tensão sobre um mandril rotativo, onde as fibras são predispostas com um padrão geométrico repetitivo. As fibras contínuas são desenroladas sob condições controladas através de sistemas de tensão e guia, e passadas em sistemas de imersão para impregnar e controlar a quantidade de resina nos filamentos. A geometria da disposição das fibras no mandril será efetuada consoante os requisitos estruturais requeridos no projeto da peça a obter. Tal geometria resulta da combinação da velocidade de translação do sistema de guiamento das fibras, com a variação da velocidade de rotação do mandril. Graças a essas velocidades, é possível obter enrolamentos circunferenciais, helicoidais e polares. Existem unidades de guiamento que se movem ao longo dos eixos  $XX'$ ,  $YY'$  e  $ZZ'$ , e quando aliadas a um software específico permitem fazer variações geométricas na disposição das fibras que até então seriam impensáveis, aumentando o leque de aplicações de tubos aplicados por este processo [13].

Após essa fase da disposição das fibras, tanto o mandril como o compósito são expostos a calor para a cura da resina (num forno ou autoclave), em que por último o mandril é removido (ou permanece dependendo da aplicação).

Como vantagens este processo apresenta um custo relativamente baixo, uma elevada qualidade do produto final, diversas possibilidades de diâmetros e facilidade de reparação, enquanto o custo de produção para grandes componentes e o facto da fibra não ser fácil de colocar corretamente ao longo do comprimento da peça são algumas das suas limitações

[14]. É utilizado para a produção de tubos com elevada resistência à flexão, torção e cargas de impacto (Figura 2.16).

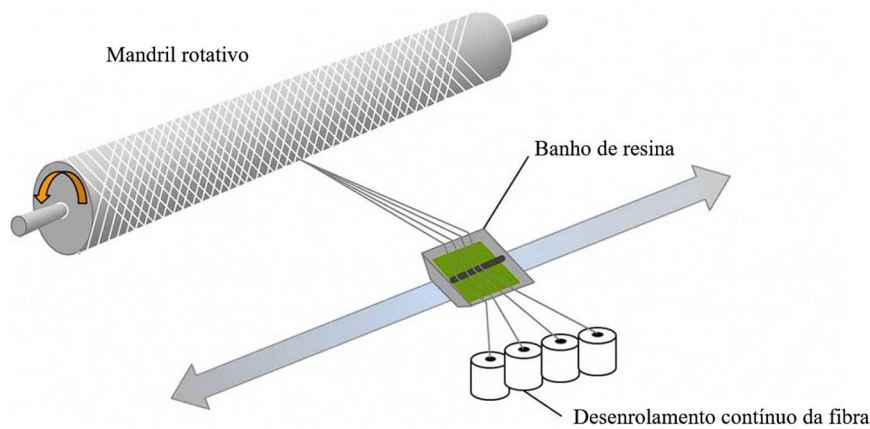


Figura 2.16 – Diagrama do processo de fabricação de tubos por pultrusão, adaptado de [15]

### 2.5.1.3. *Roll wrapping*

O *roll wrapping* é um processo comumente utilizado para fabricar longos tubos retos de secção uniforme ou com ligeiros afunilamentos ou curvaturas de elevada resistência, quer com aparência básica inacabada ou não. Na sua essência, envolve enrolar camadas de reforço com resina impregnada num mandril para formar o tubo adequado. Geralmente utilizando fibra de carbono com resina impregnada, o material é cortado em longos lençóis e posteriormente enrolado sob a forma cilíndrica em todo o mandril (molde). No entanto, de modo a prevenir que a primeira camada de reforço adira permanentemente ao mandril, o mesmo é limpo e é em si aplicado uma camada de desmoldante, colocado de seguida num forno (para curar a mistura) de forma que o reforço adira o suficiente para o resto do fabrico. Seguidamente, o resto das camadas com as orientações desejadas serão enroladas com o auxílio de um cilindro que pressiona devidamente o reforço contra o mandril (o processo pode também ser manual). Antes da cura final, o tubo é enrolado com fita de modo a exercer compressão sobre os materiais, a qual será posteriormente retirada [16].

A precisão e repetibilidade, bem como a produção de tubos com grandes comprimentos são as suas principais vantagens, mas a geometria e diâmetro poderão ser fatores limitadores. Os tubos podem ser bastante resistentes à torção e compressão, dependendo do tipo de resina e orientações das camadas (Figura 2.17).



Figura 2.17 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por *roll wrapping*, adaptado de [17]

#### 2.5.1.4. Entrelaçamento

Existe ainda outro método de fabrico de perfis tubulares apelidado de entrelaçamento, que consiste no entrelaçamento de fibras num padrão diagonal ou cruzado capaz de expandir ou contrair de modo formar diferentes diâmetros, formando uma manga de fibra extensível (Figura 2.18).



Figura 2.18 – Diagrama do processo de fabrico de tubos por entrelaçamento, adaptado de [18]

De igual modo ao *roll wrapping*, este método refere-se à disposição e método de fabrico da fibra em si, requerendo a existência de um molde (mandril) representativo do tubo desejado. Devido à natureza sensível da manga de fibra em termos de permanecer com a orientação correta e não enviesada, exige cuidado adicional no seu fabrico. No entanto são tubos mais dispendiosos, de fabrico mais complexo e suscetível a erros dimensionais, bem como apresentam menor rigidez e resistência na direção axial do que tubos fabricados por pultrusão [19].

## 2.6. Materiais para compósitos e núcleos

Após abordar a constituição básica dos materiais compósitos, assim como as características dos materiais que os podem constituir, e quais são os tipos de estruturas frequentemente encontradas, criou-se a a sua utilização seja pouco comum.

Tabela 2.1 de forma a resumir os materiais das lâminas constituintes dos laminados, e também dos compósitos de sanduíche.

É de realçar que a a sua utilização seja pouco comum.

Tabela 2.1 lista apenas os tipos de materiais mais comuns, podendo existir outros tipos de materiais de igual forma aplicáveis. Consoante a aplicação desejada, o tipo de materiais e as suas combinações poderão ser diferentes, existindo outros materiais que podem ser usados como reforço, matriz ou núcleo, ainda que a sua utilização seja pouco comum.

**Tabela 2.1 – Comparação dos tipos de materiais como reforço, matriz e núcleo [20]**

<b>Tipo de material</b>	<b>Reforço</b>	<b>Matriz</b>	<b>Núcleo</b>
<b>Polímeros</b>	Carbono, Vidro, Aramida, Basalto, Boro	Epóxi, Poliéster, Poliuretano, Poliamida, Fenólico	Poliestireno, Poliuretano, PVC, Policarbonato, Poliamida
<b>Fibras naturais</b>	Linho, Cânhamo, Juta, Sisal	Celulose, Amido, Lignina, Caseína	Balsa, Cortiça
<b>Metais</b>	Alumínio, Cobre, Níquel, Titânio, Aço Inoxidável	Alumínio, Cobre, Níquel, Titânio, Magnésio	Alumínio, Aço, Aço Inoxidável
<b>Cerâmicas</b>	Alumina, Carbetto de Silício, Zircónica, Carboneto de Titânio, Carbetto de Boro	Não aplicável	Nitreto de Silício, Nitreto de Alumínio, Nitreto de Boro

## 2.7. Caracterização das propriedades dos compósitos laminados

O referencial utilizado como sistema de coordenadas na análise de compósitos laminados para descrever a distribuição de forças, deformações e tensões numa lâmina é denominado de referencial LT (em inglês: *Laminate Theory*), onde L e T têm a designação de eixos de ortotropia.

Após a determinação no referencial LT, o próximo passo é definir as propriedades no referencial XY que será utilizado para descrever a distribuição de forças, deformações e tensões num material tridimensional, onde X e Y são comumente as direções planas do material. Assim, passando do referencial LT para o XY, é possível uma melhor compreensão dos comportamentos do material em estudo [21]. A Figura 2.19 ilustra a relação entre os referenciais através do ângulo  $\theta$  que é formado entre os mesmos.

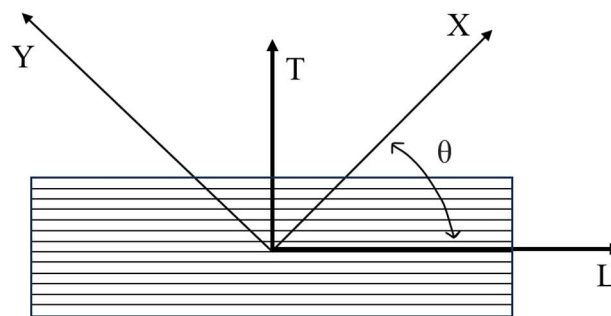


Figura 2.19 – Referenciais LT de cada lâmina e XY do laminado

Sabendo que laminados são compostos por várias lâminas com determinadas orientações, pode concluir-se que uma característica geométrica que os define é o facto da distância relativa à espessura do laminado ser muito inferior quando comparada às restantes. Ou seja, a análise de um problema pode ser simplificada abordando o problema de forma bidimensional ao invés de tridimensional, ao assumir um valor de deformação nula na direção  $ZZ'$  ( $\sigma_{33} = 0$ , Figura 2.19) [22].

