



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Resistência ao Impacto de Laminados com Múltiplos Furos

Joel Rabaço Alves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Covilhã, Outubro de 2016



# Agradecimentos

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação foram recebidos vários tipos de apoio que auxiliaram a sua elaboração. Assim, o autor deseja expressar os seus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que possibilitaram a realização deste trabalho, nomeadamente:

Ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis por todo o apoio, disponibilidade e prontidão prestada ao longo de todas as etapas de trabalho, bem como os conhecimentos científicos transmitidos;

Ao Engenheiro Carlos Alexandre, do Instituto Politécnico de Tomar, pelo apoio prestado na realização dos ensaios de impacto;

Ao Departamento de Engenharia Eletromecânica pelas facilidades concedidas para a realização deste trabalho;

Aos meus pais e avó, por todo o apoio, educação e investimento que fizeram em mim dando-me assim a possibilidade de obter a minha formação em Engenharia Eletromecânica;

À Delia, agradeço todo o apoio prestado em todas as etapas.

# Resumo

Hoje em dia, nos mais diversos campos indústrias, os materiais compósitos estão substituindo cada vez mais os ditos materiais tradicionais, pois apresentam alta resistência e rigidez específica, bom comportamento à fadiga e boa resistência à corrosão. Neste contexto, em muitas aplicações estruturais, existe a necessidade da abertura de furos para permitir o acesso a fios elétricos, sistemas hidráulicos, montagem entre componentes e/ou devido a atividades de manutenção. Todavia, se a literatura apresenta um número considerável de estudos sobre o efeito de furos simples no comportamento mecânico destes materiais, existem poucos trabalhos que abordem o efeito de vários furos.

Por outro lado, os impactos de baixa velocidade ocorrem muito frequentemente durante as atividades de serviço e/ou períodos de manutenção. Estes eventos revelam-se muito perigosos pois, para além dos danos serem muito difíceis de detetar visualmente, eles afetam significativamente o desempenho mecânico destes materiais.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo estudar o efeito de vários furos na resistência ao impacto de laminados de fibra de vidro/epóxi. Foi possível concluir que a posição geométrica e a distância entre furos revela-se mais importante em termos de resistência ao impacto do que o número de furos. Finalmente, a rigidez à flexão por impacto demonstrou ser um bom parâmetro para avaliar os danos em termos de multi-impactos.

## Palavras-chave

Compósitos laminados, Efeito dos furos na resistência ao impacto, Testes de impacto.

# Abstract

Nowadays, composites are replacing the traditional materials in all type of industries because they present high specific strength and stiffness, good fatigue performance and corrosion resistance. In this context, the presence of holes in many structural applications is expected to allow the access of electric wires, hydraulic pipes, assembly and/or maintenance activities. However, if the literature presents a reasonable number of studies about the effect of single holes on the mechanical performance of laminated composites, very few works can be found about the effect of multiple holes.

On the other hand, impacts at low velocity occur very frequently during in-service life or maintenance activities, and they are very dangerous because they affect dramatically the performance of laminated composites and, simultaneously, the damage promoted is very difficult to detect visually. Therefore, the main goal of the present work is to analyse the effect of multiple holes on the impact strength of glass fibre/epoxy laminates. It was possible to conclude that the geometric position and the distance between holes are more important in terms of impact strength than the number of holes. Finally, the impact bending stiffness showed to be a good parameter to evaluate the damage in terms of multi-impacts.

# Keywords

Laminated composites, Effect of the holes on the impact strength, Impact tests.

# Índice

1. Materiais Compósitos	2
Introdução	2
1.1 Definição e Campos de Aplicação	2
1.2 Classificação	6
1.3 Fibras	7
1.4 Matrizes	9
2. Impacto em materiais compósitos	14
Introdução	14
2.1 Classificação	15
2.2 Danos provocados por impacto	16
2.3 Impacto em laminados com furos	18
3. Material e Procedimento Experimental	19
3.1 Manufatura dos laminados	19
3.2 Provetes	20
3.3 Equipamento	20
3.4 Procedimento experimental	22
4. Análise e discussão de resultados	23
5. Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros	33
5.1 Conclusões gerais	33
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	34
Bibliografia	35

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Fases de um material compósito.	3
Figura 1.2 - Evolução dos materiais utilizados em engenharia.	4
Figura 1.3 - Exemplos de aplicações de materiais compósitos.	5
Figura 1.4 - Esquema de classificação de compósitos.	7
Figura 2.1 - Ilustração dos vários materiais compósitos envolvidos no avião Boeing 757.	14
Figura 3.1- Esquema de estrutura Tafetá de um têxtil.	19
Figura 3.2 - Geometria dos provetes utilizados nos ensaios com: a) Dois furos; b) Quatro furos.	20
Figura 4.1 - Curvas típicas carga-tempo e energia-tempo para: a) Provetes de controlo e provetes com dois furos (20 mm); b) Provetes com dois furos (40 mm) e vários impactos.	24
Figura 4.2 - Efeito do número de furos e sua disposição na carga e deslocamento máximo (Resultados para o primeiro impacto).	26
Figura 4.3 - Efeito do número de furos e sua disposição na recuperação elástica e na rigidez à flexão por impacto (Resultados para o primeiro impacto).	27
Figura 4.4 - Danos típicos observados após o primeiro impacto.	27
Figura 4.5 - Efeito da geometria na resistência ao impacto (Energia de impacto 12 J).	28
Figura 4.6 - Evolução da carga máxima com o número de impactos.	29
Figura 4.7 - Evolução do deslocamento máximo com o número de impactos.	30
Figura 4.8 - Evolução da recuperação elástica com o número de impactos.	31
Figura 4.9 - Evolução da rigidez à flexão por impacto com o número de impactos.	31
Figura 4.10 - Evolução dos danos para: a) laminados com 2 furos e distância de 40 mm; b) laminados com 4 furos e 40 mm de distância.	32

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Comparação de construções com materiais compósitos versus convencionais.	6
Tabela 1.2 - Vantagens e desvantagens da fibra de vidro.	8
Tabela 1.3 - Vantagens e desvantagens da fibra de aramida.	8
Tabela 1.4 - Vantagens e desvantagens da fibra de carbono.	9
Tabela 1.5 - Propriedades de algumas fibras.	10
Tabela 1.6 - Propriedades desejáveis para materiais utilizados como matrizes.	11
Tabela 1.7 - Temperaturas máximas para diferentes resinas poliméricas.	11
Tabela 1.8 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas matrizes poliméricas resinosas constituintes de materiais compósitos.	13
Tabela 2.1 - Técnicas de avaliação de defeitos em materiais compósitos.	17

## Lista de Acrónimos

3D	Tridimensional
ASTM	American Society for Testing and Materials
CS	Amostra de Controlo
IBS	Resistência à flexão por impacto
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PES	Polietersulfona
PP	Polipropileno
PPS	Polisulfureto de fenileno
PSUL	Polisulfona
UV	Ultravioleta

# Notação

## Caracteres Latinos

A	Alongamento à rotura
$C_0$	Constante de integração
E	Módulo de elasticidade
M	Massa do impactor
N	Número do impacto em cada instante
$N_f$	Número de impactos para o qual se deu a perfuração total.
$P_{máx}$	Carga máxima
$V_0$	Velocidade inicial

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica
$\epsilon$	Tensão de compressão
$\rho$	Massa específica
$\sigma_u$	Resistência à tração



# Introdução

Nos mais variados campos da engenharia, os denominados materiais tradicionais têm vindo a ser substituídos pelos materiais compósitos e existe uma clara tendência para este fenómeno continuar nos próximos anos. Em muitas das suas aplicações estruturais existe a necessidade dos componentes/estruturas conterem furos para a passagem de cabos, sistemas hidráulicos/pneumáticos, promover ligações entre elementos ou mesmo por questões de manutenção. No entanto, se a literatura apresenta um número razoável de estudos sobre o efeito de furos individuais no desempenho mecânico de compósitos laminados, ela é muito pobre em termos de múltiplos furos.

A presença de furos numa estrutura promove elevados gradientes de tensões nas suas vizinhanças os quais, no caso dos materiais compósitos, dependem das constantes do material, orientação das fibras e sequência de empilhamento. Associando este fenómeno à fraca resistência dos laminados na direção da espessura, muitas aplicações estruturais podem ficar comprometidas.

Por outro lado, os impactos de baixa velocidade são muito frequentes durante as atividades diárias em serviço ou em tarefas de manutenção. Para além destes eventos provocarem danos muito difíceis de detetar visualmente, eles são bastante perigosos porque afetam drasticamente as propriedades mecânicas dos materiais compósitos laminados.

Assim, este trabalho pretende estudar a influência de vários furos na resistência ao impacto de laminados de fibra de vidro/epóxi. Os resultados serão discutidos em termos das curvas carga-tempo, energia-tempo e avaliação dos danos introduzidos.

Para tal, esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, sendo o primeiro um enquadramento teórico relativo aos materiais compósitos. O segundo introduz a temática dos impactos de baixa velocidade, começando logo por fazer uma abordagem à sua classificação, uma vez que não é unânime na comunidade científica. No terceiro capítulo são descritos os procedimentos experimentais bem como a manufatura dos laminados e equipamentos utilizados. No quarto capítulo é feita a análise e discussão de resultados e, por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## Materiais Compósitos

### Introdução

Este capítulo pretende introduzir os materiais compósitos em termos de sua definição e respetiva classificação, campos de aplicação e propriedades correlacionadas com as dos seus constituintes (fibras e matrizes). Pretende-se, deste modo, introduzir os conceitos básicos que suportam este estudo ao nível dos materiais.

### 1.1 - Definição e Campos de Aplicação

Os materiais compósitos podem ser definidos, de uma forma geral, como o resultado da combinação de dois ou mais materiais, em que as propriedades finais são superiores às dos constituintes separadamente. No entanto, a definição de material compósito não foi unanime pela comunidade científica e a norma "ASTM D3878" veio então uniformizar o seu conceito e define-o como sendo a combinação de dois ou mais materiais, insolúveis, que são combinados para produzir um material de engenharia útil com propriedades não conseguidas pelos constituintes em separado [1].

Estes materiais são então constituídos basicamente por duas fases, a uma escala macroscópica, denominadas por matriz e reforço. A escolha destes elementos depende da aplicação que será dada ao compósito e deve tomar em atenção a compatibilidade dos mesmos. A fase denominada por reforço é normalmente descontínua, rígida e mais resistente, enquanto a matriz é a fase contínua de menor resistência e, geralmente, também de menor rigidez. Nos materiais compósitos também existe uma região onde ocorre a união destas duas fases, denominada por interface, como ilustra a figura 1.1. Esta interface manifesta-se de maior importância, pois a sua resistência condiciona as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Isto é, quanto mais resistente for a interface reforço/matriz, maior resistência apresenta o compósito. Deste modo se explica a atenção que deve ser tomada na compatibilidade destes dois constituintes, como referido anteriormente.

Se o reforço é responsável pela resistência e rigidez do compósito, a matriz assume o papel de transferir as solicitações mecânicas entre as fibras e de protege-las do ambiente externo. Os reforços dividem-se entre naturais ou sintéticos, enquanto as matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc.), minerais ou metálicas.

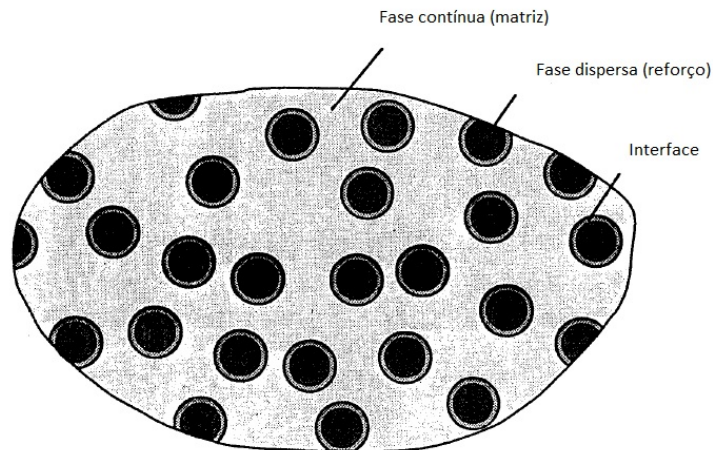


Figura 1.1 - Fases de um material compósito [2].

O conceito de material compósito não é recente, pois a história já dá inúmeras aplicações onde eles eram utilizados. Por exemplo, temos a utilização da palha como reforço dos tijolos de barro nas construções Israelitas ou, por volta de 1500 a.C., nas paredes das casas egípcias onde se combinava barro e rebentos de bambu [3]. Os soldados japoneses também eram conhecidos por fabricarem as suas espadas com metais laminados para, assim, obterem propriedades mecânicas mais elevadas. Mais recentemente, no século XX, os engenheiros civis inseriram barras metálicas em cimento e deram origem ao conhecido betão armado (denominado de compósito no seio da engenharia civil).

