



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo do impacto dinâmico em compósitos laminados sujeitos a ambientes hostis

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Bruno Samuel Marques Dias

Orientadores

Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor Paulo Nobre Balbis Reis
Professor [Auxiliar] da Universidade de Coimbra

Orientador Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2014

“A nossa maior gloria não reside no facto de nunca cairmos, mas sim em
levantarmo-nos sempre depois de cada queda”

Confúcio

Aos meus pais

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Amaro e Professor Doutor José Cirne, pelo tempo despendido, pelos conselhos dados e por toda a orientação que me foi dada durante este trabalho.

Ao Engenheiro João Esteves, por todos os conhecimentos transmitidos, pelo grande suporte durante a preparação e realização dos ensaios.

A todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico, por todos os conhecimentos e experiências transmitidas, sem os quais a realização deste trabalho não seria possível.

A todos os meus colegas que fizeram parte da minha vida académica e tornaram todos estes anos inesquecíveis

Aos meus pais, por me terem dado a oportunidade de estudar e pelo apoio fornecido nas alturas mais difíceis.

A todos vós, os meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

Hoje em dia, os materiais compósitos são utilizados em numerosas aplicações e submetidos a uma variedade de ambientes que os podem afetar de forma prejudicial. No entanto, a bibliografia existente não é completamente clara sobre os efeitos de tais ambientes nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

O objetivo da presente dissertação é o estudar os efeitos de ambientes hostis em materiais compósitos submetidos a impactos a elevada velocidade. Para atingir este objetivo, compósitos laminados unidirecionais de carbono / epóxi (0°) foram imersos em soluções de HCl e NaOH durante diferentes períodos de tempo. Em seguida, as amostras foram submetidas a ensaios de impacto a elevadas taxas de deformação e a ensaios a elevadas taxas de deformação com apoio em três pontos.

Verificou-se que as propriedades do material foram influenciadas pela solução e pelo tempo em que esteve imerso. A maior redução da tensão máxima e o maior aumento da deformação foram verificadas nos provetes que estiveram imersos durante o período de tempo mais longo em NaOH, por outro lado, os provetes que viram as suas propriedades menos influenciadas, foram os que estiveram imersos na solução de HCl durante o período de tempo menor.

Palavras-chave: Barra de Hopkinson, Compósitos de carbono/epóxi, Elevada taxa de deformação.

Abstract

Nowadays, composite materials are used in numerous applications and subjected to a variety of environments that can affect a detrimental way. However, the existing literature does not completely clear of the effects of such environments on the mechanical properties of composite materials.

The goal of this dissertation is to study the effects of hostile environments in composite materials subjected to high velocity impacts. To achieve this goal composite laminated unidirectional carbon / epoxy (0 °) were immersed in solutions of HCl and NaOH for different periods of time. Then the samples were subjected to impact tests at high strain rates and tests at high strain rates supported at three points.

It was found that the material properties have been influenced by the solution and the time he was immersed. A greater reduction in maximum tension and the largest increase in deformation were observed in specimens that were immersed during the longest time in NaOH, on the other hand, samples which have seen their properties less influenced, were those who were immersed in the solution HCl during the shortest time.

Keywords Carbon/epoxy composites, Hopkinson Bar, High Strain.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. Materiais Compósitos	3
2.2.1. Introdução.....	3
2.2.2. Aplicações dos materiais compósitos.....	5
2.2.3. Classificação dos materiais compósitos	7
2.2.4. Fibras	9
2.2.5. Matrizes	12
2.3. Compósitos laminados.....	15
2.3.1. Introdução.....	15
2.3.2. Laminados de Carbono/Epóxi	16
2.4. Ensaio dinâmicos nos materiais	17
2.4.1. Introdução.....	17
2.4.2. Ensaio de impacto a baixas taxas de deformação	18
2.4.3. Ensaio de impacto em médias taxas de deformação	18
2.4.4. Ensaio de impacto a elevadas taxas de deformação.....	19
2.5. Barra de Hopkinson (SHPB).....	20
2.5.1. Introdução.....	20
2.5.2. Base de Funcionamento de um Sistema de Barras de Hopkinson.....	21
3. Procedimento experimental.....	23
3.1. Introdução	23
3.2. Laminado de carbono/epóxi.....	23
3.2.1. Tratamento laboratorial	23
3.2.2. Avaliação da variação da massa dos provetes	26
3.3. Equipamento utilizado	27
3.3.1. Sistema de Barras de Hopkinson utilizado nos ensaios a elevadas taxas de deformação	27
3.3.2. Ensaio dinâmicos de Flexão em três pontos	32
4. resultados.....	35
4.1. Introdução	35
4.2. Variação da massa dos provetes	35
4.3. Apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de impacto a elevadas taxas de deformação	36

4.3.1. Reprodutibilidade dos ensaios.....	36
4.3.2. Análise dos resultados.....	38
4.4. Ensaio dinâmico à flexão em três pontos	42
4.5. Comparação dos resultados obtidos com a bibliografia existente.....	44
5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros	47
5.1. Introdução.....	47
5.2. Conclusões.....	47
5.3. Sugestões para trabalhos futuros	48
Bibliografia.....	49
ANEXO A.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolução dos materiais (Caetano, 2010).....	4
Figura 2.2. McLaren mp4-1 (Ramos, 2013).....	6
Figura 2.3. Constituição do Boeing 787 (Boeing).....	6
Figura 2.4. Tipos de reforços encontrados nos compósitos (Kaw, 2006)	7
Figura 2.5. Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço (Ventura, 2009).....	8
Figura 2.6. Orientação das fibras num compósito (Kaw, 2006).....	10
Figura 2.7. Formação de compósitos laminados (Kabche, 2009)	15
Figura 2.8. Partes de uma aeronave construídas por compósitos avançados (Geraldo M. Cândido).....	16
Figura 2.9. Ensaio a várias taxas de deformação (Handbook, 2000).....	18
Figura 2.10. Montagem de um Sistema de Barras de Hopkinson (Esteves, 2007).	20
Figura 3.1. Ciclo de cura das placas laminadas (Ferreira, 2014).....	24
Figura 3.2. Serra de disco	24
Figura 3.3. Geometria e dimensões dos provetes para os ensaios à flexão	25
Figura 3.4. Geometria e dimensões dos provetes para os ensaios a elevadas taxas de deformação	25
Figura 3.5. sistemas de Barras de Hopkinson e respetivo equipamento eletrónico.....	27
Figura 3.6. Projétil (5 e 6), caixa de comando (7), velocímetro (8 e 9)	28
Figura 3.7. Extensómetro micro-measurements	29
Figura 3.8. Leitura de dados obtida no osciloscópio Lecroy LT224 (Esteves, 2007).	30
Figura 3.9. Janela de leitura dos dados provenientes do osciloscópio pelo software DAVID®	30
Figura 3.10. Janela de trabalho para aproximação gráfica das ondas em estudo através do DAVID® (Esteves, 2007)	31
Figura 3.11. Câmara de filmar a alta velocidade, fastcam SA3 modelo 120 K C2.....	32
Figura 3.12. Suporte utilizado nos ensaios de flexão das placas.....	32
Figura 3.13. Montagem final para ensaio à flexão	33
Figura 4.1. Variação da massa dos provetes [%].....	35
Figura 4.2. Taxa de Deformação - Deformação dos provetes imersos 12 dias em HCl.....	37
Figura 4.3. Tensão - Deformação dos provetes imersos 12 dias em HCl.	37

Figura 4.4. Comparação da Taxa de Deformação - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL.	38
Figura 4.5. Comparação da Tensão - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL.....	39
Figura 4.6. Comparação da Taxa de Deformação - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL e em NaOH durante 36 dias.....	40
Figura 4.7. Comparação da Tensão - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL e em NaOH durante 36 dias.	40
Figura 4.8. Imagens da deformação dos provetes durante o impacto da barra incidente....	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça (Moura, et al., 2005).....	9
Tabela 2.2. Propriedades de alguns tipos de fibras.....	12
Tabela 2.3. Propriedades de alguns tipos de matrizes poliméricas (Mazumdar, 2002)	14
Tabela 2.4. Propriedades Nominais Típicas dos Pré-impregnados de Carbono/Epóxi F-584 (Geraldo M. Cândido).	17
Tabela 4.1. Resultados obtidos para as diversas condições de ensaio.....	41
Tabela 4.2. Valores obtidos nos ensaios de flexão em três pontos.....	43

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_0 – Área da secção transversal da barra

A – Área do provete

C_0 – Velocidade de propagação da onda

CWW – Massa da amostra após imersão

L – Comprimento inicial do provete

DW – Massa da amostra a seco

E – Módulo de Elasticidade

$W\%$ – Percentagem de absorção de fluido

ε – Deformação

ε_R – Deformação provocada pela onda refletida

ε_T – Deformação provocada pela onda transmitida

σ_f – Tensão limite à rotura

σ_S – Tensão no provete

σ_u – Resistência à tração

Siglas

DAVID[®] - The Database for Annotation, Visualization and Integrated
Discovery

1. INTRODUÇÃO

As necessidades do mundo atual obrigam à utilização de materiais com características que os materiais ditos convencionais dificilmente conseguem satisfazer. Nesta linha, a utilização de materiais compósitos na substituição de materiais mais convencionais tem vindo a ganhar uma enorme expressão. Para tal, contribui a elevada facilidade de produção, aliada a um baixo custo de produção, mas conseguindo materiais de elevada resistência e rigidez específica. Neste contexto, torna-se evidente o interesse nos materiais compósitos e mais especificamente nos compósitos laminados carbono/epóxi.

Contudo, os ambientes de serviço nem sempre são os mais propícios à utilização deste tipo de materiais, logo, torna-se extremamente importante conhecer os efeitos que esses ambientes podem provocar na integridade estrutural dos compósitos. Na tentativa de compreender melhor o comportamento dos materiais compósitos sujeitos a ambientes hostis, existem vários estudos realizados anteriormente, onde compósitos são sujeitos a ambientes ácidos e alcalinos, sendo testados posteriormente a impacto a baixa velocidade. Apesar dos estudos já realizados, sabe-se ainda muito pouco da resposta dos compósitos sujeitos a estes mesmos ambientes e testados posteriormente a impacto a alta velocidade.

Assim, esta dissertação visa estudar o efeito que os ambientes hostis provocam na integridade estrutural dos compósitos, mais especificamente compósitos de carbono/epóxi, sujeitos a impacto a alta velocidade.

Para tal esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo este, introdução, o primeiro. No segundo capítulo é descrito o estado da arte. O terceiro capítulo ilustra o procedimento experimental utilizado. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, sendo as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que compõem o quinto capítulo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo proceder a um enquadramento do presente trabalho com a bibliografia já existente. Serão abordados conceitos base sobre materiais compósitos, dando especial enfoque aos compósitos laminados de carbono/epóxi.

2.2. Materiais Compósitos

2.2.1. Introdução

Um material um compósito resulta da combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos e insolúveis entre si, sendo esta a grande diferença entre esta classe de materiais e as restantes (Kaw, 2006, Mazumdar, 2002, Moura, et al., 2005). Geralmente, estes materiais são compostos por um material denominado por matriz, e por outro (s) denominado (s) por reforço (s). (Kaw, 2006).

Poder-se-ia pensar que a história dos materiais compósitos é relativamente recente, contudo, pode dizer-se que a utilização de materiais compósitos remonta à antiguidade, ao período Neolítico, quando os tijolos eram fabricados com barro e palha (2500 anos AC), desde essa altura, estes materiais considerados compósitos rudimentares tiveram inúmeras aplicações Os sarcófagos eram fabricados com madeira aglomerada (1500 anos AC) e os arcos eram verdadeiras estruturas compósitas laminadas, constituídas por madeira e outros materiais como pele, osso, chifre e tendões (800 anos AC) (Caetano, 2010). Os materiais compósitos recentes tiveram o seu início de utilização por volta de 1900, coincidindo com o desenvolvimento dos materiais plásticos como o vinil, poliestireno, fenólicas e poliéster, estes materiais acabaram por substituir as resinas

naturais que eram usadas até então para a produção de compósitos. Em 1935, Owens Corning introduziu a fibra de vidro que quando combinada com materiais poliméricos cria uma estrutura bastante leve e extremamente resistente. O grande avanço nos materiais compósitos deu-se na altura da chegada da Segunda Guerra Mundial, e com ela a necessidade de materiais leves e resistentes, desde logo se percebeu a grande utilidades destes novos materiais compósitos passando estes a ser produzidos à escala industrial (Johnson a), 20014).

Desde então, os compósitos têm evoluído muito, sendo ainda hoje um dos materiais mais em foque, tanto pelas suas excelentes características, como pelo facto de se tratar, ainda, de um material com excelentes margens de desenvolvimento.

Como se pode verificar na figura 2.1, atualmente os materiais compósitos afirmam-se como materiais importantes na sociedade atual estando a sua importância a aumentar gradualmente. (Silva, 2014)

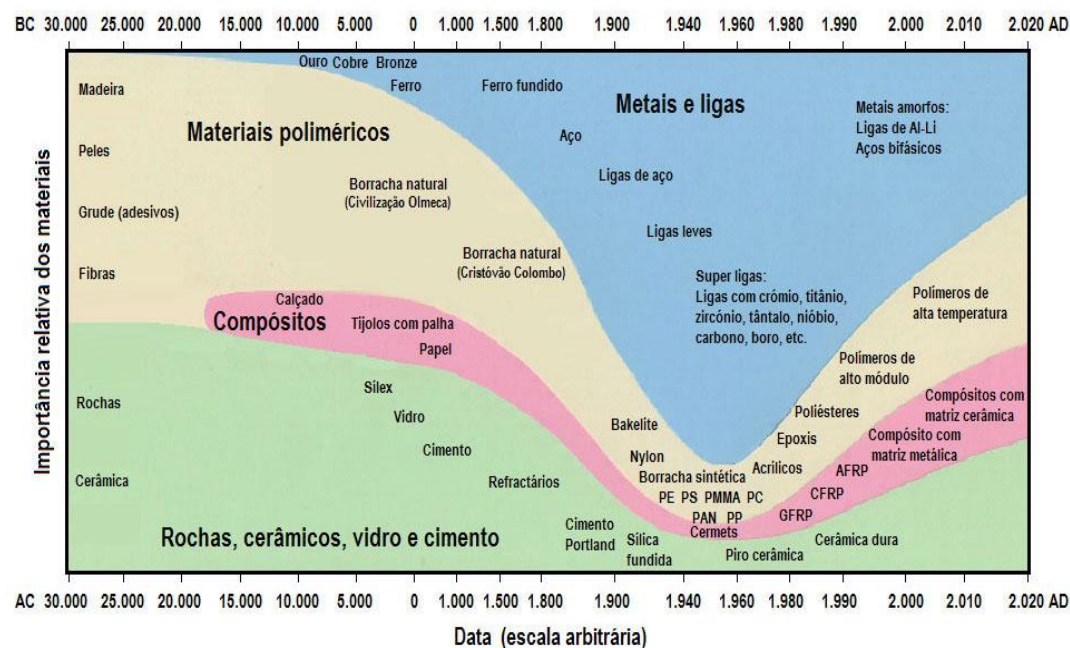


Figura 2.1. Evolução dos materiais (Caetano, 2010)

O crescente interesse dos materiais compósitos está ligado principalmente a dois fatores: econômico e performance.

