



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Electromecânica

Resistência ao Impacto de Compósitos Híbridos

Paulo Sérgio Pina dos Santos

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

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Covilhã, Outubro de 2010

Aos meus pais.

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 e que sempre se mostrou incansável, nunca baixando o grau de exigência.
- Ao Professor Abílio Pereira Silva, pelo incentivo e ajuda ao longo do trabalho.
- Ao Professor Jaime Santos, do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra, pelo apoio dado na análise de danos dos laminados.
- 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 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.
- A todos os meus amigos pelo apoio e motivação, em especial ao Jorge Soares, pela imprescindível ajuda prestada no laboratório.
- Aos meus PAIS pelo incentivo e apoio incondicional.

Resumo

Actualmente vem-se a assistir a um aumento significativo do uso de materiais compósitos reforçados com fibras em aplicações de engenharia e existe uma forte indicação de que este fenómeno tende a continuar. Contudo, a resistência e rigidez destes materiais é fortemente afectada pelos defeitos que decorrem durante o processo de fabrico e/ou de cargas de impacto que surgem ao longo da sua vida activa. Neste contexto ocorrem enormes decréscimos da resistência residual destes materiais. O presente trabalho pretende assim contribuir para um maior conhecimento e melhoria da resistência ao impacto dos materiais compósitos. Para tal foi utilizada uma resina epóxi nano-transformada tendo-se concluído que a adição de nanopartículas promove melhorias significativas nas performances ao impacto.

Palavras-chave

Nanocompósitos; Compósitos híbridos; Impacto de baixa velocidade; Técnicas não destrutivas.

Abstract

In recent years, there has been a rapid growth in the use of fibre-reinforced composite materials in engineering applications and there is evident indication that this will be continuing. However, the strength and stiffness of these materials are affected significantly by defects that may result from imperfect manufacturing process or from external loads during the operational life. Drastic reductions of the compressive residual strength have been detected. In this context the present works intends to contribute for a better knowledge and improvement of the impact strength of composite materials. Nano-enhanced epoxy resin was used and it was possible concluded that the addition of nanoparticles promote better impact performances.

Keywords

Nanocomposites; Hybrid composites; Low-velocity impact; Non Destructive Techniques.

Índice

1 - Materiais Compósitos	2
1.1 - Introdução	2
1.2 - Classificação dos Materiais Compósitos	8
1.3 - Fibras	10
1.3.1 - Fibras Sintéticas	10
1.3.2 - Fibras Naturais	12
1.3.3 - Principais Propriedades das Fibras	13
1.4 - Matrizes	13
1.4.1 - Matrizes Termoplásticas	15
1.4.2 - Matrizes Termoendurecíveis	16
1.4.3 - Principais Propriedades dos Materiais Poliméros Utilizados nas Matrizes	17
1.5 - Nanopartículas	17
1.5.1 - Visão Global sobre a Nanotecnologia	17
1.5.2 - Tipos de Nanopartículas	19
1.5.3 - Nanocompósitos	23
2 - Impacto em Materiais Compósitos	25
2.1 - Introdução	25
2.2 - Classificação do Impacto	25
2.3 - Danos Provocados por Impacto	28
2.4 - Técnicas não Destrutivas para Avaliação de Danos	29
2.5 - Formas de Melhorar a Resistência ao Impacto	34
3 - Materiais, Equipamento e Procedimento Experimental	36
3.1 - Introdução	36
3.2 - Manufactura dos Laminados	36
3.3 - Provetes	37
3.4 - Equipamento	38
3.5 - Procedimento Experimental	40
4 - Análise e Discussão de Resultados	41
4.1 - Introdução	41
4.2 - Efeito da Introdução do Reforço na Resistência ao Impacto	41
4.3 - Análise Comparativa	50

5 - Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros	57
5.1 - Conclusões Gerais	57
5.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros	58
Bibliografia	59

Lista de Figuras

Figura 1.1 –	Chassis do Corvette® C1 construído em fibra de vibro	4
Figura 1.2 –	(a) Estação espacial internacional; (b) Vaivém espacial	6
Figura 1.3 –	(a) Aplicação dos materiais compósitos pelas empresas Airbus e Boing na construção de aeronaves; (b) Componentes da aeronave EMB-170 fabricados em compósitos	6
Figura 1.4 –	Aplicação de materiais compósitos na estrutura do Aston Martin V12 Vanquish	6
Figura 1.5 –	(a) Capacete para protecção balística; (b) Colete a prova de bala composto por varias camadas de Kevlar®	7
Figura 1.6 –	Várias aplicações de diferentes biocompósitos	7
Figura 1.7 –	Energia de impacto para diversos materiais. Os materiais compósitos considerados apresentam reforço unidireccional e 60% de fracção de volume	8
Figura 1.8 –	Classificação dos diversos tipos de materiais compósitos	9
Figura 1.9 –	Comparação desde o ser humano (1.75 m) até um átomo de hidrogénio (0.1 nm)	20
Figura 1.10 –	Desenvolvimento da nanotecnologia	21
Figura 1.11 –	Estrutura cristalina da nano argila	22
Figura 1.12 –	Tipos de polímeros/argilas compósitas: (a) Particularmente dispersas; (b) Intercaladas e totalmente disperso; (c) Parcialmente dispersas e intercaladas e (d) Totalmente intercaladas e dispersas	24
Figura 1.13 –	Micrografia TEM mostrando: (a) Clays esfolheados e intercalados; (b) Clays bem intercalados; (c) Clays esfolheados	24
Figura 2.1 –	Representação esquemática da progressão dos danos devido a: (a) Esforço de flexão; (b) Esforço de contacto	29
Figura 2.2 –	Sistema ESPI: a) Representação esquemática; b) Aparelhos montados	31
Figura 2.3 –	Imagem dos danos obtidos pela técnica ESPI para laminados $[0,90,0,90]_{2s}$	31
Figura 2.4 –	Shearography sistema: a) Representação esquemática; b) Imagem da câmara aberta	32
Figura 2.5 –	Imagem dos danos obtidos pela técnica shearography para laminados $[0,90,0,90]_{2s}$: a) No mapa de fase; b) Em falsa cor	32
Figura 2.6 –	Sistema de ultrassons: a) Representação esquemática; b) Equipamento de ultrassons C-Scan	33
Figura 2.7 –	Imagem dos danos obtidos pela técnica de ultrassons C-Scan para laminados $[0,90,0,90]_{2s}$	34

Figura 2.8 –	Imagem do dano obtido pela técnica de raio X para laminados [90 ₄ ,0 ₄] _s	34
Figura 3.1 -	Dimensão das partículas do pó de cortiça	37
Figura 3.2 -	Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto	38
Figura 3.3 -	Máquinas de impacto IMATEK-IM10	39
Figura 4.1 -	Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi	42
Figura 4.2 -	Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi	43
Figura 4.3 -	Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi	43
Figura 4.4-	Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi	44
Figura 4.5 -	Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi	45
Figura 4.6 -	Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi	45
Figura 4.7 -	Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays e pó de cortiça na resina epóxi	46
Figura 4.8 -	Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição de nanoclays e do pó de cortiça na resina epóxi	46
Figura 4.9 -	Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays e do pó de cortiça na resina epóxi	47
Figura 4.10 -	Curvas força-tempo ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J	48
Figura 4.11 -	Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J	49
Figura 4.12 -	Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J	49
Figura 4.13 -	Danos observados nos laminados: a) Resina não aditivada; b) Resina com 1.5 % de clays; c) Resina com 3 % de clays; d) Resina com 6% de clays; e) Resina com 1.5 % de clays mais 1.5 % de pó de cortiça; f) Resina com 3 % de cortiça	56

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Propriedades mecânicas de vários materiais	3
Tabela 1.2 – Aplicações típicas dos materiais compósitos	5
Tabela 1.3 – Tipos de fibras de vidro e suas características	10
Tabela 1.4 – Seis tipos genéricos de fibras naturais	12
Tabela 1.5 – Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras	14
Tabela 1.6 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas matrizes poliméricas resinosas constituintes de materiais compósitos	18
Tabela 1.7 – Fórmulas químicas e parâmetros característicos dos silicatos mais usados	23
Tabela 2.1 – Velocidade de impacto	26
Tabela 2.2 – Fenômenos físicos associados a intervalos de impacto	27
Tabela 2.3 – Técnicas para avaliação de defeito	30
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de impacto para os vários reforços propostos	51
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de impacto para as várias percentagens de nanoclays utilizados	52

Lista de Acrónimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge coupled device
CEC	Cation exchange capacity
CNCs	Nanocompósitos cerâmicos
CNFs	Nanofibras de carbono
DGEBA	Diglycidyl ether of bisphenol-A
ESPI	Electronic speckle pattern interferometry
HM	High modulus
HS	High strength
IM	Intermediate modulus
MMT	Montmorillonite organoclays
MNCs	Nanocompósitos metálicos
MWNTs	Multi-walled nanotubes
NDE	Non-destructive evaluation
PA	Poliamida
PAT	Poliamidas-imidas
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-catano
PEI	Polietermidas
PES	Polyethersulfone
PNCs	Nanocompósitos poliméricos
POSS [®]	Polyhedral oligomeric silsesquioxane
PP	Polipropileno
PPS	Polisulfureto de fenileno
PRC	Particulate reinforced composites
PZT	Piezo-electric transducer
SDNTs	Small-diameter nanotubes
SWNTs	Single-walled nanotubes
UHM	Ultra high modulus

Notação

Caracteres Latinos

A	Alongamento à rotura
C_0	Constante de integração
E	Módulo de elasticidade
F	Força
$F_{\text{máx}}$	Força máxima
l_c	Comprimento crítico
m	Massa
T	Temperatura
T_g	Temperatura de transição vítrea
V	Velocidade
V_0	Velocidade inicial
X	Deflexão

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de expansão térmica
$\dot{\varepsilon}$	Deformação a compressão
ρ	Massa específica
σ_u	Resistência a tracção
σ_y	Tensão média do material
\varnothing	Diâmetro do filamento

Introdução

Os materiais compósitos são actualmente bastante utilizados em aplicações estruturais como, por exemplo, em automóveis, navios, aviões, satélites e material desportivo, devido à sua elevada resistência e rigidez específica. No entanto, o seu desempenho em serviço é significativamente afectado pelos defeitos originados durante o processo de fabrico, ou pelo impacto de cargas externas ao longo da sua vida operacional.

A carga de impacto pode causar delaminações e/ou fendas na matriz que muitas vezes não são visíveis à superfície do laminado. Na verdade, os danos por impacto são a principal causa de delaminações em compósitos, promovendo uma redução da resistência à compressão que chega a atingir os 60 %.

Recentemente alguns investigadores têm explorado uma nova maneira de melhorar a resistência ao impacto com recurso às nanopartículas. Neste contexto, pretende-se elaborar um estudo ao nível dos compósitos híbridos onde, para além das fibras, se utiliza uma resina nanotransformada de modo a obter uma melhoria significativa da resistência ao impacto destes materiais.

Para tal esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos sendo, no capítulo 1, feito um enquadramento teórico sobre materiais compósitos, sua aplicação e classificação. No capítulo 2 faz-se uma breve revisão sobre o impacto nos materiais compósitos, onde se dá um especial enfoque à classificação do impacto, danos provocados por impacto, técnicas não destrutivas para avaliação de dano e formas de melhorar a resistência ao impacto. O capítulo 3 descreve as técnicas experimentais utilizadas no trabalho, a manufactura dos compósitos, a geometria dos provetes e equipamentos utilizados. No capítulo 4 é feita a apresentação dos resultados experimentais e sua discussão. Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Materiais Compósitos

De uma forma sucinta serão apresentados alguns conceitos fundamentais sobre os materiais compósitos e o seu campo de aplicação. Para uma melhor compreensão das suas propriedades mecânicas faz-se uma breve revisão das propriedades dos seus constituintes (fibras e matrizes). Finalmente é introduzido o conceito de nanopartículas como elemento de reforço, e as vantagens da sua aplicação.

1.1 - Introdução

Actualmente os projectistas desenvolvem equipamentos/estruturas cujas propriedades mecânicas dos metais, cerâmicos e polímeros não conseguem satisfazer plenamente as exigências requeridas. Neste contexto é típico o recurso aos materiais compósitos.

O termo “compósito” resulta da combinação de dois ou mais materiais, de natureza diferente, cujas propriedades finais são superiores às dos seus constituintes. No entanto, a definição apresentada é bastante generalizada e pode abranger todos os materiais existentes na Natureza e desenvolvidos pelo Homem [1-3]. Deste modo, uma definição mais apropriada, pode passar por definir material compósito como aquele que combina dois materiais que permanecem em fases separadas, sendo uma delas a matriz e a outra o reforço [4, 5].

As propriedades mecânicas dos compósitos são dominadas pelo elemento de reforço, o qual é constituído, na maior parte das vezes, por fibras com elevada resistência, rigidez e diâmetro muito reduzido [5]. A sua distribuição determina a homogeneidade do material, pois quanto menos uniforme é a distribuição do reforço mais heterogéneo é o material e, conseqüentemente, maior a probabilidade de falha [3, 6].

A tabela 1.1, da página seguinte, compara algumas propriedades mecânicas dos materiais mais convencionais, na sua forma maciça, com as obtidas nos materiais compósitos mais expressivas para os diferentes campos de aplicação. No entanto maiores detalhes sobre as propriedades mecânicas dos materiais compósitos podem ser encontrados em [6]. Podemos observar que os compósitos apresentam uma elevada resistência e rigidez específica assumindo, desta forma, uma clara vantagem quando comparados com os tradicionais metais. Estas propriedades revelam-se determinante na indústria de transporte, onde o peso da estrutura está directamente associado ao consumo de energia.

Na verdade o recurso aos materiais compósitos não é recente, pois a História mostra que o Homem já combina diferentes materiais ao longo de vários séculos. Por exemplo os Egípcios usavam materiais compósitos de fibras naturais como o papiro para fazer barcos, velas e cordas desde o ano 4000 a.C. [7]. No âmbito da construção civil, a sua aplicação remonta ao ano de 450 a.C. Como refere a Bíblia, no Livro do Êxodo (Capítulo V, versículo 6 e 7), era enorme a dificuldade de fabricar tijolos de argila sem palha. Outro exemplo é o arco Mongol que utilizava o corno de búfalo no lado interior do arco que estava à compressão, e tendões de veado do lado exterior, ou seja, no lado da tracção [4, 7]. Também os guerreiros “Samurai” eram conhecidos por usar vários metais laminados na construção das suas espadas para obter uma liga metálica com melhores propriedades [8].

Tabela 1.1 - Propriedades mecânicas de vários materiais [1, 2].

Material	Módulo de elasticidade, E [GPa]	Resistência a tracção, σ_u [GPa]	Massa específica, ρ [kg/m ³]	Módulo específico, E/ρ [$\times 10^{-3}$]	Resistência específica, σ_u/ρ [$\times 10^{-3}$]
Materiais convencionais:					
Aço	210	0.34 - 2.1	7800	26.9	0.043 - 0.27
Ligas de Al	70	0.14 - 0.62	2700	25.9	0.052 - 0.23
Vidro	70	0.7 - 2.1	2500	28	0.28 - 0.84
Tungsténio	350	1.1 - 4.1	19300	18.1	0.057 - 0.21
Berílio	300	0.7	1830	164	0.38
Alumina	350	0.17	3800	92.1	0.045
MgO	205	0.06	3600	56.9	0.017
Compósitos de fibras curtas:					
Vidro/epóxi (35%)	25	0.3	1900	8.26	0.16
Vidro/polyester (35%)	15.7	0.13	2000	7.25	0.065
Vidro/nylon (35%)	14.5	0.2	1620	8.95	0.12
Vidro/nylon (60%)	21.8	0.29	1950	11.18	0.149
Compósitos unidireccionais:					
Vidro-S/epóxi (45%)	39.5	0.87	1810	21.8	0.48
Carbono/epóxi (61%)	142	1.73	1590	89.3	1.08
Kevlar/epóxi (53%)	63.6	1.1	1350	47.1	0.81

No entanto a história recente dos materiais compósitos começou a desenhar-se por volta de 1937, quando a Owens Corning Fiberglass® Company iniciaram a venda de fibra de vidro nos Estados Unidos. A indústria aeronáutica era a sua principal cliente. Passado pouco tempo estava disponível no mercado a resina de poliéster insaturada (patenteada em 1936), e, em 1938, começaram a surgir resinas com melhor desempenho devido ao surgimento da resina epóxi [4].

No entanto o grande desenvolvimento e aplicação dos materiais compósitos deu-se com a II Guerra Mundial, devido à sua enorme aplicação na indústria aeronáutica. Como exemplo podemos citar a aplicação da fibra de cânhamo e de resina fenólica nas peças de fuselagem do Spitfire. Durante esta época também foram desenvolvidos novos métodos de fabrico, enrolamento filamentar e moldação por pistola, para além de surgirem as primeiras estruturas sanduíche com núcleo celular e os compósitos resistentes ao fogo [4, 5, 9].

Todavia só com o fim da II Guerra Mundial é que o interesse por este tipo de materiais se generalizou aos mais variados campos industriais. Os barcos em fibra de vidro reforçados com poliéster passaram a ser construídos com fins comerciais e no sector automóvel, em 1953 chegou mesmo a ser construído um chassis em fibra de vidro para o Corvette® C1 (figura 1.1) [4, 9, 10].



Figura 1.1 - Chassis do Corvette® C1 construído em fibra de vidro [10].

Actualmente têm um campo de aplicação muito vasto, encontrando-se alguns casos típicos ilustrados na tabela 1.2 e nas figuras 1.2 à 1.6.

Podemos assim dizer, a título de conclusão, que os materiais compósitos apresentam as seguintes vantagens, face aos tradicionais [1, 4]:

- Maior capacidades de adaptação, pois diversos componentes metálicos podem ser substituídos por um único elemento;
- Fácil monitorização, em online, dos danos ocorridos nos componentes/estruturas em pleno serviço. Ao permitirem a inclusão de sensores são conhecidos como materiais “inteligentes”;
- A resistência à fadiga é muito maior nos materiais compósitos. Por exemplo, no aço e ligas de alumínio a resistência à fadiga é na ordem dos 50 % da sua resistência estática enquanto que num compósito unidireccional carbono/epóxi é de aproximadamente 90 %;

Tabela 1.2 - Aplicações típicas dos materiais compósitos [1, 2, 5, 11].

Sector	Aplicações
Aeroespacial	<ul style="list-style-type: none"> – Estações espaciais – Componentes de satélites (tubos, painéis estruturais, sondas de orientação, antenas) – Vaivéns espaciais (reservatórios de combustível, escudos de protecção para a reentrância na atmosfera)
Transportes aéreos, terrestres e marítimos	<ul style="list-style-type: none"> – Planadores e componentes de helicópteros, aeronaves comerciais e militares – Motores de aeronaves (cone do nariz, pás das turbinas, bombas de combustível, revestimento do escape) – Automóveis (estrutura e componentes do habitáculo, da suspensão e da transmissão) – Barcos de patrulha, lanchas, arrastões e ferries – Comboio de alta velocidade, vagões
Engenharia Civil e estruturas	<ul style="list-style-type: none"> – Edifícios (revestimento e isolamento de edifícios, portas e janelas de segurança e mobiliário) – Pontes pedonais e rodoviárias (estrutura, painéis e cabos de sustentação) – Torres de energia eólica (torres e pás) – Estruturas off-shore – Tubos e reservatórios sob pressão
Defesa e segurança	<ul style="list-style-type: none"> – Tanques de guerra (componentes de blindagem, antenas) – Blindagem de automóveis – Capacetes – Coletes a prova de bala
Componentes eléctricos e electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> – Componentes para isolamentos eléctricos – Componentes de electrodomésticos – Suportes para disjuntores e para circuitos impressos – Telecomunicações e cablagens de fibras ópticas – Antenas e radares – Baterias
Desporto e lazer	<ul style="list-style-type: none"> – Desporto motorizado (fórmulas, sport protótipos e gt's, equipamento de segurança: capacetes, cintos, sistema hans) – Pranchas de windsurf, de surf, de snowboard – Raquetes de ténis e squash, tacos de golfe, patins, arcos e flechas e quadros de bicicletas – Canas de pesca
Medicina	<ul style="list-style-type: none"> – Prótese para membros e articulações – Mesas de raios X

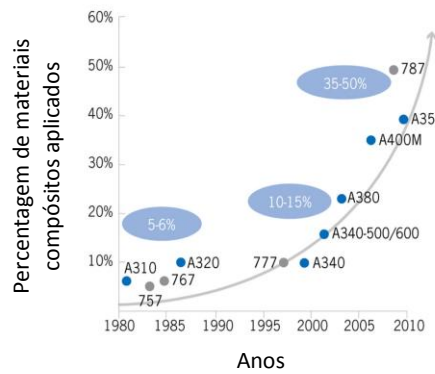


(a)

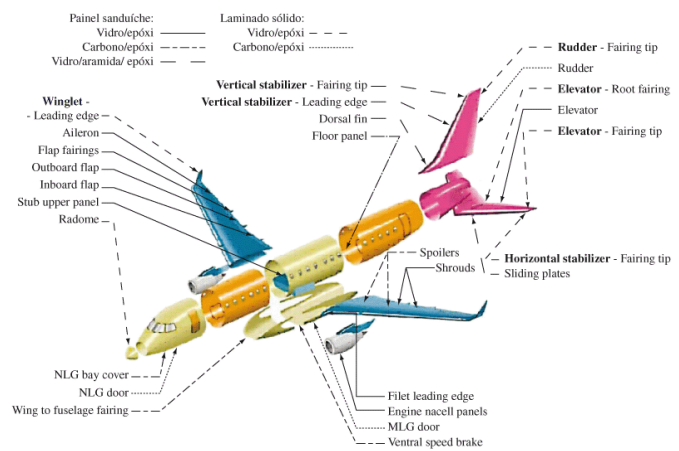


(b)

Figura 1.2 - (a) Estação espacial internacional [12]; (b) Vaivém espacial [13].



(a)



(b)

Figura 1.3 - (a) Aplicação dos materiais compostos pelas empresas Airbus e Boeing na construção de aeronaves [14]; (b) Componentes da aeronave EMB-170 fabricados em compostos [15].



Figura 1.4 - Aplicação de materiais compostos na estrutura do Aston Martin V12 Vanquish [2].

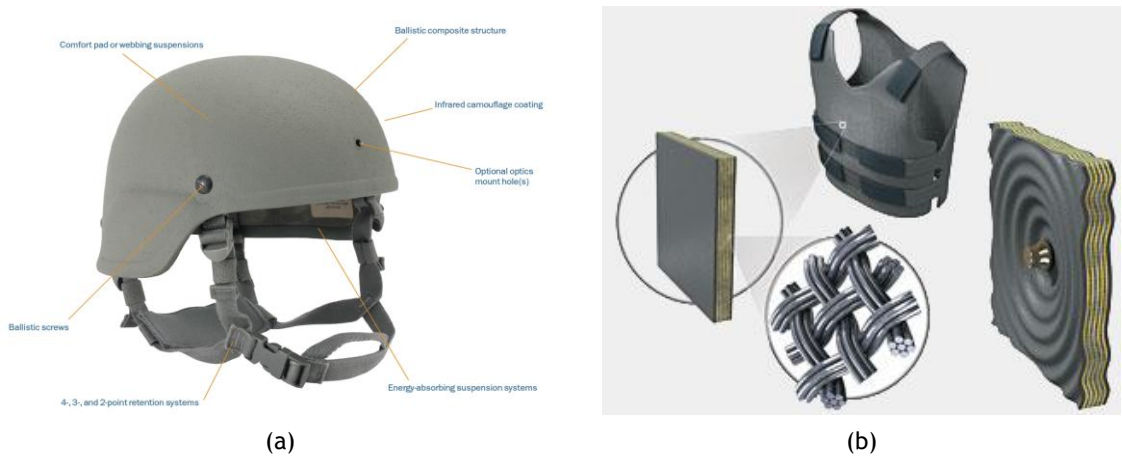


Figura 1.5 - (a) Capacete para protecção balística [16]; (b) Colete a prova de bala composto por varias camadas de Kevlar® [17].