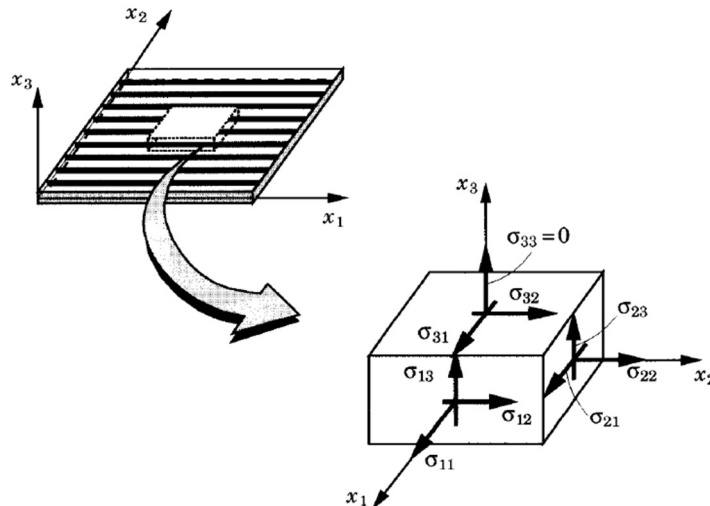


Figura 2.20 – Referenciais LT de cada lâmina e XY do laminado, adaptado de [23]

Ao combinar as propriedades e informação geométrica da estrutura em compósito, é criada a matriz ABD, a matriz representativa da rigidez do laminado, providenciando informação acerca da resposta da estrutura sob várias condições de carga. Na representação conjunta das tensões e flexões de um laminado compósito, a sua representação matricial será definida por uma matriz de propriedades 6x6, a matriz ABD (equação 2).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \epsilon_{0x} \\ \epsilon_{0y} \\ \gamma_{0x} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Para a determinação da matriz anterior, são necessários diversos passos distintos, em que o primeiro deverá ser a especificação do número de diferentes materiais utilizados (se for o caso), seguidamente as especificações das propriedades de cada um, bem como uma descrição do laminado e das suas propriedades mecânicas.

Sabendo que o sistema de coordenadas L, T, Z não coincide, geralmente, com o principal sistema de coordenadas do laminado, é então necessário transformar as propriedades de cada camada para tal.

A matriz de coeficientes de rigidez  $[E_{xy}]$ , em Pa, é determinada pela equação 3:

$$[E_{xy}] = [T]^T \cdot [E_{LT}] \cdot [T] \quad (3)$$

Onde:

- $[T]^T$  = Matriz de rotação transposta;
- $[E_{LT}]$  = Matriz de propriedades da lâmina no referencial LT (equação 4);
- $[T]$  = Matriz de rotação (equação 5).

$$[E_{LT}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} [\text{Pa}] \quad (4)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & -2SC \\ S^2 & C^2 & 2SC \\ SC & -SC & (C^2 - S^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde:

- C = Cosseno do ângulo  $\theta$  de cada camada;
- S = Seno do ângulo  $\theta$  de cada camada.

As variáveis da equação 4 podem ser calculadas através das equações apresentadas na figura 2.21.

Propriedades da Lâmina no Referencial LT			
Designação	Variável	Determinação	Unidades
Módulo da Elasticidade Longitudinal	$E_L$	$E_L = Ef \times \nu f + Em \times \nu m$	Pa
Módulo da Elasticidade Transversal	$E_T$	$E_T = Em \left[ \frac{1}{(1 - \nu f) + \frac{Em}{Ef} \nu f} \right]$	Pa
Coefficiente de Poisson	$\nu_{LT}$	$\nu_{LT} = \nu m \times \nu m + \nu f \times \nu f$	Adimensional
Coefficiente de Poisson	$\nu_{TL}$	$\nu_{TL} = \nu_{LT} \times \frac{E_T}{E_L}$	Adimensional
Módulo de Corte	$G_{LT}$	$G_{LT} = Gm \left[ \frac{1}{(1 - \nu f) + \frac{Gm}{Gf} \nu f} \right]$	Pa

Figura 2.21 – Forma de cálculo das propriedades de uma lâmina no referencial LT [10]

Para todas as lâminas e as suas orientações, a matriz inversa de  $[E_{XY}], \overline{[E_{XY}]}$ , deve ser calculada da seguinte forma (equação 6):

$$\overline{[E_{XY}]} = ([T]^T \cdot [E_{LT}] \cdot [T])^{-1} \quad (6)$$

Seguidamente, a fim de determinar a matriz ABD, resta determinar as matrizes,  $[A_{ij}]$  (equação 7),  $[B_{ij}]$  (equação 8) e  $[D_{ij}]$  (equação 9) especificamente. Para isso, e todas essas tendo em comum o elemento  $\overline{[E_{ij}]}$ , é necessário que as mesmas sejam calculadas para cada orientação, sendo o resultado o somatório dessas multiplicado por  $e_k$ , o que representa a espessura de cada camada (em milímetros).

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^n \overline{E}^k_{ij} * e_k \quad (7)$$

A matriz  $[A_{ij}]$  representa a de rigidez do laminado no seu plano, e relaciona o esforço (tensões médias) com a extensão. Transformando o esforço em tensão média, torna-se necessário relativizar a espessura de cada lâmina dividindo pela espessura total do laminado.

Sendo nula quando o laminado é simétrico, a matriz  $[B_{ij}]$  (equação 8) designada por matriz de acoplamento, representa a correlação das propriedades com efeitos nos deslocamentos, atendendo à existência de um esforço de tração plana ou flexão.

$$[B_{ij}] = - \sum_{k=1}^n \overline{E}^k_{ij} * \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \quad (8)$$

A sua determinação pode obter-se através do negativo do somatório do produto entre  $\overline{E}^k_{ij}$  e o produto da altura da linha neutra em relação ao eixo de referência (onde k representa o índice da lâmina), como representado na Figura 2.22, num exemplo para 12 camadas:

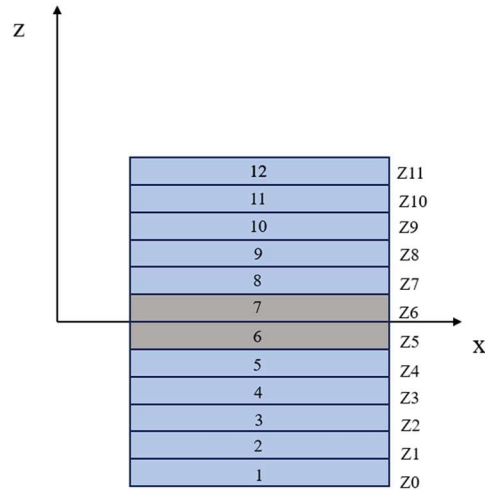


Figura 2.22 – Exemplo de referência para cálculo relacionado com as matrizes  $[B_{ij}]$  e  $[D_{ij}]$

No que diz respeito à matriz  $[D_{ij}]$  (equação 9), que corresponde às propriedades ao longo da espessura de todo o laminado, calcula-se de igual forma à  $[B_{ij}]$ , a menos de uma diferença no valor numérico da fração e nos expoentes de  $z_k$ .

$$[D_{ij}] = - \sum_{k=1}^n \bar{E}^k_{ij} * \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \quad (9)$$

Por último, ainda alusivo à equação 2,  $\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}$  e  $\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$  correspondem à deflexão do laminado quando o mesmo é sujeito a uma força perpendicular F, causando o momento fletor M e as suas componentes [24].

### 3. Comportamento de perfis tubulares

Os perfis tubulares podem ser submetidos a diferentes tipos de esforços, como tração, compressão, flexão, torção, corte e a impactos, e também a uma combinação destes.

Quando um material está sujeito a deformação causada por pequenas tensões geralmente sofre uma deformação elástica, o que significa que quando a carga é removida o material voltará à sua forma original imediatamente. No entanto, pode existir uma variabilidade no tempo de tal recuperação. O comportamento elástico que depende do tempo é chamado de anelasticidade ou viscoelasticidade.

Maiores tensões podem causar um diferente tipo de deformação, denominada de deformação plástica. Ou seja, quando um material sofre deformação plástica não voltará à sua forma original quando a carga for removida. Geralmente, uma elevada resistência à deformação plástica é uma característica procurada nos materiais que tenham uma função estrutural e que sofram grandes esforços [25] (Figura 3.1).

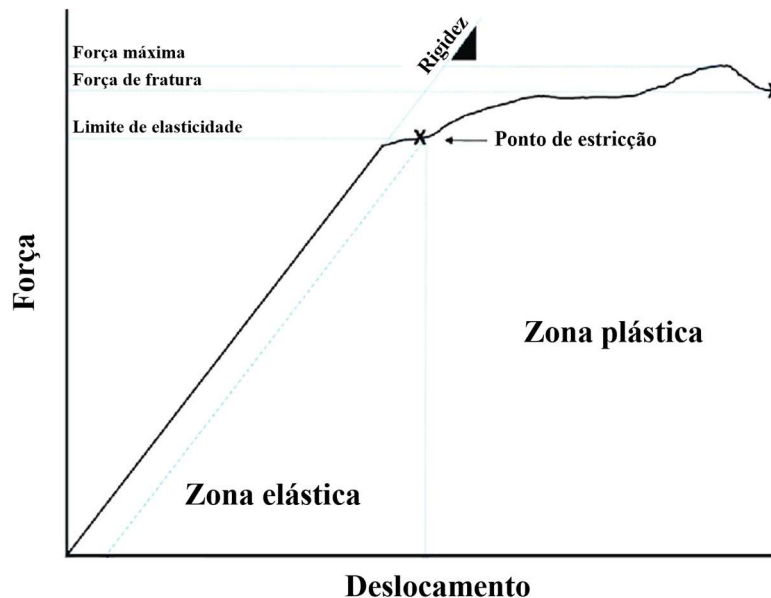


Figura 3.1 – Gráfico genérico da relação entre força e deslocamento de um material, adaptado de [26]

De forma a melhor compreender os esforços mecânicos que podem atuar em perfis tubulares, a compreensão da noção de momento é fundamental para tal. Genericamente, o momento é o esforço necessário para suportar uma carga a uma determinada distância (Figura 3.2). Este

depende da intensidade, direção e ponto de aplicação da força, assim como da distância do ponto de aplicação da força e do eixo de rotação do corpo.

