



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Resistência ao impacto de placas curvas

**Pedro Miguel Bernardino Sousa**

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

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis do Reis

Covilhã, setembro de 2017

Folha em branco

# Agradecimentos

O autor deseja, deste modo, expressar o seu agradecimento a todas as pessoas e instituições que, dos mais diferentes modos, contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente:

- Ao orientador científico, Professor Paulo Reis pelo acompanhamento dado na elaboração da dissertação;
- Ao Professor Abílio Pereira Silva e à Professora Tânia Lima, da Universidade da Beira Interior, pela dedicação e apoio dados no processo de manufatura dos provetes;
- Ao Engenheiro Carlos Coelho, do Instituto Politécnico de Abrantes, por todo o apoio e disponibilidade na realização dos ensaios de impacto;
- À Universidade da Beira Interior pela utilização do Fablab e ao Sr. João Correia pela ajuda na fabricação do molde;
- Ao Professor Fernando Santos e Professor Helder Correia, pela colaboração;
- Por último e não menos importante agradeço aos meus colegas e amigos Diogo Caetano, Renan Zocca, Ana Rita Neves, Ricardo Henriques, Rafael Santos, Hugo Góis e Sara Coelho pela ajuda prestada no fabrico dos provetes e acima de tudo pela amizade demonstrada;

Folha em branco

## Resumo

Os danos provocados pelo impacto de baixa velocidade constituem um desafio no campo dos materiais compósitos. Contrariamente aos metais, o dano em compósitos inicia-se geralmente no seu interior sob a forma de fissuras na matriz, delaminações e rotura de fibras. Tais danos apresentam um efeito bastante acentuado na resistência mecânica, por esse motivo diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de se caracterizar o comportamento ao impacto de estruturas compósitas.

Esta dissertação tem, assim, o objetivo de avaliar a resistência ao impacto de baixa velocidade em placas curvas com diferentes espessuras. Este tópico revela-se de extrema importância, uma vez que os compósitos permitem o fabrico de peças únicas com configurações complexas. Neste caso particular, para placas com geometrias curvas, verificou-se que o aumento da espessura resulta num aumento da rigidez da placa, a qual apresenta uma influência significativa no comportamento ao impacto. Assim, maiores espessuras conduzem a maiores cargas de impacto, menores deflexões e tempos de contato bem como danos induzidos. Consequentemente, uma maior espessura conduz a uma maior vida de fadiga.

## Palavras-chave

Placas curvas, Fibra de vidro, Resistência ao impacto

Folha em branco

# Abstract

The damages caused by low velocity impact are a great challenge on the composite materials field. Contrary to metals, the damage in composites generally starts inside as cracks in the matrix, delamination and fiber breakage. Such damages can have a great effect on the mechanical strength, therefore several studies have been developed to characterize the impact behavior of composite structures.

This dissertation thus has the objective of evaluation the resistance to the low speed impact on curved plates with different thicknesses. This topic proves to be of utmost importance since composites allow the manufacture of single parts with complex geometries. In this case, for plates with curved geometries it has been found that increasing the thickness results in an increase in the rigidity of the plate, which has a significant influence on the impact behavior. Thus, greater thicknesses lead to higher impact loads and lower deflections, contact times and damage severities. Consequently, a greater thickness leads to a longer life of fatigue.

## Keywords

Curved plates, Fiber Glass, Impact resistance

Folha em branco

# Índice

1. Enquadramento teórico	2
1 Materiais compósitos	2
1.1 Definição de Material Compósito	2
1.2 Aplicação dos materiais compósitos	4
1.3 Matrizes	9
1.4 Elementos de Reforço	11
1.5 Técnicas de fabrico	15
2 Efeito das cargas de Impacto nos materiais compósitos	16
2.1 Introdução	16
2.2 Classificação das cargas de Impacto	16
2.3 Danos provocados por cargas de impacto	19
2.4 Comportamento ao impacto de cascas cilíndricas	23
2 Material, equipamento e procedimento experimental	29
2.1 Fabricação dos provetes	29
2.2 Fabricação das placas	30
2.3 Equipamentos	32
2.4 Procedimento experimental	33
3 Análise e Discussão de Resultados	34
4 Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros	50
Bibliografia	51

Folha em branco

# Lista de Figuras

Figura 1.1:	Comparação de várias propriedades entre materiais compósitos e os metais mais utilizados: Aço e alumínio [3]	2
Figura 1.2:	Exemplos de materiais compósitos com formas cilíndricas	4
Figura 1.3:	Percentagem de utilização e tipo de materiais compósitos utilizados no caça F18 [32]	5
Figura 1.4:	Fuselagem de uma aeronave ligeira inteiramente em carbono	6
Figura 1.5:	Classificação das matrizes mais convencionais	8
Figura 1.6:	Classificação dos compósitos com base na geometria dos seus componentes estruturais	10
Figura 1.7:	Influência do ângulo entre as fibras e a força aplicada na tensão máxima [1]	11
Figura 1.8:	Estrutura microscópica típica de um compósito. As fibras representadas pelos pontos possuem uma distribuição aleatória no plano e a resina distribui-se em redor das fibras [47]	13
Figura 1.9:	Exemplo de molde e peça fabricada por moldação a vácuo	14
Figura 1.10:	Tipos de resposta consoante o tempo de impacto [30]	17
Figura 1.11:	Comparação entre a resposta de impactores com (a) grande massa e (b) pequena massa [37]	19
Figura 1.12:	Exemplo dos diferentes tipos de dano (fissura na matriz, rotura de fibra e delaminação) [34]	20
Figura 2.1:	Desenho técnico do molde produzido	30
Figura 2.2:	Vista geral do provete após submetido a vácuo durante o processo de fabricação	31
Figura 2.3:	Geometria dos provetes	32
Figura 2.4	Máquina de impacto IMATEK-IM10	33
Figura 3.1:	Curvas típicas carga-tempo e energia-tempo para as diferentes espessuras	33
Figura 3.2:	Máxima carga de impacto e deflexão, após o primeiro impacto, em função da espessura	34
Figura 3.3:	Resistência à flexão por impacto (IBS), após o primeiro impacto, em função da espessura	35
Figura 3.4:	Dano típico, após o primeiro impacto, para espécimes com diferentes espessuras a) 1,08 mm; b) 1,54 mm; c) 2,00 mm	36
Figura 3.5:	Curvas típicas carga-deflexão para ensaios de compressão	37
Figura 3.6:	Carga média máxima à compressão em função da espessura	38
Figura 3.7:	Evolução do dano obtido para as diferentes espessuras a) 1,1 mm; b) 1,6 mm; c) 2,1 mm	40

Figura 3.8:	Número de impactos em função da espessura	41
Figura 3.9:	Evolução da carga máxima de impacto em função do número de impactos	42
Figura 3.10:	Evolução da deflexão em função do número de impactos	43
Figura 3.11:	Evolução do IBS em função do número de impactos	43
Figura 3.12:	Evolução dos mecanismos de dano em função do número de impactos a) 1,08 mm; b) 2,00 mm	46
Figura 3.13:	Carga Compressiva Residual em função do número de impactos	46
Figura 3.14:	Curva típica carga-deflexão para a amostra de controlo e para uma amostra após 6 impactos	47
Figura 3.15:	a) Dano após 6 impactos; b) Evolução do dano a diferentes cargas compressivas	48

Folha em branco

# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Aplicações típicas dos materiais compósitos

7

Folha em branco

## Lista de Acrónimos

CFRP	Polímeros reforçados com fibras de carbono
FRPs	Polímeros reforçados com fibras
RBCs	Compósitos com base em resina
EUA	Estados Unidos da América
PI	Poli-imida
PES	Polietersulfona
PEEK	Poliéter-étercetona
PEI	Polieterimida
GFRP	Plásticos reforçados com fibra de vidro
RTM	Moldagem por transferência de resina
VARTM	Transferência de resina assistida por vácuo

Folha em branco

# Introdução

Os impactos de baixa velocidade são especialmente problemáticos, dada a forma como se desenvolve o dano. Nesse sentido, esta dissertação pretende abordar esta problemática e em especial no que concerne a placas curvas de fibra de vidro/epóxi com espessura variável.

Tendo em vista este pressuposto, a presente dissertação encontra-se organizada em 4 capítulos sendo, no Capítulo 1, feito um enquadramento teórico sobre os principais temas abordados. Especial enfoque será dado aos materiais compósitos em termos da sua definição, classificação, técnicas de fabrico e atuais aplicações. Também é feita uma breve revisão sobre o efeito das cargas de impacto nos materiais compósitos, onde se dá um especial destaque à classificação do impacto, danos provocados por impacto, técnicas não destrutivas para avaliação de dano e comportamento ao impacto de cascas cilíndricas. Por sua vez, o capítulo 2 descreve as técnicas experimentais utilizadas no trabalho, onde se realça a manufatura dos compósitos, a geometria dos provetes e os equipamentos utilizados. Pretende-se, assim, fornecer todos os detalhes do procedimento experimental adotado com vista a um enquadramento/discussão dos resultados obtidos. No capítulo 3 é então feita a apresentação dos resultados experimentais e sua discussão, sendo esta convenientemente apoiada pelos estudos disponíveis na literatura. Finalmente, o capítulo 4 apresenta as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## Enquadramento teórico

### 1 Materiais compósitos

#### 1.1 Definição de Material Compósito

Tal como o próprio nome indica, os compósitos são obtidos através da combinação de dois ou mais materiais, com distintas propriedades, de modo a obter-se um novo material cujas propriedades são superiores às dos seus constituintes em separado [1]. A utilização de compósitos na indústria apenas se massificou a partir dos anos 60, mas já na antiguidade estes eram utilizados na construção e no reforço de armas. Por exemplo, o arco Mongol utilizava o corno de búfalo no seu lado interior, que estava à compressão, e uma combinação de madeira com tendões de vaca no lado exterior, lado da tração [2]. Também a madeira, presente na natureza, poderá ser considerada um compósito fibroso. A celulose são as fibras e a lignina a matriz. As fibras de celulose são um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas e possuem uma elevada resistência axial, mas são muito flexíveis. Por outro lado, a lignina é semelhante a uma resina, sendo responsável por conferir rigidez e por unir as fibras. No entanto, nem toda a combinação de dois materiais poderá ser classificada como material compósito e, neste contexto, Chawla [3] propõe os seguintes critérios para os identificar:

1. Os materiais compósitos são manufacturados;
2. São constituídos por duas ou mais fases fisicamente e/ou quimicamente distintas, adequadamente organizadas ou distribuídas com uma interface separando-as;
3. As características do material final não podem ser alcançadas por nenhum dos seus constituintes em separado;

Numa época pré-compósitos as ligas metálicas foram dominantes em aplicações estruturais, oferecendo melhores propriedades que os metais puros. Por exemplo, o ferro fundido é frágil e passível de corrosão, mas a adição de 1% de carbono torna-o mais rígido e a adição de cromo torna-o resistente à corrosão [4]. O facto da resistência específica dos compósitos ser três vezes superior às das ligas de alumínio e duas vezes maior que a do aço de alta resistência levou a que as ligas fossem gradualmente substituídas pelos compósitos. Estes por sua vez oferecem a rigidez do aço a um quinto do peso e a rigidez do alumínio a metade do peso. Adicionalmente, a substituição de componentes de aço por componentes compostos também resulta numa economia em peso compreendida entre 60 a 80% e 20 a 50% substituindo peças de alumínio [4].

Isto significa que em média uma estrutura compósita, para a mesma rigidez, poderá apresentar metade do peso [3]. Para além da resistência estática também oferecem uma boa resistência à fadiga, pois esta é na ordem dos 90% da resistência estática para um compósito, em vez dos 35% das ligas de alumínio e 50% dos aços e ligas de titânio [2]. No que respeita à fadiga por impacto sabe-se que compósitos de fibra de vidro e de aramida proporcionam uma maior resistência do que o aço ou o alumínio [4].

A Figura 1.1 evidencia, comparativamente ao aço e alumínio, o menor peso, menor expansão térmica, maior rigidez e resistência específica bem como maior resistência à fadiga dos compósitos.

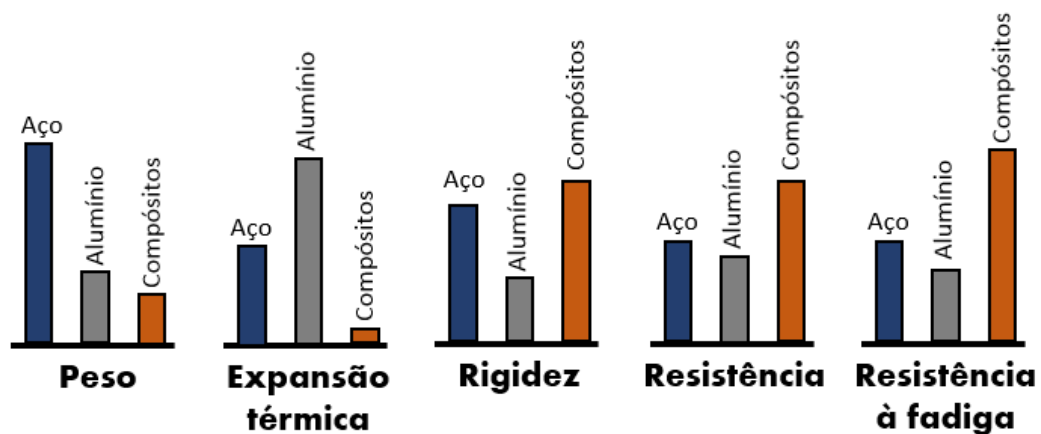


Figura 1.1: Comparação de várias propriedades entre materiais compósitos e os metais mais utilizados: Aço e alumínio [3]

Devido à sua elevada resistência e rigidez específica, para além das propriedades elétricas, térmicas e tribológicas, os compósitos revelam-se ideais para aplicações estruturais de baixo peso [2] ,[5]. Para além destas propriedades, destacam-se ainda [4]:

- O calor e a humidade não provocam o envelhecimento do material (apesar disso a resina epóxi pode absorver água por difusão até 6% da sua massa e o composto reforço/resina pode absorver até 2%);
- Elevada resistência à corrosão (exceto no caso do alumínio com fibras de carbono em que ocorre corrosão galvânica);
- Não são sensíveis a produtos químicos comuns: óleos, petróleo, líquidos hidráulicos, tintas e solventes, petróleo (Note-se que os diluentes de tinta atacam as resinas epóxi);
- Possuem uma excelente resistência ao fogo, mas os fumos emitidos pela combustão de certas matrizes podem ser tóxicos;
- Os compósitos permitem integrar vários componentes metálicos num único componente compósito;
- Peças complexas e contornos especiais, por vezes não alcançáveis com metais, podem ser fabricados com compósitos;

- Estruturas compósitas permitem o monitoramento em serviço com a ajuda de sensores incorporados;
- As características de ruído, vibração e dureza são melhores em materiais compósitos do que em metais;
- O custo das ferramentas necessárias para manufatura e processar compósitos é muito menor do que o processamento de metais devido aos menores requisitos de pressão e temperatura;

## 1.2 Aplicação dos materiais compósitos

As primeiras aplicações comerciais em larga escala de materiais compósitos começaram nos setores militares durante a Segunda Guerra Mundial (final da década de 1940 e início da década de 1950). Hoje em dia, os compósitos ocupam uma posição bem estabelecida numa diversificada gama de indústrias, nomeadamente aeroespacial, automóvel, marítima, náutica, bens desportivos, infraestruturas, entre outras [2], [4]. Através da seleção dos seus constituintes e respetivas proporções, para além da sua distribuição e resistência da interface, é possível obter-se materiais que satisfaçam as necessidades das mais diversas áreas [1]. De fato, a pluralidade de configurações, a alta qualidade do acabamento superficial obtido pelos diferentes processos de fabrico e a baixa de preço dos seus constituintes, leva a que estes materiais estejam presentes nos mais diversos setores industriais [4]. A Figura 1.2 ilustra, por exemplo, diversas peças com geometrias curvas que hoje em dia são facilmente produzidas e maquinadas em materiais compósitos.

Neste contexto, devido à sua baixa densidade e facilidade com a qual que se obtém as propriedades mecânicas desejadas, não será de estranhar a sua enorme aplicação/utilização no sector aeronáutico/aeroespacial. Por exemplo, em aeronaves são desejáveis materiais que combinem rigidez e resistência mecânica, mas no caso dos satélites é determinante a rigidez para garantir a estabilidade dos pratos refletores, antenas e estruturas de suporte [6]. Os principais motivos do uso de materiais compósitos em aplicações espaciais incluem redução de peso, bem como estabilidade dimensional. Na órbita terrestre baixa, onde a variação de temperatura é de -100 a + 100 °C, é importante manter a estabilidade dimensional em estruturas de suporte e nesse sentido os laminados de carbono podem ser projetados para um coeficiente de expansão térmico nulo [4]. Para além disso, a facilidade de se obterem formas complexas reduz o número de partes necessárias para a manufatura de uma determinada peça, diminuindo assim o tempo de montagem e o número de pontos de concentração de tensões [7].

Os materiais compósitos foram introduzidos no sector aeronáutico em 1903 através do avião Flyer 1 dos Wright Brothers, mas foi apenas a partir dos anos 60 e 70, do século passado, que eles passaram a ter expressão nesta indústria. Primeiro com a introdução dos compósitos de boro em 1960 e posteriormente com os compósitos de carbono e de aramida, em 1970 e 1972

respetivamente [2]. Inicialmente apenas eram utilizados em estruturas secundárias, como é o caso dos estabilizadores horizontais e componentes da cauda dos caças, mas com o surgimento dos CFRP a sua utilização depressa passou a contemplar elementos estruturais sujeitos a elevadas cargas como: veios de transmissão, pás de helicópteros, pás de motores a jato ou asas de aeronaves [5]. Hoje em dia são utilizados tanto em aeronaves militares como civis, para além de aplicações em aeronaves não tripuladas, lançadores espaciais e satélites em substituição do alumínio e das ligas de titânio [6],[7]. A Figura 1.3 mostra a evolução da aplicação dos materiais compósitos na indústria aeronáutica, tendo como base o avião F18. Comparando as suas duas versões, uma de 1983 (F/A-18C/D) e outra de 1995 (F/A-18E/F), é possível observar que na versão mais recente o revestimento das asas, a fuselagem dianteira, os flapes e o leme são completamente feitos em materiais compósitos, constituindo 75% da sua área exterior [7]. Na aviação comercial a primeira utilização remonta a 1983 nos lemes do A300 e A310, tendo vindo a aumentar para cerca de 50% do Boeing 787 (20% do seu peso total). A redução de peso típica encontra-se na faixa dos 20 a 35% e traduz-se numa maior capacidade de carga útil, menor consumo de combustível e aumento do número de passageiros por voo. A título de exemplo, a diminuição de um quilograma é responsável por uma redução na ordem dos 120 litros de combustível por ano [2]. Os compósitos de fibra de carbono são os mais utilizados, devido ao seu elevado desempenho, como é visível na Figura 1.4 a fuselagem de uma aeronave ligeira poderá ser totalmente construída por fibras de carbono.

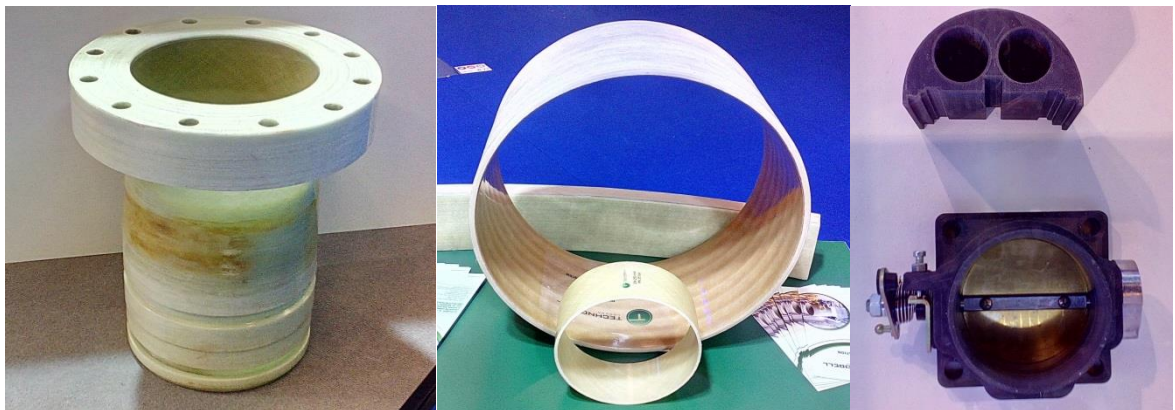


Figura 1.2: Exemplos de materiais compósitos com formas cilíndricas

Na área da construção civil, a aplicação mais vulgar dos materiais compósitos é na reabilitação e manutenção de estruturas já existentes, com especial incidência no reforço de estruturas de betão [8]. Este reforço surge da necessidade de se adaptarem estruturas a níveis de cargas mais elevadas ou na sua recuperação em caso de degradação. Por exemplo, algumas estruturas já existentes são cobertas com CFRP de modo a aumentar a sua resistência mecânica.