O fator econômico deve-se ao facto do materiais compósitos serem muito mais leves que outros tipos de materiais, o que implica uma economia de combustível e consequentemente, um aumento de carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na

massa total do produto pode chegar a 30 % ou mais, em função da aplicação dada ao material compósito. O custo de produção de algumas peças em material compósito pode ser também menor se comparado com outros materiais.

O fator performance está ligado à procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência à rotura, resistência a ambientes agressivos, etc.). A maioria dos materiais compósitos apresenta caráter anisotrópico, sendo este um dos fatores primordiais para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente (Pereira, 2003).

2.2.2. Aplicações dos materiais compósitos

A grande versatilidade dos compósitos faz com que estes tenham uma grande gama de aplicações, alargando substancialmente as opções que se colocam aos projetistas e engenheiros de materiais hoje em dia. Atendendo à versatilidade das suas características, é natural que os compósitos se encontrem espalhados por diferentes áreas com uma enorme diferenciação entre si, que vão desde a indústria aeronáutica, espacial e de defesa, a áreas como os transportes, automóvel, construção civil, área da saúde e muitas outras (Moura, et al., 2005, Pereira, 2003).

Características como o baixo peso, a elevada resistência mecânica, a resistência à corrosão fizeram com que os compósitos se tenham tornado como um dos materiais com maior relevância na atualidade (Mazumdar, 2002).

No ramo automóvel, depois de um início com uma fraca adesão, onde apenas eram utilizados em carros de corrida (Figura 2.2) e de gama elevada, devido ao elevado preço, já se encontram presentes em inúmeros componentes de qualquer automóvel comum, sendo quase impossível imaginar a construção de um automóvel sem que este tenha na sua constituição materiais compósitos. Uma ótima qualidade de acabamento, e grande detalhe são algumas das características deste tipo de materiais que mais são apreciadas neste ramo. (Mazumdar, 2002)

Características como a elevada resistência à corrosão e baixo peso, aliada à escassez de madeira, fez com que após a segunda guerra mundial os compósitos

começassem a ser utilizados na construção de barcos. Esta alteração na construção naval tornou-se um sucesso, fazendo com que os barcos não necessitassem de manutenções tão caras (S. Selvaraju, 2011, Johnson b), 2014).



Figura 2.2. McLaren mp4-1 (Ramos, 2013)

Outra das áreas onde a utilização de compósitos é uma realidade é na indústria aeroespacial, onde a utilização de compósitos permite geralmente uma redução de peso nas aeronaves de cerca de 30%. Uma outra característica muito interessante e que é extremamente importante nesta área é a estabilidade dimensional de alguns compósitos, pois algumas aeronaves estão sujeitas a variações de temperatura que chegam a ser de 200°C (Mazumdar, 2002). Características como as anteriores faz com que hoje em dia existam exemplos de aviões onde a presença de materiais compósitos supera, em muito, a de qualquer outro tipo de materiais (Kabche, 2009).

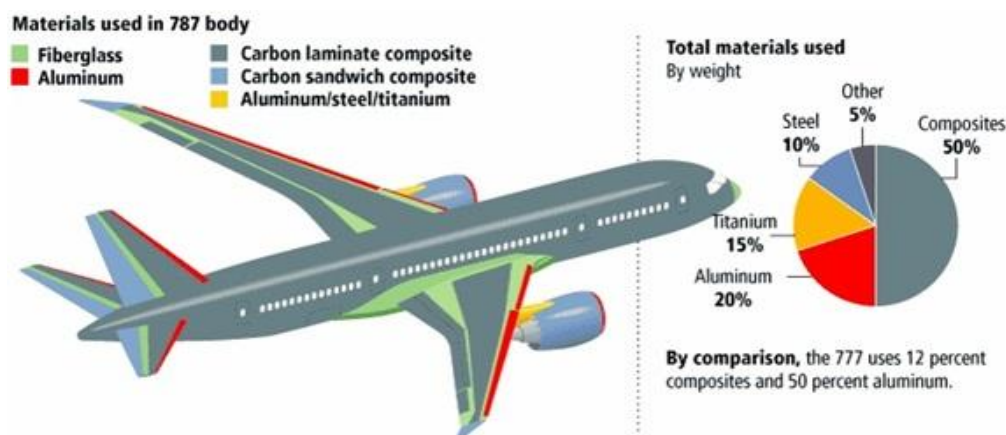
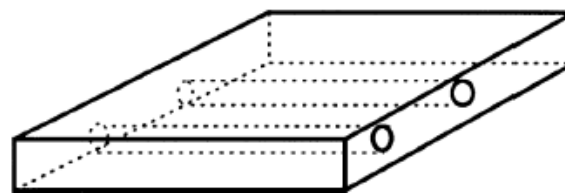


Figura 2.3. Constituição do Boeing 787 (Boeing, 2014)

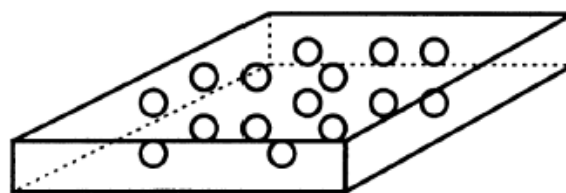
2.2.3. Classificação dos materiais compósitos

A classificação de compósitos pode ser feita de várias formas, tendo sempre em conta os seus constituintes. Geralmente a sua classificação é feita ou pelo material que constitui a sua matriz, ou pelas características do seu reforço. A sua matriz pode ser constituída por metais, cerâmicos, ou polímeros sendo a responsável pela estrutura do compósito e por manter os reforços na sua posição. Os reforços, por sua vez, são responsáveis pelo aumento da rigidez e força, mas também aumentam a resistência ao calor, à corrosão e pela condutividade do compósito (Ventura, 2009).

A classificação mais geral do reforço pode ser feita através duma divisão em três categorias, compósitos particulados, compósitos de fibras, contínuas ou descontínuas (*wiskers*) (Ventura, 2009). Há no entanto outros autores que optam por outro tipo de divisão dentro da classificação através do reforço.



Compósitos de fibras



Compósitos particulados

Figura 2.4. Tipos de reforços encontrados nos compósitos (Kaw, 2006)

Tendo em conta estes tipos de reforços, é possível obter a classificação de compósitos em função do reforço (Figura 2.5).

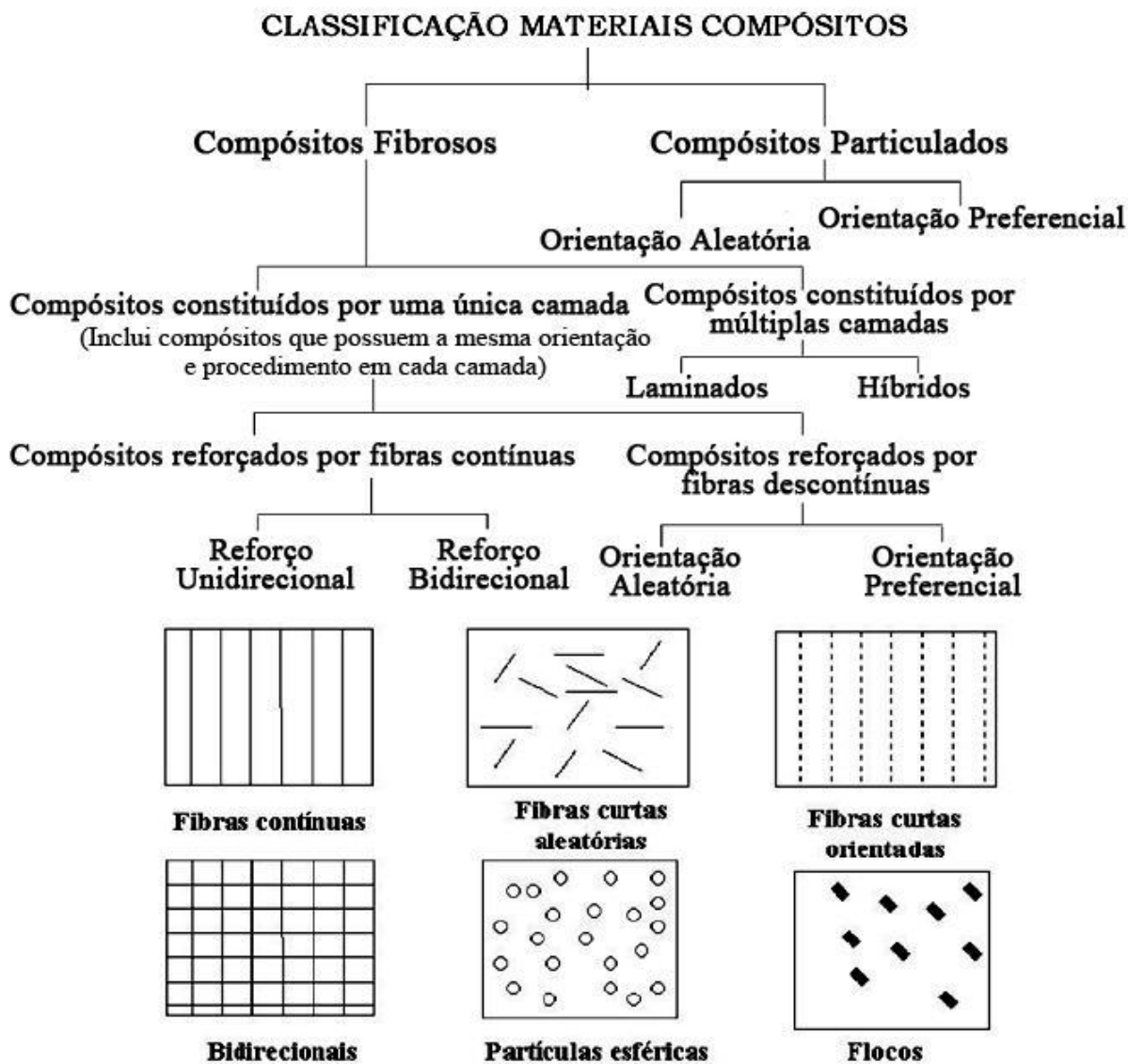


Figura 2.5. Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço (Ventura, 2009)

Tendo atenção ao escolher o reforço, a matriz e o processo de fabrico, é possível desenvolver compósitos com características que vão ao encontro das necessidades de cada engenheiro. Por exemplo, é possível produzir uma placa de material compósito mais resistente a uma carga exercida numa determinada direção, alinhando as fibras do reforço no sentido de aplicação da força (Ventura, 2009).

2.2.4. Fibras

As fibras tratam-se de uma classe de reforço extremamente importante, pois são responsáveis pelo aumento de resistência da matriz e conseqüentemente pela melhoria das suas propriedades (Ventura, 2009) .

A principal razão para o sucesso das fibras como reforço nos compósitos deve-se ao facto das fibras apresentarem propriedades mecânicas superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. A tabela 2.1 apresenta as propriedades de algumas fibras assim como de alguns materiais maciços. Através da sua análise fica demonstrado de forma clara as ótimas propriedades de algumas fibras e da importância que estas podem ter nos compósitos dos quais sejam reforço (Moura, et al., 2005).

Tabela 2.1. Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça (Moura, et al., 2005).

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tração, σ_u (GPa)	Densidade, ρ (kg/m³)	Modulo específico, E/ρ (MN.m/kg)	Resistência específica, σ_u/ρ kN.m/kg
Fibras:					
Vidro E	72.4	3.5	2540	28.5	1380
Vidro S	85.5	4.3	2490	35	1700
Carbono <i>Pich</i>	690	2.2	2150	321	1000
Carbono PAN	345	2.3	1850	186	1240
Boro	393	3.1	2700	146	1150
Sílica	72.4	5.8	2190	33	2650
Tungsténio	414	4.2	1930	21	220
Berílio	240	1.3	1830	131	710
Kevlar®49	131	3.6	1450	90	2480
Materiais convencionais					
Aço	210	0.34-2.1	7800	26.9	43-270
Ligas Al	70	0.14-0.62	2700	25.9	52-230
Vidro	70	0.7-2.1	2500	28	280-840
Tungsténio	350	1.1-4.1	19300	18.1	57-210
Berílio	300	0.7	1830	164	380

Contudo o desempenho das fibras pode ser afetado por vários fatores. A performance de um material compósito reforçado com fibras é significativamente afetado pela disposição das fibras umas em relação as outras, pela sua concentração e pela sua orientação dentro do compósito.

Existem dois tipos de configurações das fibras em relação à sua orientação, uma em que as fibras se encontram alinhadas paralelamente ao eixo longitudinal da fibra numa só direção, e um alinhamento completamente aleatório (Figura 2.6).

Normalmente as fibras contínuas estão alinhadas entre si, enquanto as fibras descontínuas se encontram orientadas aleatoriamente. (Ventura, 2009).