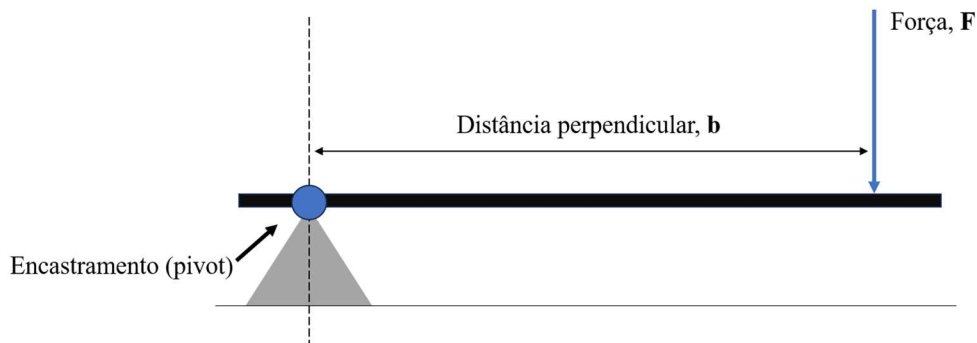


Figura 3.2 – Diagrama do momento provocado por uma força

A formulação matemática de um momento é dada pela equação 10:

$$M = F \cdot b \quad (10)$$

Onde:

- $M$  = Momento [Nm];
- $F$  = Força aplicada [N];
- $b$  = Distância perpendicular ao encastramento (pivot) [m].

### 3.1. Tensão de tração

Um tubo sujeito à tração significa que está sob ação de duas forças de tensão axiais (forças  $F$ , que até podem assumir cargas distintas, ou ser resultado do par ação-reação) opostas (Figura 3.3), que tracionam o objeto do seu centro para as extremidades, causando uma deformação no material. Os tubos compósitos são caracterizados por uma excelente resistência à tração, devido à sua geometria e típica disposição das fibras do reforço, em que é comum que a direção do esforço coincida, de certa forma, com a orientação das fibras.

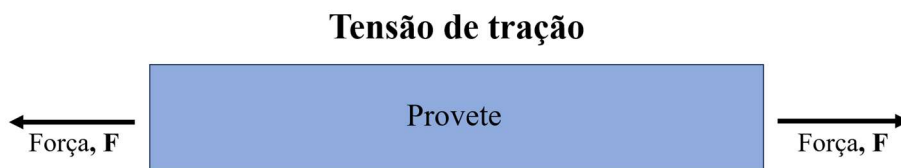


Figura 3.3 – Diagrama de um provete sujeito a uma força  $F$  de tensão de tração

### 3.2. Compressão

O comportamento mecânico de compressão uniaxial pode ser traduzido pela aplicação de forças em diferentes pontos que comprimem o material, reduzindo o seu comprimento na direção da aplicação das cargas. Essa aplicação tanto pode ser ao longo do comprimento do tubo, como transversalmente. Quando aplicada ao longo do comprimento, essa força de compressão pode dar origem a dois comportamentos distintos: falha progressiva ou catastrófica. A falha catastrófica resulta na quebra do material (Figura 3.4 (a)), enquanto a falha progressiva pode ser identificada como se o compósito estivesse a “dobrar” sobre si próprio (Figura 3.4 (b)).

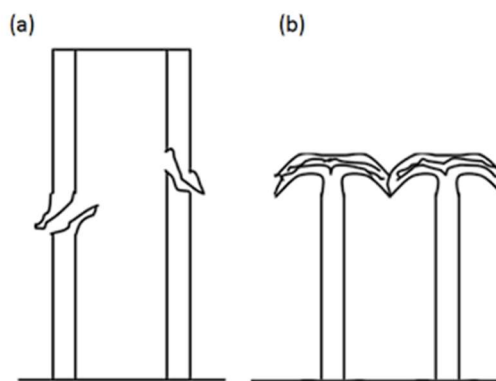


Figura 3.4 – Comportamento de perfis tubulares sujeitos à compressão, adaptado de [27]

Geralmente considerado como um princípio fundamental da mecânica dos materiais, o “dobrar” do tubo compósito é denominado pelo termo flambagem, que é o fenômeno de colapso ou deformação não linear de um material sob compressão axial, causando substanciais alterações nas estruturas. É de salientar que tanto uma combinação de deformação plástica e elástica ou em separado, podem dominar o comportamento deste fenômeno [28]. A compressão num perfil tubular também pode ser aplicada transversalmente, onde devido às diferenças na distribuição de tensões e deformações na secção transversal do tubo comparado com a sua geometria longitudinal, causa uma falha catastrófica de quebra com muito menos carga. Portanto, os tubos não são adequados para suportar grandes cargas mecânicas de compressão transversalmente.

### 3.3. Flexão

O esforço mecânico de flexão ocorre quando um perfil tubular está apoiado nas suas extremidades e é sujeito a uma carga transversal, fazendo com que o mesmo deflita ou dobre.

Tubos compósitos são frequentemente sujeitos a cargas de flexão durante a sua vida útil, portanto, um teste estandardizado para avaliar a resistência de um perfil tubular (compósito ou não) é o de flexão em 3 pontos (*3 Point Bending Test*), onde o módulo de elasticidade, relação tensão/deformação e limites de resistência à flexão do provete podem ser obtidos (Figura 3.5). Para além disso, os resultados obtidos podem ser usados para validar modelos teóricos e simulações computacionais.



Figura 3.5 – 3 Point Bending Test [29]

A flexão é geralmente decomposta como uma distribuição de momentos fletores ao longo do comprimento do tubo, o que resulta numa repartição de tensões normais e de corte na secção transversal do tubo.

A equação matemática (11) para o esforço mecânico de flexão é dada por:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (11)$$

Onde:

- $\sigma$  = Tensão normal [Pa];
- $M$  = Momento fletor [Nm];
- $C$  = Distância da secção transversal ao eixo neutro [m];
- $I$  = Momento de inércia da secção transversal [m<sup>4</sup>].

A flexão pode ser pura, em que atua somente um momento fletor  $M$ , simples onde também atua um esforço cortante, ou composta, onde para além do momento fletor também existe um esforço normal.

### 3.4. Corte

O esforço mecânico de corte refere-se à resistência do material à força necessária para o cortar ao longo de uma secção transversal. Esse esforço pode ser causado por uma combinação de cargas (exemplo: axial e torção) ou simplesmente por uma carga axial.

Na forma mais geral de solicitação por forças perpendiculares ao eixo de uma estrutura tubular, o esforço cortante existirá, ou seja, existirão tensões de corte. Quando a estrutura está sujeita a um momento fletor variável ao longo do respectivo eixo, essa situação ocorre [30].

O esforço de flexão e corte têm semelhanças na medida em que ambos requerem que o tubo compósito suporte forças que atuam perpendicularmente à sua superfície longitudinal. O esforço de corte ocorre quando duas forças de tração ou compressão adjacentes atuam, mas não no mesmo eixo vertical (Figura 3.5).

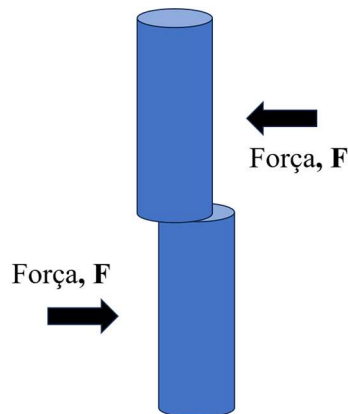


Figura 3.6 – Diagrama exemplificativo de um esforço de corte num perfil tubular

### 3.5. Torção

O esforço mecânico de torção é a tensão que ocorre quando é aplicado um momento sobre o eixo longitudinal da estrutura, causando uma rotação relativa entre as secções das extremidades. A torção provoca esforços de corte no material, onde os danos associados, como a separação entre as fibras e a matriz (delaminação), dependem das propriedades de resistência e rigidez do material compósito, bem como do tipo de fibra e matriz, número e orientação das camadas, assim como do método de fabrico dos perfis tubulares.

Segundo Cláudio César e Machado Cardoso [31], por exemplo, se as fibras forem orientadas na direção longitudinal do tubo, o mesmo terá menor resistência à torção, mas maior resistência à tração e compressão axial. Se as fibras estiverem dispostas numa orientação intermédia entre a direção longitudinal e circunferencial, o tubo terá uma resistência mais balanceada naquilo que são os diferentes esforços mecânicos.

Fernando Batista [32] demonstra que o ângulo de rotação do eixo,  $\Phi$ , é proporcional ao momento torsor aplicado,  $T$ , e ao comprimento do eixo,  $L$ , e que no regime elástico a deformação de corte e a tensão estão relacionadas (Figura 3.7).

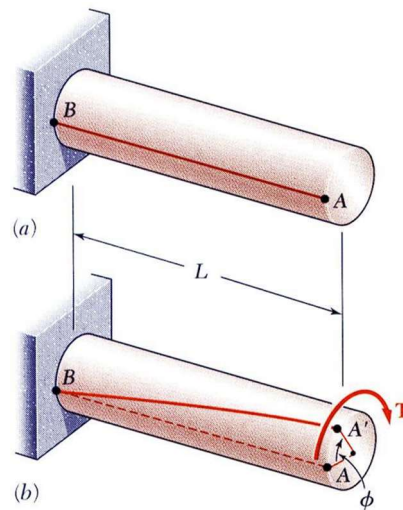


Figura 3.7 – Diagrama exemplificativo de um esforço de torção num perfil tubular [32]

No regime elástico, a tensão máxima causada pela torção pode ser obtida por (equação 12):

$$\tau_{max} = \frac{T * c}{J} \quad (12)$$

Onde:

- $\tau_{max}$  = Tensão máxima causada pela torção [Pa];
- $T$  = Momento torsor [Nm];
- $c$  = Distância radial do centro do tubo à fibra mais distante [m];
- $J$  = Momento polar de inércia [m<sup>4</sup>].

### 3.6. Impacto

No contexto da presente dissertação, é fundamental averiguar o esforço mecânico de impacto, para além dos mencionados anteriormente. Durante a vida útil de um componente,

o mesmo será sujeito inevitavelmente a impactos de baixa velocidade, ou até mesmo durante a sua montagem ou manutenção. O impacto e/ou a fratura de um perfil tubular compósito podem afetar a sua integridade estrutural, a sua funcionalidade e a sua estética, podendo comprometer a segurança e o desempenho da estrutura que o utiliza [33].