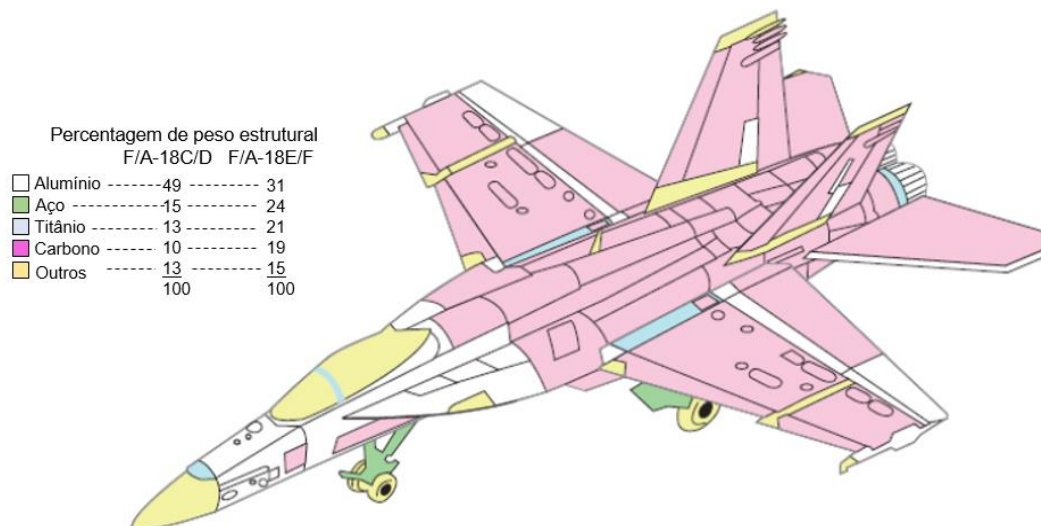


Figura 1.3: Percentagem de utilização e tipo de materiais compósitos utilizados no caça F18 [32]

Nos anos 50 o chassi em fibra de vidro do Chevrolet Corvette ditou o início dos compósitos na indústria automóvel. A utilização de compósitos em automóveis de competição tem sido uma realidade crescente, onde se têm destacado as fibras de carbono na construção de células de proteção dos pilotos [9]. A sua introdução permitiu uma redução do número de peças necessárias para fabricar um determinado componente, melhorar o isolamento térmico e acústico, melhorar o comportamento à corrosão e fomentar acabamentos superficiais de alta qualidade [4]. Para além destes benefícios, a capacidade destes materiais acumularem energia torna-os atrativos para o fabrico de molas. Teoricamente, uma mola em fibra de vidro é capaz de armazenar 5 a 7 vezes mais energia elástica do que uma mola de aço com a mesma massa [2].

A indústria naval, por exemplo, tem vindo a utilizar compósitos desde o final da 2ª guerra mundial tanto ao nível das pequenas como grandes embarcações [10]. Uma das muitas aplicações é na construção das chaminés dos navios, pois conduzem a uma redução de peso em cerca de 50%, relativamente a uma chaminé convencional. No caso dos barcos de patrulha, é possível reduzir o seu peso estrutural em 10% relativamente a uma construção similar em alumínio e 36% em aço [10]. Por sua vez, a sua utilização nos eixos das hélices de grandes navios, os quais representam 2% (100-200 toneladas) do peso total do navio, promove uma redução de peso na ordem dos 25 a 80% face aos fabricados em aço [10]. Esta redução traduz-se numa maior eficiência de combustível, maior velocidade, maior portabilidade e menores custos operacionais [4]. Para além disso, reduz em cerca de 20% os custos de construção quando comparado com os materiais tradicionais, como o aço inoxidável e o alumínio [9]. A introdução de compósitos não se reflete apenas ao nível do desempenho mecânico, mas também ao nível do design pois permite veículos mais aerodinâmicos.

Ao nível médico, os Biocompósitos sob a forma de sob a forma de implantes (placas ósseas, substituição de articulações, ligamentos, enxertos vasculares, válvulas cardíacas, lentes intraoculares, implantes dentários, etc.) e dispositivos médicos (pacemakers, biossensores, corações artificiais, tubos de sangue, etc.) são amplamente utilizados para substituir e ou restaurar a função de tecidos/órgãos traumatizados ou degenerados [11]. Os compósitos carbono/carbono, por exemplo, são biocompatíveis, resistentes a químicos, mecanicamente resistentes e tolerantes à fadiga, daí serem utilizados na maioria destas aplicações.



Figura 1.4: Fuselagem de uma aeronave ligeira inteiramente em carbono

Tabela 1.1 - Aplicações típicas dos materiais compósitos [2]

<p>Industria Aeronáutica</p>	<p><u>Primeiras utilizações à escala industrial</u> [1938] o avião Morane 406 (FRA) utilizou painéis sanduíche com núcleo de madeira revestida com ligas leves</p> <p>[1943] foram utilizados compósitos de fibra de cânhamo e resina fenólica no Spitfire (U.K.)</p> <p><b>Aplicações atuais:</b> Estrutura das aeronaves, ailerons e flaps, componentes de controle da direção e elevação, spoilers, fuselagem, portas dos compartimentos de carga e de saída, porta do trem de aterragem, nariz do avião, pisos e compartimentos de passageiros;</p>
<p>Industria Automóvel</p>	<p><u>Primeiras utilizações à escala industrial</u> [1968] O S.M.Citroen (FRA) utilizou jantes revestidas com fibra de vidro</p> <p>[1970] Os revestimentos dos amortecedores do Renault R5 foram revestidos em fibra de vidro (FRA)</p> <p><b>Aplicações atuais:</b> Cabeça do motor, capô, guarda lamas, tejadilho, portas, painel lateral e consoles centrais, suporte de faróis, tanques de óleo, colunas de direção, amortecedores, capa do distribuidor, eixos de transmissão, peças do motor e caixa de velocidades, elementos do chão, chassi de veículos desportivos;</p>
<p>Industria naval</p>	<p><u>Primeiras utilizações à escala industrial</u> [1983] Fabrico do Catamaran Elf Aquitaine (FRA)</p> <p>[1995] Fabrico das primeiras pranchas de surf em fibra de vidro</p> <p><b>Aplicações atuais:</b> Revestimentos, componentes e embarcações totalmente fabricadas em materiais compósitos;</p>
<p>Outras aplicações</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pás das turbinas eólicas</li> <li>• Botijas de gás</li> <li>• Tubos para instalações offshore</li> <li>• Cabines de teleférico</li> <li>• Equipamentos desportivos: Tacos de golfe, raquetes de ténis, esquis de neve, canas de pesca, etc.</li> </ul>

### 1.3 Matrizes

A matriz desempenha várias funções num compósito laminado [4]. Para além de unir as fibras entre si e permitir a transferência de carga entre elas, a sua baixa dureza e plasticidade também previne a propagação de fendas frágeis de uma fibra para a outra. Ao nível externo protege as fibras contra danos superficiais decorrentes da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Apesar de fornecer rigidez e forma à estrutura, ela acaba por condicionar fortemente a temperatura de serviço (temperatura máxima que o material suporta sem se deteriorar) [1], [12], [13]. Tipicamente, os compósitos são classificados de acordo com o material constituinte da matriz onde, como ilustra a Figura 1.5, podem ser de origem metálica, polimérica ou cerâmica.

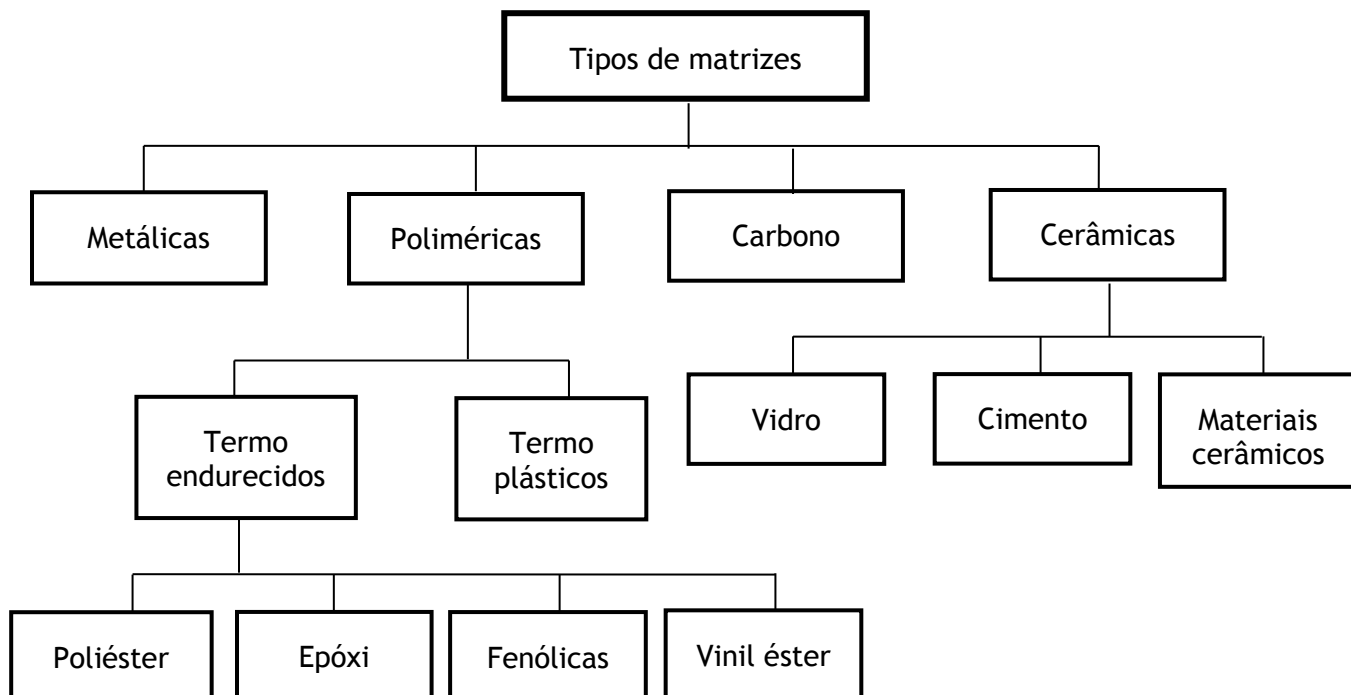


Figura 1.5 Classificação das matrizes mais convencionais

**Matrizes poliméricas** - Constituindo a base de muitos FRPs, são as mais utilizadas devido ao seu baixo custo e peso, boas propriedades mecânicas e relativa facilidade nos processos de fabrico a preços bastantes competitivos. As matrizes poliméricas dividem-se em termoendurecíveis e termoplásticas. As primeiras (epóxi, poliéster, vinil éster e fenólicas) apresentam-se no estado líquido e solidificam à temperatura ambiente (após a adição do catalisador), caracterizam-se por ser mais rígidas que as termoplásticas e não são maleáveis quando aquecidas [12]. A resina epóxi, utilizada neste trabalho, é a mais resistente das termoendurecíveis, caracterizando-se por um comportamento frágil, baixa condutividade elétrica e boa capacidade de amortecer vibrações, embora esteja limitada a temperaturas de serviço na ordem dos 120°C [13] [14]. Por sua vez, as resinas de poliéster oferecem uma boa resistência à corrosão, mas a temperatura de serviço é inferior à das resinas epóxi. As resinas vinil éster oferecem uma boa resistência química e corrosiva, sendo utilizadas em tubos e tanques na indústria química. Finalmente as resinas fenólicas

são utilizadas em aplicações que envolvam temperaturas elevadas, resistência ao desgaste, resistência a produtos químicos e estabilidade dimensional, tais como tubos de escape, componente de misseis, e disco de travões [12].

Por seu turno, as termoplásticas (tais como: PP, PI, PES, PEEK, PEI, etc.) até atingirem uma dada temperatura apresentam uma elevada viscosidade e podem ser conformadas/moldadas diversas vezes [1]. Após arrefecerem mantêm a forma adquirida. Antes de atingirem o estado fundido passam por uma fase de transição vítrea e, deste modo, são passíveis de serem recicladas ou novamente moldadas sem que ocorra alterações significativas das propriedades [12]. Por norma são dúcteis e utilizadas numa grande variedade de aplicações não estruturais [4].

**Matrizes de carbono** - São utilizadas em aplicações estruturais sujeitas a elevados esforços e/ou mudanças bruscas de temperaturas devido ao seu elevado desempenho e coeficiente de expansão térmico próximo de zero. Os compósitos com fibras de carbono e matriz de carbono são denominados de compósitos carbono-carbono, apresentam elevada rigidez e são mais resistentes à fadiga e à corrosão do que a maioria dos metais [12].

**Matrizes cerâmicas** - Apresentam maior resistência à oxidação/vaporização do que as matrizes de carbono quando sujeitas a elevadas temperaturas na presença de oxigénio [1]. Por este motivo são bastante utilizadas em aplicações que envolvam temperaturas muito elevadas (até 1700°C na presença de oxigénio). Apesar da elevada resistência à temperatura, elas apresentam um comportamento frágil e baixa resistência à fratura. Existem 3 tipos de matrizes cerâmicas: vidro, cerâmicas convencionais (tais como silício, óxido de alumínio) e cimento [12]. O desenvolvimento de compósitos cerâmicos tem ficado aquém dos outros, principalmente devido às altas temperaturas envolvidas nas etapas fabrico, sendo por isso necessária a utilização de componentes de reforços que as suportem. As duas principais variedades de fibras contínuas utilizadas são as de carboneto de silício (SiC) e as de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) [9].

**Matrizes metálicas** - Possuem baixa densidade, baixo coeficiente de expansão térmico e elevada condutividade térmica, pelo que são muito atrativas para encapsulamentos eletrónicos, eletrónica espacial e indústria automóvel [1]. A sua aplicabilidade está limitada pela corrosão galvânica e pelo seu elevado custo de fabricação, dadas as elevadas temperaturas de processamento. A sua temperatura de serviço depende do metal utilizado, mas é quase sempre superior à das matrizes poliméricas e à do metal usado na matriz por si só. Neste contexto, o alumínio é o elemento mais utilizado devido ao seu baixo ponto de fusão, baixo custo e facilidade de maquinação. Os compósitos de matrizes metálicas quando sujeitos a esforços de compressão ou de impacto são menos sensíveis a delaminações que as poliméricas [13].

## 1.4 Elementos de Reforço

Os elementos de reforço são majoritariamente constituídos por partículas ou fibras, podendo, estas últimas, ser contínuas ou descontínuas (ver Figura 1.6 **Error! Reference source not found.**). Contrariamente às fibras, a dispersão aleatória das partículas na matriz faz com que estes materiais sejam considerados quase homogêneos e quase isotrópicos [16]. Conhecem-se várias formas de partículas entre elas quadradas, triangulares e redondas, sendo as suas dimensões praticamente iguais. O tamanho da fase dispersa de compósitos particulados é da ordem de poucos micrómetros e a concentração em volume é superior a 28% [9]. A fase particulada é mais rígida do que a matriz por si só. Estas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da matriz na vizinhança de cada partícula. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende da forte ligação na interface matriz-partícula. Normalmente, a resistência do compósito depende do diâmetro das partículas, do espaço interpartículas e da fração de volume do reforço. Os vários tipos de reforços, com diferentes propriedades, podem ser combinados entre si e utilizados simultaneamente. Por exemplo, ao utilizarem-se partículas com diferentes dimensões, consegue-se que as mais pequenas preencham os espaços vazios entre as maiores, aumentando-se desta forma a fração volumétrica do compósito.

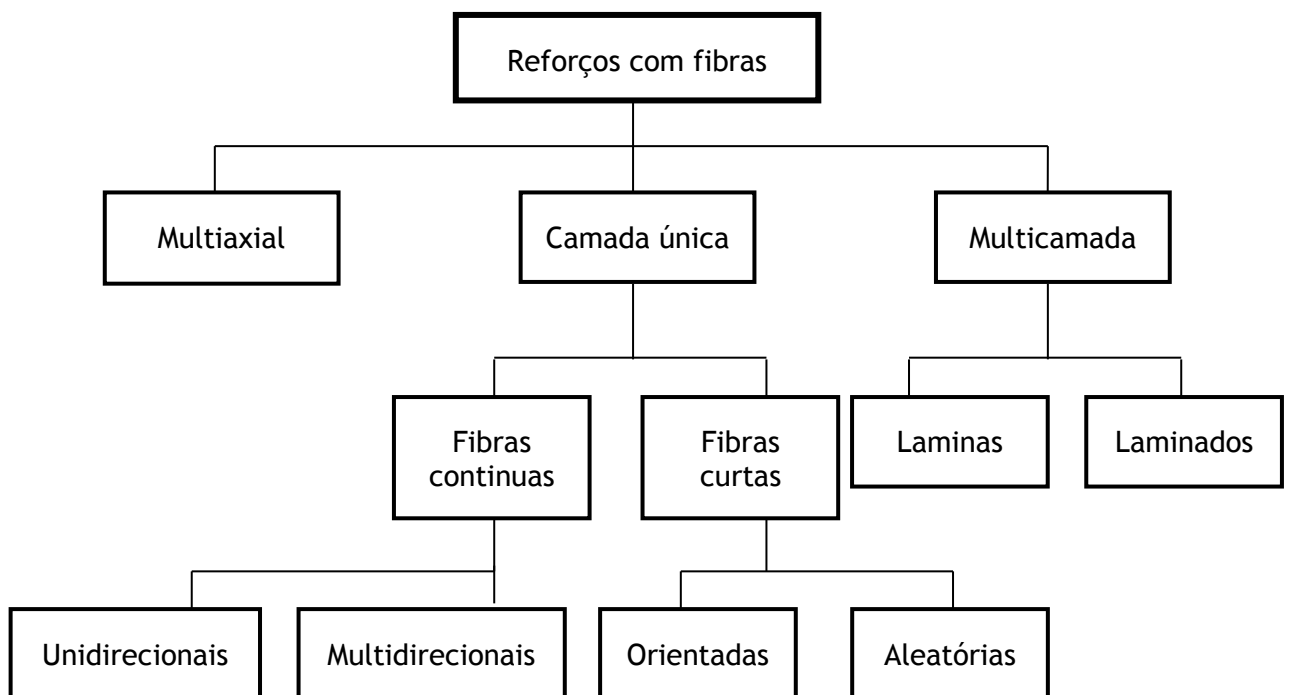


Figura 1.6 Classificação dos compósitos com base na geometria dos seus componentes estruturais

Relativamente aos compósitos fibrosos, as fibras podem ser orientadas aleatoriamente ou em múltiplas direções. As fibras curtas apresentam comprimentos na ordem de alguns centímetros ou frações de milímetros, sendo usadas na moldação por injeção. Por sua vez, as fibras longas são utilizadas em camadas unidirecionais ou na forma de tecido, cuja sobreposição da teia em relação à trama permite a formação de diversos padrões [6].

Relativamente aos compósitos fibrosos, as fibras podem ser orientadas aleatoriamente ou em múltiplas direções. As fibras curtas apresentam comprimentos na ordem de alguns centímetros ou frações de milímetros, sendo usadas na moldação por injeção. Por sua vez, as fibras longas são utilizadas em camadas unidirecionais ou na forma de tecido, cuja sobreposição da teia em relação à trama permite a formação de diversos padrões [2]. Os compósitos que utilizam este tipo de reforço por norma contêm uma fração volumétrica compreendida entre 30 a 70% [16]. Devido à maior relação comprimento/diâmetro das fibras contínuas, estas exercem uma maior influencia nas propriedades do compósito, ou seja, conduzem à maior resistência, ainda que esta dependa da sua orientação relativamente à carga aplicada. Conforme ilustra a Figura 1.7, a resistência é máxima quando a carga é aplicada na direção das fibras e é mínima quando é perpendicular à direção das fibras. Por este motivo, estes compósitos são considerados fortemente anisotrópicos e não homogêneos. Enquanto que a anisotropia é responsável pela dependência das propriedades do material em relação à orientação das fibras, a não-homogeneidade é responsável pela dependência em relação à localização [17]. Todavia, com vista a aumentar a sua isotropia, é vulgar utilizar-se empilhamentos com diferentes orientações, formando estruturas do tipo unidirecional, bidirecional ou multidirecional. Segundo Morais [18] as fibras multidirecionais são mais resistentes ao impacto do que fibras unidirecionais.

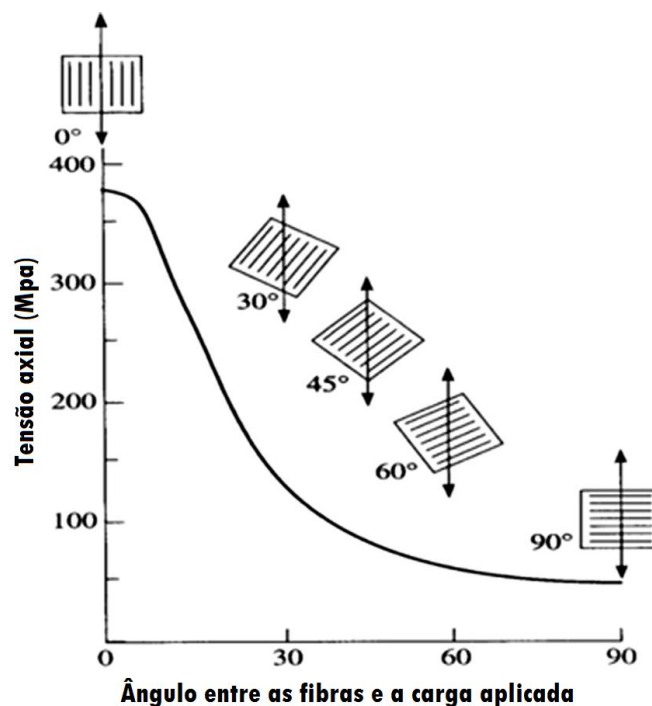


Figura 1.7 Influência do ângulo entre as fibras e a força aplicada na tensão máxima [1]

Apesar das fibras apresentarem maior capacidade de carga do que a matriz, ela depende muito do tipo de material utilizado. No domínio das aplicações estruturais as fibras sintéticas são preferíveis às naturais, de onde se destacam as fibras de carbono, vidro e aramidas. As fibras de vidro são vastamente utilizadas em aplicações industriais enquanto que as fibras de

carbono e de aramida estão mais reservadas para componentes de alta performance [2]. Seguidamente estes reforços serão alvo de uma descrição mais detalhada.