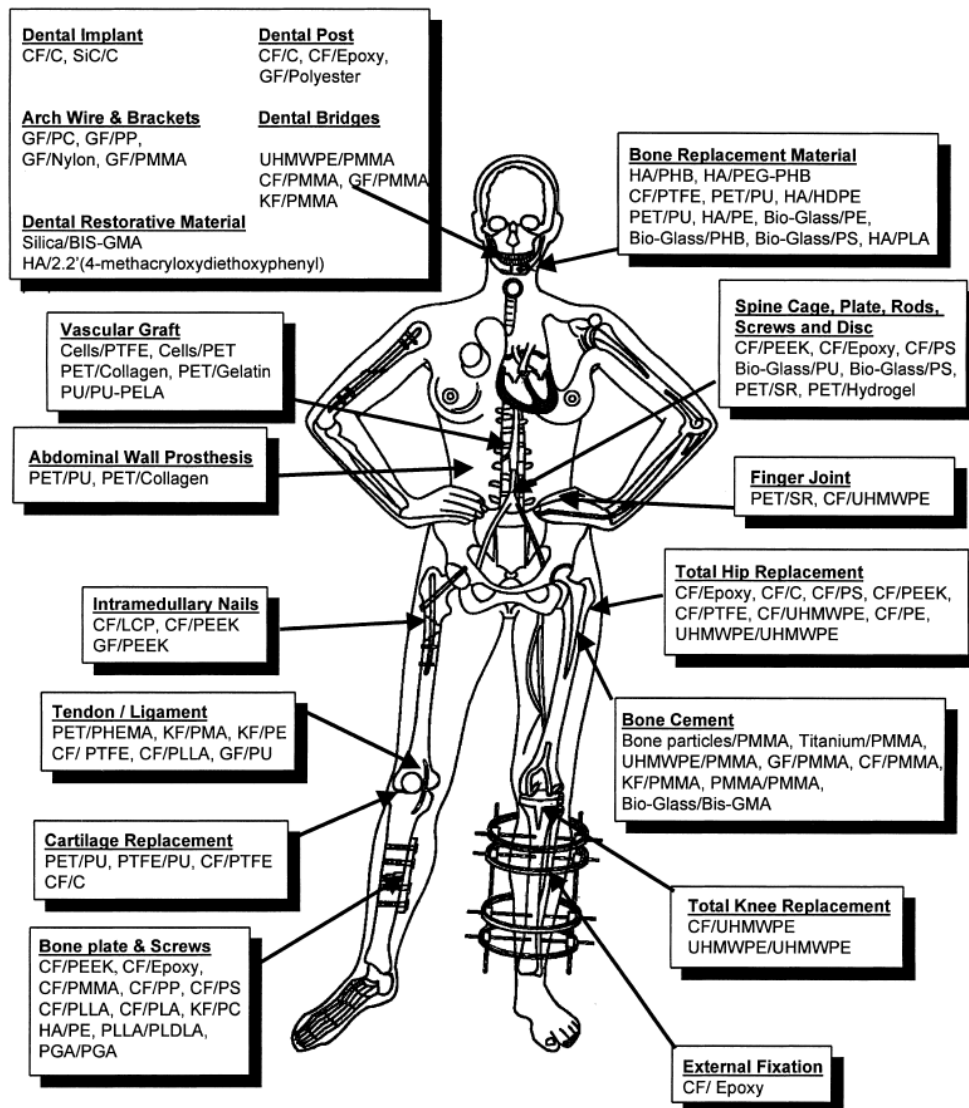


Figura 1.6 - Várias aplicações de diferentes biocompósitos [18].

- Elevada resistência à corrosão pois a sua superfície exterior é sobretudo polimérica;
- Os materiais compósitos oferecem grande flexibilidade ao projectista, pois permitem que as fibras possam ser orientadas na direcção de maior solicitação;
- Fácil controlo de qualidade e processamento dos componentes obtidos;
- Boas propriedades ao impacto, como ilustra a figura 1.7;
- Leveza, elevada rigidez específica, elevada resistência específica, boa resistência a fadiga e bom amortecimento, são propriedades muito atractivas nos compósitos;
- Armazenamento e libertação de energia;
- Baixa expansão térmica e baixa condutibilidade térmica;
- Transporte de temperatura (somente nas fibras de carbono).

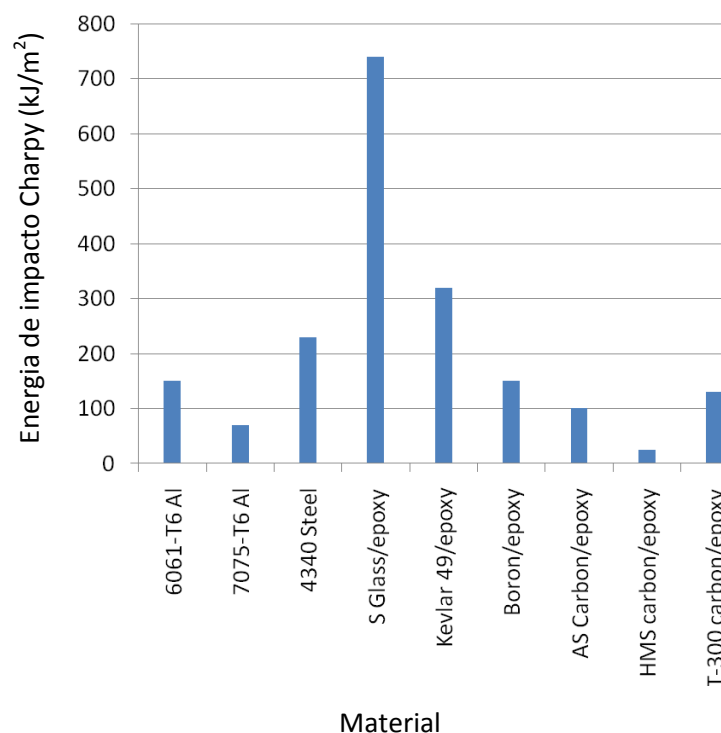


Figura 1.7 - Energia de impacto para diversos materiais. Os materiais compósitos considerados apresentam reforço unidireccional e 60 % de fracção de volume [1].

1.2 - Classificação dos Materiais Compósitos

Uma forma de classificar os materiais compósitos, sugerida por Callister [19], encontra-se representada na figura 1.8. Podemos observar que estes se encontram agrupados segundo o tipo de reforço (partículas e fibras) e em materiais compósitos estruturais.

As propriedades mecânicas de um material compósito reforçado com partículas (PRC - particulate reinforced composites), dependem de um conjunto de parâmetros, tais como: comprimento, forma, distribuição e composição das partículas de reforço [7, 20].

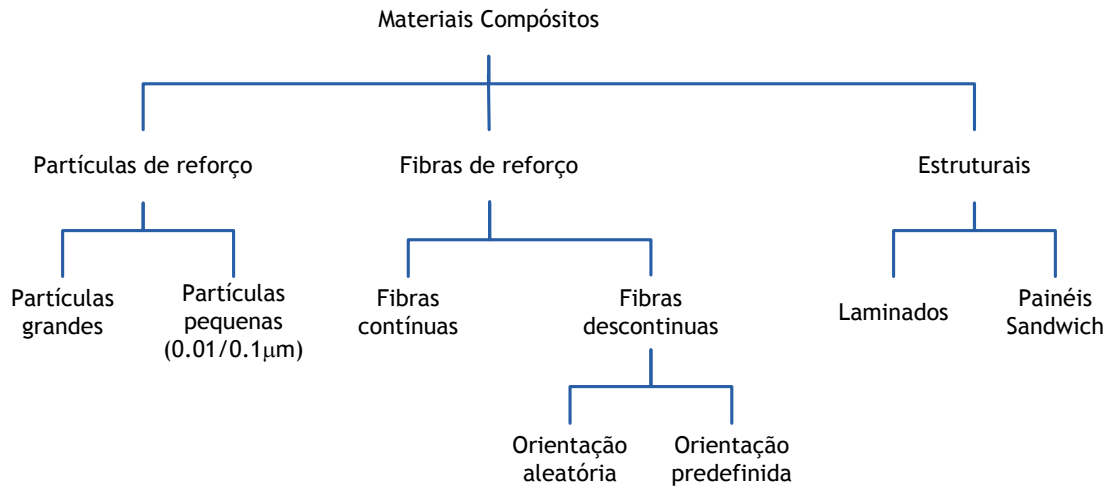


Figura 1.8 - Classificação dos diversos tipos de materiais compósitos [19].

No caso dos materiais compósitos reforçados com fibras, as suas propriedades 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, 21].

No que concerne aos compósitos reforçados com fibras descontínuas, e desde que estas estejam bem unidas à matriz, o esforço aplicado à mesma transmite-se para a fibra através da interface. Neste caso torna-se importante uma boa adesão fibra/matriz, a qual se consegue com recurso aos tratamentos à base de silanos (tratamentos químicos) [22]. Deste modo temos interfaces mais resistentes e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. Por outro lado segundo Hancock e Cuthbertson [23] e Dingle [24], existe um valor do comprimento da fibra para o qual o valor da resistência à tracção é o mesmo, quer se utilizem fibras descontínuas ou contínuas, e está directamente relacionado com o comprimento crítico (l_c). Estudos efectuados pelos primeiros autores mostram, por exemplo, que a resistência mecânica de um compósito de resina epóxi e fibras de vidro orientadas na direcção da carga com um comprimento de $4l_c$, é na ordem dos 90 % da obtida com fibras contínuas, acabando mesmo por apresentar valores idênticos para um comprimento de $10l_c$. Resultados da mesma ordem de grandeza foram obtidos por Dingle [24] em compósitos semelhantes, mas com fibras de carbono.

1.3 - Fibras

Como vimos anteriormente são as fibras, como elemento de reforço, as 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. Seguidamente serão abordadas as principais fibras, de origem sintética e natural utilizadas como elemento de reforço nos materiais compósitos.

1.3.1 - Fibras Sintéticas

Fibras de Vidro - As fibras de vidro são as mais usadas como elemento de reforço e o seu processo de fabrico baseia-se no estiramento do vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios calibrados. À temperatura de 1260 °C a sílica sofre um processo de fusão com outros minerais conferindo, deste modo, as propriedades desejadas ao fim a que se propõem. O diâmetro das fibras comerciais varia entre 3 a 20 µm [2, 25]. As suas principais características são: 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. Na tabela 1.3 são indicados alguns tipos de fibras de vidro bem como os seus nomes comerciais, não estando, no entanto, todas sujeitas às especificações ASTM [25].

Tabela 1.3 - Tipos de fibras de vidro e suas características [25].

Tipo	Designação	Propriedade e/ou característica
E	Eléctrica	Baixa condutibilidade eléctrica
S	Força	Alta resistência
C	Química	Alta durabilidade química
M	Módulo	Elevado módulo de elasticidade
A	Alcalina	Elevada resistência alcalina
D	Dieléctrica	Baixa constante dieléctrica

Fibras de Aramida - As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas pela “E.I. Du Pont de Nemours & Company, Inc” (USA)., sob o nome comercial de Kevlar®. A solução polimérica é mantida a baixa temperatura (entre -50 °C e -80 °C) sendo, posteriormente, estrugida a uma temperatura de aproximadamente 200 °C [2, 25]. Actualmente, encontram-se disponíveis no mercado dois tipos de fibras, classificadas de acordo com as suas propriedades mecânicas:

– As fibras “standard”, Kevlar®29, Twaron® ou HM.50®, com aplicações correntes em cabos, componentes de baixo coeficiente de atrito e objectos de protecção pessoal;

– As fibras de elevado módulo, Kevlar[®]49 ou Twaron HM[®] para aplicações em cascos de barcos, estruturas de aviões, capacetes, coletes de protecção balística e automóveis de competição.

De um modo geral estas fibras 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 [2].

Fibras de Carbono - Existem dois tipos de fibras de carbono. Aquelas que apresentam percentagens de carbono entre 80 % e 95 % e as de grafite, onde o teor deste elemento chega aos 99 %. A técnica mais utilizada na produção destas fibras consiste na decomposição térmica de vários precursores orgânicos, tais como: a celulose, que dá origem às chamadas “rayon fibers”, o poliácridonitrilo (PAN) e o alcatrão “pitch” [2]. Embora o tratamento específico para cada precursor seja diferente, basicamente segue a seguinte sequência: fiação, estabilização, carbonização e a aplicação de um revestimento ou cola para facilitar o seu manuseamento. Neste contexto podemos dizer que inicialmente são estabilizadas entre os 200 °C e os 300 °C numa atmosfera rica em oxigénio, sofrendo posteriormente um aquecimento até uma temperatura que pode variar entre 1000 °C e os 1500 °C sob uma atmosfera que ronda geralmente os 95 % em teor de carbono. Finalmente são submetidas a um tratamento de limpeza que, ao mesmo tempo, serve também para agrupar os grupos funcionais à superfície das fibras. Estas fibras caracterizam-se pela sua baixa massa específica, elevada rigidez, elevada tensão de rotura e baixo coeficiente de dilatação [2, 25].

As fibras de carbono são classificadas segundo a sua resistência mecânica e comercializadas de acordo com as seguintes designações:

- UHM (ultra high modulus) para fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- HM (high modulus) para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1 %;
- IM (intermediate modulus) para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo de cerca de 1 %;
- Fibras de baixo módulo, com valores inferiores a 100 GPa;
- HS (high strength) para fibras de resistências a tracção superiores a 3 GPa e rácio resistência/rigidez entre 0.015 e 0.02 [2].

Fibras de Boro - As fibras de boro são produzidas por deposição de boro na fase gasosa (tricloreto de boro) sobre um fio de tungsténio ou carbono, o qual actua como substrato. A estrutura da fibra depende dos vários parâmetros de deposição mas, essencialmente, da temperatura. Verificamos que para temperaturas de deposição na ordem dos 1300 °C as fibras apresentam estruturas amorfas, passando a ser cristalinas quando se utiliza temperaturas mais elevadas.

O diâmetro destas fibras pode chegar aos 200 μm , após deposição do boro num substrato com diâmetro na ordem dos 12 μm . De um modo geral apresentam baixa densidade e elevada resistência e rigidez. O módulo de elasticidade das fibras de boro é, por exemplo, cinco vezes superior aos das fibras de vidro, mas as primeiras são ligeiramente mais pesadas [2, 25, 26].

1.3.2 - Fibras Naturais

Existe uma grande variedade de fibras naturais que podem ser utilizadas como elemento de reforço, sobretudo em materiais compósitos que se encontram associados a desempenhos de menor exigência. A classificação destas fibras passa por agrupá-las de acordo com o seu tipo botânico, existindo segundo Pickering [27], seis grandes grupos conforme mostra a tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Seis tipos genéricos de fibras naturais [27].

Fio	Folha	Semente					Núcleo	Ervas/ canas	Outras
		Fibras	Vagem	Pele	Fruto	Casca			
Cânhamo	Ananás	Algodão					Kenaf	Trigo	Madeira
Ramie	Sisal		Capoca				Juta	Aveia	Raízes
Linho	Agave		Esponja vegetal				Cânhamo	Cevada	Galmpi
Kenaf	Henequen		Asclepia				Linho	Arroz	
Juta	Curaua			Fibra de coco				Bambu	
Mesta	Banana				Óleo de palma			Bagaço	
Urena	Abacá					Arroz		Cereais	
Roselle	Palma						Aveia	Colza	
	Cabuja							Trigo	Centeio
	Albardine								Centeio
	Ráfia								Esparto
	Curauá								Sabai
									Canary
									Ervas

O cânhamo é o nome comum das plantas pertencentes à família da cannabis, de crescimento em climas temperados, e faz parte das primeiras plantas cultivadas no mundo. O seu cultivo tem diminuído ao longo dos últimos dois séculos, embora seja uma das plantas naturais mais populares devido ao seu rápido crescimento (em menos de 140 dias) e à resistência mecânica das suas fibras. Com uma altura média de 4.5 m, depois de processada o comprimento final das fibras de cânhamo pode variar entre os 5 e os 55 mm e o diâmetro entre os 10 e os 51 μm [27].

O linho pertence à família das Linaceae (plantas com flor - divisão Magnoliophyta) e também faz parte das culturas mais antigas no mundo. É uma planta de cultivo anual em

climas temperados, sendo colhida para a produção de fibras após 100 dias ou quando a base da planta se torna amarela. Após processamento, o comprimento final das fibras varia entre os 9 e os 70 mm e o diâmetro entre os 5 e os 38 μm [27].

A juta é produzida a partir de plantas do género *Corchorus* que tem cerca de 100 espécies. É uma das fibras naturais mais baratas e é a mais produzida a seguir ao algodão. O ciclo de cultivo da juta é na ordem dos 120 dias, em climas quentes e húmidos, que depois de processada, conduz a fibras com um comprimento que varia entre os 2 e os 5 mm e um diâmetro entre os 10 e os 25 μm [27].

Finalmente o sisal pertence à família das plantas *Agavaceae*, com folhas que se assemelham a uma espada. Com uma vida útil entre os 7 e os 10 anos, geralmente produz 100 a 250 folhas de cor verde, na forma de uma roseta, em volta do tronco. Cada folha tem um comprimento médio de 1.5 m, 10 a 15 cm de largura, 6 mm de espessura e contém aproximadamente 1000 fibras. Depois de processadas, as fibras de sisal apresentam um comprimento final que pode variar entre 1 - 8 mm e o diâmetro final entre 8 a 41 μm [27].

1.3.3 - Principais Propriedades das Fibras

As principais propriedades, físicas e mecânicas, das fibras abordadas anteriormente encontram-se reunidas na tabela 1.5.

Podemos observar que as fibras de carbono são aquelas que apresentam maior módulo elástico, seguindo-se as fibras de aramida e as de vidro. No que diz respeito à resistência mecânica, os valores mais elevados ocorrem essencialmente nas fibras de carbono PAN e nas fibras de vidro.

1.4 - Matrizes

O tipo de matriz utilizada num material compósito pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas destes materiais. Num compósito ideal, quando a falha é dominada pela deformação, a matriz não se degrada durante o carregamento uma vez que o seu comportamento é dúctil quando comparado com o das fibras. Para além deste facto, acresce ainda a menor rigidez da matriz face ao elemento de reforço. 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].

Tabela 1.5 - Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras [1, 2, 11, 28].

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

No entanto a matriz apresenta outras funções para além de unir e transferir as cargas entre as fibras. Cabe-lhe também a responsabilidade de molhar completamente as fibras para, deste modo, protegê-las contra ataques químicos e/ou danos mecânicos como o desgaste. Finalmente desempenha um papel fundamental na qualidade do acabamento superficial do equipamento/estrutura.

Dos vários materiais possíveis de serem usados como matriz, os plásticos são aqueles que assumem maior expressão no domínio dos compósitos. Tal como nos polímeros temos dois grupos de matrizes, as termoplásticas e as termoendurecíveis, fazendo-se seguidamente uma breve abordagem às mais utilizadas.

1.4.1 - Matrizes Termoplásticas

As matrizes termoplásticas são formadas 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. Com o aumento da temperatura estas ligações são quebradas, passando a existir mobilidade molecular e deste modo, dá-se a conformação. Durante o arrefecimento, as moléculas mantêm as posições entretanto alcançadas. Este ciclo pode ser efectuado várias vezes. As matrizes termoplásticas apresentam maior resistência ao impacto e menor tenacidade que as termoendurecíveis [2].

Polipropileno (PP) - O polipropileno é um polímero do grupo das poliolefinas. Trata-se de um termoplástico branco e opaco com cristalinidade na ordem dos 60 a 70 %. Apresenta boa resistência ao impacto e rigidez, excelente resistência à distorção e aos ataques químicos por ácidos, álcalis e sais, mesmo a elevadas temperaturas. As suas propriedades mecânicas dependem largamente do peso molecular médio, da distribuição do peso molecular e das condições de processamento. A temperatura típica de processamento ronda os 200 °C [2].

Poliamida (PA) - As poliamidas, vulgarmente designadas por Nylons, têm designações específicas (por exemplo 6, 66, 11,) como resultado do número de átomos de carbono do ácido que deu origem ao amida-base. As poliamidas são fortemente higroscópicas, apresentam baixos coeficientes de atrito, grande resistência ao desgaste, boa resistência térmica e, nas variedades reforçadas, uma boa resistência mecânica [2].

Polycarbonato (PC) - O polycarbonato é um termoplástico amorfo que resulta da reacção de compostos de di-hidróxido aromático com ácido carbónico. É um polímero retardador de chama, transparente, incolor, pouco higroscópico, dimensionalmente estável, com boa resistência térmica, química e a exposição dos agentes ambientais. A sua resistência ao impacto é elevada, considerando-se mesmo a maior de entre os vários termoplásticos. A temperatura típica de processamento ronda os 200 °C [2].

Poli-éter-éter-cetona (PEEK) - A poli-éter-éter-cetona é um polímero semicristalino, com grau de cristalinidade máximo de 48 %. Apresenta temperatura de transição vítrea, (T_g), próxima dos 143 °C. Relativamente às resinas epóxicas, apresenta algumas vantagens como: maior tenacidade e menor absorção de água [2].

Poliimidas termoplásticas - As polietermidas (PEI) e as poliamidas-imidas (PAT) são dois exemplos de poliimidas termoplásticas. Ambas são polímeros amorfos, com temperaturas de transição vítrea (T_g) de 217 °C e 280 °C, respectivamente. 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 como hidrocarbonetos e solventes halogenados [2].

Polisulfureto de fenileno (PPS) - O polisulfureto de fenileno é um polímero semicristalino, com grau de cristalinidade máximo de 65 %, e uma temperatura de transição vítrea (T_g) na ordem dos 85 °C. Apresenta elevada resistência mecânica, excelente resistência química e pode ser usado até uma temperatura máxima de 225 °C [2].

1.4.2 - Matrizes Termoendurecíveis

As 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: resina, acelerador e catalisador. Quando misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização num processo que se designa habitualmente por “cura”. Nalguns casos o processo de cura ocorre à temperatura ambiente, todavia é vulgar o recurso ao calor para certas resinas ou quando se quer acelerar o processo de cura. As propriedades mecânicas destas resinas tendem a melhorar com um tratamento de pós-cura a altas temperaturas [2].

Poliésteres insaturados - As resinas de poliéster classificam-se em dois grupos as saturadas e as insaturadas. No primeiro grupo encontram-se os poliésteres comercializados sob a forma de filme ou fibras, resinas termoplásticas ou plasticizadores poliméricos. Todavia as resinas de poliéster insaturado 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. Por sua vez, dependendo da resistência química, as resinas de poliéster insaturado podem dividir-se em três grupos [2]:

- As resinas ortoftálicas, que têm aplicação geral;
- As resinas isoftálicas, que se distinguem por possuírem boa resistência térmica e que são aplicadas em meios levemente agressivos, húmidos ou sujeitos a condições ambientais bastante desfavoráveis;
- As resinas bisfenólicas, usadas em meios particularmente agressivos e sobretudo com características ácidas.

