



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Resposta ao Impacto de Painéis Sanduíche

Georgino Conceição Gonçalves Serra

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

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Covilhã, Junho de 2013

À minha esposa, filhas e neta.

Agradecimentos

Durante a realização desta dissertação foram recebidos vários apoios que auxiliaram e estimularam a sua elaboração. O autor deseja expressar os seus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que possibilitaram a realização deste trabalho, nomeadamente:

- Ao orientador científico, Professor Paulo Nobre Balbis dos Reis, por toda a disponibilidade, colaboração, dedicação e pela constante atenção e apoio que dedicou ao longo de toda a sua execução.
- Ao Engenheiro Carlos Coelho, do Instituto Politécnico de Tomar, por todo o apoio e disponibilidade na realização dos ensaios de impacto.
- À Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, do Instituto Politécnico de Tomar, e todo o seu corpo docente pelo apoio e disponibilidade na realização deste trabalho.
- À Universidade da Beira Interior por todas as facilidades concedidas para a realização deste trabalho.
- Ao Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior pelo apoio e colaboração prestada ao longo da execução desta dissertação.
- À minha esposa, filhas e neta pela compreensão e apoio em todos os momentos do meu percurso académico.

Resumo

Nos últimos anos temos assistido a um aumento significativo da utilização de compósitos sanduíche nos mais variados campos da engenharia e este fenómeno tende a continuar. Contudo, a resistência residual destes materiais é fortemente afetada pelos defeitos que decorrem durante o processo de fabrico e/ou de cargas de impacto que surgem ao longo da sua vida em serviço. O presente trabalho estuda o comportamento de laminados e compósitos sanduíche, com lâminas de GFRP e núcleos de cortiça, quando submetidos a múltiplos impactos de baixa velocidade. Verifica-se que a resistência ao impacto é maior para os painéis sanduíche do que para os laminados, contudo, este efeito é mais significativo à medida que a energia de impacto diminui.

Palavras-chave

Compósitos; Laminados sanduíche; Resistência ao impacto; Impacto múltiplo.

Abstract

In recent years, there has been a rapid growth in the use of composites sandwich in engineering applications and this phenomenon will be continuing. However, the residual strength of those materials is largely affected by the damages occurred along the manufacturing process and/or by impact loads that occur during the operational life. This work intends to compare the effect of multi low velocity impacts on composites sandwich, made by fibre glass/epoxy skins and cork core, relatively to the glass fibre/epoxy laminates. It is possible to conclude that the impact strength is higher for composites sandwich, however, this tendency increases when the impact energy decreases.

Keywords

Composites; Sandwich laminates; Impact strength; Multi impact.

Índice

Introdução	1
1 - Enquadramento teórico	2
1.1 - Introdução	2
1.2 - Materiais Compósitos	2
1.2.1 - Introdução	2
1.2.2 - Classificação dos Materiais Compósitos	4
1.2.3 - Fibras	5
1.2.4 - Matrizes	6
1.3 - Compósitos em Sanduíche	9
1.3.1 - Introdução	9
1.3.2 - Materiais utilizados nos painéis sanduíche	11
1.3.2.1 - Materiais utilizados nas lâminas dos painéis sanduíche	11
1.3.2.2 - Materiais utilizados nos núcleos	12
1.4 - Impacto em Compósitos sanduíche	14
2 - Materiais, Equipamento e Procedimento Experimental	20
2.1 - Introdução	20
2.2 - Manufatura dos Laminados	20
2.3 - Provetes	21
2.4 - Equipamento	22
2.5 - Procedimento Experimental	23
3 - Análise e Discussão de Resultados	24
3.1 - Introdução	24
3.2 - Apresentação e Discussão de resultados	24
4 - Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros	36
4.1 - Conclusões Gerais	36
4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros	37
Bibliografia	38

Lista de Figuras

Figura 1.1 –	Evolução dos materiais ao longo do tempo [9].	3
Figura 1.2 –	Exemplos de algumas aplicações dos materiais compósitos.	3
Figura 1.3 –	Classificação dos diversos tipos de materiais compósitos [11].	4
Figura 1.4 –	Constituição típica de um painel em sanduíche.	10
Figura 1.5 –	(Aplicações de painéis sanduíche: a) Mosquito TT35 TA639, b) Estrutura de um barco.	10
Figura 1.6 –	Diferentes configurações dos núcleos utilizados nos painéis sanduíche.	12
Figura 1.7 –	Modos de falhas em estruturas sanduíche [21, 28].	15
Figura 1.8 –	Modos de falha em estruturas sanduíche de acordo com Mines <i>et al</i> [38].	17
Figura 2.1 -	Preparação dos painéis sanduíche.	21
Figura 2.2 –	Dimensões dos provetes usados nos ensaios de impacto: a) sem cortiça; b) com cortiça.	21
Figura 2.3 –	Máquina de impacto IMATEK-IM10.	22
Figura 3.1 -	Curvas força-tempo para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.	25
Figura 3.2 -	Evolução da força máxima com a energia de impacto.	26
Figura 3.3 -	Evolução do tempo de contacto com a energia de impacto.	27
Figura 3.4 -	Curvas força-deslocamento para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.	28
Figura 3.5 -	Evolução do deslocamento com a energia de impacto.	29
Figura 3.6 -	Curvas energia-tempo para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.	30
Figura 3.7 -	Evolução da energia restituída com a energia de impacto.	31
Figura 3.8 -	Resistência ao impacto para os diferentes materiais.	32
Figura 3.9 -	Evolução da força máxima ao longo dos multi-impactos para as energias 16 J, 20 J e 24 J.	33
Figura 3.10 -	Evolução do tempo de contacto ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.	34
Figura 3.11 -	Evolução do deslocamento ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.	34
Figura 3.12 -	C Evolução da energia restituída ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.	35

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Valores típicos das propriedades mecânicas de algumas fibras [5].	5
Tabela 1.2 – Propriedades de alguns polímeros utilizados como matriz [15].	8
Tabela 1.3 – Principais vantagens e desvantagens das estruturas sanduíche [19].	11
Tabela 1.4 – Vantagens/desvantagens das lâminas metálicas [21].	12
Tabela 1.5 – Algumas das propriedades das espumas mais utilizadas [16].	13

Lista de Acrónimos

EN	European Standards
ISO	International Organization Standardization
EPS	Poliestireno expandido
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-catano
PF	Resina Fenólica
PP	Polipropileno
PVC	Poliuretano
PPS	Polisulfureto de fenileno
PRC	Particulate reinforced composites
XPS	Poliestireno extrudido

Notação

Caracteres Latinos

A	Alongamento à rotura
C_0	Constante de integração
E	Módulo de elasticidade
F	Força
$F_{\text{máx}}$	Força máxima
m	Massa
t	Tempo
T	Temperatura
T_g	Temperatura de transição vítrea
V	Velocidade
V_0	Velocidade inicial
X	Deflexão
N	Número de impactos
N_r	Penúltimo impacto par o qual ocorreu a falha (perfuração)

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de expansão térmica
ρ	Massa específica
σ_u	Resistência a tracção

Introdução

Atualmente são cada vez mais as aplicações em engenharia que utilizam elementos estruturais de elevada resistência e rigidez específica. Neste contexto, não é de estranhar o enorme interesse pelos materiais compósitos e em muito especial pelas estruturas em sanduíche com lâminas em compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras.

Apesar da grande diversidade de materiais e configurações já existentes para os painéis sanduíche, estão constantemente a ser propostos e utilizados novos materiais bem como novas combinações de materiais. Por outro lado, as propriedades mecânicas destes materiais são significativamente afectadas pelos defeitos originados durante o processo de fabrico ou pelas cargas de impacto que surgem ao longo da sua vida operacional e/ou durante os actos de manutenção. Assim, o presente trabalho pretende estudar o comportamento de compósitos sanduíche, com lâminas de GFRP e núcleos de cortiça, quando submetidos a múltiplos impactos de baixa velocidade.

Para tal, esta dissertação encontra-se organizada em 4 capítulos sendo, no capítulo 1, feito um enquadramento teórico sobre materiais compósitos, laminados sanduíche e uma breve revisão sobre o impacto nestes materiais. O capítulo 2 descreve as técnicas experimentais utilizadas no trabalho, a manufactura e geometria dos corpos de prova bem como os equipamentos utilizados. No capítulo 3 apresenta-se os resultados experimentais e a sua discussão. Finalmente, o capítulo 4, evidencia as conclusões finais e apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Enquadramento teórico

1.1 - Introdução

De uma forma sucinta serão apresentados, neste capítulo, alguns conceitos fundamentais sobre os materiais compósitos e laminados sanduiche. Especial enfoque será dado aos seus constituintes e a forma como estes influenciam as suas propriedades mecânicas. Finalmente será abordado o fenómeno do impacto a baixa velocidade, sua classificação na perspectiva de vários autores, e respectivo efeito nos laminados sanduiche.

1.2 - Materiais Compósitos

1.2.1 - Introdução

Os compósitos combinam propriedades complementares de dois ou mais materiais, de natureza distinta, as quais não são conseguidas enquanto componentes isolados. No entanto, esta definição pode ser generalizar a todos os materiais [1-3]. Assim, compósito será um composto constituído por dois ou mais materiais, insolúveis entre si, sendo um deles a matriz e o outro o reforço [4, 5]. As propriedades, neste caso, são obtidas pela combinação entre pelo menos dois materiais distintos com uma interface visivelmente clara entre os mesmos.

A combinação dos vários materiais visando obter melhores propriedades não é recente [4-8]. Embora não exista uma certeza, a primeira aplicação de um material compósito remonta ao ano de 450 A.C. e surgiu no âmbito da construção civil. De acordo com a Bíblia, no Livro do Êxodo (capítulo V, versículo 6 e 7), era enorme a dificuldade de fabricar tijolos sem palha. O sector aeronáutico introduziu os primeiros compósitos em 1938, ao utilizar painéis de madeira tipo sanduiche de contraplacado. Mais tarde foi utilizada a fibra de cânhamo e resina fenólica nas peças de fuselagem do Spitfire mas, no entanto, foi a década de 50 que ficou marcada no campo aeronáutico com a introdução de novas fibras e resinas. Apesar de tudo, só no início dos anos 70, com a crise do petróleo, é que o interesse por estes materiais se acentuou, tendo vindo a ser aplicado daí em diante nos mais variados campos da engenharia. A figura 1.1 ilustra, por exemplo, o interesse dos materiais compósitos ao longo dos tempos, numa perspectiva comparativa com os restantes materiais. Actualmente têm um

campo de aplicação muito vasto, que abrange o sector aeroespacial, aeronáutico, automóvel, naval, desportivo, industrial, médico e lazer (figura 1.2).

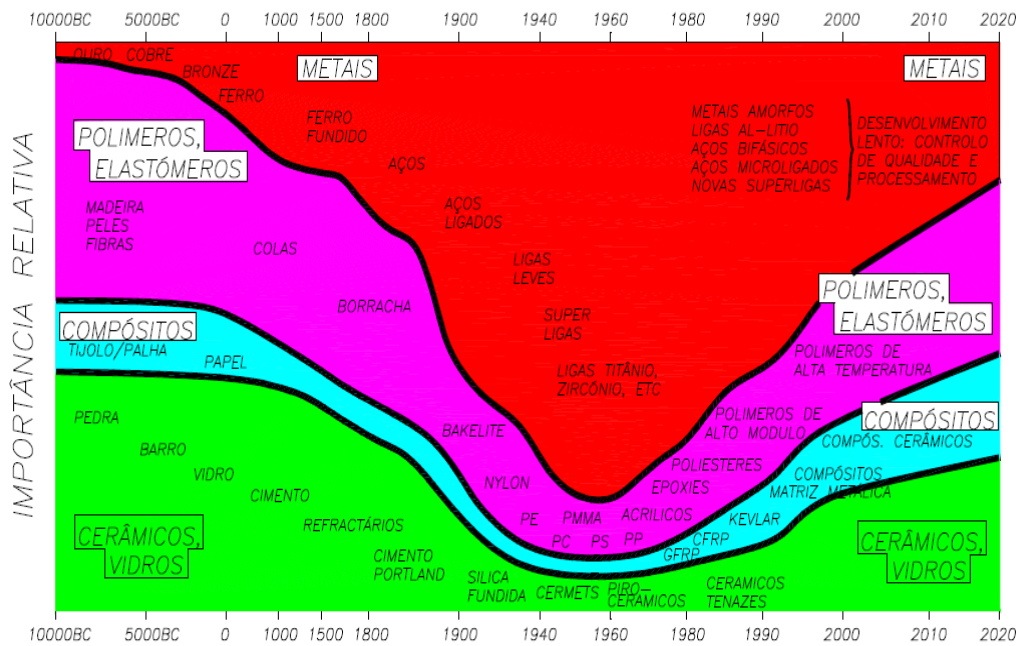


Figura 1.1 - Evolução dos materiais ao longo do tempo [9].



Figura 1.2 - Exemplos de algumas aplicações de materiais compósitos.

Face aos materiais tradicionais, podemos dizer que os compósitos apresentam as seguintes vantagens [1, 4]:

- Maior capacidade de adaptação, substituição por um único elemento;
- Fácil monitorização dos danos ocorridos nos componentes/estruturas em pleno serviço, dado permitirem a inclusão de sensores;
- Maior resistência à fadiga;
- Elevada resistência à corrosão;

- Os materiais compósitos permitem que as fibras possam ser orientadas na direção de maior solicitação;
- Fácil controlo de qualidade e processamento dos componentes obtidos;
- Elevada resistência e rigidez específica;
- Baixa expansão térmica e baixa condutibilidade térmica.

1.2.2 - Classificação dos Materiais Compósitos

Como foi referido no ponto anterior, os compósitos possuem dois ou mais constituintes, fisicamente distintos numa escala microscópica, com uma interface visivelmente clara entre eles. A matriz é o constituinte contínuo, nem sempre presente em maior quantidade, e o reforço trata-se do constituinte disperso na matriz responsável pelas propriedades mecânicas. Neste contexto, uma forma de classificar os materiais compósitos baseia-se na geometria da unidade representativa de reforço e encontra-se representada na figura 1.3 [10, 11].



Figura 1.3 - Classificação dos diversos tipos de materiais compósitos [11].