**Fibras de carbono** - Dividem-se essencialmente em 2 grupos: as que contêm percentagens de carbono entre 80% e 95% e as de grafite com percentagens até 99%. Para além das suas boas propriedades térmicas e elétricas, a sua baixa densidade e estrutura cristalina confere-lhes uma elevada resistência específica face às restantes, daí também serem as mais caras [1]. Apresentam uma elongação à rotura entre os 0,5 e os 2,4%, boa resistência à corrosão e ao desgaste e capacidade em manter as propriedades ao longo dos anos [14]. Pelos motivos indicados o carbono é vastamente utilizado na indústria aeronáutica e em equipamentos desportivos, em detrimento da fibra de vidro [22]. Para além disso as 3 principais diferenças do carbono relativamente à fibra de vidro são o módulo de Young mais elevado, a baixa densidade volumétrica e o baixo coeficiente de expansão térmica [8].

**Fibras de vidro** - São as fibras mais antigas e mais utilizadas em aplicações estruturais devido ao seu baixo custo e são as mais densas das fibras sintéticas [9]. Possuem boa estabilidade dimensional, pois não dilatam nem contraem significativamente com as variações de temperatura, não absorvem humidade nem alteram as suas propriedades quando expostas à água. Simultaneamente são resistentes ao fogo e a soluções químicas. Relativamente às fibras de carbono são eletricamente isolantes, apresentam menor rigidez e não dissipam tão facilmente o calor [8]. As fibras de vidro são mais dúcteis, apresentando uma elongação à rotura na ordem dos 3.2% [3]. Deste modo possuem uma boa tolerância ao impacto, pelo que são indicadas para aplicações sujeitas a carregamentos com taxas de deformação elevadas. Dependendo da sua composição, a temperatura de fusão pode atingir os 1260°C, sendo capazes de manter 50% da resistência inicial a 375°C e 25% a 538°C. Com base na sua composição, as fibras de vidro podem ser classificadas como sendo do tipo E, C, S e R. As primeiras correspondem à formulação mais simples e económica, pelo que são as mais utilizadas como elemento de reforço. No caso das fibras do tipo C, elas apresentam maior resistência à corrosão química, mas são mais caras e menos resistentes. Por este motivo são utilizadas essencialmente em aplicações químicas. Finalmente, as S são usadas em aplicações especiais devido à elevada resistência, 33% mais resistentes que as fibras de vidro E, e excelente desempenho a altas temperaturas [8] [19]].

**Fibras de aramida (Kevlar)** - São na ordem dos 58% mais leves do que as fibras de vidro (1.44 g/cc em relação a 2.5 g/cc da fibra de vidro), e são mais resistentes do que, por exemplo, as fibras de vidro do tipo E [20]. Estas fibras começaram a ser comercializadas em 1972 com o nome comercial de Kevlar e, atualmente, os dois tipos mais comuns são: Kevlar 29 e o Kevlar 49 [9][9]. A primeira é uma fibra de elevada resistência mecânica concebida para aplicações balística (dada a sua excecional resistência ao impacto e à penetração),

cordas e cabos. O segundo tipo é utilizado como elemento de reforço nas indústrias aeroespacial, marítima, automóvel entre outras. Apesar das suas especificidades, ambas as fibras apresentam um coeficiente de expansão térmico negativo e mantêm-se estáveis ao longo de uma vasta gama de temperaturas (-196°C a 427°C) durante longos períodos de tempo [8].

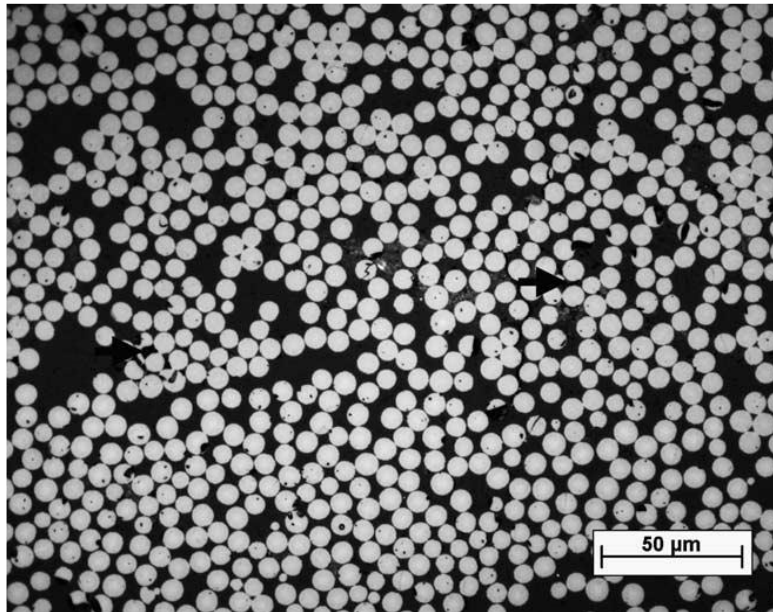


Figura 1.8 Estrutura microscópica típica de um compósito. As fibras representadas pelos pontos possuem uma distribuição aleatória no plano e a resina distribui-se em redor das fibras [47]

O comportamento destas fibras ao impacto foi estudado por Hosseinzadeh *et al.* [21] tendo, para tal, utilizado placas de fibra de vidro/epóxi (GFRP), carbono/epóxi (CFRP) e compósito híbrido fibra de vidro/carbono/epóxi (CGFRP). Estes autores verificaram que a fibra de vidro é mais sensível a danos, mesmo a baixas energias de impacto, ocorrendo o seu colapso de uma forma gradual. Por sua vez, as de carbono apresentam uma boa resistência a impactos de baixa velocidade, apesar do dano ocorrer de forma imprevisível à medida que as condições de impacto se tornam críticas. Isto significa que as fibras de vidro são menos resistentes, mas mais estáveis, enquanto que as fibras de carbono são mais resistentes, mas mais frágeis. Finalmente o compósito híbrido apresenta características semelhantes ao de carbono, no domínio do impacto a baixa velocidade, embora o colapso seja menos abrupto à medida que a energia aumenta. No caso dos compósitos de aramida, para além do seu excelente amortecimento de vibrações, eles apresentam a máxima resistência, enquanto os de carbono são responsáveis pela máxima rigidez.

## 1.5 Técnicas de fabrico

O processo de fabrico subjacente aos materiais compósitos visa a combinação de diferentes materiais na obtenção de um novo. A seleção das fibras e da resina, bem como a forma de as combinar, deve seguir uma metodologia cuidada para se obter as propriedades desejadas. Por exemplo, uma espessura mínima poderá não ser compatível com a elevada rigidez, enquanto uma elevada rigidez pode não ser compatível com o menor peso Mazumdar, S. (2001). Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. CrC press, 10 - 30.[4]. Em aplicações estruturais os compósitos laminados são os mais utilizados, os quais resultam da sobreposição de diversas camadas de fibras unidirecionais ou multidirecionais com recurso às seguintes técnicas:

**Moldação manual** - Neste processo a impregnação de sucessivas camadas de reforço é feita sobre um molde aberto (Figura 1.9). A compactação é posteriormente alcançada pela passagem de um rolo sobre as fibras, num processo que visa melhorar a impregnação da resina nas fibras, remover o ar e o excesso de resina aprisionado entre camadas [2]. Camadas alternadas de fibra e resina são adicionadas até que se atinja a espessura desejada. Neste caso podem surgir bolhas de ar ou espaços vazios no interior do compósito [23], que ao atuarem como pequenos defeitos induzem pontos de concentração de tensões ou zonas de menor resistência mecânica [7].

**Moldação por vácuo** - Esta técnica consiste em impregnar alternadamente fibras e resina sobre um molde, tal como no processo descrito anteriormente, só que neste caso o este sistema é colocado num saco primeiramente selado e depois sujeito a vácuo. Para além da remoção de bolhas de ar, o vácuo aplicado ao longo do processo de cura ajuda a uma maior compactação do laminado. Este processo de fabrico é indicado para a produção de componentes com grandes dimensões e algum grau de complexidade [2].



Figura 1.9 Exemplo de molde e peça fabricada por moldação a vácuo

**Moldação por autoclave** - A moldação manual e a assistida por vácuo permitem a colocação do molde num autoclave. Os autoclaves são recipientes de pressão aquecidos e equipados com sistemas de vácuo adequados para a fabricação de peças grandes e complexas [10]. A técnica de moldação por autoclave consiste em consolidar um componente pré formado através da aplicação simultânea de temperatura e pressão de uma forma controlada. A conformação de compósitos termoplásticos requer o uso de temperaturas elevadas, geralmente acima dos 300 °C. Esta técnica permite a obtenção de estruturas com baixa porosidade (inferiores a 1%) e com elevada integridade mecânica. Os autoclaves são normalmente utilizados usados no processamento de componentes de alto desempenho para aeronaves e aplicações aeroespaciais [2].

## **2 Efeito das cargas de Impacto nos materiais compósitos**

### **2.1 Introdução**

Nos mais variados campos de aplicação dos materiais compósitos, eles estão sujeitos a cargas de impacto quer seja a alta ou baixa velocidade. No campo aeronáutico, por exemplo, este tipo de carregamento pode surgir como resultado da queda de ferramentas durante as ações de manutenção, projeção de detritos da pista na fase de descolagem/aterragem dos aviões bem como de possíveis impactos com aves. Nestes casos gera-se uma região de alta concentração de tensões em torno do ponto de contato, o que leva a um dano muito localizado e típico dos carregamentos por impacto. Assim, dada a baixa resistência transversal dos materiais compósitos, surge a necessidade de estudar o desempenho destes materiais quando sujeitos a este tipo de carregamento. A resistência interlaminar na maioria dos casos é apenas 25% da verificada no plano das fibras [24]. Ao contrário dos metais, na maior parte das vezes o dano não se inicia na superfície do material, mas ocorre no seu interior sob a forma de fissuras na matriz e/ou delaminações. Não possuindo uma ductilidade tão elevada, estes materiais apenas conseguem absorver e dissipar energia na região elástica e através dos diferentes mecanismos de dano [15].

### **2.2 Classificação das cargas de Impacto**

Regra geral os impactos são classificados como sendo de baixa ou alta velocidade, mas a distinção entre eles não é clara na literatura e depende muito de autor para autor.

Por exemplo, Shivakumar et al. [30] classificam os impactos conforme a sua duração (ver Figura 1.10). O tempo de impacto depende essencialmente da velocidade do impactor, mas também da sua massa, orientação dos laminados e rigidez do material. Assim, para tempos de impacto na ordem do tempo de transição das ondas ao longo da espessura, a resposta é dominada pela propagação de ondas tridimensionais de tal forma que a estrutura não tem tempo de responder. Este tipo de resposta é tipicamente associado ao impacto balístico, no qual a energia é dissipada numa pequena região (Figura 1.10a). Neste caso, o dano causado é

facilmente detetável por ser muito localizado e próximo da superfície. Os efeitos geométricos nestas situações são muito pequenos, pelo que os provetes de pequenas dimensões são perfeitamente capazes de simular a resposta ao impacto de estruturas maiores e mais complexas [31]. Simultaneamente, o efeito das condições de fronteira pode ser ignorado, pois o impacto termina antes que as ondas de impacto alcancem as extremidades [32]. Para tempos de impacto mais longos, a resposta é inicialmente governada por ondas de flexão e de corte, conforme ilustra a Figura 1.10 b e c. De uma forma geral, este tipo de resposta ocorre quando a massa do impactor é superior à das placas de ensaio e o tempo de impacto é maior. Em tais condições, a força de impacto e a deflexão são tratadas como num evento quasi-estático, uma vez que a deflexão e a carga têm a mesma relação que num ensaio estático (ver Figura 1.11). As condições de fronteira já se revelam aqui bastante importantes, pois as ondas geradas pelo impacto têm tempo suficiente de alcançar as extremidades e voltar, causando uma resposta baseada em vibrações [31]. A duração do contato projétil/provete é suficientemente grande para que ocorra uma resposta estrutural permitindo, assim, que a energia cinética seja acomodada em pontos distantes do ponto de impacto. Finalmente, para além dos danos de impacto não serem facilmente visíveis [32], eles conduzem a uma diminuição da resistência residual à compressão na ordem dos 60% face aos laminados sem dano [33-35].

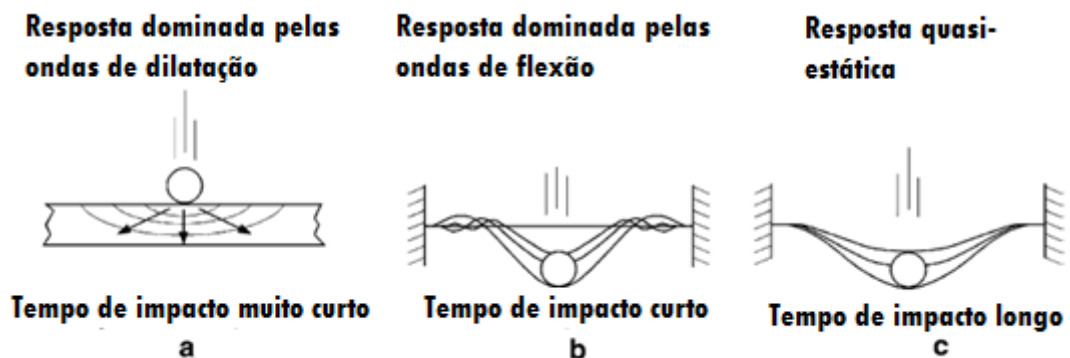


Figura 1.10 Tipos de resposta consoante o tempo de impacto [30]

Por outro lado, Liu e Malvern [25] sugerem que o tipo de impacto deve ser classificado de acordo com o dano causado. Desta forma, os impactos de alta velocidade são caracterizados pela rotura de fibras, conduzindo à perfuração, ao invés dos impactos de baixa velocidade em que o dano predominante manifesta-se através de fissuras na matriz e delaminações. Cantwell e Morton [36] estudaram os efeitos do impacto de baixa e de alta velocidade em placas de carbono e concluíram que no impacto de baixa velocidade o dano inicia-se nas camadas inferiores sob o ponto de impacto com rotura de fibras. No caso de provetes longos e finos, predominam as fissuras nas camadas inferiores devido à deflexão transversal excessiva, enquanto nos de maior espessura elas surgem sob o impactor como resultado das forças de contato mais elevadas devido à maior rigidez. Com o aumento da energia de impacto as fissuras propagam-se ao longo da camada inferior, criando uma região delaminada entre as

duas camadas. Neste caso, a capacidade de absorção de energia elástica é importante e a geometria determina a resposta ao impacto. Davies e Robinson [25] corroboraram os resultados anteriores ao observarem que nos laminados de menor espessura as delaminações surgem nas proximidades do plano central (de acordo com a teoria clássica das placas), dado que as tensões de contato podem ser desprezadas. Por seu turno nos laminados com maior espessura as delaminações iniciam-se nas proximidades do ponto de impacto, uma vez que as forças de contato são mais elevadas.

Ainda que seja muito vulgar classificar os impactos em baixa e alta velocidade, Safri et al. [5] propõem que sejam de baixa velocidade, velocidade intermédia, velocidade alta/balística e de hipervelocidade. Segundo estes autores, os impactos de baixa velocidade mais comuns ocorrem a velocidades inferiores a 10 m/s e resultam essencialmente da queda de objetos ou embates nas estruturas. Os impactos de velocidade intermédia ocorrem entre as velocidades de 10 m/s a 50 m/s e resultam da projeção de detritos. Finalmente os impactos balísticos que estão compreendidos entre os 50 m/s e os 1000 m/s são característicos de aplicações militares, enquanto os de hipervelocidade são causados pelo impacto de detritos espaciais em satélites ou veículos espaciais e ocorrem entre os 2 km/s e os 5 km/s.

A literatura também se refere à massa do impactor como uma forma de classificar os impactos onde, por exemplo, impactos que envolvam uma massa pequena estão associados a baixa velocidade enquanto impactos de elevada massa são de alta velocidade. Todavia, segundo Olsson [32] o tipo de resposta em condições elásticas depende do rácio entre a massa do impactor e a da placa. Para este autor, um impactor de menor massa provoca uma deflexão mais localizada, o que resulta numa carga de impacto mais elevada e uma iniciação de dano mais precoce do que um impactor de maior massa com a mesma energia cinética. Neste caso apenas uma região bem localizada da placa é afetada e, conseqüentemente, a severidade do dano induzido é maior. Neste caso a propagação das ondas dá-se de uma forma controlada [34]. Por outro lado, sendo a deflexão pequena, o aumento da energia cinética resulta numa perfuração sem grande deflexão [35]. Devido ao facto de a placa não ter tempo de defletir, a resposta será independente do tamanho da placa e das condições fronteira, mas dominada pela propagação de ondas (flexão e de corte) através da espessura tal como num impacto balístico [32,37].

Finalmente, de acordo com a Figura 1.11, um impacto de grande massa envolve um único ciclo de carga-descarga, enquanto um impacto com menor massa envolve oscilações adicionais [38]. Então, isto leva a concluir que a resposta e o dano são também afetados pela duração do impacto e não apenas pela um único ciclo de carga-descarga, enquanto um impacto com menor massa envolve oscilações adicionais [38] (Figura 1.11b). É possível então concluir que um impacto com maior velocidade e menor massa provoca uma maior área de delaminação do que um impacto de menor velocidade com maior massa. Tais resultados demonstram que a resposta e o dano são também afetados pela duração do impacto e não

apenas pela energia do impacto. Neste contexto, impactos de grande massa sob placas de grandes dimensões a baixa velocidade, provocam uma resposta quasi-estática governada pela propagação de ondas mecânicas em que a deflexão e amplitude são equivalentes a um ensaio estático [32,37][32]. Todavia, se a velocidade for suficientemente elevada, o rácio entre a massa do impactor e a massa da placa é irrelevante para o tipo de resposta, dado que a perfuração ocorre sem que exista deflexão [37]. Segundo Shivakumar et al. [30] a maioria dos problemas de impacto de baixa velocidade podem ser tratados como problemas quasi-estáticos porque 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. Em termos de impactos com massa intermédia, eles são semelhantes aos impactos de duração intermédia, dado que a resposta é dominada por ondas de flexão e de corte em que a carga e a deflexão estão desfasadas.

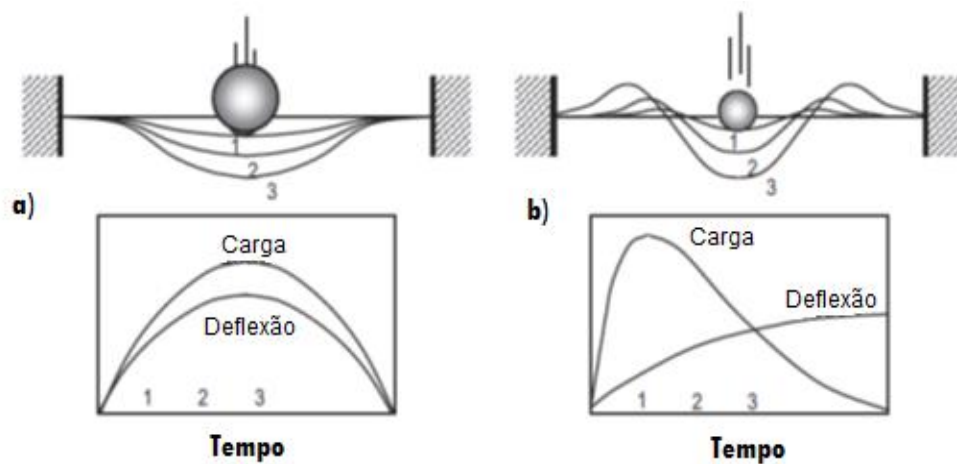


Figura 1.11 Comparação entre a resposta de impactores com (a) grande massa e (b) pequena massa [37]

### 2.3 Danos provocados por cargas de impacto

Contrariamente aos materiais homogêneos, nos quais a falha por fadiga geralmente ocorre pela iniciação e propagação de uma única fenda, nos materiais compósitos o processo de formação e propagação de dano é muito complexo e muito difícil de caracterizar [31]. Para além disso, eventuais defeitos de fabrico ou impactos na estrutura têm uma grande influência no comportamento à fadiga [39]. Segundo Her *et al.* [26] a sequência de eventos num dano por impacto pode ser classificada em dois estágios. Numa primeira fase a flexão e/ou esforço de corte iniciam microfissuras na matriz e numa segunda fase a propagação das microfissuras para uma interface vizinha leva a delaminações.

De acordo com Yan Ying [40], num impacto localizado, a energia do impactor é dissipada por diversas formas: deflexão elástica, deformações devidas ao contato, mecanismos de fratura, propagação de tensões, vibrações e inércia. Todavia, no caso particular dos impactos de baixa

velocidade, são preponderantes as três primeiras formas onde, ao nível dos mecanismos de dano, os principais modos de falha encontram-se ilustrados na Figura 1.12 e são: fissuras na matriz, delaminações, rotura de fibras e perfuração [14].

