



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Resposta ao impacto longitudinal e transversal de laminados de vidro/epóxi**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Response of glass/epoxy laminates to longitudinal and transversal impact**

**Autor**

**Victor José Gomes de Freitas**

**Orientadores**

**Professora Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Professor Paulo Nobre Balbis dos Reis**

**Júri**

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

**Vogais** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins  
**Amaro**  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho, 2016**



"Nunca desistas de nada só por ser difícil, afinal, dizem que aquilo que é difícil de conseguir, também é difícil de perder."

Aos meus pais



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis, por todo o apoio, disponibilidade e dedicação prestados ao longo do trabalho. Com um especial muito obrigado à Professora Doutora Ana Amaro por muita paciência que teve para comigo e por toda a ajuda prestada ao longo deste trabalho e ao longo de todo o curso.

Agradeço ao Sr. Fernando Bernardes das oficinais por toda a ajuda prestada na preparação dos provetes para ensaios e com a resolução de alguns problemas que possam ter surgido ao longo do presente trabalho.

Quero agradecer aos meus colegas/amigos de laboratório pelo apoio, paciência e ajuda prestada ao longo destes últimos meses.

Quero deixar também um agradecimento a todas as pessoas, que de algum modo me ajudaram, contribuindo para a realização do presente trabalho.

Por último um especial e enorme obrigado aos meus pais e irmãos pelo apoio, dedicação e muita paciência que tiveram comigo, ao longo da minha vida académica. Com um enorme obrigado a minha mãe por fazer de tudo para que nunca me falte nada e por aturar-me nos momentos menos bons que foram surgindo ao longo da vida.



## Resumo

A presente Dissertação de Mestrado tem como objetivo analisar o comportamento dos materiais compósitos na resposta ao impacto transversal e longitudinal e também à solicitação de tração, de compósitos laminados de fibra de vidro/epóxi.

O presente estudo, segue a sequência do que já foi estudado por diversos autores, salientando que na análise do comportamento dos laminados no que se refere ao impacto, foi realizado um ensaio até então pouco utilizado e ainda não reportado na literatura, ensaio de impacto longitudinal (*Tensile impact*), com o qual se pretende avaliar a resistência ao impacto longitudinal destes materiais. No presente trabalho estudou-se o comportamento de laminados com três sequências de empilhamento na resposta aos impactos transversal e longitudinal, assim como à solicitação de tração. É ainda de referenciar que nesta dissertação foi realizado o estudo da degradação dos provetes em diferentes condições higrotérmicas durante vários períodos de imersão, e também da resposta dos laminados após pré-dano com diversos carregamentos, de modo a se entender a influência destas diferentes condições na integridade estrutural dos laminados após a realização dos ensaios de impacto e de tração neste tipo de materiais. O estudo do pré-dano foi realizado através de ensaios de tração, para determinados níveis de carga, os quais provocam um determinado tipo de dano nos provetes.

Dos resultados obtidos foi possível concluir que a sequência de empilhamento tem grande influência na resposta aos impactos e à tração dos laminados em questão. No caso do impacto transversal verificou-se que nos laminados  $[0,90]_8$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$  os valores observados diferem em apenas 3%, já no laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  observou-se o valor mais baixo, aproximadamente 28%, comparando com o laminado  $[0_2,90_2]_{2s}$  que apresenta a melhor resistência. Na resistência ao impacto longitudinal, o laminado  $[0,90]_8$  apresentou o melhor desempenho, seguindo-se o laminado  $[0_2,90_2]_{2s}$  com uma diferença próxima dos 12% e onde o pior caso foi observado para o laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . Para a resistência à tração verificou-se um comportamento muito semelhante ao observado para a resistência ao impacto longitudinal. Concluiu-se também que os aumentos da temperatura e tempo de imersão afetam significativamente a integridade estrutural dos laminados em análise. De facto quanto maior a temperatura e o tempo de imersão, menor é a capacidade dos laminados

responderem às solicitações exteriores. Na resistência ao impacto transversal, comparativamente aos valores obtidos no controlo, verificou-se uma diminuição para 60 dias a 3°C e para 60 dias a 80°C, respetivamente, cerca de 18% e 37%. Comparativamente aos valores de controlo na resistência ao impacto longitudinal, observou-se um decréscimo para os 40 dias a 3°C, 40°C e 80°C, de respetivamente 28%, 43% e 64%. No caso da resistência à tração para os 60 dias a 3°C e 80°C, visualizou-se uma descida dos valores de resistência de respetivamente 11% e 28%, em comparação ao controlo, e para 40 dias a 40°C um valor inferior próximo dos 16%. Por outro lado, a presença do pré-dano também afeta a integridade estrutural do compósito, sendo que quanto maior o valor de pré-dano induzido, maior o decréscimo dos valores das propriedades em estudo, verificando-se neste caso uma descida da resistência ao impacto longitudinal para 20%, 40% e 80% de pré-tensão, de aproximadamente 22%, 31% e 53%, respetivamente, face ao provetes de controlo.

**Palavras-chave:** Condições Higrotérmicas, Ensaio de Tração, Impacto a baixa velocidade, Laminados de Vidro/epóxi.



## Abstract

This Master's Thesis aims to analyze the behaviour of composite materials in response to Charpy test and tensile impact test and also to the tensile test, in glass fibre/epoxy laminates.

This study follows the sequence of what it has been studied by several authors, underlining that in the analysis of the behaviour of the laminates in relation to the impact. Normally the impact tests used are the drop test impact and Charpy impact. In this work it was made a testing which is not used so often and not yet reported in the literature, Tensile impact, which intends to evaluate the resistance to the longitudinal impact of these materials. In the present work we studied the behavior of laminates with three stacking sequences in response to the transverse and longitudinal impacts and tensile request. This thesis was also conducted to study the degradation of samples at different hygrothermal conditions during several periods of immersion, and also the reaction of laminates after pre-damage with several loadings, in order to understand the influence of those different conditions on structural integrity of the laminates after analysis of the results of all tests. Still important to mention that the pre-damage study was done using a tensile equipment which causes damage to the respective samples by applying an specific loading.

From the results it was concluded that the stacking sequence has great influence in response to the impacts and to the tensile of the referred laminates. In the case of transversal impact it was found that the observed values for the laminates  $[0,90]_8$  and  $[0_2,90_2]_{2s}$  differ by only 3%, while in the laminate  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  it was verified the lowest amount, about 28% compared to the laminate  $[0_2,90_2]_{2s}$  which presents the best resistance. In resistance to longitudinal impact, the laminate  $[0,90]_8$  was the most efficient, followed by the laminate  $[0_2,90_2]_{2s}$  with a difference of about 12%. The worst case was registered by the laminate  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  which value achieved was only 21% of the one obtained by the laminate with the best performance. For the tensile request it was noted a similar behaviour to that one observed on the resistance to the longitudinal impact, where the laminated  $[0_2,90_2]_{2s}$  and  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  presented values 6% and 22% lower, respectively, in compared to the laminate  $[0,90]_8$ .

It was also concluded that increases in temperature and immersion time significantly affect the structural integrity of the laminates. In fact, the higher the temperature and the immersion time is, the lower is the ability of the laminate to respond to external requests. In the resistance of transverse impact, comparatively to values obtained in control, there was a decrease to 60 days at 3°C and also at 80°C, which means 18% and 37%., respectively. Comparatively to control values in the longitudinal impact resistance, a decrease was observed for 40 days at 3°C, 40°C and 80°C, which means 28%, 43% and 64% respectively. In the case of tensile resistance for 60 days at 3°C and 80°C, it was verified a reduction of the resistance values of about 11% and 28%, respectively, if compared to control, and to 40 days at 40°C, it was registered a lower value close to 16%. Moreover, the presence of pre-damage also affects the structural integrity of the composite, and the higher the value of pre-induced damage, the greater the decrease of the values of the properties studied, verifying in this case a reduction of resistance to the longitudinal impact for 20%, 40% and 80% of pre-tension, of approximately 22%, 31% and 53%, respectively, regarding to the control samples.

**Keywords** Glass/epoxy laminates, Hygrothermal effect, Low velocity impact tests, Tensile test.

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Simbologia e Siglas .....	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas .....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Materiais Compósitos .....	3
2.1.1. Campo de aplicação e tipos de compósitos .....	4
2.1.2. Vantagens e desvantagens .....	5
2.1.3. Modo de fabrico dos compósitos.....	6
2.2. Impacto em materiais compósitos.....	12
2.2.1. Dano .....	13
2.3. Efeito da sequência de empilhamento .....	14
2.4. Efeito Higrotérmico .....	16
2.4.1. Temperatura.....	16
2.4.2. Humidade .....	18
2.5. Detecção de dano por emissão acústica.....	21
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	23
3.1. Compósitos laminados.....	23
3.1.1. Manufatura dos laminados vidro/epóxi .....	23
3.1.2. Preparação e geometria dos provetes.....	24
3.2. Degradação dos compósitos laminados .....	28
3.2.1. Condições higrotérmicas .....	28
3.3. Ensaios experimentais.....	29
3.3.1. Ensaio de impacto transversal .....	30
3.3.2. Ensaio de impacto longitudinal .....	32
3.3.3. Ensaio de Tração .....	33
3.3.4. Realização do pré-dano .....	34
3.4. Visualização do dano após realização dos ensaios .....	35
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	37
4.1. Efeito da sequência de empilhamento nas propriedades mecânicas.....	37
4.1.1. Ensaio de impacto transversal .....	37
4.1.2. Ensaio de impacto longitudinal .....	40
4.1.3. Ensaio de Tração .....	43
4.2. Efeito da temperatura e tempo de exposição .....	46
4.2.1. Ensaio de impacto transversal .....	46
4.2.2. Ensaio de impacto longitudinal .....	48
4.2.3. Ensaio de Tração .....	50

4.3. Efeito do pré-dano na resistência ao impacto .....	52
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
5.1. Conclusões.....	55
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
ANEXO A.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema representativo para os diferentes tipos de compósitos [2].....	5
Figura 2.2. Algumas propriedades comparativas entre os três materiais [5].....	6
Figura 2.3. Representação esquemática do processamento de materiais compósitos dependendo da resina usada na sua obtenção [6]. .....	7
Figura 2.4. Representação esquemática da Moldação Manual, imagem adaptada de [3]. ....	8
Figura 2.5. Representação esquemática da Moldação em saco de vácuo [8].....	9
Figura 2.6. Ciclo de cura de laminados de pré-impregnados F-584 da empresa <i>Hexcel Composites</i> [9].....	9
Figura 2.7. Autoclaves gigantes utilizadas na empresa automóvel <i>Lamborghini</i> [10]. ....	10
Figura 2.8. Esquema representativo da Moldação por projeção, imagem adaptada de [3].	11
Figura 2.9. Esquema representativo da RTM, imagem adaptada de [3]. .....	12
Figura 2.10. Modos de carregamento que causam a delaminação. ....	14
Figura 2.11. Exemplo esquemático da orientação e da sequência de empilhamento de um compósito [16].....	15
Figura 2.12. Exemplo esquemático da progressão do dano, (1) devido à tensão de flexão, (2) devido à tensão de contacto [14]. .....	16
Figura 2.13. Influência da temperatura no comportamento dinâmico de uma resina [20]..	17
Figura 2.14. Influência das diversas temperaturas nas curvas tensão-deformação para o acetato de celulose [21]. .....	18
Figura 2.15. Variação da rigidez e do $T_g$ com os efeitos higrotérmicos [20].....	19
Figura 2.16. Exemplo do sinal por impulsos com emissão contínua e descontínua [28]....	22
Figura 3.1. Ciclo de cura na moldação por autoclave das placas de laminados de vidro/epóxi, imagem adaptada de [14]. .....	24
Figura 3.2. Dimensões: a)impactor do martelo e b)espaçamento para colocação do provete. ....	25
Figura 3.3. Serra de disco elétrica com dentes diamantados. ....	26
Figura 3.4. Lixa de água de 320 <i>mesh</i> com superfície abrasiva fina. ....	26
Figura 3.5. Provete obtido após maquinação com as dimensões recomendadas.....	26
Figura 3.6. Esquema representativo e dimensões do provete tipo 2, regido pela norma ISO 8256 método A [33]. .....	27
Figura 3.7. Forma final do provete obtido após maquinação. ....	27

Figura 3.8. Geometria: a) Forma de haltere e b) Plano, com maior espessura nas extremidades. ....	28
Figura 3.9. Esquema ilustrativo da divisão dos provetes para o estudo do efeito higrotérmico. ....	29
Figura 3.10. a) Martelo e suporte onde se apoia o provete; b) Equipamento de Ensaio de impacto transversal. ....	32
Figura 3.11. a) Equipamento de Ensaio de impacto longitudinal; b) Peça auxiliar onde é fixada uma das extremidades do provete; c) Martelo e suporte onde é fixo o provete. ....	33
Figura 3.12. a) Equipamento de Ensaio de Tração; b) Amarras de fixação. ....	34
Figura 3.13. Geometria dos provetes em forma de haltere. ....	34
Figura 3.14. Equipamentos: a) Ensaio de tração; b) Emissão Acústica. ....	35
Figura 3.15. Microscópio estereoscópio trinocular do fabricante Carl ZEISS. ....	36
Figura 4.1. Gráfico comparativo da resiliência entre os três tipos de empilhamento para o ensaio de impacto transversal. ....	38
Figura 4.2. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto transversal conforme a sequência de empilhamento: a) $[0,90]_8$ , b) $[0_2,90_2]_{2s}$ e c) $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . ....	39
Figura 4.3. Gráfico comparativo da força máxima entre os três tipos de empilhamento para o ensaio de impacto transversal. ....	40
Figura 4.4. Gráfico comparativo da resiliência entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de impacto longitudinal. ....	41
Figura 4.5. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto longitudinal dependendo da sequência de empilhamento: a) $[0,90]_8$ , b) $[0_2,90_2]_{2s}$ e c) $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . ....	43
Figura 4.6. Gráfico comparativo da tensão de rotura entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de Tração. ....	44
Figura 4.7. Gráfico comparativo da tensão média e respetiva dispersão entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de Tração. ....	45
Figura 4.8. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de Tração dependendo da sequência de empilhamento: a) $[0,90]_8$ , b) $[0_2,90_2]_{2s}$ e c) $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . ....	46
Figura 4.9. Gráfico comparativo da resiliência no ensaio de impacto transversal nas diferentes condições higrotérmicas e nos vários períodos de imersão. ....	47
Figura 4.10. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto transversal após degradação para 60 dias de imersão e nas diferentes temperaturas: a) 3°C e b) 80°C. ....	48
Figura 4.11. Gráfico comparativo dos valores de resiliência obtidos no ensaio de impacto longitudinal entre as várias temperaturas e diferentes dias de imersão. ....	49

---

Figura 4.12. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto longitudinal após degradação para 40 dias de imersão e para diferentes temperaturas: a) 3°C, b) 40°C e c) 80°C.....	50
Figura 4.13. Gráfico comparativo dos valores da tensão de rotura obtidos no ensaio de tração entre as várias temperaturas e diferentes dias de imersão. ....	51
Figura 4.14. Visualização da rotura dos provetes no ensaio de Tração: a) 60 dias de imersão à temperatura de 3°C; b) 60 dias de imersão à temperatura de 80°C. ....	52
Figura 4.15. Gráfico da tensão obtida em tração em função do número de eventos obtido por EA. ....	53
Figura 4.16. Gráfico comparativo dos valores de resiliência nos provetes pré-tensionados e controlo.....	54
Figura A.1. Tabela com dimensões dos provetes para o ensaio de impacto transversal. ....	61





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Resultados obtidos após os vários dias de imersão dos compósitos em água [26]. .....	20
Tabela 2.2. Fatores que influenciam a amplitude do sinal [28].....	22
Tabela 3.1. Contabilização dos provetes. ....	24
Tabela 3.2. Dimensões do provete tipo 2 [33].....	27
Tabela 3.3. Diferentes condições ambientais com os respectivos dias de imersão.....	29



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\tan \delta$  – Coeficiente de perda

$E$  – Módulo de Elasticidade

$E'$  – Módulo de ganho

$E''$  – Módulo de perda

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

### Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CNC – Controlo Numérico Computorizado

DEC-FEUP – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

DEM-FEUP – Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

DEM-UC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

EA – Emissão Acústica

INEGI – Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

ISO – International Organization for Standardization

UBI – Universidade da Beira Interior



## 1. INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos tem-se verificado uma elevada aplicabilidade dos materiais compósitos nas diversas áreas da engenharia, nomeadamente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automóvel, onde estes materiais são usados para conceber estruturas e equipamentos.

Estes materiais são cada vez mais utilizados devido ao seu baixo peso e às suas excelentes propriedades mecânicas, físicas e químicas, que os materiais comuns como o ferro, o aço e o alumínio não conseguem alcançar. É importante relembrar que nas mais diversas aplicações de engenharia estes materiais se encontram sujeitos a ambientes agressivos e em severas condições de serviço, as quais podem provocar danos no interior do material, sem que os mesmos sejam facilmente detetáveis. É com base nestes problemas existentes, que se continuam a realizar variados estudos de modo a se tentar perceber as causas do aparecimento de dano nos compósitos, de forma a se contornar estas limitações deste tipo materiais, as quais podem inibir o uso dos mesmos. Os compósitos laminados de vidro/epóxi são dos materiais mais utilizados na indústria naval, aeroespacial e aeronáutica, estando sujeitos a diferentes solicitações exteriores e, por esta razão, o interesse destes materiais para a realização do presente estudo.

É precisamente nesta questão que a presente Dissertação de Mestrado se foca. Com este trabalho pretende-se estudar o comportamento de laminados de vidro/epóxi com três sequências de empilhamento distintas sujeitos a impactos a baixa velocidade, transversal (*Charpy*) e longitudinal (*Tensile impact*), e a solicitações de tração, de forma a avaliar a influência dos mesmos nas propriedades destes laminados. O estudo do comportamento dos laminados sujeitos a condições higrotérmicas variáveis, e ao pré-dano, são também aqui abordados, de modo a se analisarem as variações que possam ocorrer nas suas propriedades devido a eventuais degradações dos provetes que possam ter surgido.

Esta Dissertação de Mestrado encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo este Introdução o primeiro. No 2º capítulo é feita uma breve introdução aos materiais compósitos referindo o seu campo de aplicações, vantagens e desvantagens e modos de fabrico. Faz-se ainda análise do impacto, o efeito da sequência de empilhamento, o efeito

higrotérmico e a detecção do dano por emissão acústica. O 3º capítulo descreve todo o processo experimental para a realização dos diversos estudos, designadamente o processamento dos compósitos laminados utilizados nesta dissertação, a degradação a que os provetes foram expostos, os respetivos ensaios e a visualização dos mecanismos de dano, de modo a analisar as propriedades dos materiais em estudo. No capítulo 4 é apresentada toda a análise e discussão dos resultados obtidos através dos diversos ensaios, sendo os resultados obtidos discutidos com base em resultados suportados na literatura. Finalmente no 5º capítulo são expostas as conclusões finais referentes aos resultados obtidos no presente estudo e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo vai-se abordar o que já foi realizado por outros autores no âmbito do tema da presente dissertação, começando por se versar os materiais compósitos fazendo referência aquando do seu campo de aplicação, vantagens e desvantagens, diversificação deste tipo de materiais e modo de fabrico. Uma breve revisão sobre estudos já realizados do efeito do empilhamento nas propriedades dos materiais compósitos no que diz respeito aos ensaios de impacto e ensaio de tração, o efeito higrotérmico e a deteção de dano por emissão acústica, será também apresentada.

### 2.1. Materiais Compósitos

De um modo geral um material compósito pode ser definido como um material formado por dois ou mais constituintes de diferentes fases (matriz e reforço) e imiscíveis, de modo a formar um novo material com melhores propriedades que as dos constituintes de base [1], [2].

O compósito é geralmente composto por uma matriz e um reforço. A matriz é a fase contínua e tem como objetivos fazer a distribuição do carregamento através do reforço, envolver o reforço preenchendo as lacunas entre este e mantendo-o, assim, na mesma posição de forma a conceder a estrutura do compósito e proteger o reforço do meio ambiente a que estará exposto. Esta fase pode ser constituída por metal, cerâmico ou polímero. A seleção da matriz depende das propriedades que se pretende alcançar. No caso dos polímeros estes geralmente têm baixa resistência e baixo ponto de fusão, enquanto que os metais têm uma resistência e um ponto de fusão bem superior aos polímeros, contudo têm o inconveniente de serem mais pesados. Os cerâmicos em geral são usados quando se quer excelentes resistências à alta temperatura e à oxidação, mas com a desvantagem de ser limitado devido a predisposição destes materiais à fratura frágil. Se assim não acontecesse, este tipo de materiais seriam candidatos ideais para aplicações onde fossem requeridas temperaturas elevadas e tensões acentuadas.

Por sua vez o reforço é a fase descontínua e geralmente é a responsável por dar melhores propriedades finais nos compósitos, tais como a força máxima que provoca rotura, a rigidez específica, a resistência a corrosão e ao calor, etc.. Logo, esta fase deve ser mais

rígida e forte que a fase matriz. O reforço pode, então, tomar várias formas e estas são classificadas em dois grupos: compósitos reforçados com partículas e compósitos reforçados com fibras. Depois de uma melhor compreensão de como é formado o compósito pode-se então concluir que as propriedades deste dependem das propriedades de cada uma das fases, das suas quantidades relativas e da geometria do reforço (forma, tamanho, distribuição e orientação) [1], [2].