A carga mecânica de impacto em estruturas tubulares em compósito remete à força e conseqüentemente à energia aplicada quando a geometria é sujeita a um impacto por um objeto. O impacto pode classificar-se como uma força de curta duração e alta intensidade, que pode causar danos localizados ou globais no perfil. Depende de fatores como a geometria e peso do objeto impactante e a direção de impacto.

Ao abordar tal esforço, um termo comum em inglês que surge naturalmente é o de *crashworthiness*, que é a capacidade de uma estrutura resistir a impactos e absorver energia cinética durante uma colisão, de forma a minimizar a severidade das conseqüências. Dependendo das características de impacto, a procura em melhorar a *crashworthiness* deste tipo de geometria passa por avaliar a combinação de diversos materiais distintos, o número e orientação de camadas (com influência direta na espessura), utilizar mecanismos de gatilho (para iniciar o modo de deformação desejado e evitar o colapso prematuro da estrutura), entre outros [34].

### 3.7. Diagrama de corpo livre do caso de estudo

Considerando o caso de estudo, onde um tubo em fibra de carbono está encastrado nas suas extremidades por estruturas metálicas, que sofre um impacto transversal de um punção metálico, deve proceder-se a um desenho de corpo livre do mesmo (Figura 3.8). É uma ferramenta essencial para a análise do comportamento mecânico do perfil sujeito ao impacto.

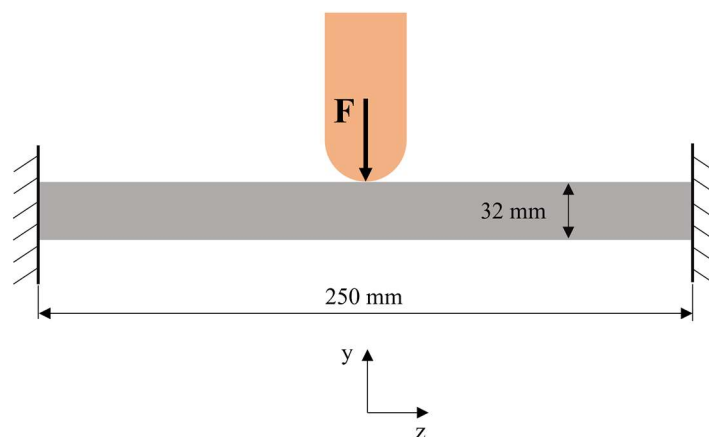


Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre do caso de estudo

## 4. Critérios de falha analíticos

De um ponto de vista macroscópico, a resistência de uma lâmina é uma propriedade anisotrópica, isto é, varia com a orientação das fibras. Um compósito com uma falha refere-se à condição em que o material não é capaz de servir a função para que foi projetado. Apelidados por critérios de falha ou de rotura, são fundamentais na análise de componentes em compósitos laminados pois permitem avaliar a sua resistência mecânica, para prever o ponto em que a falha ocorrerá sob condições de carregamento específicas. Procuram relacionar a resistência numa direção arbitrária com parâmetros básicos do material, ou seja, as resistências em direções específicas. No caso dos compósitos, tais parâmetros são as resistências à tração e compressão nas direções normal e perpendicular à fibra, assim como a resistência ao corte [35].

Sobre este tópico existem inúmeros estudos conduzidos por parte de diversos investigadores. Tal imensidão levou a uma dispersão e falta de consenso na sua precisão, levando a uma difícil interpretação daquilo que realmente é possível averiguar a este respeito nos dias que correm. Uma possível resultante dessa situação é a busca contínua por avanços no progresso e no aprimoramento de ferramentas analíticas ou numéricas mais robustas e confiáveis. Essa dinâmica pode influenciar o desenvolvimento de peças em compósito, que, por precaução, muitas vezes são concebidas com designs mais conservadores e ineficientes em termos de custos. [36].

### 4.1. Critérios de falha

Em resposta aos desafios anteriormente descritos, os autores Abdul-Salam Kaddour e Michael J. Hinton organizaram uma iniciativa internacional destinada a prever com precisão a resistência de materiais compósitos, apelidada de *World-Wide Failure Exercise* (WWFE). O objetivo principal foi providenciar uma descrição compreensiva das teorias de falha/rotura de painéis CFRP.

O WWFE é composto por três exercícios distintos, com o grau de complexidade dos estados de tensão a aumentar desde o primeiro até ao último. De um ponto de vista de desenvolvimento, os autores afirmam então que as interpretações dos resultados dos exercícios podem auxiliar a minimizar os pontos fracos do componente no que diz respeito à integridade estrutural nos seguintes aspetos:

- Dimensões da amostra;
- Previsão da rigidez inicial;
- Previsão da rotura inicial;
- Desenvolvimento da densidade de fendas;
- Desenvolvimento de grandes danos;
- Previsão final da resistência;
- Análise estrutural.

Consequentemente, é necessário efetuar uma revisão cuidadosa pelos exercícios do WWFE de modo a selecionar o critério de falha mais adequado ao presente caso de estudo, sabendo então que se esta metodologia for seguida, aumentarão as possibilidades de obter melhores resultados de integridade estrutural, tal como referido na lista anterior.

Tendo em conta a necessidade de quantificar a resistência do perfil tubular à fratura, de modo a estudar que tipo de empilhamento que poderá ser mais favorável, após uma análise cuidadosa, conclui-se que o critério de falha mais apropriado é o “Tsai”, o que significa no contexto da imagem o critério de *Tsai-Wu*, que será abordado no subcapítulo 4.1.4. Quando comparado aos restantes, segundo a Figura 4.1, o critério base escolhido demonstra ser aquele que melhor consegue prever a falha inicial por dano, a sua delaminação e a rutura (falha final).

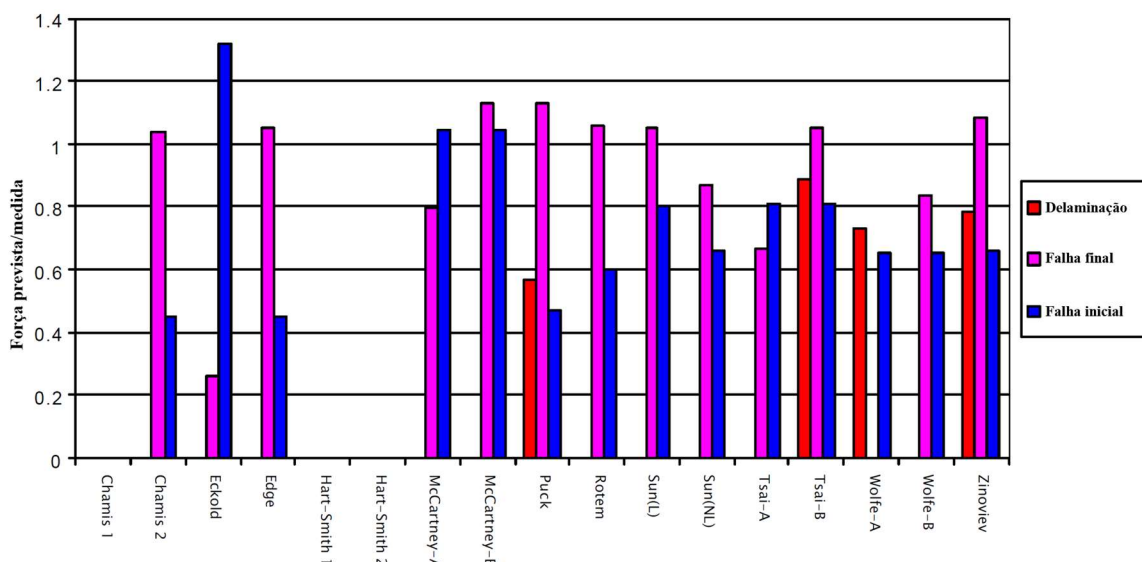


Figura 4.1 – Comparação entre teoria e testes experimentais da WWFE entre vários critérios de falha, adaptado de [37]

De forma a complementar a análise, apesar de não terem em conta as interações entre tensões/deformações numa lâmina, serão também abordados os critérios de falha da tensão máxima e o critério de falha da deformação máxima.

#### 4.1.1. Critério de falha da tensão máxima

Para aplicar o critério a materiais compósitos é necessário ter em conta a natureza anisotrópica desses materiais, que resulta em tensões diferentes em distintas direções. Por isso, o critério é aplicado em cada direção principal: longitudinalmente, transversalmente e perpendicularmente ao plano do laminado. No entanto, o critério não tem em consideração a interação entre as fibras e a matriz, podendo resultar em falhas prematuras.

Neste contexto, admite-se que ocorra falha se alguma das seguintes condições se verificar (equação 13):

$$\begin{aligned} \sigma_{11} \geq X_t, \sigma_{22} \geq Y_t, \sigma_{33} \geq Z_t \\ \sigma_{23} \geq R, \sigma_{13} \geq S, \sigma_{12} \geq T \end{aligned} \quad (13)$$

Onde:

- $\sigma_{ij}$  = componentes das tensões no sistema de eixos das coordenadas da lâmina ( $x_1, x_2, x_3$ );
- $X_t, Y_t, Z_t$  = tensões de rotura da lâmina para situações de tração;
- $R, S, T$  = tensões de rotura em situações de corte.

Se as tensões  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  e  $\sigma_{33}$  forem de compressão devem ser comparadas com  $X_c, Y_c$  e  $Z_c$  que representam as tensões de rotura da lâmina em compressão nas direções  $x_1, x_2$  e  $x_3$  respetivamente [35].

#### 4.1.2. Critério da deformação máxima

A utilização deste critério permite prever de uma forma simplificada e direta a rotura de compósitos, tendo em consideração a falha do compósito quando a deformação excede a deformação admissível em qualquer eixo.

