



Project

Master in Product Design Engineering

***Fabrico e maquinação de compósitos de matriz
polimérica com fibras curtas de carbono***

João Miguel Hortas Cavaleiro

Leiria, *Março* de 2018



Project

Master in Product Design Engineering

***Fabrico e maquinação de compósitos de matriz
polimérica com fibras curtas de carbono***

João Miguel Hortas Cavaleiro

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Março* de 2018

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Dedico este trabalho às duas pessoas que mais me apoiaram, apoiam e apoiarão na minha vida, às duas pessoas que sem a sua ajuda, motivação, esforço, compreensão e dedicação, o fim deste ciclo não seria possível. Dedico assim este trabalho aos meus pais.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Com este documento, encerro mais um ciclo da minha vida. Um ciclo exigente, mas que não seria possível sem a ajuda de excelentes pessoas que estiveram ao meu lado durante este percurso.

Começo por agradecer aos meus pais por me terem proporcionado esta experiência de aprendizagem e crescimento, assim como pelo seu apoio incondicional aos projetos que me proponho.

Agradeço aos amigos que me apoiaram e que muitas vezes me deram uma palavra de motivação para encerrar este ciclo, com um carinho especial pelo meu colega de curso e amigo Júlio Pereira que tanto me motivou e ajudou no meu percurso académico e em particular neste trabalho.

Agradeço ao meu coordenador científico e amigo Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, que com o seu vasto conhecimento e amizade me ajudou nesta “caminhada” académica e em particular neste trabalho.

À empresa Procotex, que desde o projeto de licenciatura, se mostrou disponível para ajudar no fornecimento do material, com um especial agradecimento ao Sr. Dieter Henau pela sua atenção e disponibilidade.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular à Escola Superior de Tecnologia e Gestão por disponibilizar os meios necessários à realização do presente trabalho e aproveito para deixar um especial agradecimento à Eng. Fernanda Carvalho e à Eng. Maria Paulino, por todo o conhecimento, ajuda e amizade.

Ao Sr. Berto Lino por me facilitar o acesso à maquinaria necessária para a elaboração de algumas das tarefas deste trabalho.

E por fim a todos os que entraram e saíram da minha vida e que de alguma forma me ajudaram a crescer e contribuíram para ser uma pessoa melhor.

A todos, um bem-haja!

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Os compósitos em fibra de carbono, são há muito tempo utilizados nas mais diversas aplicações e processados das mais diversas formas. Estes, são detentores de propriedades mecânicas bastante avançadas, com excelentes prestações e com provas dadas da sua aplicabilidade, visto estarem presentes nas mais diversas indústrias, desde a indústria aeroespacial, até às simples aplicações estéticas, passando pelas indústrias aeronáutica, automóvel, construção, entre outras, fazendo deste tipo de materiais, materiais de elevada performance. Falando das suas propriedades, podemos distinguir como principais a elevada rigidez e resistência mecânica, assim como, o seu baixo peso.

Tendo um enorme leque de possibilidades de exploração, este material (fibras de carbono) tem sido alvo de diversos estudos para novas formas de manuseamento, processamento e aplicação. A título de exemplo, este trabalho é um dos estudos que visa mostrar outro tipo de processamento das fibras de carbono, sendo elas trabalhadas na forma de fibras curtas.

Neste estudo foram processados e caracterizados materiais compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras curtas de carbono com vários comprimentos de fibra diferentes (2mm, 4mm e 6mm). Estes compósitos foram processados por moldação por compressão e com diversas frações mássicas (15%, 30% e 45%).

Os materiais processados foram caracterizados em termos das suas propriedades físicas e mecânicas, tais como a densidade, tensão e módulo máximos à flexão, influência da absorção de água e exposição à radiação ultravioleta quando solicitado a forças de flexão, tenacidade à fratura e de dano no que se refere à maquinação por furação.