Todavia, foi no final da década de 30 do século passado que as fibras de vidro contínuas começaram a ser produzidas e, posteriormente, com o aparecimento da resina epóxi, em 1938 na Suíça, que se verificou um grande avanço no domínio dos materiais compósitos. A década de 70 fica caracterizada pelo desenvolvimento de novas fibras, como as de carbono, boro e aramida, contribuindo, deste modo, para mais um avanço significativo no domínio destes materiais [2]. A figura 1.2 ilustra a evolução dos materiais utilizados no domínio da engenharia, onde é notória a ascensão dos compósitos a partir de 1960.

Para tal, várias características contribuíram para a sua expansão e vasta gama de aplicações [5] [6]:

- São resistentes, rígidos e leves, tendo assim rácios de rigidez/peso e resistência/peso várias vezes superiores ao aço ou alumínio;
- Possuem boa resistência à corrosão;
- É possível obter combinações de propriedades que não são possíveis de se obter com outros materiais (como metais ou cerâmicas);

- As suas propriedades à fadiga são, geralmente, melhores que as obtidas com os materiais comuns de engenharia;
- Peças complexas podem ser obtidas com os compósitos, assim como contornos especiais, ao contrário dos polímeros não necessitam de moldes complexos e caros;
- O custo das ferramentas necessárias para processamento de materiais compósitos é muito menor que o dos metais devido aos menores requisitos de pressão e temperatura.

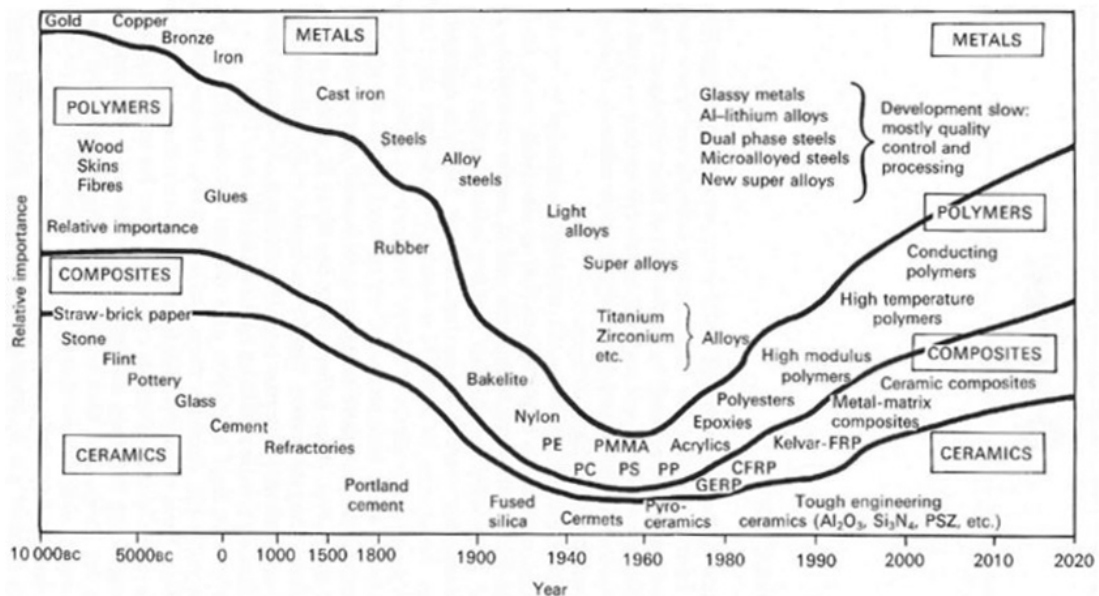


Figura 1.2 - Evolução dos materiais utilizados em engenharia [4].

Por outro lado, existem também algumas desvantagens [7]:

- O custo dos seus constituintes é maior relativamente ao aço e alumínio;
- As propriedades de muitos compósitos são anisotrópicas;
- A sua resistência à temperatura depende da matriz usada;
- Os compósitos em contacto com o ambiente podem ver afetadas as suas propriedades e estabilidade dimensional;
- Têm média-baixa resistência ao impacto, inferior à dos metais;
- Apesar de alguns compósitos apresentarem boa resistência ao fogo, quando comparados com ligas leves da mesma espessura, os gases emitidos pela combustão de certas matrizes são tóxicos.

Hoje em dia, os materiais compósitos são utilizados nos mais variados domínios da engenharia como: estruturas aeroespaciais, componentes para o setor automóvel, equipamentos desportivos, produtos para a indústria petrolífera, elétrica, de construção, etc.

A indústria elétrica, por exemplo, utiliza compósitos para isolamentos e coberturas de instalações elétricas, bem como suportes para circuitos impressos ou componentes para

turbinas eólicas. Ao nível da indústria da construção, eles são utilizados para piscinas, coberturas de portas e janelas, painéis de fachadas ou moldes de cimento. Em termos da indústria dos transportes podem ser utilizados em partes de chassis ou mesmo em chassis completos, braços de suspensão, jantes, assentos, compartimentos isotérmicos de veículos, frentes de locomotivas ou vagões e nos diversos tipos de barcos. No campo do desporto, são utilizados nos capacetes, quadros e peças de bicicletas, canas de pesca, arcos ou skates. No entanto, é na Fórmula 1 onde a sua aplicação se destaca devido à sua relação potência/peso que é obtida com estes materiais [8]. A figura 1.3 ilustra alguns exemplos típicos de aplicações dos materiais compósitos e também a complexidade de algumas peças que se conseguem obter com eles.



Figura 1.3 - Exemplos de aplicações de materiais compósitos.

Paralelamente à Formula 1, a indústria aeronáutica também tem vindo a implementar cada vez mais os materiais compósitos em diversos componentes/estruturas para, deste modo, aumentar a performance da aeronave e, simultaneamente, ganhar [7]:

- Em termos de consumos de combustível, dado que é possível aumentar a carga ou o alcance da aeronave;
- A longo prazo no custo do produto, uma vez que sua boa resistência à fadiga conduz a uma vida útil maior;
- Em termos de manutenção, pois a boa resistência à corrosão permite menos requisitos de inspeção e, conseqüentemente, menores custos envolvidos.

Finalmente a tabela 1.1 compara, em termos de peso e custo, algumas aplicações que antigamente eram construídas com os materiais tradicionais e, atualmente, passaram a ser construídas em materiais compósitos.

Tabela 1.1 - Comparação de construções com materiais compósitos versus convencionais [7].

Aplicação	Construção anterior	Construção com compósito
Reservatório de 65 m <sup>3</sup> para armazenamento de produtos químicos	Aço inoxidável e instalação: Preço = 1	Preço = 0.53
Estabilizador de helicóptero	Ligas leves + aço: Massa= 16Kg; Preço = 1	Carbono/epóxi: Preço = 0.45
Suporte de cabo para helicóptero	Aço soldado: Massa = 16 Kg Preço = 1	Carbono/epóxi: Massa = 11 Kg; Preço = 0.45
Mesa X-Y para fabrico de circuitos integrados	Alumínio fundido: Taxa de fabrico = 30 peças/ h	Carbono/epóxi estrutura sandwich: Taxa de fabrico = 55 peças/h
Tambor para impressora	Velocidade de impressão = 15-30cm/s	Kevlar/epóxi: 40-80cm/s
Cabeça de soldar para robô	Alumínio: Massa = 6 Kg	Carbono/epóxi: Massa = 3 Kg
Projétil de tear	Alumínio: Taxa = 250 ciclos/min	Carbono/epóxi: Taxa = 350 ciclos/minuto
Andar de aeronave	Massa = 1; Preço = 1	Carbono/Kevlar/epóxi: Massa=0.8; Preço=1.7

## 1.2 - Classificação

Uma classificação típica dos materiais compósitos, conforme ilustra a figura 1.4, baseia-se nos tipos de reforço que utiliza, ou seja, reforçados com partículas, com fibras e estruturais. No entanto, segundo Al-Qureshi [9], os materiais compósitos podem ser classificados com base na estrutura formada pelos seus constituintes. Assim, temos:

- Materiais compósitos particulados: são caracterizados por terem partículas dispersas numa matriz, com diferentes formas e tamanho;

- Materiais compósitos fibrosos: são materiais em que as fibras encontram-se unidas por uma matriz, podendo apresentar uma disposição orientada ou aleatória;
- Materiais compósitos laminados: surgem de uma combinação de várias camadas de reforços. Classificam-se em três tipos: laminados, sanduíche e colmeia;
- Materiais compósitos híbridos: são materiais que apresentam combinações de vários tipos de reforços, tais como: fibras e partículas, ou vários tipos de partículas ou fibras.

Por sua vez Hull [10] segue outro tipo de abordagem, segundo a qual os materiais compósitos são divididos em duas grandes categorias: materiais compósitos naturais e sintéticos. No último caso, eles ainda são divididos em duas subcategorias: microcompósitos e macrocompósitos (considerando, neste caso, o tamanho, a forma e a distribuição dos reforços).

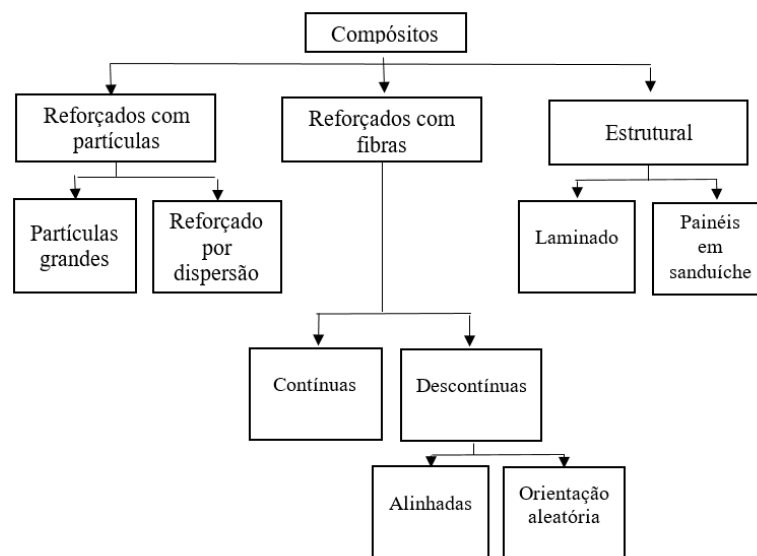


Figura 1.4 - Esquema de classificação de compósitos [11].

### 1.3 Fibras

São filamentos, geralmente de secção circular, embora também possam ter outras formas (tubular, retangular, hexagonal), conforme a utilização pretendida. Os diâmetros variam entre os 0,0025 mm e os 0,13 mm, dependendo do material que é utilizado [6]. Por outro lado, a fibra é um material contínuo, cujo comprimento é pelo menos 200 vezes o valor do seu diâmetro/largura [12].

Existem dois tipos de fibras: as naturais (obtidas das plantas, animais e minerais) e as sintéticas (feitas pelo homem). No entanto, as fibras sintéticas são normalmente mais uniformes, pois são produzidas em ambientes controlados. Apesar de apresentarem maior capacidade de carga do que a matriz, a resistência final do compósito depende muito do tipo de material utilizado no fabrico do reforço, da sua relação comprimento/diâmetro, do modo de disposição (orientação com a direção da carga), proporção usada e a sua adesão com a matriz. Muitas vezes as fibras

são submetidas a tratamentos superficiais, à base de silanos, para melhorar a sua adesão à matriz.

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado no fabrico de materiais compósitos e, uma vez que é utilizada neste trabalho, merece aqui um destaque especial. As razões para a sua vasta utilização/aplicação devem-se, essencialmente, à sua boa adesão com a maioria das matrizes, elevada resistência mecânica específica, boas propriedades dielétricas, incombustibilidade, estabilidade dimensional e boa resistência aos agentes químicos. Além disso, apresentam preços competitivos, elevada relação propriedade/custo, disponibilidade, boa manipulação e facilidade de processamento [13].

A fibra de vidro possui uma estrutura amorfa e, ainda que possa conter outros óxidos (óxido de cálcio, boro ou sódio), é constituída maioritariamente por sílica. Alterando as suas composições químicas, podem-se ter fibras de vidro do tipo E, C, S e R, para diferentes campos de aplicação [6]. No caso das fibras do tipo E, elas correspondem à formulação mais simples e económica, pelo que são as mais utilizadas como elemento de reforço. Já as do tipo C apresentam maior resistência à corrosão que o vidro E, mas são mais dispendiosas e menos resistentes. Acabam por ser utilizadas essencialmente em aplicações químicas, devido à sua maior resistência à corrosão. Finalmente, o vidro tipo S é usado essencialmente em aplicações especiais, tais como a indústria aeronáutica, devido à sua maior resistência e melhor desempenho às altas temperaturas.