O critério da deformação máxima prevê a falha quando uma das seguintes condições é satisfeita (equação 14):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &\geq X^{\varepsilon}_T, \varepsilon_{22} \geq Y^{\varepsilon}_T, \varepsilon_{33} \geq Z^{\varepsilon}_T \\ \gamma_{11} &\geq R^{\varepsilon}, \gamma_{23} \geq S^{\varepsilon}, \gamma_{33} \geq T^{\varepsilon}\end{aligned}\quad (14)$$

Onde:

- $\varepsilon_{ij}$  = componentes das extensões no sistema de eixos das coordenadas da lâmina ( $x_1, x_2, x_3$ );
- $\gamma_{ij}$  = componentes das distorções no sistema de eixos coordenados da lâmina ( $x_1, x_2, x_3$ );
- $R^{\varepsilon}, S^{\varepsilon}, T^{\varepsilon}$  = distorções de corte correspondentes à rotura;
- $X^{\varepsilon}_T, Y^{\varepsilon}_T, Z^{\varepsilon}_T$  = extensões de rotura da lâmina para situações de compressão.

#### 4.1.3. Critério de *Tsai-Hill*

O critério de *von Mises* para um material ortotrópico afirma que um material dúctil começa a escoar num ponto onde a tensão de *von Mises* se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão. O critério de *Tsai-Hill* é uma adaptação desse último, sendo utilizado para determinar a carga de rotura da primeira camada para a situação de tração. Dessa forma e considerando condições de tensão plana ( $Z = Y$ ), o critério reduz-se à seguinte condição, existindo rotura quando (equação 15):

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{T_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (15)$$

Onde:

- $X$  = tensão de rotura da fibra;
- $Y$  = tensão de rotura da matriz;
- $\sigma_1$  = tensão longitudinal;
- $\sigma_2$  = tensão transversal;
- $\tau_{ij}$  = tensão de corte no plano;
- $T_{ij}$  = tensão de corte na interface da matriz-fibra.

#### 4.1.4. Critério de *Tsai-Wu*

Baseado no de *Tsai-Hill*, este critério tem em consideração a energia de esforço total a que o compósito é sujeito para prever falhas, apesar de não fornecer informação adicional sobre

o modo da falha, inclusive falha de fibra, da matriz e de interface entre fibra e matriz [38]. No entanto, é mais geral que o critério de falha de *Tsai-Hill* porque distingue entre as resistências a falhas de compressão e de tração. Foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a correlação entre os resultados experimentais e teóricos, por meio do aumento do número de parâmetros nas equações teóricas. Quando a igualdade seguinte se confirma, a falha de um material anisotrópico é atingida (equação 16):

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (16)$$

Onde:

- $i, j = 1, \dots, 6$ ;
- $F_i$  = componente do tensor da ordem 2;
- $F_{ij}$  = componente do tensor da ordem 4;
- $\sigma_i$  = tensão longitudinal;
- $\sigma_j$  = tensão transversal.

Extrapolando a equação 16 para um material ortotrópico sujeito a um estado 2D de tensões planas, obtém-se a seguinte equação 17 [39]:

$$F_1 \sigma_x + F_2 \sigma_y + F_3 \sigma_x^2 + F_4 \sigma_{xy} + F_{11} \sigma_x^2 + F_{22} \sigma_y^2 + 2F_{12} \sigma_x \sigma_y + F_{66} \sigma_{xy}^2 = 1 \quad (17)$$

## 4.2. Principais danos em compósitos

Como abordado anteriormente, os critérios de falha são ferramentas essenciais para avaliar a integridade estrutural dos compósitos, fornecendo diretrizes para determinar quando ocorre a falha. Neste contexto, é crucial explorar os diferentes tipos de danos que podem surgir nos compósitos.

No presente subcapítulo serão explorados os principais danos que afetam os materiais compósitos em condições de serviço, bem como aqueles mais específicos para situações de impacto de baixa velocidade.

Segundo Bruno Miguel Alves Coelho [40], os principais danos que podem surgir num compósito ocorrem quando o mesmo se encontra em condições de serviço como impacto, furação, fadiga ou sobrecarga. Resumem-se a:

- Deslocamento;
- Delaminação;
- Fissuração da matriz;
- Ruptura de fibras.

### **Deslocamento**

O deslocamento ocorre na presença de estruturas compostas por um núcleo, onde ocorre separação entre o mesmo e as camadas a si unidas por meio de um adesivo. Como consequência, a diminuição da sua rigidez causa alteração às suas características de amortecimento.

### **Delaminação**

A delaminação é a separação das camadas adjacentes que constituem o laminado, causada por tensões interlaminares, furação ou impactos. É considerado o dano mais perigoso e grave em compósitos, especialmente devido à dificuldade em se detectar e porque pode debilitar as estruturas consideravelmente levando-as até ao colapso.

### **Fissuração da matriz**

Consistindo em fissuras que surgem no interior da matriz, atuam como pontos de concentração de tensões que são prejudiciais no aparecimento de defeitos como delaminação ou ruptura de fibras. As fissuras podem ser observadas ao longo da espessura do compósito e ocorrem geralmente de forma paralela às fibras. Podem ser originadas graças a tensões mecânicas, ou a tensões térmicas.

### **Ruptura de fibras**

A ruptura de fibras é frequentemente causada por tensões de tração ou impacto, podendo reduzir a resistência e rigidez do compósito, induzindo uma sobrecarga na matriz e interface fibra/matriz, podendo até causar a quebra de outras fibras. Este tipo de dano diminui a resistência à tração de laminados de forma significativa.

#### **4.2.1. Danos em compósitos sujeitos a um impacto de baixa velocidade**

No contexto de um impacto de baixa velocidade num compósito, a Figura 4.2 apresenta de forma resumida e esquemática os tipos de danos associados a tal acontecimento.

Para além dos apresentados anteriormente, um tipo de dano comum neste tipo de esforços é a flambagem superficial (em inglês *superficial buckling*), causado especialmente pela instabilidade devida a uma carga de compressão. Resulta na deformação da camada superficial de um laminado e é influenciada por fatores como espessura e rigidez dessa camada. A existência deste tipo de dano pode conduzir a outros danos, como a delaminação entre camadas e fissuração da matriz.

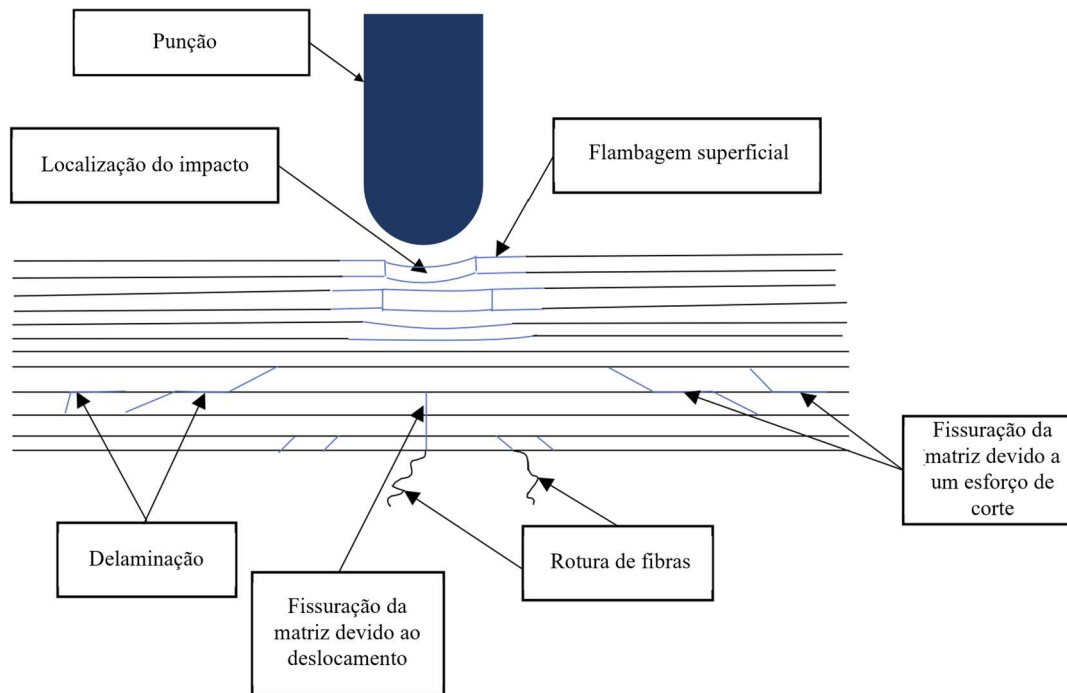


Figura 4.2 – Danos induzidos a um compósito sujeito a um impacto de baixa velocidade, adaptado de [41]

## 5. Mecanismos de impacto de baixa velocidade

O presente capítulo incide nos mecanismos de impacto de baixa velocidade em perfis tubulares. Estes mecanismos são cruciais para entender como o material responde às forças dinâmicas a baixas velocidades causadas por um punção que atua transversalmente ao material, e devido ao facto de no mundo real, atividades como manutenção (queda inadvertida de utensílios ou ferramentas) ou projéteis ocorrerem, sendo estas consideradas das cargas mais perigosas pois afetar a integridade e performance do compósito.

Os impactos podem ser diferenciados nas seguintes categorias: baixa velocidade (grande massa), velocidade intermédia, alta velocidade (pequena massa) e hipervelocidade. As categorizações das velocidades de impacto em testes são de extrema importância graças a enormes diferenças de transferência de energia entre o projétil e o alvo, bem como mecanismos de propagação e dissipação de energia, uma vez que a velocidade do punção é variável.

Um impacto de alta velocidade, normalmente associado à balística, ocorre na gama entre os 50 m/s e 1000 m/s, provocando um dano nitidamente visível e muito localizado. O tempo de contacto com o laminado é deveras reduzido, fazendo com que a restante estrutura não apresente nenhuma ou muito pouca deformação, exibindo um dano de rotura total.