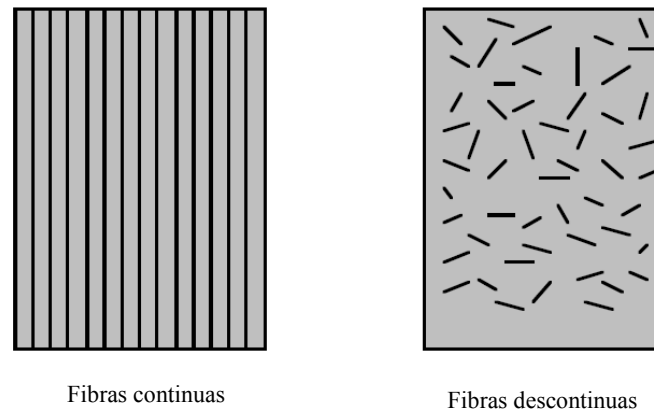


Figura 2.6. Orientação das fibras num compósito (Kaw, 2006)

As fibras podem também ser divididas de acordo com a sua origem, mineral ou orgânica. Das fibras de origem mineral fazem parte as fibras cerâmicas, fibras metálicas e fibras de origem inorgânica. Das fibras de origem orgânica fazem parte as fibras de vidro, aramída e carbono (Miravete, 2000).

Características como a boa aderência entre as fibras e a matriz, manutenção das suas propriedades em ambientes húmidos, a resistência mecânica, incombustibilidade, grande estabilidade dimensional, boa flexibilidade e baixo custo são fatores que fizeram com que as fibras de vidro sejam atualmente o reforço mais utilizado em materiais compósitos. Geralmente constituídas por sílica (mais de 50% da constituição das fibras), calcário, fluorita, ácido bórico e argila, as fibras de vidro vêm as suas características muito dependentes tanto das percentagens dos seus constituintes, como do seu processo de fabrico (Moura, et al., 2005, Mazumdar, 2002).

As fibras de carbono são outro tipo de reforço de compósitos obtidas a partir de compostos orgânicos ricos em carbono. A produção de fibras de carbono trata-se de uma

decomposição térmica de basicamente três precursores, a celulose que origina as *rayon fibers*, o poliácridonitrilo (PAN) e o alcatrão que origina as fibras *prich* (Moura, et al., 2005).

O custo da produção das fibras de carbono depende muito das propriedades que se pretende que estas tenham, por exemplo quanto maior resistência e rigidez se pretender que estas tenham, maior será o seu custo (Mazumdar, 2002). Atualmente as fibras de carbono conseguem atingir uma rigidez superior ao aço, tendo um peso bastante inferior a este (Valery V. Vasiliev, 2001). Outra característica importante é o facto das fibras de carbono serem bons condutores térmicos e elétricos, estas características aliadas a um coeficiente de expansão térmico perto de zero, proporciona que as fibras de carbono sejam não só um reforço, como alarguem as possibilidades de utilização do compósito do qual fazem parte (Chung, 2010).

As fibras de aramida, tratam-se de fibras orgânicas, tal como os dois tipos de fibras referidos anteriormente, que são obtidas a partir de poliamidas aromáticas. Apresentam como características uma ótima resistência química, mecânica, boa relação rigidez-peso, boa resistência ao impacto e à fadiga, grande capacidade de amortização de vibrações, boas características dielétricas. Possuem também elevada resistência a solventes orgânicos, a ácidos e a bases (Moura, et al., 2005, Mazumdar, 2002).

Na literatura disponível é possível encontrar muitos outros tipos de fibras, cuja sua aplicação depende sempre das características que se pretende acrescentar ao material, sendo estas normalmente associadas a desempenhos de menor exigência. Exemplos dessas mesmas fibras são as fibras de amianto, de sisal, poliamidas e poliésteres.

Para aplicações sujeitas a altas temperaturas é importante salientar as fibras cerâmicas, que mantêm uma elevada capacidade de resistência mesmo a temperaturas elevadas (Moura, et al., 2005).

Na tabela 2.2 encontram-se referidas algumas das principais características de alguns tipos de fibras.

Tabela 2.2. Propriedades de alguns tipos de fibras (Moura, et al., 2005)

	Densidade ρ (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Tensão limite à Rotura σ_f (MPa)	Coefficiente de expansão térmica axial (10 ⁻⁶ /°C)
Fibras:				
Vidro E	2600	73.0	3400	5.0
Vidro S	2490	85.5	4580	2.9
VidroR	2550	86.0	4400	4.0
Carbono PAN	1800	200-400	2480-5600	-0.7 a -0.5
Carbono <i>Pitch</i>	2000	300-700	1900-2200	-1.6 a -0.9
Carbono R.fibers	1700	415-680	2070-2760	-
Kevlar®29	1440	60	3000	-2.0
Kevlar®49	1450	129	3000	-2.0
Twaron®	1440	60	2600	-

2.2.5. Matrizes

Como já foi referido, os materiais compósitos são constituídos por reforços e matrizes. A matriz trata-se de um material que envolve os reforços protegendo estes contra ataques, químicos e ambientais, exteriores. A seleção da matriz é feita baseado nas suas características químicas, mecânicas, elétricas, inflamabilidade, custo, performance e requisitos de produção (Mazumdar, 2002).

Existem vários tipos de matrizes, metálicas, cerâmicas, cimentosas e poliméricas, sendo estas ultimas as mais utilizadas, devido ao seu baixo custo, facilidade de produção e elevada resistência (Kaw, 2006, Miravete, 2000).

As matrizes de origem polimérica dividem-se geralmente em duas categorias principais: termoplásticas e termoendurecíveis, tendo cada tipo propriedades específicas (Tabela 2.3).

As termoplásticas geralmente são caracterizadas por apresentarem uma maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade quando comparados com comparados com as matrizes poliméricas termoendurecíveis. A sua produção é fácil, por processos como por injeção ou por termoformação. Um outro ponto de grande vantagem que os polímeros termoplásticos têm sobre os termoendurecíveis é o facto de serem recicláveis, sendo esta uma grande vantagem nos dias de hoje (Moura, et al., 2005). Contudo, este tipo de polímeros é também mais suscetível a solventes, o que inviabiliza a sua utilização em inúmeras ocasiões (Mazumdar, 2002).

Como exemplos deste tipo de matrizes temos o nylon, o policarbonato, o acetal e o teflon.

Existem vários tipos de nylons, cada um com propriedades mecânicas e físicas muito específicas, contudo, em termos mais gerais, pode-se dizer que o nylon fornece um bom acabamento superficial. Como contra, tem o facto de absorver humidade, o que é um problema para a sua estabilidade dimensional (Mazumdar, 2002).

O policarbonato, por sua vez, é dimensionalmente estável, tem boa resistência química e térmica e tem uma boa duração. Esta matriz é muito utilizada sobre a forma de compósito no ramo automóvel (Moura, et al., 2005).

Os termoendurecíveis por seu lado, são constituídos por moléculas que formam estruturas bastante rígidas. Contrariamente ao que se passa com os termoplásticos, não podem ser reprocessados, inviabilizando assim a sua reciclagem (Moura, et al., 2005).

Uma ótima impregnação nas fibras, facilidade de processamento, visto que geralmente possuem uma elevada viscosidade à temperatura ambiente, são fatores a favor deste tipo de matrizes poliméricas. Além do já referido, estes polímeros possuem ainda uma grande estabilidade dimensional, melhor rigidez e alta resistência elétrica, mecânica e química. Para atingir o estado sólido, este tipo de polímeros tem de passar por um processo de cura (Mazumdar, 2002).

Os termoendurecíveis mais utilizados são as resinas de poliésteres, as resinas de epóxico, e as resinas fenólicas.

As resinas de poliésteres mais utilizadas na fabricação de compósitos fazem parte dos poliésteres insaturados. A sua elevada utilização deve-se ao seu baixo custo, facilidade de processamento e boa relação entre propriedades mecânicas, químicas e elétricas (Moura, et al., 2005).

As resinas de epóxico são cerca de quatro vezes mais caras que as anteriores, o que se justifica facilmente devido à sua maior dificuldade de processamento e tempos de cura mais longos. As suas principais vantagens são a elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química, boas propriedades de adesão às fibras, grande estabilidade dimensional. Como contra tem o facto de ser um pouco frágil, situação facilmente contornada através da adição de aditivos de alta tenacidade (Moura, et al., 2005).

Tabela 2.3. Propriedades de alguns tipos de matrizes poliméricas (Mazumdar, 2002)

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tração, σ_u (MPa)	Densidade, ρ (kg/m³)
Termoplástico:			
Nylon	1.3-3.5	55-90	1100
Acetal	3.5	70	1400
Policarbonato	2.1-3.5	55-70	1200
Termoendurecíveis:			
Epóxi	2.5-5.0	50-110	1200-1400
Fenólica	2.7-4.1	35-60	1200-1400
Poliéster	1.6-4.1	35-95	1100-1400

2.3. Compósitos laminados

2.3.1. Introdução

Como foi verificado ao longo desta dissertação, os compósitos podem ser classificados tendo em conta vários fatores. Irão ser agora abordados os compósitos constituídos por pequenas e finas camadas (lâminas) sobrepostas umas sobre as outras denominados por compósitos laminados (figura 2.7). Nestes compósitos, o reforço é feito por fibras contínuas, orientadas paralelamente entre si segundo uma determinada orientação. Estes compósitos possuem um carácter ortotrópico, tendo uma maior resistência e rigidez numa orientação paralela as fibras de reforço, conseqüentemente, uma menor resistência e rigidez numa orientação perpendicular as mesmas (Mazumdar, 2002, Kabche, 2009, Almeida, 2006).

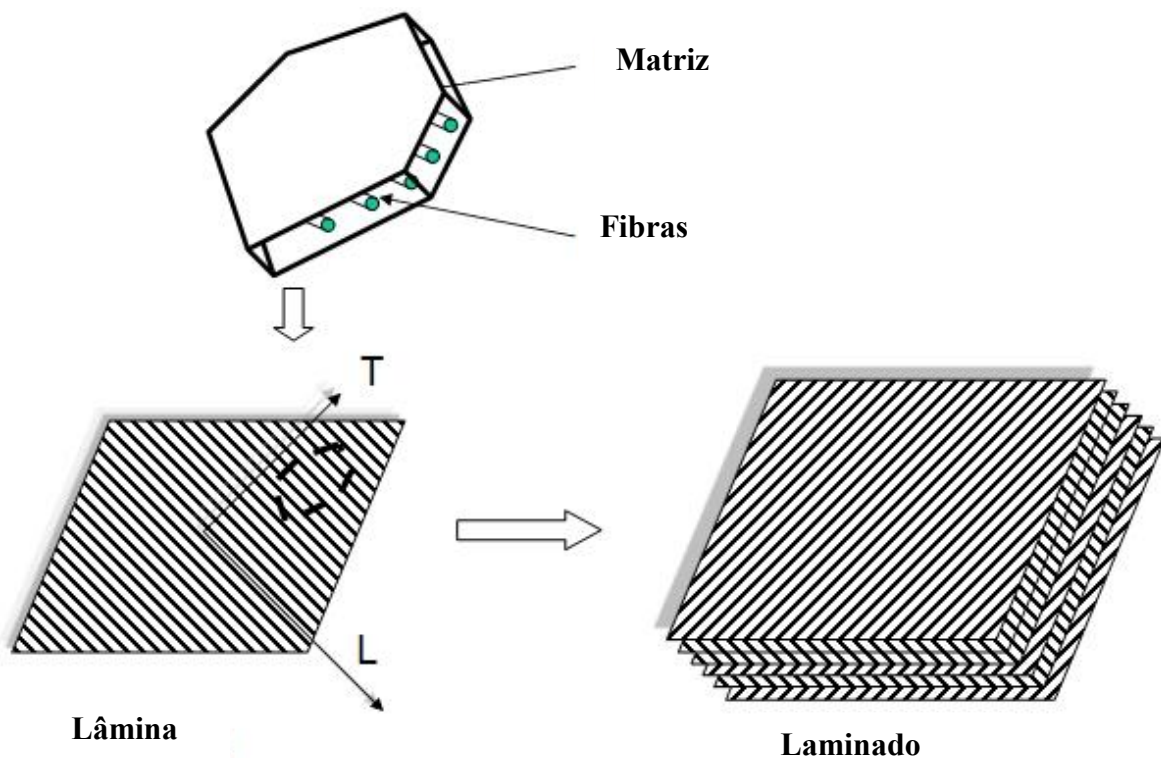


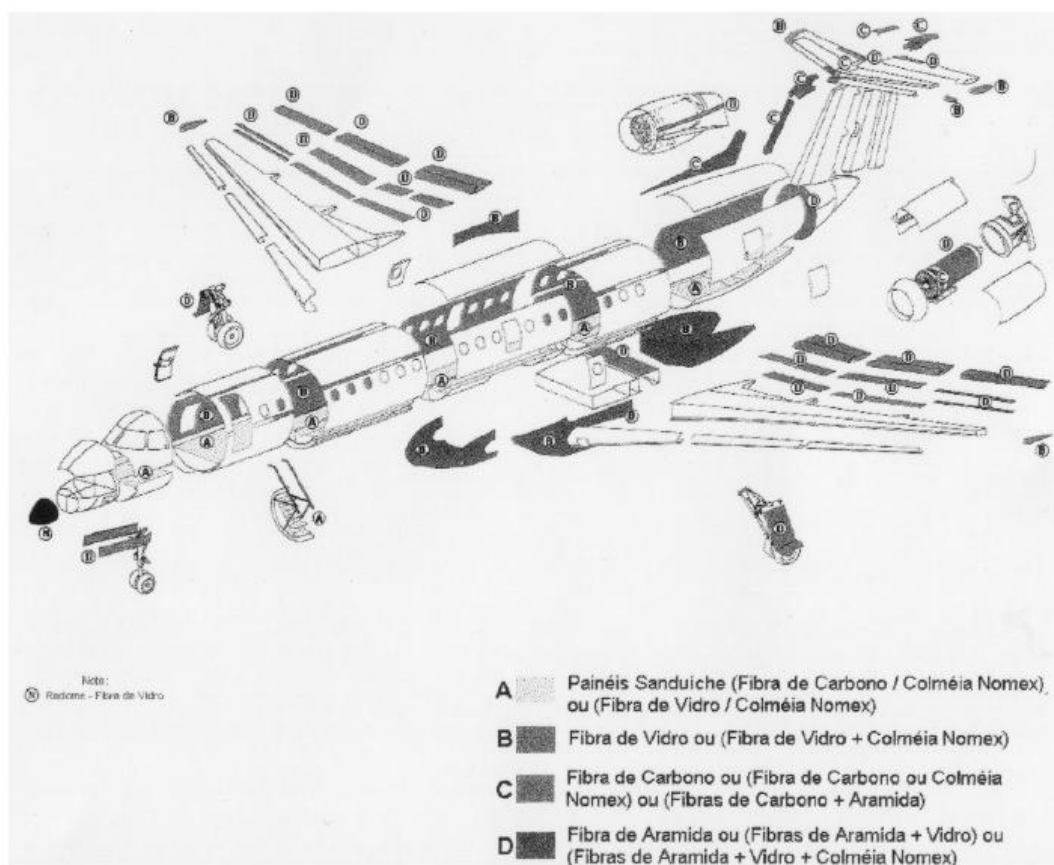
Figura 2.7. Formação de compósitos laminados (Kabche, 2009)

A caracterização dos compósitos laminados é feita a partir da caracterização da cada lâmina. Esta caracterização é feita descrevendo o ângulo que as fibras de cada lâmina fazem com os eixos de referência. As características de um laminado dependem fortemente

da orientação das fibras de cada lâmina que o constitui, alterando drasticamente as características do laminado apenas com uma pequena alteração do ângulo das fibras de uma lâmina. Esta característica dos compósitos laminados, torna bastante complicado prever o seu comportamento as solicitações (Almeira, 2006).