As tabelas 1.2 a 1.4 pretendem comparar especificamente as fibras de vidro com as fibras de carbono e de aramida, ainda que qualitativamente, e a tabela 1.5 compara-as com a generalidade das fibras em termos de propriedades mecânicas.

Tabela 1.2 - Vantagens e desvantagens da fibra de vidro [14].

Vantagens	Desvantagens
Elevada resistência à tração	Modulo de elasticidade reduzido
Baixo custo relativamente às outras fibras	Elevada massa específica
Elevada resistência química à oxidação	Sensibilidade à abrasão
Isolamento acústico, térmico e elétrico	Baixa resistência

Tabela 1.3 - Vantagens e desvantagens da fibra de aramida [14].

Vantagens	Desvantagens
Baixa massa específica	Baixa resistência à compressão
Elevada resistência à tração	Degradação sob luz UV
Elevada resistência ao impacto	Elevada absorção de humidade
Elevada resistência à abrasão	Custo elevado
Resistência a temperaturas elevadas	Elevada durabilidade

Tabela 1.4 - Vantagens e desvantagens da fibra de carbono [14].

Vantagens	Desvantagens
Elevada resistência à tração	Reduzida resistência ao impacto
Elevado módulo de elasticidade longitudinal	Elevada condutibilidade térmica
Baixa massa específica	Fratura frágil
Elevada estabilidade dimensional	Baixa deformação antes da fratura
Baixo coeficiente de dilatação térmica	Baixa resistência à compressão
Inércia química exceto em ambientes fortemente oxidantes	Custo elevado
Amortecimento estrutural	

## 1.4 Matrizes

A matriz é então o elemento responsável pela distribuição uniforme do carregamento entre as fibras, para além de as proteger dos ambientes agressivos e de ataques químicos que o compósito possa vir a estar sujeito. Desempenha ainda um papel fundamental na ligação das fibras entre si e em termos da qualidade do acabamento superficial [16]. Apesar de serem responsáveis por uma pequena fração da carga, quanto mais resistente for a matriz melhor será o desempenho do compósito.

São vários os materiais que podem ser usados como matriz (polímeros, metais e cerâmicos), no entanto, cada um deles apresenta vantagens e desvantagens. A sua seleção é então baseada em requisitos químicos, térmicos, elétricos, de inflamabilidade, ambientais, de custo, desempenho e fabrico. Não será assim de estranhar que as matrizes acabem por condicionar as propriedades dos compósitos, pois delas dependem a temperatura de trabalho, a resistência a ações externas, as propriedades elétricas e o próprio processo de fabrico. Na tabela 1.6 encontram-se sintetizadas as propriedades que devem ser tidas em consideração na sua escolha.

Associando a facilidade de processamento com a baixa densidade dos polímeros, estão reunidas as condições para que estes materiais sejam os mais utilizados como matrizes. Neste contexto, é possível classificar as matrizes poliméricas em termoendurecíveis e termoplásticas. As primeiras sofrem, por aquecimento uma transformação irreversível, ou seja, o material já não pode voltar ao seu estado original. No caso dos termoplásticos, o aquecimento permite reverter a transformação e, com isto, reciclar a matriz. Dadas as diferenças que estes grupos apresentam entre si, especialmente em termos de propriedades térmicas, é natural que elas afetem as propriedades mecânicas dos compósitos. A tabela 1.7 ilustra as temperaturas máximas de serviço para vários tipos de resinas.

Tabela 1.5 - Propriedades de algumas fibras [15].

Fibra	Diâmetro do filamento, $\varnothing$ [ $\mu\text{m}$ ]	Massa específica, $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Módulo de elasticidade, $E$ [GPa]	Resistência a tração, $\sigma_u$ [GPa]	Alongamento à rotura, $A$ [%]	Coefficiente expansão térmica, $\alpha$ [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	Temperatura limite de utilização, $T$ [ $^\circ\text{C}$ ]
<b>Vidro</b>							
Vidro E	7	2540	70	3.45	4.8	5	700
Vidro S	15	2500	86	4.50	5.7	2.9	-
Vidro R	10	2500	86	3.2	4	3	700
<b>Aramida</b>							
Kevlar® 29	12	1450	80	2.8	3.5	- 2.0	-
Kevlar® 49	12	1450	130	2.8	2.5	-2 (longitudinal) 59 (radial)	-
Kevlar® 149	12	1470	179	3.45	1.9	-	-
<b>Carbano PAN</b>							
T-300	7	1760	231	3.65	1.4	-0.6 (longitudinal) 7 a 12 (radial)	-
AS-1	8	1800	228	3.10	1.32	-	-
IM-7	5	1780	301	5.31	1.81	-	-
GY-70	8.4	1960	483	1.52	0.38	-	-
<b>Carbano Piche</b>							
P-55	10	2000	380	1.90	0.5	-1.3 (longitudinal)	-
P-100	10	2150	758	2.41	0.32	-1.45 (longitudinal)	-
Boro	130	2600	400	3.5	0.4	-	500
Alumina	10 a 12	3900	380	3.1	-	8	-
<b>Fibras Naturais</b>							
Hemp	10 a 51	1480	70	550 a 900	1.6	-	-
Linho	5 a 38	1400	60 a 80	800 a 1500	1.2 a 1.6	-	-
Sisal	8 a 41	1330	38	600 a 700	2 a 3	-	-
Juta	10 a 25	1460	10 a 30	400 a 800	1.8	-	-

Tabela 1.6 - Propriedades desejáveis para materiais utilizados como matrizes [14].

<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Resistência à tração elevada</b>
	Ductilidade
	Resistência ao corte
	Tenacidade
	Resistência ao impacto
<b>Propriedades Térmicas</b>	Resistência a temperatura extremas
	Coefficiente de dilatação térmica similar ao da fibra
	Baixa condutividade térmica
<b>Propriedades Químicas</b>	Boa adesão às fibras
	Resistência à degradação em ambientes químicos agressivos
	Baixa absorção de humidade
<b>Outras propriedades</b>	Baixo custo
	Solidificação

Tabela 1.7 - Temperaturas máximas para diferentes resinas poliméricas [5].

MATERIAIS	TEMPERATURA MÁXIMA CONTÍNUA (°C)
<b>TERMOPLÁSTICOS</b>	
VINYLÉSTER	60-150
POLIESTER	60-150
<b>FENÓLICOS</b>	
EPOXY	80-215
BISMALEIMIDE	230-320
<b>TERMOENDURECIVEIS</b>	
POLIETILENO	50-80
POLIPROPILENO	50-75
NYLON	75-100
POLIESTER	70-120
TEFLON	200-260

As resinas termoendurecíveis têm uma baixa viscosidade, o que permite uma excelente impregnação do reforço e menores tempos de processamento. São as resinas mais utilizadas devido à sua facilidade de processamento e desempenho. Utilizam a combinação de dois ou três componentes (resina, catalisador e acelerador) que, quando misturados nas proporções adequadas, promovem o processo de "cura". Dependendo dos componentes escolhidos e da temperatura, os ciclos de cura podem variar de alguns minutos a algumas horas. Todavia, as propriedades mecânicas destas resinas tendem a aumentar com um tratamento de pós-cura efetuado a temperaturas mais altas [17]. As resinas termoendurecíveis mais comuns são as vinyester, poliésteres, epóxi e fenólicas.

Dado a resina epóxi ter sido utilizada neste trabalho e ser das resinas mais utilizadas, vai merecer aqui um maior detalhe. O seu vasto campo de aplicações deve-se à sua versatilidade, elevadas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. A sua contração tem dos valores mais baixos entre as resinas (1,2 a 4% em volume), o que explica a sua excelente adesão. A maioria das resinas epóxis, ao contrário das outras, podem ser formuladas para serem mais tolerantes à água e ao calor. Finalmente apresentam uma cura simples, processo que pode ser realizado a qualquer temperatura entre os 5 e os 150°C, dependendo do acelerador utilizado. Uma das principais áreas de aplicação das resinas epóxi é a indústria aeronáutica, mas também podem ser utilizadas na calafetagem de edifícios, manufatura de peças de automóveis e barcos, bem como na indústria eletrónica devido à sua boa resistência elétrica. O custo das resinas epóxi é proporcional ao desempenho da resina, mas são geralmente mais caras do que os ésteres de vinil [18].

Por sua vez, os polímeros termoplásticos não estão sujeitos a transformações químicas durante o processamento, mas, em vez disso, são amolecidos e, após arrefecimento, retomam o seu estado sólido. Os termoplásticos apresentam altas viscosidades às temperaturas de processamento, o que dificulta todo o processo. Simultaneamente, as altas tensões de corte necessárias para fazer fluir os termoplásticos podem danificar as fibras, ou mesmo parti-las, com a consequente degradação da resistência mecânica do compósito. Por outro lado, os compósitos termoplásticos podem ser reparados, pois a transição para a fase amolecida pode ser realizada várias vezes através da aplicação de calor. Os termoplásticos mais comuns são o polipropileno (PP), a poliamida (PA), o policarbonato (PC), o poli-éter-éter-cetona (PEEK), o polisulfureto de fenileno (PPS) e a polissulfona (PSUL).

Finalmente a tabela 1.8 compara as propriedades mecânicas de várias resinas, entre termoendurecíveis e termoplásticas.

Tabela 1.8 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas matrizes poliméricas resinosas constituintes de materiais compósitos [15].

Material	Massa específica, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidade, $E$ [GPa]	Resistência a tracção, $\sigma_u$ [GPa]	Alongamento à rotura, $A$ [%]	Coefficiente expansão térmica, $\alpha$ [10 <sup>-6</sup> /°C]	Temperatura de transição vítrea, $T_g$ [°C]	Temperatura limite de utilização, $T$ [°C]
<b>Matrizes termoplásticas</b>							
Polipropileno (PP)	900	1.2	0.03	20 a 400	90	-10	70 a 140
Poliâmida (PA)	1100	2.0	0.07	200	80	50	170
Policarbonato (PC)	1200	2.1 a 3.5	0.055 a 0.07	125	-	150	-
Poli-eter-eter-cetona (PEEK)	1300 a 1350	3.5 a 4.4	0.1	50	50	143	140 a 250
Polisulfureto de fenileno (PPS)	1300 a 1400	3.4	0.08	110	-	85	240
Polyethersulfone (PES)	1350	3.0	0.085	60	60	-	180
<b>Matrizes termoendurecíveis</b>							
Poliéster	1200	4.0	0.08	2.5	80	-	60 a 200
Fenólica	1300	3.0	0.07	2.5	10	-	120 a 200
Epóxida DGEBA	1200	3.0	0.09	8.0	-	180	125
Epóxida DGEBF	1200	4.1	0.0125	5.0	-	-	-
Silicone	1100	2.2	0.035	-	-	-	100 a 350
Poliâmida	1400	4.0 a 19	0.07	1	80	-	250 a 300

## Capítulo 2

# Impacto em materiais compósitos

### Introdução

A utilização dos materiais compósitos nos mais diversos campos da engenharia implica, para diversos fins, a existência de componentes/estruturas com furos. Por exemplo, a figura 2.1, ilustra diferentes componentes/estruturas do Boeing 757 fabricadas em materiais compósitos (inclusive com fibra de vidro) com vista à redução de peso [19]. Muitas destas peças possuem furos para permitir o seu acoplamento, passagem de cablagens, atuação de hidráulicos ou mesmo por questões de manutenção. Na figura 2.2 é possível observar um sensor estrutural contendo vários furos.

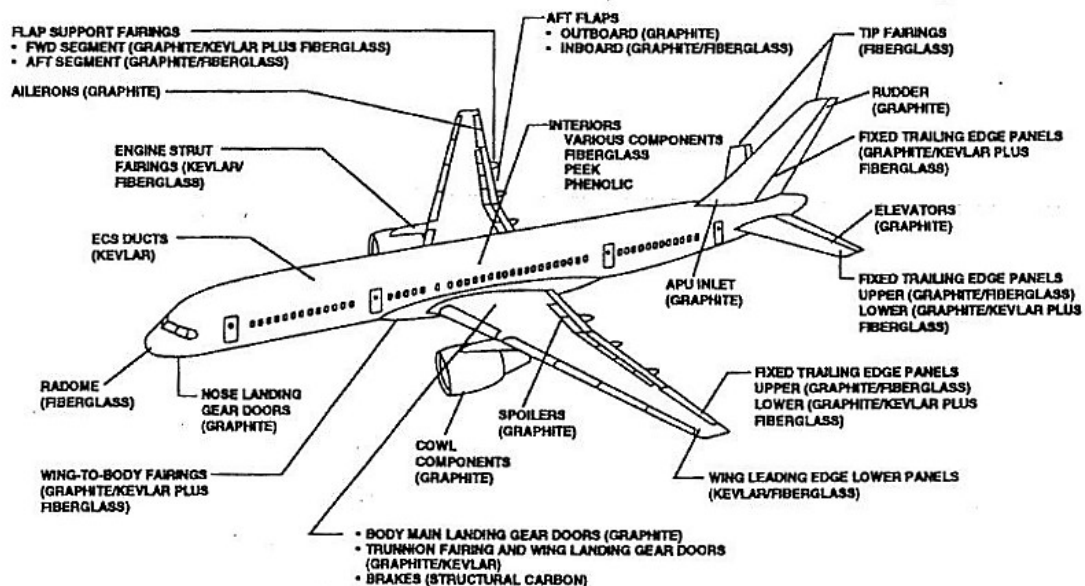


Figura 2.1 - Ilustração dos vários materiais compósitos envolvidos no avião Boeing 757.