Resinas de vinitester - Estas resinas apresentam como características uma excelente resistência química, elevada tensão de rotura, baixa viscosidade e processo de cura rápido [2].

Resinas fenólicas - As resinas fenólicas têm geralmente excelente comportamento ao fogo, e baixa emissão de fumos. A sua principal desvantagem deve-se ao facto de, no processo de cura, ocorrer a libertação de produtos voláteis condicionando, deste modo, a sua utilização [2].

Resinas epóxicas - As resinas epóxicas apresentam grande variedade de formulações químicas, a maior parte delas baseadas no diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). Como principais vantagens podemos enumerar a sua elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos), e boas propriedades de adesão às fibras. O seu processo de cura decorre sem libertação de produtos voláteis, apresentam grande estabilidade dimensional (contrações na ordem dos 2 - 3 %), baixa absorção de água e podem ser utilizadas até uma temperatura máxima de 220 °C [2].

Poliimidas termoendurecíveis - As poliimidas termoendurecíveis são utilizadas em compósitos cujas aplicações exigem elevada estabilidade dimensional a temperaturas elevadas. As principais vantagens deste grupo de resinas são a sua 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. No entanto são resinas caras, de difícil processamento e absorvem bastante água [2].

1.4.3 - Principais Propriedades dos Materiais Poliméricos Utilizados nas Matrizes

As principais propriedades, físicas e mecânicas, dos materiais poliméricos abordadas anteriormente encontram-se resumidas na tabela 1.6.

1.5 - Nanopartículas

1.5.1 - Visão Global Sobre a Nanotecnologia

A nanotecnologia pode ser entendida como a compreensão, criação, processamento e manipulação da matéria com dimensões de 1 a 100 nanómetros (1 nanómetro = 10^{-3} μm = 10^{-9} m). Para termos uma melhor percepção destas dimensões, podemos constatar que uma folha de papel tem uma espessura na ordem dos 100.000 nanómetros [29 - 32]. Todavia a figura 1.9, estabelece uma comparação, dentro da mesma escala dos, diferentes tamanhos que estamos rodeados.

Tabela 1.6 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas matrizes poliméricas resinosas constituintes de materiais compostos [1, 2, 11, 28].

Material	Massa específica, ρ [kg/m ³]	Módulo de elasticidade, E [GPa]	Resistência a tracção, σ_r [GPa]	Alongamento à rotura, A [%]	Coefficiente de 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

A palavra “nanotecnologia”, propriamente dita, foi inventada por Nario Taniguchi no ano de 1974 para descrever a maquinagem com tolerâncias de menos de um micron. Todavia esta não é a verdadeira origem do termo. Em 1959 o físico Richard Feynman Caltech dá a sua famosa palestra “There’s Plenty of Room at the Bottom” (Há muito espaço na parte inferior) delineando, deste modo, as perspectivas para a engenharia nuclear. Em 1981 Heinrich Rohrer e Gerd Binnig (prémio Nobel em 1986), da IBM’s Zurich Research Laboratory, inventaram o microscópio com efeito de túnel, permitindo assim aos investigadores ver e manipular átomos pela primeira vez. Em 1985 Robert F. Curl Jr., Harold W. Kroto e Richard E. Smalley descobrem uma molécula de carbono com a forma de uma bola de futebol, medindo aproximadamente 0.7 nm de diâmetro [33].

Neste contexto foi criada em 2001 o National Nanotechnology Initiative (NNI) tendo como principais funções o desenvolvimento e aplicação da nanotecnologia, com vista à segurança e qualidade de vida de todos os cidadãos [30]. A figura 1.10 mostra a cronologia dos acontecimentos mais significativos e uma perspectiva dos desenvolvimentos no domínio da nanotecnologia nos tempos mais próximos.

Podemos dizer que existe um sentimento generalizado em que a nanotecnologia será a próxima Revolução Industrial, com aplicação aos mais variados domínios. Ambiente mais limpo, menor desperdício industrial, materiais mais leves e resistentes, computadores mais rápidos e tratamentos mais eficazes ao nível da saúde são esperados.

Ao que concerne aos materiais compósitos espera-se que com a introdução da nanotecnologia seja possível melhorar significativamente as propriedades físicas e mecânicas destes materiais mesmo com recurso a percentagens muito pequenas de nanopartículas. A produção de nanocompósitos é actualmente um negócio em expansão, prevendo-se uma taxa de 25 % ao ano e um volume de negócio na ordem dos £ 1,1 bilhões em 2010 [34].

1.5.2 - Tipos de Nanopartículas

Os nanocompósitos actualmente abrangem uma grande variedade de materiais amorfos e/ou compostos, contendo diferentes constituintes, que se, misturam numa matriz à escala nanométrica. O material da matriz pode ser único ou uma combinação de vários componentes. Dependendo da natureza da matriz, estes podem ser agrupados em três categorias [35]:

- Nanocompósitos poliméricos (PNCs);
- Nanocompósitos cerâmicos (CNCs);
- Nanocompósitos metálicos (MNCs).

Ao nível do reforço existem actualmente diferentes tipos de nanopartículas, apresentando-se seguidamente as mais utilizadas [30]:

- Montmorillonite organoclays (MMT);

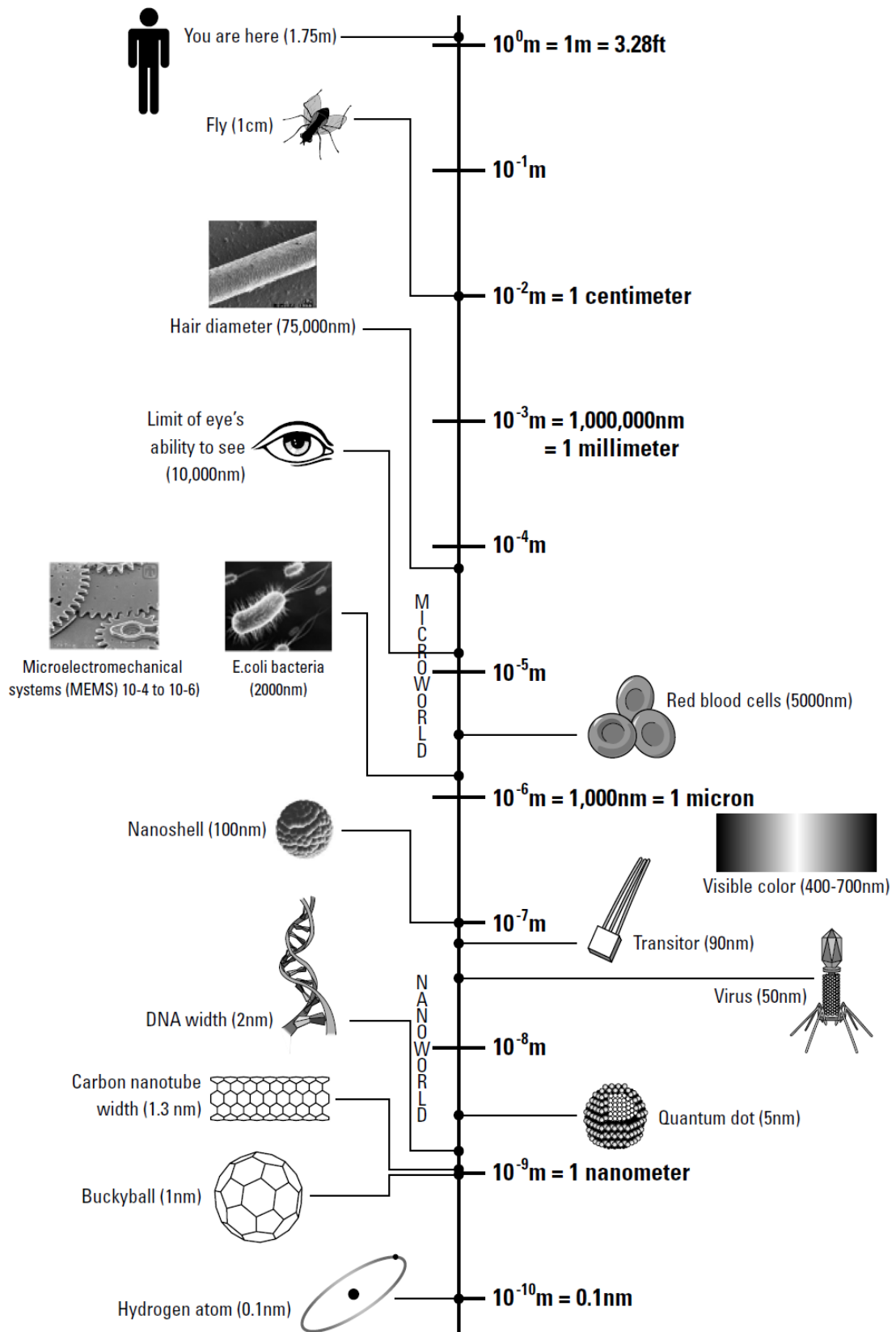


Figura 1.9 - Comparação desde o ser humano (1.75 m) até um átomo de hidrogénio (0.1 nm) [33].

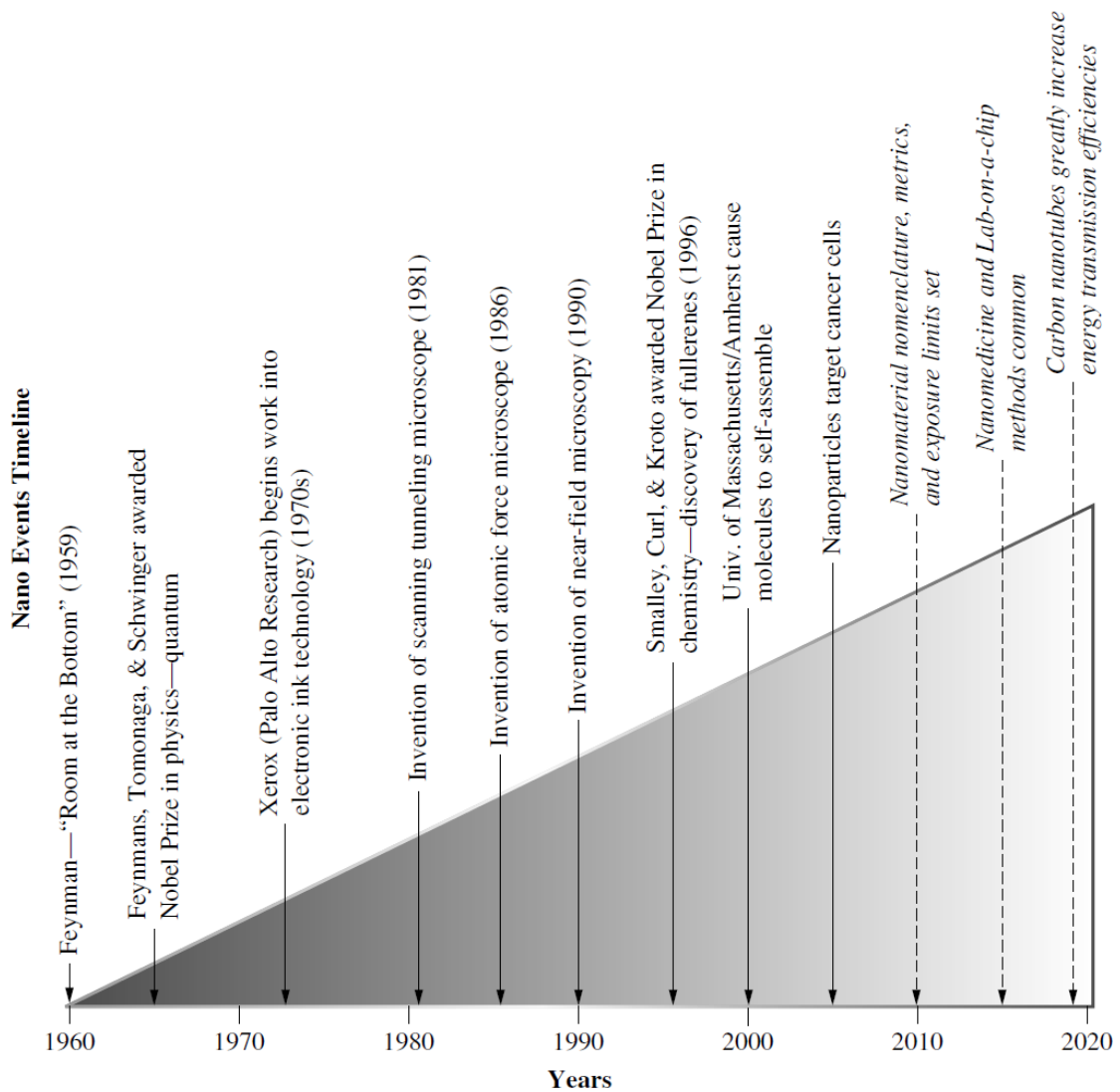


Figura 1.10 - Desenvolvimento da nanotecnologia [36].

- Nanofibras de carbono (CNFs);
- Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS®);
- Nanotubos de carbono [varias paredes (MWNTs), de pequeno diâmetro (SDNTs), e de parede simples (SWNTs)];
- Nanosílica (N-sílica);
- Óxido de nano-alumínio (Al₂O₃) e
- Óxido de nano-titânio (TiO₂);

A literatura científica revela, por exemplo, que o primeiro nanocompósito comercializado foi o nylon 6/montmorillonite (MMT), desenvolvido pelos laboratórios Toyota Central R&D em 1987 [28, 37]. Este material revelou melhorias significativas ao nível das propriedades mecânicas (a resistência à tracção aumentou 55 % e o módulo de elasticidade

aumentou 91 %), quando comparado com o polímero de base, apesar das baixas quantidades de reforço usadas (4.2 % de nanoclays em peso). Desde então os avanços neste domínio não têm parado.

Os nanoclays, são nano argilas que, devido a sua estrutura iônica e propriedades químicas, na sua forma natural ou modificada se ligam/misturam com os polímeros formando assim nanocompósitos. A sílica e a alumina são elementos dominantes dos clays, cuja estrutura cristalina se encontra ilustrada na figura 1.11.

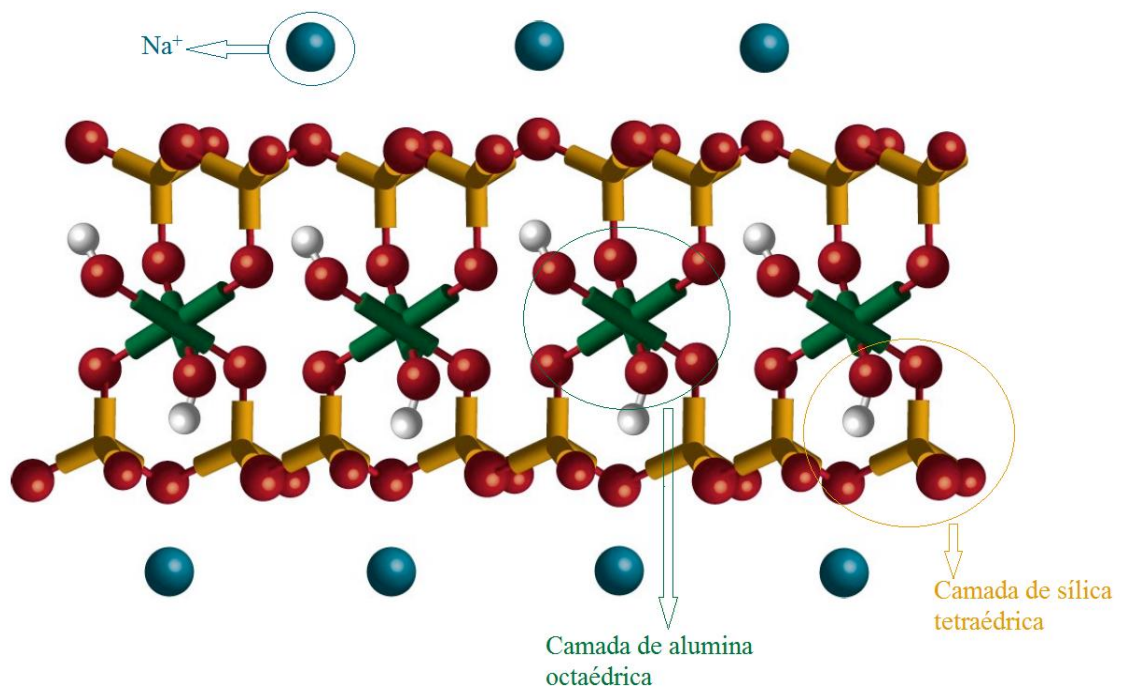


Figura 1.11 - Estrutura cristalina da nano argila [30].

A camada de sílica é constituída por grupos de tetraedros de SiO_4 , enquanto a camada de alumina consiste em dois planos de oxigênio entre os quais átomos de alumínio octaedricamente organizados são encaixados de tal modo que são equidistantes a seis átomos de oxigênio. A camada tetraédrica da sílica encaixa na camada octaédrica de alumina, partilhando os átomos de oxigênio dos vértices. Estas três camadas formam como que uma folha de argila com uma espessura de 0.96 nm, contendo mais de três mil camadas planas, como mostra a figura 1.11. A forma química da argila é $\text{Na}_{1/3}(\text{Al}_{5/3}\text{Mg}_{1/3})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ [30].

Os silicatos mais usados nos nanocompósitos são a montmorillonite, a hectorite e a saponite, cujas formulações químicas se encontram representadas na tabela 1.7.

Tabela 1.7 - Fórmulas químicas e parâmetros característicos dos silicatos mais usados [38].

Silicato	Fórmula	CEC [mequiv/100g]	Comprimento da partícula
Montmorillonite	$M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	110	100-150
Hectorite	$M_x(Mg_{6-x}Li_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	120	200-300
Saponite	$M_xMg_6(Si_{8-x}Al_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	86.6	50-60

M representa catiões monovalentes; x grau de substituição isomórfica (entre 0.5 e 1.3)

1.5.3 - Nanocompósitos

Conforme temos vindo a referir ao longo deste texto os compósitos têm vindo a substituir os ditos materiais tradicionais, como por exemplo os metais, devido a sua elevada resistência e rigidez específica. Neste caso os nano compósitos utilizam fracções volumétricas muito baixas de nanopartículas na sua composição, visando melhorias significativas ao nível das propriedades mecânicas, térmicas, eléctricas e retardante de chamas sem comprometer a densidade, tenacidade ou processo de manufactura [39 - 43]. Para isto contribui a grande área de superfície/interface por unidade de volume obtida e, conseqüentemente, o aumento da interacção física e química com a matriz. Contudo para maximizar as propriedades mecânicas as nanopartículas presentes nos polímeros devem estar bem distribuídas para altear a sua estrutura. Independentemente do tipo de nanopartícula utilizada é vulgar a sua tendência para se aglomerarem, mesmo para baixas fracções volumétricas, com o conseqüente aumento da viscosidade e perda de propriedades. Deste modo é necessário garantir a sua total dispersão, a qual pode ser obtida por meios mecânicos (misturadores de elevada rotação que promovem elevadas tensões de corte na mistura e/ou ultra-sons) ou, mais recentemente com o recurso de tensoativos (substâncias que diminuem a tensão superficial) ou a funcionalização química. Simultaneamente estes últimos tratamentos promovem uma maior adesão entre a matriz e as nanopartículas.

Relativamente aos nanoclays, e dependendo dos componentes (tipo de polímero, concentração de clays, etc.) bem como o método de preparação, quatro níveis de dispersão podem ocorrer conforme ilustra a figura 1.12 e 1.13.

No primeiro caso, figura 1.12a), as partículas estão no seu estado agregado original não permitindo assim a inserção da matriz polimérica entre as diferentes camadas (lamelas) dos clays. Neste caso eventuais melhorias das propriedades podem ser obtidas. A figura 1.12b) mostra, neste caso, uma configuração onde os clays estão intercalados e dispersos mas o polímero não molha completamente as lamelas (não existe completa inserção da matriz entre as lamelas). As propriedades mecânicas do nanocompósito reflectem, neste caso, as do cerâmico introduzido (clays). Melhores propriedades serão então obtidas se os clays se encontrarem esfolheados e intercalados como mostra a figura 1.12c). Finalmente a literatura reporta melhorias significativas nas propriedades mecânicas quando se obtêm completa esfoliação e dispersão.

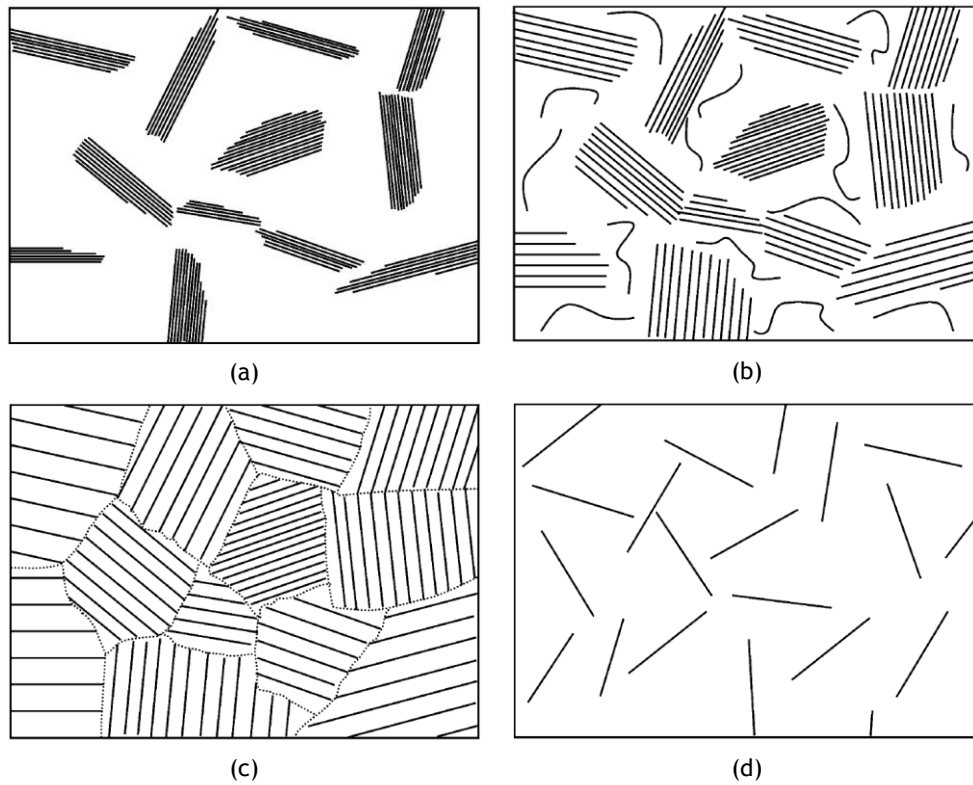


Figura 1.12 - Tipos de polímeros/argilas compósitas: (a) Particularmente dispersas; (b) Intercaladas e totalmente disperso; (c) Dispersas e intercaladas e (d) Totalmente intercaladas e dispersas [41].