As fibras apresentam uma relação comprimento/diâmetro (l/d) superior a 100 μm , diâmetro inferior a 20 μm e classificam-se, de acordo com o seu comprimento, em contínuas ou longas (quando o comprimento médio é de 200-300 mm) e curtas (quando é menor que 25 mm; Whiskers são fibras muito curtas). Neste caso, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos reforçados com fibras dependem não só dos seus constituintes (tipo de fibra e resina, fracção volumétrica, tratamentos das fibras e/ou resina, orientação, diâmetro e dimensão das fibras) mas também de outros factores, como: processo de fabrico, temperatura, humidade, porosidade da resina, etc. [5, 12]. No caso dos compósitos reforçados com partículas (PRC - particulate reinforced composites), as propriedades mecânicas dependem de vários parâmetros, tais como: comprimento, forma, distribuição e composição das partículas de reforço [7].

1.2.3 - Fibras

São as fibras, como elementos de reforço, as principais responsáveis pelas propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Deste modo, não será de estranhar que os materiais escolhidos para reforço possuam propriedades mecânicas extremamente elevadas e muitas vezes superiores às dos metais maciços de uso corrente em engenharia. As principais fibras utilizadas no fabrico de materiais compósitos são as de vidro, carbono, aramidas e asbestos, encontrando-se na tabela 1.1 alguns valores típicos das suas propriedades mecânicas [5].

Tabela 1.1 - Valores típicos das propriedades mecânicas de algumas fibras [5].

Tipo de fibra	Densidade [g/cm ³]	Diâmetro Filamento [μm]	Resistência à tracção [GPa]	Módulo Young [GPa]	Alonga- mento [%]
Vidro tipo E	2.55	13	3.34	81.3	4.8
Vidro tipo C	2.56	10-13	3.31	-	4.8
Vidro tipo S	2.50	10-13	4.58	96.9	5.7
Carbono/baixo módulo	1.76-1.79	7	3.65	228	1.4
Carbono/médio módulo	1.78	5.1	5.03	290	1.7
Carbono/alto módulo	1.80	8	2.48	340	0.7
Aramida (Kevlar 29)	1.44	12	3.6	83	4.0
Aramida (Kevlar 49)	1.44	12	3.6	124	2.8
Aramida (Kevlar 149)	1.44	12	3.4	186	2.0
Boro	2.6	-	3.5	420	-
Asbestos (Anfíbola)	3.3	-	4.1	190	-
Al ₂ O ₃	4.0	-	2.0	470	-
SiC	3.4	-	2.3	480	-

Fibras de Vidro - Apresentam boas propriedades de resistência mecânica, rigidez, eléctricas e desgaste. No entanto existem fibras de vidro que, em função da percentagem relativa dos óxidos, apresentam características típicas para aplicações específicas [13].

Fibras de Aramida - Caracterizam-se pela excelente resistência química, mecânica, óptima relação resistência/peso, alta tenacidade, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boas características dieléctricas, elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes [13].

Fibras de Carbono - Apresentam baixa massa específica, elevada rigidez, elevada tensão de rotura e baixo coeficiente de dilatação [13].

Fibras de Boro - Apresentam, de um modo geral, baixa densidade bem como elevada resistência e rigidez. O módulo de elasticidade das fibras de boro é, por exemplo, cinco vezes superior ao das fibras de vidro mas, as primeiras, são ligeiramente mais pesadas [13].

Fibras Naturais - Existe nos dias de hoje uma grande variedade de fibras naturais, as quais são utilizadas como elemento de reforço em aplicações associadas a desempenhos de menor exigência. A sua classificação toma em conta o seu tipo botânico [14].

1.2.4 - Matrizes

O tipo de matriz pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Apesar de suportar uma pequena fracção da carga aplicada, podemos dizer que quando mais resistente for a matriz melhor será o desempenho do compósito [5]. O modo de falha também é fortemente afectado pelo tipo de material utilizado na matriz, visto este poder considerar a resistência da interface fibra/matriz [1]. À matriz cabe também a responsabilidade de molhar completamente as fibras para, deste modo, protege-las contra ataques químicos e/ou danos mecânicos como o desgaste. Por outro lado, elas condicionam muitas vezes a temperatura de trabalho, as propriedades eléctricas, o processo de fabrico e a própria qualidade do acabamento superficial da peça.

Dentro dos vários materiais passíveis de serem usados como matriz, os plásticos são aqueles que assumem maior expressão e, face às especificidades das aplicações, podemos recorrer tanto às resinas termoendurecíveis como aos termoplásticos. Apesar da sua elevada aplicação em compósitos estruturais, as resinas termoendurecíveis apresentam alguns inconvenientes ao nível do fabrico e tempo de vida dos produtos, reflectindo-se posteriormente nos custos finais. Ao invés, as resinas termoplásticas contrapõem vantagens extremamente atractivas, como é o caso de um baixo custo de fabrico, elevada tenacidade,

boa tolerância ao dano e resistência ao impacto, fácil controle de qualidade e possibilidade de serem recicláveis. Desta forma, ao longo dos últimos anos, os termoplásticos têm vindo a assumir-se como uma alternativa muito promissora. A tabela 1.2 apresenta as principais propriedades, físicas e mecânicas, de alguns polímeros utilizados como matriz.

Matrizes Termoendurecíveis

São polímeros cujas moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. São fornecidas para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes e, nalguns casos, é vulgar o recurso ao calor para acelerar o processo de cura.

Poliésteres insaturados - São as mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, eléctricas e químicas [2].

Resinas de vinitester - Excelente resistência química, elevada tensão de rotura, baixa viscosidade e processo de cura rápido [2].

Resinas fenólicas - Excelente comportamento ao fogo e baixa emissão de fumos [2].

Resinas epóxicas - Elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos) e boas propriedades de adesão às fibras. Apresentam grande estabilidade dimensional, baixa absorção de água e podem ser utilizadas até uma temperatura máxima de 220 °C [2].

Poliimidas termoendurecíveis - Elevada resistência térmica (260 °C em funcionamento contínuo, e 460 °C para períodos curtos), elevada resistência mecânica, boa resistência ao impacto e à oxidação, boa capacidade de adesão e baixo coeficiente de atrito [2].

Matrizes Termoplásticas

Os termoplásticos são formados a partir de macromoléculas individuais e lineares sem qualquer reticulação entre si. Estas macromoléculas mantêm-se unidas devido às ligações secundárias (do tipo van der Waals e de hidrogénio) que se estabelecem entre si.

Polipropileno (PP) - Apresenta boa resistência ao impacto e excelente resistência aos ataques químicos (ácidos, álcalis e sais). A temperatura típica de processamento é da ordem dos 200 °C [2].

Poliamida (PA) - Apresenta baixo coeficiente de atrito, grande resistência ao desgaste, boa resistência térmica e uma boa resistência mecânica. As poliamidas são, no entanto, fortemente higroscópicas [2].

Tabela 1.2 - Propriedades de alguns polímeros utilizados como matriz [15].

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

Polycarbonato (PC) - É um polímero dimensionalmente estável, transparente, incolor, pouco higroscópico, retardador de chama, com boa resistência ao impacto, térmica, química e à exposição dos agentes ambientais. A temperatura típica de processamento é da ordem dos 200 °C [2].

Poli-éter-éter-cetona (PEEK) - Apresenta temperatura de transição vítrea, (T_g), próxima dos 143 °C e, relativamente às resinas epóxicas, apresenta maior tenacidade e menor absorção de água [2].

Poliimidas termoplásticas - Apresentam elevada resistência mecânica, rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional e boas propriedades eléctricas. São também retardadoras de chama e resistem bem a agentes químicos [2].

Polisulfureto de fenileno (PPS) - Apresenta elevada resistência mecânica, excelente resistência química e pode ser usado até uma temperatura máxima de 225 °C [2].

1.3 - Compósitos Sanduíche

1.3.1 - Introdução

Os compósitos sanduíche consistem numa estrutura composta por três camadas, sendo duas delas constituídas por lâminas finas de um material denso, rígido e resistente, as quais são separadas por uma camada de baixa densidade com menor rigidez e resistência do que as lâminas. A figura 1.4 ilustra uma constituição típica de um painel sanduíche, todavia, as diferentes tipologias e formas estruturais podem ser obtidas através da combinação das diferentes formas do material do núcleo [16].

Podemos dizer que estas estruturas sanduíche surgiram pela primeira vez em 1820, pelas mãos de Delau [17], mas a sua patente data de 1924 e foi concedida a Von Kármán e Stock. Em 1938 foi apresentado em Paris, no “Salon d’Aeronautique”, um monoplane com as asas em estrutura sanduíche. Todavia, a notoriedade a nível mundial dos painéis sanduíche deu-se com a aeronave “Mosquito” (figura 1.5), através da introdução de lâminas de madeira folheada com um núcleo em madeira de balsa como consequência da escassez de outros materiais em Inglaterra durante a II guerra [17, 18]. Posteriormente surgiram os favos de mel como material para os núcleos destas estruturas mas, devido ao seu elevado custo, com aplicação direccionada para a indústria aeroespacial. Nos anos 1950 estas estruturas estenderam-se à indústria naval (figura 1.4) e assumiram definitivamente grande importância no sector naval e aeroespacial como resultado da sua leveza e durabilidade [17]. Os finais dos anos 1950 e inícios de 1960 ficaram caracterizados pelo aparecimento de diferentes plásticos celulares mas foi nos anos de 1960 que surgiram os núcleos de espumas. Deste modo permitia-se obter maiores relações de rigidez, torção e resistência específica. Estavam então criadas

as condições para outros campos de aplicações, com especial enfoque o sector da construção, automóvel, etc.

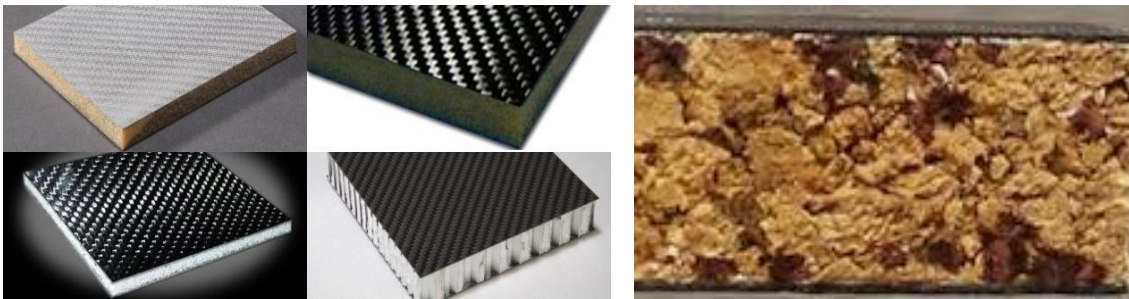
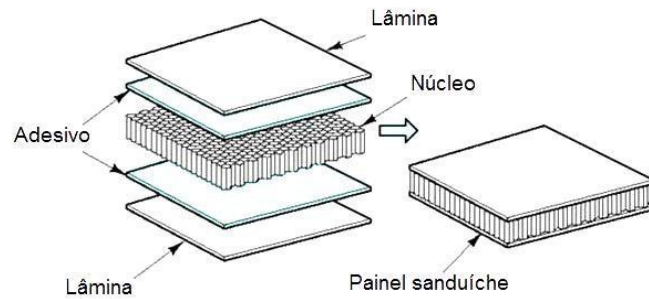


Figura 1.4 - Constituição típica de um painel sanduíche.



a)



b)

Figura 1.5 - Aplicações de painéis sanduíche: a) Mosquito TT35 TA639, b) Estrutura de um barco.

Se a grande quantidade de materiais que se podem utilizar numa estrutura sanduíche constitui uma vantagem ela é, ao mesmo tempo, uma grande desvantagem. Na verdade podemos tirar vantagens da sua elevada resistência e rigidez específica, bom comportamento à flexão, baixo peso, boa resistência ao impacto e bom isolamento térmico e acústico. Por outro lado, surgem problemas ao combinar materiais com diferentes propriedades (por exemplo: temperatura, problemas de fadiga, incompatibilidade de materiais, etc.). Neste contexto, os projectistas adoptam critérios muito conservadores conduzindo a um aumento do

peso da estrutura. Por último, a difícil reciclagem destas estruturas no fim de vida, ou os desperdícios que surgem durante o processo de manufactura, conduzem a problemas ambientais. A título de síntese, a tabela 1.3 apresenta as principais vantagens e desvantagens das estruturas sanduíche.

Tabela 1.3 - Principais vantagens e desvantagens das estruturas sanduíche [19].

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência específica	Perigoso para a saúde durante a construção
Alta rigidez específica	Fracas possibilidades de reciclagem e de Reparação (compósitos)
Baixo peso	Falta de informação dos engenheiros
Isolamento térmico e acústico	Problemas de temperatura/resistência ao fogo
Capacidade de resistência à corrosão	Mudança de mentalidades
Facilidade de construção de formas completas	Controlo de qualidade
Capacidade de absorção de energia	Variedade de critérios de rotura
Poucas peças estruturais necessárias	Incompatibilidade de materiais
Múltiplas possibilidades de escolha de materiais	

1.3.2 - Materiais utilizados nos painéis sanduíche

A selecção dos materiais a utilizar nas estruturas sanduíche depende muito das especificações do projecto e revela-se uma tarefa bastante difícil. De um modo geral deve-se combinar diferentes materiais, para o núcleo e lâminas, de modo a evidenciar as suas propriedades positivas e, ao mesmo tempo, eliminar as suas propriedades negativas.

1.3.2.1 - Materiais utilizados nas lâminas dos painéis sanduíche

As lâminas ao absorver os esforços de flexão da estrutura acabam por trabalhar à compressão e à tração, enquanto o núcleo suporta os esforços de corte e torção para evitar o deslizamento das lâminas. Deste modo, as lâminas devem apresentar uma elevada resistência, resistência ao impacto, resistência à corrosão e ao desgaste [20]. Para cumprir estas especificidades é típico o recurso a materiais metálicos (onde predomina o aço, o aço

inoxidável, as ligas de alumínio e cobre) e não metálicos (madeira e seus derivados, materiais compósitos reforçados com fibras, o amianto de cimento e o cartão impregnado em resina) [18]. A tabela 1.4 enuncia, por exemplo, algumas vantagens e desvantagens das lâminas metálicas face às não metálicas.