Nestas aplicações, para além dos carregamentos estáticos (sem variação no tempo), ocorrem também os dinâmicos (com variação no tempo) e por impacto. Uma carga de impacto define-se como a aplicação súbita de uma força impulsiva a um volume limitado ou parte de uma estrutura [20].

Então, dada a baixa tolerância às cargas de impacto por parte dos materiais compósitos, torna-se necessário introduzir um capítulo para abordar este tema que mereceu especial enfoque neste estudo. Para tal, é introduzida uma abordagem à classificação das cargas de impacto sendo, posteriormente, abordados os danos provocados por impacto e, finalmente, o impacto em laminados com furos.



Figura 2.2 - Sensor estrutural contendo vários furos [Randy Montoya].

## 2.1 Classificação

A classificação quanto ao tipo de impactos não é consensual na comunidade científica [21] [22] [23]. Todavia, a mais comum está relacionada com a velocidade de impacto e estabelece duas categorias: impacto de baixa velocidade ou grande massa e impacto de alta velocidade ou pequena massa. No primeiro caso está implícita uma resposta quasi-estática, enquanto na segunda categoria domina uma resposta de natureza tipicamente dinâmica.

Harding [24], por sua vez, defende a existência de três categorias relacionadas com a velocidade. No caso dos impactos apresentarem velocidades na ordem dos 300 m/s, os danos são confinados a pequenas zonas em redor do ponto de impacto e dão geralmente origem à perfuração. Velocidades entre 50 e 300 m/s dão origem a ondas de tensão criadas no local de impacto e, através delas, transmitem a carga a toda a região. Em tais condições a análise deve ser considerada dinâmica. Finalmente para velocidades inferiores a 50 m/s ocorrem pequenas flexões nas fronteiras até se atingir o equilíbrio quasi-estático.

Para Shivakumar *et al.* [25] impactos de baixa velocidade podem ser tratados como quasi-estáticos, com velocidades de impacto até 10 m/s, dependendo ainda das propriedades do material e da massa do impactor. Impactos de alta velocidade são dominados por ondas de tensão no material, em que a sua estrutura não tem tempo de resposta suficientemente rápido e, como tal, ocorrem danos localizados. Dada a grande velocidade, as condições fronteira podem ser ignoradas porque o impacto é mais rápido do que a chegada das ondas de tensão aos limites da estrutura.

Outros autores, como Abrate [26], definem impactos de baixa velocidade quando as velocidades são inferiores a 100 m/s, enquanto Malvern e Liu [27], por exemplo, defendem a sua classificação em função do dano causado. Assim, baixa velocidade é caracterizada por delaminações e fratura da matriz, enquanto alta velocidade ocorre quando existe fratura da fibra devido à penetração.

Robinson *et al.* [29] consideraram impacto de baixa velocidade como sendo aquele em que a onda de tensão não desempenha um papel significativo na distribuição de tensões e, deste modo, sugerem o seguinte modelo para estimar a transição para alta velocidade: a zona cilíndrica imediatamente abaixo do impactor como sendo uma zona de deformação uniforme, à medida que a onda de tensão evolui da parte dianteira para a parte traseira do material. As ondas de tensão propagam-se à velocidade do som (C) no material de amostra (aproximadamente 2000 m/s para os compósitos epóxi mais comuns) e, portanto, a tensão de compressão pode ser estimada sabendo a velocidade de impacto ( $V_0$ ) por:

$$\varepsilon = \frac{V_0}{C} \quad (2.1)$$

em que C é a velocidade do som na amostra (aproximadamente 2000 m/s para os compósitos epóxi mais comuns) e  $V_0$  a velocidade de impacto. No caso dos compósitos de matriz epóxi e utilizando deformações típicas à rotura entre 0.5 e 1%, obtêm-se velocidades de transição entre os 10 a 20 m/s.

## 2.2 Danos provocados por impacto

Ao longo da vida, um material compósito este é sujeito a vários tipos de carregamentos, os quais originam um mecanismo de fratura complexo [29]. Em termos de impacto existem, por exemplo, alguns parâmetros que influenciam a área danificada e são eles a velocidade, a geometria e massa do projétil, as condições de fronteira, etc. [30].

Para as altas velocidades, a deteção de danos não é um problema, pois eles são facilmente detetáveis pela vista humana. No entanto, o mesmo já não é verdade para os impactos a baixas velocidades pois, neste caso, as pequenas quantidades de energia podem ser absorvidas pelo material e causar danos interiores muito localizados. As delaminações, roturas de fibra, separação fibra/matriz e fissuração da matriz são modos de ruína típicos nos materiais compósitos [31] [32]. Se as fendas na matriz não causam grande alteração nas propriedades mecânicas, elas são as principais responsáveis pelas delaminações e, neste caso, as propriedades mecânicas já são significativamente afetadas. Por sua vez, as roturas das fibras condicionam fortemente as propriedades mecânicas e colocam, inclusivamente, em questão a própria integridade do componente/estrutura. Assim revela-se determinante o recurso a

técnicas de deteção de danos não destrutivas para proceder a uma avaliação correta do material. A tabela 2.1 apresenta algumas técnicas não destrutivas de avaliação de defeitos.

Tabela 2.1 - Técnicas de avaliação de defeitos em materiais compósitos [15].

	<b>Principais características</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Radiografia	Absorções diferentes da radiação penetrante	Imagem apresenta relatório de inspeção, muitos dados	Caro, é necessário tomar medidas de proteção da radiação
Topografia computacional	Radiografia com processamento digital	Identifica a localização do erro, é possível controlar a visualização	Muito caro
Ultrassons	Alterações na impedância acústica causadas por defeitos	Pode ser um processo automatizado e penetrar em materiais mais espessos	Necessária imersão em água
Emissão acústica	Defeitos que geram ondas de tensão	Vigilância remota e contínua	Exige a aplicação de estresse para deteção de defeitos
Termografia	Mapeamento da distribuição da temperatura ao longo da área de ensaio	Rápida, medição distante. Não precisa de contacto com a peça, quantitativo	Baixa resolução para amostras espessas
Holografia ótica	Imagem 3D	Não exige nenhuma preparação especial da superfície ou revestimento	Exige ausência de vibrações, necessária uma base forte
Acústica ultrassónica	Utilização de impulsos de ultra-som para estimulação de ondas de tensão	Portátil, quantitativo, automatizado, imagem gráfica	Contacto superficial, geometria da superfície crítica
Correntes de Foucault	Mudanças nas condições elétricas causado por variações de material	Facilmente automatizado, custos moderados	Limitadas às condições elétricas, materiais e profundidade de penetração limitada

## 2.3 Impacto em laminados com furos

O efeito dos furos tem sido estudado exaustivamente ao nível das cargas de tração e/ou compressão, mas poucos trabalhos podem ser encontrados na literatura sobre impactos a baixa velocidade [33].

Green *et al.* [34] reportam os primeiros resultados de impacto de um estudo que visava, experimental e numericamente, determinar o dano adicional decorrente da presença de furos. Neste caso os furos são responsáveis pelas fissuras que se desenvolvem na matriz e que surgem na lâmina inferior. Estas fendas múltiplas podem estender-se a partir da região diretamente abaixo do impacto até à extremidade dos furos e, nalguns casos, mesmo a partir dos furos.

Por sua vez, estudos realizados por Luo [35] mostram que, em compósitos com furos, o dano consiste basicamente em delaminações associadas à fissuração da matriz, mas com a ausência da rotura de fibras. Aparecem duas fendas paralelas na matriz, entre o ponto de impacto e o furo, iniciando-se uma delas no ponto de impacto e propaga-se para o furo, enquanto a outra inicia-se perto da borda do furo e propaga-se em direção ao centro do impacto. Estas fendas podem ser iniciadas por tensões de tração, de corte ou por uma combinação de ambas.

Quando os laminados contêm dois furos, Roy e Chakraborty [33] verificaram que as delaminações iniciam-se junto às bordas dos furos e, com o tempo, elas encontram-se formam, assim, uma delaminação de grande área. Finalmente, Amaro *et al.* [36] verificaram que a morfologia do dano é alterada pela presença dos furos, conduzindo a um mecanismo complexo que envolve a interação entre a fissuração da matriz e a delaminação.

Apesar da bibliografia reportar poucos trabalhos sobre impacto em laminados com furos, eles acabam somente por se focarem na caracterização, quer via numérica ou experimental, dos mecanismos de dano e sua progressão. Ao nível da resistência ao impacto, este trabalho pretende introduzir este tópico, devido aos poucos estudos existentes neste domínio.

## Capítulo 3

### Material e Procedimento Experimental

Neste capítulo será feita uma descrição detalhada sobre os materiais utilizados, seu processo de fabrico, equipamentos utilizados e respetivo procedimento experimental.

#### 3.1 Manufatura dos laminados

Neste estudo foram produzidas manualmente placas de materiais compósitos envolvendo 8 camadas, todas na mesma direção, de fibra de vidro 1195P (195 g/m<sup>2</sup>), uma resina epóxi Biresin® CR122 e um endurecedor Biresin® CH122-3 (ambos fornecidos pela Sika). De acordo com o fabricante foi adicionado à resina 30% em peso de endurecedor [37]. As dimensões finais das placas produzidas foram de 330x330 mm<sup>2</sup>.

A resina utilizada apresenta uma viscosidade média e a fibra de vidro, em forma de tecido, tem uma estrutura Tafetá (*Plain Woven*) como representa a figura 3.1. Este tipo de estrutura é a mais simples que se pode encontrar nos têxteis, na qual se coloca um conjunto de fios numa direção e igual quantidade na direção perpendicular, em que ambas as direções apresentam o mesmo tamanho [38].

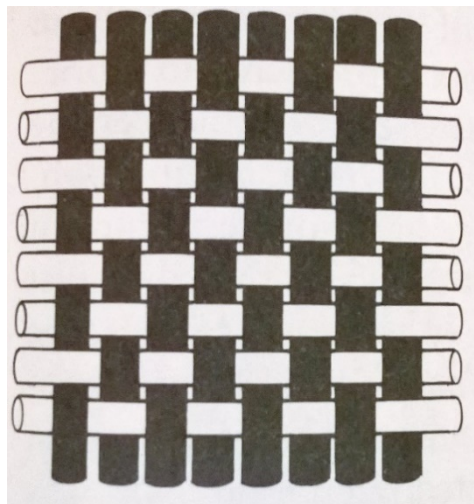


Figura 3.1- Esquema de estrutura Tafetá de um têxtil.

O conjunto (fibras mais resina) foi inserido num saco selado e sujeito a uma carga constante de 2.5 kN, aplicada por uma prensa, durante 12 horas com o objetivo de manter a fração de fibra e a espessura do laminado constante. Durante as primeiras 4 horas o saco permaneceu ligado a uma bomba de vácuo de modo a eliminar as possíveis bolhas de ar existentes no compósito.

Para completar o processo foi efetuada, de acordo com as especificações do fabricante da resina utilizada, uma pós-cura numa estufa a 60 °C durante 8 horas.

### 3.2 Provetes

Os provetes utilizados neste estudo foram obtidos a partir das placas descritas anteriormente, com recurso a uma serra de diamante. Para evitar o aquecimento do compósito e possíveis alterações das suas propriedades mecânicas, existiu um especial cuidado com a velocidade de avanço e o corte foi acompanhado com ar seco comprimido. Finalmente, com uma broca adequada para o efeito, foram feitos furos de 4 mm de diâmetro nos provetes. Detalhes das geometrias estudadas encontram-se na figura 3.2.