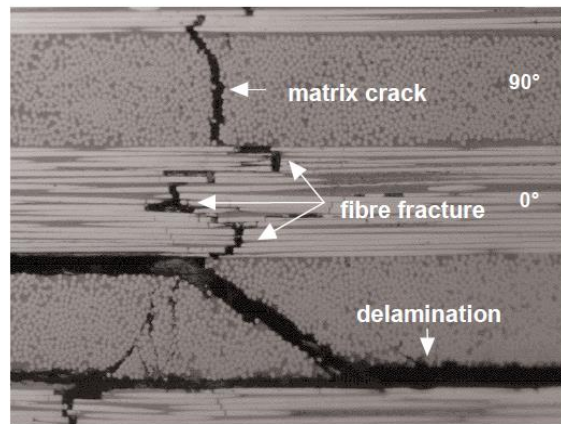


Figura 1.12: Exemplo dos diferentes tipos de dano (fissura na matriz, rotura de fibra e delaminação) [34]

Ao nível das fissuras na matriz, trata-se da primeira forma de dano ocorrida em laminados compósitos sujeitos a impactos de baixa velocidade. Resultam das diferentes propriedades que os constituintes (fibras e matriz) apresentam e geralmente surgem nos planos paralelos à direção das fibras. As fissuras que se formam nas camadas superiores e intermédia iniciam-se sob o impactor, como resultado das tensões de corte que dependem da força e área de contato. Por sua vez, as fissuras na camada inferior são induzidas pelas elevadas tensões de flexão e formam-se essencialmente ao longo do plano vertical [14]. Embora surjam para valores relativamente baixos de carga e se dispersem por toda a região de dano, elas concentram-se particularmente do ponto de impacto [39]. Segundo Sjöblom *et al.* [41] a presença de fissuras na matriz não afeta dramaticamente a rigidez do laminado, mas potenciam as delaminações e a rotura de fibras, danos que alteram significativamente a rigidez e a resposta ao impacto. De acordo com Aslan *et al.* [42] o impacto transversal gera fissuras na matriz que conduzem a delaminações, cuja localização depende da sequência de empilhamento do laminado. Por outras palavras, as delaminações surgem assim que uma fissura atinja uma interface entre camadas de diferentes orientações [43, 44]. Segundo Choi *et al.* [44] se as fissuras na matriz não ocorressem nos espécimes impactados não haveria delaminação.

No caso das delaminações, elas são induzidas por tensões de corte inter laminares que ocorrem entre camadas de diferentes orientações e conjuntamente com as fissuras são o principal mecanismo de dano em impacto de baixa velocidade [35, 43-46]. As delaminações apenas ocorrem na presença de fissuras na matriz e após uma determinada energia de rotura [12], [14], [62], abaixo da qual, a energia é absorvida no regime elástico do laminado [47]. Segundo Liu e Malvern [27], as delaminações surgem devido aos diferentes valores de rigidez

à flexão que se verifica entre as camadas adjacentes com diferentes orientações e às tensões induzidas pela flexão. Nestas condições, ao longo da direção das fibras a placa tende a fletir com uma forma côncava e com uma forma convexa na direção transversal. Quanto maior a diferença entre as orientações das fibras maior será a área delaminada e, devido à perda súbita de rigidez, a força máxima de impacto diminui significativamente [34, 35, 62]. Segundo Olsson [49] a carga crítica para o crescimento de delaminações depende fortemente da orientação dos laminados, mas é praticamente independente das condições de fronteira. A estrutura do material de reforço também apresenta alguma influência, dado que os tecidos bidirecionais conduzem a uma superfície ondulada e irregular restringindo, neste caso, o crescimento das delaminações [50]. Por outro lado, de acordo com Davies e Robinson [24], a carga crítica à qual se inicia a propagação da delaminação é proporcional a  $t^{2/3}$ , em que  $t$  é a espessura do laminado.

A rotura de fibras ocorre logo após a formação de delaminações e sob o impactor, devido ao estado de compressão e corte que as fibras ficam sujeitas nas camadas inferiores. No entanto, a rotura de fibras ocorre mais extensivamente (dano maior) na parte central da região delaminada e distribui-se uniformemente ao longo da espessura [35]. Em laminados finos o dano é mais extenso do que em laminados mais espessos, o que indica a importância das tensões intra-laminares [45], e a quebra de fibras gera pontos de concentração de tensões que conduzem a falhas prematuras [35].

Finalmente a perfuração é uma falha catastrófica ao nível macroscópico e que leva à perda total de rigidez dado que não ocorre mais transferência de carga. Nos impactos de baixa velocidade, a perfuração ocorre quando a rotura de fibras atinge uma extensão crítica sob o ponto de aplicação da carga [38]. Todavia, para além dos mecanismos de dano previamente descritos (fissuras na matriz, delaminações e rotura de fibras), Zhou [51] refere que o impacto também altera a curvatura das fibras sob o ponto de contacto, a qual induz pontos de concentração de tensões. Neste caso, a perfuração resulta da combinação de uma perda de rigidez à flexão com a concentração de tensões devido à alteração de curvatura das fibras.

Como ficou bem patente, os impactos de baixa velocidade são bastante problemáticos devido ao facto dos danos não serem de fácil deteção visual. Eles ocorrem essencialmente no interior do material e são responsáveis por significantes reduções das propriedades mecânicas. Deste modo, o recurso a técnicas de deteção não destrutivas revela-se determinante. Neste contexto, segundo Adams *et al.* [16] e Her *et al.* [26] os métodos mais utilizados na inspeção de danos internos são os ultrassónicos (C-scan) e radiografia (raios X), embora a melhor técnica de deteção dependa do tamanho do defeito, do tamanho da estrutura a ser inspecionada e do ambiente no qual os testes serão realizados. Por outro lado, se no caso dos compósitos de fibra de vidro/epóxi é possível uma observação direta do dano através da retroiluminação, outras técnicas são necessárias para materiais que não transmitam a luz. É

neste contexto que, seguidamente, se faz uma breve descrição dos métodos mais utilizados na inspeção de danos em materiais compósitos.

Os métodos ultrassônicos baseiam-se na injeção de ondas acústicas de elevada frequência no material, na gama dos 0,5 a 15 MHz, e respetiva monitorização [16]. Os dois métodos mais utilizados são a emissão de um pulso e quantificação das ondas refletidas (pulso-eco) e a transmissão de ondas através da espessura. O primeiro faz uso de um transdutor piezoelétrico (ou de uma sonda) que gera impulsos elétricos para, posteriormente, serem convertidos em energia sonora/vibração de alta frequência. Essa energia propaga-se pelo material na forma de ondas que serão refletidas ao emissor sempre que existirem descontinuidades ou falhas. Conhecida a velocidade de propagação das ondas através do material bem como o tempo de propagação, a distância percorrida pode ser obtida e, conseqüentemente, a posição do defeito/dano. Este método não se revela, no entanto, muito adequado para materiais com múltiplos defeitos porque há muita sobreposição de ecos. O segundo método, por sua vez, utiliza dois transdutores para registar a energia que atravessa completamente o material e qualquer alteração detetada indica a existência de defeitos. Esta técnica tem a vantagem de não ser muito afetada pelo estado da superfície, pois apenas é recebido um sinal para o processamento da energia total transmitida. Neste processo é essencial uma boa transmissão acústica entre os transdutores e o material, pelo que é utilizado um gel ultrassônico. O gel colmata as diferenças entre a impedância do ar e a dos sólidos, facilitando a transmissão das ondas. Por essa mesma razão estruturas do tipo colmeia são difíceis de inspecionar, dado que as ondas não se propagam no interior da estrutura (com exceção das paredes das células), bem como as que envolvem fibras de aramida.

Utilizando os ultrassons e as diferentes formas de analisar/avaliar uma região danificada, é possível dizer que existem, atualmente, três técnicas: A-Scan, B-Scan e C-Scan, ou mesmo as três formas em simultâneo [27]. No caso do A-scan, ela analisa a quantidade de energia ultrassônica recebida em função do tempo. O tamanho da descontinuidade pode ser estimado comparando a amplitude do sinal obtido de um refletor desconhecido (descontinuidade) com o de um refletor conhecido (face oposta do material). Neste caso os defeitos existentes na estrutura causam uma redução na amplitude do sinal ultrassônico recebido e a profundidade da descontinuidade pode ser determinada pela posição do sinal na varredura horizontal. Por seu turno, a técnica B-scan representa uma visão transversal da amostra. Aqui o tempo de viagem da energia sonora é exibido no eixo vertical e a posição linear do transdutor é exibida no eixo horizontal. A partir do B-scan, a profundidade da descontinuidade e suas dimensões na direção transversal podem ser determinadas. A presença de ecos é indicada por variações na intensidade da energia refletida. Sempre que a intensidade exceder um certo limite é registado um ponto. Todavia, uma limitação desta técnica deve-se à ocultação de refletores internos por outros refletores maiores perto da superfície. Finalmente, no C-scan o plano da imagem é paralelo ao padrão de varredura do transdutor. À medida que ele varre a peça, a amplitude e o tempo de voo do sinal são gravados ao longo de intervalos regulares. Assim, a

representação C-Scan fornece uma imagem dos pontos que refletem e espalham o som dentro e sobre as superfícies em análise, não fornecendo informações sobre a sua profundidade. A amplitude do sinal ou o tempo de voo são exibidos numa determinada tonalidade, ou seja, uma cor para cada uma das posições onde os dados foram gravados. Esta técnica é aplicada com os provetes imersos em água para assegurar um bom acoplamento transdutor/amostra.

Apesar de não fornecer sempre resultados muitos satisfatórios, a **Emissão acústica** envolve o uso de dois transdutores ultrassónicos colocados a uma distância fixa da superfície do material a ensaiar, em que um atua como transmissor e o outro como um recetor. O sinal recebido é então processado e permite aferir a existência de vazios, fissuras e delaminações.

Ao nível das **Correntes de Foucault**, este método encontra-se limitado aos materiais com uma fase condutora e os resultados obtidas são muito sensíveis à fração volumétrica e à integridade da fase. Neste caso são induzidas correntes elétricas no material, na ordem dos microamperes, existindo dois caminhos de condução possíveis para as correntes. O caminho resistivo, no qual a corrente induzida passa de fibra em fibra, e o caminho capacitivo resistivo. O caminho de condução é do primeiro tipo para baixas frequências, enquanto para frequências mais altas (próximas aos 15 Mhz) a reatância da interface e a capacitância ficam baixas comparativamente à resistência do caminho de condução, pelo que o segundo tipo torna-se mais apropriado [28]. Conforme a existência de defeitos a corrente induzida será diferente, apesar do método se mostrar insensível a porosidades, inclusões não-condutoras e delaminações. Revela-se, assim, um método complementar aos ultrassons, uma vez que é sensível aos defeitos que são difíceis de detetar com os ultrassons.

Finalmente a **Radiografia** permite uma fácil deteção de defeitos, devido à diferença de densidade que existe entre a região que contém o defeito e a livre de defeitos. No entanto, a radiografia não é tão sensível quanto os ultrassons. As regiões mais escuras correspondem a zonas de fácil penetração dos raios-X (ausência de qualquer dano) enquanto as mais claras, que revelam a presença de defeitos, são devido à absorção de raios-X [28]. As delaminações são detetáveis por este método se houver um aumento de contraste, pelo que é vulgar o recurso ao iodeto de zinco, já que neste tipo de dano não há diferença entre a absorção de uma região danificada e não danificada [29].

## 2.4 Comportamento ao impacto de cascas cilíndricas

Revela-se determinante logo na fase de projeto a otimização da resistência ao impacto e respetiva tolerância a danos. Para este fim foram desenvolvidos numerosos trabalhos experimentais e técnicas analíticas com vista a compreender melhor a resposta aos carregamentos por impacto de componentes estruturais fabricados em laminados compósitos. Dada a flexibilidade na produção de geometrias complexas com estes materiais, existem vários trabalhos na literatura sobre a resistência ao impacto de geometrias não planas como: curvas, cilíndricas e esféricas.

Gong *et al.* [43], por exemplo, estudaram a resposta ao impacto de painéis laminados cilíndricos abertos sujeitos a diferentes condições de impacto com recurso ao método dos elementos finitos. Para tal, utilizaram cascas fabricadas em grafite/epóxi com o empilhamento de  $[(\pm 45/0_2)_2/\pm 45/0/90/90]_{2s}$ . Estes autores concluíram que a força máxima de impacto, a deflexão e o tempo de contato aumentam, embora não linearmente, com o aumento da massa do impactor. Relativamente à influência da rigidez do impactor na carga de impacto e na deflexão, verificaram que ambas as propriedades aumentam com o aumento da rigidez, mas o tempo de contato diminui. Ou seja, um impactor mais rígido torna a força de impacto mais impulsiva, com mais vibrações de alta frequência, o que faz com que esta propriedade e a deflexão não aumentem linearmente com a rigidez do impactor. Relativamente à velocidade do impactor, verificou-se que a força de impacto e a deflexão aumentam linearmente com este parâmetro, mas a duração do impacto permanece a mesma. Finalmente, uma maior energia de impacto aumenta a deflexão, conduzindo a que a força de contato seja mais facilmente dissipada. Os mesmos autores também estudaram o efeito da geometria na carga de impacto e na deflexão. Para tal, variaram o parâmetro  $\lambda$  que é dado pelo rácio entre o comprimento do compósito e o comprimento do arco, mantendo constante o raio. Neste caso baixos valores de  $\lambda$  correspondem a cascas finas fletidas numa forma circular, enquanto valores mais elevados representam superfícies cilíndricas longas. Os resultados vieram demonstrar que a deflexão aumenta com o aumento de  $\lambda$ , sendo para  $\lambda=1$  a situação em que o centro da casca está mais afastado das extremidades de apoio. Por outro lado, a rigidez diminui com o aumento do tamanho da casca, apresentando o parâmetro  $\lambda$  um efeito significativo na rigidez da casca (rigidez mínima para  $\lambda=1$ ). Relativamente à força de impacto e à duração do contacto, verificaram um efeito muito semelhante ao ocorrido para a rigidez, mas em menor escala.

Kistler [61] estudou a resposta ao impacto de laminados cilíndricos fabricados em fibra de vidro com diferentes espessuras (1,02 e 2,03 mm) e diferentes raios de curvatura. As extremidades curvas do provete foram encastradas enquanto que as extremidades planas permaneceram livres. Os resultados experimentais revelaram que a geometria dos laminados influencia fortemente a resposta ao impacto, pois quanto maior for a espessura maior é a força de impacto e menor a deflexão, bem como o tempo de contacto. Todavia para a mesma espessura um raio de curvatura maior conduz a uma maior força de contato devido à maior rigidez.

Cho e Zhao [52] estudaram a resistência ao impacto de compósitos cilíndricos tipo casca em carbono/epóxi, simplesmente apoiados e com o empilhamento  $[0/45/0/-45/0]_{2s}$ . Segundo o estudo destes autores, a diminuição do raio de curvatura leva à diminuição da rigidez, o que aumenta a duração do impacto. Este resultado mais uma vez comprova que a rigidez e o raio de curvatura são determinantes na resposta ao impacto. Verificaram que a amplitude da força de impacto aumenta proporcionalmente com o aumento na velocidade de impacto, embora o

tempo de contato permaneça o mesmo. Finalmente, com o aumento da massa do impactor a amplitude da força de contato e o tempo de contato aumentam. Deste modo, foi possível concluir deste estudo que a duração do impacto é independente da velocidade, dependendo apenas da massa do impactor, das propriedades do material e dos parâmetros geométricos da casca.

O efeito da redução da rigidez da amostra pela alteração da geometria também foi estudado analiticamente por Arachchige *et al.* [53] tendo, para tal, aplicado o modelo a uma casca cilíndrica de carbono/epóxi com o seguinte empilhamento  $[(\pm 45/0_2)_2/\pm 45/0/90]_2s$ . Os resultados demonstraram que a carga de impacto aumenta com o aumento da rigidez e o tempo de contato diminui. Relativamente à velocidade de impacto, verificou-se que esta tem uma relação direta com a força de contato. Um aumento da velocidade de 10 m/s para 15 m/s, por exemplo, conduziu a um aumento de 36% na magnitude da carga de impacto, embora o tempo de contato tenha permanecido praticamente igual. Deste modo, uma maior deflexão e força de impacto traduzem-se na forma de dissipação de energia adicional. Enquanto neste estudo a alteração da rigidez foi obtida através de secções com espessuras diferentes, Arachchige e Ghasemnejad [54] efetuaram um estudo semelhante através da introdução de defeitos (cortes localizados de 20x20 mm ao nível das camadas). Para além da diminuição da rigidez também se verifica uma degradação da frequência natural da amostra. Neste caso, os resultados mostraram que se o corte fosse efetuado apenas numa das 10 camadas conduzia a uma redução na força de contato em 6%, face aos provetes sem defeito, mas ao ser na primeira camada este valor já pode atingir os 15%. Todavia, ao introduzir um defeito duplo nas camadas 5 e 6 a diminuição já é na ordem dos 46%. De um modo geral, a análise demonstrou que a remoção das camadas entre 5 a 7 resulta no enfraquecimento significativo da estrutura. Para além do posicionamento do defeito, este estudo também revela que a orientação das fibras influencia a resistência ao impacto. Um maior número de camadas com fibras orientadas a 0° conduz a uma menor força de contato. Finalmente, os autores concluíram que a força de impacto máxima também é fortemente condicionada pelo raio de curvatura, pois um simples aumento de 0,15 para 0,2 m induz uma diminuição na ordem dos 9%.

Kistler *et al.* [55] estudaram o comportamento ao impacto de painéis cilíndricos de grafite/epóxi com diferentes espessuras, curvaturas e condições de apoio. Estes autores concluíram que o aumento da espessura leva ao aumento da rigidez e, conseqüentemente, a uma maior força de impacto bem como menor deflexão e tempo de contato. Contrariamente ao verificado, a diminuição do raio de curvatura demonstrou diminuir a rigidez. Verificaram também que à medida que a espessura diminui, os efeitos da curvatura tornam-se mais expressivos na carga máxima, deflexão e tempo de contato. Finalmente o estudo das condições de fronteira demonstrou que as extremidades encastradas aumentam a rigidez do

laminado, independentemente da curvatura, e que a probabilidade de ocorrer dano é maior à medida que a curvatura aumenta.

Krishnamurthy *et al.* [56, 57] estudaram o dano e a resposta ao impacto de painéis cilíndricos tipo casca de grafite/epoxy com recurso ao método de elementos finitos. De acordo com este estudo, o aumento da massa do impactor leva ao aumento do tempo de contato entre impactor/painel, com o conseqüente aumento do dano (fissuras na matriz e delaminações) sob o ponto de impacto. Tal como nas placas planas, os danos ocorreram principalmente no lado oposto da superfície impactada. Neste caso a força máxima de contato não aumenta proporcionalmente como o aumento da massa do impactor, pois a deflexão ao aumentar induz o efeito de amortecimento. No que diz respeito ao aumento da velocidade de impacto, observou-se que a força de contato e a deflexão aumentam proporcionalmente, bem como o dano induzido. Logo a extensão do dano é proporcional à energia cinética. No entanto, considerando diferentes combinações massa-velocidade, verifica-se que, para uma determinada energia cinética, a velocidade de impacto tem mais efeito na força de impacto e no dano do que a massa. Isto porque a energia cinética do impactor aumenta linearmente com o aumento da massa e quadraticamente com a velocidade. Relativamente à orientação das camadas, verificou-se que o laminado com a orientação 0/90/90/0 foi responsável pela maior carga de impacto e menor deflexão, face à orientação de 45/-45/-45/45. O dano também foi menor, pois as fibras ao estarem alinhadas com a direção da deflexão aumentam a resistência à deformação. Finalmente a curvatura da casca mostrou ter menos influência na magnitude da força de impacto e na dimensão do dano do que a variação da massa ou a velocidade de impacto. Contudo, o aumento da curvatura afeta a flexibilidade do painel que, por sua vez, aumenta o tempo de contato e a deflexão sob o ponto de impacto. Segundo Olsson [32] o dano induzido por impacto não é influenciado somente pela energia de impacto, mas também pela sua duração. Por outro lado, o estudo do efeito das condições de fronteira mostrou que tanto as extremidades simplesmente apoiadas como as encastradas promovem forças de contato muito semelhantes até ao pico de carga, a partir do qual as curvas se separam. Na base deste fenómeno está o facto de o pico ser atingido antes das ondas de deflexão atingirem as extremidades do provete e o seu efeito só ser perceptível após estas serem modificadas pelas condições de fronteira e alcançarem de novo o ponto de impacto. A partir desse ponto o padrão da carga de impacto é alterado. Relativamente à deflexão, mais uma vez conclui-se que as extremidades simplesmente suportadas tornam o painel mais flexível, enquanto as extremidades encastradas tornam o painel mais rígido. Conclusões semelhantes são apresentadas por Amaro *et al.* [48] que também estudaram o efeito das condições de fronteira. Concluíram que a deflexão obtida no caso de extremidades apoiadas é superior à verificada no caso de extremidades encastradas. Relativamente ao dano, verificaram que no caso de extremidades encastradas a maior rigidez leva a uma maior área de delaminação.

Por sua vez, Kumar [58] estudou o efeito de impactos múltiplos em laminados cilíndricos de grafite/epóxi. Segundo este autor, o aumento da curvatura traduz-se numa maior rigidez da casca e, conseqüentemente, aumento da força máxima de contato impacto e diminuição da duração do impacto. Relativamente ao dano, as fissuras na matriz ocorreram na camada inferior do laminado e a sua extensão é maior na direção perpendicular das fibras. No caso dos impactos múltiplos, como consequência da redução de rigidez, verifica-se que a força de impacto máxima diminui sucessivamente com o número de impactos enquanto a deflexão e o tempo de contato aumentam. Neste caso as fissuras da matriz estenderam-se na direção das fibras e diminuem na direção normal, pois a carga transfere-se dos elementos mais danificados para os elementos adjacentes menos danificados.