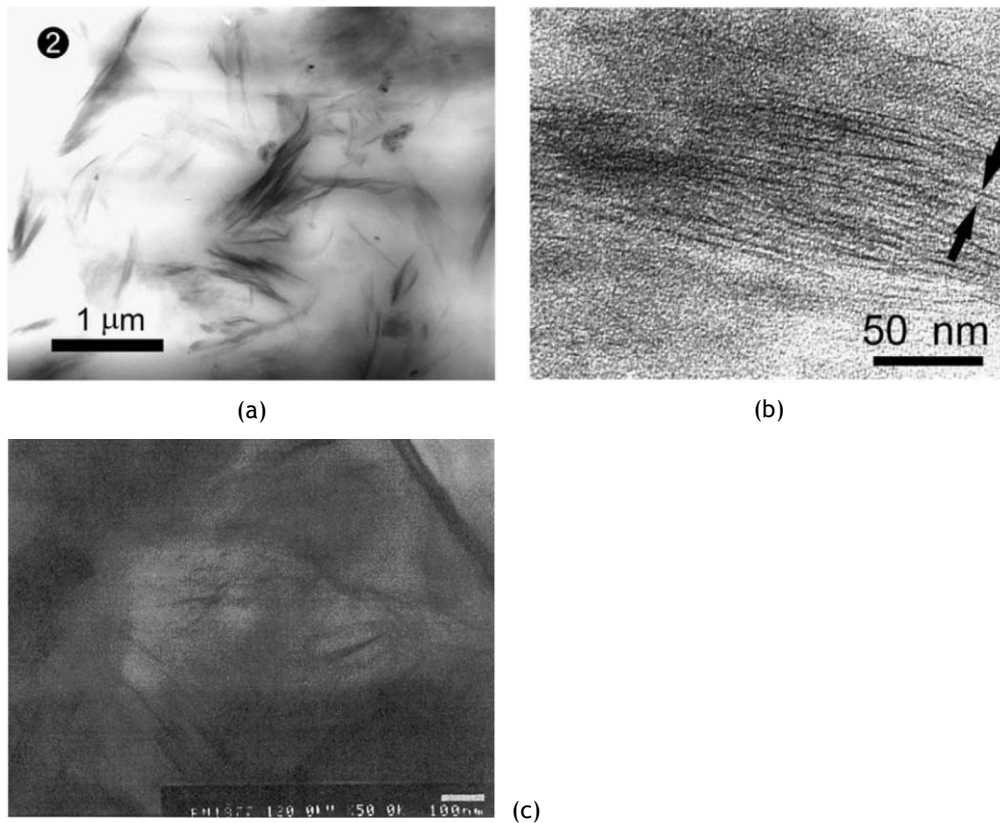


Figura 1.13 - Micrografia TEM mostrando: (a) Clays esfolheados e intercalados [41]; (b) Clays bem intercalados [41]; (c) Clays esfolheados [44].

Capítulo 2

Impacto em Materiais Compósitos

Este capítulo pretende abordar o fenómeno das cargas de impacto em materiais compósitos. Inicialmente o impacto será classificado na perspectiva de vários autores, fazendo-se, seguidamente, uma abordagem aos diferentes mecanismos de dano. Neste caso será dado principal enfoque aos danos ocorridos para impactos a baixa velocidade. Finalmente serão abordadas as técnicas não destrutivas utilizadas para detecção/análise dos danos induzidos por impacto a baixas velocidades.

2.1 - Introdução

Ao nível do projecto deve-se garantir que um componente/estrutura desempenhe as suas funções sem que ocorra falha em serviço. Para tal é necessário dimensiona-lo de modo a que não ocorra nenhum dos possíveis modos de ruína, o que, deste modo, é de extrema importância o conhecimento do tipo de cargas aplicadas. Neste caso a nossa atenção recai de imediato nas cargas estáticas e nas solicitações dinâmicas, mas não devemos menosprezar o efeito das cargas de impacto, onde a forças é exercida num curto espaço de tempo.

Ao nível dos materiais compósitos destacamos a sua elevada resistência e rigidez específica, no entanto a sua resistência ao impacto (na direcção da espessura) é bastante reduzida quando comparada com a dos metais.

Torna-se assim necessário um conhecimento aprofundado neste domínio, de modo a conhecer as suas limitações, e numa perspectiva mais abrangente, o seu comportamento em serviço.

2.2 - Classificação do Impacto

A velocidade de impacto encontra-se directamente relacionada com o tempo de actuação da carga e, conseqüentemente, com o dano verificado nos materiais compósitos. Segundo vários autores, e de acordo com o valor da velocidade, as solicitações de impacto dividem-se em duas categorias: impacto de baixa velocidade e impacto de alta velocidade [45, 46]. Estes dois fenómenos deferem em termos do comportamento do material e do dano que provocam.

Impacto de baixa velocidade, ou de grande massa, caracteriza-se por uma extensa zona danificada e por uma resposta global da estrutura. O tempo de contacto do impactor

com a amostra é cerca de 5 a 10 milissegundos, surgindo a possibilidade da sua simulação por meio de um teste de carregamento quase estático. Por outro lado o impacto de alta velocidade, ou de pequena massa, provoca uma resposta de carácter localizado, praticamente sem deformação global da estrutura, podendo existir ou não perfuração. O tempo de contacto, neste caso, é muito reduzido e é associado normalmente à balística [2, 47].

Hogg *et al* [45] definem impacto de baixa velocidade quando este se situa entre 1 a 10 m/s. Impactos superiores a 100 m/s são classificados como testes balísticos, enquanto que a uma velocidade superior a 1000 m/s são denominados de impactos a hiper-velocidade. Por outro lado, Sierakowski *et al* [46], classifica os impactos de acordo com a tabela 2.1. Neste caso associam um valor adimensional característico, dado pela equação $\rho v^2 / \sigma_y$, onde ρ representa a massa volúmica da amostra de material, v a velocidade do impactor no momento de impacto e σ_y a tensão média do material.

Tabela 2.1 - Velocidade de impacto [46].

Velocidade (m/s)	$\rho v^2 / \sigma_y$	Regime
2.5	10^{-5}	Quasi-elástico estático
25	10^{-3}	Início do comportamento plástico
250	10^{-1}	Baixa velocidade de impacto
2500	10^1	Deformação plástica extensa, velocidade de impacto comum
25000	10^3	Hiper-velocidade de impacto

Por sua vez Robinson *et al* [48] definiu o impacto de baixa velocidade como sendo aquele em que a onda de tensão não desempenha qualquer papel importante na distribuição de tensões e sugeriu um modelo simples para fazer a transição para a alta velocidade. Neste caso considera uma área cilíndrica sob o impactor onde a deformação é uniforme, como resultado da onda de tensão que se propaga através da placa, e é dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{\text{velocidade de impacto}}{\text{velocidade do som no material}} \quad (2.1)$$

Segundo este autor, deformações à rotura na ordem dos 0.5 e 1 % ocorrem para eventos entre os 10 a 20 m/s em compósitos a base de epóxi.

De acordo com Zukas *et al* [49], 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 e a resposta da estrutura torna-se secundária no estudo do comportamento do material na área de impacto. O impacto a hiper-velocidade dá-se para velocidades superiores a 2 km/s, onde as pressões locais excedem a resistência do material, podendo os sólidos em colisão ser tratados como fluidos na fase inicial do impacto. 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. De acordo com os vários intervalos de velocidade os fenómenos de impacto encontram-se apresentados na tabela 2.2 [49, 50].

Tabela 2.2 - Fenómenos físicos associados a intervalos de impacto [49, 50].

Velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$	Velocidade de impacto	Efeitos	Causas
10^8	>12 km/s	Impacto explosivo com vaporização	-
10^6 a 10^7	3 a 12 km/s	Impacto hidrodinâmico compressível	Aceleração por explosão
10^4 a 10^6	2 a 3 km/s	Comportamento como fluido. Tensões máximas	“Canhão” de gás ou detonador sólido
10^2 a 10^4	0.5 a 1 km/s	Resposta viscosa ainda significativa	“Canhão” com detonador sólido
1 a 100	50 a 500 m/s	Comportamento plástico	Mecânica ou arma de ar comprimido
<1	<50 m/s	Comportamento elástico com plasticidade localizada	Mecânica ou arma de ar comprimido

Para Ruiz e Harding [51] existem três regimes. Impacto para velocidades da ordem dos 300 m/s, onde o impactor penetra/perfura a superfície de embate com danos confinados a uma pequena área (em torno do impactor). 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. Neste caso a análise efectuada deve ser dinâmica. Finalmente para velocidades abaixo dos 50 m/s onde ocorrem múltiplas reflexões nas fronteiras da estrutura até se atingir o equilíbrio quasi-estático.

Olsson [52] defende uma divisão tendo como base a deformação da placa: deformação da placa completa, onde a duração do impacto é muito maior que o tempo levado pelas ondas de deformação a atingir as fronteiras e a reflectir (quasi-estático), e a deformação focalizada numa pequena região em torno do ponto de contacto impactor/superfície impactada, onde o tempo de contacto é muito reduzido (as vibrações não podem ser desprezadas).

Finalmente Swanson [53] considera a onda de tensão que ocorre na estrutura como principal meio de classificação do impacto.

2.3 - Danos Provocados por Impacto

De um modo geral podemos dizer que os materiais compósitos estão sujeitos às mesmas fontes de dano que os metais, as quais se podem agrupar em três categorias: defeitos de projecto, defeitos durante o fabrico e defeitos ocorridos em serviço. Do ponto de vista dos defeitos que surgem nos componentes em serviço as cargas por impacto revelam-se, como vimos, determinantes nos materiais compósitos. Se a resistência mecânica é fortemente afectada nas estruturas sujeitas a impacto de alta velocidade, o dano causado não se revela um grande problema, em termos de detecção, pois estes são facilmente detectados por inspecção visual e prontamente reparados. Contudo, o mesmo não acontece com os impactos a baixa velocidade. Neste caso pequenas quantidades de energia podem ser absorvidas através de mecanismos de dano muito localizados e sem grande deformação plástica. O dano não é visível na superfície exterior, e nem tão pouco a olho “nu”, pelo que se torna necessário o recurso a técnicas adequadas para a sua detecção. Por outro lado estes defeitos diminuem a resistência residual à compressão até 60 % [54-60], assim como a sua resistência à flexão também é significativamente afectada [61].

Vários tipos de defeitos podem ocorrer como: delaminações, rotura de fibras, fissuração da matriz e separação fibra/matriz. No caso das fissuras que ocorrem na matriz, estas não conduzem a reduções significativas das capacidades mecânicas, mas afectam como promotoras das delaminações. Dado as fibras serem o elemento de reforço, a sua rotura por impacto afecta acentuadamente a resistência mecânica dos laminados. Finalmente as delaminações revelam-se o dano mais importante nos compósitos, pois conduz a redução drástica de resistência e rigidez dos laminados.

A sequência de empilhamento das camadas nos compósitos laminados desempenha um papel na tolerância ao dano. A sua propagação pode ter início no lado do impacto ou no lado contrário conforme a amostra seja rígida ou flexível. Para cargas de impacto que geram grandes tensões de tracção na camada mais afastadas do ponto de contacto conduzem a danos na interface fibra-matriz que, por sua vez, induzem delaminações (figura 2.1a)). Os níveis de energia que promovem o dano local (esforço de contacto) dão origem essencialmente a falhas na interface fibra/matriz com a conseqüente delaminação (figura 2.1b)) [46].

Na verdade a resposta mecânica dos materiais compósitos sujeitos a impacto de baixa velocidade é um problema que envolve vários parâmetros.

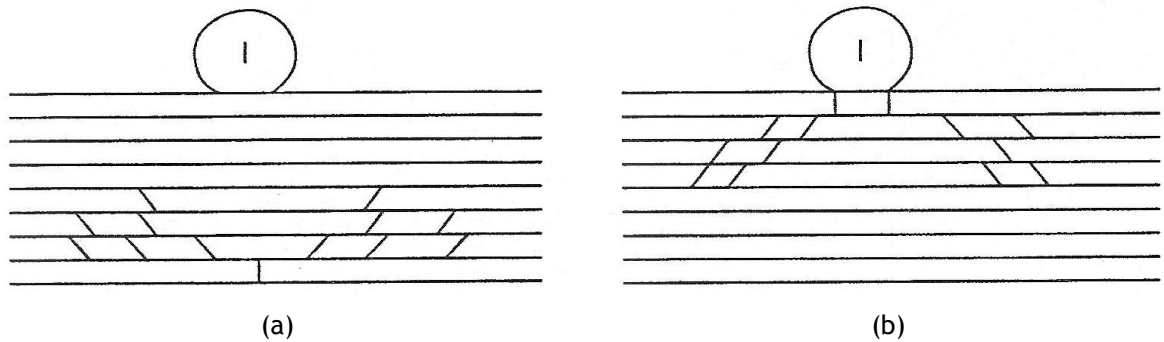


Figura 2.1 - Representação esquemática da progressão dos danos devido a: (a) Esforço de flexão; (b) Esforço de contacto [46].

2.4 - Técnicas não Destrutivas para Avaliação de Danos

O estudo de uma zona danificada num compósito geralmente é de natureza complexa, pois pode ser constituída por quebra de fibras, delaminações e fendas na matriz. Na maioria dos casos, em particular no impacto de baixa velocidade, a maioria dos danos são internos e não podem ser detectados a olho nu. Deste modo são necessárias técnicas de detecção adequadas para descobrir e caracterizar estes danos [62, 63]. Na tabela 2.3 faz-se um resumo das técnicas de avaliação não destrutiva NDE (Non-Destructive Evaluation) utilizadas para avaliação dos danos. Seguidamente serão abordados algumas técnicas com algum detalhe.

Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)

Esta técnica surge a partir das técnicas de Interferometria Holográfica. As emulsões fotográficas inicialmente utilizadas permitiam registar até 3000 linhas/mm, enquanto os sensores de CCD (Charge Coupled Device) não vão além das 50 linhas/mm. Actualmente é possível registar 25 hologramas por segundo sem revelação química e sem necessidade de reposicionamento do holograma. Dependendo da configuração óptica do sistema de ESPI, este pode ser sensível a deslocamentos fora do plano, isto é, deslocamentos paralelos à direcção de observação, bem como no plano onde detecta deslocamentos perpendiculares à direcção de observação. Uma representação esquemática do sistema ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) é apresentada na figura 2.2 e na figura 2.3 ilustra-se uma imagem típica obtida por este sistema para um dano num compósito laminado $[0,90,0,90]_{2s}$ sujeito a uma energia de impacto de 3 J.

Sistema Shearography

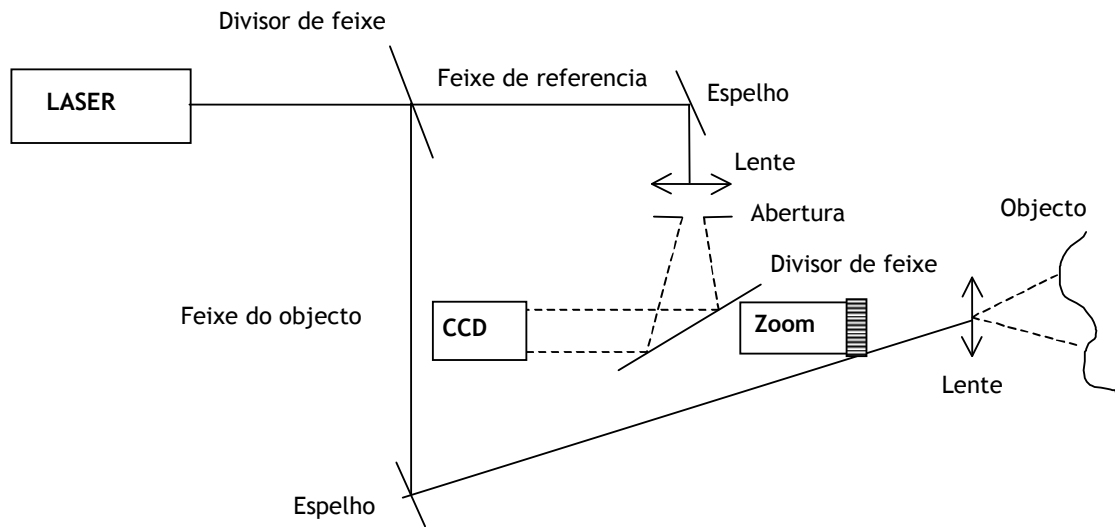
Shearography é um método muito compacto e simples que permite a observação interferométrica de tensões superficiais [64]. O interferómetro usado na shearography é semelhante ao utilizado para a medição de deslocamentos fora do plano, baseando-se no interferómetro de Michelson. A figura 2.4 mostra esquematicamente a geometria do interferómetro. A luz proveniente da fonte de iluminação é usada para iluminar apenas o

objecto. Um ligeiro desalinhamento nas duas imagens permite a interferência entre pontos vizinhos, a uma distância fixa, e a obtenção de gradientes de deformação.

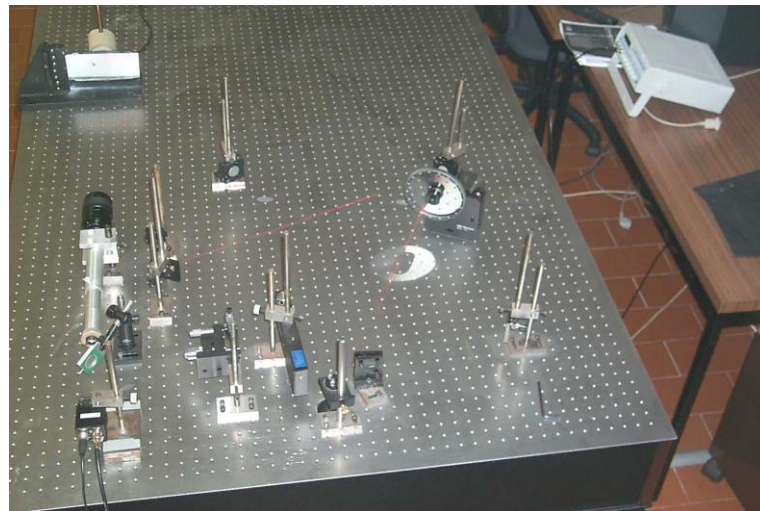
Uma característica muito importante deste tipo de equipamento é a sua baixa sensibilidade a perturbações exteriores, pois as frentes de onda que interferem percorrem praticamente o mesmo caminho [65]. Na figura 2.5 apresentam-se duas imagens típicas de um dano ocorrido num laminado $[0,90,0,90]_{25}$ com uma energia de 3 J.

Tabela 2.3 - Técnicas para avaliação de defeito [46].

	Principais características detectadas	Vantagens	Limitações
Radiografia	Absorção diferencial da radiação penetrante	Imagem apresenta relatório da inspecção, extensa base de dados	Caro, profundidade do defeito J não indicado, protecção da radiação J
Topografia computacional	Tecnologia convencional de raio-X com processamento digital	Identifica a localização do defeito. A visualização da imagem é controlada por computador	Muito caro, estruturas com paredes finas podem causar problemas
Ultrassons	Mudanças na impedância acústica J causados por defeitos	Podem penetrar em materiais espessos, pode ser automatizado	Necessária imersão em água
Emissão acústica	Defeitos que geram ondas de tensão	Vigilância remota e contínua	Exige a aplicação de estresse para detecção de defeitos
Acústica ultra-sónica	Utilização de impulsos de ultra-som para estimulação de ondas de tensão	Portátil quantitativo, automatizado, imagem gráfica	Contacto superficial, geometria da superfície crítica
Termografia	Mapeamento da distribuição da temperatura ao longo da área de ensaio	Rápida, medição distante. Não precisa de contacto com a peça, quantitativo	Baixa resolução para amostras espessas
Holografia óptica	Imagem 3D	Não exige nenhuma preparação especial da superfície ou revestimento	Exige ausência de vibrações, necessária uma base forte
Correntes de Foucault	Mudanças nas condições eléctricas causado por variações de material	Facilmente automatizado, custos moderados	Limitadas as condições eléctricas, materiais e profundidade de penetração limitada



a)



b)

Figura 2.2 - Sistema ESPI: a) Representação esquemática; b) Aparelhos montados [63].

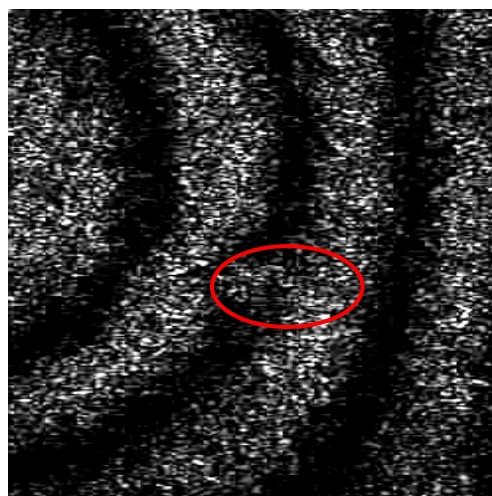
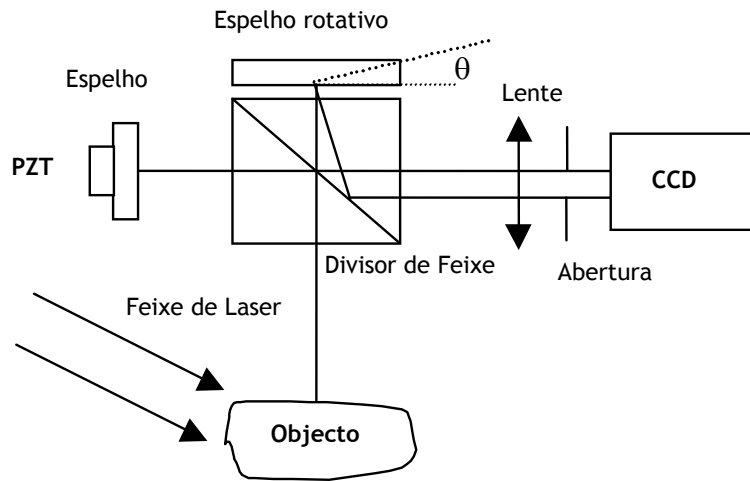
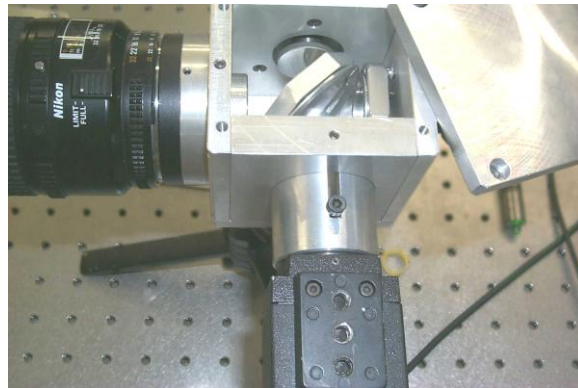


Figura 2.3 - Imagem dos danos obtidos pela técnica ESPI para laminados $[0,90,0,90]_{25}$ [63].