Tipicamente, está inerente ao ensaio de baixa velocidade a queda de um peso. Tais impactos podem ser considerados eventos que ocorrem entre 1 m/s e 10 m/s, tendo em consideração a variação das propriedades do material impactante e do impactado. Como o tempo de contacto entre os dois é superior (5 a 10 milissegundos) face ao ensaio de alta velocidade, a amostra sofre uma deformação global em que o dano interno se estende para além da zona de contacto. Tendo esse fator em consideração, segundo Luís Ferreira [42], pode-se negligenciar os efeitos dinâmicos na resposta estrutural, podendo então os impactos ser simulados por ensaios quase-estáticos. Essa possibilidade pode contribuir para uma maior facilidade da deteção da iniciação do dano bem como a sua propagação, assim como a deflexão pode ser medida diretamente com precisão. Corroborando a ideia, segundo Shivakumar et al. [43], como a duração do impacto é muito mais longa do que o tempo necessário para a propagação das ondas até às extremidades da amostra de teste, a maioria dos problemas de impacto de baixa velocidade podem ser tratados como problemas quase-estáticos.

Em termos de energia, entre um impacto de baixa e alta velocidade, a maior diferença será no valor da energia cinética transferida da punção para o perfil tubular compósito.

Num impacto de alta velocidade a  $E_c$  do punção é consideravelmente superior à sua  $E_{pg}$ , ou seja, grande parte da energia é dissipada em calor e ondas sonoras durante a colisão. O impacto de alta velocidade é tipicamente severo, causando perfuração, fragmentação e até explosão.

Por outro lado, num impacto de baixa velocidade, a  $E_c$  do punção é relativamente baixa quando comparada com a sua  $E_{pg}$ . Ou seja, grande parte da  $E_c$  é convertida em  $E_{pg}$  na forma de deformação elástica tanto do tubo como do punção, causando danos mais localizados como indentação, delaminação e quebra das fibras [45].

## **5.2. Normas aplicáveis a ensaios de baixa velocidade em perfis compósitos tubulares**

A presente dissertação consiste no estudo da integridade em provetes tubulares produzidos em compósito laminado quando são sujeitos a impactos de baixa velocidade, como tal, surge a necessidade de seguir um procedimento fiável e validado que permita posteriormente medir a resposta ao impacto e danos causados sem ser de forma aleatória. Adicionalmente, ao seguir normas e ensaios standardizados, permite-se que os resultados obtidos possam ser comparados com outros estudos já realizados anteriormente, complementando deste modo o estado da arte. Apesar disso há que ter em mente que normas e testes standardizados podem não conseguir cobrir todo o tipo de cenários a que os perfis tubulares podem estar sujeitos.

Existem entidades como a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), ISO (*International Organization for Standardization*), SAE *International* (*Society of Automotive Engineers International*), ACI *International* (*American Concrete Institute International*) e AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*) que desenvolveram normas e testes standardizados para testes em compósitos, entre outras. De acordo com a pesquisa efetuada, a ASTM e ISO são as entidades que têm testes que se aplicam da melhor forma a testes mecânicos em compósitos, como condições de tração, compressão, torção e impacto.

A ISO 14125:1998 especifica 2 métodos para determinar a fratura interlaminar de peças de CFRP de modo a avaliar a resistência de compósitos à delaminação nos impactos de baixa

velocidade. A norma especifica o método de ensaio para a determinação das propriedades de flexão, incluindo a deflexão máxima e a tensão de rotura máxima.

A ISO 6603-2:2018 estabelece um método para a determinação do comportamento da amostra quando sujeito ao impacto de uma punção. É útil para comparar diferentes materiais ou diferentes combinações de materiais sujeitos a um impacto de baixa velocidade, sendo mais aplicada a plásticos e não a compósitos de fibra de carbono.

A ASTM D7137/D7137M-17 possibilita a medição das propriedades de resistência residual à compressão de placas CFRP, submetidas a indentação quase estática. Pode ser igualmente aplicável a estruturas tubulares [46].

Por último, a norma ASTM D7136/D7136M-15 determina a resistência aos danos de uma placa em compósito quando sujeita a um impacto de baixa velocidade da queda do peso. Esta metodologia de testes pode ser utilizada para caracterizar as propriedades do material, avaliar a sua integridade estrutural, entre outros. Pode ser aplicável a estruturas tubulares utilizando uma geometria da amostra apropriada, bem como condições de fronteira congruentes com a norma [47].

Os testes de impacto a baixa velocidade podem efetuar-se de diferentes formas: mediante a queda do pêndulo, através de teste de impacto de pistão pneumático e pela queda livre do peso.

### **5.2.1. Teste *Izod***

Existem dois testes standardizados baseados na queda do pêndulo: *Izod* e *Charpy*. O teste de impacto *Izod* é um método padrão ASTM utilizado para determinar a resistência dos materiais ao impacto. Resumidamente, consiste na largada de um braço giratório levantado a uma altura específica, consoante a energia e velocidade de impacto pretendidos. O braço balança será então movimentado em direção ao provete inferindo-lhe danos (Figura 5.1).

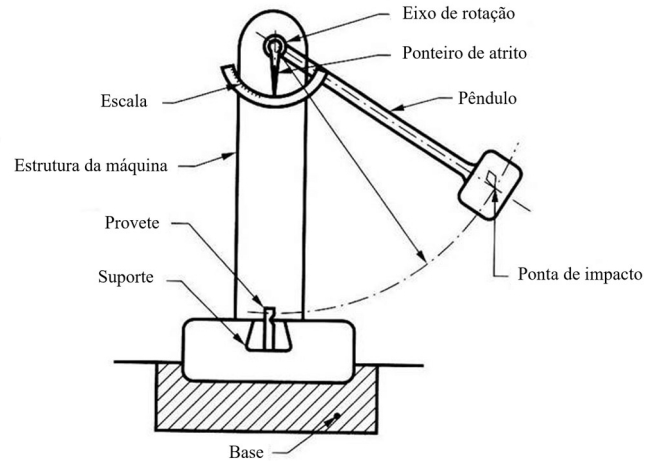


Figura 5.1 – Aparato exemplo do teste *Izod*, adaptado de [48]

É amplamente utilizado em várias indústrias para testar a resistência à fratura de uma multitude de materiais, graças à facilidade e celeridade dos testes. É frequentemente aproveitado como uma forma de controlo para averiguar as propriedades específicas de impacto ou para comparar materiais quanto à sua tenacidade. No entanto, o teste *Izod* é geralmente considerado um teste mais comparativo que definitivo.

### 5.2.2. Teste *Charpy*

A metodologia de testes denominada de *Charpy* é semelhante à anteriormente abordada, com a diferença que o *Charpy* mede a quantidade de energia necessária para fraturar uma amostra, enquanto o *Izod* mede a quantidade de energia requerida para iniciar uma fratura. Por outras palavras, o teste *Charpy* padronizado e de elevada taxa de deformação, determina a quantidade de energia absorvida por um material durante a fratura. No que diz respeito ao aparato experimental do teste, a diferença consiste na forma de fixação da amostra a testar, sendo presa lateralmente ao invés de verticalmente [49].

Os investigadores recorrem a este teste para avaliar a propagação de fraturas e medição de forças, em conjunto com a aquisição de fotografias a alta velocidade, consoante a variação dos empilhamentos.

### 5.2.3. Teste de impacto com pistão pneumático: *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB)

O teste SHPB é um método para averiguar e testar a resposta dos materiais quanto à sua resistência ao impacto e deformação dinâmica. Um aparato que não tenha sido modificado,

está dividido em 3 secções: uma barra de impacto, uma barra incidente e uma barra de transmissão. A de impacto é aquela que é usada para gerar uma onda de tensão, propagando-se pela barra incidente até atingir a amostra, através de um sistema pneumático, hidráulico ou mecânico. A barra de transmissão não só absorve a onda recorrendo também a um batente, mas transmite a onda para o dispositivo de medição, o qual pode ser um sensor piezoelétrico, extensómetros ou similares. Com essa informação pode ser possível calcular a tensão, deformação, taxa de deformação e energia absorvida pela amostra durante o teste. Durante o mesmo, tanto as deformações como as taxas de deformação são determinadas a partir da medição da velocidade de propagação da onda de compressão nas barras.

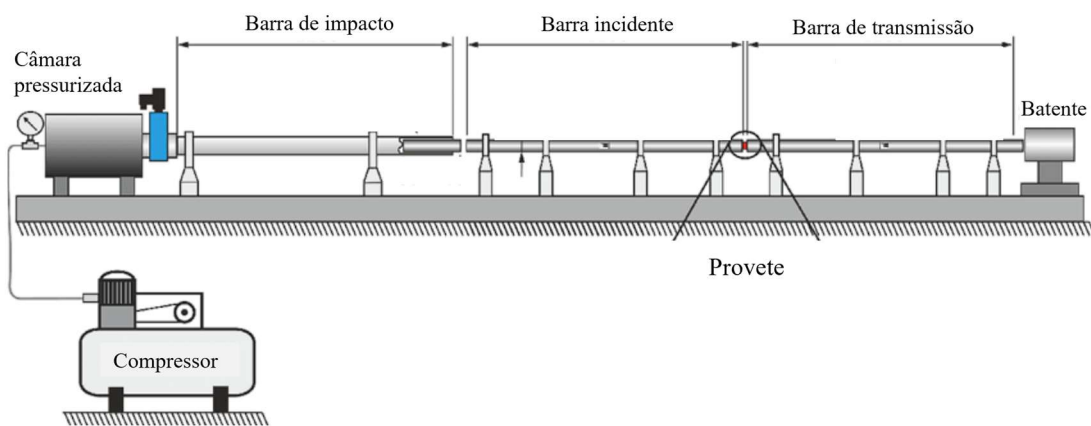


Figura 5.2 – Aparato exemplo do teste SHPB, adaptado de [50]

O teste SHBP é capaz de medir com precisão, a resistência à fratura em elevadas taxas de deformação, ideal para uma grande variedade de materiais que são submetidos a impactos céleres. Por outro lado, o sistema é sofisticado, complexo e mais dispendioso que outras alternativas.

#### 5.2.4. Teste de queda de peso

O teste de impacto por queda de peso é um teste mecânico em que um peso definido cai sobre uma amostra a partir de uma altura especificada. Após o teste de queda de peso, a aparência das superfícies de fratura é avaliada.