Durante a vida operacional muitas estruturas, tais como as asas de aeronaves, podem ser afetadas por pré-carregamentos. Neste contexto, Saghafi *et al.* [46] investigaram o efeito do pré-carregamento na resposta ao impacto de laminados curvos, tendo concluído que a rigidez e a curvatura aumentam com o aumento do pré-carregamento. Neste caso, as forças de impacto são mais elevadas assim como maiores níveis de carga para se iniciar o dano. Relativamente ao aumento da resistência, Ballère *et al.* [47] sugerem que o mecanismo de dano mais crítico é a rotura de fibras, a qual ocorre para um nível de tensão mais elevado. Este facto está relacionado com dois fatores: alteração da curvatura e aumento da rigidez na parte superior do provete. Com o aumento do pré-carregamento, o nível de fissuração da matriz diminuiu porque a existência de tensões de compressão na camada inferior do laminado restringe a propagação de fissuras na matriz.

Finalmente a literatura também apresenta estudos em que os danos produzidos por cargas de impacto a baixa velocidade são comparados entre placas e cascas. Por exemplo, para Zhao e Cho [60] o dano inicia-se em ambos os casos na região do impacto, mais especificamente nas camadas superiores, mas a sua propagação é diferente. No caso das cascas, à medida que a força de impacto aumenta o dano vai propagar-se das camadas superiores para as interiores, encontrando-se a área de maior dano localizada na camada superior. Por seu turno, o dano nas placas surge nas camadas inferiores e propaga-se em direção às camadas superiores e, como tal, a região de maior dano localiza-se nas camadas inferiores. Este comportamento que é responsável pela diferente localização da região de maior dano é justificado pelas diferentes geometrias. No caso das placas, o impacto ao dar-se na direção da espessura (transversalmente) induz cargas de flexão que são responsáveis pelo dano se iniciar e localizar maioritariamente nas camadas inferiores. Já nas cascas a distribuição das forças internas é diferente, pelo que o dano máximo ocorre na superfície superior, ou seja, sob o ponto de impacto. A delaminação resultante apresentou a forma de um amendoim sendo o eixo principal da delaminação é paralelo ao sentido das fibras na camada abaixo da interface. Verificou-se que a orientação dos laminados e o número de interfaces têm uma influência significativa na velocidade à qual o dano se inicia. Assim, no caso das placas, quanto mais

espeso é o laminado menor é a deflexão e, conseqüentemente, a área do dano. O aumento da espessura significa que há um maior número de interfaces nas quais a energia de impacto poderá dissipar-se. Isso reduz a energia disponível para extensão da delaminação e, conseqüentemente, reduz a área total de delaminação. Relativamente às cascas, uma diminuição do raio de curvatura é responsável pelo aumento da área de dano, ainda que a sua localização não seja alterada, ou seja, por outras palavras, não dependa da curvatura. Iguais conclusões foram obtidas pelo estudo numérico efetuado por Her *et al.* [26], onde os autores compararam os danos e sua propagação entre placas retangulares e cascas, tanto cilíndricas como esféricas, de grafite/epóxi. Do referido estudo concluiu-se que existe um valor específico da velocidade para desencadear os mecanismos de dano (fissuras na matriz e conseqüentes delaminações) abaixo da qual não ocorre dano. Comprovaram que após a fissuração da matriz (causada pelas cargas de flexão) surge a delaminação na interface da camada inferior. À medida que a carga de impacto vai aumentando, as fissuras e as delaminações vão surgindo noutras interfaces, embora a primeira delaminação seja a mais sensível à velocidade de impacto. Como seria de esperar, o aumento da velocidade de impacto conduziu a uma maior área de dano. Relativamente às cascas cilíndricas e esféricas o aumento da velocidade de impacto provoca um aumento na máxima força máxima de impacto e da deflexão, enquanto o tempo de contato não se altera significativamente. No caso da deflexão, verificaram que esta aumenta proporcionalmente com a velocidade de impacto. Relativamente às condições de fronteira as extremidades encastradas fazem com que o pico da força de contato ocorra mais cedo relativamente às extremidades simplesmente apoiadas, logo a rigidez aumenta.

## Capítulo 2

# Material, equipamento e procedimento experimental

Tendo em vista a concretização dos objetivos propostos para este trabalho, foi necessário realizar um vasto trabalho experimental que será alvo de uma atenção especial neste capítulo. Neste contexto, é descrito detalhadamente todo o procedimento adotado no fabrico dos provetes que irão ser ensaiados de acordo como plano de trabalho adotado. Seguidamente, para uma melhor compreensão de toda a componente experimental, serão especificados os equipamentos utilizados e o respetivo procedimento experimental utilizado nos diferentes testes realizados.

### 2.1 Fabricação dos provetes

Para obter os provetes necessários à realização deste trabalho foi necessário, em primeiro lugar, produzir um molde com o intuito de conferir a forma geométrica pretendida. No seu desenvolvimento foi utilizado o software *SolidWorks*<sup>®</sup> 2016, um software CAD utilizado na modelação/simulação paramétrica, onde a geometria, para além de acomodar e dar forma às camadas de fibra de vidro impregnadas, deve conter ainda espaço para a colocação de canais de vácuo e do tecido de impregnação para absorção do excesso de resina. Foi seleccionada a geometria côncava para facilitar o fluxo de resina em excesso para as extremidades, com vista a ser absorvida pelo tecido de impregnação, e deste modo garantir também a uniformização da espessura. Após esta fase, o molde foi impresso em poliestireno com recurso a uma router de 3 eixos da marca Pronum, com a geometria indicada na figura 2.1.

## 2.2 Fabricação das placas

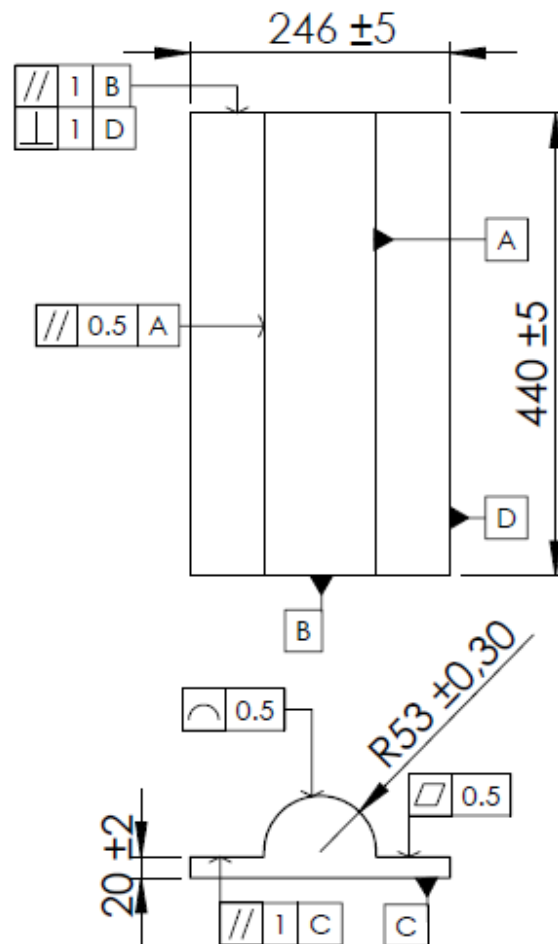


Figura 2.1 Desenho técnico do molde produzido

Após a obtenção do molde, foram produzidos provetes curvos com diferentes valores de espessuras 1,1 mm, 1,6 mm e 2.1 mm, com um desvio padrão de 0.2 mm. Para tal, foram utilizadas 6, 9 e 12 camadas de fibra de vidro bidirecional com uma densidade areal de 210 g/m<sup>2</sup> e uma resina poliéster de infusão pré acelerada. Inicialmente foram cortados bocados de tecidos de fibra de vidro com as dimensões 240x390 mm, os quais foram empilhados alternadamente com uma mistura de resina poliéster e 5% de catalisador no molde. A resina e o catalisador foram pesados com recurso a uma balança eletrónica da marca Nahita-Blue serie 5161.

Durante a impregnação houve um especial cuidado com a distribuição da resina ao longo das fibras, por forma a evitar que esta se venha a acumular pontualmente ou que ocorra a formação de bolhas de ar. Finalmente, após a fase de impregnação, o sistema é colocado no interior de um saco devidamente selado a quente e sujeito a vácuo durante 4 horas, conforme ilustra a figura 2.2. A bomba de vácuo utilizada é da marca ILMVAC com uma pressão máxima de 0,5 mbar e uma velocidade de aspiração na ordem dos 25m<sup>3</sup>/h. O sistema de vácuo para

além de eliminar as bolhas de ar entre camadas, garante também uma maior consolidação das placas e uma maior homogeneidade da espessura. Após o sistema de vácuo ser desligado, o provete é deixado no molde durante 12 horas à temperatura ambiente para obter a rigidez final.



Figura 2.2 Vista geral do provete após submetido a vácuo durante o processo de fabricação

Após a produção das placas, os provetes foram levados às dimensões finais ilustradas na figura 2.3 com recurso ao equipamento *Struers Accutom-2*, equipado com um disco diamantado, e à mesa de polimento *Struers DAP-V*. Especial cuidado foi tido na velocidade de avanço, de modo a evitar uma temperatura capaz de alterar as propriedades da resina.

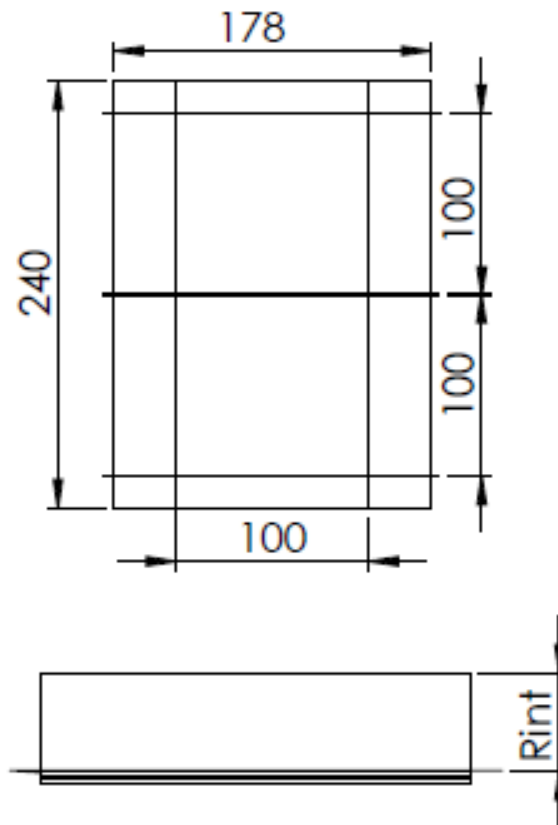


Figura 2.3 Geometria dos provetes

### 2.3 Equipamentos

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 3.1 Encontra-se instrumentada com um sistema de aquisição de dados recebidos a partir de uma célula de carga piezoeléctrica, com uma capacidade de recolha de 32000 pontos, posicionada na raiz do impactor e o seu funcionamento baseia-se essencialmente na queda livre de um peso.

Esta máquina é constituída por uma torre com duas colunas-guia onde se desloca, com recurso a rolamentos, um carrinho que suporta o impactor. A massa do sistema pode ser alterada pela adição de pesos até um total de 30 kg e elevada até uma dada altura máxima de 2.5 m. Neste caso, a combinação de altura, massa e velocidade fornece a energia de impacto. A existência de um sistema “anti-rebound” previne a ocorrência de um segundo impacto. Em termos de parâmetros, a velocidade é medida no início do contacto por meio de um sensor electrónico e a força por meio de uma célula de carga, sendo, posteriormente, os cálculos e armazenamento de dados (como aceleração, deslocamento, energia, força, tempo e velocidade) efectuados com recurso ao “software” Impact Versão 1.3.



Figura 2.4: Máquina de impacto IMATEK-IM10

## 2.4 Procedimento experimental

Os ensaios de impacto foram realizados na máquina IMATEK, modelo IM10, à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma EN ISO 6603- 2. Para cada condição de ensaio foram ensaiados três provetes, com as geometrias descritas em 2.2, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respetivos valores médios.

Os ensaios foram realizados com um impactor hemisférico com 10 mm de diâmetro, massa total de queda de 2,826 kg, uma altura de queda de 0,18 m e extremidades do provete bi-apoiadas. A energia de impacto é de 5 J e a velocidade de impacto de 1,4 m/s.

Ensaio estáticos complementares de compressão foram realizados numa máquina Shimadzu modelo AG-100KN, equipada com uma célula de carga de 100 kN e realizados à temperatura ambiente a uma velocidade de 3 mm/s.

# Capítulo 3

## Análise e Discussão de Resultados

As placas curvas foram submetidas a testes de impacto com o intuito de avaliar o efeito de espessura na resistência ao impacto. Curvas representativas carga-tempo e energia-tempo dos ensaios experimentais encontram-se ilustradas na figura 3.1, as quais se encontram de acordo com a literatura [63][63-65]. Essas curvas contêm oscilações como consequência das vibrações promovidas pelas amostras [66-67].

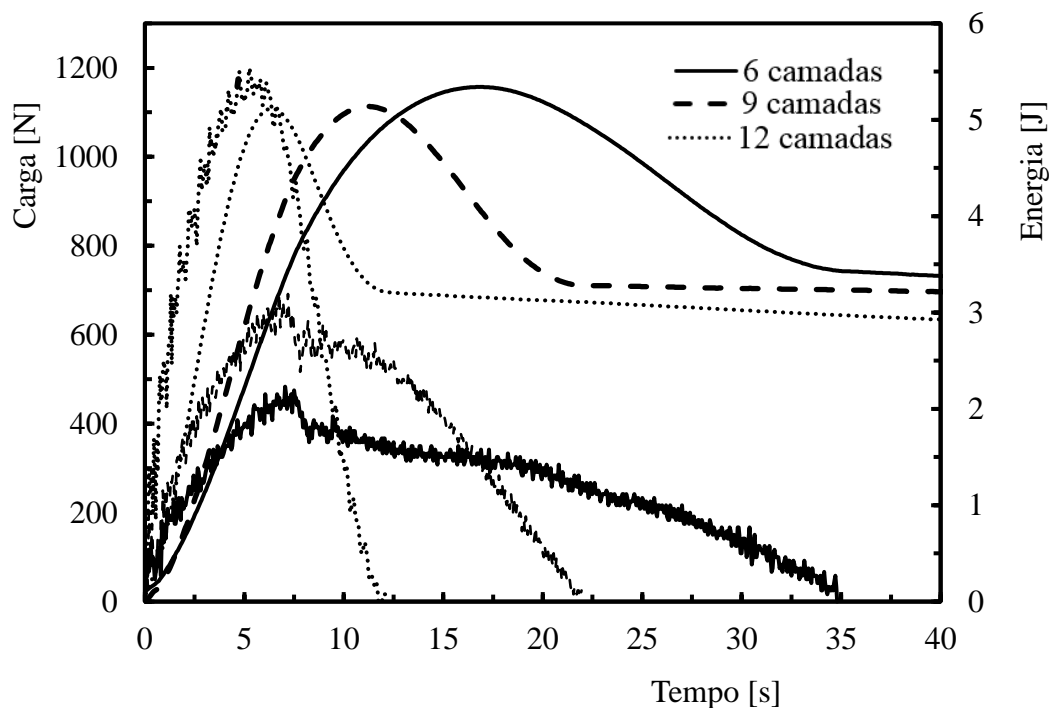


Figura 3.1 Curvas típicas carga-tempo e energia-tempo para as diferentes espessuras

Relativamente às curvas, é possível observar que a carga aumenta até um valor máximo ( $P_{max}$ ), seguida de uma queda correspondente ao retrocesso do impactor. Por outro lado, a energia de impacto não foi suficientemente alta para a penetração total, pois o impactor embate nos provetes e retrocede sempre. A diferença entre a energia máxima, correspondente ao pico de carga, e a energia definida pelo patamar é a componente restaurada ao sistema (energia elástica) devido ao retrocesso do impactor [68,69].

A carga máxima, o deslocamento máximo e a rigidez à flexão por impacto podem ser obtidos, para o primeiro impacto, através das curvas representadas anteriormente. Neste contexto, a figura 3.2 ilustra a evolução dos valores médios da carga e deslocamento máximo em relação

à espessura das placas. As bandas de dispersão representam, respetivamente, os máximos e mínimos dos valores obtidos para cada condição.

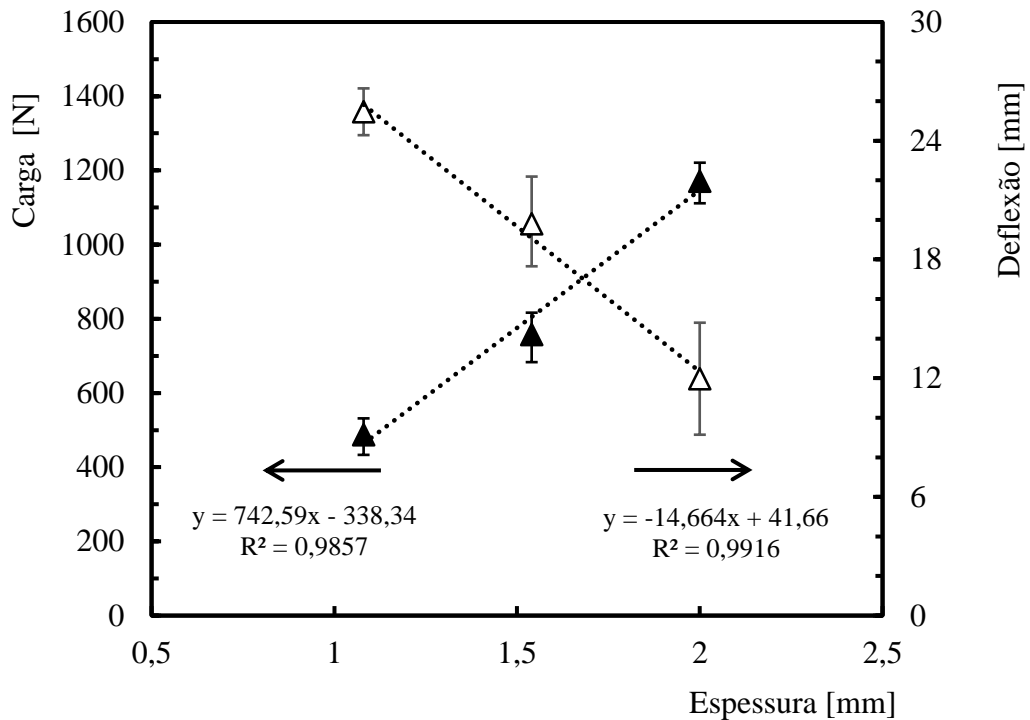


Figura 3.2 Máxima carga de impacto e deflexão, após o primeiro impacto, em função da espessura

Em termos da carga máxima é possível observar que esta aumenta linearmente com a espessura, enquanto a deflexão diminui, também, linearmente. Por exemplo, no primeiro caso, para 1,1 mm de espessura o valor médio da carga máxima de impacto é da ordem dos 487,4 N, passando para 1170,6 N quando a espessura aumenta para 2,1 mm, o que representa um aumento de 140,2%. Por sua vez, em termos de deflexão, estes valores são de 25,5 e 12 mm, respetivamente, o que representa uma diminuição na ordem dos 52,9%. Estes resultados, que já seriam expectáveis, concordam com a tendência descrita por vários estudos apresentados na bibliografia. Kistler [61] e Kistler et al. [55], por exemplo, concluíram que o aumento da espessura leva ao aumento da rigidez e, conseqüentemente, a uma maior força de impacto bem como menor deflexão e tempo de contacto. Por sua vez, Cho e Zhao [52] estudaram a resistência ao impacto de compósitos cilíndricos, tipo casca, e verificaram que a rigidez é determinante na resposta ao impacto. O efeito da redução da rigidez pela alteração da geometria também foi estudado analiticamente por Arachchige et al. [53] tendo observado que a força de impacto aumenta com o aumento da rigidez e o tempo de contacto diminui. A evolução dos resultados ilustrados na figura 3.2 é, assim, justificada pela literatura devido ao aumento da rigidez. Quer seja por via das propriedades do material, dos parâmetros geométricos da casca ou das condições de fronteira, o aumento da rigidez revela-se determinante na resposta ao impacto [52, 61].

Neste contexto, para compreender melhor o efeito da rigidez nos parâmetros analisados (carga e deflexão máxima), a figura 3.3 representa a evolução da rigidez à flexão por impacto (IBS) com a espessura e a figura 3.5 a evolução da resistência estática à compressão com a espessura. O IBS é reconhecido como uma propriedade importante para avaliar o dano em laminados compostos submetidos a impactos [70, 71].