### **2.1.1. Campo de aplicação e tipos de compósitos**

Os compósitos são cada vez mais usados nas mais diversas áreas da engenharia devido ao seu baixo peso e boas propriedades mecânicas. Tem-se os exemplos da indústria civil que usa os compósitos como substitutos dos tradicionais ferros e aços nos reforços estruturais de construções. Da indústria aeronáutica/aeroespacial que faz uso destes materiais para a construção da estrutura do avião fazendo, por exemplo, a substituição dos alumínio por compósitos. Também a indústria naval utiliza cada vez mais os materiais compósitos para reforço das estruturas dos navios e dos submarinos. A indústria automóvel que faz aplicação destes materiais para a estrutura da carroçaria e também para peças de *design* exterior e interior. Ainda das indústrias ligadas ao desporto e lazer que recorrerem aos materiais compósitos para a conceção de pranchas de *surf*, pranchas de *bodyboard*, capacetes, bicicletas, tacos de golfe, etc..

Para as diversas aplicações destes materiais na engenharia existem vários tipos de compósitos os quais se encontram classificados em dois grupos em função do tipo de reforço, Figura 2.1. É de realçar que existem ainda os compósitos naturais os quais não se encontram referenciados nesta figura.



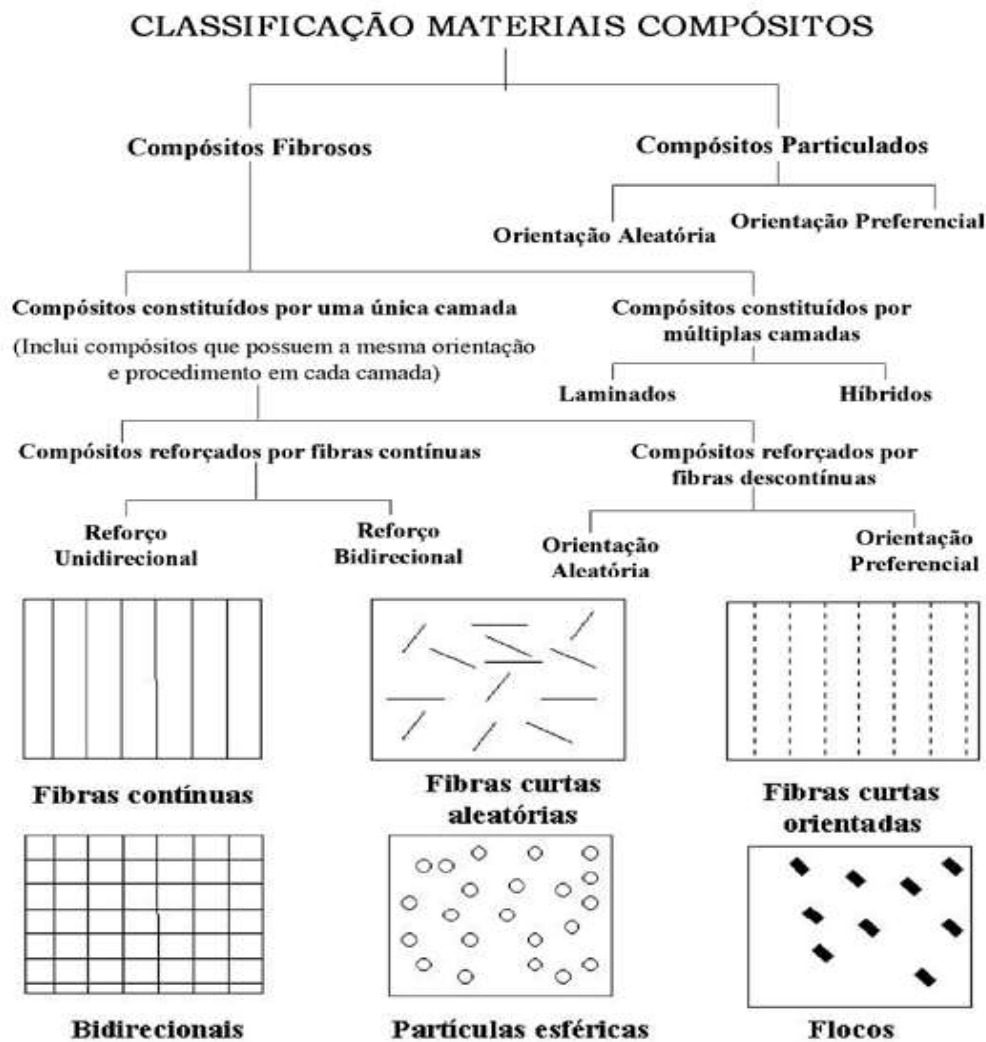


Figura 2.1. Esquema representativo para os diferentes tipos de compósitos [2].

### 2.1.2. Vantagens e desvantagens

Como todos os tipos de materiais também os compósitos apresentam vantagens e desvantagens. Devido às características que estes materiais podem apresentar para as mais diversas áreas da engenharia, observam-se algumas vantagens e desvantagens para suas aplicações. As principais vantagens na utilização de compósitos devem-se à excelente relação de tensão de cedência/massa específica e rigidez/massa específica, boa resistência térmica, boa resistência à corrosão e a ambientes agressivos, bom isolamento elétrico e moldação do compósito em diferentes formatos. Como principais desvantagens tem-se os custos elevados para a sua conceção, a sua difícil reparação, temperatura de serviço limitada e pouco reaproveitamento na reciclagem destes materiais [1], [3], [4].

Na Figura 2.2 observa-se três tipos de materiais (aço, alumínio e compósito) sendo feita uma comparação entre diferentes propriedades: o peso, o coeficiente de dilatação térmica, a rigidez, a resistência à tração e a resistência à fadiga.

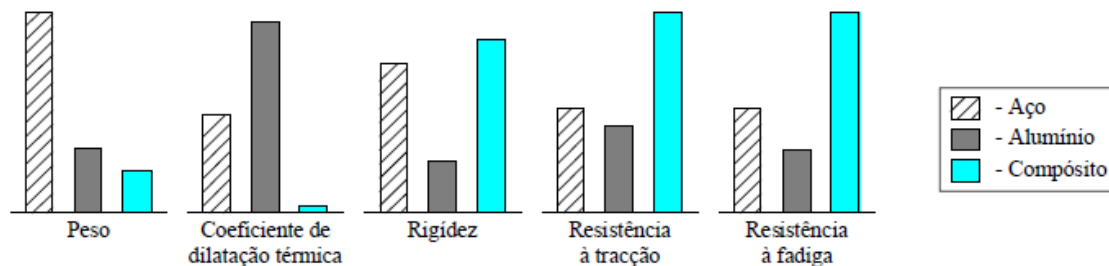


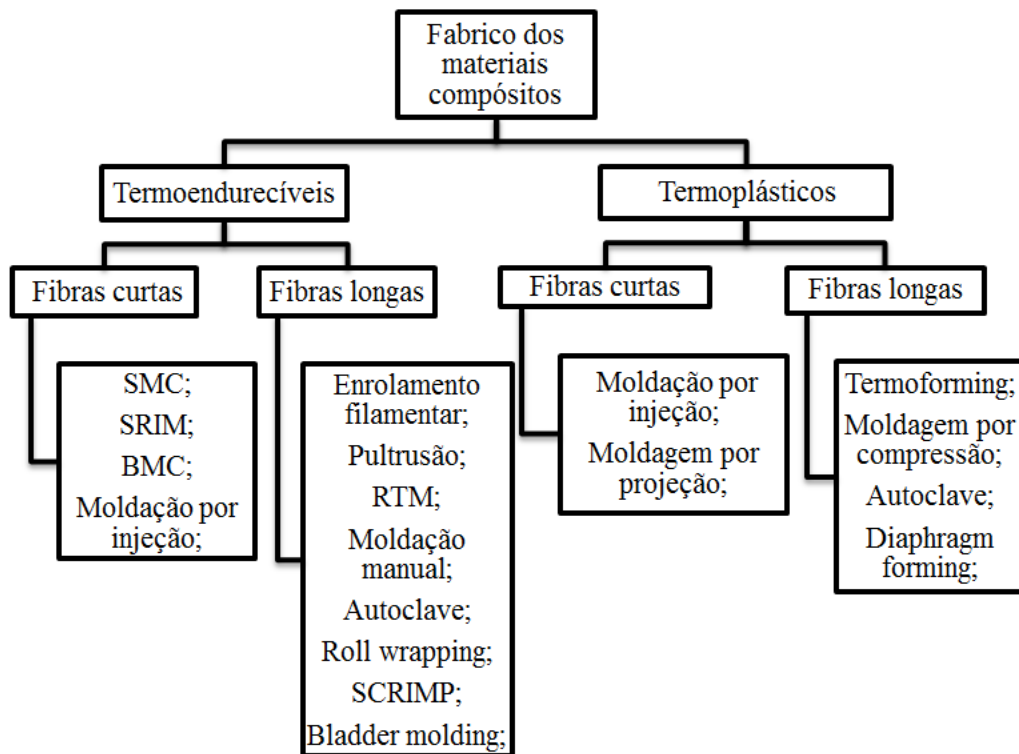
Figura 2.2. Algumas propriedades comparativas entre os três materiais [5].

Como se pode constatar da Figura 2.2 o compósito é o material que apresenta na globalidade melhores propriedades mecânicas, quando comparado com outros materiais tradicionais.

### 2.1.3. Modo de fabrico dos compósitos

Existem vários processos para a produção dos materiais compósitos. Genericamente podem ser avaliados em dois tipos: processos em molde aberto ou processos em molde fechado. As distinções que mais se realçam entre ambos são as superfícies de acabamento, que no caso do processo em molde aberto só permite obter bom acabamento superficial numa das superfícies, enquanto que no processo em molde fechado é possível alcançar bons acabamentos em ambas as superfícies. É de realçar que apesar de só ser possível conseguir bom acabamento superficial num dos lados do compósito através de molde aberto, neste tipo de processo é exequível a realização de componentes de dimensões elevadas e de geometria complexa. Já no caso do processo de molde fechado, além dos bons acabamentos superficiais em ambas as superfícies do compósito, tem-se também uma ótima reprodutibilidade e ainda uma menor exposição a produtos voláteis, os quais são nocivos para a saúde [6].

O tipo de processo/moldação utilizado para a produção deste tipo de materiais pode ser classificado de acordo com a resina usada, seja ela termoendurecível ou termoplástica. Na Figura 2.3 está representada uma esquematização sobre a classificação dos processos de fabrico de acordo com a resina utilizada.



**Figura 2.3.** Representação esquemática do processamento de materiais compósitos dependendo da resina usada na sua obtenção [6].

Seguidamente será apresentada uma breve descrição sobre alguns dos processos usados para a produção dos materiais compósitos.

### 2.1.3.1. Moldação Manual

A moldação manual é o modo de fabrico de compósitos mais usados nos dias de hoje devido a ser o processo mais económico. É um processo completamente manual e portanto a qualidade final do compósito irá depender da “qualidade” da mão-de-obra do operador. O processamento é feito a partir de um molde aberto, o qual é inicialmente revestido com uma resina de poliéster com o objetivo de garantir bom acabamento superficial. A etapa seguinte será fazer a inserção das fibras de reforço, geralmente usadas em forma de tecido ou manta. Posteriormente será introduzida a resina que irá permitir fazer a junção das duas fases (matriz e reforço) e ocupar toda a zona do molde com o auxílio de rolos que irão fazer pressão, de modo a que a resina se impregne no reforço e desta forma sejam retiradas as bolhas de ar que existam entre as fases. Com o auxílio de uma espátula retira-se o excesso de resina no molde. Dependendo do resultado pretendido as etapas descritas acima são repetidas, camada por camada, até se obter um compósito com um certo valor de espessura. A última etapa é o processo de cura no qual geralmente é realizado à

temperatura ambiente [6], [7]. Através da Figura 2.4 consegue-se ter uma melhor percepção do esquema deste tipo de processo.

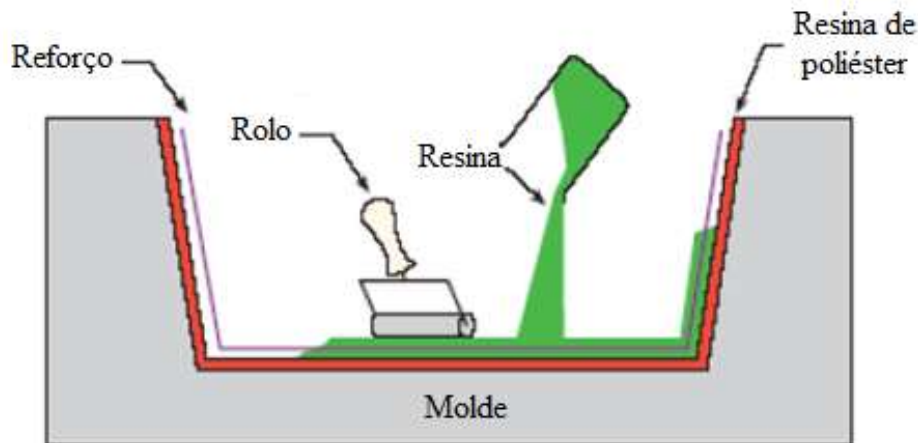


Figura 2.4. Representação esquemática da Moldagem Manual, imagem adaptada de [3].

#### 2.1.3.2. Moldagem em saco de vácuo

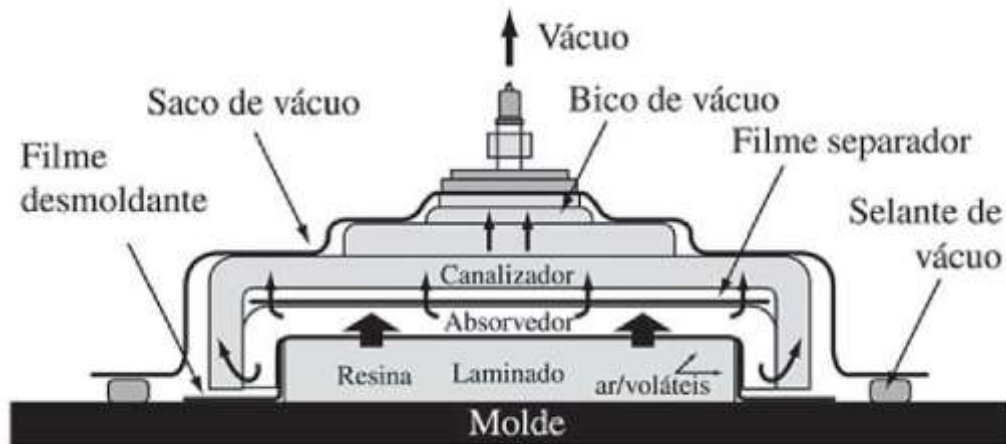
A moldagem em saco de vácuo é basicamente igual ao processo de moldagem manual. Neste caso é usado um saco flexível de plástico onde é selada a peça depois de feita a moldagem manual, para que posteriormente seja realizada a compressão da peça e desta forma seja eliminado o excesso de resina e de ar. O ar dentro do saco é extraído com auxílio de bomba ou bombas de vácuo que permitem fazer a compressão da peça extraindo o excesso de resina através de filmes absorventes. Este processo permite obter uma boa cadência de peças com bom acabamento superficial e boas propriedades, mesmo que a cura seja realizada a temperatura e pressão ambientes. É possível melhorar as propriedades com recurso ao processo de autoclave [7].

#### 2.1.3.3. Moldagem por Autoclave

A moldagem por autoclave é muito utilizada para a obtenção de compósitos laminados. O principal objetivo é realizar a cura do compósito controlando assim a temperatura de aquecimento e arrefecimento, a pressão exercida e o vácuo, de forma a ter uma boa compactação do compósito.

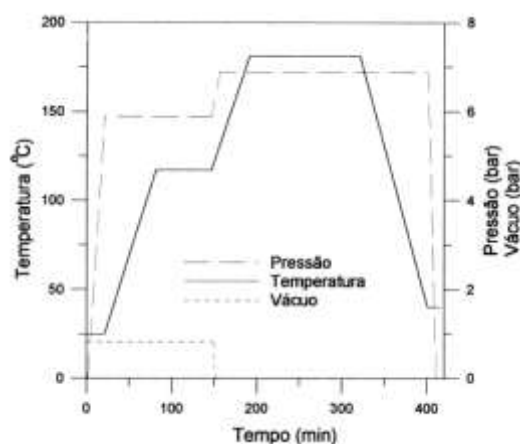
Inicialmente pode ser usado um pré-impregnado com dimensões personalizadas de modo a que este seja empilhado sobre o molde com a sequência e a espessura pretendidas. Após isto, o processo acaba por ser semelhante a moldagem por saco de vácuo. Insere-se o

conjunto num saco de vácuo de modo a que este seja exposto a um ciclo de temperatura e pressão definidas (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Representação esquemática da Moldagem em saco de vácuo [8].

Seguidamente é colocado o conjunto num autoclave de modo a consolidar o componente preformado através da aplicação simultânea de pressão, temperatura e vácuo. Os estágios que são realizados para a cura dos laminados irão ser diferentes dependendo do material a moldar. A primeira parte do estágio consiste numa subida gradual da temperatura, de modo a baixar a viscosidade da resina, fazendo melhorar o seu fluxo e removendo alguns voláteis existentes. Na etapa seguinte faz-se a consolidação do material mantendo os valores constantes de temperatura e pressão durante um certo período de tempo. A última etapa ou estágio é usada para fazer a diminuição gradual dos parâmetros de modo a ter uma boa cura e, desta forma, obter as propriedades desejadas para compósito laminado, [6], [9]. Na Figura 2.6 encontra-se um exemplo dos vários estágios realizados neste tipo de processo para o fabrico de um certo tipo de placas laminadas da empresa *Hexcel Composites*.



**Figura 2.6.** Ciclo de cura de laminados de pré-impregnados F-584 da empresa *Hexcel Composites* [9].

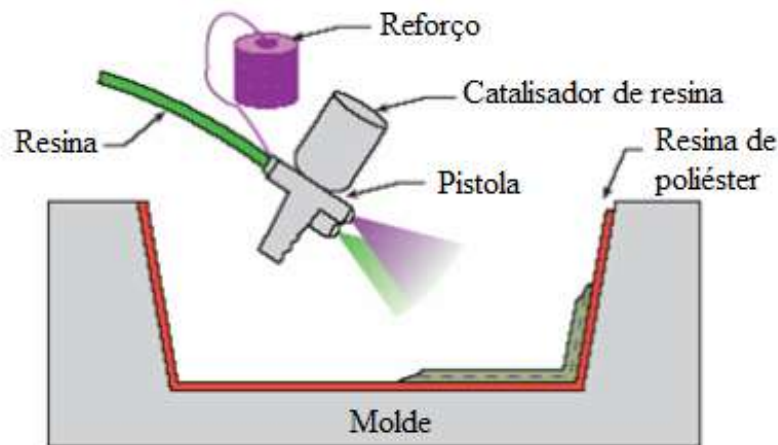
De realçar que este tipo de moldação é geralmente associada às indústrias aeronáutica/aeroespacial e automóvel (mais usual para veículos desportivos), permitindo assim a obtenção de peças de elevada qualidade e desempenho. Na Figura 2.7 é apresentada um autoclave gigante utilizado numa empresa automóvel.



**Figura 2.7.** Autoclaves gigantes utilizadas na empresa automóvel *Lamborghini* [10].

#### **2.1.3.4. Moldação por projeção**

No processo de moldação por projeção, a resina (polimérica ou metálica) e o reforço (fio de fibra ou outro material enrolado num rolo) são pulverizados através de uma pistola de projeção para o molde criando deste modo a camada com a espessura desejada. Seguidamente, com o auxílio de um rolo, é feita a densificação da camada. O processamento é realizado em molde aberto e, portanto, esta moldação acaba por ser um pouco semelhante à moldação manual, com a diferença de se poder automatizar o processo na moldação por projeção (esquema representativo do processo na Figura 2.8). Este tipo de processo é geralmente usado no fabrico de placas ou cascas. Como aplicações tem-se os exemplos dos cascos de barcos de pequeno porte, banheiras e objetos de grandes dimensões [3], [11].



**Figura 2.8.** Esquema representativo da Moldação por projeção, imagem adaptada de [3].

### 2.1.3.5. RTM (Moldação por transferência de resina)

A moldação por transferência de resina é realizada em molde fechado. Neste tipo de moldação a primeira etapa a realizar é a introdução das fibras por camadas no molde inferior. Geralmente as várias camadas são previamente compactadas na forma do molde e unidas por um material ligante. Seguidamente fecha-se o molde superior e faz-se a inserção da mistura sobre pressão por uma(s) cavidade(s) existente(s) entre as fases de modo a preencher os espaços vazios entre elas. A mistura é composta geralmente por resina, cargas, catalisadores e por vezes também aditivada com um composto para dar cor à peça final.

Após realizados os passos acima descritos, tem de se proceder à cura da peça. Para esta etapa, o tempo de cura que irá ser realizado vai depender dos parâmetros escolhidos (catalisador e temperatura) de forma a permitir a obtenção das propriedades requeridas para o produto final.

Para uma melhor compreensão das várias etapas realizadas para obtenção de um material compósito com este tipo de moldação, na Figura 2.9 ilustra-se a representação esquemática deste tipo de processo. Como produtos finais obtêm-se peças com bons acabamentos superficiais, volume de fibras superior em comparação com os restantes processos, dimensões mais precisas e maior complexidade de formas. Como exemplos de aplicação tem-se, por exemplo, os capacetes de proteção, quadros de bicicletas, pás de turbinas eólicas, componentes automóveis como painéis, carroçaria, etc., e também peças para a indústria aeronáutica/aeroespacial. De realçar que este processo pode ser ainda automatizado [3], [12].