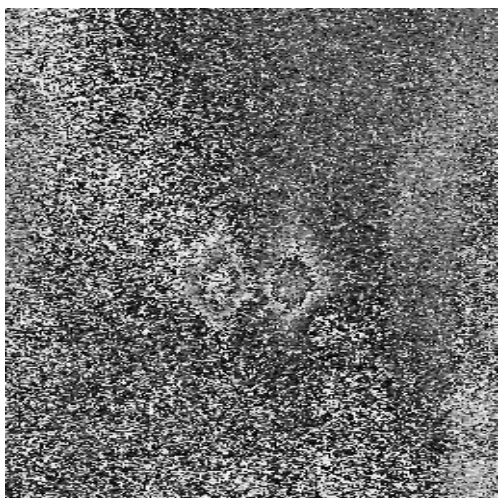


a)

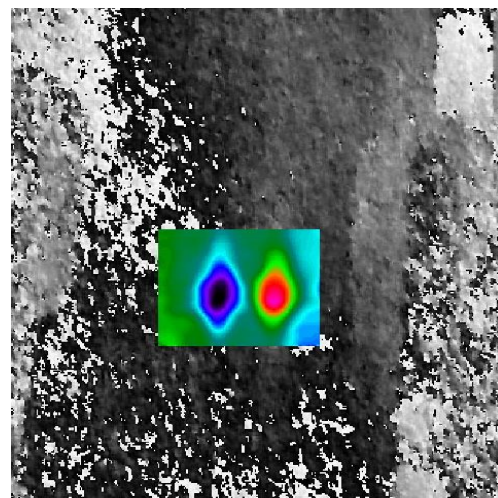


b)

Figura 2.4 - Shearography sistema: a) Representação esquemática; b) Imagem da câmara aberta [63].



a)



b)

Figura 2.5 - Imagem dos danos obtidos pela técnica shearography para laminados $[0,90,0,90]_{25}$: a) No mapa de fase; b) Em falsa cor [63].

Ultrassons

Nos testes de ultrassons, as ondas de tensão são introduzidas no componente alvo de análise e em seguida é monitorizada a sua reflexão. Para tal são usadas transdutores piezoelétricos ou sondas capazes de produzir e receber ondas acústicas. Basicamente são sistemas capazes de converter impulsos eléctricos em vibrações e, posteriormente, converter vibrações mecânicas em sinais eléctricos para respectiva análise. É essencial que as ondas de tensão se propaguem de forma eficaz entre os transdutores e o componente em análise, ou seja, é necessário um meio de transmissão entre o transdutor e o componente para garantir uma transmissão acústica satisfatória. Neste caso é vulgar o recurso à água ou geles. Todavia o uso da água nem sempre é o mais adequado, sempre que esta seja absorvida pela matriz ou possa contaminar a área de dano [62]. Na figura 2.6 encontram-se representado o esquema C-Scan e na figura 2.7 é ilustrado um defeito obtido por esta técnica num laminado $[0,90,0,90]_{25}$ sujeito a um impacto de 3 J.

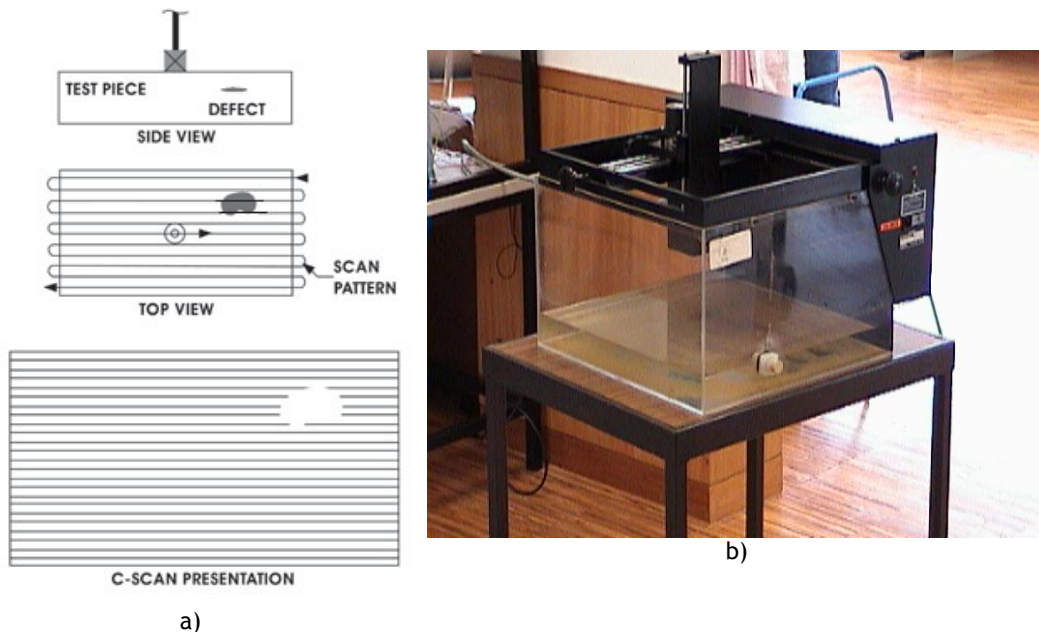


Figura 2.6 - Sistema de ultrassons: a) Representação esquemática; b) Equipamento de ultrassons C-Scan [63].

Raios X

A radiografia com recurso aos raios X é um método clássico utilizado na detecção de defeitos/danos em compósitos. É particularmente útil em compósitos reforçados com fibra de vidro pois determina a distribuição e alinhamento das fibras, bem como a detecção de vazios e defeitos. No entanto, no caso de compósitos de fibra de carbono, devido aos semelhantes coeficientes de absorção das fibras de carbono e matriz, os raios X não podem ser usados para detecção das fibras [62]. Esta técnica consiste numa fonte de raios X, cuja intensidade de radiação váia ao longo da passagem pelo material e seus defeitos. A densidade ou contraste

no filme, após a revelação, permite a visualização da região que contém o defeito. As regiões mais escuras no filme correspondem a zonas de fácil penetração de raios X (ausência de danos), enquanto as mais brilhantes resultam da presença do defeito [63]. Tal como no método C-Scan, a radiografia de raios X não permite a obtenção de detalhes sobre a distribuição das delaminações ao longo da espessura do material, uma vez que a imagem obtida corresponde à sobreposição das delaminações [2]. Na figura 2.8 é ilustrada uma imagem obtida por radiografia mostrando o defeito obtido por impacto num laminado $[90_4,0_4]_S$.

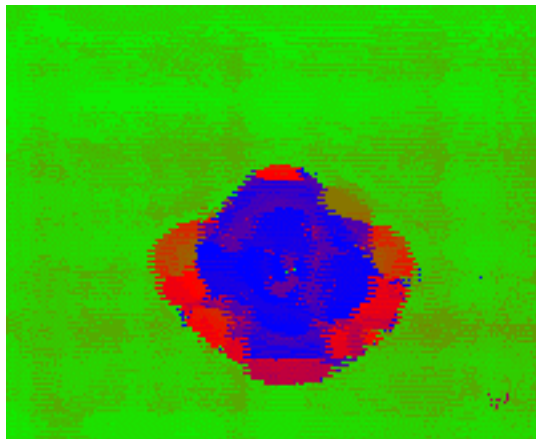


Figura 2.7 - Imagem dos danos obtidos pela técnica de ultrassons C-Scan para laminados $[0,90,0,90]_{2S}$ [61].

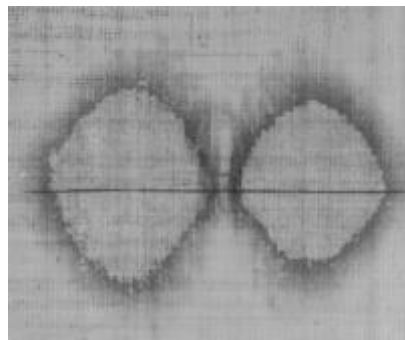


Figura 2.8 - Imagem do dano obtido pela técnica de raio X para laminados $[90_4,0_4]_S$ [63].

2.5 - Formas de Melhorar a Resistência ao Impacto

Cho *et al* [66] efectuaram um estudo numérico que abordava a influência da sequência de empilhamento nos laminados graphite/epoxy. Estes autores vieram a concluir que a sequência produzida influencia o tipo de dano observado nos laminados sujeitas a cargas de impacto. A zona de dano pode ser minimizada pela optimização do lay-up, desde que este garanta igual rigidez a flexão tanto na direcção transversal como longitudinal.

Cartié *et al* [67] estudaram o efeito das propriedades da fibra e da resina tendo como base seis tipos de laminado com diferentes fibras de carbono e resina epóxi. Estes autores concluirão que a resposta ao impacto é fortemente influenciada pela tenacidade à fractura da resina, enquanto o recurso às fibras de alta resistência e rigidez não trazem melhorias na resistência ao impacto. Gustin *et al* [68], por sua vez, estudaram uma sanduíche que envolvia fibras de carbono e kevlar numa matriz epóxidica. Segundo estes autores a colocação das fibras de kevlar na face sujeita ao impacto melhorou a absorção de energia e a força de impacto máxima média em cerca de 10 %. O uso de um tecido híbrido apenas melhorou a absorção máxima de energia em cerca de 5 %, todavia, a força de impacto média máxima foi de 14 %, em comparação com as amostras de carbono.

No entanto o recurso a nanopartículas é largamente abordado na bibliografia como forma de melhorar a resistência ao impacto dos materiais compósitos. Neste contexto Sun *et al* [69] fazem uma extensa revisão bibliográfica sobre a inclusão de nanopartículas na absorção de energia, evidenciando a seu uso como forma de aumentar a resistência ao impacto.

Lin *et al* [70], por exemplo, estudaram o tipo de nanopartícula e a seu valor em percentagem de volume na resistência ao impacto de um compósito de matriz epóxidica, tendo concluído que a adição destes materiais promove uma melhoria no comportamento ao impacto. Segundo estes autores os melhores resultados foram obtidos para uma percentagem na ordem dos 5 % de reforço. Avila *et al* [71, 72] efectuaram estudos de impacto em compósitos fibra de vidro/epóxi/nanoclays com fracções de reforço (de nanopartículas) na ordem de 1 %, 2 %, 5 % e 10 % tendo observado que a fracção volumétrica ideal é de 5%. Para este valor obtiveram aumentos de absorção de energia na ordem dos 48 % para baixas energias (20 J), 15 % para níveis de energias médios (60 J) e 4 % para altas energias (80 J). Hosur *et al* [73] fabricaram painéis sanduíche em carbono/epóxi com núcleos de espuma nano reforçada, tendo observado que a inclusão de nanoclays promove uma melhoria significativa na resistência ao impacto destes materiais. Iqbal *et al* [74] estudaram a influência de várias percentagens em peso de nanoclays (0%, 3% e 5%) na resistência ao impacto em compósitos de fibra de carbono/epóxi. De acordo com estes autores o valor óptimo para a adição de clays foi de 3 % em peso uma vez que conduziu a valores mais altos de resistência ao dano.

Capítulo 3

Material, Equipamento e Procedimento

Experimental

Neste capítulo será feita uma abordagem aos materiais utilizados no presente estudo, ao equipamento utilizado e ao procedimento experimental aplicado.

3.1 - Introdução

O principal objectivo deste trabalho consiste essencialmente em melhorar a compreensão do comportamento ao impacto dos compósitos Kevlar/epóxi. Para além disto pretende-se melhorar o desempenho em serviço destes materiais com o recurso a uma resina modificada. Será utilizado, para tal, nanoclays e/ou pó 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 utilizados.

3.2 - Manufactura dos Laminados

Neste estudo foram fabricados seis laminados diferentes, variando a percentagem em peso dos elementos de reforço (nanoclays e pó de cortiça). Para cada placa foram cortadas 12 camadas de Kevlar 170-1000P (170 g/m²), em forma de tecido (tafetá), com as dimensões 330×330 mm. Foi utilizada uma resina epóxi SR 1500, com densidade 1.13 g/cm³, e um endurecedor SD 2503, ambos fabricados pela Sicomin. De acordo com o fabricante foi adicionado à resina 33% em peso de endurecedor.

As 12 camadas de tecido foram então impregnadas uma a uma, manualmente, 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 a placa mantinha-se mais 14 horas na prensa e à mesma pressão. Finalmente as placas foram introduzidas numa estufa à temperatura de 40±2 °C durante 24 horas.

A introdução dos elementos de reforço na resina deu-se por mistura, durante 2 horas, com recurso a um misturador mecânico de elevada rotação, de modo a criar altas tensões de corte e, assim, permitir a esfolheação dos clays. Simultaneamente era utilizado um banho de ultra-sons para se conseguir, ao mesmo tempo, uma boa dispersão dos clays. A mesma

metodologia foi utilizada para como pó de cortiça. As percentagens de reforço em peso foram: 0 %, 1.5 %, 3 % e 6 % de nanoclays; 3 % de pó de cortiça e 1.5 % nanoclays mais 1.5 % de pó de cortiça.

Os nanoclays utilizados neste trabalho são do tipo Cloisite 30B, produzidos pela Southern Clay Products, revelando-se os mais adequados para a resina epóxi. Para uma melhor adesão das nanopartículas à resina os clays foram sujeitos a um tratamento à base de silano. Por sua vez o pó de cortiça utilizado é proveniente das operações de rectificação e acabamentos. Foi efectuada, previamente, uma análise ao nível da sua densidade e tamanho de grão. A densidade apresentou valores de 0.1095 g/cm^3 e a análise granulométrica, obtida por difracção laser no equipamento Malvern Mastersizer 2000, em termos de percentil apresentou os seguintes valores: $d(0.1) = 18.6 \text{ }\mu\text{m}$, $d(0.5) = 78.9 \text{ }\mu\text{m}$ e $d(0.9) = 208.3 \text{ }\mu\text{m}$. Mais detalhes podem ser encontrados na figura 3.1, onde se encontra representada a distribuição e a função acumulação dos tamanhos das partículas.

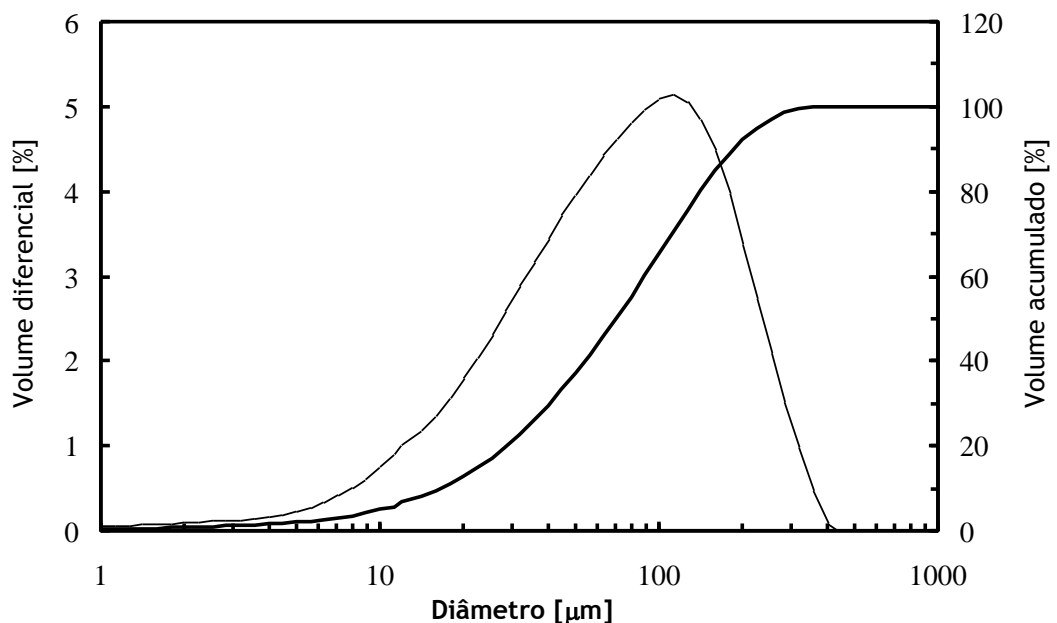


Figura 3.1 - Dimensão das partículas do pó de cortiça.

3.3 - Provetes

Os provetes foram obtidos a partir dos laminados descritos anteriormente. A geometria, ilustrada na figura 3.2, 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 do compósito e, assim, possíveis alterações nas suas propriedades mecânicas foi utilizado ar comprimido seco.

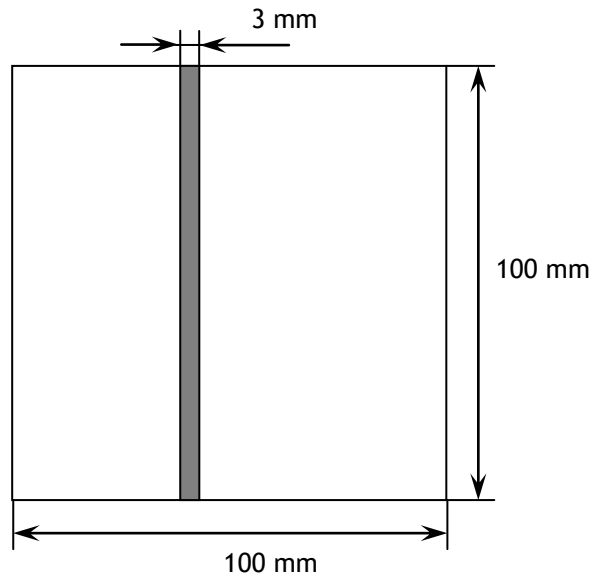


Figura 3.2 - Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto.

3.4 - Equipamento

Os ensaios foram realizados numa máquina de impacto da marca IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 3.3 O seu funcionamento baseia-se essencialmente na queda livre de um peso e encontra-se instrumentada com um sistema de aquisição de dados recebidos a partir de uma célula de carga piezoelétrica, com uma capacidade de recolha de 32000 pontos, posicionada na raiz do impactor.

Essencialmente podemos dizer que é constituída por uma torre com duas colunas-guia onde se desloca, com recurso a rolamentos, um carrinho suportando 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 ao carrinho 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 por meio de um sensor electrónico e a força por meio de uma célula de carga. A dupla integração da curva de carga em função do tempo fornece a variação da deflexão com a carga:



Figura 3.3 - Máquina de impacto IMATEK-IM10.

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

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:

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

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

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

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.

3.5 - Procedimento Experimental

Os ensaios de impacto 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 3.2, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

Os ensaios foram realizados com um impactor hemisférico de diâmetro 20 mm, uma massa total de queda de 3,005 kg e com as condições de fronteira de simplesmente apoiados. Foram utilizados os níveis de energia de 6 J, 12 J e 21 J visando comparar a taxa de recuperação elástica e o respectivo dano provocado nos vários materiais compósitos estudados.

Capítulo 4

Análise e Discussão de Resultados

4.1 - Introdução

Os materiais compósitos são actualmente bastante utilizados em aplicações estruturais, no entanto, o seu desempenho em serviço é significativamente afectado pelos defeitos originados durante o processo de fabrico ou pelo impacto, ao longo da sua vida operacional, de cargas externas. Estas cargas podem causar danos que muitas vezes não são visíveis à superfície do laminado.

Recentemente a bibliografia sugere o reforço da matriz, com recurso às nanopartículas, como forma de melhorar o desempenho destes materiais. Neste contexto, o presente capítulo discute a influência da introdução de nanoclays e pó de cortiça na melhoria da resistência ao impacto em compósitos de carbono/epóxi.

4.2 - Efeito da Introdução do Reforço na Resistência ao Impacto

Inicialmente iremos estudar o efeito da introdução do pó de cortiça através da análise das curvas força/tempo, força/deslocamento e energia/tempo para os níveis de energia de 6 J, 12 J e 21 J. Os ensaios de impacto decorreram segundo o procedimento experimental descrito no capítulo anterior e os resultados encontram-se expressos, ao nível das curvas médias para cada condição de ensaio, nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

Numa primeira análise podemos observar que o traçado das curvas apresenta um andamento semelhante ao observado na bibliografia. As curvas manifestam algumas oscilações que, segundo Schoeppner e Abrate [75], 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 [76], são excitadas pela rápida variação das grandezas cinemáticas no instante da colisão.

Uma análise mais detalhada da figura 4.1 revela que, nos ensaios realizados com as energias de 6 J e 12 J, a força cresce até um determinado valor, $F_{m\acute{a}x}$, a partir do qual volta a diminuir até atingir novamente o zero. Neste instante o impactor deixou de ter contacto com a placa. Verificamos também que o valor de $F_{m\acute{a}x}$, aumenta com o aumento da energia de impacto, apesar do tempo médio de contacto impactor/placa manter-se muito semelhante para todos os níveis de energia (na ordem dos 7.7 m/s).

No que concerne à energia de 21 J temos dois comportamentos distintos para os laminados em estudo. No caso dos compósitos sem pó de cortiça a força cresce até ao seu valor máximo, $F_{m\acute{a}x}$, ao que posteriormente passa a diminuir. Todavia entre os 3.2 e os 4.6 m/s o valor da força permanece mais ou menos constante, em torno de um valor médio que ronda os 2.65 kN, como resultado da perfuração ocorrida no laminado. No caso da introdução do pó de cortiça podemos observar que este patamar não existe, o que significa que a sua adição evita a perfuração e, conseqüentemente, menores danos no compósito.

Relativamente à figura 4.2 o andamento das curvas caracteriza-se pelo crescimento simultâneo da força e do deslocamento, 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. No entanto para os laminados Kevlar/epóxi, e para a energia de 21 J, a força permanece mais ou menos constante e o deslocamento aumenta. Este patamar coincide com o observado no gráfico força/tempo e é o resultado do dano ocorrido (perfuração). Verificamos também que o aumento da energia de impacto aumenta o deslocamento bem como o dano nas placas. Todavia a introdução do pó de cortiça, independentemente do nível de energia, promove a diminuição do deslocamento observado.

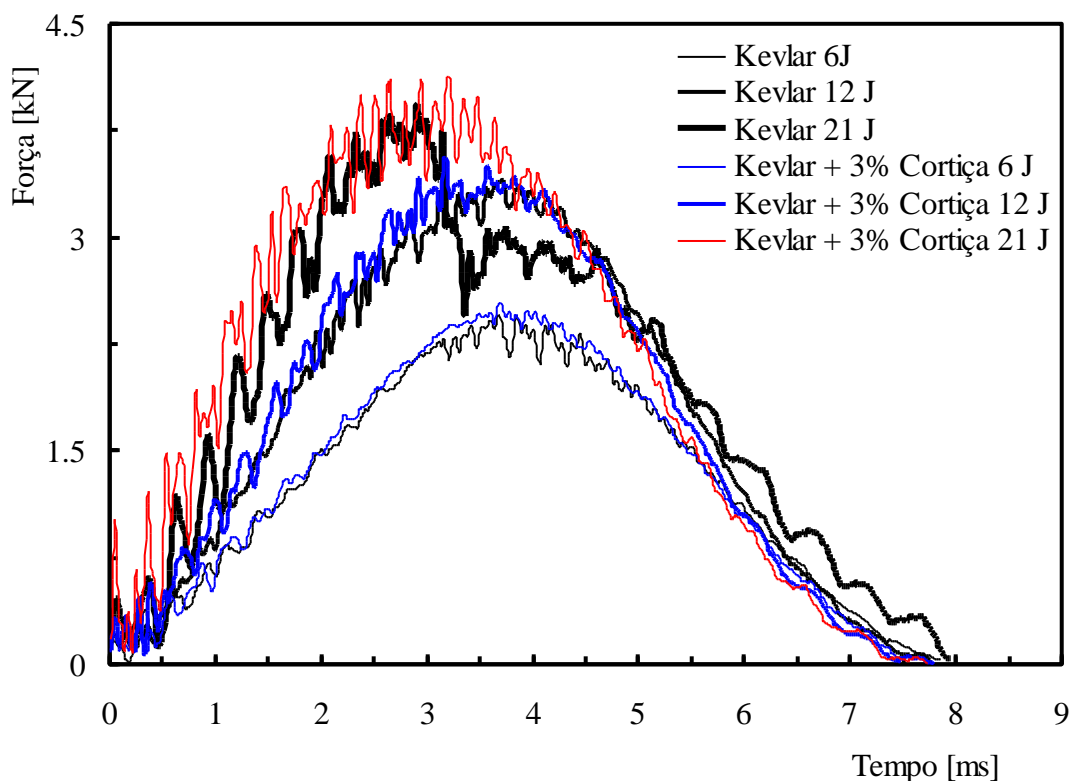


Figura 4.1 - Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi.