Tabela 1.4 - Vantagens/desvantagens das lâminas metálicas [21].

Vantagens	Desvantagens
Elevado desempenho ao nível de rigidez e resistência	Elevada densidade
Baixo custo	Problemas de fabrico em presença de geometrias complexas
Bom acabamento	Corrosão
Boa resistência a impacto	

1.3.2.2 - Materiais utilizados nos núcleos

De acordo com Almeida [16], os núcleos dos painéis sanduíche podem apresentar diferentes configurações: núcleos homogêneos e núcleos não homogêneos ou estruturados (núcleos canelados, núcleos de favos de mel e os painéis em que as lâminas são suportadas apenas por elementos pontuais), conforme ilustra a figura 1.6. Outra divisão apresentada por Soares [21] dá a existência de três grupos: em ninho de abelha, sólida e treliça.

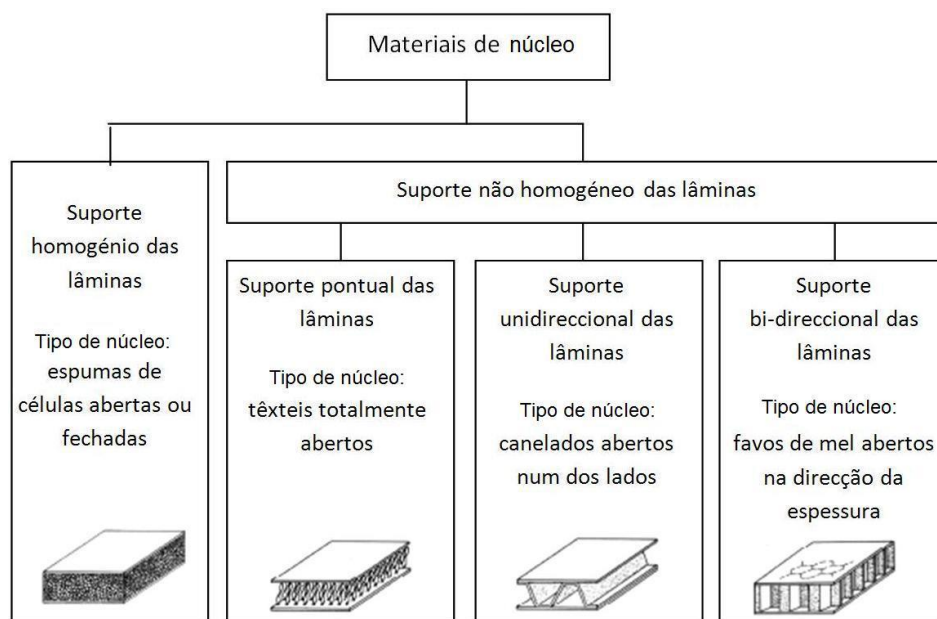


Figura 1.6 - Diferentes configurações dos núcleos utilizados nos painéis sanduíche.

No caso dos núcleos homogêneos (sólidos), estes podem ser constituídos por espumas, lãs, diferentes tipos de plásticos expandidos ou madeira de balsa [18]. Seguidamente faz-se uma breve descrição dos materiais mais típicos, os quais caracterizam-se por uma baixa densidade, alguma rigidez e resistência ao corte (rigidez no sentido perpendicular às faces), isolamento térmico e acústico [18, 21].

Espumas - Os materiais mais utilizadas são o poliuretano, o PVC, a resina fenólica (PF) e o poliestireno expandido (EPS) ou o extrudido (XPS) [16, 19]. As espumas são sensíveis à temperatura, evidenciando um comportamento flexível e viscoelástico para as altas temperaturas e tornando-se quebradiças, rígidas e resistentes para as temperaturas mais baixas. As suas propriedades mecânicas dependem da densidade da espuma, variando também com a temperatura e com a humidade. Uma das grandes desvantagens das espumas é o seu comportamento ao fogo, uma vez que se tornam combustíveis em virtude da sua base orgânica [16]. A tabela 1.5 sintetiza algumas propriedades das espumas mais utilizadas.

Tabela 1.5 - Algumas propriedades das espumas mais utilizadas [16].

Propriedade	Poliuretano	Poliestireno expandido	Poliestireno extrudido	Espuma fenólica
Densidade [kg/m ³]	35-59	15-20	30-50	NE
Condutividade térmica [W/m°C]	0.022-0.320	0.033-0.039	0.025-0.036	NE
Estabilidade dimensional [°C]	100		80	130
Temperatura de ignição [°C]	300		Pouco mais que 300	530-580
Temperatura de decomposição [°C]	150-200		300	350-500

NE - Não encontrado

Materiais inorgânicos - Os núcleos de materiais inorgânicos mais usuais são constituídos por fibras (de lã mineral, rocha e vidro) ligadas através de aglutinadores orgânicos ou inorgânicos [16]. A principal vantagem destes materiais é a sua elevada resistência ao fogo.

Madeira de balsa - Existe principalmente na América Central com especial incidência nas florestas tropicais. É a madeira mais leve, apresentando uma densidade, quando seca, entre os 100-200 kg/m³.

No caso dos núcleos estruturados, os núcleos canelados ou em ninho de abelha são os mais comuns. No primeiro caso, podem apresentar-se de diversas formas, mas caracterizam-se essencialmente por serem células abertas na direcção das lâminas. Por sua vez, os ninhos

de abelha são constituídos por células abertas na direção transversal às lâminas, proporcionando um suporte bidirecional das mesmas. As suas boas propriedades mecânicas e a sua densidade reduzida conferem a este tipo de núcleos um bom desempenho por unidade de peso [16]. Os materiais mais típicos são: metais (alumínio e aço inoxidável), compósitos (com fibras de aramida, carbono e vidro), plásticos (polipropileno e policarbonato), cerâmicos ou até mesmo cartão.

1.4 - Impacto em Compósitos Sanduíche

Em questões de projecto deve garantir-se que qualquer componente e/ou estrutura desempenhe as funções para a qual foi concebida sem ocorrer falha em serviço. Para tal, revela-se necessário um dimensionamento que tome em consideração todos os modos de ruína. O conhecimento do tipo de cargas aplicadas revela-se, neste caso, de extrema importância. Se a nossa atenção recai de imediato nas cargas estáticas e nas solicitações dinâmicas, não devemos menosprezar também o efeito das cargas de impacto, onde a força é exercida num curto espaço de tempo.

Verifica-se que a velocidade de impacto e o tempo de atuação da carga se encontram estritamente relacionados. Alguns autores defendem que as solicitações de impacto dividem-se em impacto de baixa velocidade e impacto de alta velocidade [22, 23]. Estes dois fenómenos diferem em termos do comportamento do material e do dano que provocam.

Impacto de baixa velocidade é definido por Hogg *et al* [22] quando se situa entre 1 a 10 m/s. Por outro lado, impactos superiores a 100 m/s são classificados como testes balísticos e para uma velocidade superior a 1000 m/s são denominados de impactos a hiper-velocidade. Zukas *et al* [24] defendem que o impacto de baixa velocidade ocorre para velocidades menores que 250 m/s. Na gama dos 0.5 aos 2 km/s o impacto é de alta velocidade, enquanto que para velocidades superiores a 2 km/s já é a hiper-velocidade. Finalmente para velocidades superiores a 12 Km/h a propagação da energia ocorre a uma taxa tão elevada que ocorre vaporização dos materiais no instante da colisão. Ruiz e Harding [25] consideram que existem impactos para velocidades da ordem dos 300 m/s (onde o impactor penetra/perfura a superfície de embate com danos confinados a uma pequena área), impactos para velocidades no intervalo dos 50 a 300 m/s (onde as ondas de tensão têm origem no ponto de impacto mas de imediato transmitem a carga à restante estrutura) e finalmente para velocidades abaixo dos 50 m/s (onde ocorrem múltiplas reflexões nas fronteiras da estrutura até se atingir o equilíbrio quasi-estático). Uma classificação com base nas deformações foi proposta por Olsson [26], enquanto Swanson [27] considera as ondas de tensão originadas na estrutura como a principal forma de classificar o impacto.

No caso das estruturas em sanduíche existem diferentes modos de falha, conforme ilustra a figura 1.7.

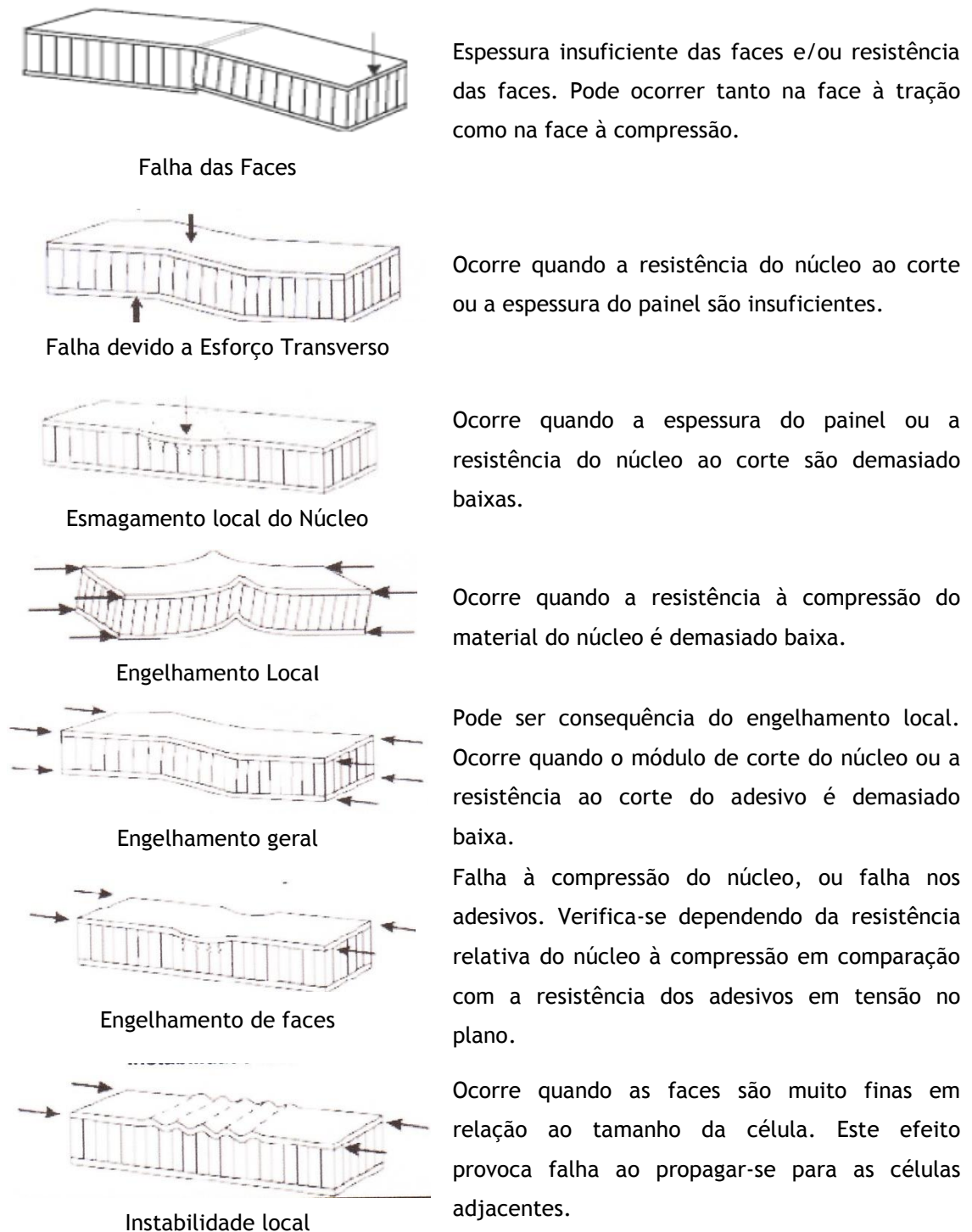


Figura 1.7 - Modos de falhas em estruturas sanduíche [21, 28].

Na verdade os painéis sanduíche apresentam danos bem mais complexos do que os ocorridos nas estruturas convencionais laminadas. No caso dos compósitos sanduíche, os danos ocorridos nas lâminas dão-se ao nível de fendas na matriz, fractura ou encurvadura da fibra e delaminações [29]. Além destes danos típicos, outros modos adicionais podem ocorrer como o esmagamento do núcleo e o descolamento das lâminas. Muitas vezes, os danos não podem ser caracterizados como sendo uniformes ao longo da espessura. Por outro lado, defeitos de fabrico ou defeitos induzidos em serviço por cargas acidentais também resultam num estado de dano assimétrico, originando uma redistribuição das tensões.

As cargas de impacto, em particular, induzem danos localizados nas lâminas, no núcleo ou na interface núcleo/lâmina. A sua severidade depende de uma multiplicidade de factores, tais como: lay-up das lâminas e sua espessura, material do núcleo e sua espessura, propriedades da interface lâmina/núcleo, técnicas de fabrico, velocidade de impacto e energia, geometria do impactor, temperatura, condições de fronteira e factores ambientais. O limiar de iniciação dos danos, bem como o seu tamanho, depende das propriedades do material do núcleo e a sua relação com as propriedades das lâminas. A sua avaliação pode ser efectuada através de diferentes técnicas: inspeção ultra-sons, raios-X, micrografia, termografia, shearografia e “deply technique” [30, 31].

No caso particular dos impactos de baixa velocidade em sanduíches com lâminas de carbono/epóxi e núcleos em favo de mel, o dano é tipicamente confinado à lâmina do topo (impactada), à interface da lâmina superior com o núcleo e ao núcleo. A lâmina inferior geralmente não apresenta qualquer dano. O dano é basicamente composto por cinco modos de falha: encurvadura do núcleo, delaminação na lâmina impactada, fendas no núcleo, fendas na matriz e rotura de fibras na lâmina [32]. O dano na lâmina impactada consiste principalmente em fissuras na matriz e algumas fibras partidas, de forma semelhante ao que ocorre nos laminados [33]. De acordo com a literatura os danos ao nível das lâminas impactadas aumentam quase linearmente com a energia de impacto até atingirem um valor máximo [32]. Atingida a saturação, os danos tornam-se visíveis e a delaminação núcleo/lâmina permanece constante [32]. Em termos de núcleo, e em particular para o caso dos favos de mel, o dano dá-se por esmagamento ou deformação das paredes das células em torno da região de impacto. Em caso de núcleos com paredes celulares mais espessas a falha geralmente ocorre pela fractura da parede celular. No caso dos núcleos de espuma, a interface núcleo/lâmina impactada pode descolar-se na região em torno do impacto e o núcleo apresentará uma deformação permanente. Bernard e Lagace [34] observaram, por exemplo, que a descolagem interfacial varia em função do tipo de material do núcleo. A resistência residual à compressão após impacto aumenta quando os núcleos promovem um maior apoio às lâminas, embora as áreas delaminadas sejam maiores. Por exemplo, de acordo com Rhodes [35], a resistência residual de sanduíches de grafite/epóxi e kevlar/epóxi é

bastante afetada quando a estrutura é previamente impactada com níveis de energia bem abaixo daqueles que produzem danos visíveis.