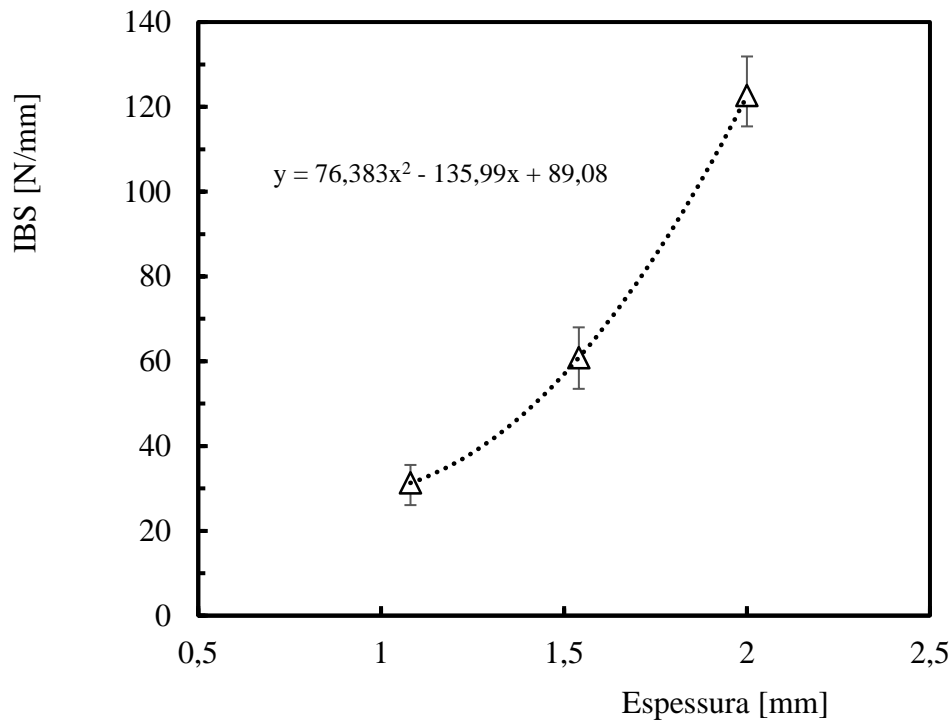


Figura 3.3 Resistência à flexão por impacto (IBS), após o primeiro impacto, em função da espessura

Os resultados ilustrados confirmam que a rigidez aumenta com a espessura, apresentando um valor de 31,3 N/mm e 122,6 N/mm para as espessuras de 1,1 mm e 2,1 mm, respectivamente, o que representa um aumento de 291,7%. Simultaneamente, também é possível verificar que o aumento da rigidez, para o intervalo de espessuras estudado, decorre segundo uma curva polinomial de segunda ordem, cuja equação é dada por  $y = 76,383x^2 - 135,99x + 89,08$ . Por outro lado, estando este parâmetro relacionado com o dano induzido pela carga de impacto. A figura 3.4 ilustra os danos observados, após o primeiro impacto, nas placas com diferentes espessuras.

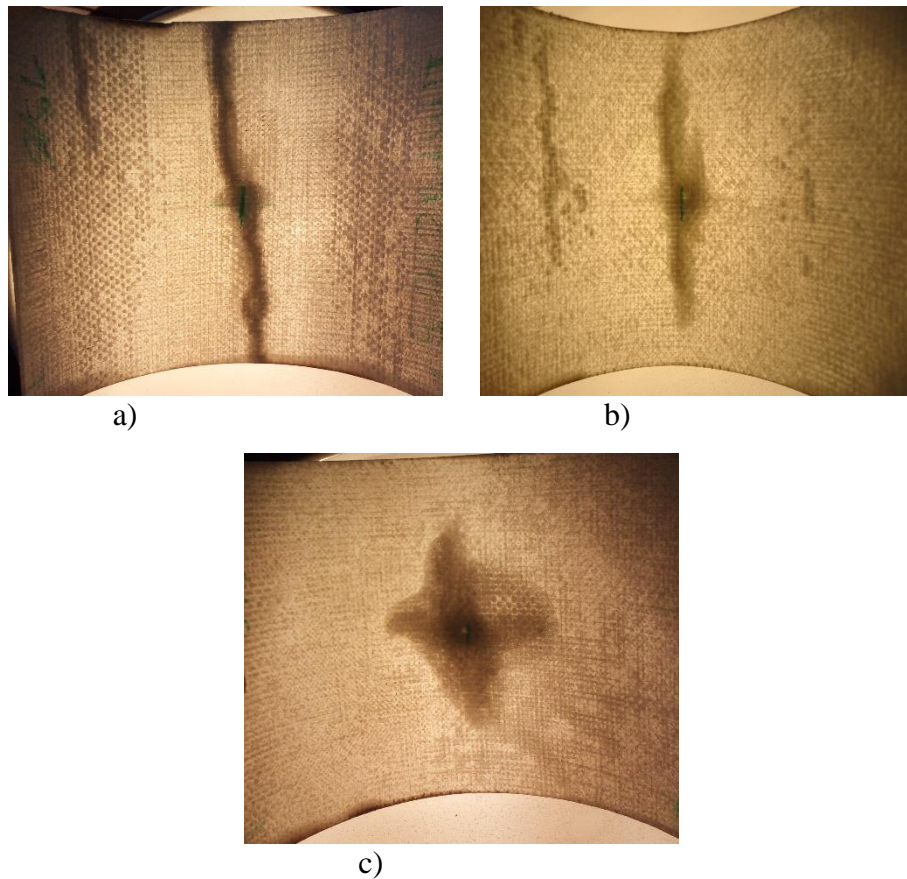


Figura 3.4 Dano típico, após o primeiro impacto, para espécimes com diferentes espessuras  
a) 1,08 mm; b) 1,54 mm; c) 2,00 mm

Também a este nível a severidade do dano depende da espessura. Conforme se pode observar, os laminados de menor espessura apresentam um dano a todo o comprimento da placa, com início na região do impacto, assim como danos adicionais em regiões mais distantes da zona de contacto impactor/placa. Para as placas com espessura de 1,6 mm o dano é muito semelhante ao observado nas placas de 1,1 mm mas menos severo. Finalmente para as placas com maior espessura (2,1 mm) o dano é localizado e confinado ao ponto de impacto. De acordo com Krishnamurthy et al. [56, 57] as fissuras na matriz e consequentes delaminações ocorrem sob o ponto de impacto, tal como nas placas planas, e segundo Kumar [58] sobretudo na camada inferior do laminado com maior extensão na direção perpendicular das fibras. Já para Zhao e Cho [60] o dano também tem início na região do impacto, mas no caso das cascas a maior área danificada encontra-se localizada na camada superior e à medida que a força de impacto aumenta o dano propaga-se das camadas superiores para as interiores. Contrariamente às placas em que o impacto ao dar-se na direção da espessura induz cargas de flexão que são responsáveis pelo dano se iniciar e localizar maioritariamente nas camadas inferiores, nas cascas a distribuição das forças internas é diferente pelo que o dano máximo ocorre na superfície superior, ou seja, sob o ponto de impacto. Por outro lado, segundo estes autores, o aumento da espessura conduz a um maior número de interfaces, nas quais a energia de impacto pode dissipar-se e logo reduz a energia disponível para a extensão do dano, ou

seja, menor área danificada. Finalmente para Kumar [58] as fissuras da matriz ocorrem essencialmente na direção das fibras, pois a carga transfere-se dos elementos mais danificados para os elementos adjacentes menos danificados.

Em termos dos ensaios estáticos à compressão, a figura 3.5 ilustra as curvas carga-deflexão obtidas para as diferentes espessuras estudadas. É possível observar que maiores espessuras induzem maiores cargas de rotura e as curvas apresentam maiores regimes lineares. Para as espessuras de 1,1 e 1,6 mm a linearidade perde-se para deflexões em torno dos 1 mm, enquanto para 2,1 mm este valor já ronda os 4 mm. Por outro lado, ainda que não se possa falar em rigidez, o andamento das curvas leva a perspetivar que maiores espessuras conduzem a valores mais altos de rigidez.

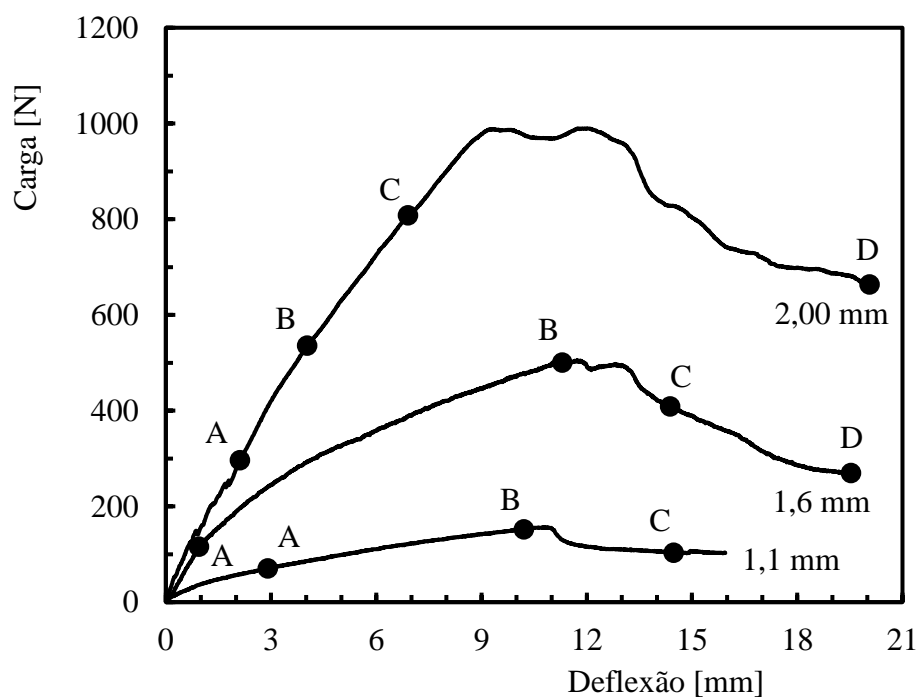


Figura 3.5 Curvas típicas carga-deflexão para ensaios de compressão

O valor da carga média máxima, obtida a partir das curvas apresentadas anteriormente, encontra-se representado na figura 3.6. Verifica-se que para a espessura de 1,1 mm a carga de colapso ocorre para valores na ordem dos 252,1 N e para 2,1 mm atinge os 889 N, o que corresponde a um crescimento em torno dos 252,6%. De acordo com os resultados apresentados também fica visível que este aumento é linear, o qual pode ser quantificado pela equação  $y = 692,19x - 515,08$ , com um coeficiente de correlação de 0,994.

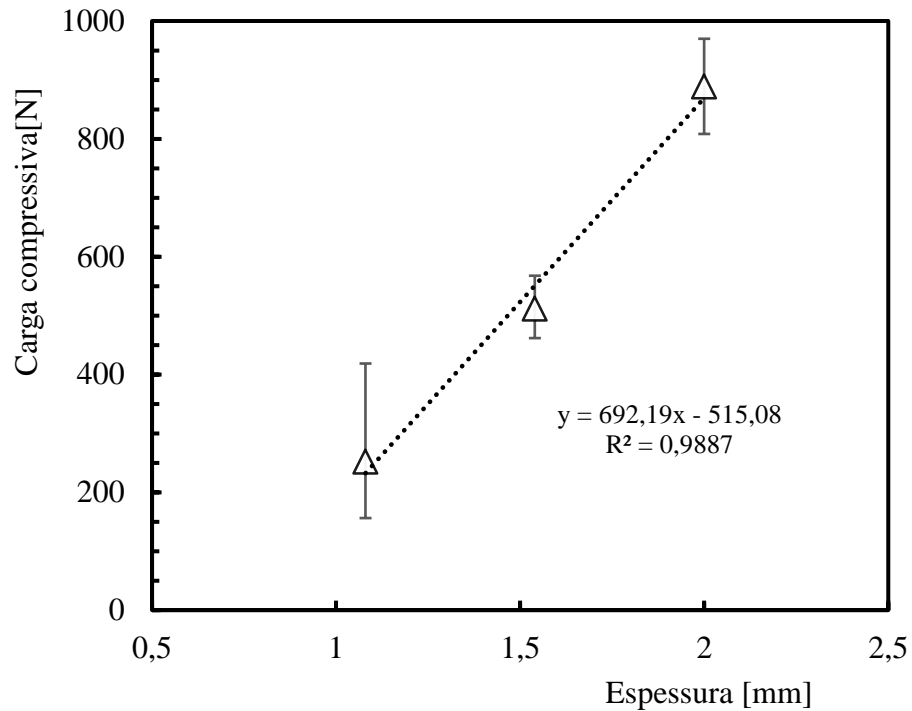
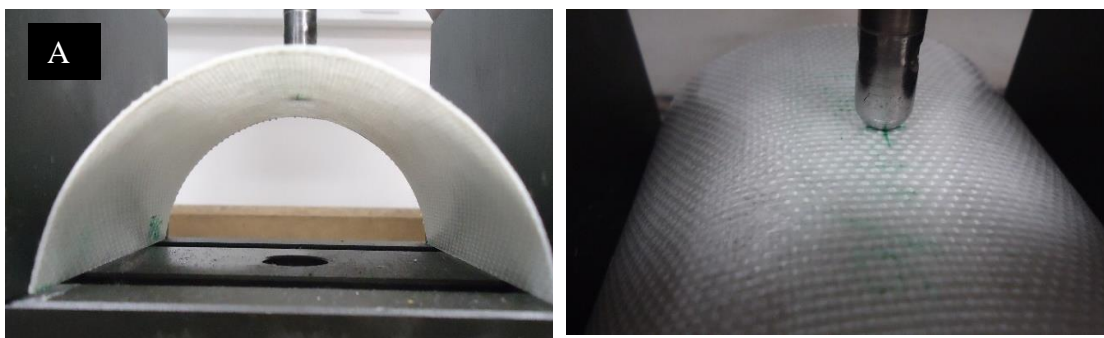
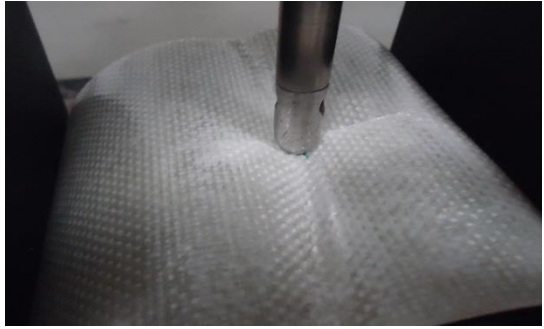
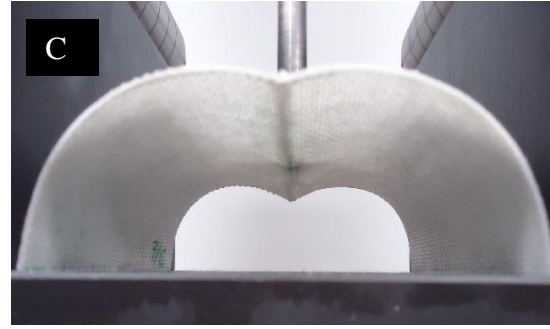
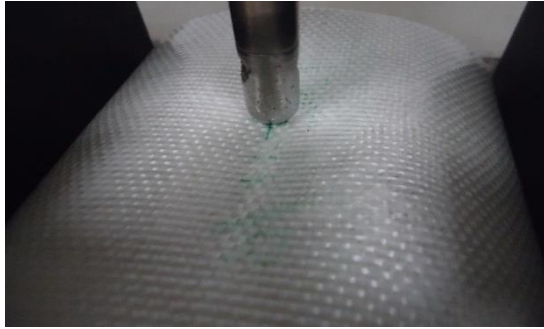
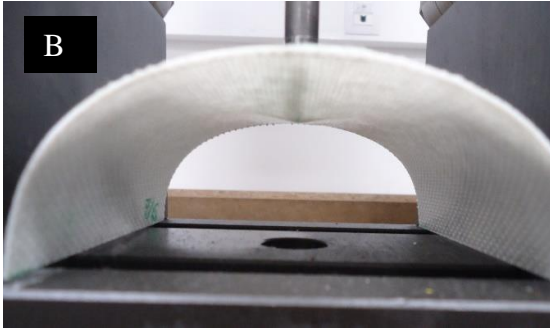


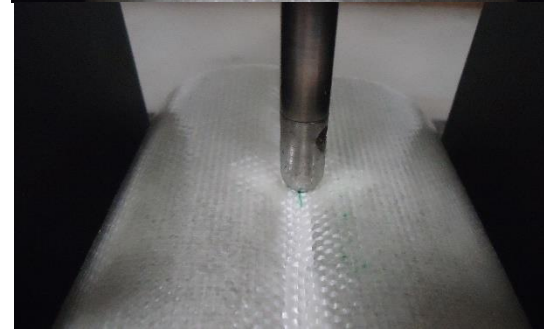
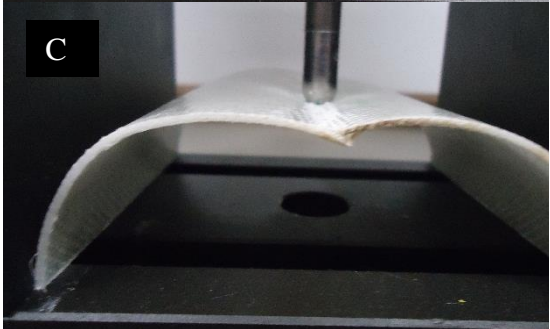
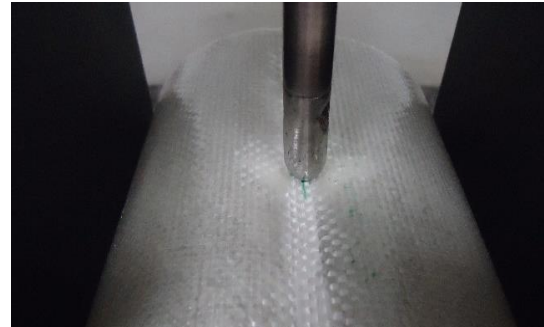
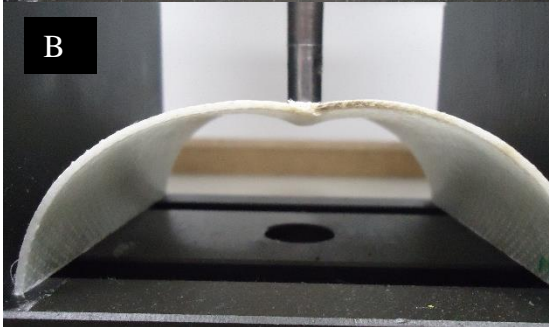
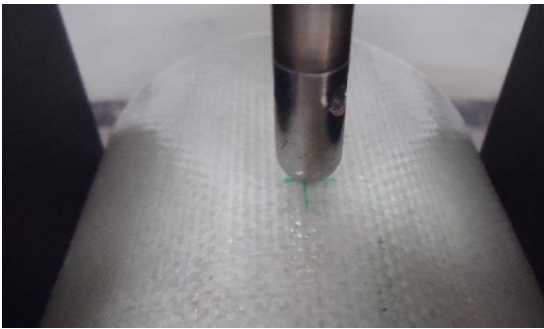
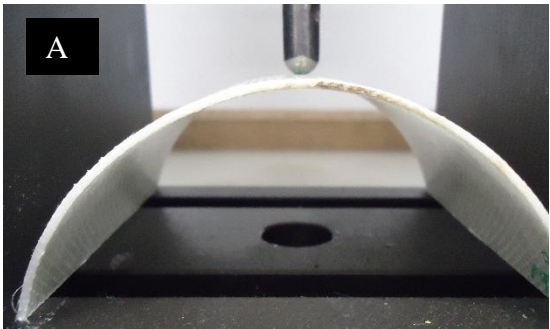
Figura 3.6 Carga média máxima à compressão em função da espessura

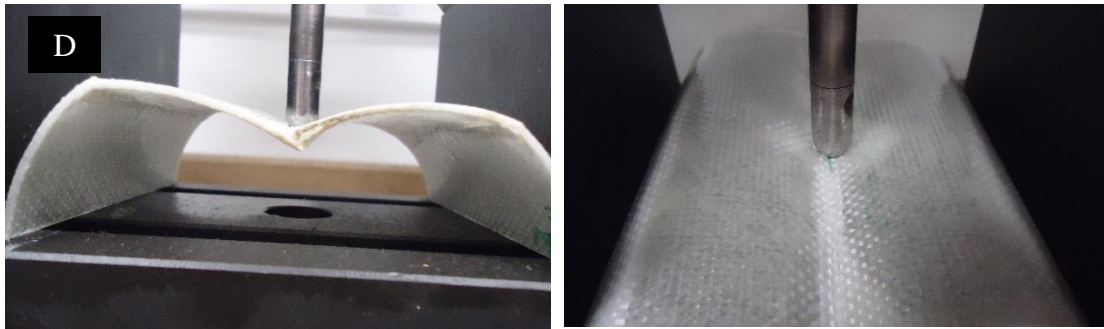
Finalmente a evolução do dano ocorrido nos ensaios estáticos à compressão também foi analisado e encontra-se ilustrado na figura 3.7 para as três espessuras estudadas. Tal como se observou na figura 3.4 o dano tem início na região sob o indentador e nas camadas superiores, propagando-se ao longo das fibras e na direção das extremidades. Após atingir as extremidades, a saturação do dano leva a que ele se propague na direção perpendicular a partir, mais uma vez, da região onde se efetua o carregamento. Com o aumento da espessura este dano na direção perpendicular vai propagar-se até atingir um determinado valor, a partir do qual desencadeia novos danos paralelos ao inicial. Quando estes atingirem as extremidades do provete a rigidez cai drasticamente e o colapso é imediato.