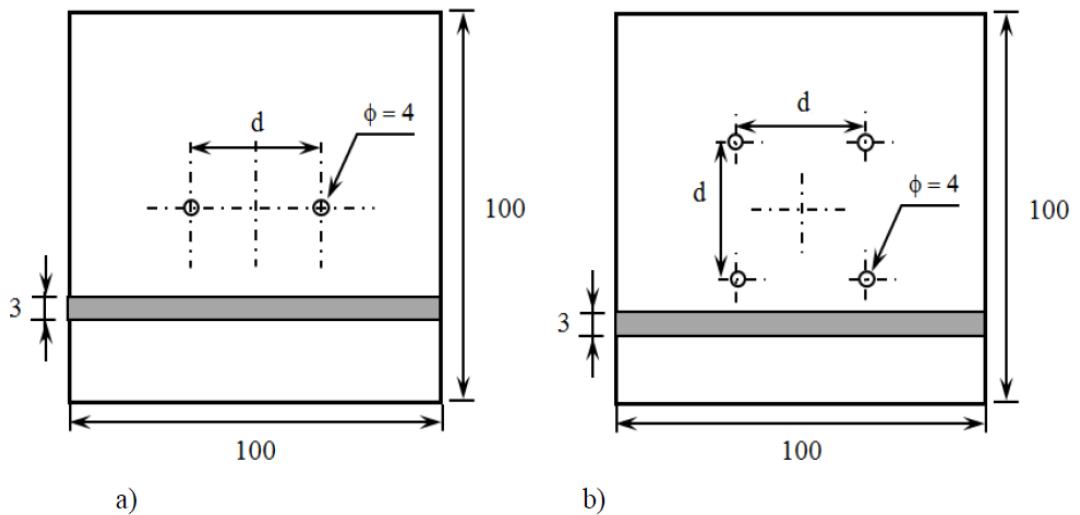


Figura 3.2 - Geometria dos provetes utilizados nos ensaios com: a) Dois furos; b) Quatro furos.

Dimensões em mm ( $d = 20$  mm e  $d = 40$  mm).

### 3.3 Equipamento

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina da marca IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 3.3. A máquina é composta por duas colunas nas quais é feita a queda livre de um peso, designado de impactor, guiado por rolamentos e um sistema que previne o segundo impacto após atingir o provete. A energia de impacto é produzida apenas pelo ajuste da altura de queda do peso, até 3.5 m [39]. O sistema faz a aquisição de dados com recurso a uma célula

de carga piezoelétrica, situada no impactor, capaz de adquirir até 32000 pontos, e um computador com o software *Impact V3*.

A velocidade é medida através da interrupção de um laser em dois sensores óticos, um destes sensores tem também a função de dar início à aquisição de dados da célula de carga assim que o impactor passe por ele e interrompa o feixe de luz.



Figura 3.3 - Máquina de impacto IMATEK IM10

No software é possível escolher o parâmetro de impacto desejado, como altura de queda, energia ou velocidade de impacto. A energia de impacto é somente fornecida pela ação da gravidade, e é controlada através do ajuste da altura de queda ajustada também em função da massa do impactor.

A dupla integração da curva de carga em função do tempo fornece a variação da deflexão com a carga:

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.1)$$

Em que  $F(t)$  representa a força lida pela célula,  $m$  é a massa do impactor, e a segunda derivada da posição em ordem ao tempo representa a aceleração.

A partir da equação 3.1 pode-se calcular a velocidade pela seguinte expressão matemática:

$$V(t) = -\frac{1}{m} \int F(t) dt + C_0 \quad (3.2)$$

Onde  $V(t)$  é a velocidade da célula de carga e  $C_0$  é a constante de integração e  $V_0$  é a velocidade inicial, ou seja, as condições de fronteira, em que  $C_0 = V_0$ , para  $t = 0$ .

Da equação 3.2 podemos então calcular a deflexão, usando a seguinte expressão:

$$X(t) = \left( -\frac{1}{m} \iint F(t) dt dt \right) + V_0 t \quad (3.3)$$

Nesta última expressão  $X(t)$  representa a deflexão em função do tempo, e é utilizada pelo "software" que realiza as integrações numéricas.

### 3.4 Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados na máquina de impacto descrita no ponto anterior, à temperatura ambiente e seguindo a norma ISO 6603-2. Para tal foi utilizado um impactor hemisférico de 10 mm, com massa de 2.827 kg, e uma energia de 12 J. As amostras foram encastradas e, para cada condição, foram ensaiados 3 provetes. Os ensaios decorreram até se verificar a perfuração total, ou seja, quando o impactor passa por completo toda a espessura do laminado.

## Capítulo 4

### Análise e discussão de resultados

Em muitas aplicações estruturais existe a necessidade dos componentes/estruturas conterem furos para a passagem de cabos, sistemas hidráulicos/pneumáticos, promover ligações entre elementos ou mesmo por questões de manutenção. Neste caso, os furos ao induzirem concentração de tensões no componente/estrutura, dão origem a elevados gradientes de tensão em seu torno. No caso dos materiais compósitos estes gradientes ainda dependem de outras variáveis como constantes do material, orientação das fibras e sequência de empilhamento das camadas. Por outro lado, os materiais compósitos revelam-se muito sensíveis às cargas de impacto.

Neste contexto, este capítulo pretende fazer a análise e discussão dos resultados experimentais efetuados com vista a caracterizar a resistência ao impacto de laminados compósitos com múltiplos furos.

A figura 4.1 começa, assim, por apresentar o efeito dos furos através das curvas típicas carga-tempo e energia-tempo. Mais detalhadamente, na figura 4.1 a) comparam-se as curvas obtidas com os provetes de controlo (laminados sem furo e designados por CS) e as obtidas com os provetes contendo dois furos separados em 20 mm. Por sua vez a figura 4.1 b) representa, para os laminados com dois furos e separados em 40 mm, a evolução das curvas carga-tempo e energia-tempo ao longo de vários impactos (primeiro, quinto e décimo impacto). Estas curvas representam o comportamento típico de todos os laminados ensaiados para as diferentes condições e estão de acordo com a bibliografia [40] [41] [42] [43]. De acordo Schoeppner e Abrate [44], as oscilações observadas são originadas pelas vibrações do provete.

Numa análise mais detalhada destas curvas, pode verificar-se que a carga aumenta até atingir um determinado valor máximo ( $P_{m\acute{a}x}$ ), passando, em seguida, a diminuir. Relativamente à energia de impacto, esta não foi suficientemente elevada para perfurar o provete, uma vez que o impactor bate e é devolvido de imediato, conforme ilustra a curva energia-tempo. Pode-se verificar que a energia aumenta até atingir um pico, que é o valor da energia à carga máxima, e em seguida passa a decrescer até estabelecer um patamar que, neste caso, coincide com a perda de contacto impactor/provete. A quantidade de energia abaixo deste patamar representa a energia absorvida pela amostra. Assim, a energia elástica é obtida pela diferença entre a energia absorvida e a energia para a carga máxima. No último impacto, em que ocorre a perfuração total do provete, a curva carga-tempo para além de evidenciar valores de carga máxima muito baixos apresenta também uma rápida diminuição logo após a carga máxima, apresentando, posteriormente, uma certa estabilização no tempo até ao seu valor se anular. A energia elástica neste caso é zero, pois toda a energia é absorvida pela amostra em forma de dano.

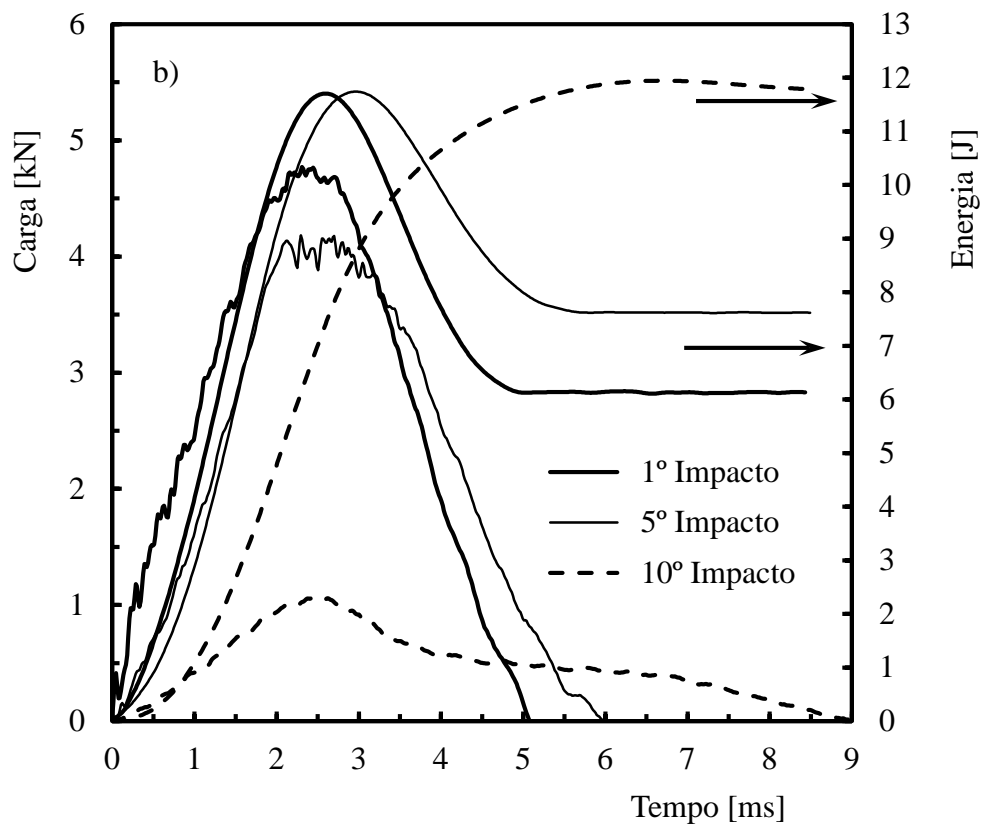
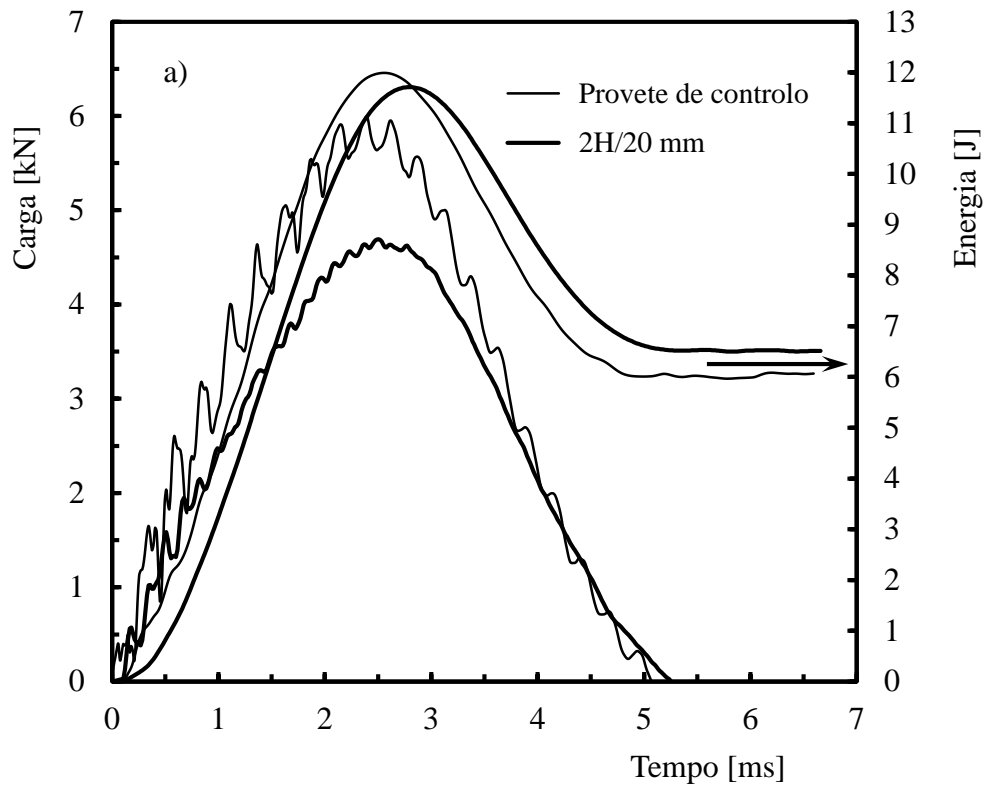


Figura 4.1 - Curvas típicas carga-tempo e energia-tempo para: a) Provetes de controlo e provetes com dois furos (20 mm); b) Provete com dois furos (40 mm) e vários impactos.