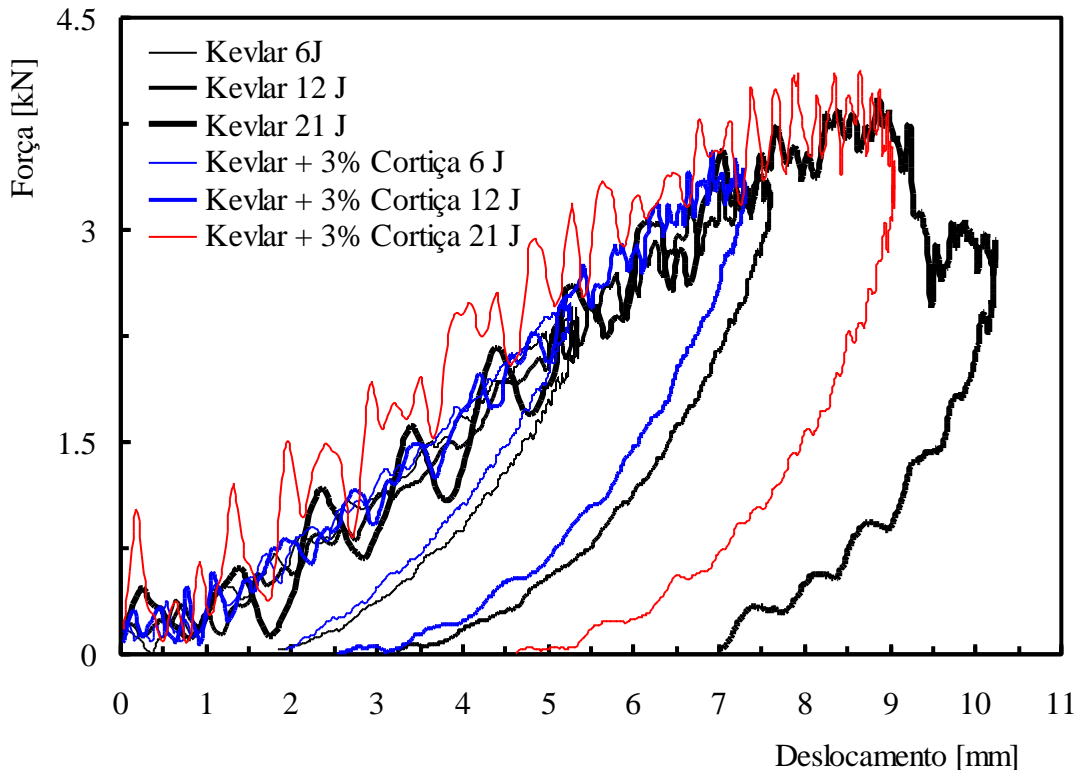


Figura 4.2 - Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi.

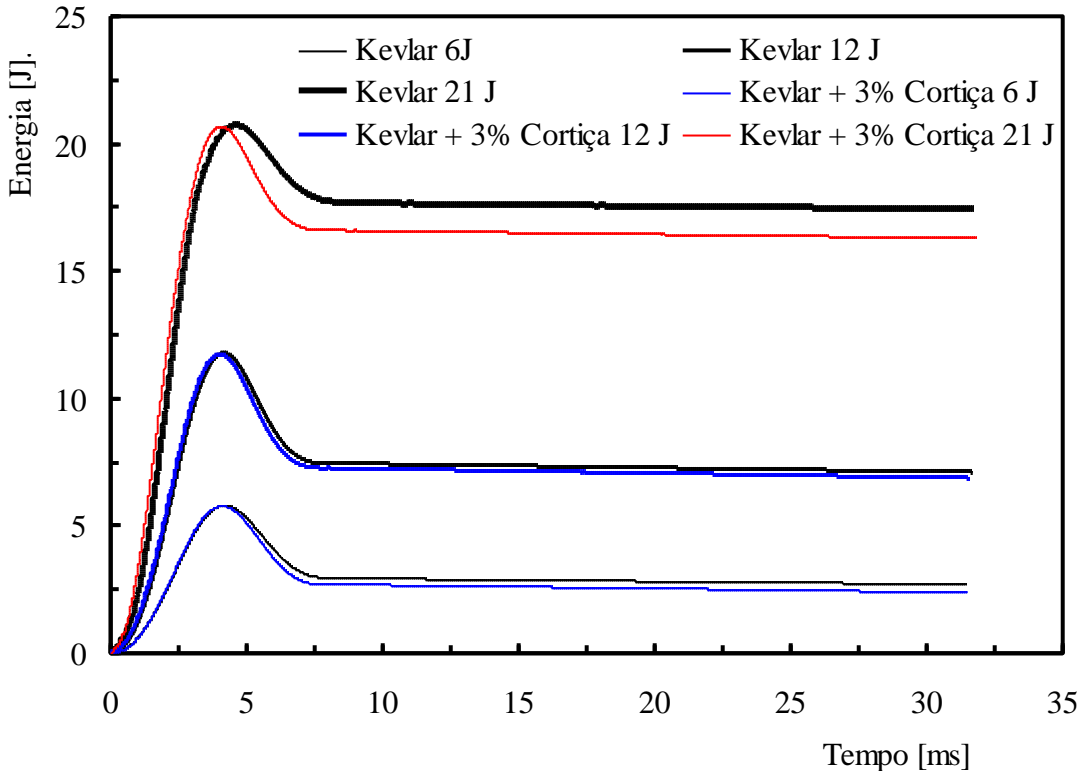


Figura 4.3 - Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição do pó de cortiça na resina epóxi.

Finalmente a figura 4.3 ilustra-nos 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.

O efeito da introdução dos nanoclays pode ser analisado, de igual modo, através das curvas força/tempo, força/deslocamento e energia/tempo para os níveis de energia de 6 J, 12 J e 21 J. Mais uma vez os ensaios de impacto decorreram segundo o procedimento experimental descrito no capítulo anterior e os resultados encontram-se expressos, ao nível das curvas médias para cada condição de ensaio, nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Podemos observar que o traçado das curvas é muito semelhante ao das curvas obtidas com a adição do pó de cortiça, revelando, deste modo, que a resina aditivada promove um melhor desempenho dos compósitos às cargas de impacto.

Por sua vez a introdução simultânea de pó de cortiça e nanoclays, na percentagem de 1.5 % em peso (de cada componente), também foi averiguada. O seu efeito na resistência ao impacto dos laminados encontra-se ilustrado nas figuras seguintes (4.7, 4.8 e 4.9), em termos das curvas força/tempo, força/deslocamento e energia/tempo.

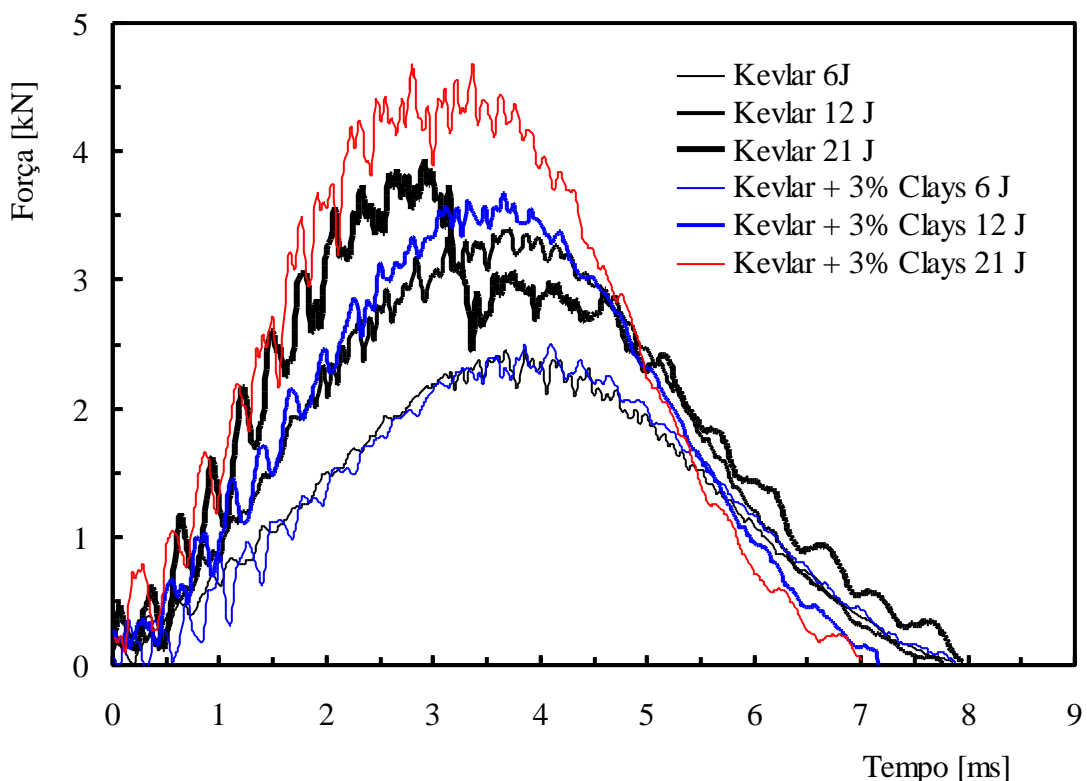


Figura 4.4 - Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi.

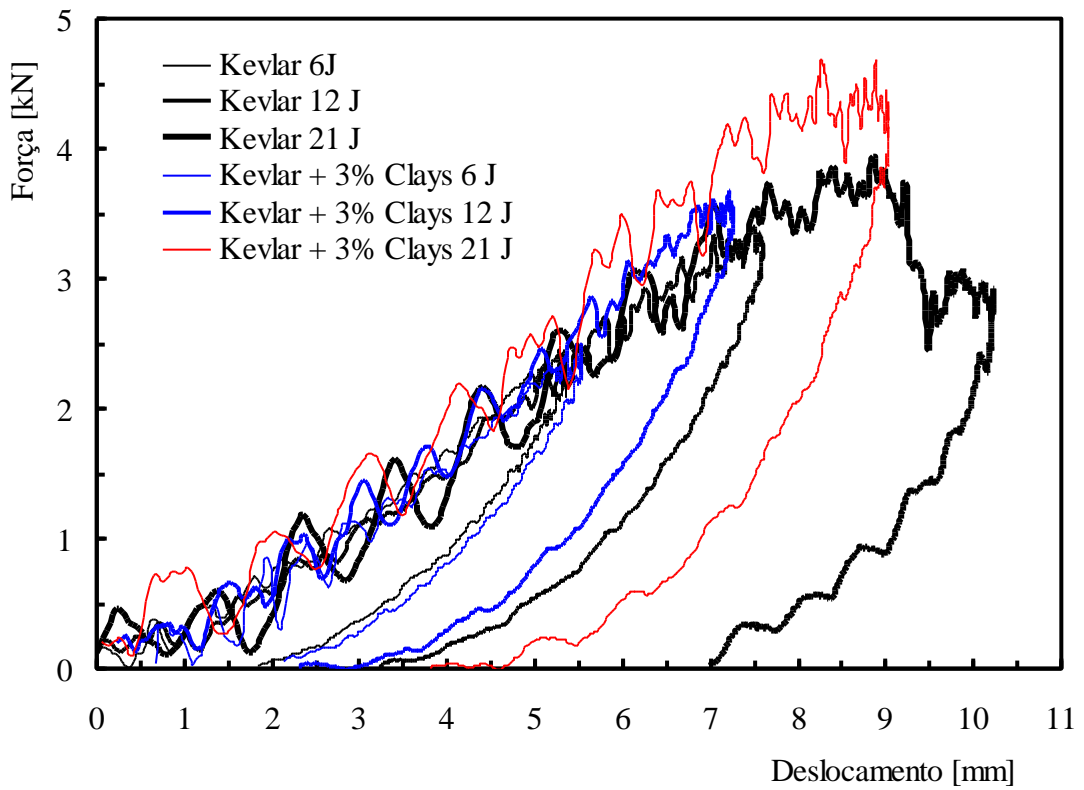


Figura 4.5 - Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi.

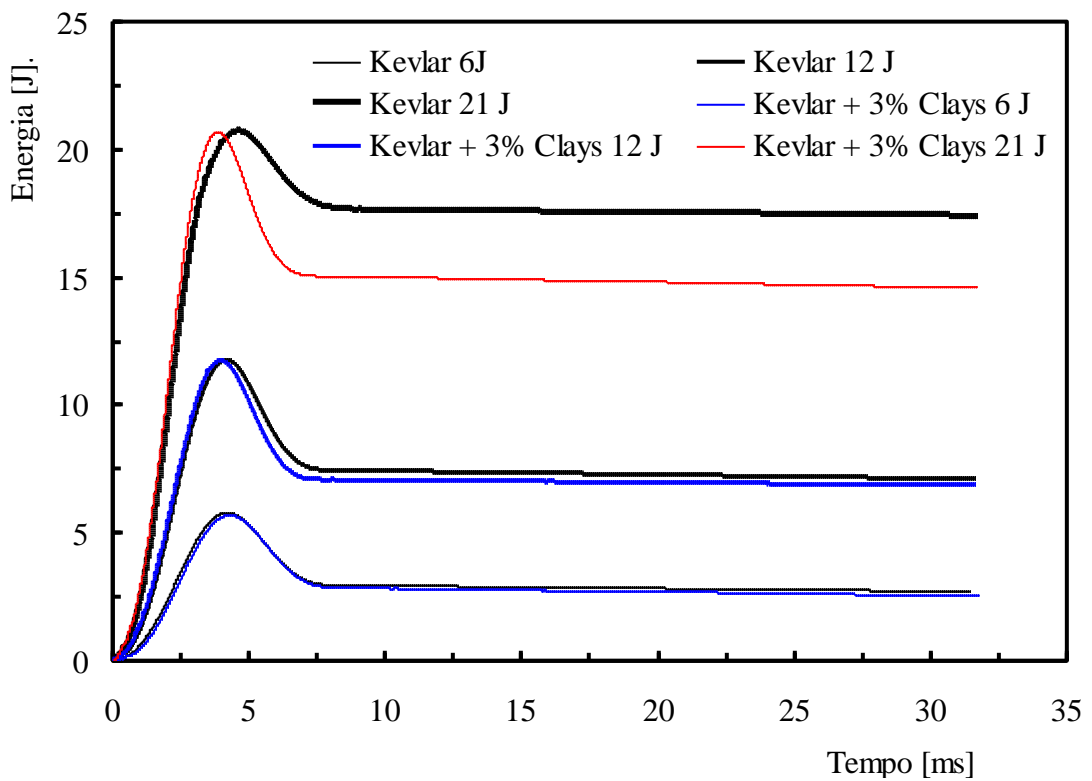


Figura 4.6 - Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays na resina epóxi.

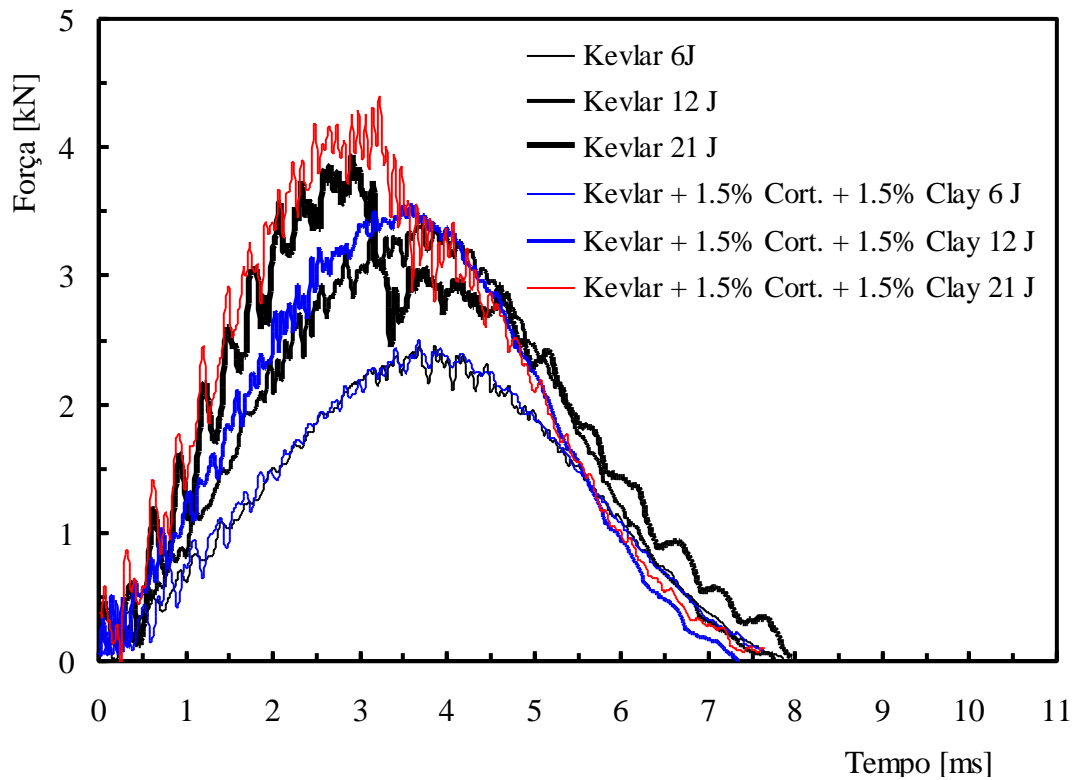


Figura 4.7 - Curvas força-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays e pó de cortiça na resina epóxi.

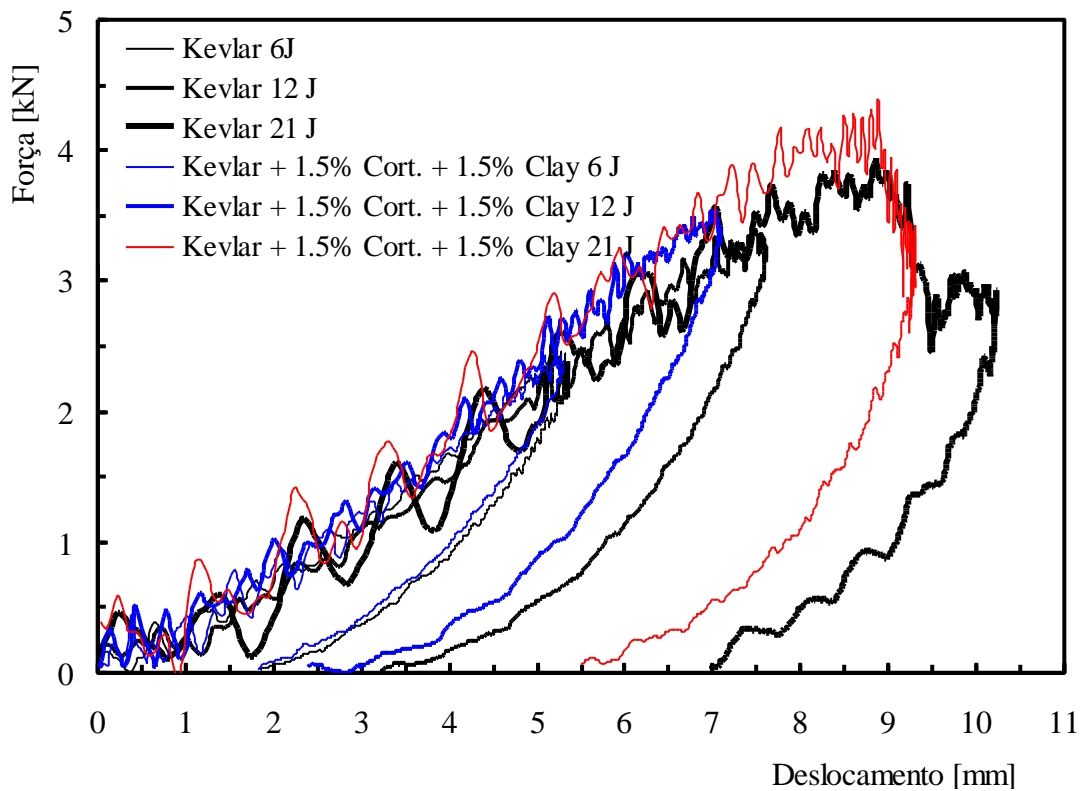


Figura 4.8 - Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da adição de nanoclays e do pó de cortiça na resina epóxi.

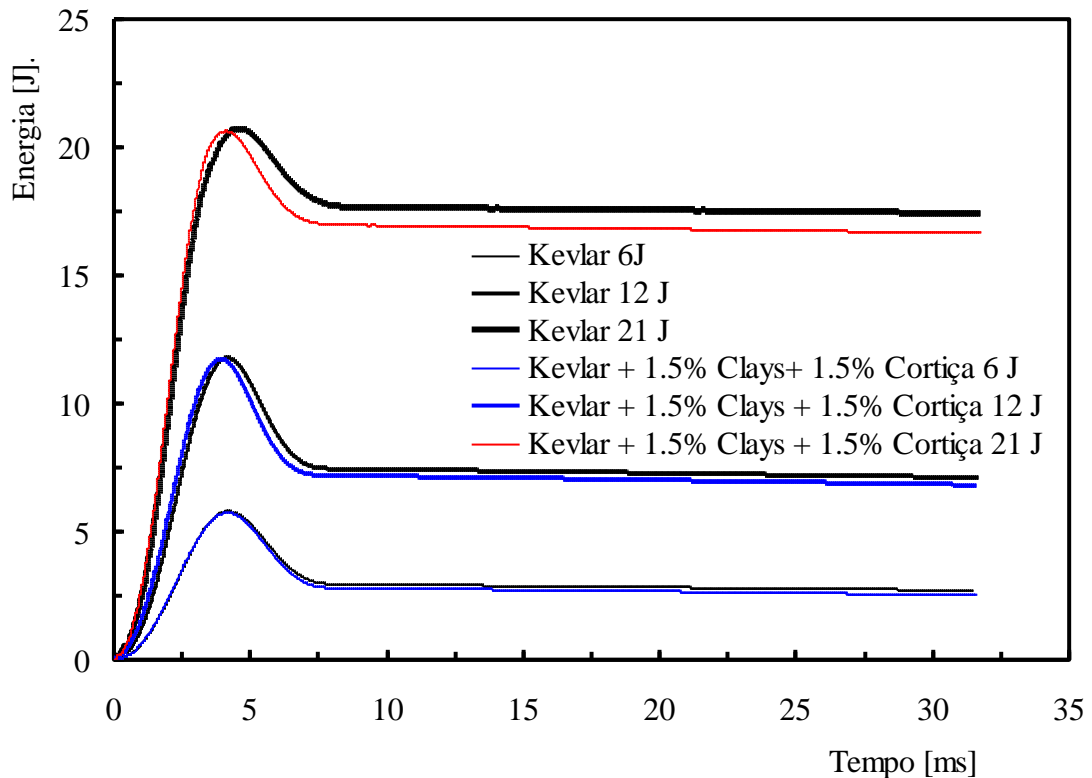


Figura 4.9 - Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da adição de nanoclays e do pó de cortiça na resina epóxi.