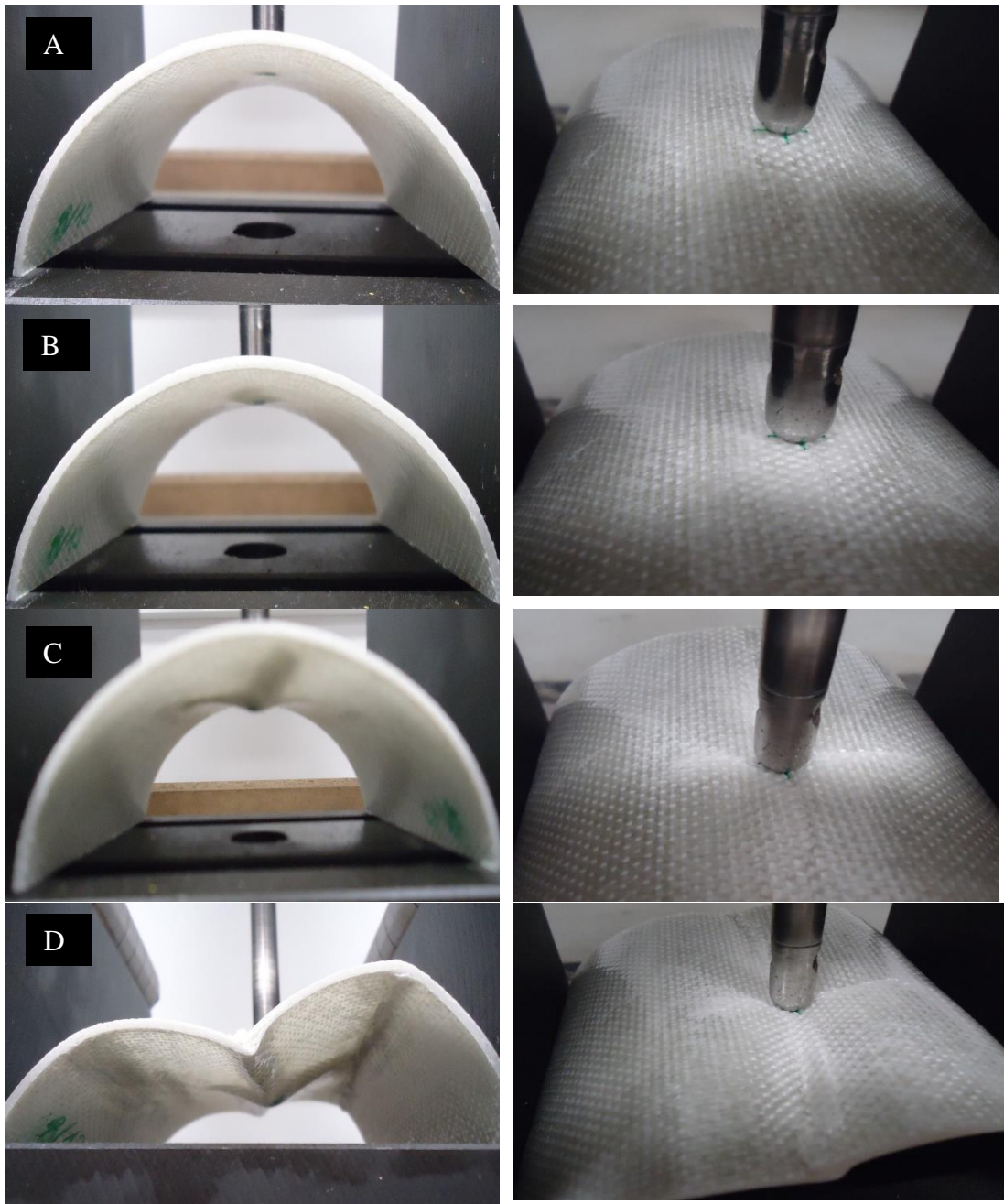


a)





b)



c)

Figura 3.7: Evolução do dano obtido para as diferentes espessuras a) 1,1 mm; b) 1,6 mm; c) 2,1 mm

A figura 3.8 ilustra o efeito da espessura na resistência à fadiga de impacto tendo sido, para esse fim, os resultados representados em termos de espessura versus número de impactos até à rotura. Para este fim foi adotada a mesma representação usada na análise de fadiga (curvas SN), onde a curva média ajustada aos resultados experimentais também se encontra representada. O colapso foi definido quando ocorre a perfuração total, a qual é definida quando o impactor atravessa completamente a amostra.

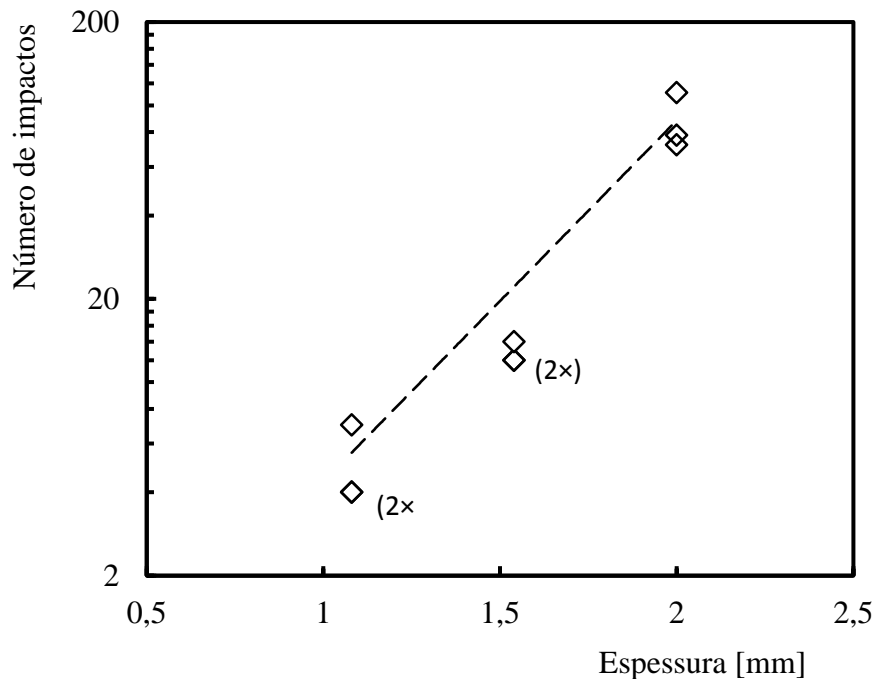


Figura 3.8 Número de impactos em função da espessura

É possível verificar que maiores espessuras conduzem a vidas mais longas. Por exemplo, para obter a perfuração total são necessários, em média, 5 impactos para a espessura de 1,1 mm enquanto para a de 2,1 mm são precisos 87 impactos. Em termos de valores médios é possível dizer que neste intervalo de espessuras a vida de fadiga aumenta na ordem das 17,4 vezes. Esta diferença significativa de vidas pode ser explicada pela rigidez e, conseqüentemente, os mecanismos de danos são diferentes, conforme relatado por Kumar [58]. Como referido anteriormente, o aumento da espessura leva a uma maior dissipação de energia devido ao maior número de interfaces. Para ter uma melhor compreensão da resistência à fadiga, os parâmetros de impacto serão foco de uma análise mais detalhada. A figura 3.9 mostra, por exemplo, a evolução da carga máxima com os múltiplos impactos para as diferentes espessuras.  $N$  é o número de impactos para um dado instante e  $N_f$  o número de impactos para o qual ocorreu a rotura. Nesta representação o último impacto não se encontra ilustrado dado ter ocorrido a perfuração total.

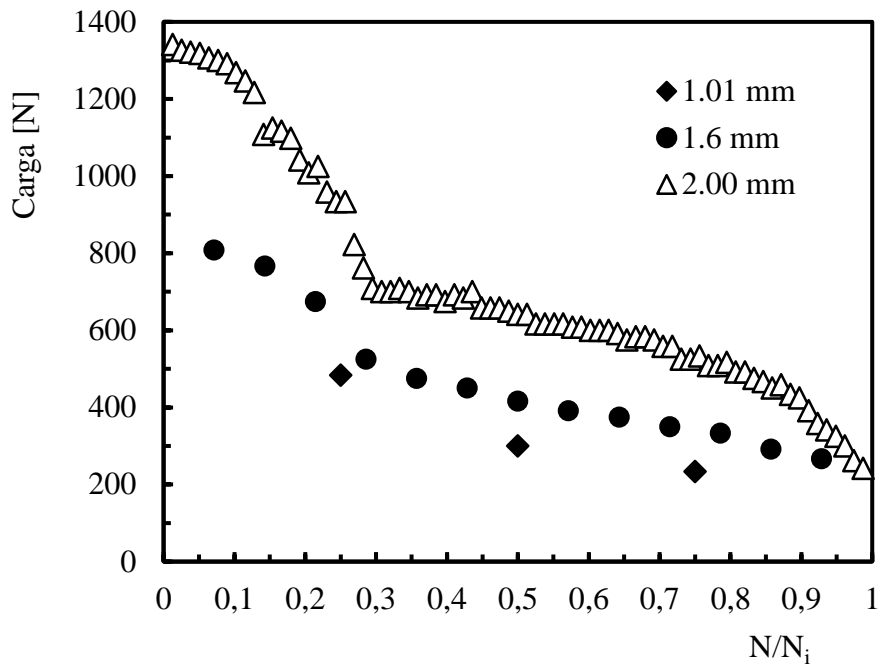


Figura 3.9 Evolução da carga máxima de impacto em função do número de impactos

Como esperado, independentemente da espessura, a carga máxima diminui com o aumento do número de impactos. A acumulação de danos é responsável pela menor rigidez, especialmente no ponto de impacto, o que explica a diminuição da carga máxima. Por outro lado, a quebra das fibras é responsável por uma diminuição drástica da rigidez, com a carga máxima a diminuir significativamente até à perfuração ocorrer. Em termos da deflexão máxima, a figura 3.10 ilustra a tendência oposta.

Com exceção da espessura de 1,1 mm, em que se verifica uma diminuição bastante rápida da carga devido à baixa rigidez da placa, os restantes valores conduzem a uma evolução caracterizada por três estágios. No primeiro, que representa basicamente os primeiros 30% da vida de fadiga, verifica-se uma diminuição bastante rápida da carga máxima como resultado do surgimento dos primeiros danos (fissuras na matriz e delaminações/fratura interlaminar) e sua propagação. A tendência demonstrada revela que o aumento da espessura conduz a uma maior queda da carga máxima de impacto neste regime. Seguidamente, o segundo estágio que se estende sensivelmente até aos 80% da vida de fadiga resulta da saturação dos danos iniciados no estágio anterior e o surgimento de novos, neste caso, paralelos ao inicial e que se desenvolveu longitudinalmente. Pode-se dizer que neste estágio a diminuição da carga máxima ocorre quase linearmente com o número de impactos. Finalmente, o terceiro estágio caracteriza-se novamente por uma queda abrupta da carga máxima, como resultado de uma elevada severidade dos danos introduzidos.

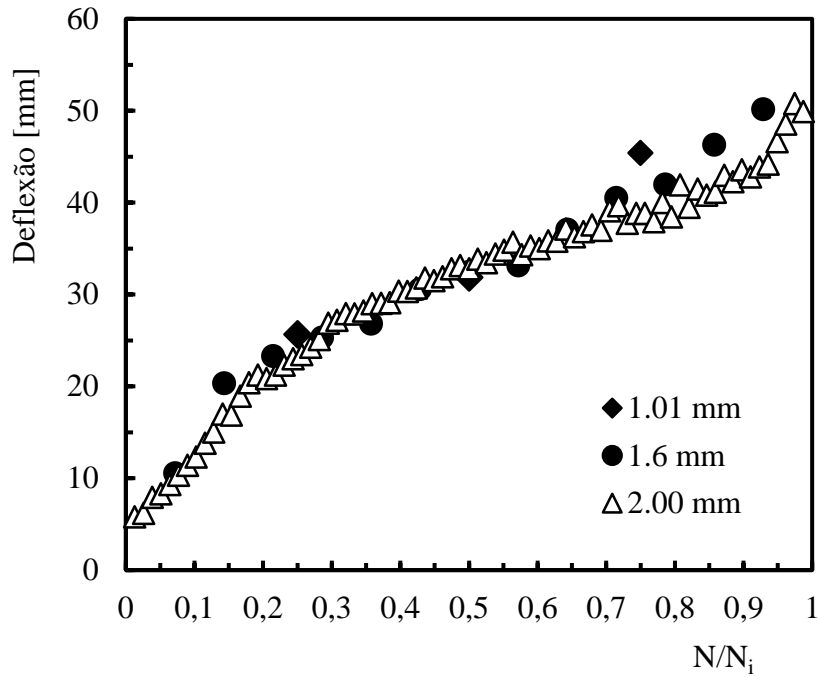


Figura 3.10 Evolução da deflexão em função do número de impactos

Em termos de rigidez à flexão por impacto, a sua evolução com o número de impactos encontra-se ilustrada na figura 3.11. Este parâmetro revela-se como uma ferramenta bastante importante na avaliação do dano em materiais compósitos e a sua evolução é bastante similar à observada para a energia de recuperação elástica. Tal como na figura 3.9, também aqui se denota a existência de três estágios com um andamento muito semelhante ao descrito anteriormente. Portanto, é possível concluir que estas curvas estão de acordo com a discussão anterior em termos de progressão de dano e a que se encontra visualizada na figura 3.12.

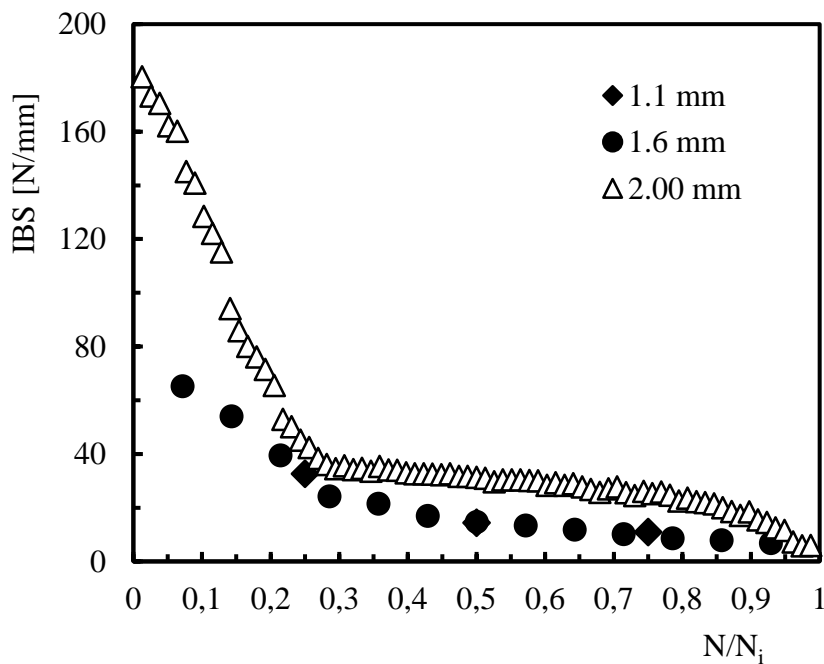
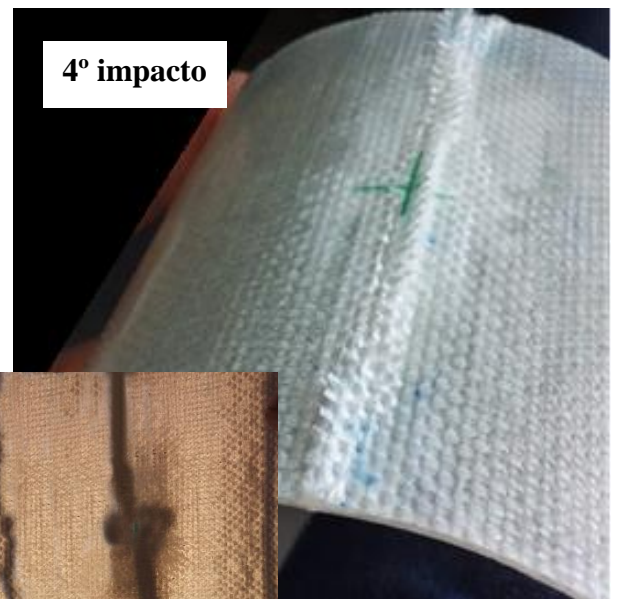
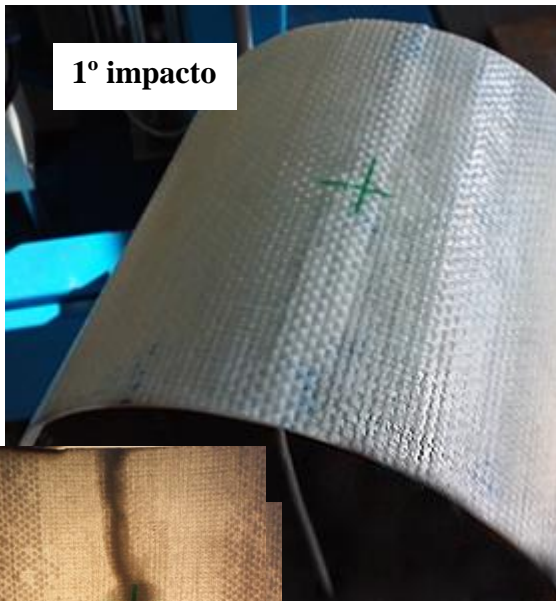
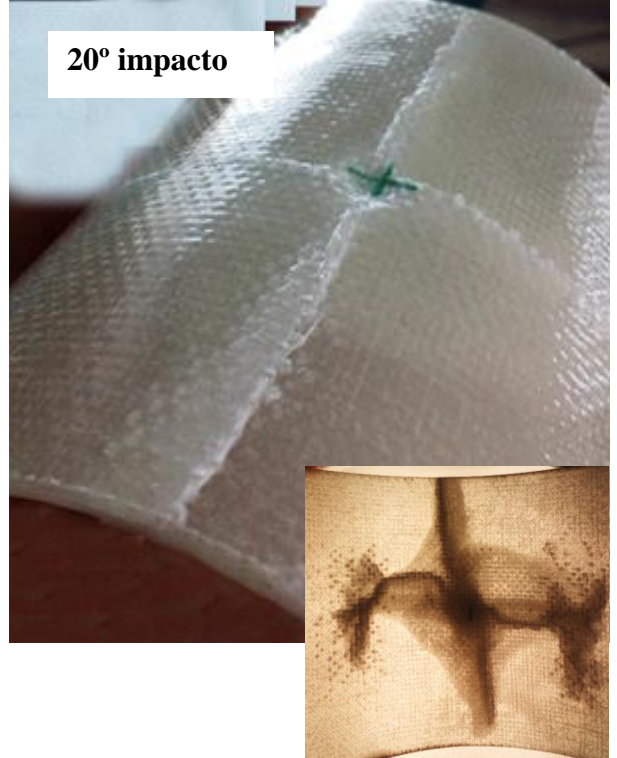
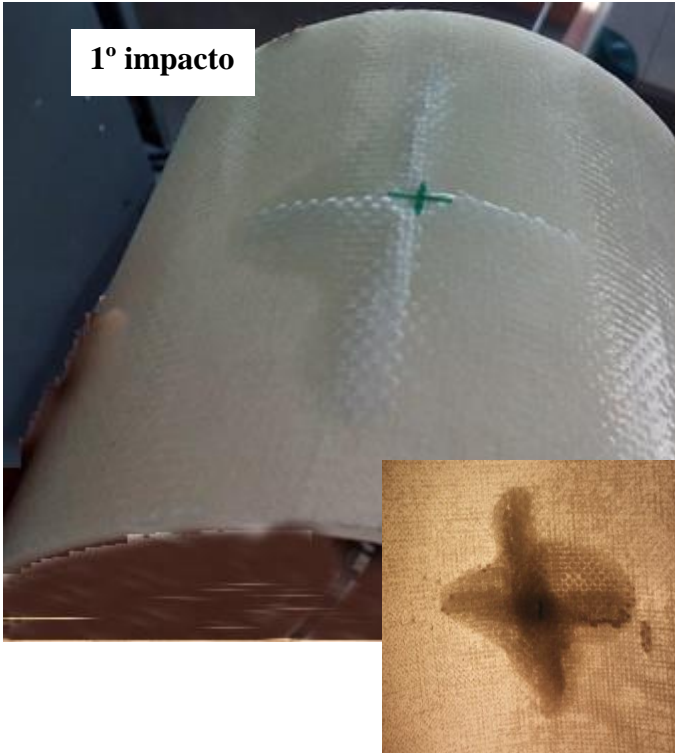


Figura 3.11 Evolução do IBS em função do número de impactos



a)





b)

Figura 3.12 Evolução dos mecanismos de dano em função do número de impactos a) 1,08 mm; b) 2,00 mm

Finalmente a resistência residual estática à compressão foi avaliada para laminados com espessura de 1.6 mm, cuja perfuração total (vida de fadiga ao impacto) foi alcançada entre os 12 e os 14 impactos. O gráfico ilustrado na figura 3.13 representa a evolução da carga residual de compressão para diferente número de impactos.