A figura 4.2 mostra, para o primeiro impacto, a evolução da carga máxima e do deslocamento máximo para cada uma das geometrias ensaiadas. Em termos de carga, o valor médio mais alto ocorre para os provetes de controlo (sem furo), na ordem dos 5,9 kN, e o mais baixo na ordem dos 4,46 kN para os laminados com dois furos distanciados entre si em 20 mm. Este decréscimo na ordem dos 24,4%, face aos provetes de controlo, é resultado da presença dos furos que, para além da concentração de tensões induzida, faz diminuir a rigidez do laminado. Neste caso a rigidez diminui, como resultado do corte das fibras provocado pelos furos. De acordo com Amaro *et al.* [45], as propriedades ao impacto são significativamente afetadas pela rigidez dos provetes. Para os laminados com quatro furos distanciados em 40 mm o valor médio é cerca de 15,9% mais baixo. Nas restantes configurações, os valores médios são muito semelhantes e cerca de 19,5% mais baixos relativamente aos valores obtidos para os provetes de controlo. Uma tendência oposta pode ser encontrada para o deslocamento máximo. Os valores médios obtidos para as amostras de controlo são de 4,1 mm e este valor aumenta para 6,3 mm (na ordem dos 53,1% mais altos) para as amostras com dois furos e uma distância de 20 mm. Para as outras configurações, foi obtido um valor médio na ordem dos 5,5 mm para os laminados de quatro furos distanciados em 40 mm, o que representa um aumento em cerca de 34,6%, e para as restantes o aumento foi de 43%. Neste caso, verifica-se que embora as configurações sejam diferentes, laminados de dois furos distanciados em 40 mm e laminados de quatro furos distanciados em 20 mm, elas afetam de igual modo a carga e o deslocamento máximo. Com exceção dos laminados com furos distanciados em 20 mm, as restantes amostras não se revelam tão sensíveis ao efeito da concentração de tensões pois, segundo Whitney [46] and Nuismer [47], o dano só ocorre quando a tensão média a uma certa distância da frente do entalhe iguala a resistência do laminado sem entalhe. Por outro lado, estas configurações não afetam tanto a rigidez quanto a que contém dois furos distanciados entre si em 20 mm. Apesar da configuração com dois furos distanciados em 40 mm também apresentar fibras cortadas no alinhamento do impacto, o seu efeito não é tão nefasto devido ao efeito da concentração de tensões ser menos sentido e a rigidez não ser tão afetada devido ao maior número de fibras existentes a 90° na área de influência do impacto.

Na figura 4.3 são apresentados os resultados, para o primeiro impacto, em termos de recuperação elástica e rigidez à flexão por impacto. A rigidez à flexão por impacto (IBS) trata-se de uma propriedade bastante importante na avaliação de danos globais e é determinada a partir do declive ascendente da curva carga-deslocamento [48]. O IBS foi relacionado com a severidade do defeito por Amaro *et al.* [49], tendo observado que existe uma relação direta entre eles.

Da referida figura, verifica-se que o provete de controlo apresenta uma recuperação elástica de 59,2%, enquanto este valor para os laminados com dois furos distanciados em 20 mm é na ordem dos 44,6%. Este valor representa uma redução de 24,6% face aos provetes de controlo. Para as outras configurações, o valor médio para os laminados com quatro furos distanciados

em 40 mm é na ordem dos 49,1% e para os restantes em torno dos 46%, o que representa uma redução em torno

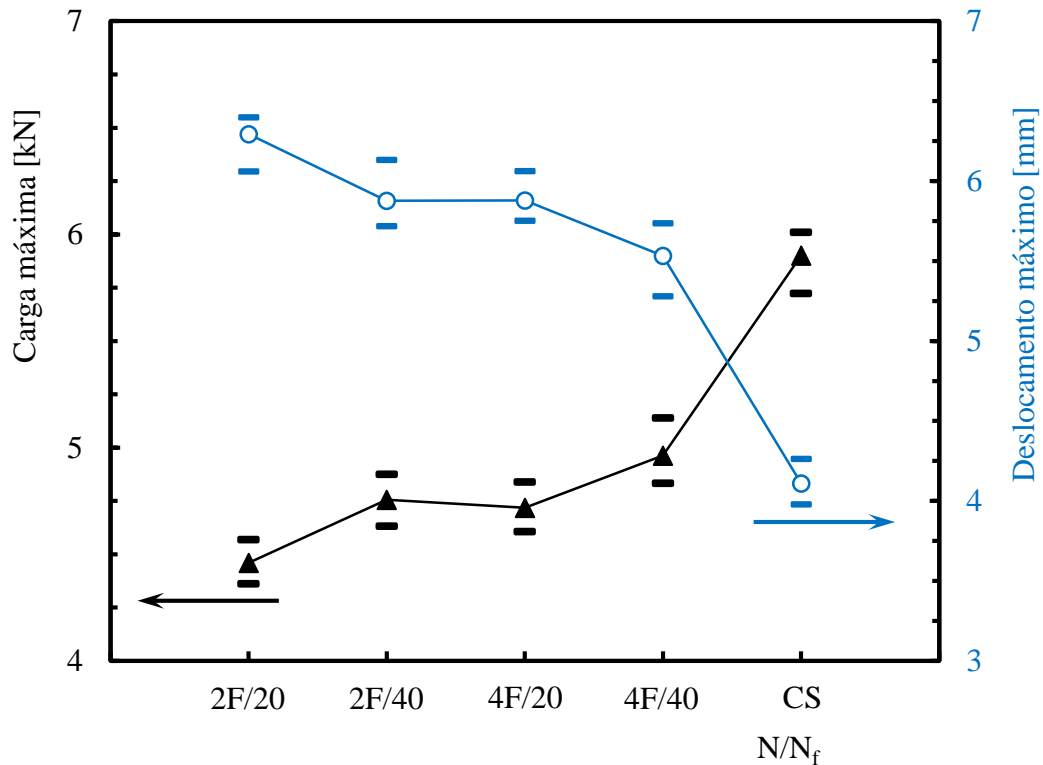


Figura 4.2 - Efeito do número de furos e sua disposição na carga e deslocamento máximo (Resultados para o primeiro impacto).

dos 17% e 22%, respetivamente, face às amostras de controlo. Uma tendência muito semelhante pode ser encontrada para a rigidez à flexão por impacto. Os valores médios obtidos para as amostras de controlo são em torno de 1226 N/mm e esse valor diminui em torno de 28,8%, 20% e 25%, respetivamente, para as amostras com dois furos distanciados em 20 mm, para os laminados com quatro furos distanciados em 40 mm e restantes configurações.

Estes valores confirmam a análise descrita anteriormente, onde a geometria com dois furos distanciados em 20 mm se revela a mais crítica. De acordo com a figura 4.3 ela apresenta a menor resistência ao impacto e, simultaneamente, a menor rigidez à flexão por impacto. Logo é espectável que o dano seja maior face às outras configurações. Dada a pequena distancia entre o furo e o ponto de contacto impactor/provete, a carga de impacto é significativamente majorada pelos elevados gradientes de tensão em torno do furo. Paralelamente, a rigidez do laminado também é afetada pelo corte das fibras provocado pelo furo.

Finalmente a figura 4.4 mostra os danos globais causados pelo primeiro impacto para os provetes de controlo, para os laminados com dois furos distanciados em 20 mm e para os laminados com quatro furos distanciados em 20 mm. Visualmente esta figura confirma o que foi dito anteriormente, onde o dano mais severo ocorre para os laminados com dois furos

distanciados em 20 mm. Neste caso o dano provocado pelo impacto alastra-se aos furos, chegando mesmo a serem envolvidos pelo dano global. Relativamente ao laminado com quatro furos, o dano apenas envolve marginalmente os furos.

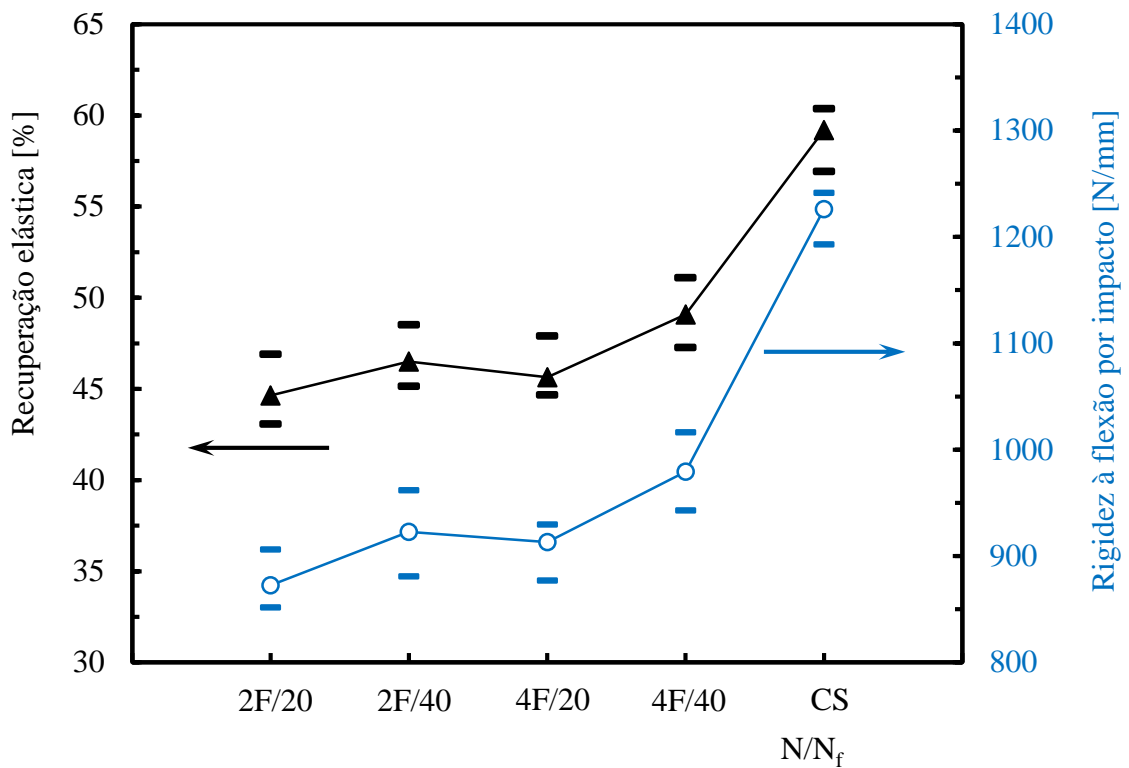


Figura 4.3 - Efeito do número de furos e sua disposição na recuperação elástica e na rigidez à flexão por impacto (Resultados para o primeiro impacto).

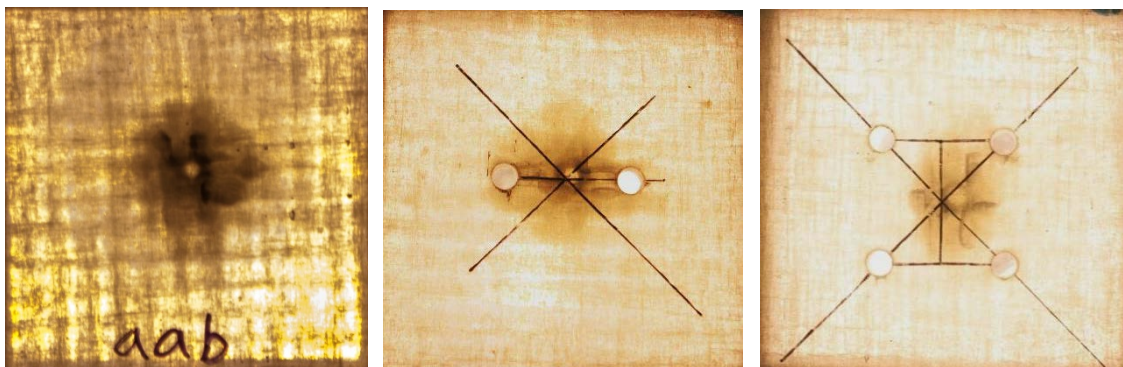


Figura 4.4 - Danos típicos observados após o primeiro impacto.

O número de impactos até à perfuração também foi estudado e está representado na figura 4.5. Numa primeira análise pode-se verificar que o número de furos não é revelante, mas o seu posicionamento geométrico e distância entre eles mostra afetar a resistência ao impacto. Para

esta gama de energia, enquanto para os provetes de controlo são necessários, em média, 18 impactos para ocorrer perfuração, nos laminados com dois furos distanciados em 20 mm são necessários apenas 9 impactos. Existe, neste caso, uma diminuição de 50% da vida, enquanto para os laminados com quatro furos distanciados em 40 mm é de 14,8% e para as restantes configurações na ordem dos 38%.