2.3.2. Laminados de Carbono/Epóxi

Combinando características como elevada resistência e rigidez, faz com que este tipo de compósitos comece a roubar protagonismo em áreas onde antigamente materiais como o alumínio e o aço dominavam. Tendo uma extrema utilidade na construção de peças como ailerons, reservatórios, carenagens ou lemes, os compósitos laminados de carbono/epóxi têm vindo a ter uma utilização bastante abrangente e diversificada (Geraldo M. Cândido).



Partindo de vários ensaios normalizados, foi possível obter as características mecânicas do carbono/epóxi. A tabela seguinte (tabela 2.4) apresenta as propriedades mecânicas do pré-impregnado carbono/epóxi F-584 à temperatura ambiente.

Tabela 2.4. Propriedades Nominiais Típicas dos Pré-impregnados de Carbono/Epóxi F-584 (Geraldo M. Cândido).

Propriedades Mecânicas	Fita Unidirecional	Tecido Bidirecional	Norma ASTM
Módulo Longitudinal, E_1 (GPa)	130	65	D 3039
Módulo Transversal, E_2 (GPa)	2	65	D 3039
Módulo de Cisalhamento, G_{12} (GPa)	6	5	D 4255
Quociente de Poisson, ν_{12} (GPa)	0,27	0,05	D 3039
Resistência à Tração Longitudinal, X_T (MPa)	1721	680	D 3039
Resistência à Tração Transversal, Y_t (MPa)	43	680	D 3039
Resistência à Compressão Longitudinal, X_c (MPa)	703	548	D 3410
Resistência à Compressão Transversal, Y_c (MPa)	133	548	D 3410
Resistência ao Cisalhamento no Plano, S_{12} (MPa)	88	122	D 4255
Resistência ao Cisalhamento Interlaminar, S_{13} (MPa)	84	70	D 2344
Massa Específica, ρ ($\text{kg}/\text{mm}^3 \times 10^{-5}$)	0,155	0,157	D 3171
Espessura Nominal da Camada, t_{nom} (mm)	0,18	0,35	
Massa Específica da Resina (g/cm^3)	1,22	1,22	
Massa Específica da Fibra de Carbono (g/cm^3)	1,77	1,77	

2.4. Ensaio dinâmicos nos materiais

2.4.1. Introdução

Os compósitos laminados têm vindo a abranger uma gama de utilização cada vez mais extensa, o que torna cada vez mais importante perceber o seu comportamento a solicitações dinâmicas, visto estas poderem diminuir significativamente a resistência dos

materiais (Abrate, 2001). Contudo os materiais podem ser sujeitos a vários tipos de impactos, que são classificados de acordo com a taxa de deformação que estes impõem ao material (figura 2.9) (Handbook, 2000).

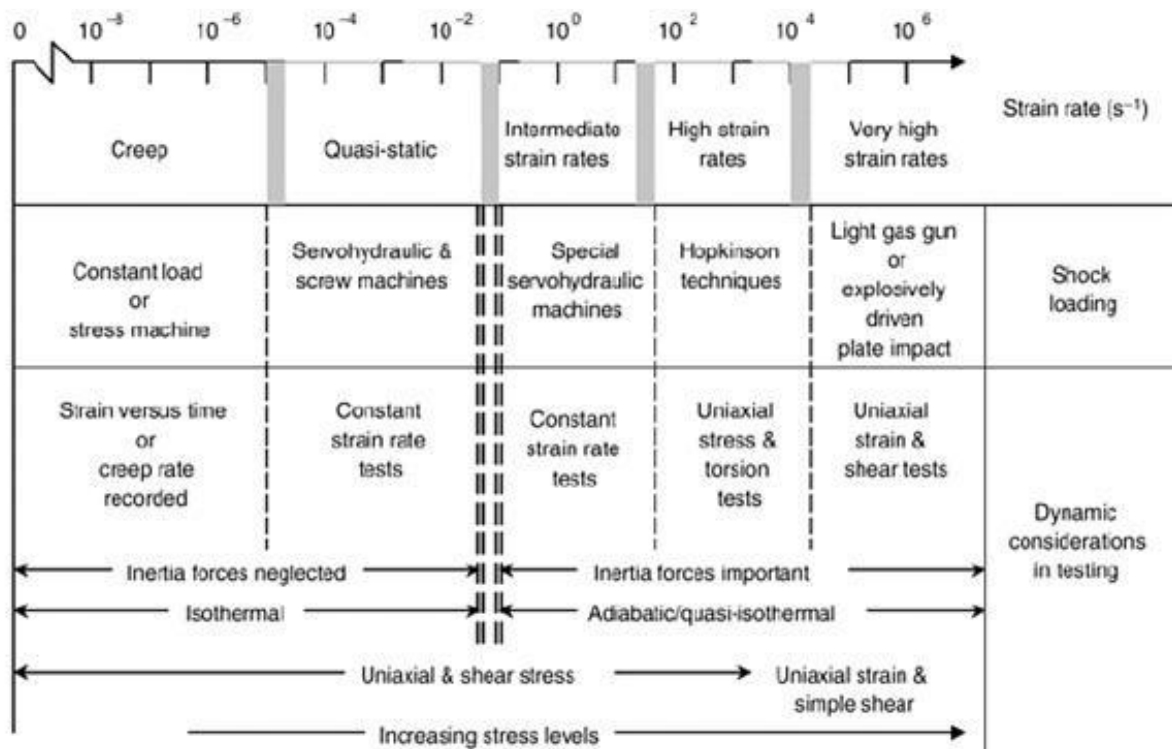


Figura 2.9. Ensaios a várias taxas de deformação (Handbook, 2000).

2.4.2. Ensaios de impacto a baixas taxas de deformação

Considera-se que um corpo é solicitado a baixa taxa de deformação quando as taxas de deformação nominal não ultrapassam 10s⁻¹. O exemplo mais representativo da simulação em laboratório deste tipo de impactos é o ensaio de Charpy-Izod. Estes ensaios são utilizados para determinar a energia absorvida pelos materiais em estruturas submetidas a carregamentos quase estáticos. Geralmente o foco de aplicação destes ensaios são os materiais poliméricos (Cardoso, 2005).

2.4.3. Ensaios de impacto em médias taxas de deformação

Geralmente os materiais são caracterizados pelos ensaios de queda de peso, *drop weight test*. Quando a aceleração do projétil é apenas a aceleração gravitacional, as

taxas de deformação são bem próximas das obtidas nos ensaios de Charpy-Izod. Caso seja aplicada algum tipo de aceleração ao projétil, é possível atingir taxas de deformação na ordem de $10^2 s^{-1}$. Este tipo de ensaios tem a vantagem de ser de fácil reprodutibilidade, sendo a sua instrumentação fácil e confiável. Sendo o seu principal foco de aplicação em materiais frágeis (Cardoso, 2005).

2.4.4. Ensaios de impacto a elevadas taxas de deformação

As exigências que se colocam aos materiais hoje em dia, faz com que seja necessário conhecer o seu comportamento a solicitações elevadas, e a diferentes taxas de deformação. Assim sendo, para otimização e adaptação dos materiais às mais variadas aplicações, tornou-se necessário desenvolver técnicas laboratoriais que permitam o conhecimento do comportamento desses materiais a elevadas taxas de deformação. Na altura da 2ª Guerra Mundial, sugeriram então vários ensaios com a capacidade de estudar o comportamento dos materiais a elevadas taxas de deformação. Métodos como o método de Taylor de impacto de cilindros, os aceleradores lineares de impacto como as barras de Davies e de Hopkinson/Kolsky, os canhões a gás de vários estágios e os dispositivos com cargas explosivas, viram o seu desenvolvimento nesta altura da história (Cardoso, 2005).

Contudo, o método de Taylor não permite taxas de deformação constantes ao longo dos ensaios, e os canhões a gás e dispositivos com explosivos têm um custo extremamente elevado. Isto levou a que os ensaios utilizando as barras sejam os que mais são utilizados laboratorialmente para as análises do comportamento de materiais a taxas de deformação elevadas (Cardoso, 2005).

A possibilidade de manter os valores da taxa de deformação em condições de deformação uniforme faz com que o sistema de barras de Hopkinson seja bastante bem aceite atualmente (M.F. Ashby, 2000).

2.5. Barra de Hopkinson (SHPB)

2.5.1. Introdução

A Barra de Hopkinson é um método laboratorial utilizado para a determinação do comportamento dos materiais sujeitos a elevadas taxas de deformação. Esta técnica teve o seu início com as experiências de propagação de ondas de tensão em fios de aço efetuadas por John Hopkinson e mais tarde pelo seu filho Bertram Hopkinson (Gama, et al., 2004).

Depois de passar por vários desenvolvimentos e atualizações, a Barra de Hopkinson atual é constituída essencialmente por duas barras de secção uniforme, entre as quais é colocado o provete do material a estudar. Uma das extremidades da barra, considerada barra incidente ou *input bar*, é impactada por uma terceira barra, denominada projétil, que vai induzir nesta uma onda de compressão que se irá propagar ao longo da barra incidente. Esta onda ao atingir a zona do provete, irá dividir-se, sendo parte refletida para a barra incidente, desta vez sob a forma de onda de tração, enquanto a outra parte é transmitida à segunda barra, denominada por barra transmitida ou *output bar*. Esta divisão na onda inicial fica a dever-se à existência do provete, por este ser de um material com características e dimensões diferentes das barras (Esteves, 2007).

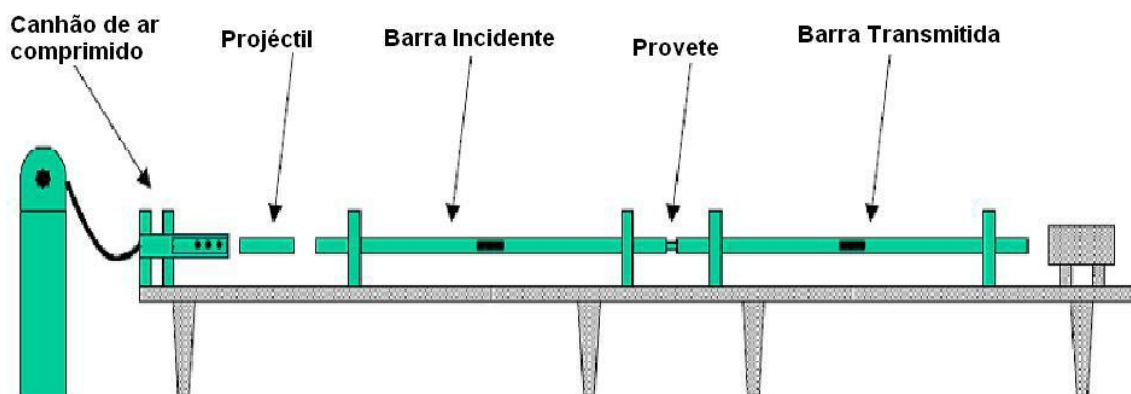


Figura 2.10. Montagem de um Sistema de Barras de Hopkinson (Esteves, 2007).

Como forma de analisar as ondas que se transmitem nas barras incidente e transmitida, são acoplados em cada uma delas estações de extensómetros formando um

circuito elétrico com a configuração de ponte Wheatstone. A partir da análise das ondas incidente, transmitida e refletida captadas através das estações de extensometria é possível caracterizar o comportamento dos materiais ensaiados (Esteves, 2007).

2.5.2. Base de Funcionamento de um Sistema de Barras de Hopkinson

Para o funcionamento do sistema de Barras de Hopkinson é necessário garantir que durante os testes não ultrapassada a tensão limite elástica do de que são construídas as barra. Partindo desta obrigatoriedade é então possível calcular a tensão, a deformação e a taxa de deformação do provete analisando as ondas obtidas nos ensaios experimentais (Esteves, 2007).

Segundo Esteves, 2007, a tensão no provete será então calculada através da seguinte equação 2.1,

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_o}{A} \varepsilon_T(t) \quad (2.1)$$

onde E é o modulo de elasticidade da barra transmitida, A_o a área da secção transversal da barra transmitida, A a área da secção transversal do provete e ε_T a onda de deformação transmitida.

A taxa de deformação no provete obtém-se através da equação,

$$\frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2.2)$$

onde $\varepsilon_R(t)$ é a onda de deformação refletida na barra incidente, L o comprimento inicial do provete, e C_0 a velocidade de propagação de onda na barra incidente.