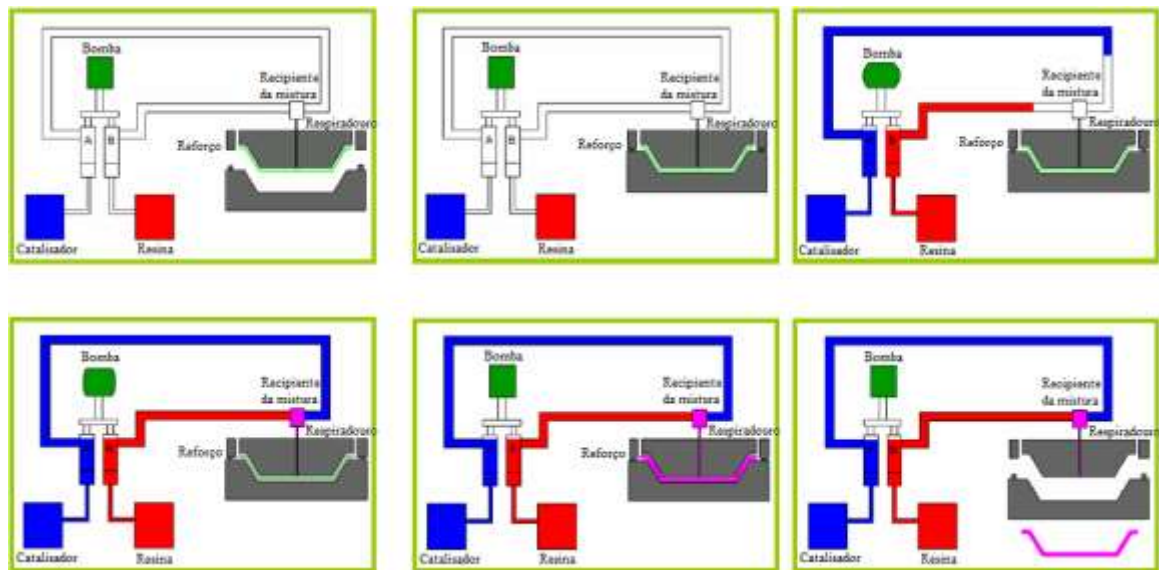


Figura 2.9. Esquema representativo da RTM, imagem adaptada de [3].

## 2.2. Impacto em materiais compósitos

Na presente dissertação pretende-se estudar o efeito do dano provocado por impacto nos compósitos laminados com diferentes sequências de empilhamento. O tipo de dano provocado por impacto é muito comum nestes materiais e pode originar uma redução drástica na resistência mecânica dos compósitos.

Não existe um consenso entre os mais diversos autores no que diz respeito à divisão das solicitações de impacto definida em função do valor da velocidade de impacto. Mesmo não havendo uma partilha de opinião entre os investigadores, muitos defendem que os impactos devem ser divididos em dois grupos: impacto de baixa velocidade e impacto de média/alta velocidade ou balísticos. Os impactos de baixa velocidade são geralmente definidos como impactos com velocidades até os 10 m/s, sendo que este é o modo de dano mais crítico para os compósitos devido à extensa zona de defeito que surge no material após submetido ao impacto. Este tipo de dano não se consegue avaliar/visualizar a olho nu. O impacto de média/alta velocidade é normalmente definido como sendo um impacto com velocidade superior a 10 m/s, e pode comumente ser caracterizado por apresentar um dano que se consegue avaliar/visualizar facilmente a olho nu e onde a zona danificada é localizada no local onde o material sofreu o impacto, não se propagando, na maioria dos casos, pelo resto da estrutura [13].



Na presente dissertação, o estudo baseia-se nos impactos de baixa velocidade onde o dano causado nos compósitos é designado por rotura de matriz, fissuras de fibras, descoesão fibra/matriz e delaminação, conforme descrito no subcapítulo seguinte.

### **2.2.1. Dano**

Um dano muito comum em laminados sujeitos a impacto a baixa velocidade, e que tem grande influência no comportamento dos materiais compósitos, é a rotura da matriz. Este tipo de dano é complicado de se detetar e geralmente é localizado na zona onde o compósito sofreu o impacto. A falha em questão não conduz a reduções significativas nas propriedades mecânicas, mas regra geral, pode atuar como precursor da delaminação, sendo esta uma falha muito significativa para os materiais compósitos e que afeta negativamente nas suas propriedades [14].

Outro tipo de dano vulgarmente observado nos materiais compósitos é a fissuração das fibras. As fibras são as responsáveis por suportar a maior parte das cargas quando sujeitas a solicitações de carregamento. É de salientar que a fissuração das fibras pode influenciar a perda da rigidez e da resistência deste tipo de materiais. Existem várias causas para a ocorrência deste tipo de dano nos compósitos, sendo o impacto uma delas e o principal foco de estudo nesta dissertação. Quando aplicado um impacto transversal no compósito laminado geralmente a fissuração das fibras ocorre de forma localizada proveniente da indentação do impactor. Desta forma pode haver uma descoesão fibra-matriz devido ao aumento das tensões de corte na sua interface provocadas pela existência de extremidades livres de fibras na matriz [12], [14].

A descoesão fibra-matriz é um dano de difícil deteção por técnicas convencionais. Esta geralmente surge devido à fraca adesão entre as fibras e a matriz. De modo a melhorar a aderência entre as fases, faz-se geralmente um controlo cuidadoso durante a produção dos compósitos efetuando um tratamento superficial adequado às fibras[14]. A falha em questão resulta de um modo geral devido à aplicação de uma força na fibra que vai aumentando gradualmente, verificando-se desta forma uma deformação elástica na mesma, onde é atingido um valor máximo para a qual ocorre a descoesão. Consecutivamente, a carga volta a aumentar, obtendo-se desta maneira uma perda de correlação geométrica a que diz respeito a ocupação do novo posicionamento das fibras na matriz. Seguidamente verifica-se uma diminuição da carga aplicada, consequência da diminuição do comprimento de contacto entre as fases [14].

A delaminação é provavelmente o dano mais importante, no que diz respeito a perda de integridade estrutural, em materiais compósitos laminados sujeitos a impactos de baixa velocidade [14]. No entanto, este tipo de dano é supostamente a falha mais difícil de quantificar e analisar. Ao longo dos anos vários autores têm realizado um estudo extensivo para avaliar as causas que levam à ocorrência deste tipo de dano nos materiais compósitos. De um modo geral, a delaminação surge após acontecer rotura da matriz numa dada camada, sendo que esta se tende a propagar para a camada seguinte com diferente orientação ou diferentes propriedades das fibras [14], [15]. Existem três modos de carregamento que podem originar a delaminação neste tipo de materiais [15], Figura 2.10.

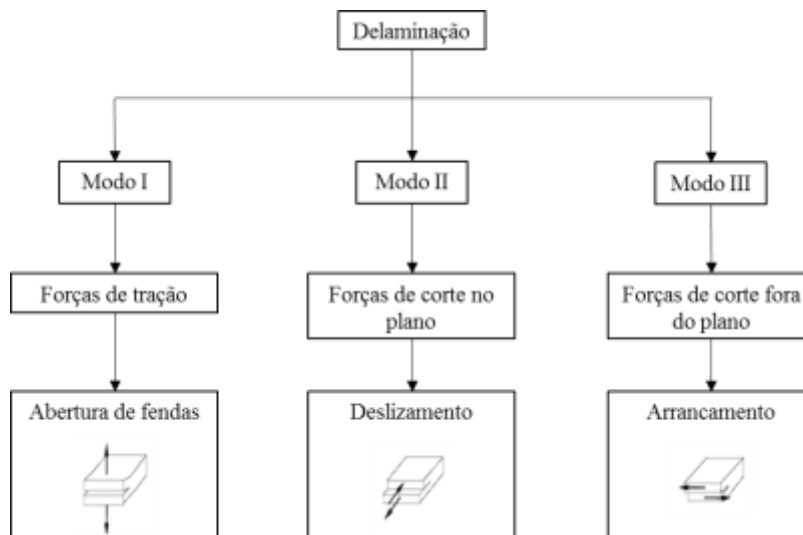
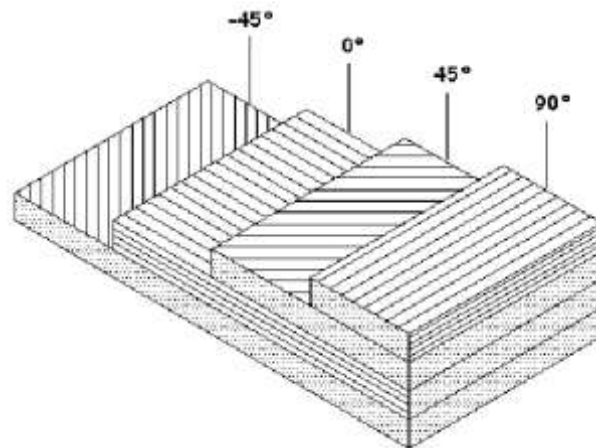


Figura 2.10. Modos de carregamento que causam a delaminação.

### 2.3. Efeito da sequência de empilhamento

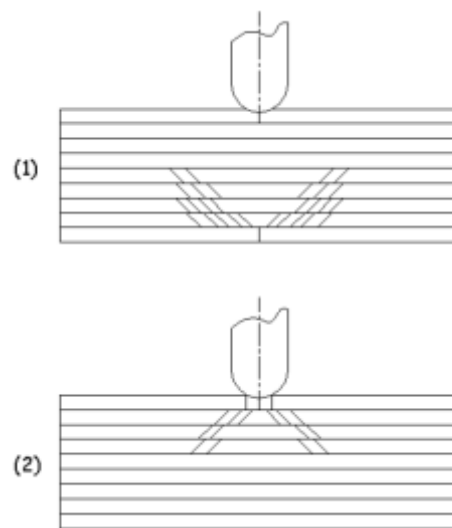
No processamento de compósitos tem de ter em atenção que a orientação e a sequência de empilhamento das fibras determinam a anisotropia do material. Desta forma, dependendo das propriedades que se pretendem faz-se então o empilhamento das fibras de modo a fortalecer as propriedades na direção desejada [16]. Na Figura 2.11 encontra-se representada um exemplo das orientações e respetivas camadas de um material compósito com sequência de empilhamento  $[-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$ .



**Figura 2.11.** Exemplo esquemático da orientação e da sequência de empilhamento de um compósito [16].

Geralmente a fraca correspondência do coeficiente de *Poisson* (relação entre as deformações laterais e longitudinais) entre camadas adjacentes origina elevadas tensões normais e de corte nas extremidades de um laminado [15]. Com o objetivo de diminuir o risco de delaminação são usados diferentes tipos de orientações por camada de modo a alterar algumas solicitações de compressão para tração. Os referidos autores verificaram também que a produção de um compósito laminado com distintas orientações por camada irá permitir que o material se torne quasi-isotrópico. Desta forma, consegue suportar cargas mais elevadas verificando-se uma possível minimização da área danificada, garantindo assim uma rigidez à flexão idêntica em ambas as direções [15]. Assim sendo, pode-se afirmar que a rigidez do laminado revela uma propriedade preponderante e, desta feita, controla o modo de fratura.

Existem dois exemplos tipo de modo de propagação de fratura. No primeiro verifica-se uma propagação de trás para frente a partir da interface provocando a delaminação, isto acontece para o impacto em corpos de amostra flexíveis onde existe uma grande produção de tensões de tração na face contrária onde o impactor colide [14]. No segundo tipo a propagação é observada no sentido contrário, isto é, de frente para trás, sendo que este efeito acontece para níveis de energia de impacto que provocam a iniciação do dano na zona de embate do corpo de amostra. A propagação do dano e respetiva delaminação surge assim devido às elevadas tensões de tração desenvolvidas na extremidade do impactor [14]. Na Figura 2.12 encontra-se uma representação dos dois tipos de propagação do dano nos corpos de amostra. É de realçar que a análise do dano por impacto nos laminados mostra que a delaminação ocorre nas zonas onde existe diferenciação na orientação das fibras entre lâminas contíguas [14].



**Figura 2.12.** Exemplo esquemático da progressão do dano: (1) devido à tensão de flexão; (2) devido à tensão de contacto [14].

## 2.4. Efeito Higrotérmico

Durante o uso de materiais compósitos é necessário ter em conta as condições de serviço/meio ambiente, em que estes vão operar, assim como os vários tipos de carregamento e condições exteriores a que podem estar sujeitos. Temperatura, humidade, exposição química, radiação UV, entre outros, são alguns exemplos referenciados pela literatura [17].

Naturalmente, os compósitos quando sujeitos a variações de temperatura podem sofrer degradação, a qual pode ter influência nas suas propriedades. Mas, estes materiais quando expostos a diferentes condições de temperatura e humidade ficam ainda mais suscetíveis a degradação provocando, desta forma, uma aceleração no seu processo de desgaste e de modo geral, com tendência a baixar ainda mais as suas propriedades.

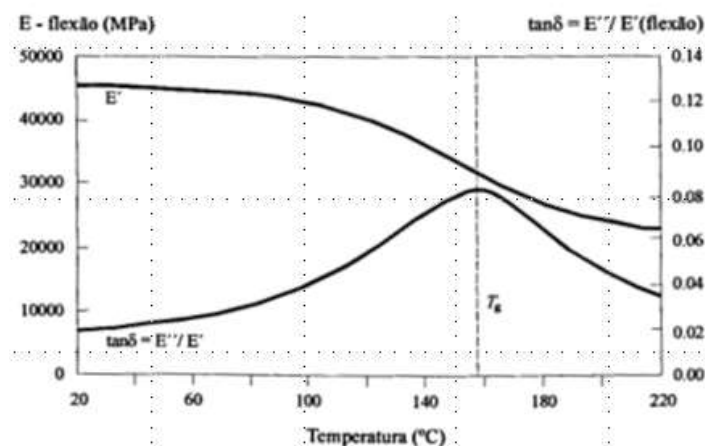
No subcapítulo seguinte apresentam-se algumas conclusões do que já foi feito por outros autores no que diz respeito ao estudo do efeito da temperatura, da humidade e da humidade/temperatura na integridade estrutural de materiais compósitos.

### 2.4.1. Temperatura

Nas mais diversas aplicações de engenharia, é inevitável a exposição dos materiais a diferentes níveis de temperatura [18].

Os compósitos de matriz polimérica também se revelam muito sensíveis às variações de temperatura, pois estas induzem tensões entre camadas. Neste caso surgem fissuras, afetando significativamente a sua resistência mecânica. Por outro lado, o fluxo de calor aumenta geralmente para, ou a partir, das extremidades do laminado onde habitualmente a condutividade ao longo das fibras é maior que ao longo da espessura. Na maior parte dos casos, verifica-se que as camadas que apresentam maior dano são as superficiais, as quais, são mais suscetíveis a dilatações térmicas [18]

Usualmente, as fibras utilizadas nos compósitos estruturais são resistentes à temperatura, por esta razão é que, de modo geral, a degradação nos materiais compósitos estruturais se deve à degradação da matriz ou da interface reforço/matriz [19]. Quando se trata de materiais compósitos de matriz polimérica podem ocorrer alterações significativas nas suas propriedades mecânicas e físicas, quando a temperatura se aproxima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) [18]. Deste modo, a matriz tende a tornar-se muito macia e, por consequência, pode afetar bruscamente as suas propriedades mecânicas, tal como a rigidez e a resistência[20]. Na Figura 2.13 observa-se o gráfico típico da influência do aumento de temperatura no módulo de elasticidade deste tipo de materiais para o comportamento referido anteriormente.

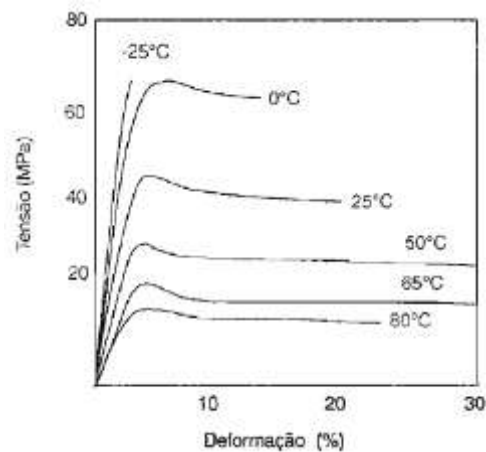


**Figura 2.13.** Influência da temperatura no comportamento dinâmico de uma resina [20].

De notar que no gráfico, também se observa o comportamento da curva do coeficiente de perda ( $\tan \delta = E''/E'$ ) com o efeito do aumento da temperatura. Sendo este coeficiente representado pela razão entre o módulo de perda ( $E''$ ) e o módulo de ganho ( $E'$ ).

No caso da exposição dos compósitos poliméricos a baixas temperaturas, estes tem tendência a danos por fadiga devido a perda de flexibilidade, mas onde geralmente a resistência e a rigidez do compósito são pouco afetadas [20].

A partir da Figura 2.14 observa-se o gráfico tensão-deformação, obtido no ensaio de tração, no qual é demonstrado a influência da temperatura no comportamento mecânico de um polímero de acetato de celulose.



**Figura 2.14.** Influência das diversas temperaturas nas curvas tensão-deformação para o acetato de celulose [21].

De notar que o gráfico evidencia uma mudança do comportamento do material para as diversas temperaturas, no qual pode passar de um comportamento frágil, para temperaturas abaixo de -25°C, na sua totalidade, para um comportamento inteiramente dúctil, considerando temperaturas entre os 50°C e 65°C.

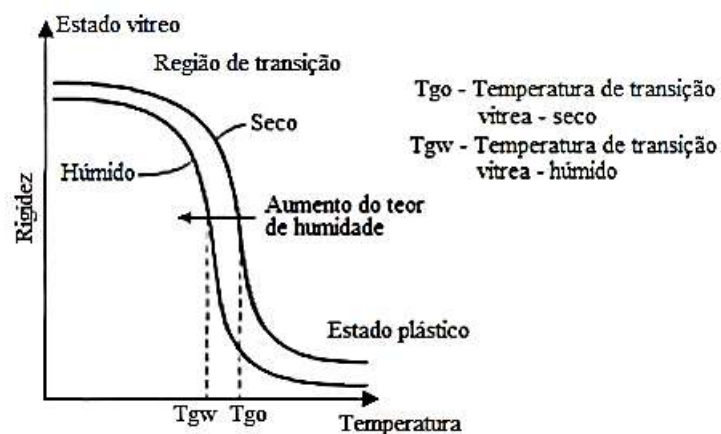
### 2.4.2. Humidade

Normalmente, a presença de água no interior dos compósitos de origem polimérica pode causar efeitos que levam à alteração das propriedades químicas e/ou físicas da resina [22]. Geralmente, as resinas de origem polimérica absorvem, aproximadamente, 2% em massa de água, este valor mostra-se muito baixo, mas no entanto é o suficiente para promover alterações significativas nas suas propriedades [23].

A água é transportada para o interior do compósito através dos reforços (fibras) e da interface, até que seja alcançada a concentração de equilíbrio. Isto pode acontecer devido a lacunas existentes na matriz, por defeitos que possam surgir na fase de fabricação ou provocados por fatores ambientais, ou de serviço, e até mesmo pela capacidade de absorção de água pela matriz [24]. Em geral, a absorção de água pela resina é realizada por difusão, e tem tendência a se intensificar com o aumento da temperatura [25]. Por sua vez, no que diz respeito à matriz esta pode ser afetada pela humidade, condicionando fortemente

a  $T_g$  (temperatura de transição vítrea), sendo verificado que aumentando ligeiramente a humidade se observa um decréscimo considerável da  $T_g$ . Esta situação indesejável pode ocorrer devido às dilatações provocadas pela humidade que acabam por introduzir tensões internas que são maiores que as forças de ligação da matriz, podendo promover fissuras geralmente na camada exterior [24]. Usualmente quando os tempos de exposição são curtos, as consequências ambientais provocadas pela temperatura e humidade relativa do ar podem ser reversíveis[17]. Contudo, esta situação já não acontece para tempos de exposição longos, pois acaba por existir uma ação conjunta entre estes dois fatores devido à afinidade da água com as matrizes de origem polimérica de natureza polar[17]. Vulgarmente nestas situações ocorrem alterações destrutivas entre as fases, matriz e reforço, provocadas pelas possíveis interações físico-químicas existentes entre a resina e a fibra [17].

A  $T_g$  é um parâmetro de extrema importância nos compósitos de origem polimérica, pois, é esta que define em que gama de temperaturas se pode trabalhar com este tipo de materiais, sem haver degradação prematura deste tipo de compósitos. De notar que dependendo das condições higrotérmicas a que o compósito seja sujeito, a  $T_g$  tem tendência a diminuir e por consequência a temperatura em que é realizado o trabalho pode variar [22]. Na Figura 2.15 encontra-se representado o comportamento da  $T_g$ , o qual influencia a rigidez de uma matriz polimérica.



**Figura 2.15.** Variação da rigidez e do  $T_g$  com os efeitos higrotérmicos [20].

Para o caso das resinas epóxi, estas são comumente utilizadas em gamas de temperaturas que são inferiores a  $T_g$ . Estas variações em que a  $T_g$  pode estar sujeita, torna-se um desafio para projetistas e engenheiros, pois a sua causa e quantificação não são simples de identificar, sendo que estas podem ocorrer nos compósitos devido ao grau de plastificação da resina e das interações que podem surgir entre a resina e a água [22].

Num estudo realizado por Huang e Sun [26], em que são analisadas as propriedades mecânicas de compósitos laminados de fibra de vidro/poliéster imersos em água à temperatura de 30°C, verifica-se que após 7, 14 e 21 dias de imersão essas mesmas propriedades tendem a se alterar, algumas com influência negativa e outras com influência positiva. Através da Tabela 2.1 é possível observar-se a variação dos valores de algumas propriedades influenciadas pelos dias de imersão dos laminados compósitos.