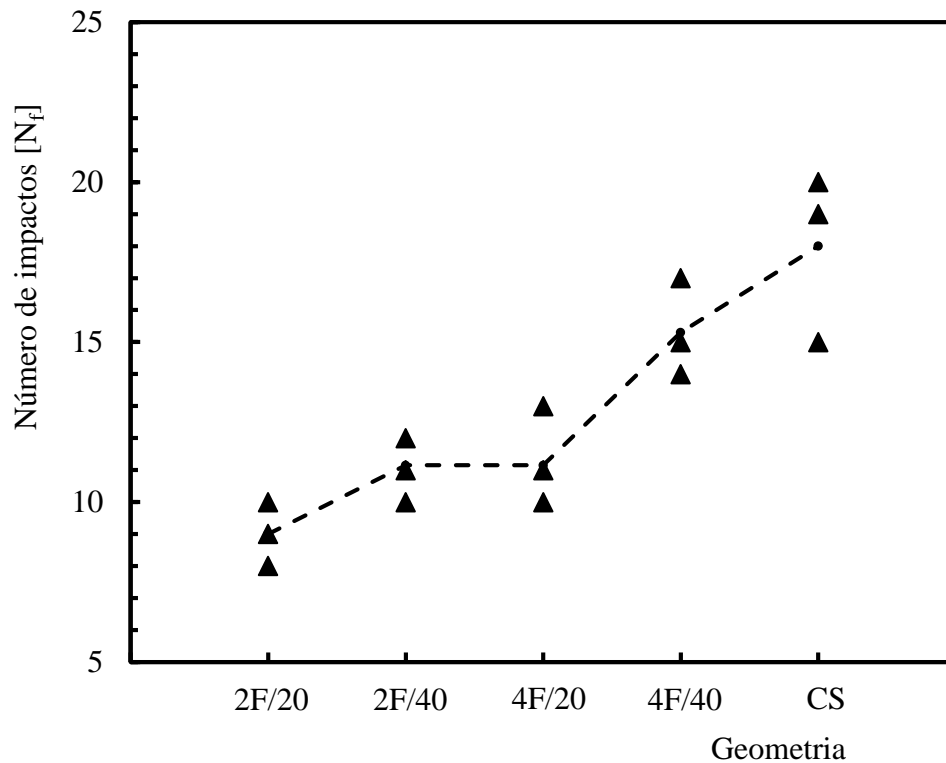


Figura 4.5 - Efeito da geometria na resistência ao impacto (Energia de impacto 12 J).

A figura 4.6 ilustra a evolução da carga máxima com o número de impactos. Os resultados são expressos em função de  $N/N_f$ , onde  $N$  representa o número do impacto em cada momento e  $N_f$  o número de impactos para o qual se deu a perfuração total.

Da referida figura observa-se que a carga máxima diminui com o número de impactos e, excepto para os provetes de controlo, todas as outras configurações evoluem segundo um polinómio do segundo grau. Neste caso fica evidente uma evolução rápida do dano, como consequência da concentração de tensões induzida pelo furo e pela afectação da rigidez dos laminados por estes. No caso dos laminados com dois furos distanciados em 10 mm, verifica-se uma evolução do dano muito mais rápida, a qual é justificada pelos elevados gradientes de tensão em torno dos furos e menor rigidez do laminado na zona do impacto provocada pelo corte das fibras [45] [46] [47].

Relativamente aos provetes de controlo, a evolução da carga segue um polinómio de grau três, dando, assim, origem a três estágios bem definidos. No primeiro, a carga decai acentuadamente

como resultado dos primeiros danos introduzidos pelas cargas de impacto. Posteriormente, os danos evoluem lentamente, definido-se assim o segundo estágio, até que se atinge uma saturação. Nesta altura os mecanismos de dano alteram-se significativamente e evoluem rapidamente para o colapso final, ou seja, perfuração total (terceiro estágio).

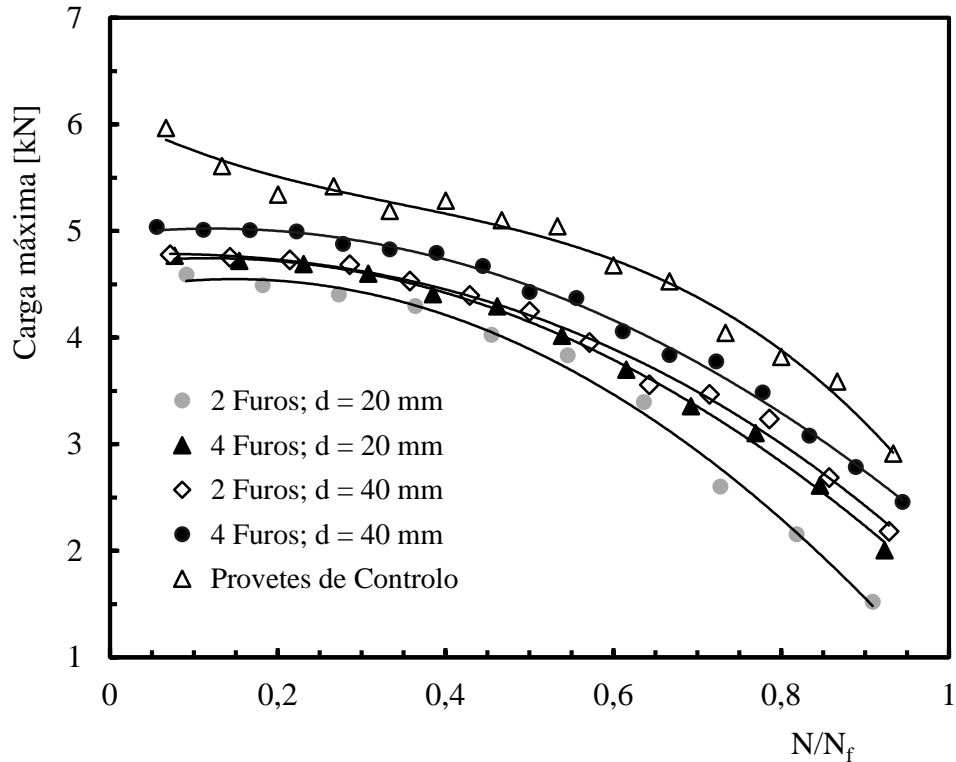


Figura 4.6 - Evolução da carga máxima com o número de impactos.

O deslocamento máximo evolui de forma semelhante, mas em sentido inverso, como ilustra a figura 4.7. Da referida figura é bem perceptível que o deslocamento aumenta com o número de impacto e, tal como anteriormente, exceto para os provetes de controlo, todos as outras configurações evoluem segundo um polinómio de grau dois. Os três estágios também aqui são bem visíveis para os provetes de controlo.

A figura 4.8 ilustra a evolução da recuperação elástica para todas as configurações. Como já foi referido, quanto menor for a recuperação elástica maior será a energia acumulada, ou seja, maior será o dano introduzido. Exceto para os laminados de controlo, em todas as configurações o dano progride rapidamente até ao colapso final, confirmando o que já foi referido anteriormente. Para os provetes de controlo, a existência dos três estágios denota uma progressão mais lenta do dano.

A evolução da rigidez à flexão por impacto (IBS) com o número de impactos encontra-se representada na figura 4.9. A consistência destas curvas com as apresentadas na figura anterior (figura 4.8), vem confirmar toda a análise descrita ao longo dos parágrafos anteriores. Nos

provetes de controlo, o dano inicia-se logo após o primeiro impacto e progride segundo um polinómio de grau três até ao colapso final. Após o primeiro estágio existe uma acumulação de dano até atingir uma saturação, a qual desencadeia novos mecanismos de falha que aceleram drasticamente a evolução do dano até se dar a perfuração. No caso das outras configurações, uma vez iniciado o dano, ele progride rapidamente até ao colapso final. Os laminados com dois furos distanciados em 20 mm são os que apresentam uma maior severidade do dano inicial, bem como na evolução do dano até à perfuração. Para as outras configurações, elas apresentam para o primeiro impacto valores de IBS muito próximos e, de acordo com a figura 4.9, esta semelhança mantém-se ao longo dos multi-impactos.

A figura 4.10 mostra os danos causados nos provetes para diferentes números de impactos. A figura 4.10 a) representa os danos para uma geometria de 2 furos e 40 mm, enquanto a figura 4.10 b) representa os danos ocorridos para uma geometria de 4 furos e 40 mm. É ainda possível observar que os danos inter-laminares que se desenvolvem entre camadas têm início no ponto de impacto e propagam-se nas direções das fibras, o que está de acordo com a bibliografia [50].

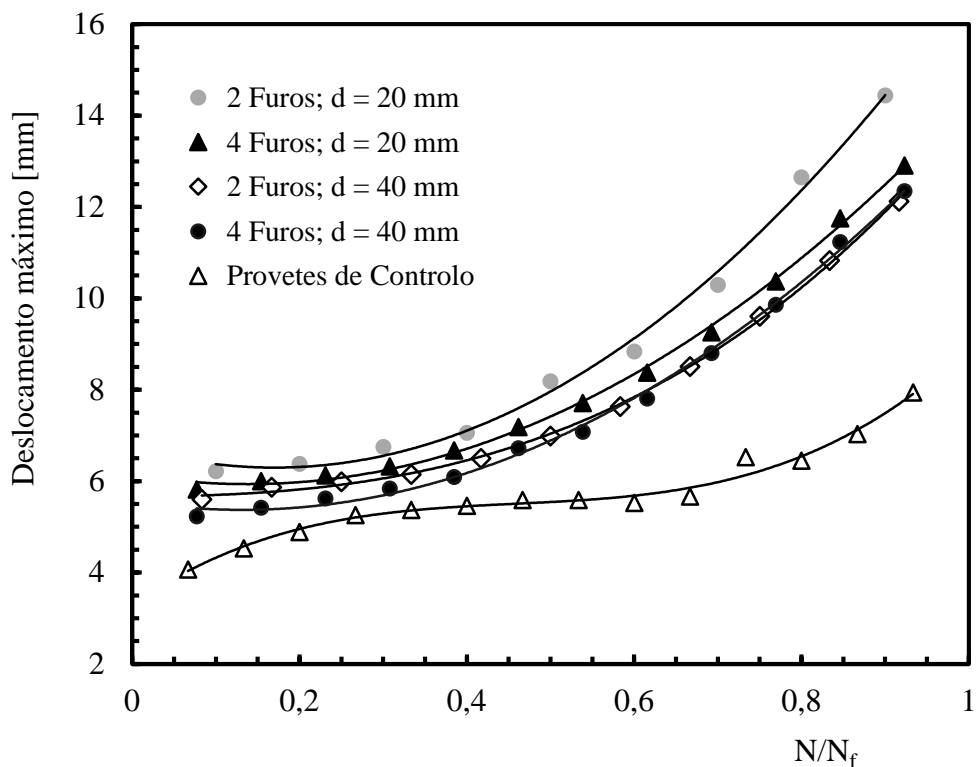


Figura 4.7 - Evolução do deslocamento máximo com o número de impactos.

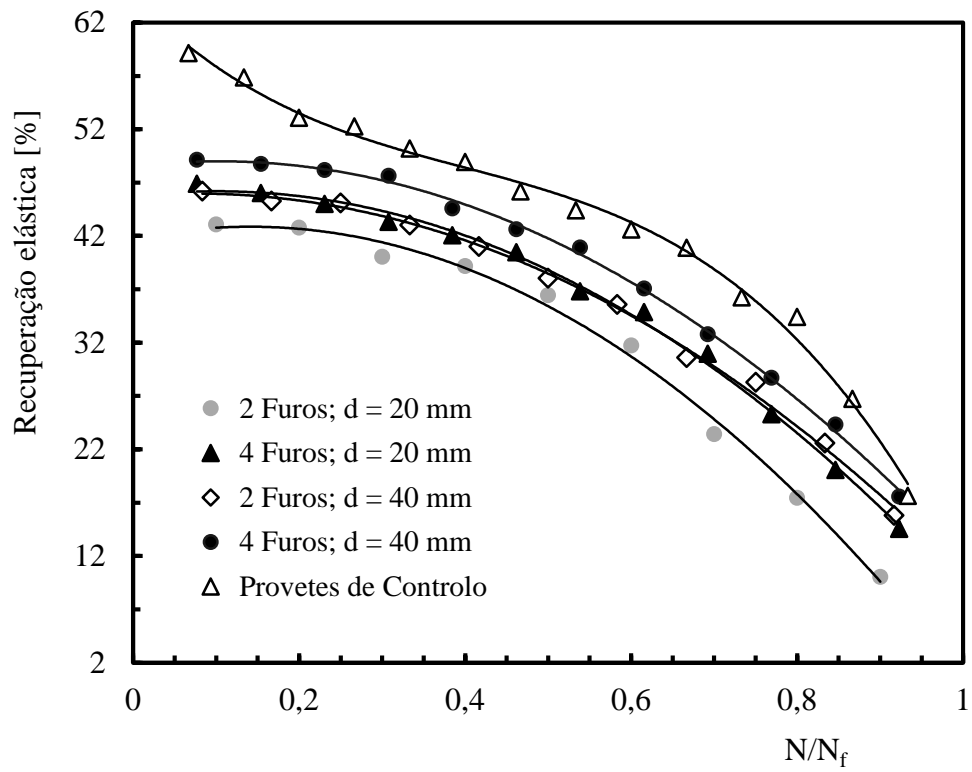


Figura 4.8 - Evolução da recuperação elástica com o número de impactos.