Mines *et al* [36] examinaram o comportamento estático e ao impacto de compósitos sanduíche e identificaram basicamente quatro modos de falha: falha à compressão da lâmina superior seguida pelo esmagamento ou rotura por corte do núcleo, falha por esmagamento da lâmina superior, falha ao corte do núcleo e falha da lâmina inferior devido às cargas de tração. De acordo com estes autores, as sanduíches com lâminas em fibras de carbono ou fibras de vidro exibem o modo I de falha (a resistência à compressão foi menor do que a resistência à tração), enquanto as sanduíches com lâminas em tecidos de aramida exibiram falhas em modo II como resultado da baixa resistência à compressão das fibras de aramida. Por outro lado, o aumento da espessura das lâminas não melhora necessariamente a resistência ao impacto de uma estrutura sanduíche, mas o aumento da resistência ao esmagamento do material do núcleo geralmente melhora a resistência ao impacto [32].

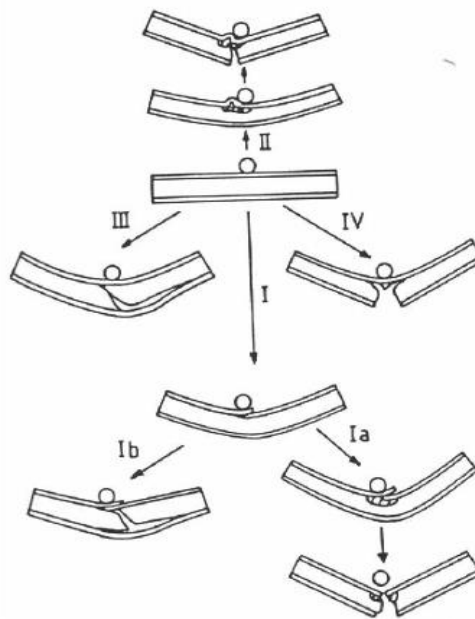


Figura 1.8 - Modos de falha em estruturas sanduíche de acordo com Mines *et al* [38].

Verifica-se que a resposta ao impacto de compósitos sanduíche é fundamentalmente dominada pelo material do núcleo. Neste caso, as leis de contacto que definem a relação força de contacto versus indentação durante o impacto são bastante diferentes das observadas para os compósitos laminados [32]. Aqui, a indentação é definida como o deslocamento relativo entre o indentador e alvo [32].

Durante o impacto o alvo sofre uma deformação generalizada bem como uma deformação localizada na vizinhança do ponto de impacto. A teoria clássica das vigas, assim como a teoria das placas e cascas, não considera geralmente a deformação local junto do ponto de impacto. Neste caso, a deformação localizada de um painel sanduíche pode ser estimada a partir da análise numérica, em larga escala, considerando um problema de contacto dinâmico [37] ou através da introdução de uma lei de contacto que toma em conta o efeito de deformação inelástica e o dano induzido na zona de impacto. Assim a lei de contacto é tipicamente uma função não-linear, exibindo diferentes características durante o carregamento/descarregamento e, geralmente, requer a validação experimental [32].

Sun e Wu [38] apresentaram resultados experimentais para impactos a baixa velocidade em painéis sanduíche (com lâminas de AS4/3501-6 grafite/epóxi e núcleos de favo de mel em alumínio ou espuma Rohacell) com impactores cilíndricos e esféricos. Expressões bilineares e linear-quadráticas foram introduzidas para descrever a componente de carregamento da lei de contacto tendo em conta os núcleos em favo de mel e de espuma, respetivamente. Por sua vez, leis de potência foram introduzidas para caracterizar a componente de descarga da lei de contacto. Em ambos os casos as leis assumidas ajustaram-se bastante bem aos resultados experimentais. Segundo Abrate [32] o comportamento mecânico do material do núcleo deve estar bem caracterizado de modo a estimar a extensão dos danos. Hiel *et al* [39] notaram que os danos no núcleo de espuma de compósitos podem ser, por vezes, limitados a uma pequena região semi-hemisférica junto da lâmina superior. Neste caso torna-se necessário o recurso a um critério de falha tridimensional de modo a avaliar, para um dado impacto, a probabilidade de falha da espuma.

Todas estas abordagens analíticas assumem que os danos promovidos pelas cargas de impacto restringem-se essencialmente ao material do núcleo e à lâmina superior. Em caso de maiores danos, envolvendo ambas as lâminas e/ou penetração de projecteis, as técnicas mencionadas anteriormente deixam de ser válidas ou exigem alterações significativas. No entanto, estes eventos promovem um orifício ao longo da espessura com menores danos nas suas imediações.

Do ponto de vista da resistência residual, Hiel *et al* [39] mostraram que, para uma determinada gama de tamanho dos danos, os modos de falha e a resistência residual dos compósitos sanduíche foram análogos aos de um painel contendo um furo circular penetrante de igual tamanho. Deste modo, a resistência residual da lâmina superior pode ser estimada através dos métodos disponíveis para a previsão da resistência residual de compósitos que contenham furos penetrantes. Saczalski *et al* [40], com base num elevado número de testes experimentais, obtiveram polinómios estatisticamente fiáveis para a resistência residual, profundidade da indentação e a área danificada em função da configuração dos laminados sanduíche (espessura do núcleo, espessura das lâminas) e energia de impacto. De acordo com McGowan e Ambur [41], a profundidade da indentação não deve ser o único parâmetro

utilizado na medida de extensão do dano, pois não conduz a resultados suficientemente fiáveis e realistas. Kassapoglou [42] desenvolveu um modelo para compósitos sanduíche com delaminações elípticas, o qual prevê a sua falha quando a tensão na extremidade da delaminação atinge um valor limite baseado no critério de falha de von Mises. Este modelo também define o tamanho limite da delaminação para que a falha da sanduíche em compressão mude de encurvadura global para encurvadura local da delaminação. O mesmo autor verificou também que a complexidade geométrica, fendas na matriz, indentação e delaminações resultantes do impacto também podem ser incluídos nos modelos usando uma única delaminação elíptica equivalente [43]. Por outro lado, os métodos simplificados para prever a falha por compressão desenvolvidos por Kassapoglou podem ser limitados na sua aplicação devido à dependência que mostraram ter com o material e geometria dos laminados sanduíche [44]. Minguet [39] apresentou uma abordagem diferente para a modelação da resistência residual de estruturas sanduíche danificadas. Este autor usou a profundidade da indentação como parâmetro avaliador da carga de encurvadura do painel danificado. O núcleo é modelado como um material geralmente ortotrópico, onde a relação tensão-deformação é linear até a tensão provocar o esmagamento do núcleo. Uma vez esmagado o núcleo, este suporta uma tensão constante inferior à de esmagamento. O modelo, para estabelecer o dano inicial após impacto, considera a indentação da lâmina e os danos no núcleo mas negligência os efeitos das delaminações e as fendas na matriz.

Capítulo 2

Material, Equipamento e Procedimento Experimental

Este capítulo aborda o fabrico dos materiais estudados no presente trabalho, o equipamento utilizado e todo o procedimento experimental que esteve na base dos ensaios realizados.

2.1 - Introdução

O objectivo deste estudo visa melhorar a compreensão do comportamento ao impacto de painéis sanduíche com núcleo de cortiça. Com vista a atingir este objectivo, foi realizado um vasto trabalho experimental. Nos pontos seguintes é feita uma descrição sumária dos materiais, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais.

2.2 - Manufatura dos Laminados

Com o intuito de comparar o comportamento ao impacto, foram fabricados laminados de fibra de vidro e painéis sanduíche com resina epóxi SR 1500 e um endurecedor SD 2503, ambos fornecidos pela Sicomin.

Os laminados foram construídos com 8 camadas de tecido de vidro, 3366-685 (120 g/m² Plain), impregnadas manualmente uma a uma de modo a promover uma distribuição uniforme da matriz no tecido. Seguidamente este conjunto era colocado num saco, selado a quente, e sujeito a vácuo durante 10 horas numa prensa hidráulica à pressão de 2.5 bar. Ainda à temperatura ambiente e à mesma pressão a placa mantinha-se mais 14 horas na prensa. Finalmente as placas foram introduzidas numa estufa à temperatura de 40±2 °C durante 24 horas.

Por sua vez, os painéis sanduíche foram manufacturados com o mesmo procedimento, sendo as lâminas (superior e inferior) constituídas por quatro camadas de tecido de vidro 3366-685 e o núcleo por uma placa de cortiça com 2 mm de espessura. A placa do núcleo foi coberta com resina sendo, seguidamente, impregnadas as várias camadas do tecido de vidro manualmente. Para melhorar a aderência entre as lâminas e o núcleo, as placas de cortiça foram previamente secas numa estufa (Heraus, modelo UT 6060) durante 2 horas a 80 °C. A figura 2.1 ilustra alguns passos do processo de fabrico dos painéis sanduíche.

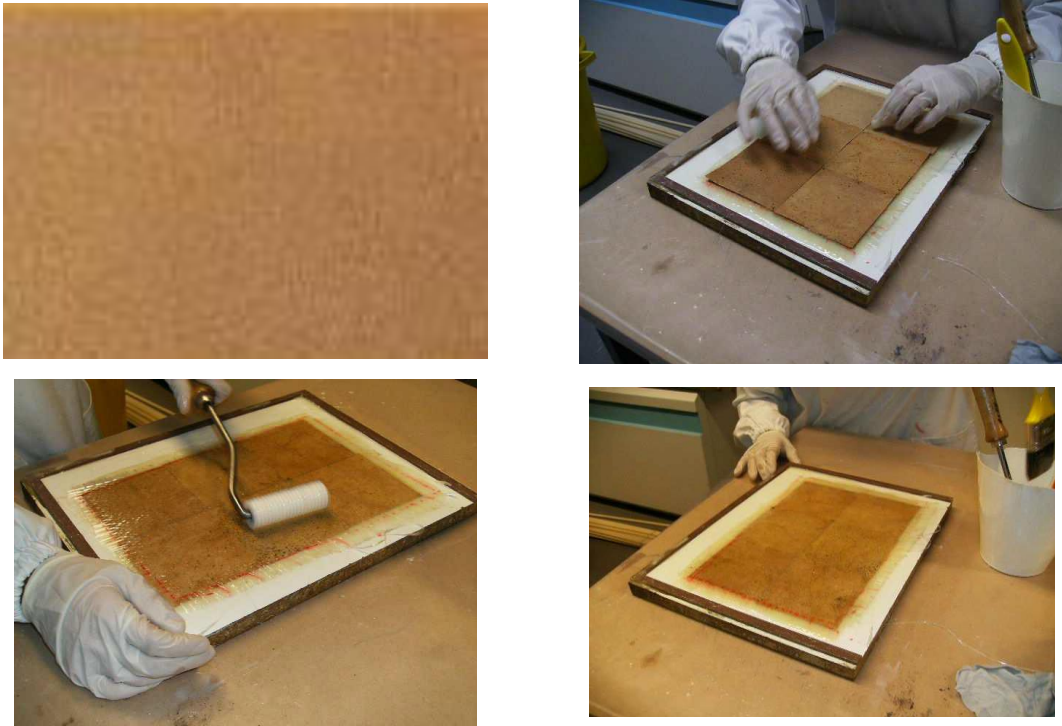


Figura 2.1 - Preparação dos painéis sanduiche.

2.3 - Provetes

Os provetes foram obtidos a partir dos laminados descritos anteriormente. A geometria, ilustrada na figura 2.2, foi obtida com recurso a uma serra eléctrica havendo, no entanto, um cuidado especial com a velocidade de avanço. De modo a evitar o aquecimento, e consequentes alterações das propriedades mecânicas, foi utilizado ar comprimido seco.

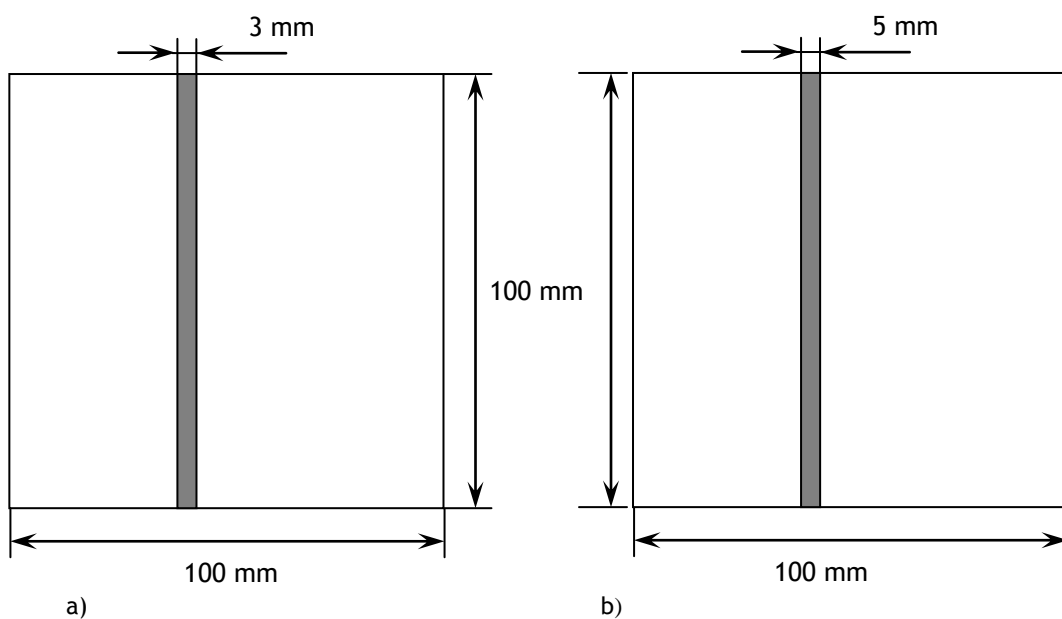


Figura 2.2 - Dimensões dos provetes usados nos ensaios de impacto: a) sem cortiça; b) com cortiça.