**Tabela 2.1.** Resultados obtidos após os vários dias de imersão dos compósitos em água [26].

	<b>Tensão de tração [MPa]</b>	<b>Alongamento à rotura [%]</b>
<b>Controlo</b>	192	3,11
<b>7 Dias</b>	181	3,07
<b>14 Dias</b>	176	3,27
<b>21 Dias</b>	162	3,15

Segundo Huang e Sun [26] a estrutura do compósito laminado tende a plastificar com o aumento do tempo de imersão em água fazendo, assim, aumentar a resistência à flexão dos compósitos.

Por outro lado, o aparecimento da água faz com que a matriz, o reforço e a interface sejam afetadas, podendo mesmo levar a perda de aderência entre a matriz e o reforço e, desta forma, pôr em causa a integridade estrutural deste tipo de materiais [18].

Num outro estudo, realizado por Botelho *et al* [27], em que é analisado o efeito higrotérmico nas propriedades elásticas de um compósito de fibra de vidro/epóxi, verificou-se que após a realização do condicionamento higrotérmico nas condições de 80°C e 90% de humidade relativa e no período de exposição de 6 semanas, as amostras apresentaram um decréscimo nas propriedades de resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade à tração de aproximadamente 22%, 18% e 12,4% respetivamente, em comparação com as amostras de teste. Assim, os autores concluíram que a degradação apresentada nas amostras foi devido ao efeito da plastificação da matriz induzida pela temperatura e humidade.



## 2.5. Detecção de dano por emissão acústica

A emissão acústica (EA) é um ensaio não destrutivo de inspeção, no qual são captados sinais sonoros que, em geral, não são audíveis pelo ser humano, permitindo deste modo a deteção de danos num dado material. Os sinais captados resultam de ondas de tensão que surgem devido à deformação do material quando se encontra em uso. Com o auxílio de sensores, colocados ao longo da estrutura em estudo, consegue-se transformar estes sinais sonoros em sinais elétricos, de forma a produzir a informação necessária para avaliar o estado de um dado componente, identificando os danos que este possa conter no momento da sua utilização. A tensão por sua vez produz sinais de EA através de impulsos, os quais podem ser induzidos devido a carregamentos mecânicos, gradiente térmico, pressurização com gás ou líquido, entre outros [28].

Existem outras técnicas de inspeção não destrutiva tais como a radiografia, os ultrassons, as correntes de Foucault, a termografia, etc.

A técnica de EA possibilita a deteção de iniciação de fissuras, de transformações metalúrgicas e de outros efeitos que possam produzir emissão acústica detetável. Uma das vantagens associadas a esta técnica é o caso de permitir analisar o dano causado num dado material, sem que seja necessário aplicar sensores muito próximos da área que se quer inspecionar. Além de que esta técnica também permite uma monitorização quando o material se encontra em serviço e onde é possível realizar a sua monitorização ao longo de vários dias [28]. As desvantagens no uso destas técnicas podem ser associadas à sobreposição de ruído no momento da análise do material em serviço. De modo a encobrir esta sobreposição de ruído são geralmente utilizados filtros eletrónicos [28].

O sinal obtido através de impulsos na EA mostra um comportamento que pode ser apresentado por aproximação de uma função sinusoidal amortecida. Desta forma, podem ocorrer duas situações no comportamento da função: emissão contínua - no caso do sinal ser praticamente constante; emissão descontínua - para o caso do sinal poder ser separado por blocos [28]. Na Figura 2.16 ilustra-se um exemplo do sinal obtido por impulsos com os dois tipos de comportamentos.

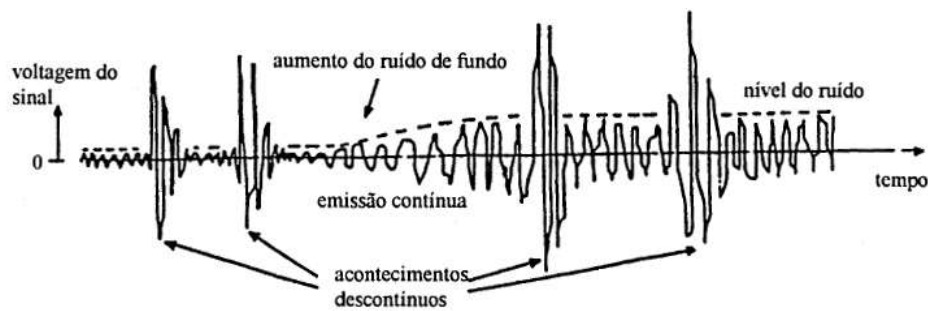


Figura 2.16. Exemplo do sinal por impulsos com emissão contínua e descontínua [28].

A amplitude, o tempo correspondente ao início de detecção do dano e a duração da ocorrência do dano, são alguns dos exemplos de parâmetros que podem ser medidos de forma direta na sequência de um sinal de EA. A detecção do dano é obtida através da amplitude do sinal,  $A$ , no qual a gama de decibéis (dB) apresentadas na ocorrência do ensaio de EA, permite identificar que tipo de dano que surge no material em serviço. Geralmente, considera-se um dano relativamente baixo quando se obtêm amplitudes inferiores a 35 dB. No caso das amplitudes serem superiores a 75 dB, o dano passa a ser considerado muito elevado [28]. Na Tabela 2.2 apresenta-se alguns fatores que influenciam a amplitude do sinal.

Tabela 2.2. Fatores que influenciam a amplitude do sinal [28].

Amplitudes baixas	Amplitudes elevadas
Resistência mecânica baixa	Resistência mecânica elevada
Fraca ductilidade	Boa ductilidade
Isotropia	Anisotropia
Homogeneidade	Heterogeneidade
Espessura reduzida	Espessura elevada
Rotura por corte	Rotura por clivagem
Elevada temperatura	Baixa temperatura
Material sem defeitos	Material com defeitos
Deformação plástica	Propagação de fissura

Na literatura atual existem vários estudos que fazem uso deste tipo de técnicas de inspeção em materiais [29]–[32].

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Após a análise do estado de arte, apresentada no capítulo anterior, apresenta-se neste capítulo o material e procedimentos utilizados no presente estudo de modo a se entender como foram preparados e ensaiados os provetes, antes de se proceder à análise dos resultados obtidos.

Conforme já referido, os objetivos do presente trabalho são estudar o efeito de degradação com diferentes condições higrotérmicas, o efeito do empilhamento das camadas constituintes do compósito e o efeito de pré-dano, na integridade estrutural de materiais compósitos laminados de vidro/epóxi sujeitos a solicitações por impacto e tração.

#### **3.1. Compósitos laminados**

Neste ponto é feita uma descrição de como foram obtidos os provetes para a realização dos diversos ensaios.

##### **3.1.1. Manufatura dos laminados vidro/epóxi**

Para o estudo e respetivos ensaios de impacto utilizaram-se provetes de laminados de vidro/epóxi (matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro) com 3 tipos diferentes de empilhamento de fibras, produzidos em forma de placa no INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), situado na cidade do Porto.

As placas com dimensões de 300×300 [mm] foram fabricadas a partir do processo de moldação por autoclave com um ciclo de cura definido (Figura 3.1). O aquecimento apresenta uma taxa de aumento de temperatura de 3°C/min até se atingir os 130°C onde é mantido durante 1 hora. Após este período procede-se então ao arrefecimento com uma taxa de diminuição de temperatura de 3°C/min até se alcançar o limite que é imposto pela temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Todo este ciclo de cura é efetuado a pressão constante de 2 bar. Os laminados foram obtidos com as seguintes sequências de empilhamento: [0,90]<sub>8</sub>, [0<sub>2</sub>,45<sub>2</sub>,-45<sub>2</sub>,90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>,90<sub>2</sub>]<sub>2s</sub>, sendo que todos têm 16 camadas e uma espessura de aproximadamente 2,1mm.

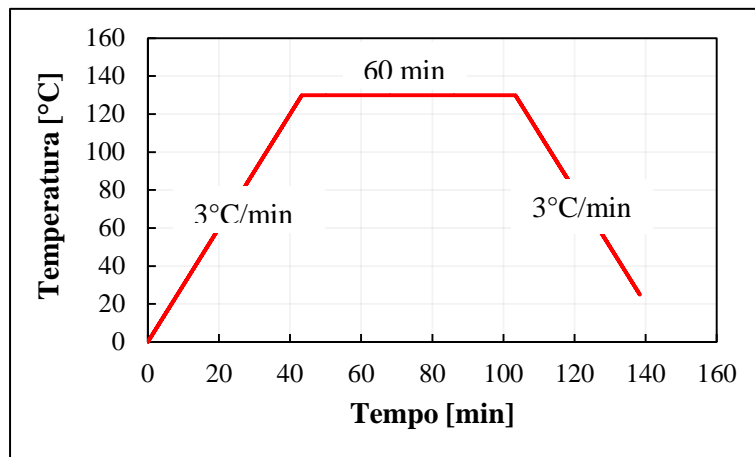


Figura 3.1. Ciclo de cura na moldação por autoclave das placas de laminados de vidro/epóxi, imagem adaptada de [14].

### 3.1.2. Preparação e geometria dos provetes

As placas laminadas acima referidas foram posteriormente seccionadas em provetes com duas formas diferentes de modo a cumprir as normas exigidas para os três tipos de ensaio a serem realizados. Nos subcapítulos seguintes faz-se um resumo da obtenção dos provetes dependendo do tipo de ensaio a realizar.

#### 3.1.2.1. Contabilização dos provetes

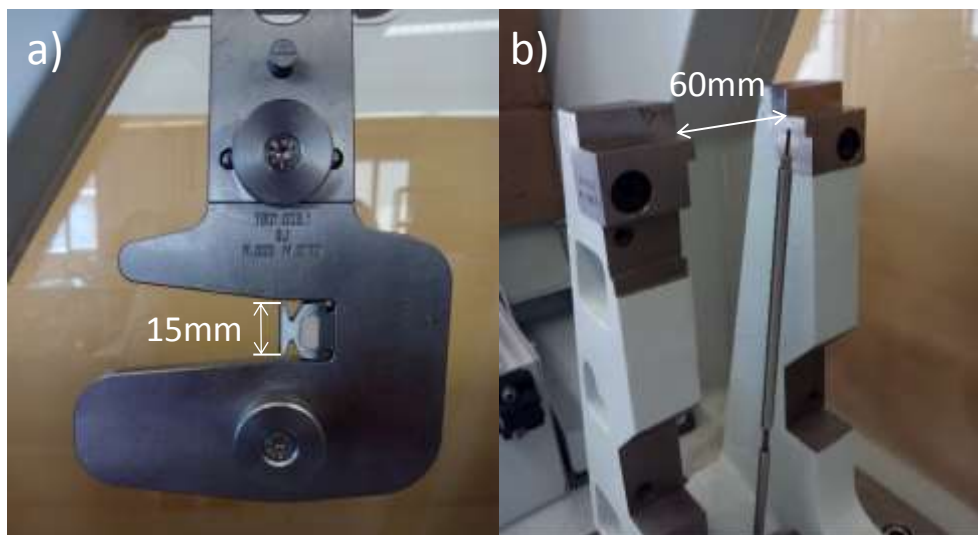
Antes de se proceder à maquinação das placas, fez-se uma contabilização dos provetes necessários para os diferentes tipos de estudo, na Tabela 3.1, admitindo os vários ensaios a realizar e os três tipos de orientação das camadas a estudar.

Tabela 3.1. Contabilização dos provetes.

		Ensaio de tração e Impac. longitudinal	Impacto transversal	Total
Efeito da sequência de empilhamento	[0,90] <sub>8</sub>	6	3	9
	[0 <sub>2</sub> ,45 <sub>2</sub> ,-45 <sub>2</sub> ,90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	6	3	9
	[0 <sub>2</sub> ,90 <sub>2</sub> ] <sub>2s</sub>	6	3	9
Degradação	[0,90] <sub>8</sub>	54	27	81
Pré-Dano	[0 <sub>2</sub> ,45 <sub>2</sub> ,-45 <sub>2</sub> ,90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	15	-	15
	<b>Total</b>	87	36	123

### 3.1.2.2. Ensaio de impacto transversal

Este tipo de ensaio segue a norma ISO 179 para o dimensionamento dos provetes, a qual indica um dimensionamento do provete com largura inferior a 15 mm e com comprimento maior que 60 mm, distância entre os apoios, onde é colocado o provete. Para cumprir estes requisitos os provetes foram seccionados com 80 mm de comprimento e 10 mm de largura. É de referenciar que existem várias dimensões que podem ser consideradas para os provetes seguindo esta norma no qual se encontra apresentada em forma de tabela no ANEXO A. Na Figura 3.2 estão representadas a dimensão do martelo na zona de impacto e o suporte para a colocação dos provetes.



**Figura 3.2.** Dimensões: a) impactor do martelo; b) espaçamento para colocação do provete.

Para a obtenção dos provetes com as dimensões recomendadas fez-se o corte das placas com o auxílio de uma serra elétrica na forma de disco com 2 mm de espessura e dentes diamantados (Figura 3.3) de forma a não causar o levantamento/arrancamento de fibras durante a operação de corte. Após se terem obtido os provetes com as dimensões desejadas fez-se então uma retificação com o recurso a uma lixa de água de 320 *mesh* com uma superfície abrasiva fina adequada para acabamentos (Figura 3.4), de modo a remover eventuais rebarbas ou imperfeições nas arestas que possam ter ficado após a realização do processo de corte. A Figura 3.5 apresenta uma fotografia com o provete para ensaio de impacto transversal, após serem realizadas as operações de corte e retificação.



**Figura 3.3.** Serra de disco elétrica com dentes diamantados.



**Figura 3.4.** Lixa de água de 320 *mesh* com superfície abrasiva fina.

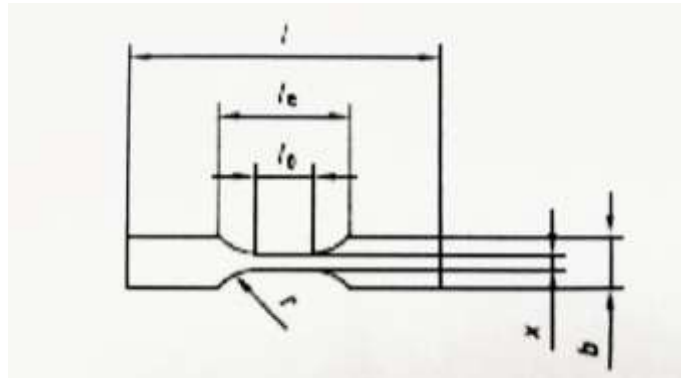


**Figura 3.5.** Provete obtido após maquinação com as dimensões recomendadas.

### **3.1.2.3. Ensaio de impacto longitudinal**

No caso do ensaio de impacto longitudinal, a norma ISO 8256 método A exige dimensões padronizadas as quais são representadas esquematicamente na Figura 3.6, estando os respetivos valores na Tabela 3.2. Para fazer a maquinação das placas para obtenção dos provetes com as dimensões exigidas pela norma foi utilizado o equipamento CNC (Controlo Numérico Computorizado) da marca MIKRON modelo VCE500, pertencente e situado no DEM-UC (Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra). A Figura

3.7 apresenta uma fotografia do provete na sua forma final, considerando as dimensões padronizadas pela norma acima referida para este tipo de ensaio.



**Figura 3.6.** Esquema representativo e dimensões do provete tipo 2, regido pela norma ISO 8256 método A [33].

**Tabela 3.2.** Dimensões do provete tipo 2 [33].

Tipo de provete	$l$ [mm]	$b$ [mm]	$x$ [mm]	$l_0$ [mm]	$l_e$ [mm]	$r$ [mm]
2	$60 \pm 2$	$10 \pm 0,2$	$3 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$25 \pm 2$	$10 \pm 1$



**Figura 3.7.** Forma final do provete obtido após maquinação.

#### 3.1.2.4. Ensaio de Tração

Para este tipo de ensaio o dimensionamento dos provetes baseia-se na norma ASTM D 3039, Figura 3.8, que permite a obtenção das propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica.

Com o objetivo de fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos para os vários dias e para as várias temperaturas de exposição dos provetes, realizaram-se estes ensaios com provetes de dimensões iguais aos usados no ensaio de impacto longitudinal, geometria da Figura 3.8 a). De referir que estes provetes têm dimensões relativamente diferentes às impostas pela norma acima referida mas, sendo ensaios comparativos não haverá problemas quanto à geometria, desde que sejam mantidas a mesma forma e dimensões dos provetes em todos os ensaios, consegue-se fazer o paralelo de resultados e de

comportamento dos laminados para as diferentes condições de degradação e para os diferentes tipos de empilhamento.

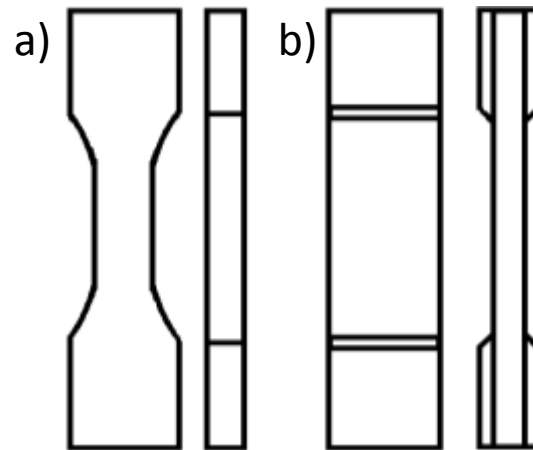


Figura 3.8. Geometria: a) Forma de haltere; b) Plano, com maior espessura nas extremidades.

## 3.2. Degradação dos compósitos laminados

Depois de maquinados todos os provetes, estes foram expostos a diferentes tipos de degradação. Para a sua identificação, todos os provetes foram devidamente identificados através de códigos numéricos.

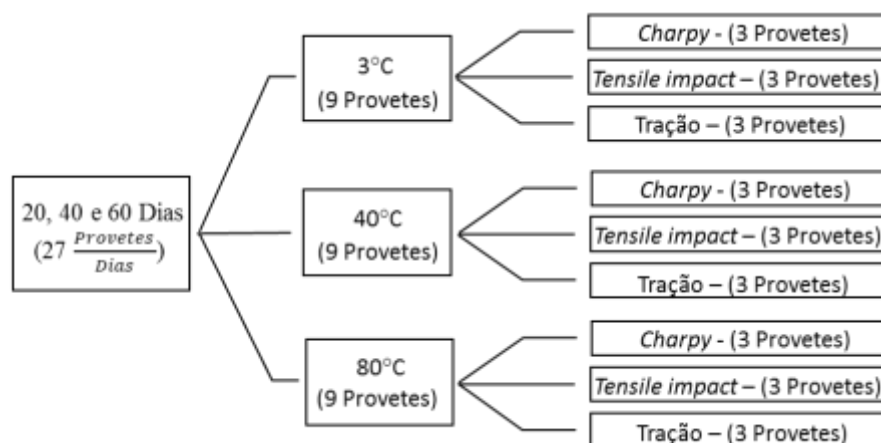
Seguidamente faz-se a exposição do procedimento adotado no presente estudo.

### 3.2.1. Condições higrotérmicas

Para estudar o efeito higrotérmico, diferentes provetes foram imersos em água destilada à temperatura de 3°C, 40°C e 80°C. Para tal, foi utilizado um frigorífico, uma câmara de climatização e uma mufla/forno, respetivamente. Na Figura 3.9 ilustra-se a distribuição dos provetes em termos do meio ambiente e tipo de ensaios experimentais adotados, enquanto na Tabela 3.3 indica-se o tempo de exposição.

Estes ensaios foram realizados em laminados  $[0,90]_8$  e em provetes com as geometrias já previamente descritas.





**Figura 3.9.** Esquema ilustrativo da divisão dos provetes para o estudo do efeito higrotérmico.

**Tabela 3.3.** Diferentes condições ambientais com os respetivos dias de imersão.

Condição ambiental	Temperatura [°C]	Tempo de imersão [dias]
Água destilada	3	20, 40 e 60
Água destilada	40	20, 40 e 60
Água destilada	80	20, 40 e 60

### 3.3. Ensaio experimentais

Após a promoção da degradação dos provetes de compósitos laminados, procede-se à realização dos ensaios de impacto transversal, de impacto longitudinal e de tração de modo a avaliar o comportamento e as possíveis alterações nas propriedades dos compósitos laminados. A realização dos ensaios e a determinação das propriedades do material são efetuadas com parâmetros pré-definidos através de normas, dependendo do tipo de ensaio a realizar.

Os ensaios foram sempre executados com grupos de 3 provetes, sendo que cada grupo corresponde ao tipo de degradação e tempo de exposição a que estes foram expostos. Inicialmente ensaiaram-se os provetes de controlo de forma a se obter dados quando os provetes estão na condição “novo”, isto é, provetes que não sofreram qualquer tipo de dano. Assim, poder-se-á fazer comparação com os dados obtidos após a degradação dos provetes em diversas condições higrotémicas e vários tempos de exposição.

É de salientar que também na fase inicial, para além de se ensaiarem os provetes de controlo, com o empilhamento  $[0,90]_8$ , que são utilizados para comparação com os provetes sujeitos a degradação, foram também ensaiados os dois tipos restantes de provetes com sequências de empilhamento  $[0_2,90_2]_{2s}$  e  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ , de forma a se analisar o efeito do empilhamento na resposta dos laminados às diferentes solicitações exteriores. Foram ainda realizados ensaios com provetes de sequência de empilhamento  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  no que se refere ao estudo do pré-dano a aplicar aos provetes e a respetiva deteção do dano por emissão acústica. O pré-dano por sua vez realizou-se no equipamento de ensaio de tração na UBI (universidade da Beira Interior) aplicando diferentes carregamentos aos provetes sem os levar à rotura.