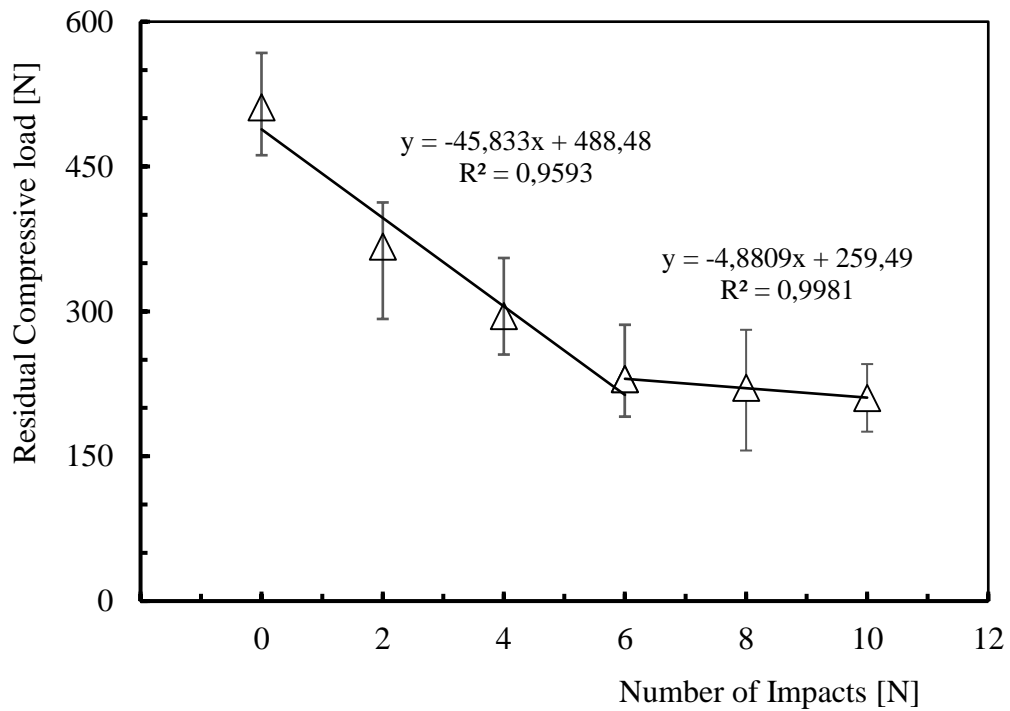


Figura 3.13 Carga Compressiva Residual em função do número de impactos

A resistência residual à compressão mostra ser bastante dependente do número de impactos, a qual pode ser traduzida por um modelo bi-linear. Assim, face aos provetes de controlo, a resistência residual decresce de 511,6 N para 230 N, o que se traduz numa diminuição na ordem dos 55%. Em termos de resistência à fadiga, este valor representa sensivelmente 50% do valor da vida observado e denota a severidade do dano introduzido em termos de resistência estática. Para a mesma vida, a diminuição da carga máxima ilustrada na figura 3.9 é de 48,5%. Finalmente, o segundo estágio ocorrido entre o sexto e o décimo impacto representa uma diminuição da resistência residual à compressão na ordem dos 8,5% revelando que, em termos estáticos, o efeito dos danos introduzidos já não se revela tão danoso quanto os introduzidos no período inicial.

Para uma melhor compreensão do efeito dos danos introduzidos na resistência residual à compressão, a figura 3.14 compara duas curvas carga-deflexão para o provete de controlo e para um provete previamente submetido a seis impactos e a figura 3.15 a evolução do dano para diferentes níveis de carga.

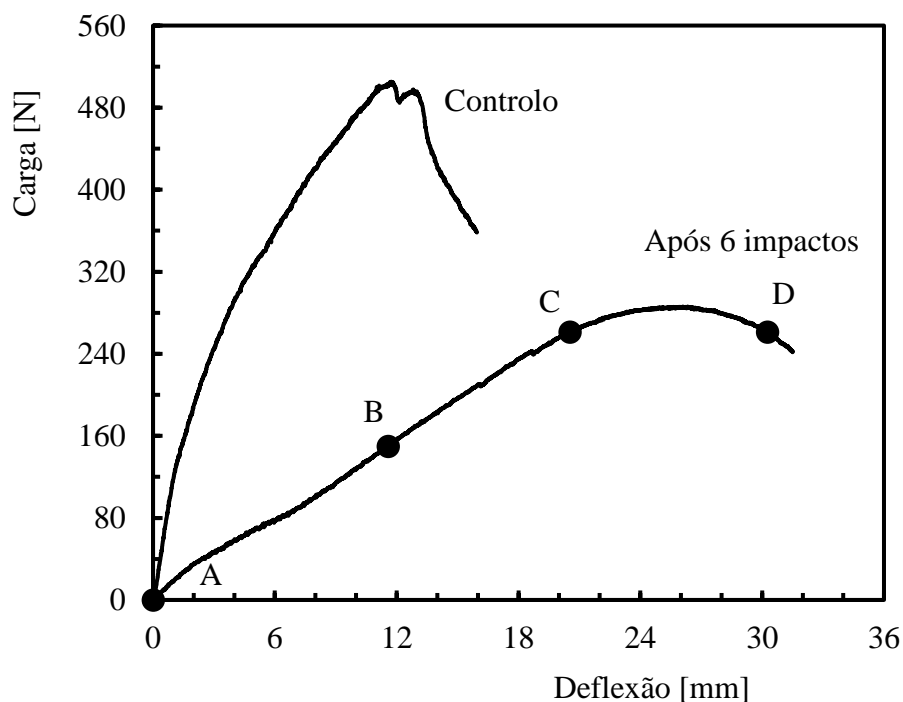
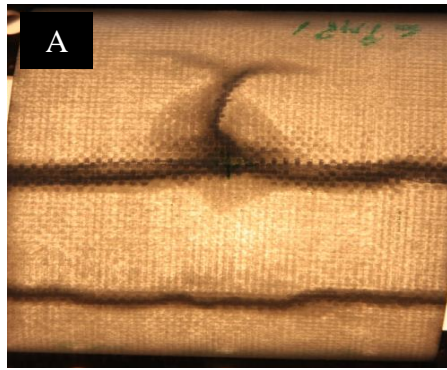
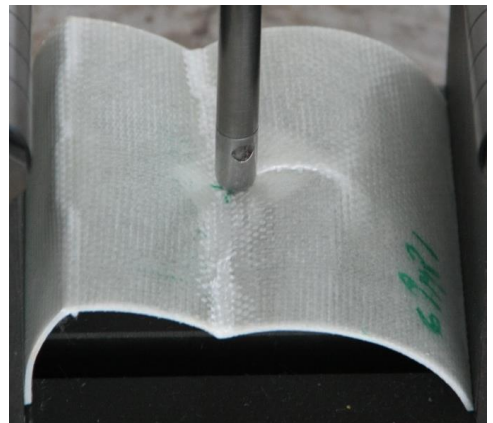
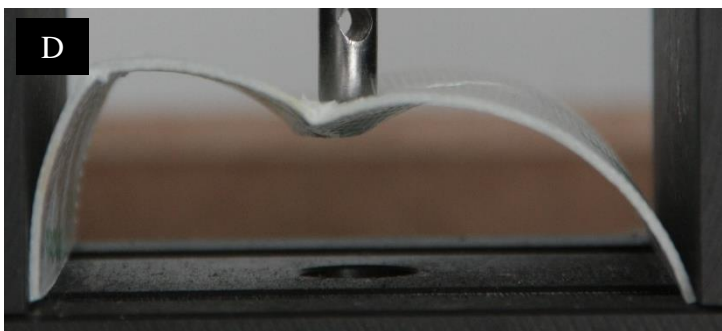
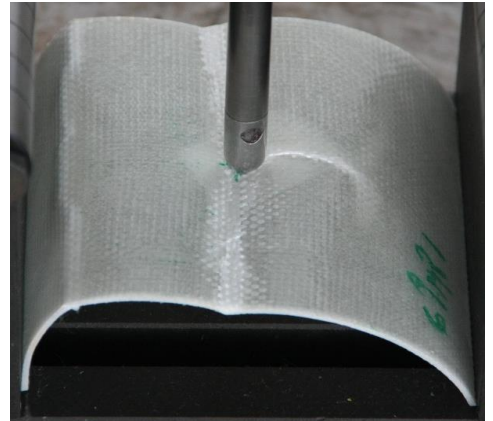
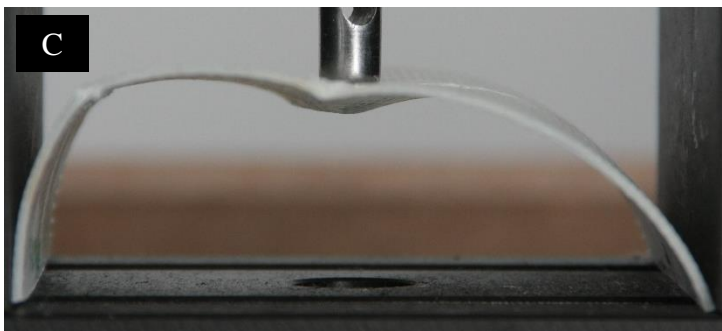
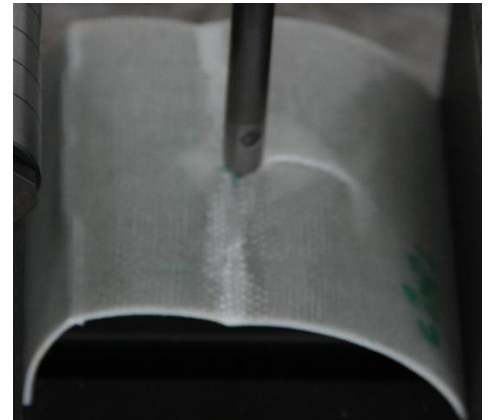
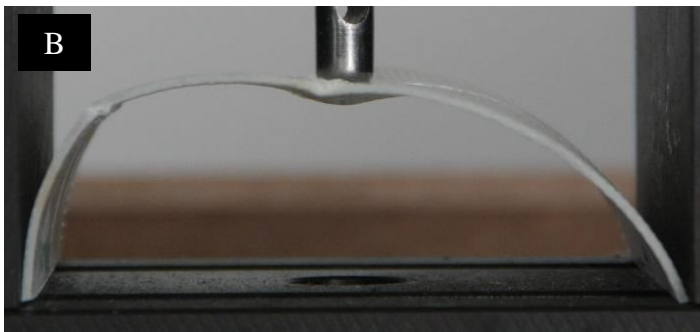


Figura 3.14 Curva típica carga-deflexão para a amostra de controlo e para uma amostra após 6 impactos

As referidas figuras deixam bem visível o efeito dos danos introduzidos pelas cargas de impacto na resistência residual estática à compressão. Para o mesmo nível de carga, o valor de deflexão observado no provete previamente impactado é significativamente superior, o que, neste caso, é revelador da perda significativa de rigidez. Estes resultados, mais uma vez, confirmam que a rigidez revela-se determinante na resposta ao impacto.



a)



b)

Figura 3.15 a) Dano após 6 impactos; b) Evolução do dano a diferentes cargas compressivas

# Capítulo 4

## Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

De acordo com os objetivos inicialmente estabelecidos, esta tese apresentou uma análise e discussão de resultados que conduziu a algumas conclusões. As principais conclusões que se podem tirar encontram-se resumidas na seguinte lista:

1. Nos ensaios de impacto o aumento da espessura leva a um aumento da rigidez e, conseqüentemente, a uma maior carga de impacto bem como menor deflexão e tempo de contato;
2. Para maiores valores de espessura, verifica-se que a carga de impacto aumenta e a deflexão diminui, ambos linearmente, enquanto a rigidez à flexão por impacto aumenta de acordo com um polinómio de 2º grau;
3. Quanto maior a espessura menor a severidade do dano, isto porque a energia é dissipada pelo maior número de interfaces.
4. Relativamente aos ensaios estáticos verificou-se que uma maior espessura conduz a maiores cargas de rotura;
5. O aumento da espessura leva ao aumento da vida de fadiga.

Perspetivando a existência de trabalhos futuros, os aspetos que se revelam interessantes para uma abordagem mais detalhada são:

- Estudo de diferentes configurações relativamente à orientação dos laminados;
- Estudo de multi-impactos com diferentes pontos de incidência a uma distância variável do centro geométrico do provete;
- Estudo de condições ambientais incluindo ambientes hostis;
- Estudo da resistência ao impacto de cascas com defeitos induzidos;
- Estudo da variação da resistência com diferentes energias de impacto.

# Bibliografia

- [1] Chung, D. (2010). Composite materials: science and applications. Springer Science & Business Media.
- [2] Gay, D. (2014). Composite materials: design and applications. CRC press, 13-61,141 -177
- [3] Chawla, K. K. (2012). Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media, 10-30.
- [4] Mazumdar, S. (2001). Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. CrC press, 10 - 30.
- [5] Safri, S., Sultan, M., Yidris, N., & Mustapha, F. (2014). Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials - A review. The International Journal of engineering and science (IJES), 3(9), 50-60.
- [6] Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. Materials Science and Engineering, 412(1), 171-176.
- [7] Quilter, A. (2001). Composites in Aerospace Applications. IHS White Paper, 444(1).
- [8] Brigante, D. (2013). New Composite Materials Selection: Design and Application, 19 - 34.
- [9] Ventura, A. M. F. (2009). Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. Ciência & tecnologia dos materiais, 21(3-4), 10-19.
- [10] Vinson, J. R., & Sierakowski, R. L. (2012). The behavior of structures composed of composite materials (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- [11] Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., & Leong, K. W. (2001). Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. Composites science and technology, 61(9), 1189-1224.
- [12] Saira Taj, S., Munawar, M. A., & Khan, S. (2007). Natural fiber-reinforced polymer composites. Proceedings-Pakistan Academy of Sciences, 44(2), 129.
- [13] Paiva, J., Mayer, S., & Rezende, M. (2006). Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites. Materials Research, 9(1), 83-90.
- [14] Richardson, M., & Wisheart, M. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27(12), 1123-1131.

- [15] Silva, H. (2014). Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epóxi nano-reforçados. Universidade de Coimbra: Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica para a obtenção do grau de Mestre.
- [16] Adams, R. D., & Cawley, P. D. R. D. (1988). A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT international*, 21(4), 208-222.
- [17] Amaro, A. M., Reis, P. N., & de Moura, M. F. (2006). Residual strength after low velocity impact in carbon-epoxy laminates. In *Materials science forum* (Vol. 514, pp. 624-628). Trans Tech Publications.
- [18] De Moraes, W. A., Monteiro, S. N., & d'Almeida, J. R. M. (2005). Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts. *Composite structures*, 70(2), 223-228.
- [19] Leylek, Z., Scott, M., Georgiadis, S., & Thomso, R. (1999). Computer modelling of impact on curved fibre composite panels. *Composite structures*, 47(1), 789-796.
- [20] HexPly Prepreg Technology. (2013, 1). Consultado a 7/9/2017, no website [https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing\\_of\\_Polymer\\_composites/FS2017/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/design-materials-fabrication/composite-materials-dam/Education/Manufacturing_of_Polymer_composites/FS2017/Prepreg_Technology.pdf)
- [21] Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M., & Lessard, L. (2006). Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts. *Composites science and technology*, 1(61-68), 66.
- [22] Hexcel Corporation, (HexForce ® Reinforcements) Consultado a 7/9/2017, no website <http://www.hexcel.com/Products/Fabrics-Reinforcements/HexForce-Reinforcements>.
- [23] Kim, H., & Lee, D. (2002). Dielectric cure monitoring for glass/polyester prepreg composites. *Composite Structures*, 57(1), 91-99.
- [24] Robinson, P., & Davies, G. A. O. (1992). Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. *International journal of impact engineering*, 12(2), 189-207.
- [25] Liu, D., & Malvern, L. E. (1987). Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *Journal of Composite Materials*, 21(7), 594-609.
- [26] Her, S. C., & Liang, Y.-C. (2004). The finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact. *Composite Structures*, 66(1), 277-285.

- [27] Imielińska, K., Castaings, M., Wojtyra, R., Haras, J., Le Clezio, E., & Hosten, B. (2004). Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: glass, carbon and Kevlar/epoxy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 157, 513-522.
- [28] Prakash, R. (1980). Non-destructive testing of composites. *Composites*, 11(4), 217-224.
- [29] Amaro, A. M., Reis, P. N. B., De Moura, M. F. S. F., & Santos, J. B. (2012). Damage detection on laminated composite materials using several NDT techniques. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 54(1), 14-20.
- [30] Shivakumar, K. N., Elbert, W. & Illg, W. (1985). Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates. *AIAA journal*, 23(3).
- [31] Razali, N., Sultan, M., Mustapha, F., Yidris, N., & Ishak, M. (2014). Impact damage on composite structures-a review. *International Journal of Engineering Science*, 3(7), 8-20.
- [32] Olsson, R. (2000). Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (8), 879-887.
- [33] Schoeppner, G., & Abrate, S. (2000). Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 31(9), 903-915.
- [34] Davies, G. A. O., & Olsson, R. (2004). Impact on composite structures. *The Aeronautical Journal*, 108(1089), 541-563.
- [35] R. Olsson, Swerea SICOMP AB, Sweden. (2012). Low and medium velocity impact as a cause of failure in polymer matrix composites. *Failure mechanisms in polymer matrix composites criteria, testing and industrial applications*. 53-78
- [36] Cantwell, W., & Morton, J. (1989). Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP. *Composites*, 20(6), 545-551.
- [37] Olsson, R., Donadon, M., & Falzon, B. (2006). Delamination threshold load for dynamic impact on plates. *International Journal of Solids and Structures*, 43(10), 3124-3141.
- [38] Olsson, R. (2015). Analytical prediction of damage due to large mass impact on thin ply composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 72(1), 184-191.
- [39] Kosmann, N., Riecken, B. T., Schmutzler, H., Knoll, J. B., Schulte, K., & Fiedler, B. (2014). Evaluation of a critical impact energy in GFRP under fatigue loading. *Composites Science and Technology*, 102, 28-34.

- [40] Ying, Y. (1998). Analysis of impact threshold energy for carbon fibre and fabric reinforced composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 17(12), 1056-1075.
- [41] Sjöblom, P. O., Hartness, J. T., & Cordell, T. M. (1988). On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of composite materials*, 22(1), 30-52.
- [42] Aslan, Z., Karakuzu, R., & Okutan, B. (2003). The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 59(1), 119-127.
- [43] Gong, S., Toh, S., & Shim, V. (1994). The elastic response of orthotropic laminated cylindrical shells to low-velocity impact. *Composites Engineering*, 4(2), 247-266.
- [44] Choi, I. H., Downs, R., & Chang, F. (1991). A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I—experiments. *Journal of Composite Materials*, 25(8), 992-1011.
- [45] Olsson, R. (2001). Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(9), 1207-1215.
- [46] Saghafi, H., Brugo, T. M., Zucchelli, A., Fragassa, C., & Minak, G. (2016). Comparison of the effect of preload and curvature of composite laminate under impact loading. *FME Transactions*, 44(4), 353-357.
- [47] Choi, I. H. (2017). Low-velocity impact response analysis of composite pressure vessel considering stiffness change due to cylinder stress. *Composite Structures*, 160, 491-502.
- [48] Amaro, A., Reis, P., & Magalhães, A. (a.2011). The Influence of the Boundary Conditions on Low-Velocity Impact Composite Damage. *Strain*, 47(s1).
- [49] Olsson, R. (2010). Analytical model for delamination growth during small mass impact on plates. *International Journal of Solids and Structures*, 47(21), 2884-2892.
- [50] Shyr, T., & Pan, Y. (2003). Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite structures*, 62(2), 193-203.
- [51] Zhou, G. (1997). Compressive behavior of large undamaged and damaged thick laminated panels. *Composite structures*, 38(1-4), 589-597.
- [52] Zhao, G., & Cho, C. (2007). Damage initiation and propagation in composite shells subjected to impact. *Composite Structure*, 78(1), 91-100.
- [53] Arachchige, B., Ghasemnejad, H., & Augousti, A. T. (2016). Theoretical approach to predict transverse impact response of variable-stiffness curved composite plates. *Composites Part B: Engineering*, 89, 34-43.

- [54] Arachchige, B., & Ghasemnejad, H. (2017). Post impact analysis of damaged variable-stiffness curved composite plates. *Composite Structures*, 166, 12-21.
- [55] Kistler, L., & Waas, A. (1998). Experiment and Analysis on the Response of Curved Laminated Composite Panels Subjected to Low Velocity Impact. *International journal of impact engineering*, 21(9), 711-736.
- [56] Krishnamurthy, K., Mahajan, P., & Mittal, R. (2003). Impact response and damage in laminated composite cylindrical shells. *Composite structures*, 59(1), 15-36.
- [57] Krishnamurthy, K., Mahajan, P., & Mittal, R. (2001). A parametric study of the impact response and damage of laminated cylindrical composite shells. *Composites Science and Technology*, 1655-1669, 61.
- [58] Kumar, S. (2008). Analysis of impact response and damage in laminated composite shell involving large deformation and material degradation. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 3(9), 1741-175
- [59] Ballère, L., Viot, P., Lataillade, J. L., Guillaumat, L., & Cloutet, S. (2009). Damage tolerance of impacted curved panels. *International Journal of Impact Engineering*, 36(2), 243-253.
- [60] Cho, C., & Zhao, G. (1999). Dynamic response and damage of composite shell under impact. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 13(9), 596-608.
- [61] Kistler, L. (1994). Experimental investigation of the impact response of cylindrically curved laminated composite panels. *AIAA paper*, 94-1604.
- [62] De Moura, M., & Marques, A. (2002). Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(3), 361-368.
- [63] Andrew JJ, Arumugam V, Saravanakumar K, Dhakal HN, Santuli C. Compression after impact strength of repaired GFRP composite laminates under repeated impact loading. *Compos Struct* 2015;133:911-20.
- [64] Reis PNB, Ferreira JAM, Santos P, Richardson MOW, Santos JB. Impact response of kevlar composites with filled epoxy matrix. *Compos Struct* 2012;94:3520-8.
- [65] Reis PNB, Ferreira JAM, Zhang ZY, Benameur T, Richardson MOW. Impact response of kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. *Compos Part B-Eng* 2013;46:7-14.
- [66] Belingardi G, Vadori R. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *Int J Impact Eng* 2002;27:213-29.

- [67] Schoeppner GA, Abrate S. Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates. *Compos Part A-Appl S* 2000;31:903-15.
- [68] Reis PNB, Ferreira JAM, Zhang ZY, Benameur T, Richardson MOW. Impact response of kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. *Compos Part B-Eng* 2013;46:7-14.
- [69] Río TG, Zaer R, Barbero E, Navarro C. Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature. *Compos Part B-Eng* 2005;36:41-50.
- [70] David-West OS, Nash DH, Banks WM. An experimental study of damage accumulation in balanced CFRP laminates due to repeated impact. *Compos Struct* 2008;83:247-58.
- [71] Amaro AM, Reis PNB, Neto MA, Louro C. Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites. *Polym Degrad Stab* 2013;98:853-62.