2.4 - Equipamento

Os ensaios foram realizados numa máquina de impacto da marca IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 3.3. O seu funcionamento baseia-se na queda livre de um impactor, o qual se encontra instrumentado com uma célula de carga piezoelétrica permitindo, deste modo, que o sistema de aquisição de dados possa recolher até 32000 pontos por segundo.

Esta máquina é constituída por uma torre com duas colunas-guia onde se desloca, com recurso a rolamentos, um carro que suporta o impactor. Este pode, assim, ser elevado até uma dada altura e, de seguida, solto na direcção vertical com reduzido atrito nas colunas-guia. A massa do conjunto pode ainda ser alterada pela adição de pesos até um total de 30 kg. A máquina está equipada também com um dispositivo de prevenção de segundo impacto.

A energia de impacto é completamente fornecida pela gravidade e controlada pelo ajustamento da altura de queda, até um máximo de 2.5 metros. A velocidade é medida no início do contacto e a força pela célula de carga. A dupla integração da curva de carga em função do tempo fornece a variação da deflexão com a carga:



Figura 2.3 - Máquina de impacto IMATEK-IM10.

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1)$$

onde $F(t)$ é a força lida pela célula de carga, m é a massa do impactor e d^2x/dt^2 é a aceleração. A partir desta equação pode então calcular-se a velocidade pela seguinte expressão matemática:

$$V(t) = -\frac{1}{m} \int F(t) dt + C_0 \quad (2.2)$$

onde $V(t)$ é a velocidade da célula de carga e C_0 é a constante de integração e V_0 é a velocidade inicial, ou seja, as condições iniciais de fronteira, onde $C_0 = V_0$, para $t = 0$. Da equação 3.2 podemos finalmente calcular a deflexão, usando a seguinte expressão:

$$X(t) = \left(-\frac{1}{m} \iint F(t) dt dt \right) + V_0 t \quad (2.3)$$

onde $X(t)$ é a deflexão em função do tempo. Estas integrações numéricas são realizadas automaticamente pelo “software” Impact Versão 1.3, o qual permite ainda o armazenamento de dados como a aceleração, o deslocamento, a energia, a força, o tempo e a velocidade.

2.5 - Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados na máquina de impacto IMATEK, modelo IM10, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma EN ISO 6603-2. Para cada condição de ensaio foram ensaiados 3 provetes, com as geometrias descritas em 2.2, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

Os ensaios foram realizados com um impactor hemisférico de diâmetro 12 mm, uma massa total de queda de 2,925 kg e os provetes encontravam-se encastrados. Foram utilizados os níveis de energia de 16 J, 20 J, 24 J, 28 J, 32 J, 36 J, 40 J, 44 J, 48 J, 50 J e 54 J visando comparar a taxa de recuperação elástica e o respetivo número de impactos até ocorrer a penetração total do impactor nos vários materiais estudados.

Capítulo 3

Análise e Discussão de Resultados

3.1 - Introdução

É reconhecido o facto das propriedades mecânicas dos materiais compósitos serem significativamente afectadas pelos defeitos originados durante o processo de fabrico ou pelas cargas de impacto que surgem ao longo da sua vida operacional e/ou durante os actos de manutenção. Apesar destes danos não serem na maioria das vezes visíveis, eles promovem uma diminuição significativa na resistência residual dos laminados.

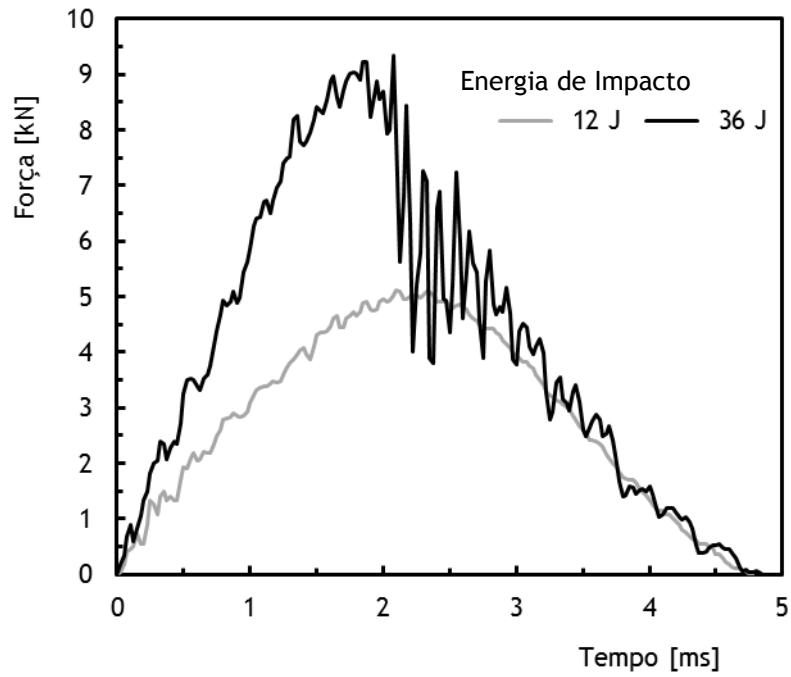
Por outro lado, os compósitos sanduíche ao permitirem elevadas relações de rigidez, torção e resistência específica reúnem condições para uma vasta aplicação nos mais variados campos da engenharia. Neste contexto, o presente capítulo discute a melhoria da resistência ao impacto de um compósito sanduíche, com núcleo de cortiça, relativamente aos laminados simples produzidos com o mesmo material e configuração do utilizado nas lâminas da sanduíche.

3.2 - Apresentação e Discussão de Resultados

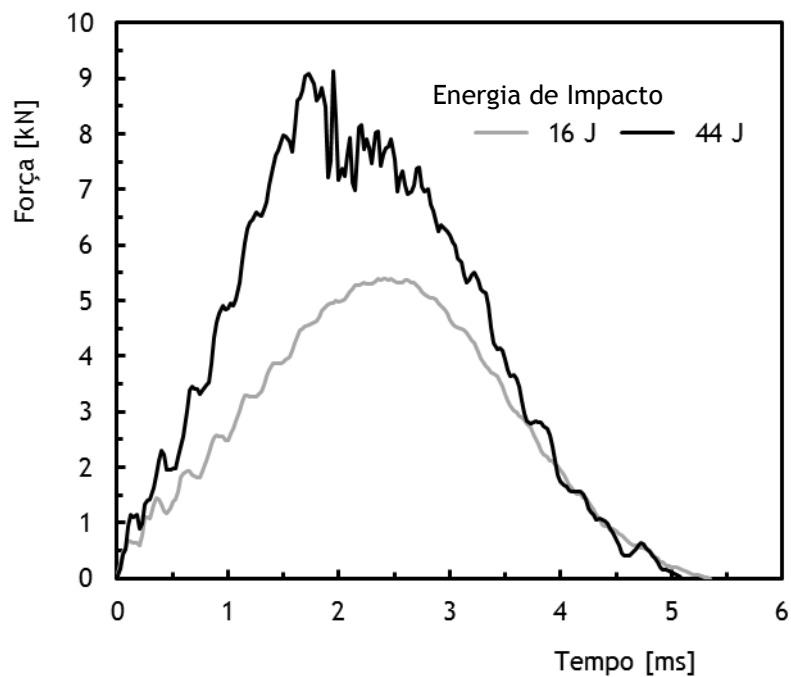
Inicialmente será abordado o benefício da introdução de um núcleo de cortiça, entre lâminas de fibra de vidro e resina epóxi, relativamente a laminados do mesmo material e configuração (fibra de vidro/resina epóxi) através da análise das curvas força/tempo, força/deslocamento e energia/tempo para vários níveis de energia. Os ensaios de impacto decorreram segundo o procedimento experimental descrito no capítulo anterior e os resultados encontram-se expressos ao nível das curvas médias.

Numa primeira análise pode observar-se que o traçado das curvas apresenta um andamento semelhante ao observado na bibliografia [46-51]. As curvas manifestam algumas oscilações que, segundo Schoeppner e Abrate [52], são devidas à resposta da onda elástica que se cria e às próprias vibrações dos provetes. Estas, por sua vez, dependem da rigidez bem como da massa do provete e do impactor e que, de acordo com Belingardi e Vadori [53], são excitadas pela rápida variação das grandezas cinemáticas no instante da colisão.

Uma análise detalhada da figura 3.1 revela que, nos ensaios realizados em laminados com energias de impacto até 28 J e nas sanduíches com energias de impacto até 32 J, a força cresce até um determinado valor máximo, $F_{m\acute{a}x}$, a partir do qual volta a diminuir até atingir novamente o zero. Neste instante o impactor deixou de ter contacto com a placa.



a)



b)

Figura 3.1 - Curvas força-tempo para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.

Por sua vez, no que diz respeito às curvas obtidas nos ensaios com laminados para energias superiores a 32 J e no caso das sanduíches para valores superiores a 36 J, o comportamento descrito anteriormente mantém-se mas com a particularidade de ocorrer um patamar da força (força mais ou menos constante em torno de um valor médio) como

resultado de um maior dano [49]. Este comportamento, que difere das curvas anteriormente descritas, está relacionado com o surgimento de maiores danos apesar de ainda não se verificar perfuração [49, 51]. Pela análise das figuras, também se pode observar que o valor de $F_{\text{máx}}$ é muito dependente da energia de impacto. Alguns autores verificaram que a força máxima aumenta com a energia de impacto [49-51, 54] e esta tendência também se manifesta neste estudo, para ambos os materiais, conforme ilustra a figura 3.2.

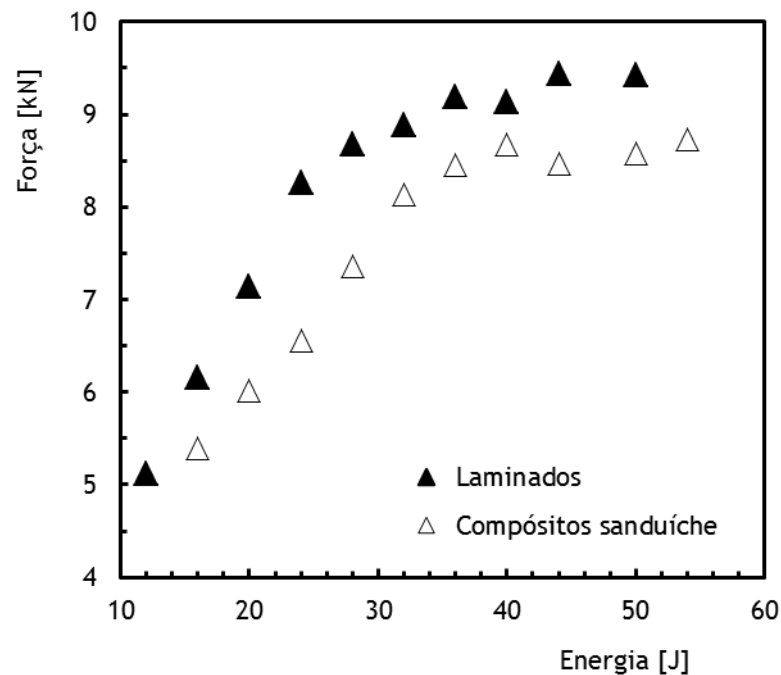


Figure 3.2 - Evolução da força máxima com a energia de impacto.

De acordo com Hosur *et al* [47] a força máxima aumenta quase linearmente com a energia de impacto, o que também aqui acontece. No caso dos laminados, e até uma energia de 28 J, os dados podem ser ajustados por regressão linear ($y = 0.2606.x + 1.9755$) com um coeficiente de correlação de 0.999 enquanto nos compósitos sanduíche, e até uma energia de 32 J, o coeficiente de correlação é de 0.997 ($y = 0.1699.x + 2.6124$). As diferenças observadas podem ser justificadas pelas diferentes propriedades, tanto à tração como ao corte, dos materiais ensaiados [48]. Outra evidência apresentada na figura 3.2 é o facto da força máxima aumentar até 36 J, em ambos os materiais, mas, após este valor, este parâmetro não mostra ser afetado significativamente pela energia. Semelhante comportamento foi observado por Reis *et al* [51] bem como Found e Howard [55] e pode ser justificado pela enorme saturação de danos existente nos corpos de prova. Finalmente esta figura também ilustra que os compósitos sanduíche apresentam, para todos os níveis de energia, menores forças máximas. Para a energia de impacto de 16 J, por exemplo, o valor de $F_{\text{máx}}$ ocorrido nos laminados é 13.9% maior que o observado nos painéis sanduíche, enquanto que esta diferença é de apenas 8% para uma energia de 36 J. O facto dos valores mais baixos da força máxima

ocorrerem nas sanduíches deve-se à introdução da cortiça, a qual apresenta boas características de amortecimento e boa tolerância ao dano promovido por cargas de impacto [56, 57]. Dentro desta gama de energias (16 e 36 J) também se observa que $F_{m\acute{a}x}$ aumenta 48.5% nos laminados de fibra de vidro/epóxi ao invés dos 55.6% observados para as sanduíches.

O tempo de contacto também foi analisado e encontra-se apresentado na figura 3.3. Verifica-se que este parâmetro aumenta com o aumento da energia de impacto e é mais elevado no caso dos painéis sanduíche. Este fenómeno é justificado mais uma vez pelas propriedades intrínsecas à cortiça [56, 57]. Todavia, para os valores mais altos de energia, ele aproxima-se do tempo de contacto observado nos laminados. Por exemplo, para uma energia de 16 J, o tempo de contacto nos painéis sanduíche é 12.8% mais elevado do que o ocorrido nos laminados mas, para energias de impacto superiores a 44 J, ambos os materiais apresentam valores muito semelhantes.