Para comparação dos resultados faz-se então três tipos de estudo: o primeiro consiste na comparação de propriedades e comportamento para os diferentes tipos de empilhamento dos laminados; o segundo na avaliação, para um tipo de empilhamento, das propriedades e comportamento do material antes e após a degradação dos provetes nas diferentes condições higrotérmicas e nos vários tempos de imersão; o terceiro na avaliação das propriedades e comportamento do material quando aplicado um pré-dano aos provetes sem qualquer tipo de degradação de modo a simular choques que este tipo de materiais possam vir a sofrer. De salientar que ainda no terceiro estudo fez-se a deteção do dano aplicado através de emissão acústica.

Antes da realização dos ensaios é necessário determinar corretamente as espessuras e larguras da zona estreita no caso dos provetes em forma de haltere e em todo o provete no caso dos provetes planos, de modo a se obterem os valores para as respetivas áreas da secção, o que foi efetuado com recurso a um paquímetro.

Nos subcapítulos seguintes explicam-se os procedimentos utilizados para os três tipos de ensaios a efetuar.

### **3.3.1. Ensaio de impacto transversal**

O ensaio de impacto transversal é comumente utilizado por diversas indústrias, com o objetivo de medir a quantidade de energia absorvida por um material durante a fratura, bem como para avaliar a resistência ao impacto e a resiliência do material em estudo. As principais vantagens deste ensaio são a sua simplicidade, o fácil manuseamento e o baixo

custo na sua realização. Este é um ensaio destrutivo, sendo que o material a testar é levado até à rotura.

Uma definição de resiliência pode ser dada como a capacidade que um material tem em absorver energia mecânica, sendo dada pela razão entre a energia total e a área da secção.

Energia de impacto pode ser definida como a energia absorvida pelo provete antes de se atingir a rotura do material, sendo medida a deformação que o provete sofre.

No caso em que o martelo após embater no provete não tem energia suficiente para o partir, fica-se perante a situação em que a energia absorvida é igual a energia máxima e, portanto, a resistência de impacto é igual a resiliência.

Os ensaios foram realizados no DEM-UC, segundo a norma ISO 179 no equipamento de ensaio do fabricante INSTRON, modelo CEAST 9050 com um martelo impactor pendular de referência M2129, designado com o código 7601.005.1 com uma energia de 5 J. Os ensaios realizaram-se em ambiente laboratorial à temperatura ambiente.

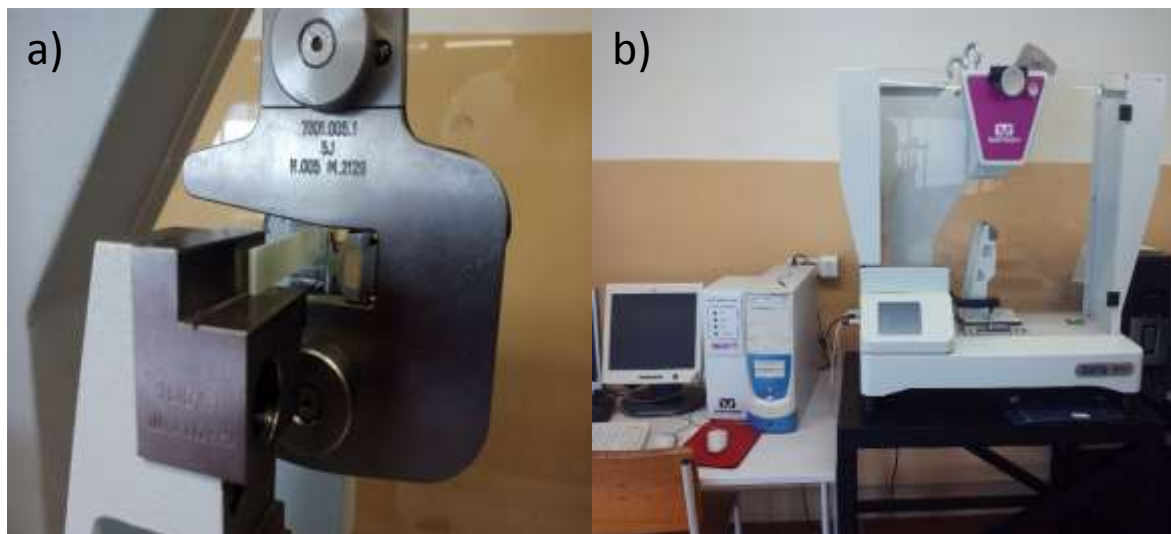
O equipamento acima descrito encontra-se conectado a um sistema de aquisição de dados do fabricante INSTRON, modelo CEAST DAS 8000 *Junior* e também a um computador equipado com o programa da CEAST que permite a realização dos ensaios e recolha dos dados obtidos.

De acordo com o que é usual em todos os tipos de ensaios experimentais, antes da realização dos ensaios é necessário efetuar a calibração do equipamento.

Depois de se inserir as dimensões dos provetes e escolher os parâmetros de teste no programa da CEAST, coloca-se o provete para ensaiar no componente fixo do equipamento, o qual é apoiado nas extremidades conforme se pode ver na Figura 3.10 a). Posteriormente, solta-se o martelo de forma a impactar o provete na secção média levando-o à rotura. O martelo encontra-se posicionado a 150°, como se pode visualizar na Figura 3.10 b).

Após a realização dos ensaios, o tratamento dos dados obtidos é feito com recurso ao programa *Microsoft Office Excel*.

Na Figura 3.10 observa-se: a) pormenor do martelo a embater no provete; b) equipamento utilizado neste tipo de ensaios (máquina de aquisição de dados, computador e máquina de ensaios respetivamente).



**Figura 3.10.** a) Martelo e suporte onde se apoia o provete; b) Equipamento de Ensaio de impacto transversal.

### **3.3.2. Ensaio de impacto longitudinal**

O ensaio de impacto longitudinal é um ensaio destrutivo, que se realiza através do impacto ao longo do comprimento do provete sendo por isso considerado um ensaio de impacto em tração. Com este tipo de ensaio consegue-se quantificar a capacidade de absorção de energia pelo provete até à rotura, avaliar a sua resistência ao impacto e respetiva resiliência dos provetes. Para a realização destes ensaios segue-se a norma ISO 8256.

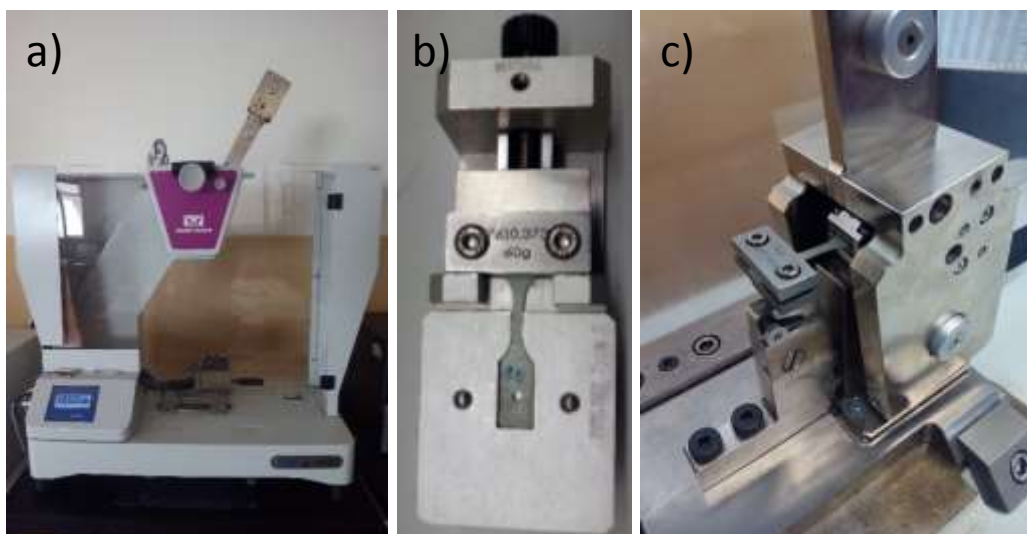
Estes ensaios foram realizados no DEM-UC, com recurso ao equipamento do fabricante INSTRON, modelo CEAST 9050 com um martelo impactor pendular designado com o código 7600.325 e com energia de 25 J. De referenciar que todos os ensaios foram executados em ambiente laboratorial à temperatura ambiente.

Antes da realização dos ensaios, tal como já foi referido anteriormente para o outro teste, faz-se a calibração do equipamento.

Este ensaio consiste em soltar o martelo de uma determinada altura, posicionado a 150° (ver Figura 3.11 a)) tal como no ensaio anterior, fazendo-o embater no provete levando-o à rotura. O provete é fixo numa das suas extremidades e na outra existe um dispositivo onde o martelo vai embater provocando, deste modo, a força de impacto (Figura 3.11). Os dados obtidos após efetuar o ensaio são apresentados através de um ecrã táctil incorporado no próprio equipamento.

De referenciar que o equipamento de ensaios de impacto transversal e longitudinal é o mesmo, diferenciando o martelo impactor e o componente imóvel onde se

fixa o provete. Tal como no ensaio anterior, o tratamento dos dados foi executado com o auxílio do programa *Microsoft Office Excel*.



**Figura 3.11.** a) Equipamento de Ensaio de impacto longitudinal; b) Peça auxiliar onde é fixada uma das extremidades do provete; c) Martelo e suporte onde é fixo o provete.

### 3.3.3. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo e tem como objetivo determinar algumas propriedades dos materiais, tais como a tensão de rotura, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* de um material.

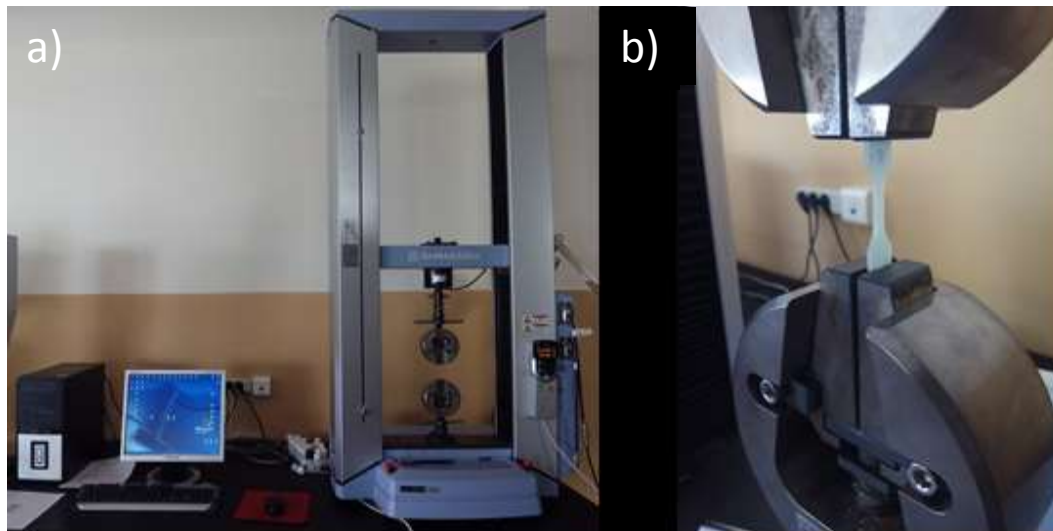
O ensaio em questão foi realizado segundo a norma ASTM D 3039 no DEM-UC, conforme já referido. Antes da execução de qualquer ensaio, e sempre que se inicia o programa ou se alteram as amarras, é sempre necessário fazer a calibração do equipamento.

Para a sua realização todos os provetes são sujeitos a um carregamento contínuo, na direção longitudinal dos provetes, no equipamento de ensaios da marca SHIMADZU modelo AUTOGRAPH AG-X, equipado com uma célula de carga de 5 kN. A velocidade de avanço de travessão a que se efetuaram os ensaios foi de 2 mm/min, sempre em ambiente laboratorial, portanto os ensaios foram todos realizados à temperatura ambiente. O provete é fixo através de amarras de fixação nas suas extremidades, sendo tracionado até que seja atingida a rotura do provete. A rotura observou-se, como era espectável, perto da zona onde se encontram os raios de concordância, pois é onde existe maior concentração de tensões.

A máquina de ensaio encontra-se conectada a um computador de forma a se poder usar o próprio programa da máquina “TRAPEZIUM X” e desta forma se obter os dados dos respetivos ensaios. No momento da realização de cada ensaio obtém-se um registo

da variação da força aplicada em função do deslocamento. Após a realização dos ensaios, o tratamento de dados é feito com o auxílio do programa *Microsoft Office Excel*.

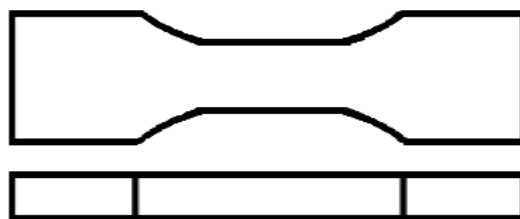
Na Figura 3.12 encontra-se representada: a) equipamento de ensaio de tração; b) pormenor das amarras de fixação com o provete pronto para ensaiar.



**Figura 3.12.** a) Equipamento de Ensaio de Tração; b) Amarras de fixação.

### 3.3.4. Realização do pré-dano

Tendo em vista o estudo do efeito do pré-dano nas propriedades ao impacto, foram efetuados ensaios de tração nos laminados com a sequência de empilhamento  $[0_2, 45_2, -45_2, 90_2]_s$  e a geometria indicada na Figura 3.13. Para tal foi utilizada uma máquina de tração SHIMADZU, modelo AGS-X, equipada com uma célula de carga de 10 kN (Figura 3.14 a). Este equipamento encontra-se ligado a um computador, onde está instalado o programa “TRAPEZIUM X”. Como descrito em 3.3.3, estes ensaios decorreram segundo a norma ASTM D 3039.



**Figura 3.13.** Geometria dos provetes em forma de haltere.

Após obtida a resistência estática dos referidos laminados, os provetes foram, posteriormente, sujeitos a pré-cargas de 20%, 40% e 80% do valor da carga de rotura. Para

cada condição foram utilizados três provetes. Para caracterizar o dano induzido, utilizou-se a emissão acústica com recurso ao equipamento MARANDY, modelo MR1004 (Figura 3.14 b)). De salientar que os equipamentos acima descritos, os quais foram utilizados neste estudo pertencem e estão na UBI.



**Figura 3.14.** Equipamentos: a)Ensaio de tração; b)Emissão Acústica.

Após efetuado o pré-dano e a sua respetiva caracterização, os provetes foram ensaiados ao impacto, neste caso sujeitos a impacto longitudinal. Desta forma pretendia-se determinar a resistência residual ao impacto e os ensaios decorreram segundo a descrição exposta em 3.3.2.

### **3.4. Visualização do dano após realização dos ensaios**

Posteriormente à realização dos ensaios, de forma a se poder ter uma melhor perceção de como ocorre a deformação/rotura dos provetes, fez-se uma avaliação visual do dano com o auxílio de um microscópio estereoscópio trinocular do fabricante Carl ZEISS, modelo Stemi 2000-C com ampliação de 5X e dupla focagem (macrométrica e micrométrica). O equipamento encontra-se conectado a uma câmara fotográfica digital (fabricante CANON, modelo POWERSHOT G5 com ampliação de 16X) para a obtenção das imagens, e a um computador de secretária com o próprio programa do microscópio. A obtenção das imagens é toda realizada através de um programa instalado no computador, podendo-se, desta forma, fazer a avaliação do dano através das imagens captadas, sem ter de

se recorrer ao binóculo do microscópio. De salientar que o trabalho foi realizado no DEM-UC.

Na Figura 3.15 encontra-se uma fotografia de todo o equipamento utilizado para proceder à visualização do dano provocado nos provetes.



**Figura 3.15.** Microscópio estereoscópio trinocular do fabricante Carl ZEISS.

Basicamente a grande diferença entre o microscópio estereoscópio trinocular e binocular encontra-se na adaptação da câmara fotográfica que permite captar as imagens e posteriormente tratá-las com recurso a um computador. Este equipamento possibilita fazer uma visualização tridimensional e geralmente é usado para observar materiais/objetos opacos. De realçar que a visualização do dano com este tipo de equipamento é o método mais simples de avaliação visual de danos em materiais.

Na visualização do dano foi usada uma ampliação de 2 vezes para os provetes de ensaio de impacto transversal e ampliação de 2,5 vezes para os provetes de ensaio de tração e de impacto longitudinal.



## **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios experimentais previamente descritos. Para tal, vão existir três subcapítulos referentes ao efeito da sequência de empilhamento, temperatura e tempo de exposição bem como o efeito do pré-dano nas propriedades mecânicas. Os resultados são apresentados em função do seu valor médio e respetiva dispersão em torno dos valores máximos e mínimos.

### **4.1. Efeito da sequência de empilhamento nas propriedades mecânicas**

Como referido no capítulo 2, a sequência de empilhamento assume uma grande influência no comportamento mecânico dos materiais compósitos. Neste sentido, será dada uma especial atenção ao seu efeito na resistência estática e no comportamento ao impacto, tanto transversal como longitudinal, assim como à tração.

#### **4.1.1. Ensaio de impacto transversal**

A resistência ao impacto transversal decorreu segundo a metodologia descrita no capítulo anterior e os resultados encontram-se apresentados em termos de resiliência e força máxima de impacto. Neste sentido, a Figura 4.1 começa por ilustrar o efeito do empilhamento na resiliência, onde os símbolos representam os valores médios e as bandas de dispersão os respetivos valores máximos e mínimos.

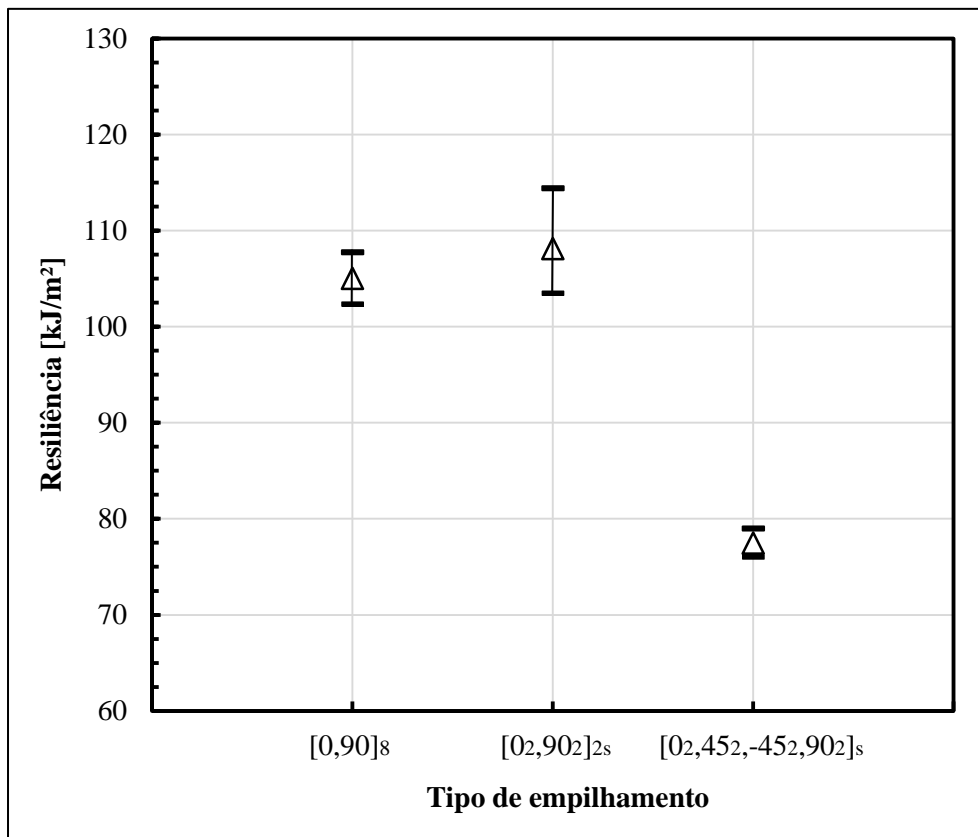


Figura 4.1. Gráfico comparativo da resiliência entre os três tipos de empilhamento para o ensaio de impacto transversal.

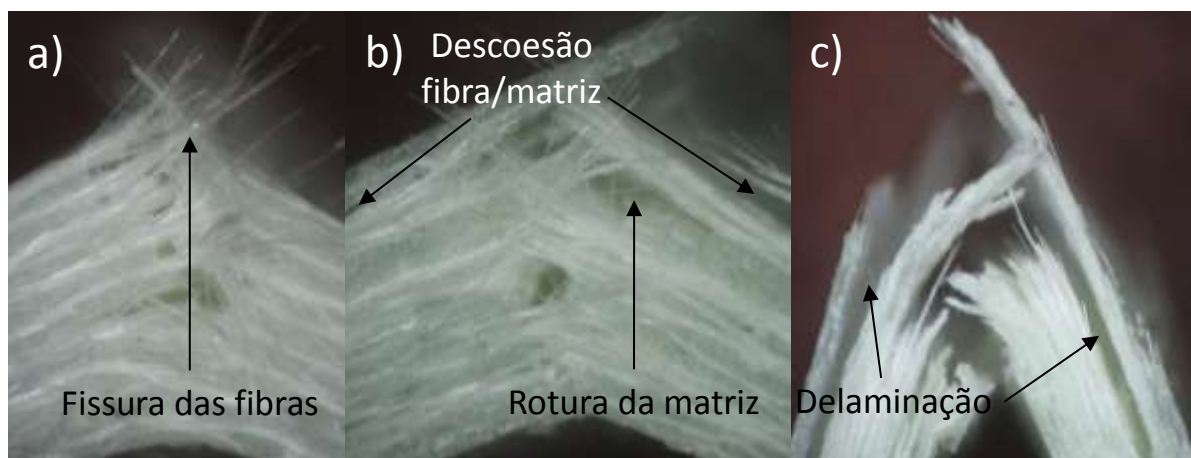
Da análise do gráfico verifica-se que os laminados com as sequências  $[0,90]_8$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$  apresentam valores de resiliência muito próximos, ainda que, em termos médios, os valores do último empilhamento sejam aproximadamente 3% mais elevados. Relativamente à sequência  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ , o valor médio da resiliência é, neste caso, cerca de 28% mais baixo que o observado para o empilhamento  $[0_2,90_2]_{2s}$ . De acordo com a literatura [15], [34] a orientação das fibras tem efeito preponderante na resposta do laminado às solicitações exteriores. Assim, pode-se justificar o porquê de o laminado simétrico com orientações a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  apresentar valor mais elevado para a resiliência, contrariamente ao que sucede para o laminado também simétrico, mas com orientações a  $45^\circ$  que não respondem da mesma forma ao impacto transversal.