Iguais conclusões se podem retirar (a partir das curvas 4.7, 4.8 e 4.9) apesar de, numa primeira análise, esta mistura revela-se menos eficaz que a adição individual de cada um dos elementos na resina. Para a energia de 21 J, por exemplo, a introdução simultânea de pó de cortiça e nanoclays conduz a uma menor absorção de energia, conforme ilustra a figura 4.9 quando comparada com as figuras 4.3 e 4.6.

Por sua vez a figura 4.6, comparada com as figuras 4.3 e 4.9, revela que a introdução de nanoclays na matriz conduz a maiores níveis de energia absorvida pelos laminados. Este acontecimento é mais pronunciado para os níveis de energia de impacto mais elevados. Deste modo as figuras seguintes apresentam os resultados do estudo efectuado sobre a influência da quantidade de nanoclays, em percentagem de peso, na resistência ao impacto. Mais uma vez se representam as curvas força/tempo, força/deslocamento e energia/tempo obtidas pelo procedimento experimental descrito no capítulo anterior.

Devido ao facto das curvas obtidas para as energias de 6 e 12 J serem muito semelhantes às observadas anteriormente, opta-se por representar apenas as de 21 J, por serem aquelas que reflectem a comportamento limite do compósito Kevlar/epóxi. Deste modo, o efeito da adição dos nanoclays torna-se mais visível.

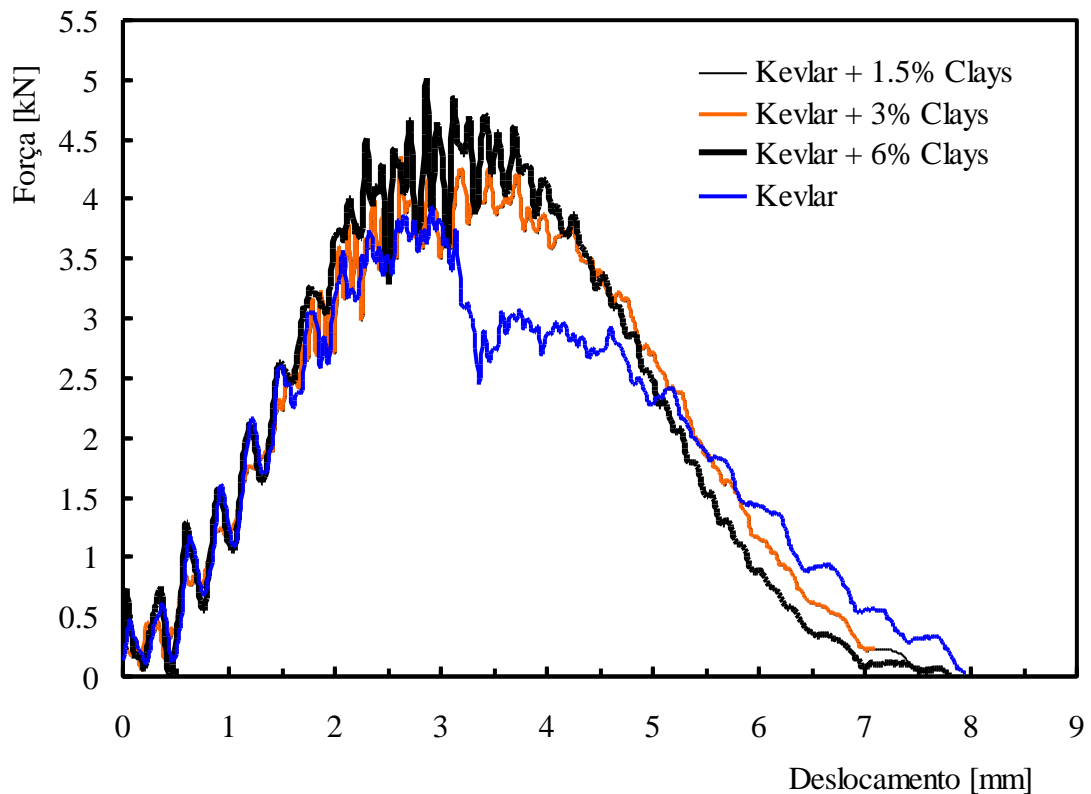


Figura 4.10 - Curvas força-tempo ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J.

Assim, e mais uma vez, podemos observar pela figura 4.10 dois comportamentos distintos para os laminados em estudo. Para os laminados simples de Kevlar/epóxi existe um patamar da força em torno do valor médio de 2.65 kN, como resultado da perfuração ocorrida no laminado, enquanto a adição de clays não promove tal comportamento, ou seja, menores danos ocorridos no compósito. Verifica-se também que a maior percentagem em peso dos nanoclays traduz-se em maiores forças de impacto.

Ao nível da figura que ilustra o comportamento força versus deslocamento, figura 4.11, o dano mais uma vez se torna visível para os laminados de Kevlar/epóxi, através do patamar ocorrido, enquanto o aumento da percentagem de nanoclays diminui o deslocamento.

Finalmente a figura 4.12 ilustra a variação da energia com o tempo. Verificamos que o aumento de energia absorvida aumenta com a percentagem de clays adicionados à resina, todavia, denota-se uma certa proximidade das curvas de 3 % e 6 % o que revela estarmos próximos do valor ideal. Na verdade este facto pode ser justificado pela bibliografia, a qual dá como valor óptimo a percentagem de 5% [70-72].

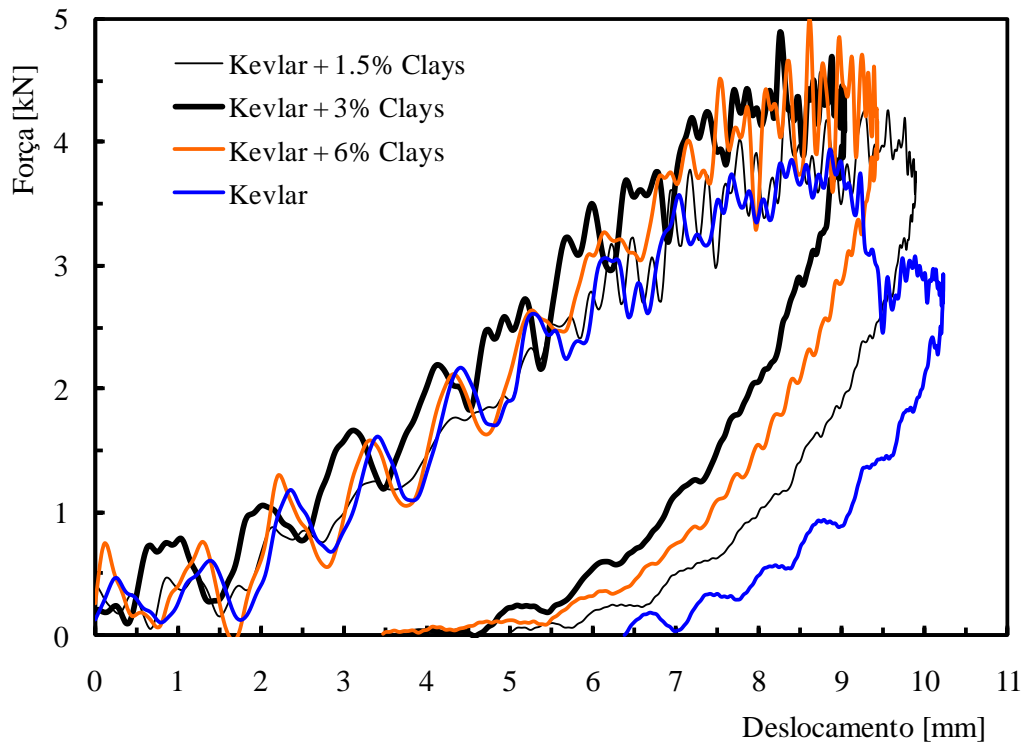


Figura 4.11 - Curvas força-deslocamento ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J.

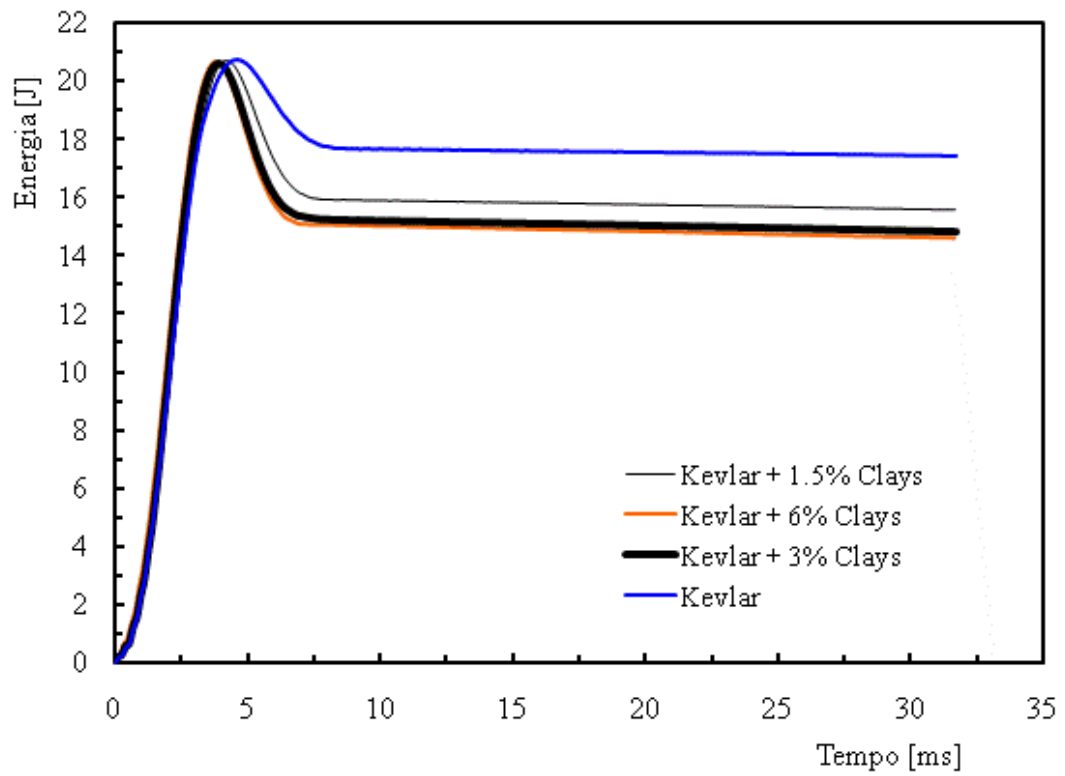


Figura 4.12 - Curvas energia-tempo ilustrando o efeito da percentagem em peso de nanoclays na resina epóxi para a energia de 21 J.

4.3 - Análise comparativa

Para além da análise qualitativa efectuada no ponto anterior sobre o efeito do uso de uma resina epóxi aditivada, mais detalhes podem ser retirados a partir da tabela 4.1. Podemos assim observar que a força média máxima aumenta com o aumento dos níveis de energia. Este aumento, para a gama de energia entre os 6 J e os 21 J, atinge valores na ordem dos 37.3 % quando se utiliza resina epóxi simples, 41 % quando se adiciona pó de cortiça, 41.8% para a mistura de pó de cortiça e nanoclays e, finalmente, 47.4 % para a adição simples de nanoclays. Quando se compara a força média máxima para o nível de energia de 6 J, verificamos que a introdução de nanoclays aumenta esta grandeza em 3.9 % face à utilização simples de resina epóxi. A diferença é, no entanto, de 3.14 % quando se adiciona o pó de cortiça. Podemos assim concluir que a utilização de uma resina aditivada promove cargas médias de impacto mais elevadas, quando comparada com a utilização de resina simples nos laminados, sendo o maior valor obtido com a utilização de clays (3.9 %).

Ao nível do deslocamento médio máximo ocorrido nos laminados durante o impacto, verificamos que este também aumenta com a energia. Os valores obtidos, em termos percentuais, são de 47.5 % quando se utiliza resina simples, 41.6 % quando se aditiva pó de cortiça, 41.9 % com nanoclays e 42.1 % com a mistura de pó de cortiça e nanoclays. O elevado deslocamento observado nos laminados com resina simples denota um dano bastante grande que, segundo o traçado da curva, revela já perfuração. Por outro lado, quando se compara o deslocamento obtido com a energia de 6 J podemos ver que a introdução de pó de cortiça na resina diminui o deslocamento médio máximo em 1.1 % e 2.6 % com a introdução dos nanoclays, face aos valores obtidos com a resina pura. Estes valores para a energia de 21 J são, respectivamente, de 11.4 % e 12.1 % revelando, assim, o benefício da introdução destes aditivos na resina. Todavia a introdução dos nanoclays, ao nível dos deslocamentos observados, revela-se preferível face ao pó de cortiça.

Finalmente ao nível de energia absorvida verificamos que quanto maior é a energia de impacto menor é a percentagem absorvida e, como tal, maior o dano ocorrido nos laminados. No caso da energia de 21 J, e quando se utiliza resina pura, verificamos que apenas 14.8 % corresponde à recuperação elástica. Toda a restante é transformada em dano dando origem, neste caso, à perfuração do laminado. Quando se adiciona pó de cortiça à resina verificamos um acréscimo de 25.7 % de energia absorvida e um valor de 44.6 % quando se adiciona nanoclays. A introdução simultânea do pó de cortiça e de nanoclays na resina apenas se traduz num benefício de 18.7 %.

A tabela 4.2 ilustra a influência da percentagem em peso de nanoclays na resina. Neste caso podemos observar que força média máxima aumenta com o aumento dos níveis de energia e com a percentagem de reforço adicionada à resina. Existe, em termos médios e pa-

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de impacto para os vários reforços propostos.

Laminados	Energias [J]	Força Média máxima [kN]	Desv. Padrão [kN]	Desl. médio máximo [mm]	Desv. Padrão [mm]	% Energia absorvida
Com resina simples	6	2.47	0.02	5.35	0.27	49.5
	12	3.39	0.07	7.60	0.13	37.3
	21	3.94	0.10	10.22	0.48	14.8
Resina com 3% Cortiça	6	2.55	0.07	5.29	0.14	53.5
	12	3.56	0.10	7.38	0.23	38.7
	21	4.32	0.14	9.06	0.28	19.9
Resina com 3% Clays	6	2.57	0.09	5.21	0.33	51.9
	12	3.68	0.11	7.25	0.39	40.2
	21	4.89	0.17	8.98	0.49	26.7
Resina com 1.5% Clays + 1.5% Cortiça	6	2.56	0.10	5.28	0.32	51.1
	12	3.59	0.02	7.29	0.28	39.4
	21	4.40	0.17	9.12	0.44	18.2

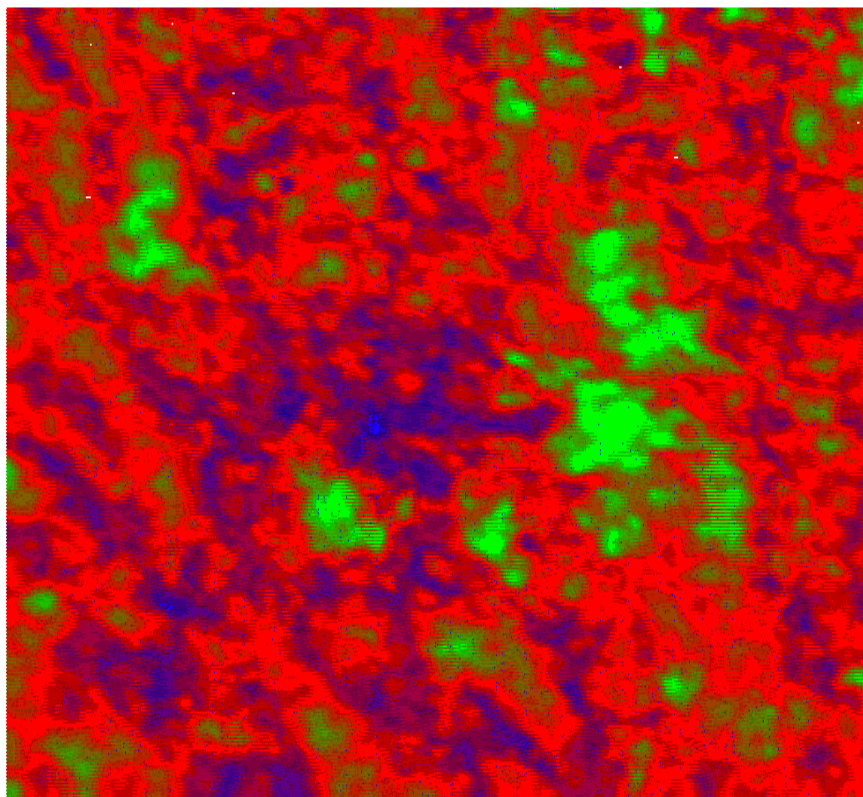
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de impacto para as várias percentagens de nanoclays utilizados.

Laminados	Energias [J]	Força Média máxima [kN]	Desv. Padrão [kN]	Desl. médio máximo [mm]	Desv. Padrão [mm]	% Energia absorvida
Com resina simples	6	2.47	0.02	5.35	0.27	49.5
	12	3.39	0.07	7.60	0.13	37.3
	21	3.94	0.1	10.22	0.48	14.8
Resina com 1.5 % Clays	6	2.51	0.09	5.29	0.25	49.7
	12	3.61	0.11	7.44	0.23	38.5
	21	4.37	0.31	9.09	0.27	23.3
Resina com 3 % Clays	6	2.57	0.09	5.21	0.33	51.9
	12	3.68	0.11	7.25	0.39	40.2
	21	4.89	0.17	8.98	0.49	26.7
Resina com 6 % Clays	6	2.62	0.07	5.18	0.38	54.6
	12	3.74	0.02	7.17	0.27	43.2
	21	5.05	0.17	8.54	0.44	27.5

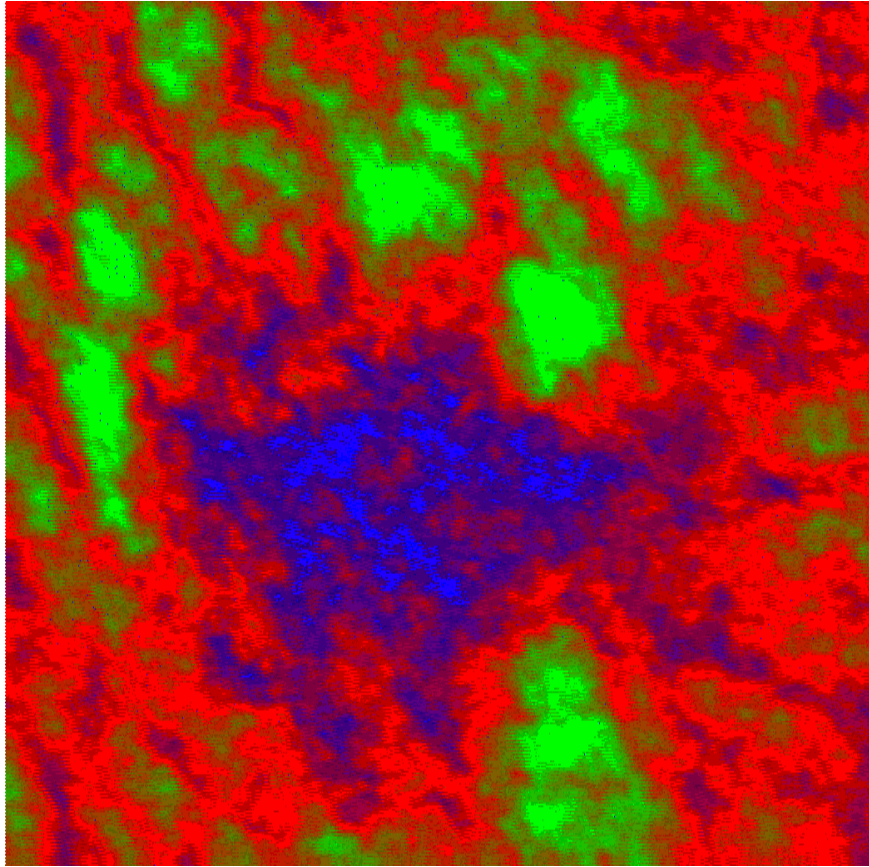
ra a gama de energias de 6 J, apenas uma diferença de 5.7 % entre a força média de impacto ocorrida para o laminado com 6 % de clays e o que apresenta uma resina não aditivada (laminado com resina simples). Este valor, quando comparado para a energia de 21 J, já difere na ordem dos 21.9 %.

Ao nível do deslocamento médio máximo ocorrido nos laminados durante o impacto verificamos que este aumenta com a energia mas diminui com a introdução de clays. Para a energia de 6 J verificamos que a introdução de 6 % de reforço (nanoclays) diminui o deslocamento em 3.2 % face aos laminados com resina simples. Para a energia de 21 J este valor é 16.4 %. Finalmente ao nível de energia absorvida verificamos que o aumento da percentagem em peso do reforço se revela benéfica. Para a energia de 6 J verificamos que a adição de 6 % de clays melhora em 9.3 % a energia absorvida, sendo de 46.2 % para a energia de 21 J.

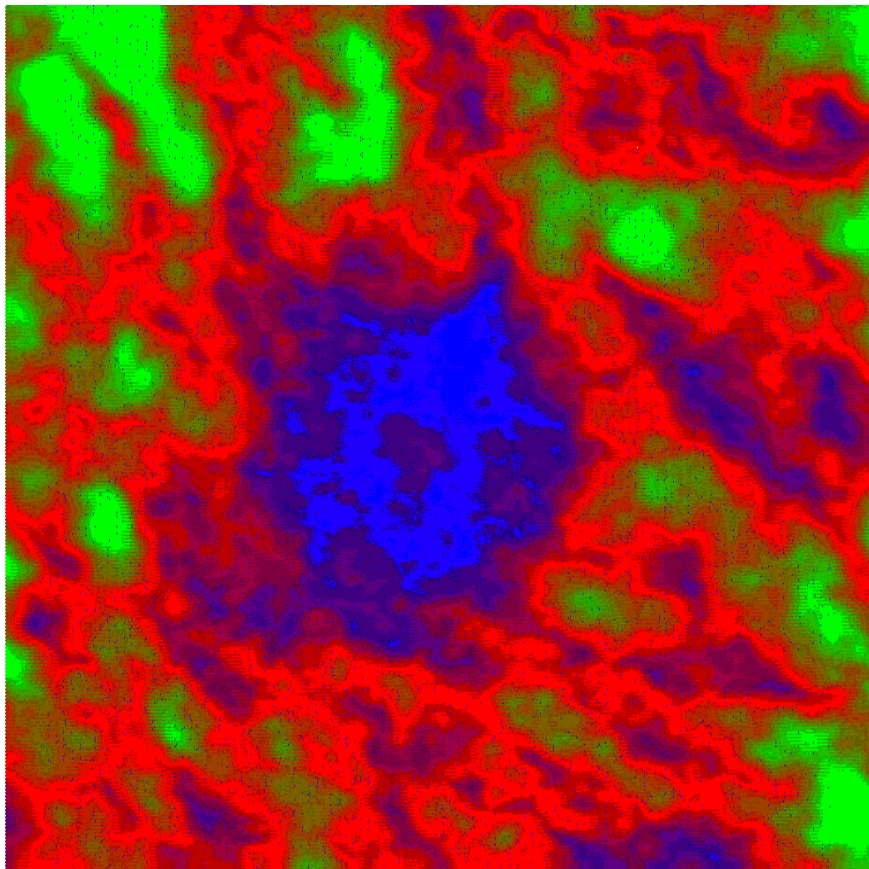
Seguidamente são apresentados os danos observados nos vários laminados. Para tal utilizou-se a técnica do C-scan e na figura encontram-se ilustrados apenas os laminados ensaiados com a energia de impacto de 6 J. A zona de análise está confinada a um quadrado de 5 cm de lado.