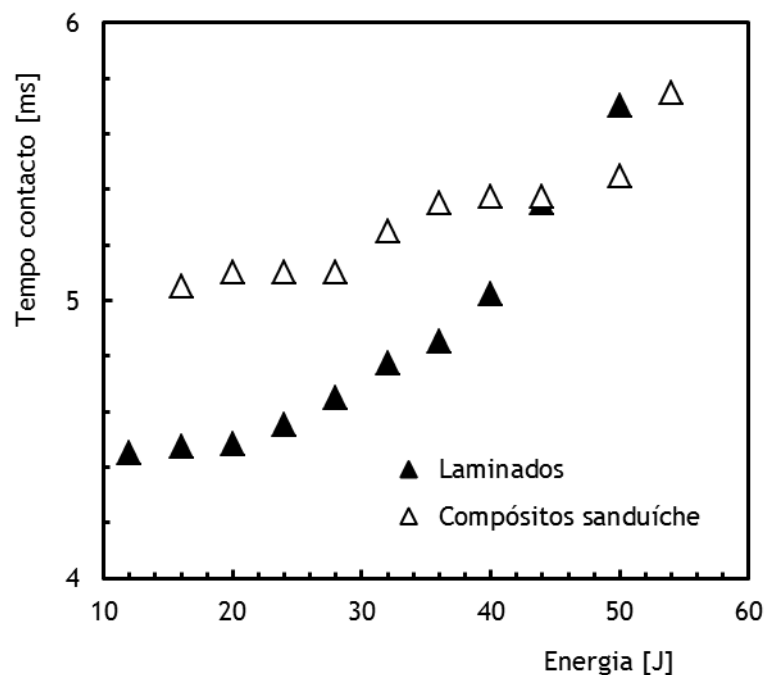
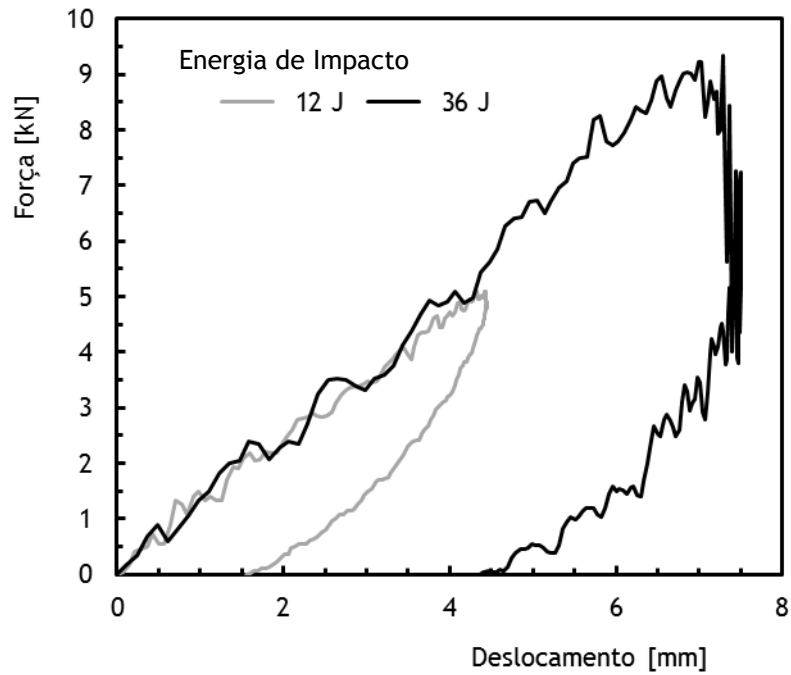
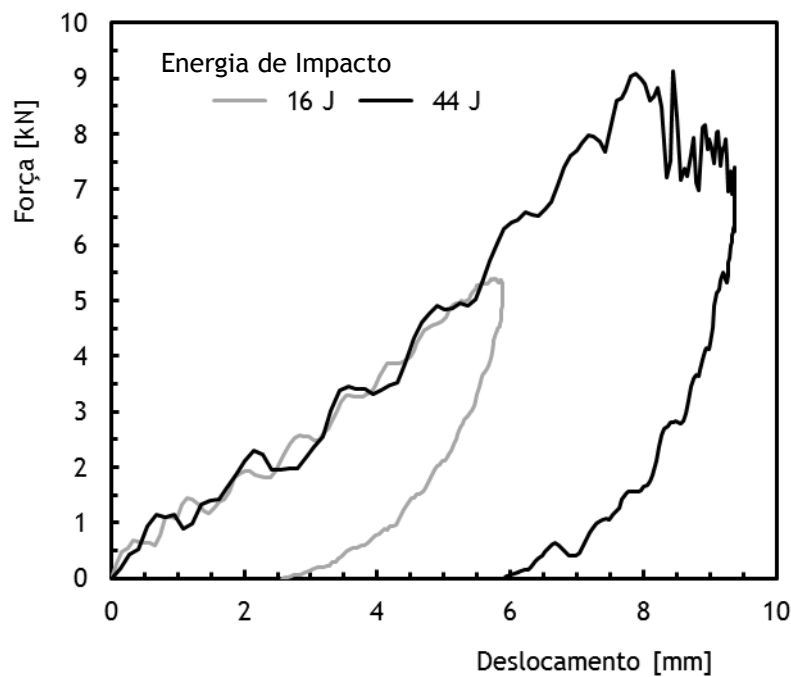


Figure 3.3 - Evolução do tempo de contacto com a energia de impacto.

A figura 3.4 ilustra o andamento das curvas força-deslocamento, para ambos os materiais, e caracteriza-se pelo crescimento simultâneo de ambos os parâmetros, até um valor máximo, seguindo-se da sua diminuição. Este decréscimo, após $F_{m\acute{a}x}$, significa que o impactor se afasta da placa. Todavia, no que diz respeito às curvas obtidas com laminados para energias superiores a 32 J e em sanduíches para valores superiores a 36 J, a força permanece mais ou menos constante e o deslocamento aumenta. Este patamar coincide com o observado no gráfico força/tempo e é resultado do maior dano ocorrido.



a)



b)

Figura 3.4 - Curvas força-deslocamento para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.

O aumento da energia de impacto promove também maiores deslocamentos bem como maiores danos. Este comportamento encontra-se ilustrado na figura 3.5, onde os painéis sanduíche apresentam sempre maior deslocamento do que o observado nos laminados, exceto para as energias de impacto mais elevadas onde o deslocamento é semelhante para ambos os materiais. Por exemplo, para uma energia de 16 J, o deslocamento nos painéis sanduíche é

17.8% mais elevado do que o ocorrido nos laminados mas, para energias de impacto superiores a 44 J, ambos os materiais apresentam valores muito semelhantes. Este fenómeno é idêntico ao observado na figura 3.3 para a evolução do tempo de contacto com a energia de impacto.

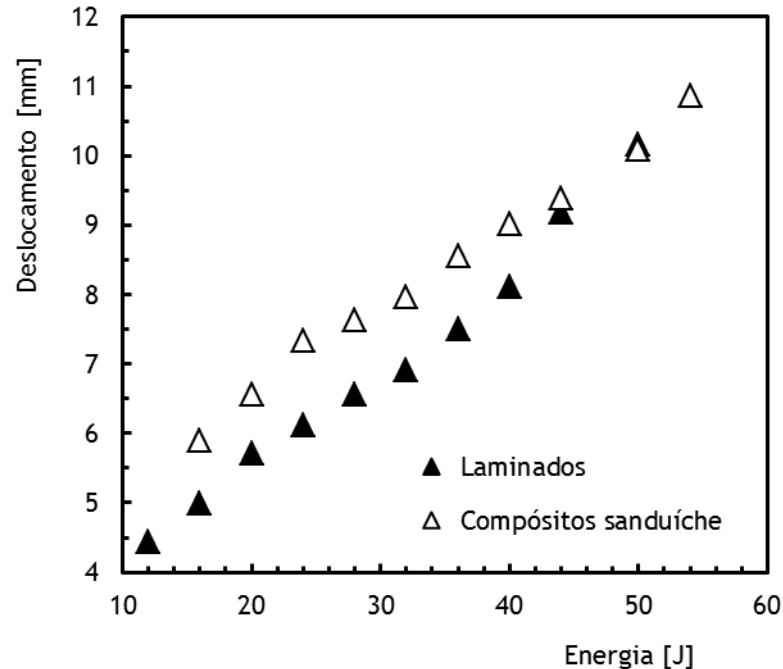
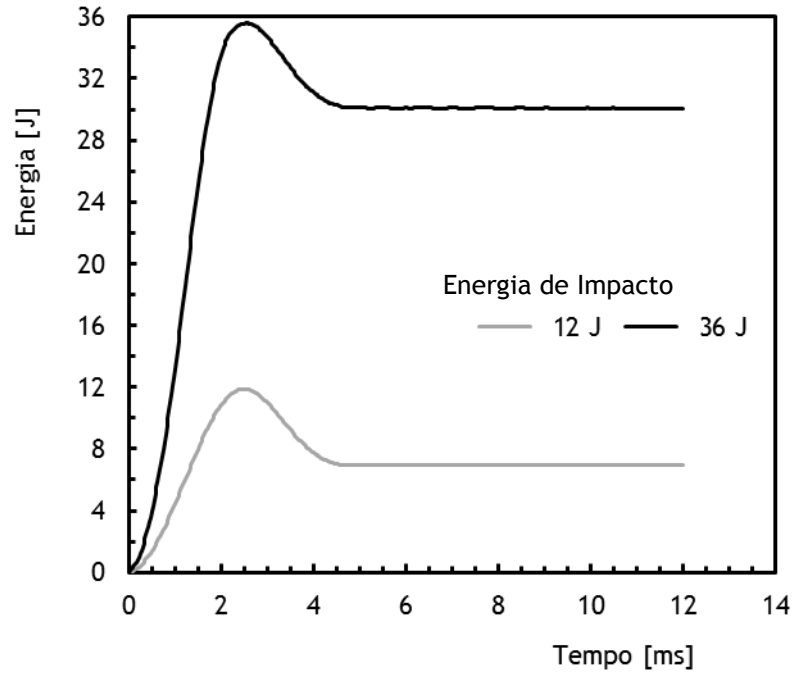


Figure 3.5 - Evolução do deslocamento com a energia de impacto.

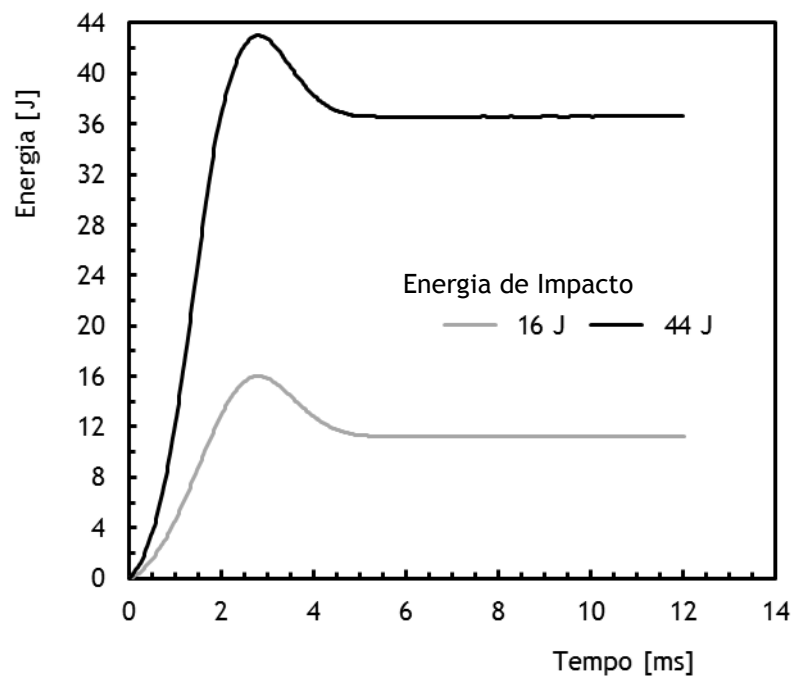
Finalmente a figura 3.6 ilustra a variação da energia com o tempo. O traçado das curvas revela-se muito semelhante e pauta-se pelo aumento da energia com o tempo até um valor máximo ficando, posteriormente, constante depois de ter decrescido uma determinada quantia. O pico representa a energia de impacto, que é a energia fornecida ao laminado, e o decréscimo corresponde à recuperação elástica depois do impacto. Se o material fosse totalmente elástico a curva voltaria novamente a zero. Neste caso, parte da energia de impacto não foi absorvida de forma elástica traduzindo-se em forma de dano.

A figura 3.7 compara a recuperação elástica, em função da energia de impacto, para cada material estudado. A energia elástica foi determinada como a diferença da energia absorvida (valor do patamar) com a energia de impacto (valor de energia no pico) [49-51]. Os valores médios representados, em termos de percentagem, mostram que o aumento da energia de impacto promove uma diminuição da energia restituída e, conseqüentemente, maiores danos em ambos os materiais. Em termos de laminados de fibra de vidro/epóxi verifica-se que a energia restituída diminui quase linearmente ($y = -1.0058.x + 54.162$), cujo polinómio foi obtido por regressão linear com um coeficiente de correlação de 0.994. Por exemplo, comparando a energia restituída entre as energias de impacto de 12 J e 50 J, ocorre uma diminuição da ordem dos 88.2%. No caso dos painéis sanduíche também se verifica uma

diminuição da ordem dos 72.6%, entre as energias de impacto de 16 J e 54 J, mas não existe qualquer linearidade neste decréscimo.



a)



b)

Figura 3.6 - Curvas energia-tempo para: a) laminados; b) compósitos sanduíche.