Os mecanismos de dano também explicam estes resultados e encontram-se ilustrados na Figura 4.2.

Contudo, a diferença de resultados é justificada através das Figura 4.2 a) e b), nas quais, se observa o dano causado nos respetivos laminados. Em todas as figuras é

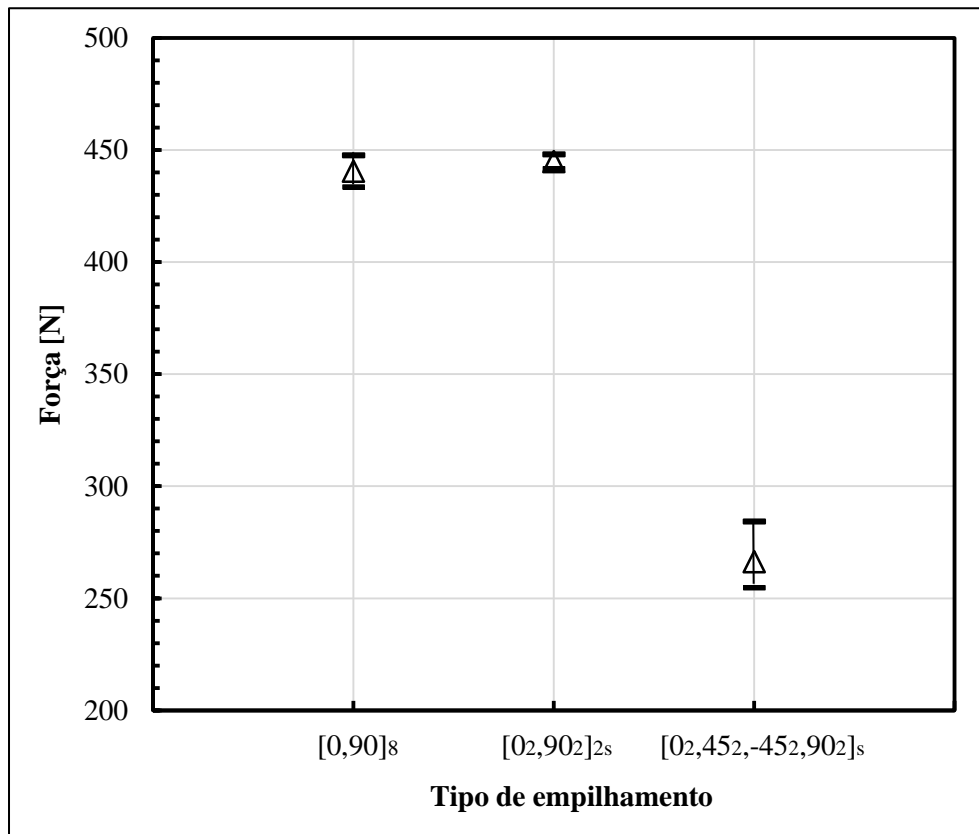
possível detetar-se rotura de matriz e fissura de fibras. De salientar que a matriz tem grande influência no comportamento neste tipo de ensaio, pois é fase que suporta boa parte do esforço para o qual os provetes são sujeitos.

Na Figura 4.2 a) verifica-se o sucessivo empilhamento das camadas com orientações a  $0^\circ$  (“linhas” brancas) e  $90^\circ$  (zonas mais escuras entre “linhas” brancas), onde o dano ocorre de modo contínuo por delaminação através das camadas com diferentes orientações ao longo da espessura do laminado  $[0,90]_8$ . No caso da Figura 4.2 b), observam-se aglomerados de camadas com orientações  $0^\circ$  e  $90^\circ$  o que não promove tantas zonas de dano por delaminação ao longo da espessura do laminado  $[0_2,90_2]_{2s}$  e por consequência, apresenta melhor resistência ao impacto. No laminado com empilhamento  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  a diminuição do valor médio de resiliência em comparação com o empilhamento  $[0_2,90_2]_{2s}$ , pode ser justificado pela menor distribuição de fibras na orientação a  $90^\circ$ , as quais, se encontram no sentido da altura do impactor dificultando a sua fissuração. De notar que o empilhamento  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  apresenta 4 camadas para cada tipo de orientação, agrupadas na sua maioria 2 a 2, com exceção para os  $90^\circ$  que apresenta 4 camadas juntas, pelo que neste caso existem várias zonas entre camadas onde é possível a ocorrência de delaminação. Através da Figura 4.2 c) visualiza-se que o dano é essencialmente causado por delaminação, devido às diferentes orientações das fibras, levando à separação quase total entre as lâminas constituintes do compósito, o que origina também uma completa fissuração em todas as fibras. De referir que, no que diz respeito aos mecanismos de dano, ocorre primeiramente a rotura da matriz, seguidamente a descoesão fibra/matriz, a delaminação e a fissuração de fibras.



**Figura 4.2.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto transversal conforme a sequência de empilhamento: a)  $[0,90]_8$ , b)  $[0_2,90_2]_{2s}$  e c)  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ .

Relativamente à força máxima de impacto, a Figura 4.3 apresenta a sua variação em função da sequência de empilhamento.

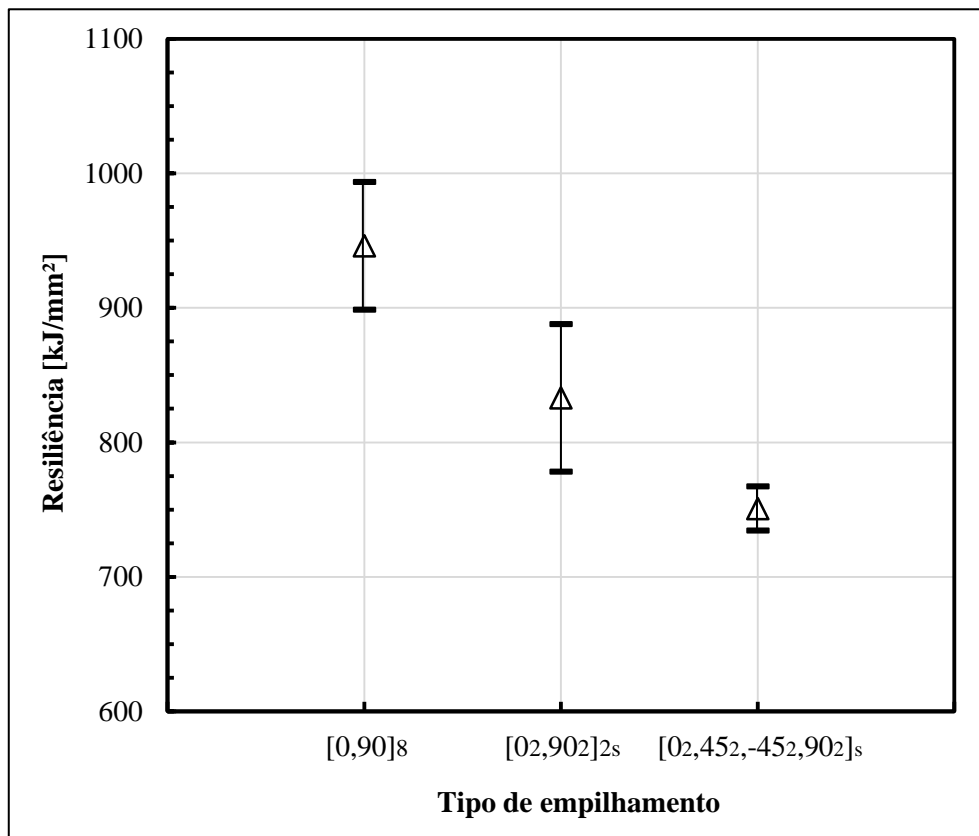


**Figura 4.3.** Gráfico comparativo da força máxima entre os três tipos de empilhamento para o ensaio de impacto transversal.

Analisando o gráfico, verifica-se um comportamento muito semelhante ao observado na Figura 4.1, onde os empilhamentos  $[0,90]_8$  e  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ , apresentam valores médios para a força máxima de impacto na ordem dos 1% e 40% respetivamente, mais baixos que os observados para o empilhamento  $[0_2,90_2]_{2s}$ .

#### 4.1.2. Ensaio de impacto longitudinal

A resistência ao impacto longitudinal em função da sequência de empilhamento encontra-se ilustrada na Figura 4.4, em termos dos valores médios da resiliência e respetivos máximos e mínimos obtidos dos ensaios experimentais.



**Figura 4.4.** Gráfico comparativo da resiliência entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de impacto longitudinal.

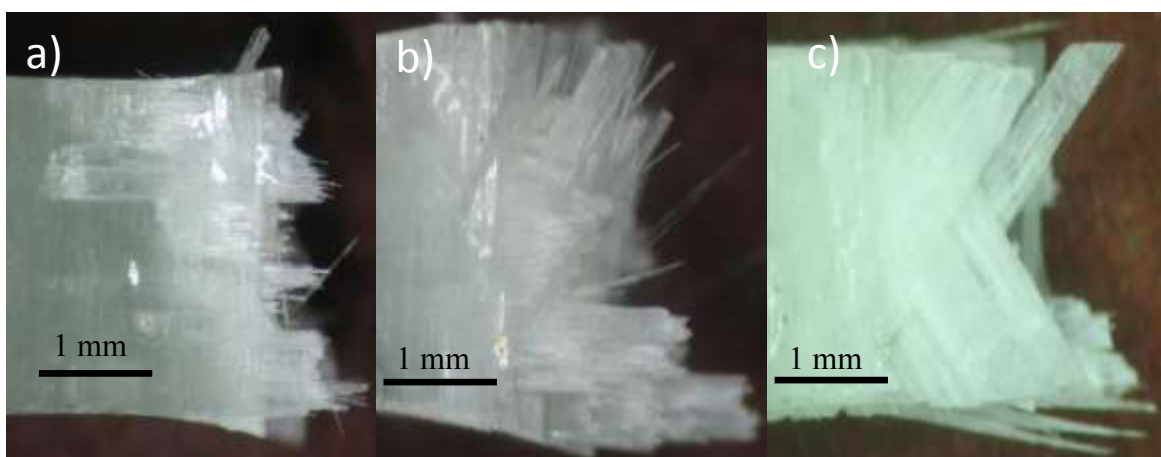
A sequência de empilhamento  $[0,90]_8$  é a que apresenta a maior resiliência, cujos valores médios são aproximadamente 21% mais elevados que os obtidos para a sequência de  $[02,452,-452,902]_s$  e 12% mais elevados do que os observados para a sequência de  $[02,902]_{2s}$ . De notar que os empilhamentos com maior resistência ao impacto longitudinal exibem uma ampla gama de dispersão de resultados, mas não se cruzam nos seus domínios. No caso do empilhamento com menor resistência, este apresenta uma dispersão de resultados bem mais reduzida. Não são conhecidos trabalhos na bibliografia que permitam justificar estes valores, no entanto os mesmos estão em conformidade com os obtidos para a solicitação por tração, apresentados no ponto seguinte. Sendo o impacto longitudinal um ensaio de impacto à tração seria de esperar que os laminados que apresentassem maior número de lâminas segundo a direção longitudinal do provete, direção da solicitação, oferecessem maior resistência ao impacto, apresentado maior valor para a resiliência, o que é confirmado pela Figura 4.4. Apesar dos laminados  $[0,90]_8$  e  $[02,902]_{2s}$  terem o mesmo número de camadas a  $0^\circ$ , o posicionamento é distinto, o que pode justificar a diferença observada para os valores da resiliência.

Os mecanismos de dano também explicam estes resultados e encontram-se ilustrados na Figura 4.5.

Este tipo de comportamento é espectável devido a pré-disposição das fibras nos laminados, sendo que os laminados com mais camadas na orientação  $0^\circ$  conseguem absorver maior energia de impacto para este tipo de ensaio pois as fibras encontram-se na direção preferencial do carregamento e portanto têm maior resistência ao impacto do que se apresentassem ao corte. De referenciar que a sequência  $[0,90]_8$  tem 8 camadas no sentido do carregamento ( $0^\circ$ ) enquanto que a sequência  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_8$  só apresenta 4 camadas com esta orientação, o que faz com que se verifique a diminuição na resistência ao impacto em tração neste último tipo de laminado referenciado.

A variação entre as sequências  $[0,90]_8$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$  pode ser justificada devido ao número de camadas adjacentes com orientação a  $90^\circ$ , direção perpendicular ao carregamento, o que leva a que o laminado em causa não suporte um carregamento tão elevado devido ao aparecimento prévio da delaminação. É de notar que ambos os materiais têm o mesmo número de camadas no sentido do carregamento, 8, diferenciando o modo como estas se encontram predispostas. No caso da sequência  $[0,90]_8$ , as fibras encontram-se a  $0^\circ$  e  $90^\circ$  sucessivamente até se atingir as 16 camadas no total, salientando que numa face as fibras estão a  $0^\circ$  e na outra face a  $90^\circ$ . Para a sequência  $[0_2,90_2]_{2s}$ , as fibras encontram-se por blocos, tendo na direção  $0^\circ$  dois blocos de duas camadas situadas nas faces do laminado e um bloco de quatro camadas no centro. Em relação as fibras na direção  $90^\circ$ , estas encontram-se em dois blocos compostos por quatro camadas que se situam entre os blocos com a direção longitudinal ( $0^\circ$ ).

A Figura 4.5 ilustra o modo de dano/rotura nos provetes de acordo com a sequência de empilhamento dos laminados.



**Figura 4.5.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto longitudinal dependendo da sequência de empilhamento: a)  $[0,90]_8$ , b)  $[0_2,90_2]_{2s}$  e c)  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ .

Ao analisar as figuras a) e b), observa-se que qualquer que seja a sequência de empilhamento, os mecanismos de dano apresentados nos provetes são a rotura da matriz, delaminação e fissuração das fibras, respetivamente. No caso da Figura 4.5 c), o provete apresenta maior rotura de matriz, sendo que esta quase que se estende por todo o provete.

#### 4.1.3. Ensaio de Tração

Na Figura 4.6 estão representadas as curvas tensão-deslocamento obtidas para as diferentes sequências de empilhamento. As curvas ilustradas são as que apresentam o valor máximo da tensão de rotura mais próximo do valor médio obtido entre os três provetes ensaiados para cada tipo de empilhamento. Contudo, elas representam o comportamento típico observado para cada sequência.

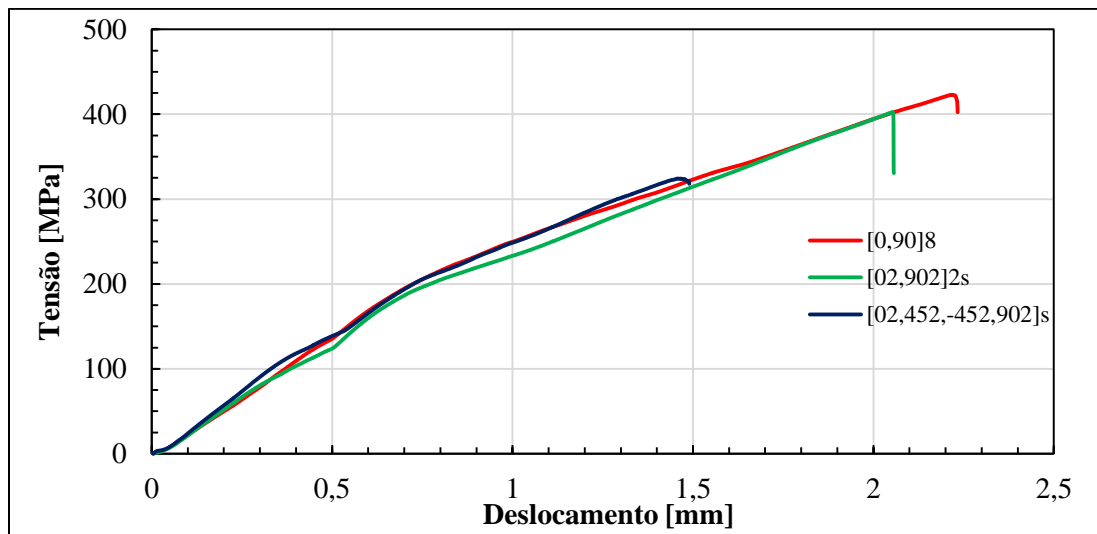
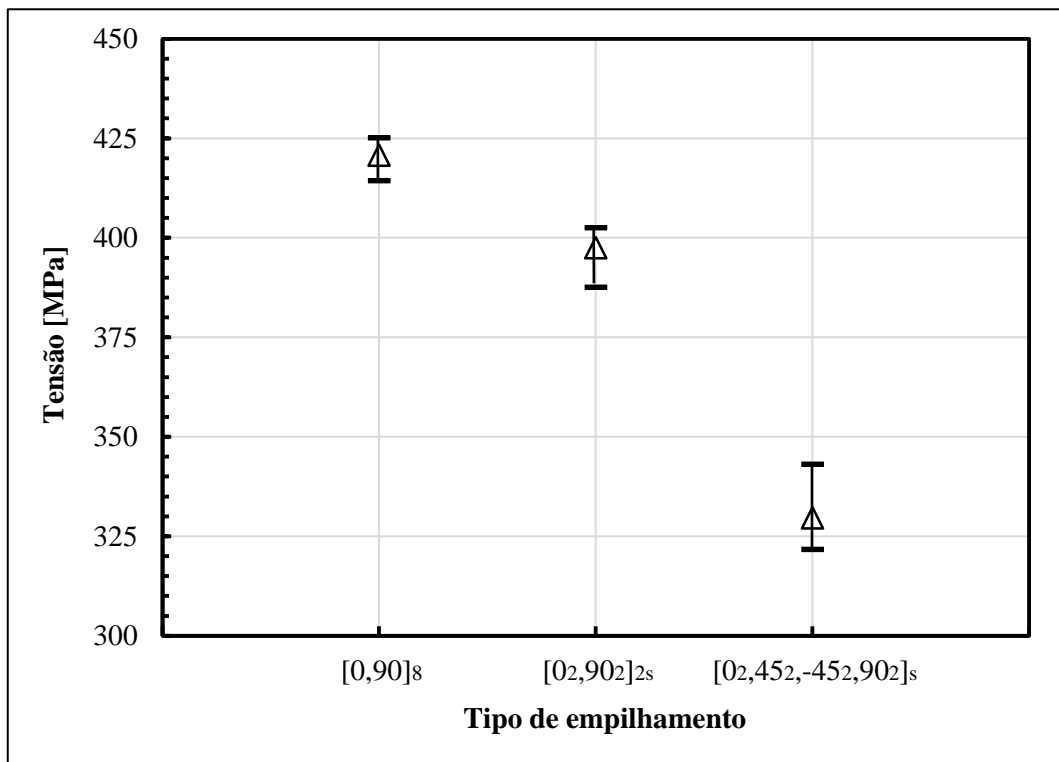


Figura 4.6. Gráfico comparativo da tensão de rotura entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de Tração.

Da análise ao gráfico observa-se que o empilhamento  $[0,90]_8$  é o que apresenta maior resistência à tração e, no campo oposto, o laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  é o que apresenta menor resistência estática. Estes valores encontram-se ilustrados na Figura 4.7, onde é possível observar que os empilhamentos de  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$  apresentam uma resistência à tração, respetivamente, 22% e 6% inferior à obtida para o empilhamento  $[0,90]_8$ . A dispersão de resultados para qualquer uma das sequências de empilhamento é baixa. Observa-se uma tendência para o valor máximo no caso dos empilhamentos com melhores resistências à tração, e uma tendência para o valor mínimo para o empilhamento  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ .