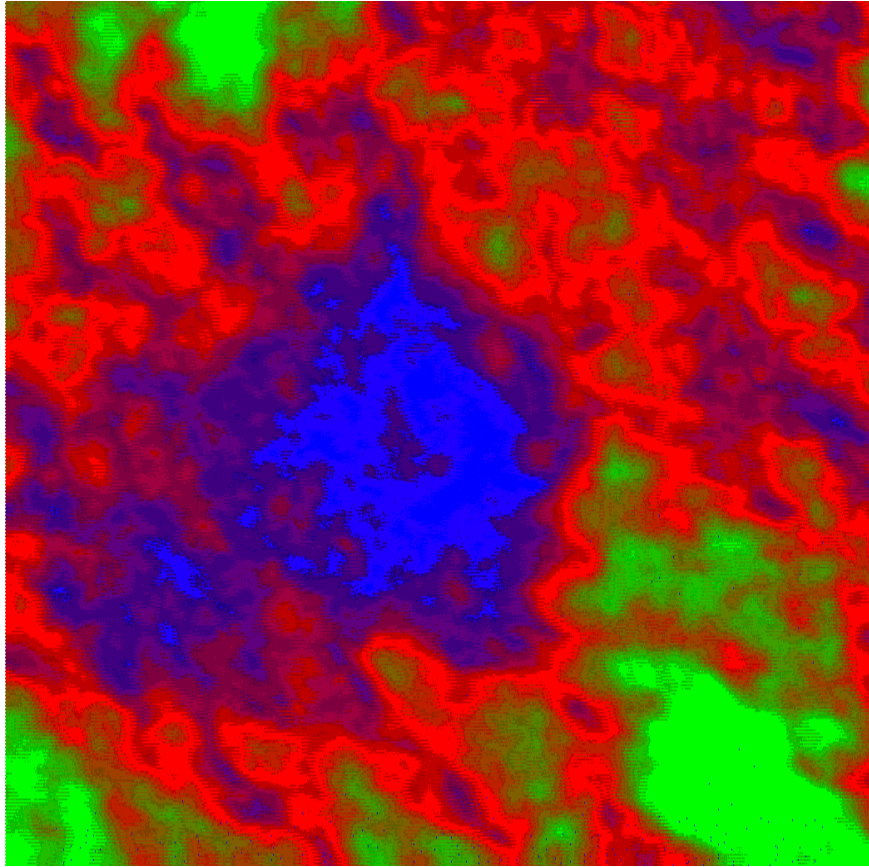
a)



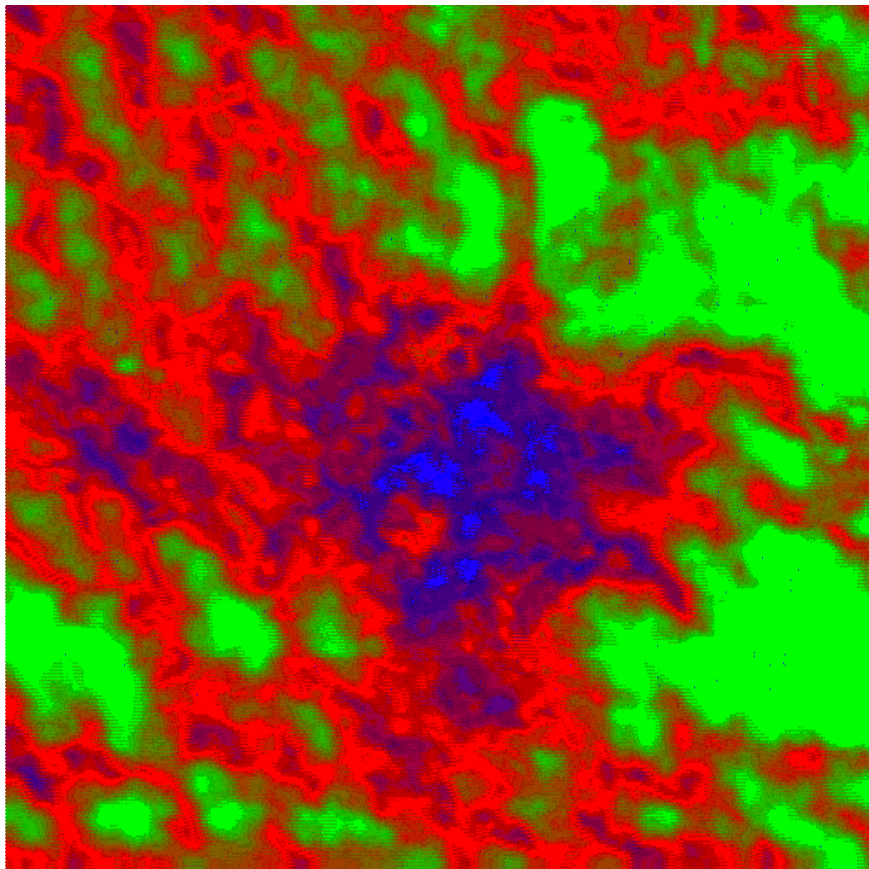
b)



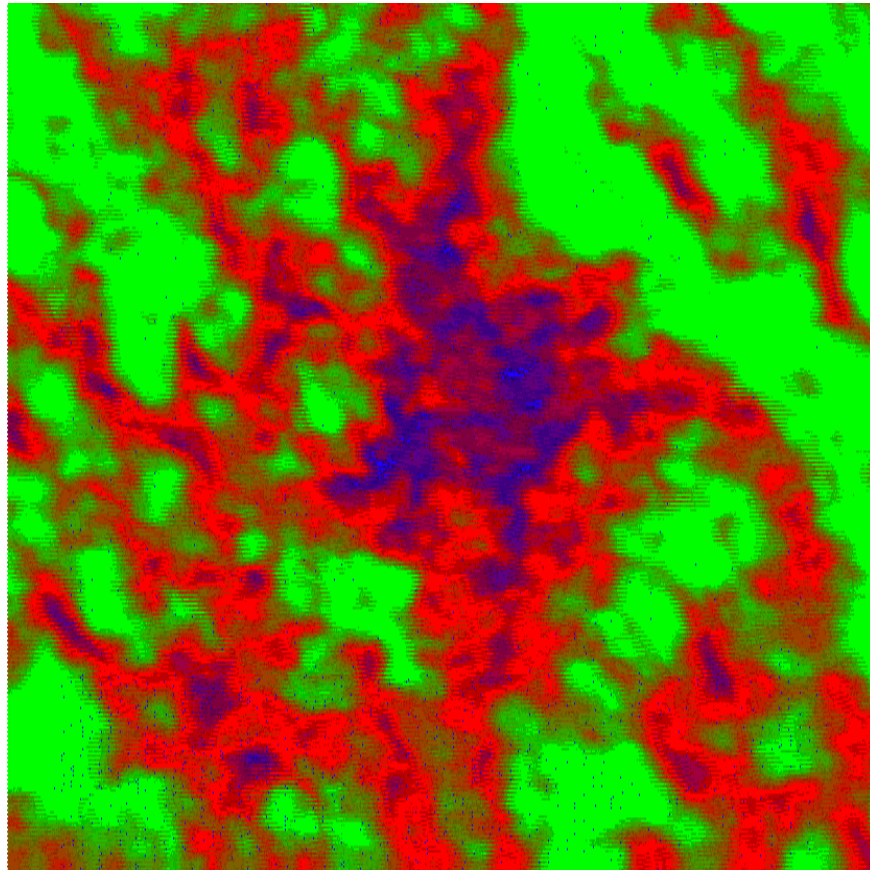
c)



d)



e)



f)

Figura 4.13 - Danos observados nos laminados: a) Resina não aditivada; b) Resina com 1.5 % de clays; c) Resina com 3 % de clays; d) Resina com 6% de clays; e) Resina com 1.5 % de clays mais 1.5 % de pó de cortiça; f) Resina com 3 % de cortiça.

Verificamos que quando se utiliza como reforço os nanoclays o dano aumenta com a percentagem em peso destas nanoparticulas. Este comportamento era esperado pelo exposto anteriormente, pois se os laminados aumentavam a energia absorvida, esta seria libertada essencialmente sob a forma de dano. Ao nível do reforço com pó de cortiça e para a energia de 6 J o dano é um pouco superior ao observado nos laminados com resina simples. Semelhante comportamento é visível nos laminados com resina aditivada com 1.5 % de clays mais 1.5 % de pó de cortiça. Este fenómeno pode ser explicado pela boa resistência ao impacto da cortiça.

Capítulo 5

Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

De acordo com os objectivos inicialmente estabelecidos, esta tese apresentou uma análise e discussão de resultados que conduziu a algumas conclusões. Neste capítulo irão ser abordadas apenas as que se julguem serem mais importantes.

Numa fase seguinte são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 - Conclusões Gerais

- 1 - Independentemente do tipo de reforço utilizado a força média máxima de impacto aumenta com a energia de impacto.
- 2 - A adição de nanoclays nos laminados promove forças médias máximas de impacto superiores às observadas nos laminados com reforço de pó de cortiça. Verificou-se também que o aumento da percentagem em peso de nanoclays aumenta a força média máxima de impacto. Para a gama de energia entre os 6 J e os 21 J, este aumento atinge valores na ordem dos 37.3 % quando se utiliza resina epóxi simples, 41 % quando se adiciona pó de cortiça e 47.4 % com a adição de nanoclays (3 % em percentagem de peso).
- 3 - O deslocamento médio aumenta com a energia de impacto independentemente do tipo de reforço utilizado.
- 4 - Para ambos os reforços utilizados verificou-se que o deslocamento médio devido à carga de impacto diminui. No entanto, o uso dos nanoclays nos laminados conduziu a deslocamentos médios inferiores aos observados nos compósitos reforçados com pó de cortiça. Verificou-se também que o aumento da percentagem em peso de nanoclays diminui o deslocamento médio observado. Para a energia de 6 J verificamos que a introdução de 6 % de clays diminui o deslocamento em 3.2 % face aos laminados com resina simples. Para a energia de 21 J este valor é da ordem dos 16.4 %.
- 5 - Ao nível de energia absorvida verificamos que o aumento da percentagem em peso de nanoclays se revela benéfica. Para a energia de 6 J verificamos que a adição de 6 % de clays melhora em 9.3 % a energia absorvida, sendo de 46.2 % para a energia de 21 J.
- 6 - Verificamos que o pó de cortiça para baixos níveis de energias (6 J) se revela preferível aos nanoclays no que concerne à energia absorvida. Para este nível de energia podemos observar que os laminados com pó de cortiça têm uma taxa de absorção na ordem dos

53.5 %, enquanto os que utilizam nanoclays apresentam valores de 51.9 %. No entanto este fenómeno inverte-se para níveis de energia superiores a 12 J. Para uma energia de 21 J, por exemplo, os laminados com pó de cortiça apresentam valores de 19.9 % enquanto os que usam os clays como reforço absorvem 26.7 %.

- 7 - A introdução dos nanoclays na resina conduz a maiores danos observados no laminado que o uso do pó de cortiça. Verifica-se também que o dano aumenta com a percentagem em peso dos nanoclays.

5.2 - 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 maiores gamas de percentagem em peso do pó de cortiça para determinar a quantidade óptima de reforço.
- 2 - Estudar o comportamento ao impacto de laminados que envolvam uma percentagem em peso superior a 6 % de nanoclays para determinar a quantidade óptima de reforço.
- 3 - Efectuar uma análise de dano mais detalhada de modo a quantificar o dano ocorrido.
- 4 - Estudar os efeitos ambientais na resistência ao impacto destes laminados.

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] Daniel, Isaac M.; Ishai, Ori (1994) *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, Oxford, pp. 3-11.
- [7] 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.
- [8] Vinson, Jack R.; Sierakowski, Robert L. (2008) *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*. Springer, Netherlands, pp. 1-10.
- [9] Strong, A. Brent (2002) *History of Composite Materials - Opportunities and Necessities*. Brigham Young University, pp. 1-8.
- [10] Web-cars - The Corvette story (Consult. 20 Fevereiro 2010). Disponível na WWW: <<http://www.web-cars.com/corvette/beginning.php>>.
- [11] Gay, Daniel; Hoa, Suong V.; Tsai, Stephen W. (2003) *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press LLC, pp. 1-13.
- [12] Nasa Home - International Space Station (Consult. 24 Fevereiro 2010). Disponível na WWW: <http://www.nasa.gov/mission_pages/station/multimedia/exp22_130undock.html>.
- [13] Nasa Home - Kennedy Space Center (Consult. 24 Fevereiro 2010). Disponível na WWW: <<http://mediaarchive.ksc.nasa.gov/search.cfm?cat=4>>.
- [14] Grant Thornton (2009) *Sector outperforms: 2008 M&A activity matches prior-year record*. Grant Thornton Corporate Finance - Mergers and Acquisitions, Boston, pp. 1-5.

- [15] Rezende, Mirabel C. (2007) *Fractografia de Compósitos Estruturais*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 17, pp. E4-E11.
- [16] Bae Systems (2009) Ballistic Helmets. United States of America, pp. 1-4.
- [17] Blintec: Coletes Balísticos - Tecnologia (Consult. 24 Fevereiro 2010). Disponível na WWW: <<http://www.blintec.com.br/tecnologia.html>>.
- [18] Ramakrishna, S.; Mayer, J.; Wintermantel, E.; Leong, Kam W. (2001) *Biomedical applications of polymer-composite materials: a review*. Composites Science and Technology, Vol. 61, Elsevier Science Ltd, pp. 1189-12224.
- [19] Callister, William D., Jr. (2007) *Materials Science and Engineering: an Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 577-580.
- [20] Silva, Patrícia A. A. (2009) *Desenvolvimento e Aplicação de Compósitos ao Design de Mobiliário*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Design Industrial, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, pp. 34-38.
- [21] Zhang, Z.; Friedrich, K. (2003) *Artificial neural networks applied to polymer composites - a review*. Composites Science and Technology, Vol. 63, pp. 2029-2044.
- [22] Frenzel, H.; Bunzel, U.; Habler, R.; Pompe, G. (200) *Influence of Different Glass Fiber Sizings on Selected Mechanical Properties of PET/Glass Composites*. Adhesion Science and Technology, Vol. 14, pp. 651-660.
- [23] Hancock, P.; Cuthbertson, R.C. (1970) *Effect of Fibre Length and Interfacial Bond in Glass Fibre-Epoxy Resin Composites*. Materials Science, Vol. 5, pp. 762-768.
- [24] Dingle, L.E. (1974) *Aligned Discontinuous Carbon Fibre Composites*. Proc. of the Fourth International Conference on Carbon Fibres, their Composites and Applications, paper 11, Plastics Institute, London.
- [25] Miracle, Daniel B; Donaldson, Steven L. (2001) *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*. ASM International, pp. 77-118.
- [26] Akovali, Güneri (2001) *Handbook of Composite Fabrication*. Rapra Technology Ltd, United Kingdom, pp. 3-56.
- [27] Pickering, Kim L. (2008) *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 1-65.
- [28] Mallick, P. K. (2008) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. Taylor & Francis Group, LLC., United States of America, pp. 1-118, 557-580.
- [29] Bhushan, B. (2010) *Springer Handbook of Nanotechnology*. Springer, Würzburg, pp. 1-13.

- [30] Koo, Joseph H. (2006) *Polymer Nanocomposites - Processing, Characterization, And Applications*. McGraw-Hill Companies, Inc., United States of America, pp. 1-49.
- [31] Thostenson, Erik T.; Chunyu, Li; Chou, Tsu-Wei (2005) *Nanocomposites in context*. Composites Science and Tecnology, Vol. 65, pp. 491-516.
- [32] The National Nanotechnology Initiative - What is Nanotechnology? (Consult. 16 Abril 2010). Disponível na WWW: <<http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>>.
- [33] Booker, Richard; Boysen, Earl (2005) *Nanotechnology for Dummies*. Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, pp. 9-28.
- [34] Nanomaterial Potential - Market Opportunities. (Consult. 16 Abril 2010). Disponível na WWW: <http://www.jobwerx.com/news/Archives/Nanomaterials_2.html>.
- [35] Utracki L. A. (2004) *Clay-Containing Polymeric Nanocomposites*. Rapra Technology Limited, Shropshire, pp. 1-34.
- [36] Williams, Linda; Adams, Wade (2007) *Nanotechnology Demystified*. McGraw-Hill Companies, United States of America, pp. 3-20.
- [37] Okada, A.; Kawasumi, M.; Usuki, A.; Kojima, Y.; Kurauchi, T.; Kamigaito, O. (1990) *Synthesis and Properties of Nylon-6/Clay Hybrids*. In Schaefer, D. W.; Mark, J. E. (Eds.). *Polymer Based Molecular Composites*. MRS Symposium proceedings, Pittsburgh, Vol. 171. pp. 45-50.
- [38] Ray, Suprakash Sinha; Okamoto, Masami (2003) *Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing*. Progress in Polymer Science, Vol. 28, pp. 1539-1641.
- [39] Kiliaris, P.; Papaspyrides, C. D. (2010) *Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: An overview of flame retardancy*. Progress in Polymer Science, Vol. 35, pp. 902-958.
- [40] Fernández, C. de Julián; Mattei, G.; Sada, C.; Battaglin, C.; Mazzoldi, P. (2006) *Nanostructural and optical properties of cobalt and nickel-oxide/silica nanocomposites*. Materials Science & Engineering C, Vol. 26, pp. 987-991.
- [41] Luo, Jyi-Jiin; Daniel, Isaac M. (2003) *Characterization and modeling of mechanical behaviour of polymer/clay nanocomposites*. Composites Science Technology, Vol. 63, pp. 1607-1616.
- [42] Giannelis, Emmanuel P. (1996) *Polymer Layered Silicate Nanocomposites*. Advanced Materials, Vol. 8, pp. 29-35.
- [43] Saber-Samandari, Saeed, Khatibi, Akbar Afaghi; Basic, Domagoj (2007) *An experimental study on clay/epoxy nanocomposites produced in a centrifuge*. Composites, Part B: Engineering, Vol. 38, pp. 102-107.
- [44] Alexandre, Michael; Dubois, Philippe (2000) *Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials*. Materials Science and Engineering, Vol. 28, pp. 1-63.

- [45] Hodgkinson, J. M. (2000) *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 211-247.
- [46] 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.
- [47] Ferreira, L. M. S. (2006) Avaliação do Dano em Compósitos laminados Devido a Impactos de Baixa Velocidade. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, pp. 53-64.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Justo, Jorge M. C. F. (1996) *Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, pp. 53-64.
- [51] Ruiz, C.; Harding, J. (1992) *Modelling impact of composite structures using small specimens*. Composites Engineering, Vol. 2, pp. 164-167.
- [52] Olsson, R. (1992) *Impact response of orthotropic composite plates predicted from a one-parameter differential equation*. AIAA Journal, Vol. 30, pp. 1587-1596.
- [53] Swanson, S. R. (1992) *Elastic impact stress analysis of composite plates and cylinders composites*. Composites Engineering, Vol. 2, pp. 221-227.
- [54] Abrate, S. (1991) *Impact on laminated Composite Materials*. Applied Mech. Rev., Vol. 44, pp. 155-190.
- [55] Caprino, G. (1984) *Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates*. Composites Mater., Vol. 18, pp. 508-518.
- [56] Cantwell, W.J.; Morton, J. (1989) *Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP*. Composites, Vol. 20, pp. 545-551.
- [57] Prichard, J.C.; Hogg, P.J. (1990) *The Role of Impact Damage in Post-Impact Compression Testing*. Composites, Vol. 21, pp. 503-509.
- [58] Davies, G.A.O.; Hitchings, D.; Zhou, G. (1996) *Impact Damage and Residual Strengths of Woven Fabric Glass/Polyester Laminates*. Composites Part A: Applied Scien., Vol. 27A, pp. 1147-1156.

- [59] Zheng, S.; Sun C. (1998) *Delamination Interaction in Laminated Structures*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 59, pp. 225-240.
- [60] Moura, M.F.S.F.; Marques, A.T. (2002) *Prediction of Low Velocity Impact Damage in Carbon-Epoxy Laminates*. Composites: Part. A, Vol. 33, pp. 361-368.
- [61] Amaro, A. M.; Reis, P. N. B.; Moura, M. F. S. F. (2006) *Residual Strength after Low Velocity Impact in Carbon-Epoxy Laminates*. Materials Science Forum, Vol. 514-516, pp. 624-628.
- [62] Imielinska, K.; Castaing, M.; Wojtyra, R.; Haras, J.; Clezio, E. Le; 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, Vol. 157-158, pp. 513-522.
- [63] Reis, P. N. B.; Amaro, A. M.; Moura, M. F. S. F.; Santos, J. B. *Damage Characterization of Composite Materials Using Several NDT Techniques*, Submitted to Applied Composite Materials.
- [64] Hung, Y. Y. (1996) *Shearography for Non-destructive Evaluation of Composite Structures*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 24, Issues 2-3, pp. 161-182. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, pp. 101-107.
- [65] Chousal, J. A. G. (1999) *Técnicas de Processamento de Imagens Obtidas por Métodos Ópticos em Análise Experimental de Tensões*.
- [66] Cho, C.; Zhao, G (2001) *Effects of Geometric and Material Factors on Mechanical Response of Laminated Composites Due to Low Velocity Impact*. Composite Materials, Vol. 36, nº 12, pp. 1403-1428.
- [67] Cartié, D. D. R.; Irving, P. E. (2002) *Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, pp. 483-493.
- [68] Gustin, J.; Joneson, A.; Mahinfalah, M.; Stone, J. (2005) *Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites*. Composite Structures, Vol. 69, pp. 396-406.
- [69] Sun, L.; Gibson, R. F.; Gordaninejad, F.; Suhr, J. (2009) *Energy absorption capability of nanocomposites: A review*. Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 2392-2409.
- [70] Lin, J.-C.; Chang, L. C.; Nien, M. H.; Ho, H. L. (2006) *Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact*. Composite Structures, Vol. 74, pp. 30-36.
- [71] Avila, A. F.; Soares, M. I.; Neto, A. S. (2007) *A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, pp. 28-41.

- [72] Ávila, A. F.; Carvalho, M. G. R.; Dias, E. C.; Cruz, D. T. L. (2010) *Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact*. Composite Structures, Vol. 92, pp. 745-751.
- [73] Hosur, M. V.; Mohammed, A. A.; Zainuddin, S.; Jeelani, S. (2008) *Processing of nanoclay filled sandwich composites and their response to low-velocity impact loading*. Composite Structures, Vol. 82, pp. 101-116.
- [74] Iqbal, K.; Khan, S.-U.; Munir, A.; Kim, J.-K. (2009) Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix. Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 1949-1957.
- [75] Schoeppner, G. A.; Abrate, S. (2000) *Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, pp. 903-915.
- [76] Belingardi, G.; Vadori, R. (2002) Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. International Journal of Impact Engineering, Vol. 27, pp. 213-229.