Uma unidade de teste de impacto por queda de peso permite a simulação de uma multitude de condições reais de impacto e recolhe dados detalhados de desempenho. Uma das vantagens deste teste em relação aos testes *Charpy* e *Izod* é o facto de poder examinar uma gama mais ampla de geometrias de teste, permitindo que componentes mais complexos

sejam testados. Existem várias técnicas diferentes para testar compósitos usando o teste de impacto com baixa velocidade.

No que diz respeito ao aparato experimental, o que caracteriza este tipo de teste é o próprio dispositivo de queda livre. O punção possui tipicamente uma ponta esférica e uma determinada massa, colocada a uma altura fixa específica sobre o tubo compósito, que varia consoante a energia de impacto pretendida. O dispositivo de queda livre tem frequentemente associado um sistema de contrapeso para gerar a massa requerida do punção.

De igual forma, uma particularidade à qual é necessário tomar atenção são os suportes para fixar a amostra, neste caso um perfil tubular. Tais suportes requerem um projeto específico consoante a amostra, para que a mesma fique adequadamente alinhada durante o teste e não se mova após o impacto.

Relativamente à instrumentação do teste, esta depende do tipo de norma ou padrão que se tem por base. Em relação aos danos, os mesmos podem ser averiguados de diversos modos, algo que será abordado no subcapítulo 5.3.

A Figura 5.3 ilustra um exemplo de uma máquina capaz de efetuar o teste em questão.



**Figura 5.3 – Máquina para testes de queda de peso [51]**

### 5.3. Técnicas de detecção de dano

De modo a avaliar os materiais compósitos após serem sujeitos a determinadas cargas, é necessário recorrer a métodos de controlo não destrutivo, isto é, que permitem efetuar uma avaliação do material sem afetar a sua integridade física.

Devido à natureza heterogénea e anisotrópica dos compósitos, é de dificuldade elevada a detecção de defeitos bem como a caracterização das propriedades dos materiais. Dessa forma, os avanços realizados nesta área levaram à criação de diversos tipos de métodos de controlo não destrutivo, sendo os mais comuns os seguintes [40]:

- Inspeção visual:
  - É um método que consiste em observar a superfície das peças para detetar defeitos visíveis, como fissuras, delaminações, descolamentos ou alterações térmicas. É usado isoladamente ou em conjunto com outros métodos;
- Termografia:
  - Utilizam-se câmaras de infravermelhos a fim de medir a distribuição de temperatura nas peças, identificando anomalias térmicas potencialmente geradoras de defeitos internos;
- Radiografia:
  - Este método utiliza radiação ionizante (raios X ou gama) de modo a penetrar nos provetes, produzindo imagens radiográficas que mostram as variações de densidade e espessura dos materiais. É usado para detetar delaminações e porosidades;
- Correntes induzidas:
  - Através de correntes elétricas induzidas por um campo magnético alternado, pode ser utilizado, com o auxílio de sensores que medem as variações desse campo, para identificar defeitos como fissuras, corrosão ou desgaste;
- Emissão acústica:
  - Graças a sensores piezoelétricos, que captam as ondas sonoras geradas por fontes de emissão acústica nas peças, é possível monitorizar o comportamento das mesmas sob carga e detetar defeitos como fraturas e deformações;

- *Shearografia*:
  - É um método ótico que utiliza a interferência de feixes de laser de forma a medir as variações de deslocamento de superfícies da peça sob estímulo térmico ou mecânico. É um método útil para detetar delaminações, fraturas e defeitos superficiais;
- *Ultrassons*:
  - Pela utilização de ondas sonoras de alta frequência que propagam nas peças e refletem nas interfaces dos materiais com o auxílio de transdutores, é possível formar imagens ultrassónicas que demonstram os efeitos internos como porosidades e delaminações, entre outros.

Não obstante, apesar da multitude de técnicas apresentadas, durante um procedimento de inspeção não destrutivo, os dados devem ser comparados outros ensaios normalizados, e os desvios que possam ocorrer têm de ser assinalados para se efetuar um exame rigoroso ou uma ação corretiva no caso dos ensaios experimentais.

A disponibilização de padrões de elevada qualidade para a calibração de instrumentos deve ser levada a cabo, pois sem os mesmos a análise pode ser imprecisa. Um exemplo disso pode ser a necessidade de estimar a quantidade de porosidade num compósito por intermédio de ultrassons, onde é necessária uma calibração dos níveis de porosidade considerados aceitáveis. Sem estes *standards*, os resultados podem ser meramente especulativos [52].

Apesar da apresentação de diferentes técnicas de deteção de dano é de salientar que, tendo em conta o âmbito da análise numérica que se pretende efetuar, a inspeção visual será o método utilizado para averiguar a integridade dos provetes, para além de ferramentas numéricas baseadas nos critérios de falha já mencionados.

## 6. Estudos sobre impacto em perfis tubulares em material compósito

Neste capítulo serão abordados estudos encontrados na literatura sobre impacto, semelhantes ao caso de estudo, onde será incluído o autor, objetivo do estudo, a sua metodologia, resultados e principais conclusões de relevância. Esta revisão bibliográfica é parte crucial da pesquisa científica, uma vez que permite uma contextualização e verificação do estado da arte. É assim então possível identificar lacunas no conhecimento existente, bem como realçar os aspetos já validados e suportados por meio de testes experimentais realizados por outrem.

Os estudos apresentados de seguida permitem compreender que tipos de provetes foram estudados, o seu método de fabrico, normas que estiveram por base do estudo, entre outros, bem como servem de suporte para a determinação das especificações dos provetes em estudo no presente trabalho e da metodologia de testes, incluindo o aparato experimental utilizado.

Tendo em conta o cariz do tipo de estudos, impacto transversal de baixa velocidade em perfis tubulares em compósito, para definir provetes tubulares em compósito laminado passíveis de produção para a realização dos testes numéricos realizados no presente trabalho, no fim do capítulo encontra-se resumido, na forma de tabela, quais foram os materiais e parâmetros utilizados por cada autor/es em cada trabalho analisado no presente capítulo.

### 6.1. Estudo 1

G. Minak et al. [53], no estudo “*Low-velocity impact on carbon/epoxy tubes subjected to torque – Experimental results, analytical models and FEM analysis*”, aborda os efeitos de cargas torsionais resultantes de um impacto transversal de 7 J num cilindro.

Como provetes, foram utilizados tubos com 4 empilhamentos distintos de 16 camadas, totalizando 2,56 mm de espessura, todos com 200 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro interno. Os tubos foram fabricados através de *roll wrapping* de fibra T300 com resina pré-impregnada.

O aparato do teste (Figura 6.1) consistiu em suportar o tubo numa estrutura específica que prendia as suas extremidades. 8 tubos foram sujeitos a uma pré-carga torsional, onde foram então sujeitos à queda de um punção por meio de um pêndulo (ensaio *Charpy*), e outros 8

tubos sofreram primeiramente o impacto e só depois foram sujeitos a uma força torsional. A energia de impacto absorvida pelo tubo pôde ser avaliada com uma célula de carga (*load cell* na imagem), através do valor da força de impacto, velocidade do punção e deslocamento.

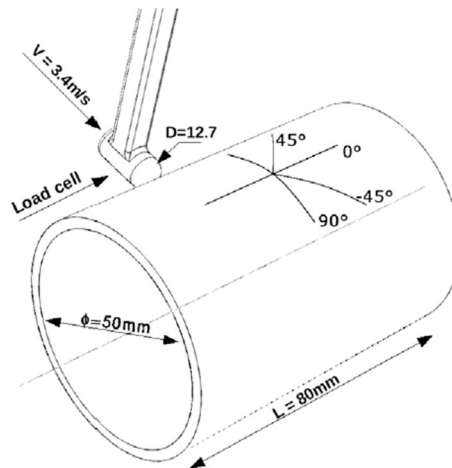


Figura 6.1 – Aparato experimental do estudo 1 [53]

Através do *software* comercial Ansys e do seu código de análise por elementos finitos, tendo por base o critério de falha *Hashin*, os resultados obtidos foram analisados lâmina a lâmina para cada tubo ensaiado. Como conclusões, os autores reiteram que a orientação das camadas influencia a resistência à delaminação causada pelo impacto, e também que embora o início do dano de impacto não seja afetado pela carga de torção, esse esforço influencia a propagação do dano. Adicionalmente, identificaram que a delaminação não ocorre entre lâminas contíguas com a mesma orientação.

## 6.2. Estudo 2

Com o título de “*Performance and damage of carbon fibre reinforced polymer tubes under low-velocity transverse impact*”, Yang Liu et al. [54] expõem a investigação do desempenho e os danos de tubos em CFRP sob impacto transversal de baixa velocidade, sendo realizadas simulações numéricas para analisar a evolução dos danos durante o processo de impacto.

Os testes de impacto foram efetuados através do teste de queda do peso, em tubos com o comprimento de 300 mm e com 18 mm e 16 mm de diâmetros externos e internos, respetivamente. 6 camadas foram dispostas com a orientação [90/0/90/0/90/0/(0/90)]. O procedimento experimental consistiu na realização de testes para 6 diferentes amostras,

fazendo variar a altura de largada do punção, de modo a fazer variar a energia de impacto de 5 J em 5 J.

Os resultados mostraram que quando a energia de impacto se situava entre 5 J e 10 J, os tubos tinham tendência a gerar fissuras circunferenciais. Quando a energia do impacto aumentou de 15 J a 30 J, os tubos absorveram mais energia gerando fissuras longitudinais e circunferenciais. Segundo o autor, pode dizer-se que a evolução dos danos em tubos CFRP sob impactos transversais é afetada significativamente pela orientação das fibras dentro da matriz do polímero. A carga máxima de impacto diminui com o aumento do ângulo das camadas, tal como uma maior capacidade de absorção de energia cinética durante um evento de impacto.

### 6.3. Estudo 3

Lin Shi et al. [55], em “*Residual crashworthiness of braided composite tube with transverse multi-impact damages: Experimental and numerical study*”, investigam o comportamento e as características da resistência residual ao choque de um tubo compósito trançado que posteriormente é sujeito a uma compressão axial. O foco desta análise incidirá na primeira parte do estudo, pois a segunda vertente não é tão relevante para o presente trabalho.