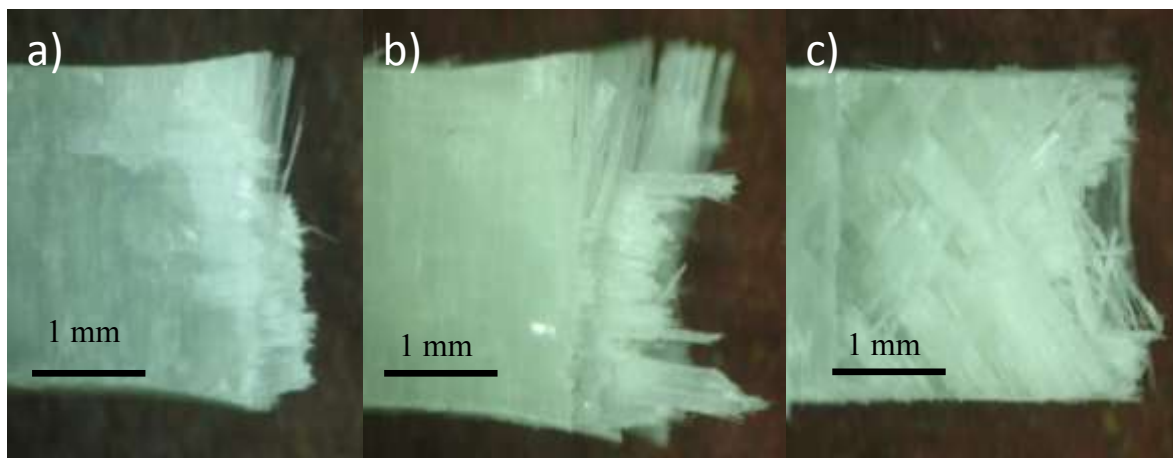
**Figura 4.7.** Gráfico comparativo da tensão média e respectiva dispersão entre as três sequências de empilhamento para o ensaio de Tração.

Segundo a bibliografia [35], este fenómeno pode ser explicado pela disposição das fibras no laminado. Dado que neste tipo de carregamento o maior esforço é suportado pelas fibras, os laminados com menor número de camadas orientadas a  $0^\circ$  têm necessariamente menor valor de resistência à tração. Caso que se verifica entre os empilhamentos em que só têm camadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e o empilhamento  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . Para os empilhamentos  $[0,90]_8$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$ , dado que estes laminados têm o mesmo número de camadas com orientação  $0$ , a literatura mostra que a diferença entre os valores de resistência podem ser explicados pela maneira como são distribuídas as fibras pela espessura do laminado. Desta forma o comportamento em causa é explicado pelo aglomerado de fibras na orientação a  $90^\circ$  para o empilhamento  $[0_2,90_2]_{2s}$  no qual surgem fissuras na matriz e onde o processo de delaminação se processa de forma mais rápida até que ocorra a quebra total do laminado.

Os mecanismos de dano também explicam estes resultados e encontram-se ilustrados na Figura 4.8. Nos três tipos de empilhamento pode-se verificar que existe rotura de matriz e fissura de fibras, sendo também observado descoesão fibra-matriz com maior predominância no caso do laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$ . Também para este laminado se

verifica que existe uma maior extensão de rotura de matriz, bem como fissuras de fibras, associadas à presença de delaminação. A maior extensão de dano justifica a menor capacidade que o laminado tem de responder às solicitações exteriores., como foi observado na Figura 4.7.

É de salientar o facto do comportamento previamente descrito ser muito semelhante ao observado para os provetes sujeitos a ensaios de impacto em tração.



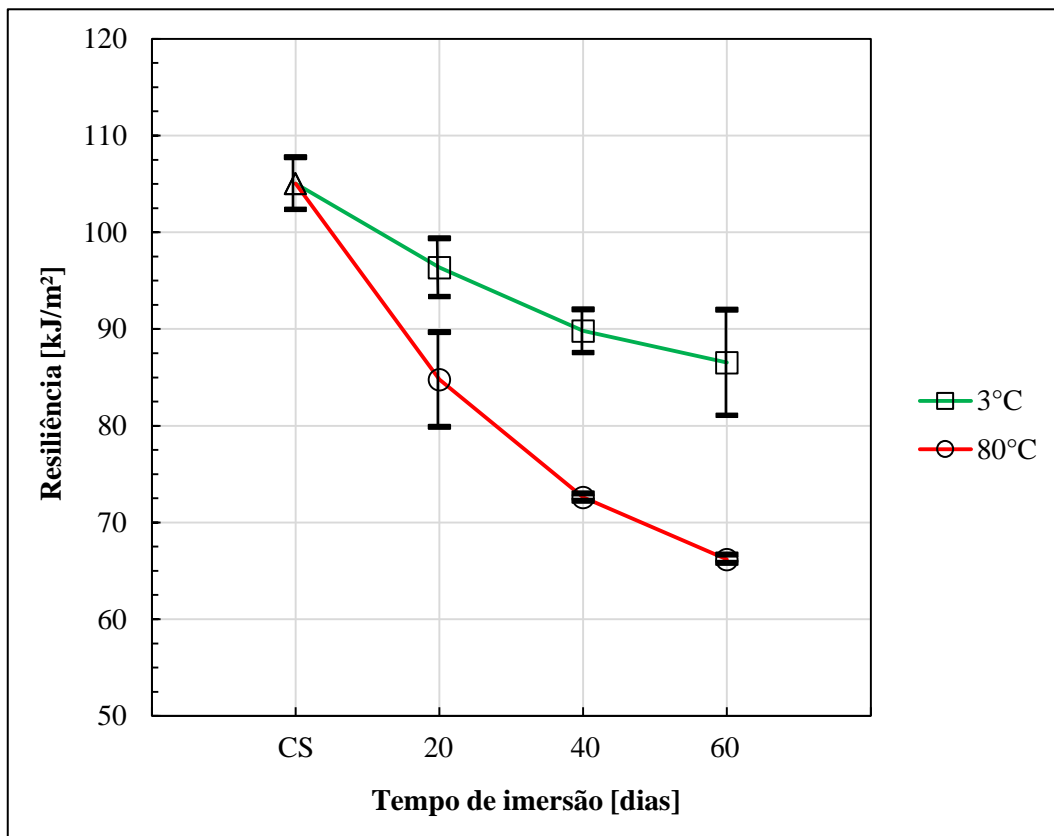
**Figura 4.8.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de Tração dependendo da sequência de empilhamento: a)  $[0,90]_8$ , b)  $[0,90]_{2s}$  e c)  $[0,45_2,-45_2,90]_s$ .

## 4.2. Efeito da temperatura e tempo de exposição

Nesta secção, tanto o efeito higrotérmico como o tempo de exposição serão avaliados em termos das propriedades estáticas e resistência ao impacto. Para tal, foram utilizados laminados com a orientação  $[0,90]_8$ .

### 4.2.1. Ensaio de impacto transversal

A Figura 4.9 ilustra os valores médios da resiliência obtidos para as diferentes temperaturas ( $3^\circ\text{C}$  e  $80^\circ\text{C}$ ) e tempo de exposição.



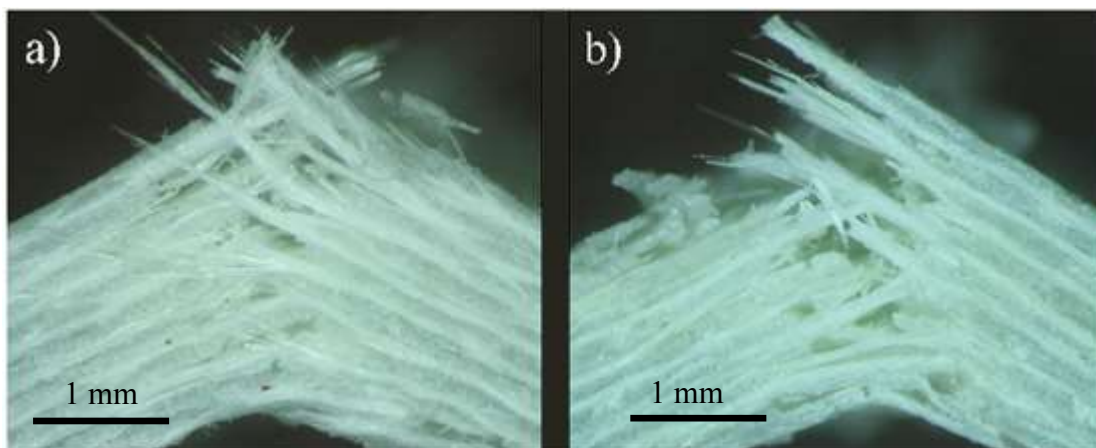
**Figura 4.9.** Gráfico comparativo da resiliência no ensaio de impacto transversal nas diferentes condições higrotérmicas e nos vários períodos de imersão.

Analisando o gráfico verifica-se uma redução gradual da resiliência, para ambas as temperaturas, ao longo do tempo de imersão. No entanto, a diminuição mais expressiva surge para os 60 dias de imersão à temperatura de 80°C, onde ocorre uma redução de aproximadamente 37% face aos provetes de controlo. No caso da imersão para 60 dias a 3°C, existe um decréscimo, neste caso, na ordem dos 18% relativamente ao valor de controlo. Pela dispersão de resultados observa-se que os provetes imersos em 40 dias à temperatura de 3°C atingem os níveis de degradação nos quais os provetes imersos em 20 dias a 80°C já tinham atingido. Para os 60 dias de imersão a 3°C os valores de resiliência obtidos apresentam uma dispersão ao ponto de conseguirem abranger os resultados para os 40 dias de imersão à mesma temperatura, o que pode mostrar uma menor degradação para este efeito higrotérmico.

Segundo a bibliografia, este andamento pode ser explicado devido ao facto dos compósitos de matriz polimérica, caso em estudo, serem bastante sensíveis a variações de temperatura. Quando a temperatura se aproxima da temperatura vítrea ( $T_g$ ) tende a ficar mais macia, afetando deste modo as propriedades mecânicas do compósito, como por

exemplo a sua resistência [18], [20], [36]. De acordo com Canevarolo [21] o comportamento demonstrado pelos provetes quando sujeitos a diferentes temperaturas varia bastante podendo, inclusive, passar de comportamento frágil para dúctil.

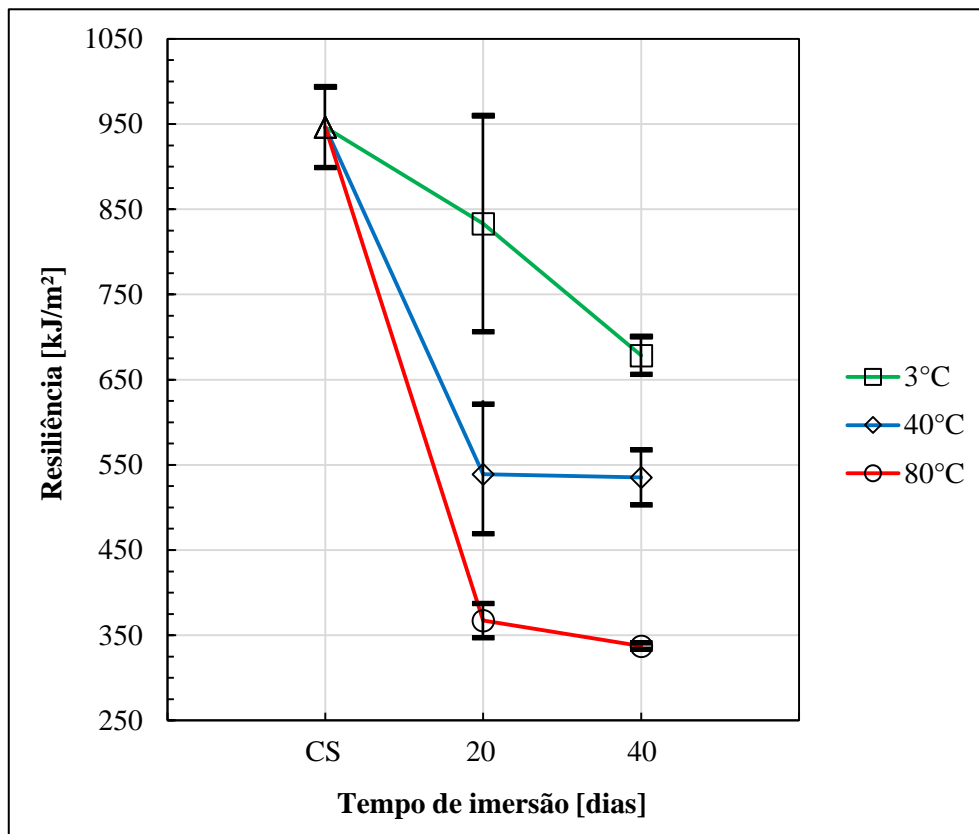
Na Figura 4.10 encontra-se ilustrado o dano causado nos provetes após a realização do ensaio de impacto transversal. O mecanismo de dano observado nas diversas situações pode explicar a diferença nos valores obtidos. Na comparação das fotografias, observa-se que na região de fratura dos provetes existe maior degradação da matriz para a temperatura de 80°C, criando desta forma maior espaçamento entre as várias camadas, enquanto que, na temperatura de 3°C, a região de fratura apresenta uma melhor união entre as diversas camadas e portanto a degradação mostra-se menor. Assim, no caso dos 80°C verifica-se a ocorrência de várias zonas com separação fibra-matriz, bem como de diversas camadas sujeitas a delaminações. Estes mecanismos de dano são muito mais predominantes para os 80°C do que para os 3°C.



**Figura 4.10.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto transversal após degradação para 60 dias de imersão e nas diferentes temperaturas: a) 3°C e b) 80°C.

#### **4.2.2. Ensaio de impacto longitudinal**

Relativamente à resistência ao impacto em tração, a Figura 4.11 apresenta a evolução do valor médio da resiliência em função da temperatura da água e tempo de exposição.



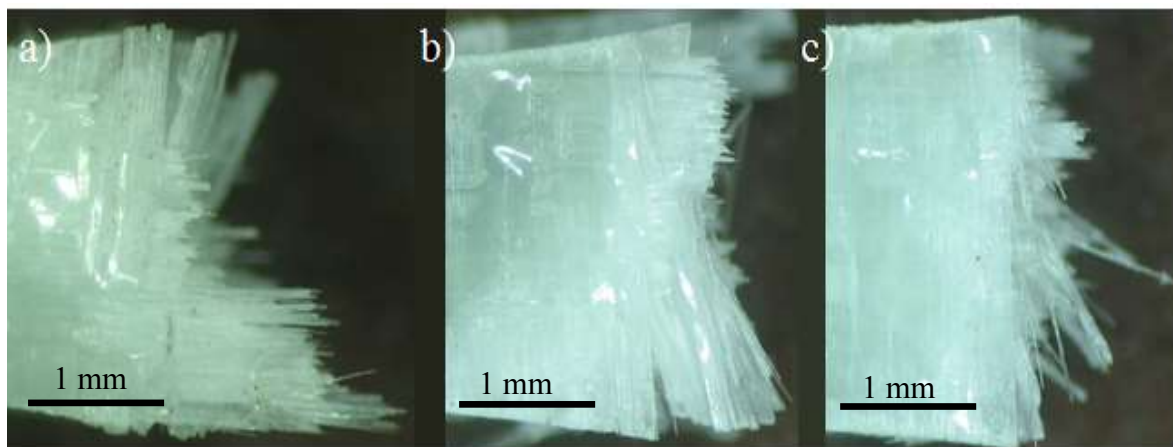
**Figura 4.11.** Gráfico comparativo dos valores de resiliência obtidos no ensaio de impacto longitudinal entre as várias temperaturas e diferentes dias de imersão.

Da referida figura observa-se, independentemente do valor da temperatura, uma redução da resiliência com o tempo de exposição. No entanto, a maior degradação surge para as temperaturas mais elevadas. Por exemplo, para os 40 dias de imersão e face aos valores obtidos para os provetes de controlo, a resiliência diminui na ordem dos 28%, 43% e 64% para as temperaturas de 3°C, 40°C e 80°C, respetivamente. De notar que para os 20 dias de imersão a 3°C e 40°C existe uma larga dispersão de resultados, não se observando nenhuma tendência do valor médio.

Este andamento era espectável e vem de encontro ao explicado ao longo deste trabalho. De acordo com [37], [38] a presença de humidade nos compósitos, devido à capacidade da matriz polimérica em absorver água, pode afetar significativamente as propriedades mecânicas do compósito, as quais podem ainda ser degradadas devido ao aumento da temperatura, como se observa na Figura 4.11. Quanto maior o tempo de imersão mais efeito tem a presença de água e da temperatura, o que confirma aos resultados determinados. No que diz respeito à resposta ao impacto, estes provetes degradados apresentam-se muito frágeis após introduzidos em ambiente higrotérmico, diminuindo em

grande escala a sua resistência ao impacto longitudinal para o caso das temperaturas mais elevadas.

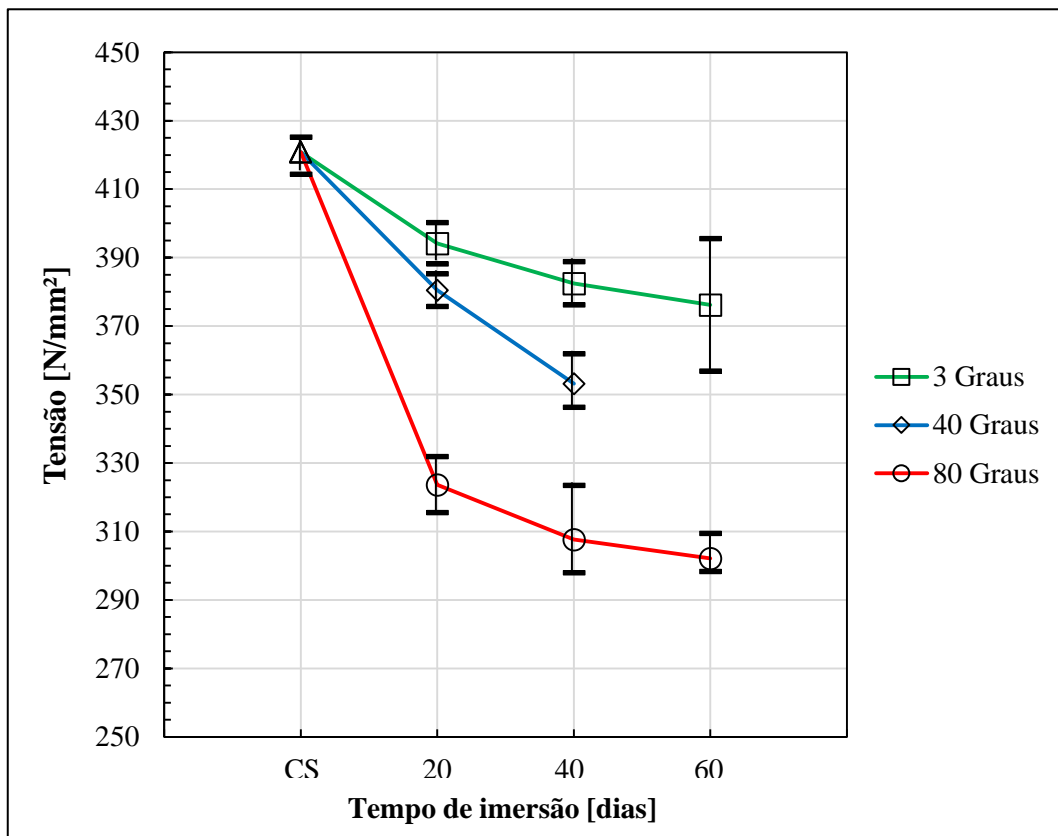
A Figura 4.12 ilustra o dano que surge nos provetes para cada tipo de condicionamento imposto. Em todas as figuras se verifica a ocorrência dos mecanismos de dano expostos ao longo do presente estudo: rotura da matriz; fissura de fibras; separação fibra-matriz e delaminações. Para a situação de 80°C é possível observar-se que o provete apresenta em todo ele uma zona totalmente esbranquiçada que pode corresponder às alterações da matriz e das fibras, não reversíveis para tempos de exposição mais longos e temperaturas mais elevadas [17], isto é a rotura total de matriz. Juvandes [20] observou que a temperatura e o tempo de exposição afetam significativamente a rigidez das resinas epóxicas, a qual decresce com o aumento da temperatura e do tempo, o que é confirmado por Huang e Sun [26], e está de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho.



**Figura 4.12.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de impacto longitudinal após degradação para 40 dias de imersão e para diferentes temperaturas: a) 3°C, b) 40°C e c) 80°C.

### 4.2.3. Ensaio de Tração

Os valores da tensão de rotura encontram-se ilustrados na Figura 4.13 em termos de valores médios, representando as bandas com os respetivos valores máximos e mínimos observados para cada condição ensaiada.

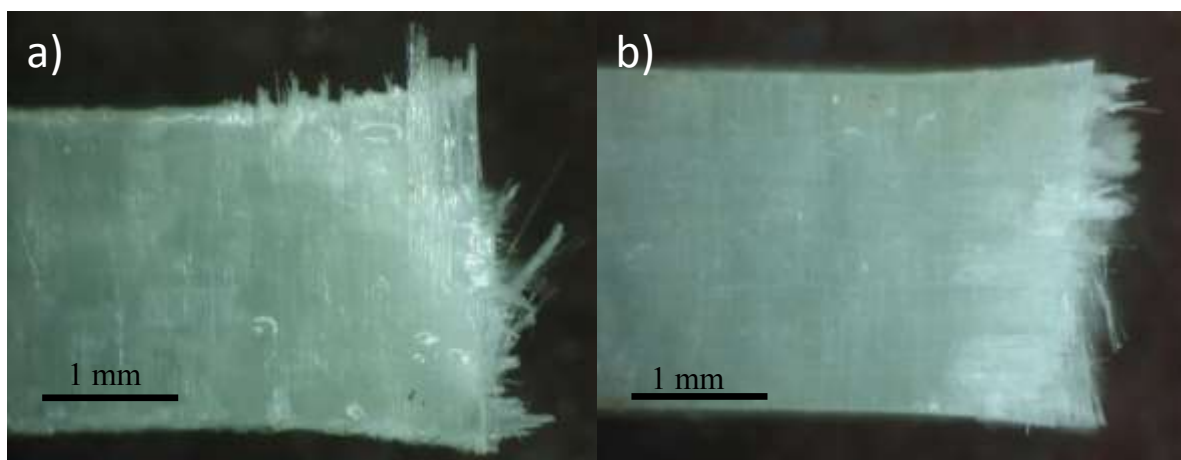


**Figura 4.13.** Gráfico comparativo dos valores da tensão de rotura obtidos no ensaio de tração entre as várias temperaturas e diferentes dias de imersão.