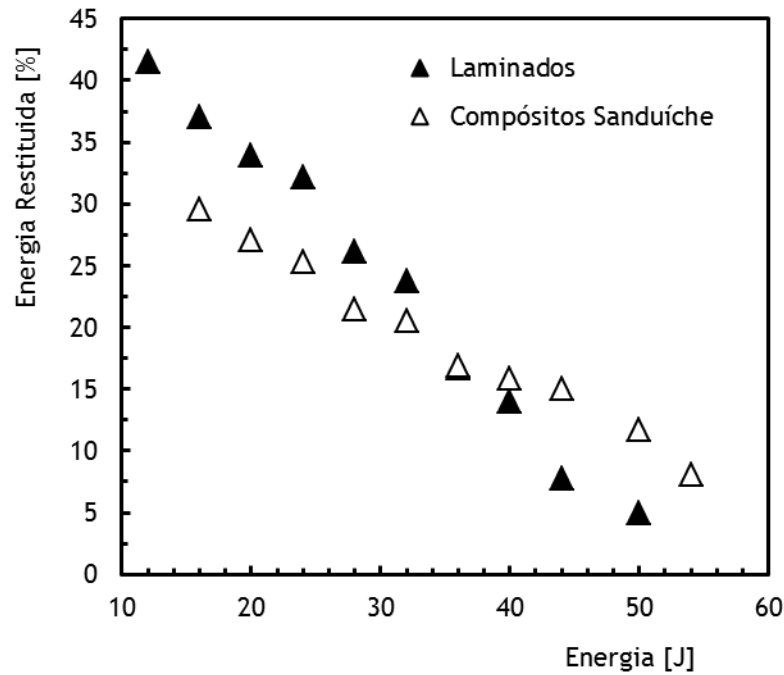


Figure 3.7 - Evolução da energia restituída com a energia de impacto.

Na verdade existe um decréscimo mas, entre as energias de impacto de 36 J e 44 J, existe uma ligeira tendência para a ocorrência de um patamar. Este fenómeno pode ser explicado através do dano ocorrido ao nível do material do núcleo. Mais detalhadamente, verifica-se que os laminados sanduíche até à energia de impacto de 28 J apresentam energias restituídas inferiores à dos laminados. Por exemplo, para a energia de impacto de 16 J esta diferença é de 20.3% enquanto para energia de 28 J é de apenas 17.2%. Seguidamente, entre as energias de 32 J e 40 J, a energia restituída é muito semelhante à observada nos laminados. Pode-se dizer mesmo que os resultados se misturam entre si. Finalmente para energias de impacto superiores a 44 J a energia restituída dos painéis sanduíche é superior à dos laminados fibra de vidro/epóxi. Como termo de comparação, a energia restituída dos laminados impactados a 44 J é muito semelhante à observada nas sanduíches impactadas a 54 J. Este comportamento encontra-se fortemente condicionado pelas propriedades intrínsecas à cortiça, onde a sua estrutura alveolar promove fortes benefícios ao nível do amortecimento e boa tolerância ao dano promovido por cargas de impacto [56, 57].

O efeito dos multi-impactos foi analisado em termos de resistência ao impacto. A figura 3.8 representa os resultados em termos de energia de impacto versus número de impactos até ocorrer falha (N) e foi adotada a mesma representação usada nos ensaios de fadiga (curvas SN). Para ambos os materiais, a falha foi considerada quando ocorreu perfuração, ou seja, quando o impactor atravessou completamente os corpos de prova.

Comparando as curvas, é possível observar que a resistência ao impacto é maior para os compósitos sanduíche do que para os laminados, contudo, este efeito é mais significativo à

medida que a energia de impacto diminui. Verifica-se mesmo que, para os níveis de energia de impacto mais elevados, a resistência ao impacto é muito semelhante para ambos os materiais. Por outro lado, para uma energia de 16 J, a resistência ao impacto dos painéis sanduíche é sensivelmente 1.9 vezes maior que a observado nos laminados fibra de vidro/epóxi.

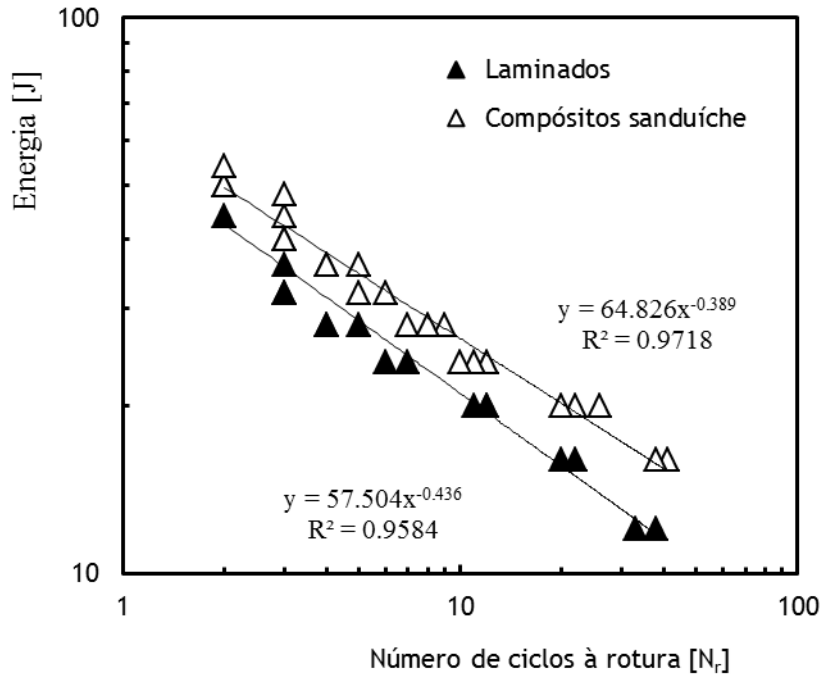


Figure 3.8 - Resistência ao impacto para os diferentes materiais.

A evolução da força máxima ao longo dos multi-impactos foi analisada para ambos os materiais e encontra-se representada na figura 3.9. Neste caso, N representa o número de impactos instantâneos e N_r o número de impacto para o qual ocorreu a falha (perfuração). Apesar da figura ilustrar o comportamento observado para as energias de impacto de 16 J, 20 J e 24 J ele revela-se representativo das restantes energias. À exceção dos ensaios onde decorreram apenas dois impactos, para os quais foram ajustados polinómios de primeira ordem por regressão linear, nos restantes verificou-se que os dados se ajustavam a um polinómio do segundo grau com coeficientes de correlação que variaram entre 0.995 e os 0.998 para os laminados e entre 0.99 e os 0.995 para os painéis sanduíche. Tal como foi observado na figura 3.2, também aqui se verifica que a evolução da força máxima é sempre superior nos laminados em relação à observada nos compósitos sanduíche. Por outro lado, comparando a força máxima entre o primeiro e o último impacto, verifica-se que esta diferença é superior nos laminados relativamente à sanduíche. Por exemplo, para a energia de 24 J, esta diferença é de 49.6% para os laminados e de 41.5% para os compósitos sanduíche.

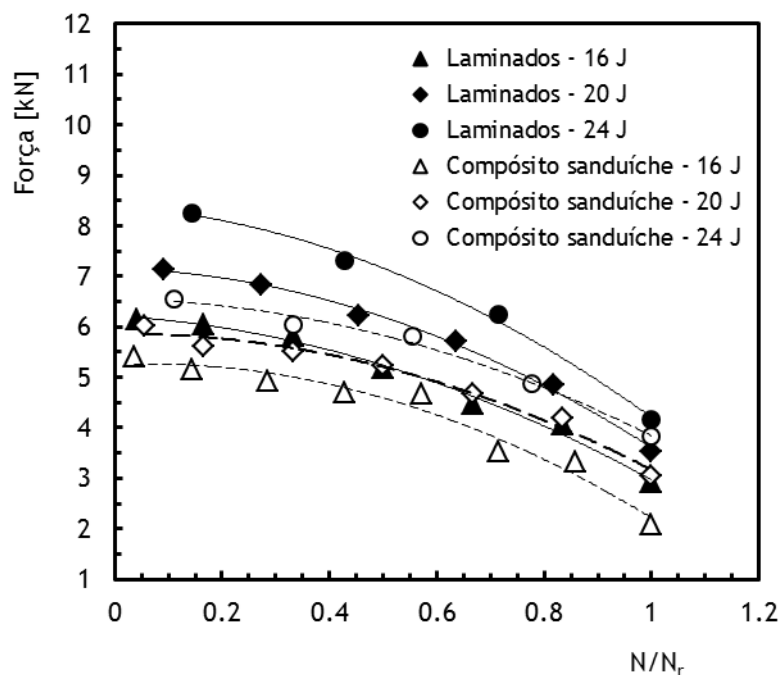


Figure 3.9 - Evolução da força máxima ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.

A evolução do tempo de contacto também foi estudada e, para ambos os materiais, encontra-se representada na figura 3.10. Neste caso N representa o número de impactos instantâneos e N_r o penúltimo impacto antes de ocorrer a falha (perfuração). Pela referida figura verifica-se que existem dois comportamentos distintos. Ao nível dos compósitos sanduíche os dados podem ser ajustados por um único polinómio do segundo grau, com um coeficiente de correlação de 0.994, mostrando, neste caso, que a sua evolução é independente da energia de impacto. Contrariamente, a evolução do tempo de contacto nos laminados fibra de vidro/epóxi revela-se dependente da energia de impacto. Neste caso, cada nível de energia é ajustado por um polinómio do segundo grau e verifica-se que à medida que a energia de impacto aumenta maior é o tempo de contacto, ou seja, maior dano. Na verdade a introdução do núcleo de cortiça aumenta o tempo de contacto, tal como observado na figura 3.3, e pode ser explicado pela sua estrutura alveolar [56, 57].

A figura 3.11 ilustra a evolução do deslocamento onde, mais uma vez, N representa o número de impactos instantâneos e N_r o penúltimo impacto antes de ocorrer a falha (perfuração). Para ambos os materiais, e para cada nível de energia, os valores podem ser ajustados por polinómios de segunda ordem com coeficientes de correlação que variaram entre 0.991 e os 0.998 para os laminados e entre 0.993 e os 0.995 para os painéis sanduíche. Tal como se verificou na figura 3.5, também aqui o deslocamento do impactor observado ao longo dos multi-impactos é sempre maior nas sanduíches do que nos laminados. Comparando o deslocamento máximo entre o último e o primeiro impacto, por exemplo para uma energia de 24 J, existe uma diferença de 58.6% para os laminados enquanto que nos compósitos sanduíche é de 66.9%.

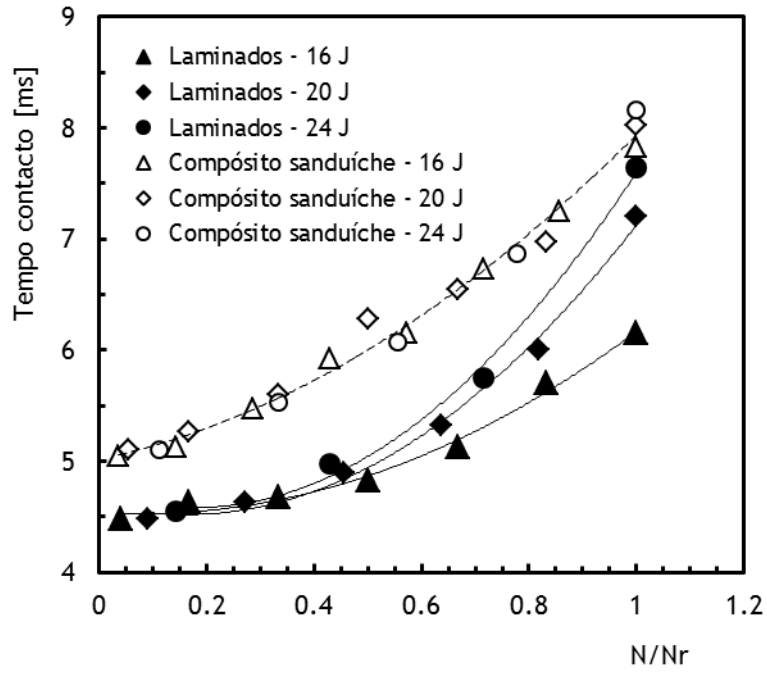


Figure 3.10 - Evolução do tempo de contacto ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.

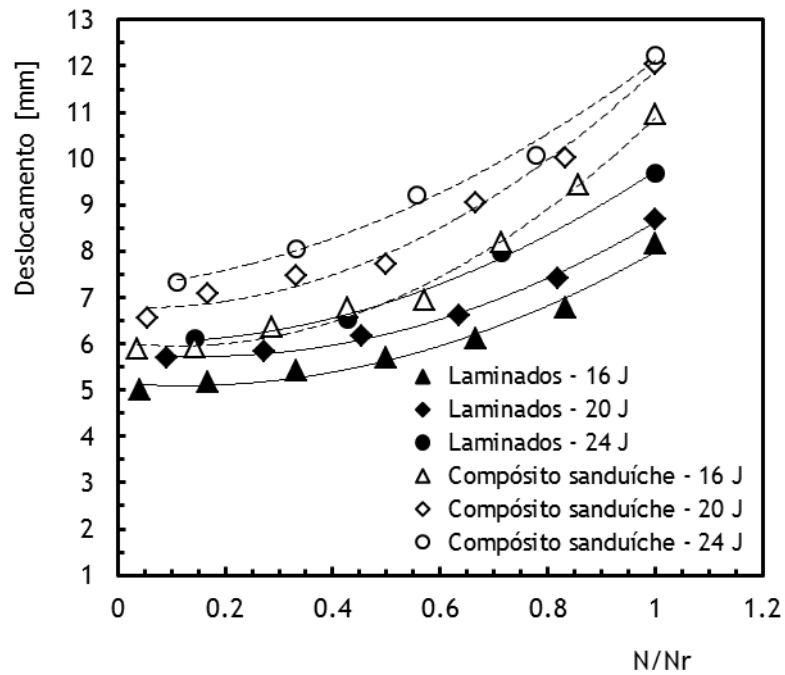


Figure 3.11 - Evolução do deslocamento ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.

Finalmente a evolução da energia restituída ao longo dos multi-impactos encontra-se ilustrada na figura 3.12, onde N representa o número de impactos instantâneos e N_r o

penúltimo impacto antes de ocorrer a falha (perfuração). Para cada um dos materiais a evolução deste parâmetro pode ser ajustada por um polinómio do terceiro grau, com um coeficiente de correlação de 0.985 para os laminados e de 0.987 para os compósitos sanduíche. Pode-se verificar a existência de três estágios, para ambos os materiais, os quais estão relacionados com os diferentes mecanismos de dano que vão ocorrendo ao longo dos multi-impactos. O primeiro estágio, no caso dos laminados, decorre durante os primeiros 40% de vida à fadiga e assiste-se a perdas de energia restituída na ordem dos 29.8%, ao que se segue um decréscimo lento (13.1%) até sensivelmente os 70% da vida à fadiga. Finalmente, no terceiro estágio, ocorre novamente um decréscimo rápido da energia restituída, culminando com o colapso. Ao nível dos compósitos sanduíche verificamos um primeiro estágio muito mais curto, que decorre mais ou menos durante os primeiros 20% de vida à fadiga, e também com um decréscimo da energia restituída muito menor (na ordem dos 15.3%). O segundo estágio, comparativamente aos laminados, revela-se mais longo (até cerca dos 56% da vida à fadiga) e apresenta um decréscimo apenas de 8%.