Os autores utilizaram um tubo de fibra T700 com 60mm de comprimento, 15,5 mm de diâmetro e 1,14 mm de espessura, cujo ângulo de trançado é de 45°. Foi seguida uma metodologia de testes distinta, que consistiu em efetuar testes de impacto não com a variação de energia, mas sim com variação da periodicidade e posição de embate do punção (Figura 6.2).

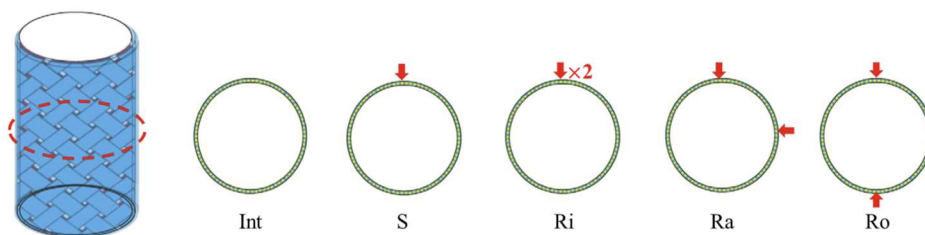


Figura 6.2 –Metodologia de testagem do estudo 3, adaptado de [55]

Apesar do trabalho ter sido mais focado na influência do impacto na resistência residual à compressão axial, com isso obtiveram informações interessantes, na medida em que consoante o tipo de impacto transversal isso terá implicações na integridade da estrutura quando sujeita a outro esforço mecânico. Conclui-se então, que existe uma relação direta da

delaminação induzida pelos impactos com a integridade do perfil para o esforço de compressão. Com o número de repetições do impacto, isto é, quanto maior foi a energia de impacto absorvida, menor será a capacidade de absorção de energia futura, confirmado pelo esforço de esmagamento.

#### 6.4. Estudo 4

O estudo com o título “*Transverse impact performance and finite element analysis of three dimensional braided composite tubes with different braiding layers*”, conduzido por Haili Zhou et al. [56], incide na avaliação do comportamento de perfis tubulares sujeitos a um impacto transversal, por meio de estudos experimentais e numéricos.

Produzidos em fibra de carbono T700, foram testados 3 tipos de tubos diferentes, cada um com 24 mm, 25 mm e 26 mm de diâmetro exterior, o que equivale a que cada um possua mais camadas de fibra por meio do método de fabrico de entrelaçamento (2, 3 e 4 camadas, respetivamente). A disposição angular das camadas foi em todos os casos de 30°.

Cada tipo de tubo foi testado 3 vezes para avaliar o seu comportamento sob 3 distintas cargas causadas pelo ensaio SHPB, portanto o número total de amostras foi de 9. Diferentes velocidades de impacto, 7 m/s, 12 m/s e 17 m/s, causaram diferentes danos nos diferentes tubos.

A Figura 6.3 ilustra uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente.

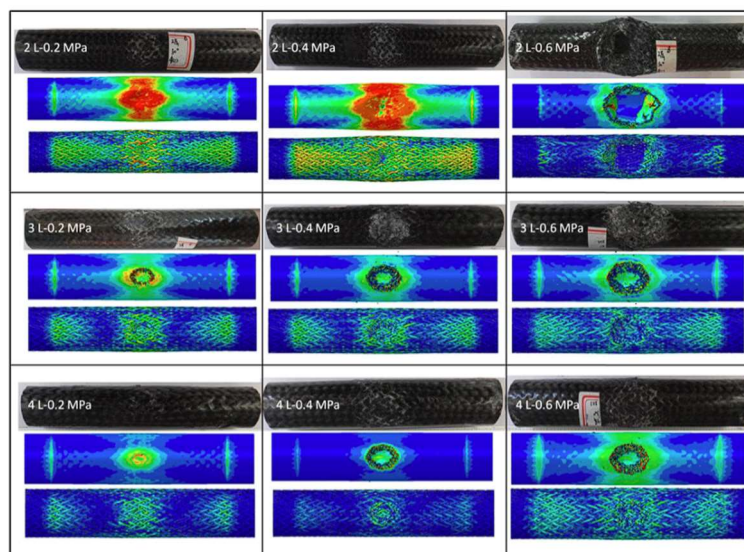


Figura 6.3 – Comparação entre resultados experimentais e testes de elementos finitos [56]

As principais conclusões do trabalho de investigação indicam que a carga de impacto, o deslocamento e a energia absorvida aumentam com o aumento da energia de impacto. O aumento do número de camadas do tubo leva a um aumento da carga de impacto e da absorção de energia, mas a uma diminuição do deslocamento de impacto. Mais camadas de entrelaçamento contribuem para uma maior rigidez nos tubos sujeitos a impactos transversais. Foram observadas fissuras nas matrizes e rotura de fibras em áreas afetadas por forças transversais nos tubos ensaiados.

## 6.5. Estudo 5

Marcelo Leite Ribeiro et al. [57], no estudo “*Experimental analysis of transverse impact loading on composite cylinders*”, realizou uma análise experimental de cilindros em compósito fabricados pelo método de enrolamento filamentar, sujeitos a impacto transversal, considerando a influência do empilhamento e espessura da parede.

3 tipos de cilindros foram estudados, cada um com um empilhamento e espessura distintos (Figura 6.4), com 81 mm de diâmetro interno. A metodologia de impacto seguiu uma estrutura de queda vertical de um punção com um indicador de carga aplicada no tubo. Adicionalmente, foram colocados extensómetros no tubo em determinadas posições para se poder avaliar a deformação causada pelo impacto.

	Empilhamentos	Espessura [mm]
Tipo A	[90/60/ - 60/90/60/ - 60/90] <sub>S</sub>	3.49
Tipo B	[90/30/ - 30/90/30/ - 30/90] <sub>S</sub>	3.25
Tipo C	[90/30/ - 30/60/ - 60/30/ - 30] <sub>S</sub>	3.54

Figura 6.4 – Tipos de empilhamentos estudados, adaptado de [57]

Tendo em consideração a especificação dos tubos tipo A, B e C apresentados anteriormente, pode concluir-se que a sequência de empilhamento tem um impacto significativo nos danos sofridos, e especialmente na diferença da rigidez à flexão na direção axial, em que o tubo tipo A se destacou pela positiva. O estudo sugere a utilização de um empilhamento semelhante aos cilindros de tipo B e C para uma maior resistência ao impacto e um empilhamento semelhante aos cilindros de tipo A para absorver mais energia de impacto.

## 6.6. Estudo 6

Por último, o estudo conduzido por Chongdu Cho e Guiping Zhao com a designação de “*Dynamic Response and Damage of Composite Shell Under Impact*” [58] oferece uma visão mais geral sobre os danos de um laminado cilíndrico sujeito a impacto através do método dos elementos finitos. Este trabalho procede a uma comparação de resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos a partir do método dos elementos finitos.

Os testes tiveram por base um empilhamento de 20 camadas  $[0/45/0/-45/0]_{2s}$  de fibra T300 que foi impactado ao centro por um punção de aço com diâmetro da ponta de 1,27 cm, a uma velocidade de 30 m/s.

Como conclusões, pode destacar-se que a força máxima de contacto aumenta com a diminuição do raio de curvatura do tubo. Igualmente, a frequência de resposta, ou duração do impacto é independente da sua velocidade, dependendo da massa do pêndulo e das suas propriedades. Concluiu-se ainda que quanto maior for a força de impacto, maior será a duração do contacto entre o punção e o perfil tubular.

## 6.7. Visão geral dos estudos abordados

De modo a resumir e concatenar a informação mais relevante destes estudos, e que servirá de auxílio para a seleção do tipo de provetes para os testes que serão realizados no presente trabalho, elaborou-se a Tabela 6.1 com a informação geral das dimensões dos tubos, os seus empilhamentos, a fibra/resina utilizados, qual o método de fabrico do tubo e por último o tipo de ensaio que causou o impacto. D representa o diâmetro exterior do tubo, d o seu diâmetro interior, E a espessura da parede e NE significa não especificado.

Tabela 6.1 – Resumo das especificações dos provetes dos estudos semelhantes abordados

Estudo	Dimensões	Empilhamentos	Fibra/Resina	Método de fabrico	Tipo de ensaio
1	D = 50 mm E = 2,56 mm 16 camadas	[+45/-45] <sub>4s</sub> [+45/-45] <sub>8</sub> [0 <sub>2</sub> /(+45,-45) <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> [0 <sub>2</sub> /(+45,-45) <sub>2</sub> /90 <sub>4</sub> /(+45,-45) <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	T300/NE	Roll wrapping	Izod
2	D = 18 mm E = 2 mm 7 camadas	[90/0/90/0/90/0/(0/90)]	T300/NE	Enrolamento filamentar	Izod
3	D = 15,5 mm ext E = 1,14mm	45° de entrelaçamento	T700SC-12K/EPOL AM 2040 e 2042	Entrelaçamento	NE
4	D = 24 mm, 25 mm, 26mm d = 20,5mm	2, 3 e 4 camadas de entrelaçamento a 30°	T700/resorc inol epoxy	Entrelaçamento	SHPB
5	d = 81mm E = 3,49 mm 3,25 mm, 3,54 mm 14 camadas	[90/60/-60/90/60/-60/90] <sub>s</sub> ; [90/30/-30/90/30/-30/90] <sub>s</sub> ; [90/30/-30/60/-60/30/-30] <sub>s</sub>	NE	Enrolamento filamentar	Izod
6	D: 12,7 mm 20 camadas	[0/45/0/-45/0] <sub>2s</sub>	NE	NE	Izod

Analisando a tabela, é notável uma tendência de recurso ao teste experimental *Izod*. A escolha do método de fabrico dos tubos é dispersa, não tendo sido seleccionado o método de pultrusão. No que diz respeito às dimensões e empilhamentos dos provetes, não é possível retirar nenhuma conclusão de forma imediata.