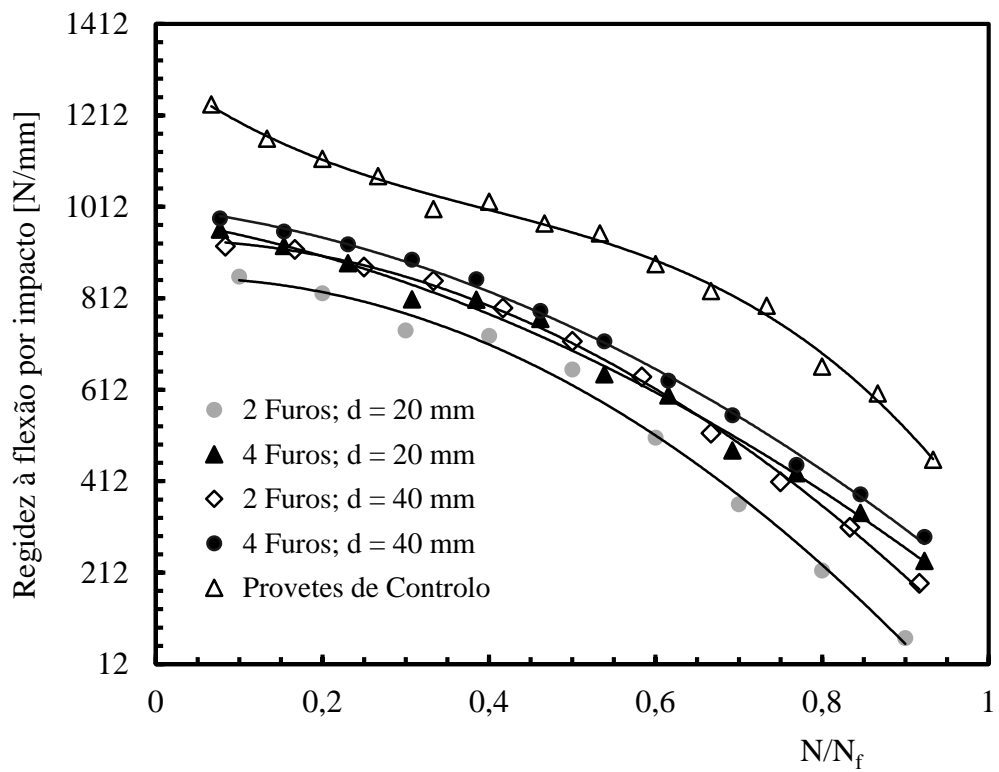
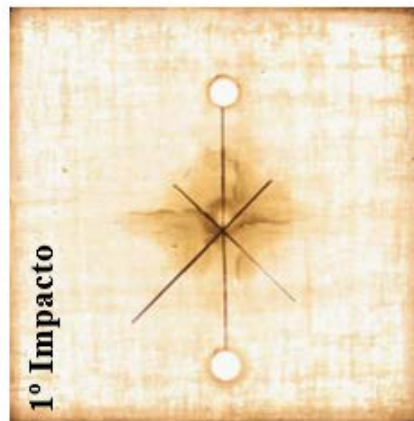
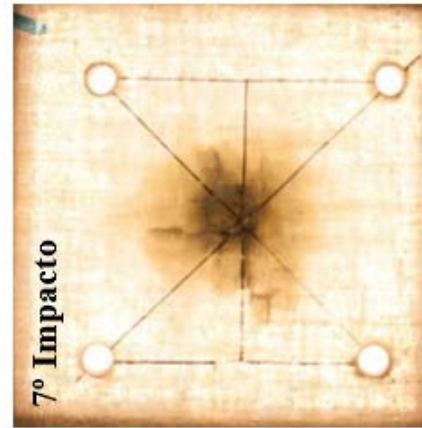
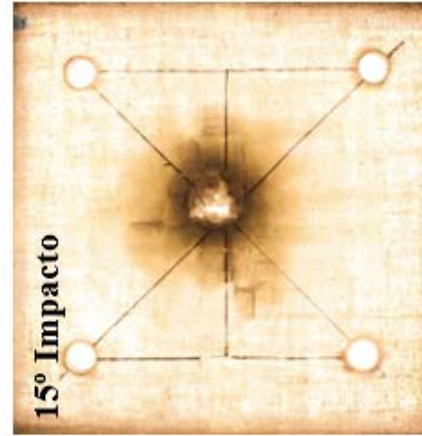


Figura 4.9 - Evolução da rigidez à flexão por impacto com o número de impactos.



a)



b)

Figura 4.10 - Evolução dos danos para: a) laminados com 2 furos e distância de 40 mm; b) laminados com 4 furos e 40 mm de distância.

# Capítulo 5

## Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros

O objetivo estabelecido para este estudo consistia em avaliar a resistência ao impacto de materiais compósitos contendo múltiplos furos. Para tal, efectuou-se um vasto estudo experimental envolvendo compósitos de fibra de vidro/epóxi com diferentes configurações. Assim, da análise e discussão de resultados surgiram algumas conclusões, as quais serão apresentadas neste capítulo. Finalmente deixam-se algumas recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões gerais

- 1- Para as configurações e gama de energia estudada, verificou-se que a disposição e a distância entre furos são mais importantes na resistência ao impacto do que o número de furos;
- 2- De todas as configurações estudadas, a que contém dois furos distanciados em 20 mm foi a que se revelou mais desfavorável na resistência ao impacto. Por outro lado, a configuração com quatro furos distanciados em 40 mm foi a que promoveu maiores vidas;
- 3- Os laminados contendo dois furos distanciados em 40 mm e os laminados contendo 4 furos distanciados em 20 mm apresentam cargas e deslocamentos máximos muito semelhantes, assim como recuperação elástica e rigidez à flexão por impacto. Consequentemente, as vidas também andam na mesma ordem de grandeza;
- 4- A evolução, com o número de impactos, da carga e do deslocamento máximo, da recuperação elástica e da rigidez à flexão revelou-se muito dependente da distância entre o ponto de impacto e o furo;
- 5- A rigidez à flexão por impacto manifestou ser um parâmetro capaz de avaliar a evolução do dano.

## 5.2 Recomendações para trabalhos futuros

No desenvolvimento do trabalho surgiram alguns aspetos que se revelam importantes no desenvolvimento de futuros trabalhos. Serão apresentados de seguida sumariamente os aspetos que poderão vir a ser desenvolvidos:

- 1- Desenvolver um estudo numérico para avaliar o efeito da concentração de tensões e da rigidez na resistência ao impacto de laminados com furos;
- 2- Estudar outros tipos de geometrias, incluindo as que não apresentam simetria;
- 3- Estudar o efeito do diâmetro dos furos;
- 4- Desenvolver este estudo para outros modos de carregamento;
- 5- Associar a este estudo o efeito do meio ambiente e ambientes hostis;

## Bibliografia

- [1] ASTM International (2007) Standard Terminology for Composite Materials, West Conshohocken, 2007, p. 5.
- [2] O Daniel, Ishai I(1994) Engineering of Composite Materials, Oxford University Press, p. 395.
- [3] AK, Kaw (1997) Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis.
- [4] Ashby MF (2005) Materials Selection in Mechanical Design, New York: Elsevier Butterworth.
- [5] M. SK, (2002) Composites Manufacturing: Materials, Product and Process, New York: CRC Press LLC.
- [6] M. Groover (2007) Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems, New York: John Wiley & Sons Inc.
- [7] Gay D. (2015) Composite Materials: Design and Applications, vol. Third Edition, CRC Press , 2015.
- [8] Pereira J (2005) Curso de projeto estrutural com materiais compósitos. Universidade federal de Santa Catarina.
- [9] Al-Qureshi, H. A (1984) Composite Materials: Fabrication and Analysis. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [10] Hull D (1988) Introduction to composite materials. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, p. 246.
- [11] Callister WD (2007) Materials Science and Engineering: An Introduction, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [12] G Akovali (2001) Handbook of Composite Fabrication, United Kingdom: Rapra Technology Ltd, pp. 16-18.
- [13] P. Silva (2014) Comportamento Mecânico de Compósitos de Fibra de Vidro/Epoxy Nano-Reforçados, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- [14] Moreira A (2008) Materiais de Construção I, vol. Materiais compósitos, Instituto politécnico de Tomar.
- [15] P. Santos(2010) Resistência ao Impacto de Compósitos Híbridos. Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior.
- [16] WD, Callister (2002) Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, New York, pp. 308-326.
- [17] Moura M; Morais A B, Magalhães (2009) Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, Porto: Publindústria, pp. 1-36 273-287.

- [18] Barbero J (2011) Introduction to Composite Materials Design, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, pp. 45-58.
- [19] Shimokawa T, Ham Aguchi, Distribution of fatigue life and fatigue strength in notched, J Compos Mater, Vol. 17, pp. 64-75.
- [20] Reid SR, G Zhou (2000) Impact Behaviour of Fibrereinforced Composite Materials and, England: Woodhead Publishing Limited.
- [21] Richardson WM (1996) Review of Low-velocity Impact Properties of Composite, Compos Part A-Appl S, Vol. 27, pp. 1123-1131.
- [22] Rouse JE (2012) Characterisation of Impact Damage in Carbon Fibrereinforced Plastics by 3D, Manchester, United Kingdom: University of Manchester.
- [23] Kaw AK (2006) Mechanics of composite materials, New York: Taylor & Francis Group.
- [24] Ruiz C, Harding J (1992) Modelling Impact of Composite Structures Using Small Specimens, vol. 2, pp. 164-167.
- [25] Shivakumar KN, Iber W, Illg W (1985) Prediction of low velocity impact damage in thin circular laminates, vol. 23, pp. 442-449.
- [26] Abrate S (1991) Impact on laminated composite materials, Appl Mech Rev, Vol. 44, pp. 155-190.
- [27] Liu D, Malvem LE (1987) Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates, J Compos Mater, Vol.21, pp. 594-609.
- [28] P. Robinson, G. Davies, (1992) Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites, Int J Impact Eng, Vol. 12 , pp. 189-205.
- [29] Reifsnider K L (1982) Damage in composite materials, vol. STP 775, ASTM.
- [30] Hayes BS, Gamm LM (2010) Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites, USA: ASTM International.
- [31] Reis L, Freitas M (1997) Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels, vol. 38, pp. 509-515.
- [32] Dias D, (2009) Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [33] Roy T, Chakraborty D (2008) Delamination in FRP laminates with holes under transverse impact, vol. 29, Mater. Des., pp. 124-132.
- [34] Green ER, Morrison CJ, Luo RK (2000) Simulation and Experimental Investigation of Impact Damage in Composite Plates with Holes, J. Compos. Mater., pp. 502-521.
- [35] Luo R (2000) The evaluation of impact damage in a composite plate with a hole, vol. 60, Compos. Sci. Technol., pp. 49-58.

- [36] AM Amaro, PNB Reis, MFSF De Moura, MA Neto (2013) Influence of open holes on composites delamination induced by low velocity impact loads, *Compos. Struct.*, Vol. 97, pp. 239-244.
- [37] Biresin CR122 Product Data Sheet Composite resin system (consult. 15 Julho 2016) Disponível em: [http://deu.sika.com/de/tooling-and-composites-redirect/tooling\\_composites/Dokumentendownload\\_Tooling/document\\_download/PDB-Compositesysteme.html](http://deu.sika.com/de/tooling-and-composites-redirect/tooling_composites/Dokumentendownload_Tooling/document_download/PDB-Compositesysteme.html).
- [38] Hatch KL (1993) *Textile science*, St. Paul: West Publishing Company.
- [39] IMATEK IM 10 Drop Weight Impact Testers (Consul. 24 Setembro 2016) Disponível em: <http://www.imatek.co.uk/product-im10.php>.
- [40] Aslan Z, Karakuzu R, Okutan B (2003) The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, *Compos Struct*, Vol 59, pp. 119-127.
- [41] Reis PNB, Ferreira J, Zhang Z, Benameur T, Richardson M (2013) Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix, *Compos Part B-Eng*, pp. 7-14.
- [42] Belingardi, G (2002) Low velocity impact of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite materials plates, *Int J Impact Eng*, Vol. 27, pp. 213-229.
- [43] M. Aktas, C. Atas, B. Icten, K. R (2009) An experimental investigation of the impact response of composite laminates. *Compos Struct*, Vol.87, pp. 307-313.
- [44] Schoeppner GA, Abrate S (2000) Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Compos Part A-Appl S*, Vol. 31, pp. 903-915.
- [45] Amaro AM; Reis PNB, Moura M, Santos JB (2012) Influence of the specimen thickness on low velocity impact behavior of composites, vol. 32, *J Polym Eng*.
- [46] Whitney JM, Nuismer RJ (1974) Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations, vol. 8, *J Compos Mater*, pp. 253-265.
- [47] Whitney JM, Nuismer RJ (1975) Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations, *Fracture mechanics of composites ASTM STP 593*, p. 117.
- [48] David-West O, Nash D, Banks W (2008) An experimental study of damage accumulation in balanced CFRP laminates due to repeated impact, *Compos. Struct.* 83, pp. 247-258.
- [49] Amaro A, Reis P, Neto M, Louro C (2013) Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites, *Polymer Degradation Stability*, Vol. 98, pp. 853-862.
- [50] Reis P, Ferreira J, Santos P, Richardson M, Santos J, (2012) Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix, *Compos Struct*, Vol. 94, pp. 3520-3528.