A velocidade de onda na barra incidente é calculada recorrendo á equação,

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

onde E e ρ são o módulo de elasticidade e a densidade, respetivamente.

A deformação do provete é obtida integrando a equação 2.2

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (2.4)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo expor os materiais usados, e equipamentos usados, assim como explicar todo o procedimento experimental.

3.2. Laminado de carbono/epóxi

3.2.1. Tratamento laboratorial

Os compósitos laminados testados foram fornecidos pelo INEGI, tendo sido produzidos pelo processo de autoclave. Este processo tem por base a combinação da variação de pressão, do vácuo e da temperatura no fabrico dos laminados (Mazumdar, 2002). As placas de carbono/epóxi estudadas são constituídas por 24 camadas unidireccionais (0°). Depois de empilhadas as 24 lâminas, a placa foi sujeita a um ciclo de cura no autoclave, que consistiu na extração de todo o ar e no aquecimento da placa desde a temperatura ambiente até à temperatura de 130°C, com uma subida de temperatura de 3°C/minuto. A placa é mantida nestas condições durante 60 min. O processo de arrefecimento é semelhante ao de aquecimento, descendo a temperatura desde os 130°C até à temperatura ambiente com uma velocidade de arrefecimento de 3°C/minuto. O ciclo de cura das placas está indicado na figura 3.1.

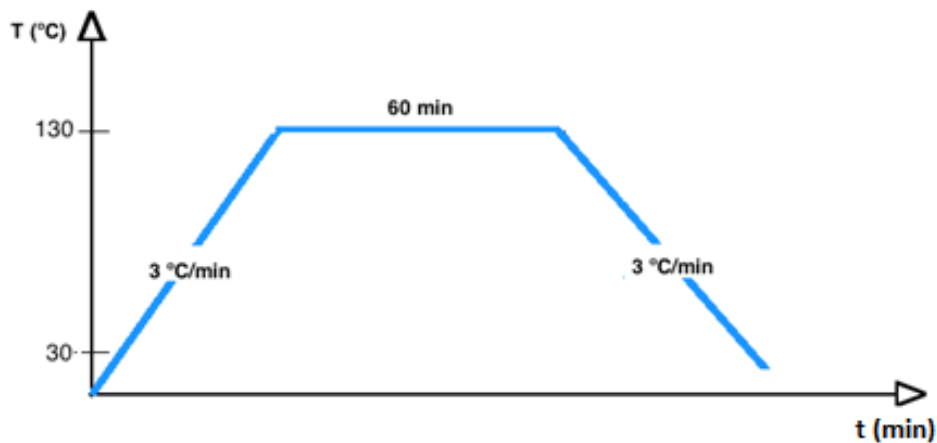


Figura 3.1. Ciclo de cura das placas laminadas (Ferreira, 2014).

As placas foram fornecidas com dimensões de $300 \times 300 \times 3,7$ [mm], pelo que foi necessário proceder ao seu corte a fim de obter as dimensões requeridas para os dois tipos de provetes necessários à realização dos testes. Recorrendo a uma serra de disco com dentes de diamante (figura 3.2) procedeu-se ao corte dos provetes com dimensões de $100 \times 100 \times 3,7$ [mm] e $10 \times 10 \times 3,7$ [mm] (Figura 3.3 e 3.4 respetivamente), os primeiros tendo como objetivo os ensaios dinâmicos à flexão em três, e os segundos com o objetivo de estudar o comportamento do compósito a elevadas taxas de deformação.



Figura 3.2. Serra de disco

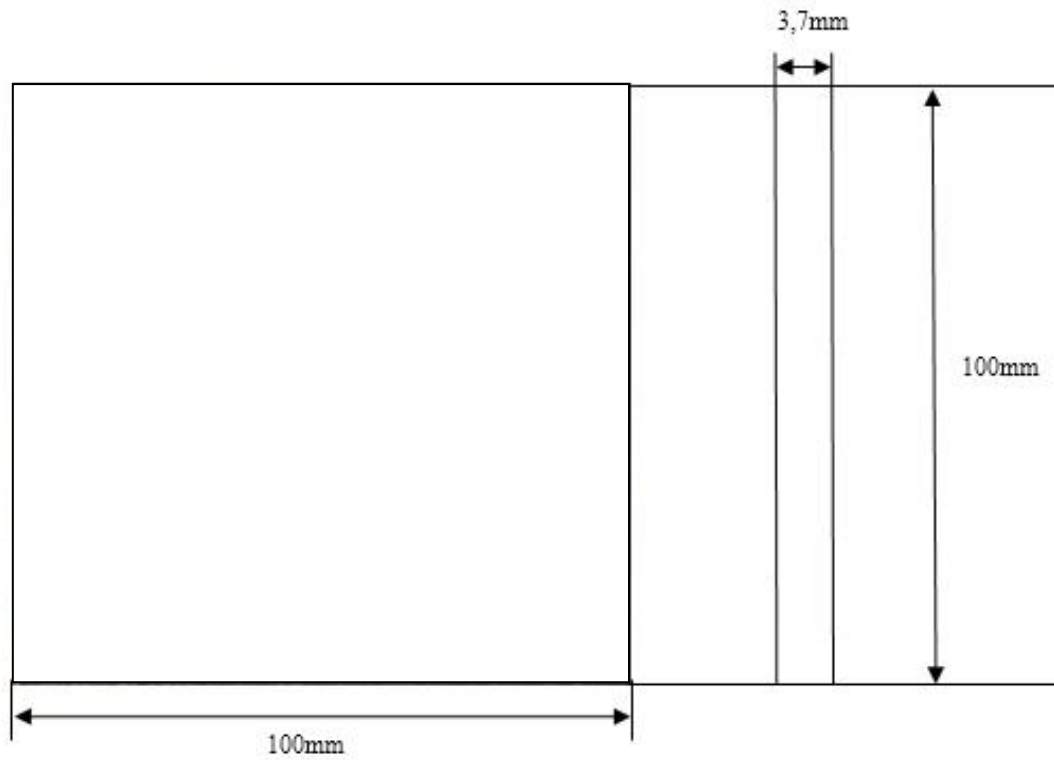


Figura 3.3. Geometria e dimensões dos provetes para os ensaios à flexão

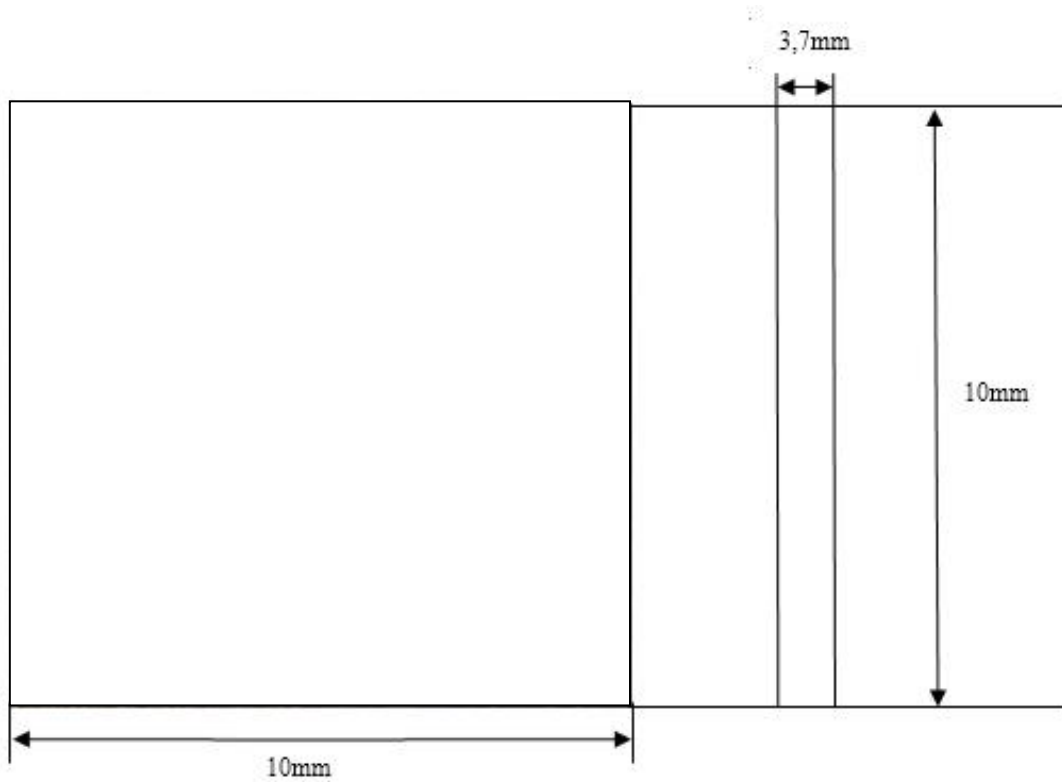


Figura 3.4. Geometria e dimensões dos provetes para os ensaios a elevadas taxas de deformação

Após o corte, os provetes foram limpos e pesados numa balança digital, marca AND modelo GH 202 com capacidade máxima e mínima de 220g e 1mg respetivamente. A balança possui um erro 0,01mg na pesagem de 1mg e de 0,1 mg na pesagem de 220g. De seguida, os provetes foram mergulhados em soluções de HCl e de NaOH, ambos com uma concentração de 10%. Parte dos provetes ficou mergulhado nas soluções durante 12 dias, os restantes durante 36 dias.

A imersão dos provetes nas soluções referidas tem por objetivo a criação de um ambiente hostil, permitindo o estudo do efeito que este tipo de exposições possa provocar no material. É importante referir que ambas as faces dos provetes foram submersas nas soluções de HCl e NaOH. Contudo, num caso prático apenas uma das faces teria estado sujeita em contacto com as soluções. A escolha do tempo de imersão dos provetes e as soluções utilizadas para tal efeito, foi feita com o objetivo de proceder a uma comparação de resultados com outros projetos já realizados anteriormente.

Decorrido o tempo programado para as imersões (12 e 36 dias), os provetes foram retirados das soluções, lavados com água corrente deixando-se depois secar à temperatura ambiente. Após este processo, os provetes foram pesados de novo para verificar qual o efeito que a base e o ácido tiveram nas placas a nível da sua massa.

3.2.2. Avaliação da variação da massa dos provetes

De modo a se obter a absorção de fluidos durante a imersão por parte das placas de laminados, foi necessário proceder à avaliação da variação de massa das amostras. Para tal, avaliou-se a massa das amostras a seco (DW -Dry Weight) e após imersão (CWW -current wet weight). A absorção de fluido ($W\%$) é dada pela seguinte fórmula (Amaro, et al., 2012):

$$W\% = \frac{CWW - DW}{DW} * 100 \quad (3.1)$$

onde, $W\%$ traduz a absorção de fluido, CWW representa a massa da amostra após imersão e DW a massa da amostra a seco.

3.3. Equipamento utilizado

3.3.1. Sistema de Barras de Hopkinson utilizado nos ensaios a elevadas taxas de deformação

Como já foi referido no capítulo anterior, o sistema de Barras de Hopkinson permite a avaliação das forças aplicadas aos provetes, partindo do conhecimento da velocidade de impacto a que são solicitados. De forma a ser possível determinar a deformação, das barras, provocada pela passagem das ondas de impacto, as barras incidente e transmitida foram previamente instrumentadas.



Figura 3.5. sistemas de Barras de Hopkinson e respetivo equipamento eletrónico

As figuras 3.5 e 3.6 mostram o aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios.

Na figura 3.5 é possível ver o sistema de Barras de Hopkinson utilizado (1), o osciloscópio com memória Lecroy LT224 (2), o computador de visualização das imagens (3) obtidas através de uma câmara de alta velocidade Fastcam SA3, modelo 120 K C2, posteriormente tratadas com o programa Photron, e por fim um amplificador Vishay 2210A (4).

O impacto inicial que vai provocar a onda de compressão na barra incidente é produzido pelo projétil (5), sendo o movimento deste iniciado pelo disparo do ar comprimido contido num reservatório (6). O controlo da pressão dentro do reservatório, e o disparo, é feito por intermédio da caixa de controlo (7). A velocidade com que o projétil atinge a barra incidente é calculada por intermédio da diferença de tempo entre a interrupção de dois feixes laser (8) e é registado pelo velocímetro (9).



Figura 3.6. Projétil (5 e 6), caixa de comando (7), velocímetro (8 e 9)

A captação das deformações provocadas pela passagem das ondas foi feita com recurso a extensómetros de dupla grelha, do tipo folha, com resistências de

$120\Omega \pm 0,4\%$ da marca micro-measurements (figura 3.7). Os extensómetros estão integrados num circuito elétrico apropriado de modo a que a oscilação da resistência elétrica do extensómetro, proporcional à sua deformação, seja transformada numa variação da diferença de potencial. Os extensómetros foram dispostos de modo a serem eliminados os efeitos das ondas de flexão que poderão advir de impactos não coaxiais. Recorrendo ao equipamento apropriado referido anteriormente, essa diferença de potencial é ampliada e medida.

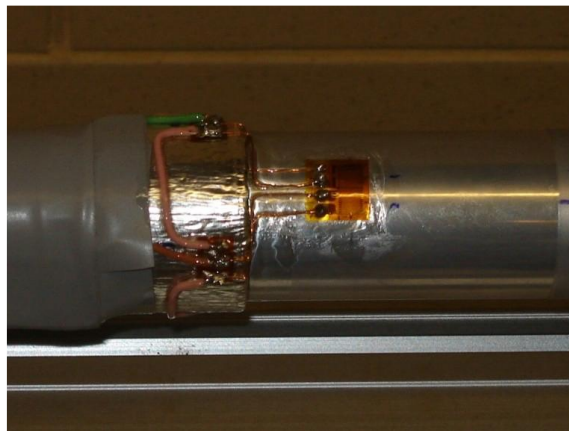


Figura 3.7. Extensómetro micro-measurements

O amplificador Vishay 2210A é responsável por alimentar as estações de extensometria com uma tensão, V_{in} , de 3V e amplificar o sinal de saída, V_{out} , 1000 vezes de modo a facilitar a sua posterior leitura desse sinal no osciloscópio. O amplificador tem também a função de equilibrar as pontes extensométricas, garantindo que caso não exista qualquer deformação nas barras, o sinal $V_{out} = 0V$. O sinal amplificado é então registado no osciloscópio com memória (figura 3.8) e gravado para posterior tratamento.