Independentemente da temperatura, é observada uma diminuição gradual da tensão de rotura com o tempo de exposição. O valor mais baixo ocorre para os provetes submetidos a 80°C durante 60 dias, onde a tensão cai na ordem dos 28% em relação aos provetes de controlo. Para os 40 dias de imersão para a mesma temperatura, esta redução é de aproximadamente 27% comparativamente ao controlo. Estes valores podem indicar que após 40 dias não existe efeito, pois a redução é muito próxima e as bandas de dispersão estão umas dentro das outras. Para os provetes submetidos a 3 °C, o valor da tensão de rotura diminui aproximadamente 11%, em comparação ao controlo, após 60 dias de imersão. Finalmente, para a temperatura de 40°C observa-se que, para 40 dias, existe uma diminuição na ordem dos 16% em comparação aos provetes de controlo. O comportamento observado para 40 dias a 80°C segue o mesmo padrão do estudo realizado por Botelho *et al* [27], em que foi analisado o efeito higrotérmico nas propriedades elásticas de um compósito de fibra de vidro/epóxi. Nesse estudo os autores verificaram que após a realização do condicionamento higrotérmico nas condições de 80°C e 90% de humidade relativa e no

período de exposição de 6 semanas, as amostras apresentaram um decréscimo na resistência à tração de aproximadamente 22%, em comparação com as amostras de teste.

A Figura 4.14 ilustra o modo de dano observado nos provetes após realização do ensaio de tração, em que a Figura 4.14 a) e b) apresenta o dano nos provetes imersos em água durante 60 dias nos quais foram submetidos às temperaturas de 3°C e 80°C. Os mecanismos de dano observados na Figura 4.14 são semelhantes ao descrito no ponto anterior.



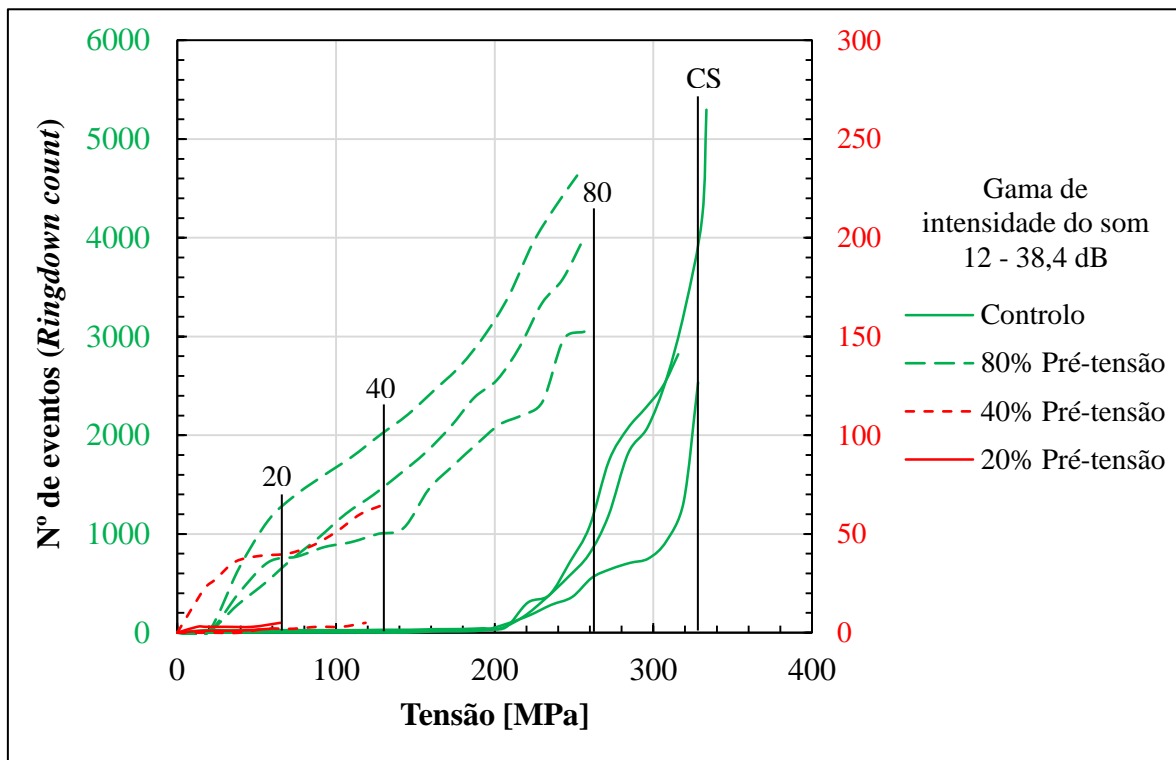
**Figura 4.14.** Visualização da rotura dos provetes no ensaio de Tração: a) 60 dias de imersão à temperatura de 3°C; b) 60 dias de imersão à temperatura de 80°C.

### 4.3. Efeito do pré-dano na resistência ao impacto

O presente estudo tem como objetivo avaliar a resistência ao impacto dos compósitos laminados de vidro/epóxi previamente sujeitos a uma pré-carga de tração. Para tal, foram aplicados valores de carga na ordem dos 20%, 40% e 80% da tensão de rotura do laminado. Para avaliar os danos introduzidos, os ensaios foram monitorizados pela técnica da emissão acústica.

Na Figura 4.15 encontra-se representado o gráfico da tensão em função do número de eventos (*RingDown Counts*) que ocorrem na gama de intensidade entre os 12 e os 38,4 dB.





**Figura 4.15.** Gráfico da tensão obtida em tração em função do número de eventos obtido por EA.

Para os valores de 20% de pré-tensão, o número de eventos é relativamente baixo e está relacionado a ocorrências de baixa amplitude. Como referido anteriormente [29], [30], eventos de baixa amplitude encontram-se associados à fissuração e deformação plástica da matriz, propagação de fendas e à descoesão da interface fibra-matriz. No caso dos provetes submetidos a valores de 40% de pré-tensão, o número de eventos aumenta, mas é na gama dos 80% de pré-tensão que ocorrem os eventos com os níveis de intensidade mais elevados associados à rotura das fibras [29], [30].

O efeito do pré-dano na resistência ao impacto longitudinal encontra-se ilustrado na Figura 4.16 em termos da resiliência.

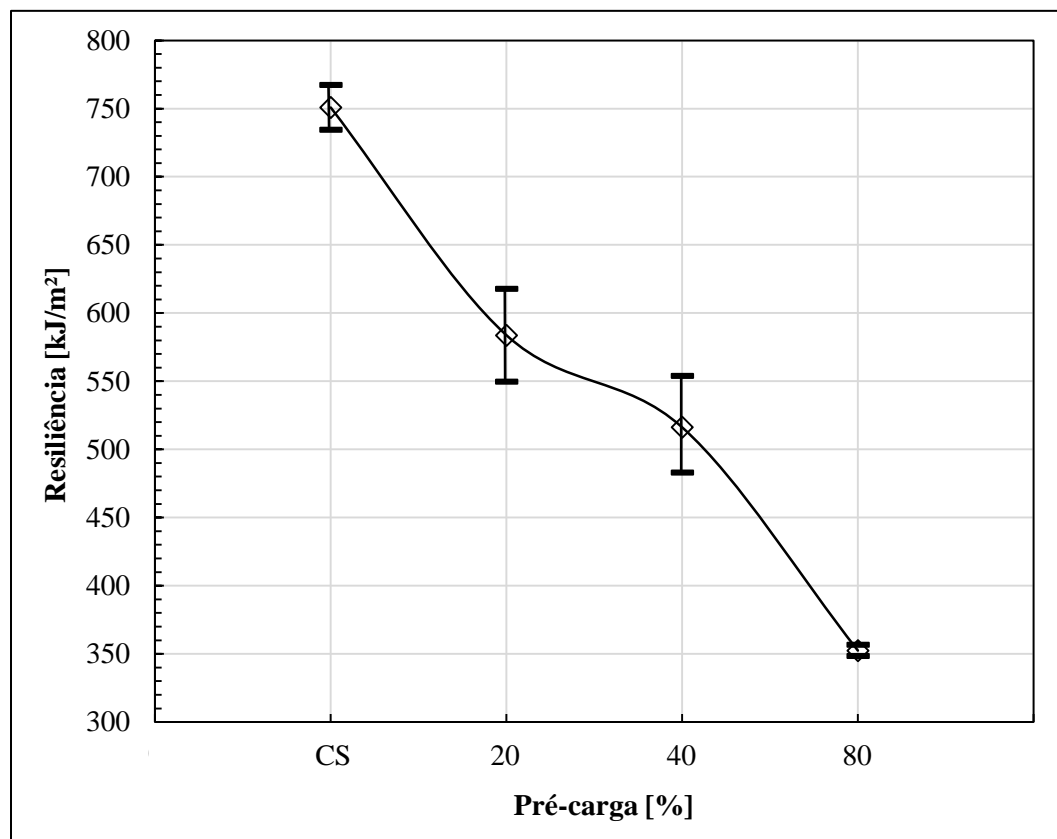


Figura 4.16. Gráfico comparativo dos valores de resiliência nos provetes pré-tensionados e controlo.

Verifica-se que os provetes com pré-dano apresentam valores de resiliência muito inferiores aos provetes de controlo, conforme seria de esperar. Os provetes sujeitos a 20%, 40% e 80% de pré-tensão, apresentam um decréscimo do valor de resiliência de aproximadamente 22%, 31% e 53%, respetivamente, face aos provetes de controlo. O valor obtido, por exemplo, para os provetes sujeitos a uma pré-tensão de 80% atinge metade do valor médio observado para os provetes de controlo. Na Figura 4.16 também se observa uma maior dispersão de resultados para os 20% e 40% de pré-tensão, sendo que no caso dos 80% de pré-tensão este comportamento já não acontece, e muito provavelmente já ocorreu a rotura das fibras antes de ser atingido este valor.

---

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo apresentam-se todas as conclusões retiradas a partir da análise dos resultados, sendo, seguidamente, apresentadas propostas para futuros trabalhos no domínio desta dissertação.

### 5.1. Conclusões

Para o efeito da sequência de empilhamento, os resultados obtidos a partir dos diferentes ensaios experimentais permitem concluir o seguinte:

- A resistência ao impacto transversal é fortemente influenciada por este parâmetro geométrico. O laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  apresenta o valor mais baixo, aproximadamente 28%, comparando com o laminado  $[0_2,90_2]_{2s}$ , enquanto nas sequências  $[0,90]_8$  e  $[0_2,90_2]_{2s}$  os valores observados diferem em apenas 3%;
- A resistência ao impacto longitudinal também é afetada, mas, neste caso, o laminado  $[0,90]_8$  apresenta o melhor desempenho, seguindo-se o laminado  $[0_2,90_2]_{2s}$  com uma diferença próxima dos 12%. O pior caso está associado ao laminado  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  que exhibe um valor de cerca de 21% em comparação com o laminado com melhor desempenho;
- A resistência à tração apresenta um comportamento muito semelhante ao observado para a resistência ao impacto longitudinal, sendo que os laminados  $[0_2,90_2]_{2s}$  e  $[0_2,45_2,-45_2,90_2]_s$  mostram valores inferiores de, aproximadamente, 6% e 22%, respetivamente, em comparação ao laminado  $[0,90]_8$ .

No estudo do efeito higrotérmico com diferentes tempos de exposição, conclui-se que:

- A resistência ao impacto transversal e longitudinal, assim como a resistência à tração, é fortemente afetada pelo aumento da temperatura e tempo de imersão;

- A resistência ao impacto transversal apresenta um decréscimo para 60 dias a 3°C e para 60 dias a 80°C, de respetivamente 18% e 37%, em comparação ao valor de controlo.
- No caso da resistência ao impacto longitudinal, este apresenta valores inferiores para 40 dias a 3°C, 40°C e 80°C, de respetivamente 28%, 43% e 64%, comparativamente ao valor de controlo;
- A resistência à tração patenteia valores para 60 dias a 3°C e para 60 dias a 80°C, de respetivamente 11% e 28%, relacionando com os valores de controlo. No caso dos 40 dias a 40°C o valor da resistência diminui em relação ao controlo cerca de 16%.

No caso do pré-dano, pode-se concluir:

- Quanto maior é o valor da pré-tensão, menor é a resistência residual ao impacto. Nos provetes com 20%, 40% e 80% de pré-tensão, a resiliência é, respetivamente, cerca de 22%, 31% e 53%, em comparação ao valor obtido para os provetes de controlo;
- A emissão acústica revela-se eficaz na avaliação dos pré-danos introduzidos.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

De modo a dar seguimento ao estudo apresentado nesta dissertação são sugeridas algumas propostas para trabalhos futuros:

1. Realização de ensaios de impacto transversal, longitudinal e ensaio de tração, em provetes degradados para 40°C e 80°C, nos diversos períodos de imersão e visualização do dano com recurso ao SEM (Microscópio eletrónico de varrimento).
2. Realização do estudo presente nesta dissertação com compósitos laminados constituídos por outro tipo de fibras e matriz, de forma a se poder comparar os resultados obtidos.
3. Simulação numérica do efeito higrotérmico avaliado no presente estudo.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. D. J. Callister, *Ciência e Engenharia dos Materiais*. 2008.
- [2] A. M. F. M. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10–19, 2009.
- [3] R. Nascimento, “Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes,” Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [4] F. F. Herter, “Desempenho De Compósitos Tri-Componente Epóxi/Fibra De Vidro/Hidróxidos Duplos Lamelares,” Trabalho de diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [5] L. Juvandes, “Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP,” Relatório no âmbito de Licenciatura em Engenharia Civil, DEC-FEUP, 2002.
- [6] N. Veiga, “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica , reforçados com fibras de juta INEGI,” Dissertação de Mestrado, DEM-FEUP, 2014.
- [7] T. Nogueira, “Estudo da influência do efeito do meio ambiente na resistência ao impacto de laminados de vidro epóxico,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2013.
- [8] S. Mayer, G. M. Cândido, and M. C. Rezende, “Influência do condicionamento ambiental na resistência à tração de compósitos de carbono/epóxi reparados,” *Polímeros*, vol. 13, no. 3, pp. 147–153, 2003.
- [9] G. M. Cândido, S. F. M. Almeida, and M. C. Rezende, “Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas,” *Polímeros*, vol. 10, no. 1, pp. 31–41, 2000.
- [10] P. Jalopnik, “Como a Lamborghini constrói seu carro mais avançado tecnologicamente,” pp. 1–14, 2011.
- [11] S. C. R. Furtado, “Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo,” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- [12] D. S. da C. Santos, “Estudo do impacto a baixa velocidade em compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2012.
- [13] L. Neves, “Efeito das soluções cimentícias na resposta ao impacto de laminados vidro/epóxico,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2015.
- [14] L. Ferreira, “Avaliação do dano em compósitos laminados devido a impactos de baixa velocidade,” Dissertação de Doutorado, DEM-UC, 2006.
- [15] D. Dias, “Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico/fibra de vidro, com camadas de cortiça,” Dissertação de Mestrado,

DEM-FEUP, 2009.


- [16] L. Guimarães, “Compressão de placas compósitas após submetidas a impacto a baixa velocidade,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2010.
- [17] J. A. P. Cunha, M. L. Costa, and M. C. Rezende, “Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono / Epóxi Modificada,” vol. 16, pp. 193–201, 2006.
- [18] A. Campos, “Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos,” Dissertação de Mestrado, UBI, 2012.
- [19] J. P. R. P. Pereira, “Caracterização de Reforços Compósitos Submetidos a Impacto e Fogo,” Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2014.
- [20] L. Juvandes, “Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de ‘CFRP,’” Dissertação de Doutorado, DEC-FEUP, 1999.
- [21] S. V. Canevarolo Jr., *Ciência dos Polímeros - Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2006.
- [22] M. L. Costa, S. F. M. De Almeida, and M. C. Rezende, “Efeito Higrotérmico No Comportamento Dinâmico-Mecânico E Na Interface De Compósitos Poliméricos,” *Congr. Bras. Eng. e Ciência dos Mater.*, pp. 1685–1691, 2002.
- [23] V. Vivas, “Influência da Degradação Ambiental no Comportamento Mecânico e Balístico de Compósitos Produzidos com Fibra de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular,” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro, 2013.
- [24] R. Carvalho, “Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxi sujeitos a soluções cimentícias,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2015.
- [25] M. C. M. de Faria, “Avaliação do Efeito Higrotérmico nas Propriedades Mecânicas de Compósitos de PPS/Fibras Contínuas,” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, 2008.
- [26] G. Huang and H. Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1647–1650, 2007.
- [27] E. C. Botelho, M. L. Costa, L. C. Pardini, and M. C. Rezende, “Efeito do condicionamento higrotérmico nas propriedades elásticas de um compósito de fibra de vidro/epóxi,” pp. 1051–1052.
- [28] A. G. de Magalhães, “Aplicação das técnicas de emissão acústica e radiografia na caracterização do dano produzido por fluência em juntas de materiais compósitos sujeitas a diferentes condições ambientais,” Dissertação de Doutorado, DEM-FEUP, 1999.
- [29] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. A. Neto, and J. M. Cirne, “Residual impact strength of carbon/epoxy laminates after flexural loadings,” *Compos. Struct.*, vol. 146, pp. 69–74, 2016.
- [30] P. N. B. Reis, J. A. M. Ferreira, and M. O. W. Richardson, “Fatigue damage

- 
- characterization by NDT in polypropylene/glass fibre composites,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 18, no. 5, pp. 409–419, 2011.
- [31] L. C. Pardini, F. Levy Neto, and B. McEnaney, “Modelling of mechanical properties of CRFC composites under flexure loading,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 203–216, 2000.
- [32] D. A. Papargyris, X. Spiliotis, A. D. Papargyris, and N. Ktiria, “Comparison of acoustic emission produced during bending of various oxide ceramic and short fiber oxide ceramic matrix composites,” *J. Acoust. Emiss.*, vol. 28, pp. 246–255, 2010.
- [33] “INSTRUCTIONS for USE and MAINTENANCE - CEAST 9000 Series Pendulum Impact Systems.” .
- [34] L. Reis and M. de Freitas, “Damage growth analysis of low velocity impacted composite panels,” *Compos. Struct.*, vol. 38, no. 1–4, pp. 509–515, 1997.
- [35] R. L. King, *Fibre-reinforced composites materials, manufacturing and design*, 3rd ed. 2008.
- [36] A. K. Mohanty, “Macromolecular Materials and Engineering,” vol. 276/277, pp. 1–24, 2000.
- [37] D. Hull, “Fractography observing, measuring and interpreting fracture surface topography,” *Cambridge Univerty Press*, 1999.
- [38] C. T. Herakovich, *The what and the why of fibrous composites, Mechanics of fibrous composites. John Wiley & Sons Inc, 1st edition, New York.* 1998.





# ANEXO A

 **INSTRON**

### 14. TABLES

#### 14.1 EQUIPMENT FOR CHARPY TYPE TESTS

CHARPY TEST ON POLYMERS

Standard	Specimen w x h (mm)		Specimen Length (mm)	Span <sup>(1)</sup> s (mm)	Radius R (mm)	Shoulder	Impact speed (m/s)	Support	Notch alignment device	Side alignment device	Hammers	Hammers complete with instrumental striker
	1	2										
ISO 179 BS 2762-359	4 x 10	80	80	62	1	7610.130	2,9	7610.101 (or 7610.103)	7610.111 (or 7610.113)	7610.121	7600.065 (0.5J)	7601.005.1 (5J - 1.5kN) 7601.005.2 (5J - 4.5kN)
	10 x 4	80	80	62	1	7610.131						
	15 x 3	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.140	7600.001 (1J)						
	10 x 3	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.145	7600.002 (2J)						
DIN 53463 DIN 53753	3 x 15	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.150	7610.155	3,8	7610.102 (or 7610.103)	7610.112 (or 7610.113)	7610.122	7600.004 (4J)	7601.025.1 (25J - 1.5kN) 7601.025.2 (25J - 4.5kN)
	3 x 10	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.155							
	4 x 6	50	50	42	1						7610.180	
	10 x 15	120	120	72	1						7610.181	
DIN 53463 DIN 53753	4 x 10	80	80	62	1	7610.130	3,8	7610.102 (or 7610.103)	7610.112 (or 7610.113)	7610.122	7600.007 (7.5J)	7601.050.1 (50J - 1.5kN) 7601.050.2 (50J - 4.5kN)
	10 x 4	80	80	62	1	7610.131						
	15 x 3	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.140	7600.015 (15J)						
	10 x 3	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.145	7600.025 (25J)						
DIN 53463 DIN 53753	3 x 10	33 - 39 - 75	18 - 24 - 60	1	7610.155	7610.180	3,8	7610.102 (or 7610.103)	7610.112 (or 7610.113)	7610.122	7600.050 (50J)	7601.050.1 (50J - 1.5kN) 7601.050.2 (50J - 4.5kN)
	4 x 6	50	50	42	1						7610.180	
DIN 53463	10 x 15	120	120	72	1	7610.181	3,8	7610.102 (or 7610.103)	7610.112 (or 7610.113)	7610.122	7600.060 (60J)	7601.060.1 (60J - 1.5kN) 7601.060.2 (60J - 4.5kN)
	15 x 10	120	120	72	1	7610.182						

(1): distance between the supports of the specimen

Page 120 - CEAST 9050 - Instructions for Use and Maintenance 7611.000MN1r ed. 5 rev. 1

Figura A.1. Tabela com dimensões dos provetes para o ensaio de impacto transversal.