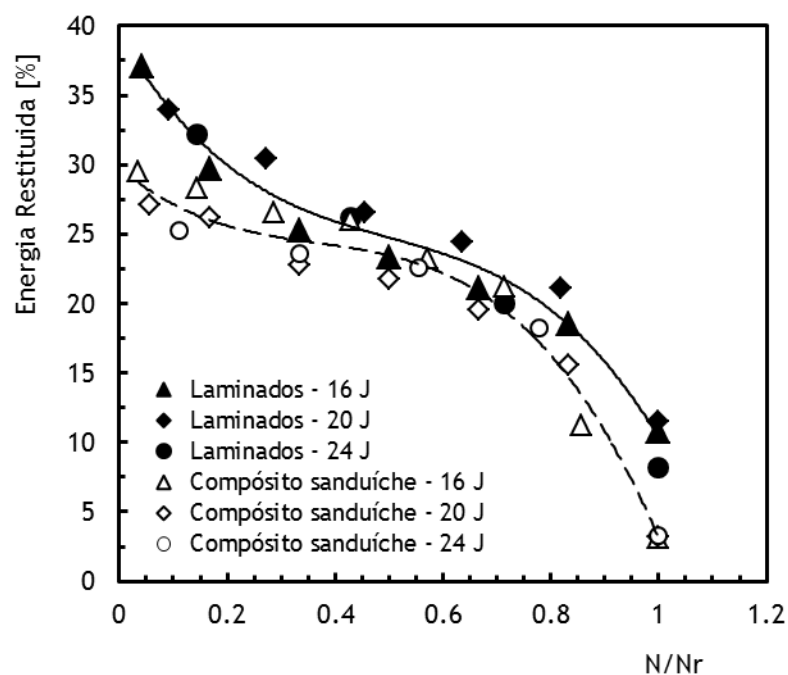


Figure 3.12 - Evolução da energia restituída ao longo dos multi-impactos para as energias de 16 J, 20 J e 24 J.

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. Neste capítulo, serão então abordadas as principais conclusões.

Numa fase seguinte são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

4.1 - Conclusões Gerais

- 1 - O valor da força máxima é muito dependente da energia de impacto e aumenta, quase linearmente, até 28 J no caso dos laminados e 32 J nos compósitos sanduíche. No entanto, os painéis sanduíche apresentam, para todos os níveis de energia, menores forças máximas.
- 2 - O tempo de contacto aumenta com o aumento da energia de impacto e é mais elevado no caso dos painéis sanduíche.
- 3 - O aumento da energia de impacto promove maiores deslocamentos, contudo, estes valores são sempre maiores nos compósitos sanduíche do que nos laminados.
- 4 - O aumento da energia de impacto promove uma diminuição da energia restituída e, consequentemente, maiores danos em ambos os materiais. Em termos de laminados fibra de vidro/epóxi verifica-se que a energia restituída diminui quase linearmente, no entanto, esta tendência não é observada para os compósitos sanduíche.
- 5 - A resistência ao impacto é maior para os compósitos sanduíche do que para os laminados, contudo, este efeito é mais significativo à medida que a energia de impacto diminui.
- 6 - À excepção dos ensaios onde decorreram apenas dois impactos, para ambos os materiais, a evolução da força máxima ao longo dos multi-impactos varia segundo um polinómio do segundo grau.
- 7 - A evolução do tempo de contacto ao longo dos multi-impactos, para os compósitos sanduíche, pode ser ajustada por um único polinómio do segundo grau. Todavia, no caso dos laminados, esta evolução revela-se dependente da energia de impacto. Neste caso, cada nível de energia é ajustado por um polinómio do segundo grau e verifica-se que quanto mais alto for o seu valor maior é o tempo de contacto.

- 8 - A evolução do deslocamento para ambos os materiais, e para cada nível de energia, pode ser ajustada por polinómios de segunda ordem. No entanto, o deslocamento do impactor observado ao longo dos multi-impactos é sempre maior nas sanduíches do que nos laminados.
- 9 - A evolução da energia restituída ao longo dos multi-impactos, para cada um dos materiais, pode ser ajustada por um polinómio do terceiro grau. Verifica-se a existência de três estágios, os quais estão relacionados com os diferentes mecanismos de dano que vão ocorrendo. Ao nível dos compósitos sanduíche, o primeiro estágio é muito mais curto e, também, com um menor decréscimo da energia restituída face aos laminados. Por sua vez, o segundo estágio, revela-se mais longo.

4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser alvo de estudo:

- 1 - Estudar o comportamento ao impacto de laminados que envolvam menores níveis de energia de impacto.
- 2 - Efectuar uma análise de dano mais detalhada, especialmente ao nível dos compósitos sanduíche.
- 3 - Estudar a tenacidade à fractura dos painéis sanduíche.
- 4 - Estudar os efeitos ambientais na resistência ao multi-impacto.

Bibliografia

- [1] Mazumdar, Sanjay K (2002) *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process*. CRC Press LLC, New York, pp. 1-55.
- [2] Moura, M.F.S.F.; Morais, A.B.; Magalhães, A.G (2009) *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, Porto, pp. 1-36, 273-287.
- [3] Berthelot, Jean-Marie (1998) *Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*. Springer, New York, pp. 3-14.
- [4] Strong, A. Brent (2008) *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Society of Manufacturing Engineers, United States of America, pp. 1-18.
- [5] Reis, Paulo N. B (2001) *Resistência de Uniões Estruturais em Polipropileno Reforçado com Fibra de Vidro*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, pp. 5-20.
- [6] Ventura, Ana Mafalda F.M (2009) *Os Compósitos e a sua Aplicação na Reabilitação de Estruturas Metálicas*. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, pp. 10-19.
- [7] Vinson, Jack R.; Sierakowski, Robert L (2008) *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*. Springer, Netherlands, pp. 1-10.
- [8] Strong, A. Brent (2002) *History of Composite Materials - Opportunities and Necessities*. Brigham Young University, pp. 1-8.
- [9] Ashby, Michael F (2005) *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier Butterworth-Heinemann, New York.
- [10] Callister, William D. (2007) *Materials Science and Engineering: an Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 577-580.
- [11] Daniel, Isaac M.; Ishai, O (1994) *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, Oxford, pp. 3-11.
- [12] Mallick, P.K. (2008) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. Taylor & Francis Group, LLC., United States of America, pp. 1-118, 557-580.
- [13] Miracle, Daniel B; Donaldson, Steven L. (2001) *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*. ASM International, pp. 77-118.
- [14] Pickering, Kim L (2008) *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 1-65.
- [15] Santos, Paulo SP (2010) *Resistência ao Impacto de Compósitos Híbridos*. Tese de Mestrado,

Universidade da Beira Interior, Covilhã.

- [16] Almeida, Maria I.A (2009) *Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção*. Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa.
- [17] DIAB (2003) *Sandwich concept*. DIAB Sandwich Handbook.
- [18] Allen, H.G (1969) *Analysis and design of structural sandwich panels*. Pergamon Press, Oxford, UK.
- [19] Leite, M (2004) *Estudo Experimental, Analítico e Numérico de Vigas em Construção Sandwich Reforçada com Aplicações ao Transporte Refrigerado de Bens Perecíveis*. Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa.
- [20] Vinson, J.R.; Sierakowski R.L (1986) *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [21] Soares, Bruno A.R.S (2007) *Estruturas sandwich com utilização de núcleos de cortiça*. Tese de Mestrado. IST/UTL, Lisboa.
- [22] Hodgkinson, J.M (2000) *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 211-247.
- [23] Sierakowski, Robeert L.; Chaturvedi, Shive K (1997) *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*. John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 1-14, 135-162.
- [24] Zukas, J.A.; Nicholas, T.; Swift, H.F.; Greszczuk, L.B., Curran, D.R (1982) *Impact Dynamics*. John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 155-214.
- [25] Ruiz, C.; Harding, J. (1992) Modelling impact of composite structures using small specimens. *Composites Engineering*, Vol. 2, pp. 164-167.
- [26] Olsson, R. (1992) Impact response of orthotropic composite plates predicted from a one-parameter differential equation. *AIAA Journal*, Vol. 30, pp. 1587-1596.
- [27] Swanson, S. R. (1992) Elastic impact stress analysis of composite plates and cylinders composites. *Composites Engineering*, Vol. 2, pp. 221-227.
- [28] Broughton, W.R.; Crocker, L.E.; Gower, M.R.L (2002) *Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures*, NPL Report MATC(A)65.
- [29] Richardson, M.O.W.; Wisheart, M.J (1996) Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, pp. 1123-1131.
- [30] Adams, R.D.; Cawley, P.D (1998) *A Review of Defects Types and Non-Destructive Testing Techniques for Composites and Bonded Joints*. *NDT Int*, Vol. 21, pp. 208-222.
- [31] 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*, Vol. 54, pp. 14-20.

- [32] Abrate, S (1997) *Localized Impact on Sandwich Structures With Laminated Facings*. Appl Mech Rev, Vol. 50, pp. 69-82.
- [33] Kim, C.G.; Jun, E.J (1992) *Impact Resistance of Composite Laminated Sandwich Plates*. Comp Mat, Vol. 26, pp. 2247-2261.
- [34] Bernard, M.L.; Lagace, P.A (1989) *Impact Resistance of Composite Sandwich Plates*. J Reinf Plas Comp, Vol. 8, pp. 432-445.
- [35] Rhodes, M.D (1975) *Impact Fracture of Composite Sandwich Structures*. Proc. of the 16th ASME/AIAA/SAE Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, CO, AIAA-75-748, pp. 1-9.
- [36] Mines, R.A.W.; Worrall, C.M.; Gibson, A.G (1994) *The Static and Impact Behavior of Polymer Composite Sandwich Beams*. Composites, Vol. 25, pp. 95-110.
- [37] Nemes, J.A.; Simmonds, K.E (1992) *Low-Velocity Impact Response of Foam-Core Sandwich Composites*. J Comp Mat, Vol. 26, pp. 500-519.
- [38] Sun, C.T.; Wu, C.L (1991) *Low-Velocity Impact of Composite Sandwich Panels*. Proceedings of the 32nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ACS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Baltimore, April 10-13, AIAA-91-1077-CP, pp. 1123-1129.
- [39] Hiel, C.; Dittman, D.; Ishai, O (1993) *Composite Sandwich Construction With Syntactic Foam Core: A Practical Assessment of Post-Impact Damage and Residual Strength*. Composites, Vol. 24, pp. 447-450.
- [40] Saczalski, T.; Lucht, B.; Steeb, D (1991) *Advanced Experimental Design Applied to Damage Tolerance of Composite Materials*. Proc. of the 23rd International SAMPE Conference, Kiamesha Lake, NY, October 21-24.
- [41] McGowan, D.M.; Ambur, D.R (1998) *Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Sandwich Panels Impacted With and Without Compression Loading*," Proc. of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 20-23, Long Beach, CA, AIAA-98-1783, pp. 1-11.
- [42] Kassapoglou, C (1988) *Buckling, Post-Buckling, and Failure of Elliptical Delaminations in Laminates Under Compression*. Compos Struct, Vol. 9, pp. 139-159.
- [43] Kassapoglou, C.; Jonas, P.J.; Abbott, R (1988) *Compressive Strength of Composite Sandwich Panels After Impact Damage: an Experimental and Analytical Study*. J Compos Technol Res, Vol. 10, pp. 65-73.
- [44] Kassapoglou, C (1996) *Compression Strength of Composite Sandwich Structures After Barely Visible Impact Damage*. J Compos Technol Res, Vol. 18, pp. 274-284.
- [45] Minguet, P.J (1991) *A Model for Predicting the Behavior of Impact-Damaged Minimum Gage Sandwich Panels Under Compression*. AIAA publication AIAA-91-1075-CP.

- [46] Aslan, Z.; Karakuzu, R.; Okutan, B (2003) *The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading*. Compos Struct, Vol. 59, pp. 119-127.
- [47] Hosur, M.V.; Abdullah, M.; Jeelani, S (2005) *Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites*. Compos Struct, Vol. 67, pp. 253-262.
- [48] Gustin, J.; Joneson, A.; Mahinfalah, M.; Stone, J (2005) *Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites*. Compos Struct, Vol. 69; pp. 396-406.
- [49] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Santos, P.; Richardson, M.O.W.; Santos, J.B (2012) *Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix*. Compos Struct, Vol. 94, pp. 3520-3528.
- [50] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Zhang, Z.Y.; Benameur, T.; Richardson, M.O.W (2013) *Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix*. Compos Part B-Eng, Vol. 46, pp. 7-14.
- [51] Reis, P.N.B.; Santos, P.; Ferreira, J.A.M.; Richardson, M.O.W (2013) *Impact response of sandwich composites with nano-enhanced epoxy resin*. J Reinf Plast Comp, Vol. 32, pp. 898-906.
- [52] Schoeppner, G.A.; Abrate, S (2000) *Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates*. Compos Part A-Appl S, Vol. 31, pp. 903-915.
- [53] Belingardi, G.; Vadori, R (2002) *Low velocity impact of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite materials plates*. Int J Impact Eng, Vol. 27, pp. 213-229.
- [54] Iqbal, K.; Khan, S-U.; Munir, A.; Kim J-K (2009) *Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix*. Compos Sci Technol, Vol. 69, pp. 1949-1957.
- [55] Found, M.S.; Howard, L.C (1993) *Single and multiple impact behaviour of a CFRP laminate*. Compos Struct, Vol. 32, pp. 159-163.
- [56] Mano, J.F (2002) *The Viscoelastic Properties of Cork*. J Mater Sci, Vol. 37, pp. 257-263.
- [57] Silva, S.P.; Sabino, M.A.; Fernandes, E.M.; Correlo, V.M.; Boesel, L.F.; Reis, R.L (2005) *Cork: properties, capabilities and applications*. Int Mater Rev, Vol. 50, pp. 345-365.