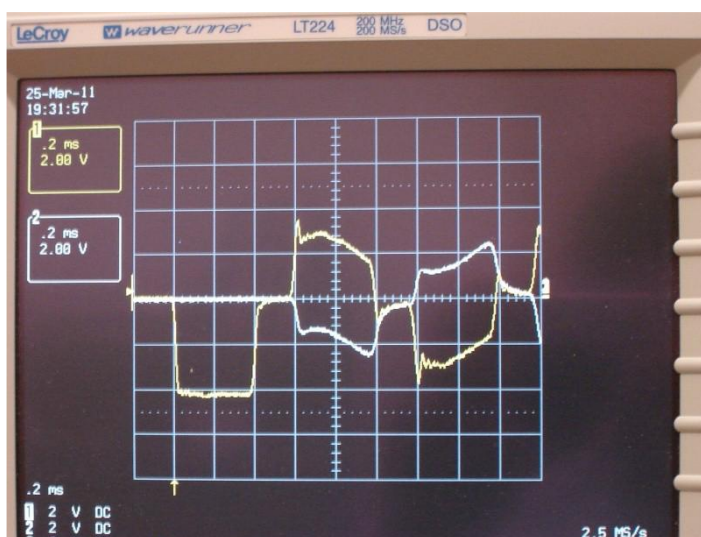


Figura 3.8. Leitura de dados obtida no osciloscópio Lecroy LT224 (Esteves, 2007).

Depois de exportados, o tratamento dos dados provenientes do osciloscópio foi efetuado recorrendo ao software DAVID[®], programado em linguagem Labview, sendo este um software que permite uma análise completa dos ensaios realizados com as Barras de Hopkinson. (Esteves, 2007).

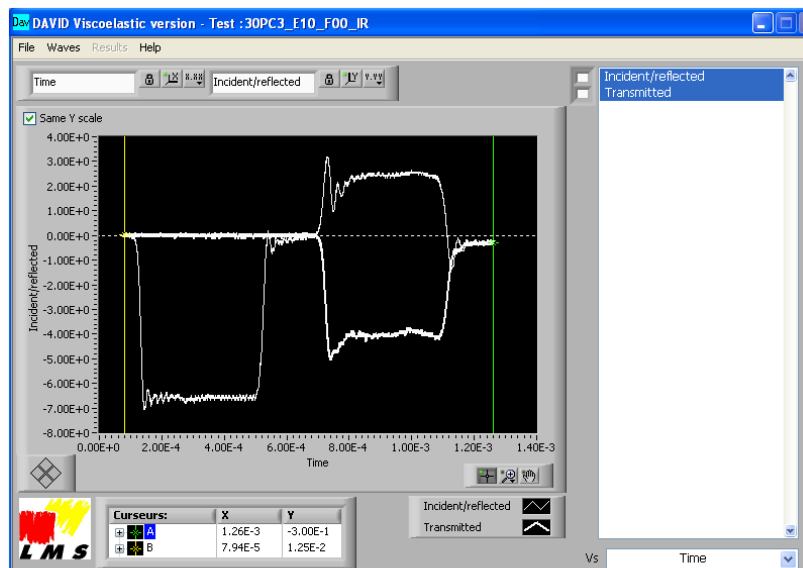


Figura 3.9. Janela de leitura dos dados provenientes do osciloscópio pelo software DAVID[®]

Para a utilização deste software foi necessário proceder a uma medição e pesagem rigorosas dos provetes, como já foi referido anteriormente. Isto porque para se proceder ao tratamento dos dados é necessário fornecer ao software informações tais como dimensões e densidade do provete. O processo de tratamento de dados através do software

DAVID[®] implica também o conhecimento de algumas propriedades das barras, tais como o diâmetro, comprimento, densidade, modulo de elasticidade e velocidade de propagação das ondas no material em que são fabricadas. O tratamento dos dados por parte do software possui várias fases, sendo algumas delas de caracterização dos provetes e das barras utilizados, e outras de tratamentos gráficos das curvas dos resultados (figura 3.10).

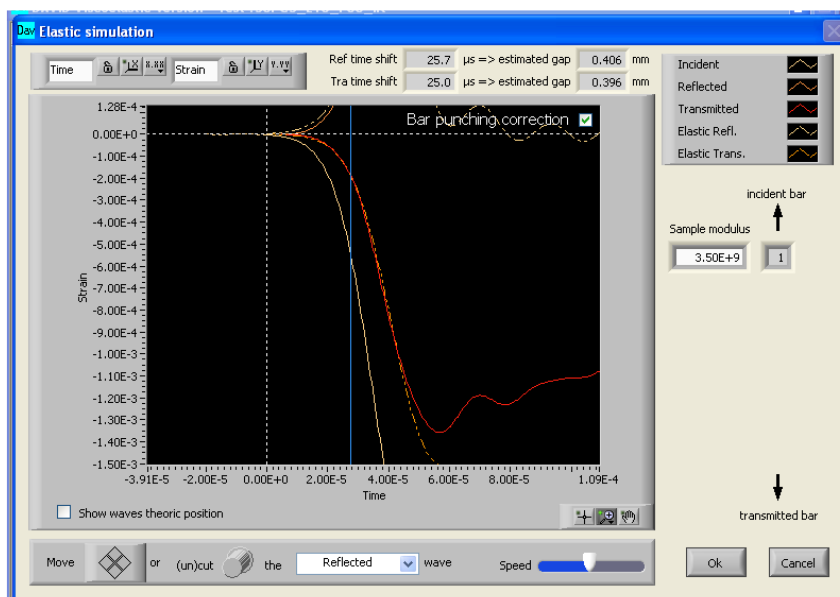


Figura 3.10. Janela de trabalho para aproximação gráfica das ondas em estudo através do DAVID[®] (Esteves, 2007)

Todos os ensaios foram também gravados recorrendo a uma câmara de filmar a alta velocidade Fastcam SA3, modelo 120 K C2 (figura 3.11), que teve por objetivo principal verificar se o ensaio decorreu como o esperado, tornando ainda possível analisar o comportamento das interfaces das barras com o provete e verificar como foi o comportamento do material durante o teste. A utilização desta da câmara obriga também à utilização de iluminação especial, sendo usados para o efeito dois projetores de halogéneo de 500watt cada.



Figura 3.11. Câmara de filmar a alta velocidade, fastcam SA3 modelo 120 K C2

3.3.2. Ensaios dinâmicos de Flexão em três pontos

Na realização destes ensaios foi utilizado um sistema de Barras de Hopkinson adaptado. Esta alteração consistiu na utilização de um suporte para as placas (Figura 3.12), acoplado na barra transmitida. A inexistência de qualquer suporte semelhante ao pretendido, exigiu que se procedesse à projeção e maquinação de um suporte com as características pretendidas (ANEXO A). O suporte foi maquinado em liga de alumínio com características mecânicas semelhantes às das utilizadas no sistema de Barras de Hopkinson, cuidado este que teve a ver com a tentativa de diminuir as grandes variações de impedância mecânica introduzidas na barra incidente por este suporte.

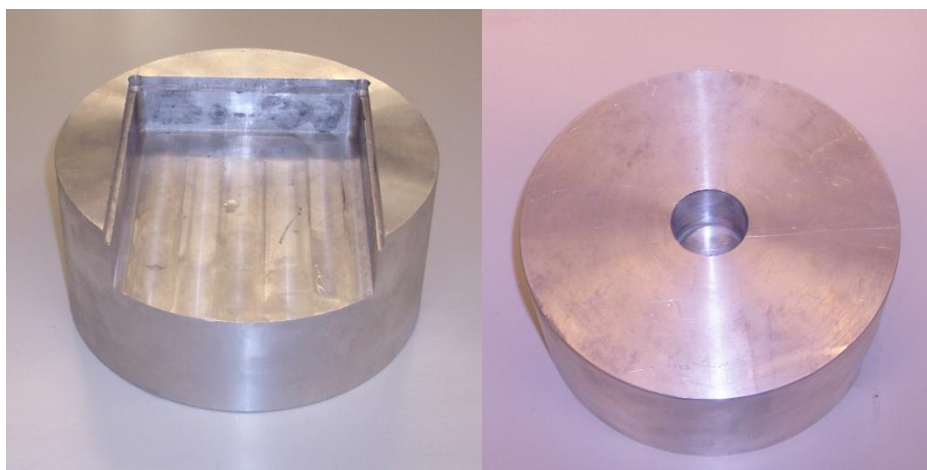


Figura 3.12. Suporte utilizado nos ensaios de flexão das placas

O suporte sofreu pequenas alterações desde o seu projeto inicial até ao final, que se ficaram a dever a algumas melhorias que foi necessário implementar de modo a otimizar os ensaios efetuados.

Na ponta da barra transmitida, em contacto com o provete, foi acoplado um elemento com ponta arredondada, com o objetivo de proporcionar um contacto pontual inicial entre a barra incidente e o provete.

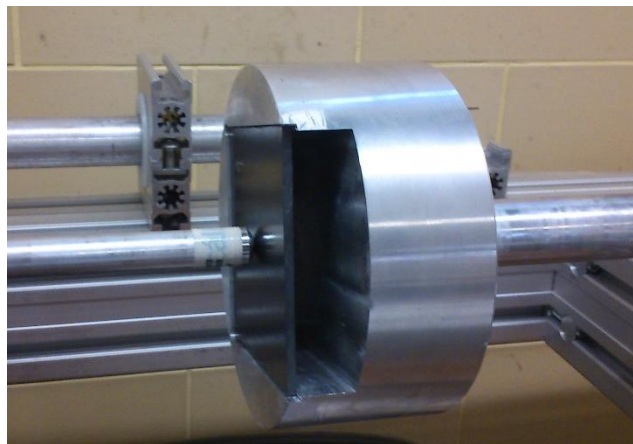


Figura 3.13. Montagem final para ensaio à flexão

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

Sendo o objetivo do presente estudo a análise do comportamento de compósitos laminados, sujeitos a ambientes hostis, após submetidos a impacto dinâmico, o atual capítulo visa a apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos.

4.2. Variação da massa dos provetes

Para se tentar perceber a influência das soluções ácidas e alcalinas na alteração da integridade estrutural do material em análise, foi necessário a realização da pesagem das amostras antes e após imersão nas duas soluções em estudo. A figura 4.1 apresenta os resultados das várias pesagens realizadas ao longo de todo o processo laboratorial.

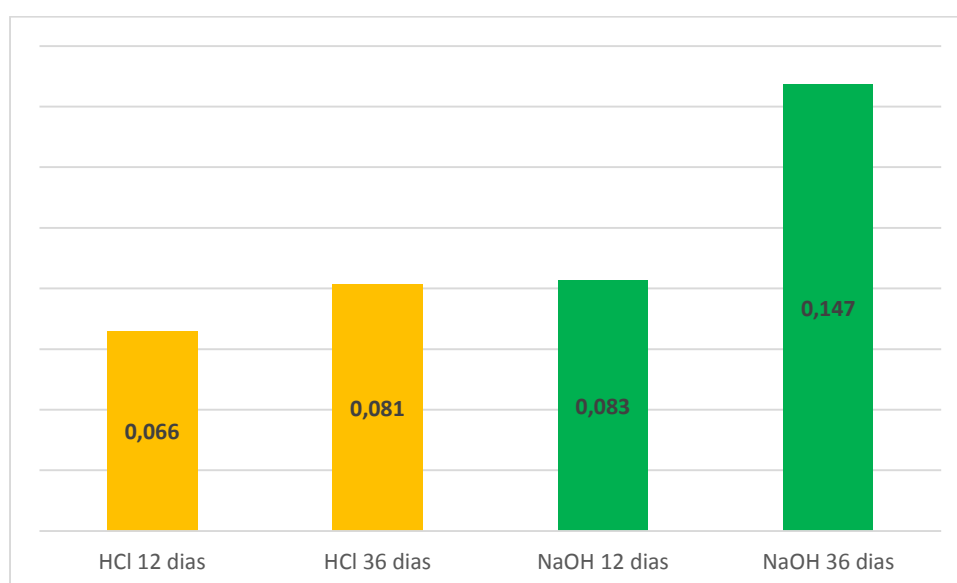


Figura 4.1. Variação da massa dos provetes [%]

Partindo dos dados demonstrados no gráfico da figura 4.1 verificou-se que os provetes imersos na solução de NaOH durante um período de 36 dias sofreram a maior variação de massa registando um aumento de massa de 0,147%, por outro lado, os provetes expostos à solução de HCl durante 12 dias, foram os que sofreram a alteração de massa menos significativa, sendo apenas de 0,066%. Observou-se também a existência de uma variação de massa muito próxima entre os provetes expostos à solução de HCl durante 36 dias e os provetes expostos à solução de NaOH durante 12 dias.

Apesar de terem sido vários provetes para cada situação, é importante referir que estas variações se encontram muito próximas do erro da balança, podendo por isso, não se verificar qualquer variação de peso digna de registo.

4.3. Apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de impacto a elevadas taxas de deformação

4.3.1. Reprodutibilidade dos ensaios

Como referido anteriormente, foram ensaiados vários provetes imersos numa solução ácida (HCL 10%) e numa solução alcalina (NaOH 10%), sendo os tempos de imersão em cada uma das soluções de 12 e 36 dias.

Na figura 4.2 e 4.3 são apresentados os gráficos Taxa de deformação-Deformação e Tensão-Deformação, dos ensaios realizados.

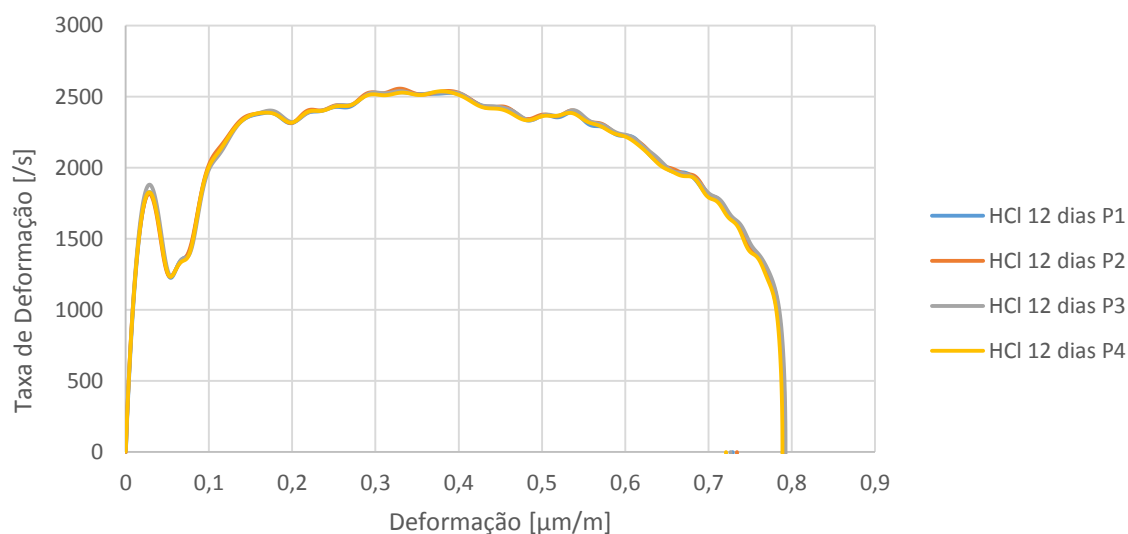


Figura 4.2. Taxa de Deformação - Deformação dos provetes imersos 12 dias em HCl.

No gráfico da figura 4.2 verificou-se o comportamento da Taxa de deformação e da deformação dos vários provetes imersos em HCl durante 12 dias. Através da análise do gráfico é possível verificar que houve uma boa reprodutibilidade de resultados dos vários ensaios.

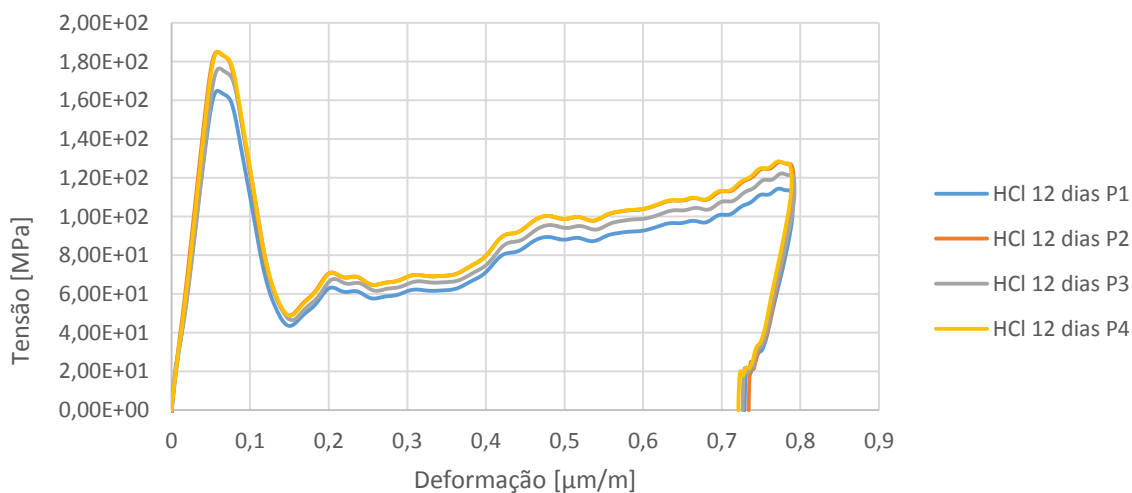


Figura 4.3. Tensão - Deformação dos provetes imersos 12 dias em HCl.

A figura 4.3, por sua vez, apresenta o gráfico de Tensão - Deformação obtido para os vários provetes imersos na solução de HCl durante 12 dias, também neste caso foi obtida uma reprodutibilidade de resultados bastante aceitável.

Este nível de semelhança não foi atingido para todos os testes, contudo conseguiu-se sempre uma semelhança de resultados bastante aceitável, entre os vários ensaios realizados.

Os gráficos das imagens 4.2 e 4.3 visam apenas representar a variação que existiu entre os vários provetes analisados, procedendo-se a uma análise mais rigorosa dos resultados e do que estes representam, mais à frente.

4.3.2. Análise dos resultados

Os resultados obtidos da comparação dos ensaios realizados com os provetes de teste, que não foram sujeitos a qualquer tipo de tratamento, e dos provetes sujeitos a imersão em HCl estão representados nos gráficos das figuras 4.4 e 4.5.

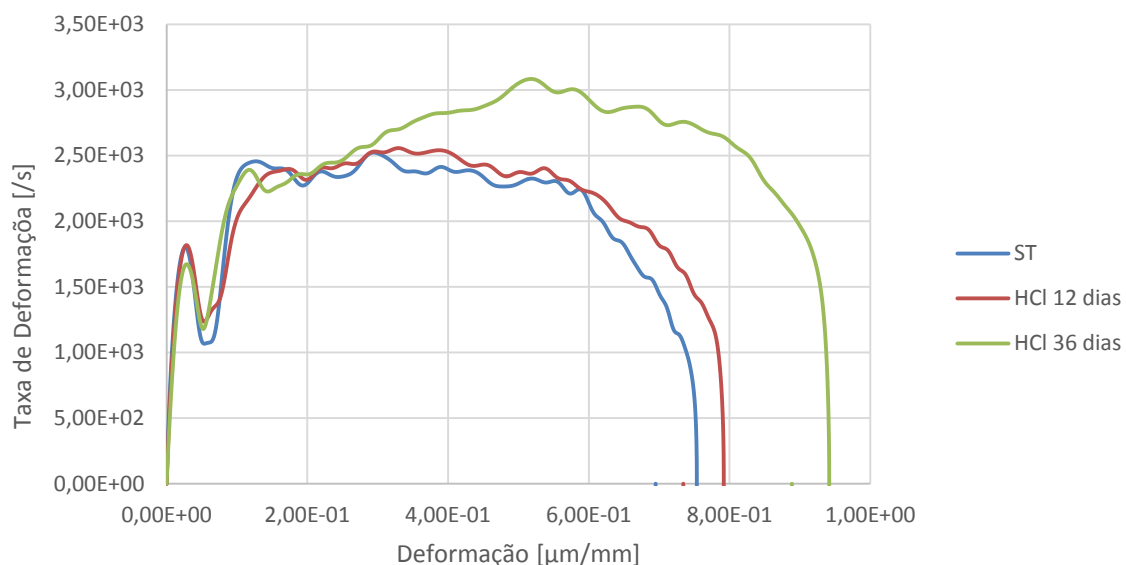


Figura 4.4. Comparação da Taxa de Deformação - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL.

Da análise da figura 4.4 verificou-se um aumento da taxa de deformação e da deformação dos provetes sujeitos ao banho na solução de HCl. Observou-se que as amostras que sofrem uma maior taxa de deformação e deformação, são as que estiveram imersas no ácido durante 36 dias, em contrapartida, os provetes de teste são os que apresentam uma taxa de deformação e deformação menores.

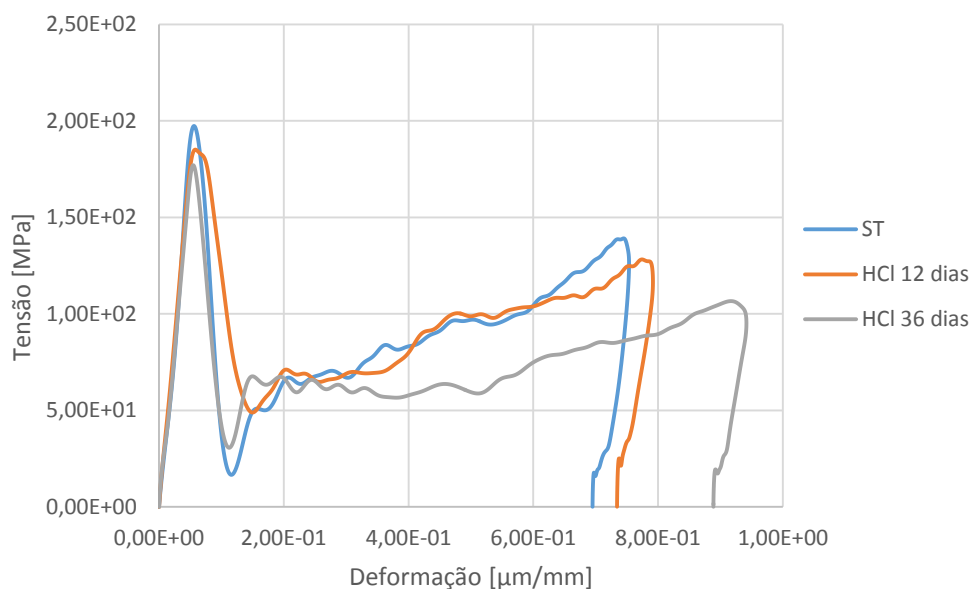


Figura 4.5. Comparação da Tensão - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL.

De acordo com a figura 4.5 verificou-se que contrariamente ao que se passa com a taxa de deformação e com a deformação, a tensão tende a diminuir quando as placas são sujeitas a maior tempo de imersão na solução ácida.

Da análise das figuras anteriores (figuras 4.4 e 4.5) observou-se que o contacto com o ácido fragiliza o compósito. Verificou-se que os provetes imersos durante 12 dias em HCl não sofreram alterações significativas do seu comportamento, contrariamente ao que se observou para os provetes imersos durante 36 dias. Deste modo, concluiu-se que o tempo que as amostras se encontraram imersas influencia significativamente o seu comportamento quando sujeitas a elevadas taxas de deformação. A mesma conclusão é retirada no caso dos provetes sujeitos ao efeito da solução alcalina.

Na figura 4.6 é feita a comparação da taxa de deformação e da deformação entre os provetes de teste, os provetes imersos em HCl durante 36 dias e os provetes imersos em NaOH durante 36 dias.

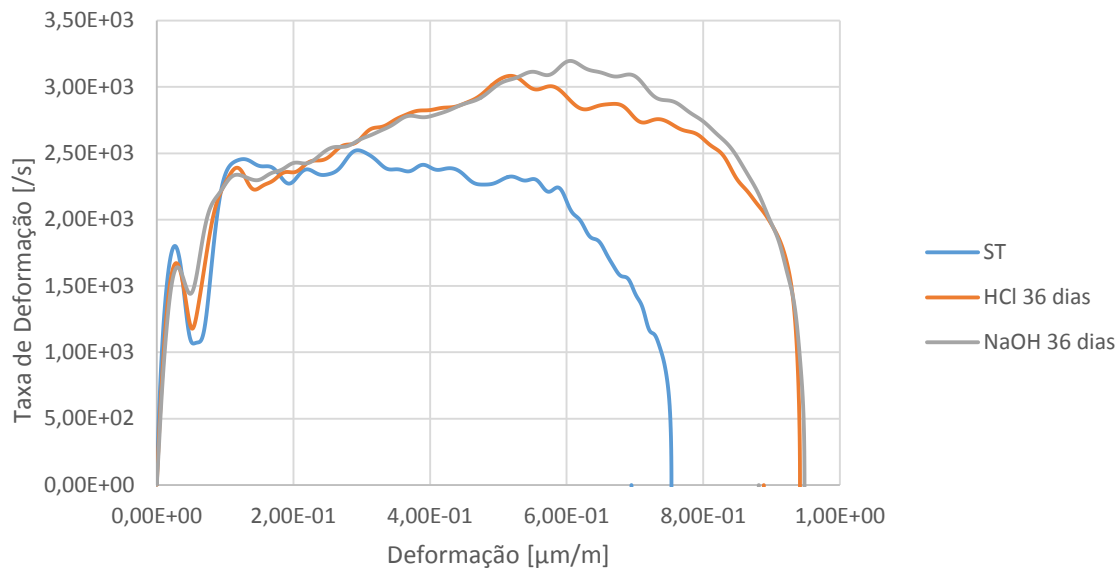


Figura 4.6. Comparação da Taxa de Deformação - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL e em NaOH durante 36 dias.

Dos dados representados na figura anterior, conclui-se que os provetes que estiveram sujeitos à imersão em NaOH são os que apresentaram uma maior taxa de deformação e uma maior deformação, contudo, no parâmetro da deformação verificou-se uma diferença muito pequena entre estes e os provetes imersos em HCl durante 36 dias.

Na figura 4.7 está representado a relação tensão /deformação das amostras imersas durante 36 dias nas soluções ácidas e alcalinas, respetivamente.

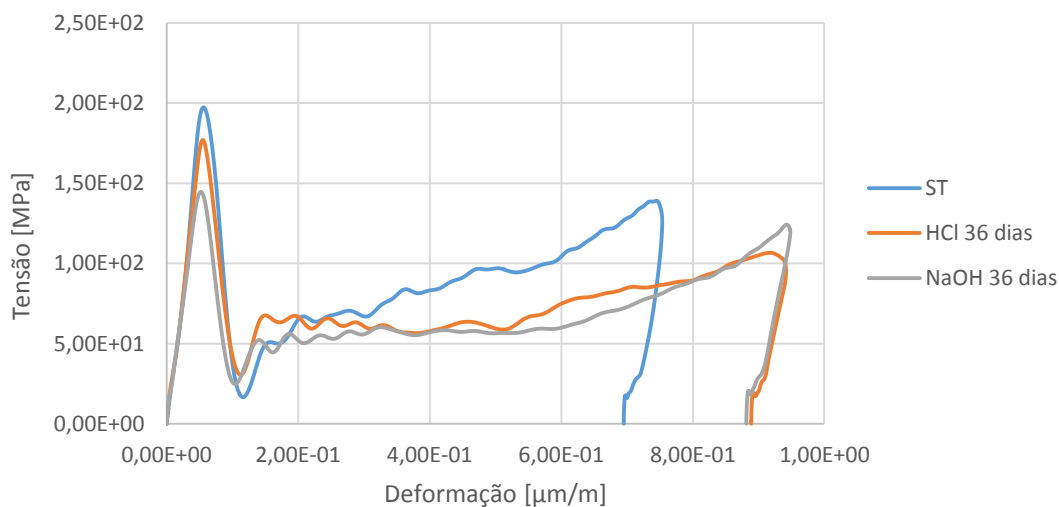


Figura 4.7. Comparação da Tensão - Deformação dos provetes de teste e dos imersos em HCL e em NaOH durante 36 dias.

Procedendo a uma análise da figura 4.7 verificou-se que a tensão máxima dos provetes imersos em NaOH durante 36 dias é significativamente inferior à dos provetes sem tratamento e à dos provetes imersos em HCl durante 36 dias.

A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nas diversas condições de ensaio para o caso de impacto.

Tabela 4.1. Resultados obtidos para as diversas condições de ensaio.

Amostra	Taxa Deformação [s^{-1}]		Deformação [$\mu\text{m}/\text{m}$]		Tensão [MPa]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
ST	2,49E3	8,03E1	7,69E-1	1,64E-2	1,85E2	1,19E-2
HCl 12	2,54E3	1,08E1	7,91E-1	1,64E-3	1,82E2	9,52E-3
HCl 36	3,07E3	2,08E1	9,29E-1	1,77E-2	1,74E2	1,13E-2
NaOH 12	3,09E3	9,51E1	9,27E-1	2,34E-2	1,83E2	1,16E-2
NaOH 36	3,11E3	1,83E2	9,35E-1	4,15E-2	1,64E2	1,84E-2

De acordo com a Tabela 4.1 é possível verificar que as amostras sujeitas a imersão em NaOH durante 36 dias apresentam o maior valor de taxa de deformação e de deformação em contrapartida apresentam o menor valor de tensão. Em sentido oposto é o comportamento das amostras de testes, isto é, que não foram sujeitas a nenhum tipo de degradação, sendo que as mesmas apresentam menor valor de taxa de deformação e de deformação e maior valor de tensão. As amostras imersas durante 36 dias em NaOH apresentam um aumento no valor da taxa de deformação e na deformação, quando comparadas com as amostras de teste, de cerca de 25% e de 22%, respetivamente. A diminuição no valor da tensão é da ordem dos 11%. Analisando agora a influência do HCl verifica-se que os valores são ligeiramente inferiores aos anteriores, sendo o aumento da ordem dos 23% e dos 8%, no caso da taxa de deformação e deformação, respetivamente. O decréscimo no valor da tensão é de 6%. Todas as comparações são realizadas em relação às amostras de teste.

Da Tabela 4.1 pode-se, ainda, verificar que os valores não sofrem alterações significativas se apenas se considerar a imersão durante 12 em HCl. De facto, o aumento na taxa de deformação e deformação para esta situação de estudo é apenas da ordem dos 2% e dos 3%, respetivamente, sendo que a tensão sofre um decréscimo de 1.6%. No caso da imersão durante 12 dias ser em NaOH estes valores já são mais significativos, rondando os 24% e os 20.5% para a taxa de deformação e deformação.

4.4. Ensaio dinâmico à flexão em três pontos

A necessidade de aplicação do suporte na barra transmitida originou que a estação de extensometria presente nesta, deixasse de receber qualquer sinal, o que originou que os únicos dados provenientes destes ensaios de possível análise fosse a flexão provocada nos provetes pelo impacto da barra incidente com uma dada energia.

Para a realização dos ensaios à flexão em três pontos foram definidas as seguintes condições iniciais:

Velocidade do projétil = 9,5 m/s

Energia de impacto = 92,96 J

Massa do projétil = 2,06 Kg

Os valores apresentados na tabela 4.2 resultam da análise das imagens captadas pela câmara de filmar a alta velocidade. Na figura 4.8 são apresentados alguns exemplos das imagens captadas e estudadas.

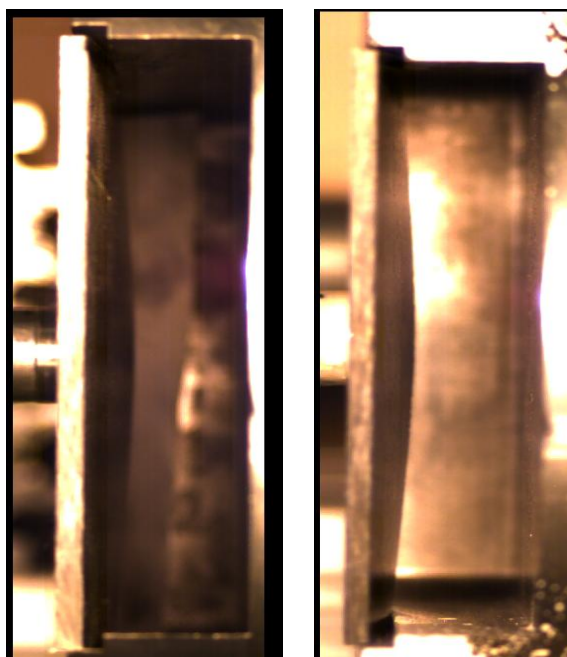


Figura 4.8. Imagens da deformação dos provetes durante o impacto da barra incidente.

Tabela 4.2. Valores obtidos nos ensaios de flexão em três pontos

Amostra	Deformação [mm]	
	Média	Desvio Padrão
ST	5,12	0,25
HCl 12	6,00	0.78
HCl 36	7,20	0.58
NaOH 12	6,90	1.27
NaOH 36	7,25	0.54

Através da análise dos valores obtidos no ensaio de flexão em três pontos, verificou-se que a imersão em NaOH continua a ser a mais prejudicial para o compósito, observando-se um aumento da flexão dos provetes de 41,66% face à flexão dos provetes de teste. A imersão em HCl durante 36 dias mostrou-se também bastante prejudicial para o material, proporcionando um aumento da flexão de 40,6% face aos provetes de teste. O

banho em HCl durante 12 dias volta a ser o que é menos prejudicial para a amostra, levando a um aumento da flexão de 17,28%.

Os resultados obtidos nos testes à flexão vêm reforçar as conclusões já retiradas anteriormente. O tempo de imersão revelou-se um fator de enorme relevo neste teste, influenciando muito o comportamento do material. A solução de NaOH foi, também neste teste, a solução que mais influenciou negativamente o comportamento do compósito.

No decorrer do procedimento experimental foram detetados vários problemas que impossibilitam que estes resultados possam ser considerados conclusões absolutas. Fatores como o baixo número de provetes e a difícil análise de algumas imagens captadas dificultam o tratamento dos dados e conseqüentemente colocam em causa a exatidão dos mesmos.

Contudo, tendo esta sido a primeira vez que este tipo de ensaio foi tentado, tornou-se muito interessante a sua realização, assim como será extremamente útil quando se conseguir uma gama de resultados com uma maior certeza.

4.5. Comparação dos resultados obtidos com a bibliografia existente

Apesar da boa resistência química dos compósitos laminados de carbono/epóxi a ambientes hostis, como já foi referido no capítulo 2, a exposição prolongadas destes a meios ácidos, ou alcalinos, acaba por provocar danos nos materiais, influenciado o seu comportamento mecânico.

Ensaio realizados anteriormente, cujo objetivo foi verificar o comportamento à flexão e ao impacto a baixa velocidade do compósito laminado de vidro/epóxi, previamente imerso em soluções de NaOH e HCl, ambos com concentrações de 10%, permitiram apurar que independentemente da solução, a resistência à flexão e o módulo de flexão diminuem com o tempo de exposição. Foi também verificado que as amostras imersas em NaOH sofreram uma deterioração das suas propriedades de flexão superiores as amostras imersas em HCl. Depois de realizados os ensaios que permitiram tirar as conclusões atrás referidas, com o objetivo de confirmar os resultados, foi utilizado um microscópio eletrónico de varredura, para uma análise rigorosa das amostras. Através das

imagens obtidas, foi verificado que as amostras não sujeitas a qualquer imersão apresentavam uma superfície lisa, enquanto as amostras expostas apresentavam microfissuras que aumentavam com o tempo de exposição e que certamente fragilizam o material (Amaro, et al., 2012).

Verificou-se que as conclusões retiradas dos ensaios realizados no sistema de Barras de Hopkinsons estão de acordo com conclusões apresentadas em estudos anteriores e provadas pelo recuso ao microscópio eletrónico de varredura. As curvas obtidas nos ensaios também apresentam características próprias dos compósitos, representando um comportamento do material semelhante a estudos realizados noutros tipos de compósitos, como é apresentado por Esteves, 2007.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Introdução

Neste capítulo irão ser apresentadas as principais conclusões desta dissertação, com base nos objetivos que foram inicialmente propostos. Serão também apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

5.2. Conclusões

As principais conclusões a retirar do presente estudo são as seguintes:

- Os ambientes hostis afetam significativamente a integridade estrutural do compósito de carbono/epóxi.
- O tempo de exposição revelou ser um fator extremamente relevante no efeito de degradação das propriedades estudadas, taxa de deformação, deformação e tensão. Os provetes expostos durante um maior período de tempo sofreram uma maior alteração das suas propriedades.
- Os provetes imersos durante 36 dias na solução de NaOH foram aqueles em que se verificou o maior aumento da taxa de deformação e da deformação e a maior redução da tensão máxima.
- Os provetes imersos durante 12 dias na solução de HCl verificou-se uma menor variação das propriedades em análise em relação os provetes de controlo.

- Em termos comparativos, a solução alcalina provoca maior degradação das propriedades mecânicas do material.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

- Implementar melhorias no sistema para ensaios dinâmicos à flexão em três pontos que permitam resultados mais rigorosos.
- Analisar o comportamento em ensaios a elevadas taxas de deformação de compósitos com fibras orientadas em diversos sentidos.
- Avaliar o efeito que outro tipo de soluções podem provocar nos compósitos.
- Analisar se existem mesmo variações de peso significativas, aumentando o tempo de imersão nas soluções.

BIBLIOGRAFIA

Abrate, Serge. (2001). Modeling of Impacts on Composite Structures. s.l. : Elsevier, 2001.

Almeira, Felipe Schaedler de. (2006). Otimização de Estruturas de Materiais Compósitos Laminados utilizando Algoritmos Genéticos. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Amaro, A.M., Reis, P.N.B., Neto, M.A., Louro, C. . (2012). Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites. Departamento de Engenharia Mecânica da universidade de Coimbra. Coimbra. Departamento de Engenharia eletromecânica da Universidade da Beira Interior. Covilhã.

Boeing 787/7E7 Dreamliner. modern air liners. [Citado em: 6 de 6 de 2014.] http://modernairliners.com/Boeing787_files/Specifications.html.

Caetano, Mario J. L. 2010. Resenha Histórica do Uso de Materiais. Ciência e tecnologia da borracha. [Online] 2010. [Citado em: 20 de 05 de 2014.] http://www.ctb.com.pt/?page_id=422.

Cardoso, A.L.V. 2005. "Caracterização Dinâmica por impacto de cerâmicos à base de Alumina". Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais. Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

Chung, Deborah D. L. 2010. Composite Materials: Science and Applications. London . Springer. 2010. 1619-0181.

Esteves, J.C.M. 2011. "Projecto e Instalação de um sistema de Barras de Hopkinson em Alumínio para Caracterização Dinâmica de Materiais Compósitos". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Tecnologia da Produção, Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Coimbra.

Ferreira, Gonçalo José Pedro. 2014. Resistência ao impacto de laminados previamente sujeitos a cargas de flexão. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Tecnologia da Produção. Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Coimbra.

Gama, Bazle A., Sergey L Lopatnikov, John W Gillespie Jr. (2004). “Hopkinson bar experimental technique: A critical review”. American Society of Mechanical Engineers.

Geraldo M. Cândido, Sergio F. M. Almeida, Mirabel C. Rezende. (2000). Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas. Associação Brasileira de Polímeros. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47013622007>.

ASM Handbook. (2000). Mechanical Testing and Evaluating, Volume 8 – ASM International.

Johnson, Todd a). history of composites. [Citado em: 2014 de 05 de 21.] <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>.

Johnson, Todd.b) Composite Materials in Boats. About.com. [Online [Citado em: 7 de 7 de 2014.] <http://composite.about.com/od/aboutglass/a/Composite-Materials-In-Boats.htm>.

Kabche, Jean Paul.(2009). ESSS. simulatin the future. [Online] [Citado em: 2 de 8 de 2014.] <http://www.esss.com.br/blog/pt/2009/03/compositos-modelagem-de-materiais-de-elevada-resistencia-e-rigidez/>.

Kaw, Autar k. (2006). Mechanics of Composite Materials. s.l. : Taylor & Francis Goup, 2006.

M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck. (2000). Metal Foams: A Design Guide. Oxford : Butterworth Heinemann, 2000.

Mazumdar, sanjay K. (2002). Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. New York : CRC Press LLC, 2002. Pp 1-55.

Miravete, A. (2000) Materiales compuestos. António Miravete. Los autores. Zaragoza.

Moura, Marcelo F. S. F., Morais, Alfredo B. e Magalhães, António G. (2005). Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Porto : Publindústria, 2005.

Pereira, José Carlos. (2003) [Citado em: 2014 de 05 de 21.] . Florianópolis, <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAB7kAD/materiais-compositos>

Ramos, Admilson. (2013). materiais compósitos na aviação. 25 de 1 de 2013. [Citado em: 6 de 06 de 2014.] <http://www.engenhariae.com.br/tecnologia/materiais-compositos-na-aviacao/>.

S. Selvaraju, S. Ilaiyavel. (2011). Applications Of Composites In Marine Industry. Journal of Engineering Research and Studies. College of engineering, Sriperumbudur.

Silva, Arlindo & Freitas. Manuel. Materiais compósitos. (acetatos de intuito pedagógico).

Silva, Flávio de Andrade .(2004). Tenacidade de materiais compósitos não convencionais. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro . Rio de Janeiro : s.n.

Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morosov. (2001). Mechanics and Analysis of Composite Materials. Oxford : Elsevier, 2001.

Ventura, Ana Mafalda F. M. (2009). Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. Lisboa : Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n.º 3/4, 2009.

ANEXO A