Palavras-chave: Materiais compósitos, fibras curtas, fibras de carbono, resina epóxi, propriedades mecânicas

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Carbon fibers composites have long been used for a large variety of applications and processed in the most various forms. Holders of quite advanced mechanical properties, with excellent performances and applicability proven, having their presence in several areas, from aerospace industry to simple aesthetic applications, passing through aeronautics, automotive, and construction industries, among others, making these, high performance materials. Speaking of which, we can distinguish as main properties its high stiffness and mechanical strength, as well as, low weight.

Having a wide range of possibilities to exploit, this material (carbon fiber), has been the subject of several studies for new forms of handling, processing and application. For instance, this work is one of the studies, which sets out to demonstrate another kind of carbon fiber processing, being worked in the form of short fibers.

In this study, epoxy matrix composite materials, reinforced with short carbon fibers with different lengths (2 mm, 4 mm and 6 mm) were processed and characterized. These composites were processed by casting compression and with several mass fractions (15%, 30% and 45%).

The processed materials have been characterized in terms of their physical and mechanical properties, such as density, tension and maximum bending module, influence of water absorption and ultraviolet radiation exposure when prompted to bending forces, fracture toughness and damage in which concerns to machining by drill.

Keywords: Composite materials, short fibers, carbon fibers, epoxy resin, mechanical properties

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama dos tipos de polímeros[1]	3
Figura 2 - Tipos de materiais compósitos[9].....	6
Figura 3 – Gráfico de resistência mecânica versus fração e orientação das fibras nos compósitos reforçados com fibras [17].	8
Figura 4 - Moldação manual [28].....	13
Figura 5 - Moldação manual por projeção [29]	14
Figura 6 - Moldação manual assistida por vácuo: a) Esquema de montagem de vácuo (adaptado) [30]; b)Exemplo de saco de vácuo	15
Figura 7 - Processo de RTM [34].....	17
Figura 8 - Equipamentos de auxílio no processamento de compósitos: (A) Autoclave, (B) Hidroclave [36]	18
Figura 9 - Principais fatores que afetam a resistência mecânica dos compósitos reforçados com fibras curtas [40]	19
Figura 10 - (Esq.) Braço de suspensão do Lamborghini Sesto Elemento construído em “Forged Composite” [41]; (Drt.) Lamborghini Sesto Elemento [42].....	20
Figura 11 - Braço de suspensão construído com fibras curtas de carbono, já com a instalação da rótula e respectivos casquilhos [41].	21
Figura 12 - Fibras curtas de carbono (6mm, 4mm e 2mm).....	23
Figura 13 - Fibras "agrupadas"/sem tratamento de dispersão	24
Figura 14 - Teste de dispersão de fibras com água destilada, acetona, diclorometano e eter	24
Figura 15 – Solventes e fibra já quantificados (Esq.); Mistura no equipamento de ultrassons (Drt.)	25
Figura 16 - Molde de compressão metálico (Esq.); Prensa hidráulica para compressão do molde (Drt.)	26
Figura 17 - Placas de matriz epóxi reforçadas com fibras curtas.....	26
Figura 18 - Dimensões em milímetros dos provetes de flexão e fratura (Esq.); Dimensões em milímetros do entalhe dos provetes de fratura (Drt.)	27
Figura 19 – (Esq.) Máquina de corte de provetes; (Drt.) Maquinação do entalhe para os provetes de fratura.....	27

Figura 20 - Esquema de furação das placas de compósito de fibras curtas de carbono	28
Figura 21 - Balança hidrostática e respetivo kit para determinação de densidades; Tabela de valores padrão da densidade da água.....	29
Figura 22 - Kit de determinação de densidades	29
Figura 23 - Máquina servo-mecânica Zwick Z100.....	31
Figura 24 - Provetes imersos em água destilada.....	33
Figura 25 - Esquema da câmara desenvolvida para a realização dos ensaios de radiação UV; Provetes no interior da câmara de radiação UV	33
Figura 26 - Máquina Zwick Z100 com os acessórios para flexão utilizados nos ensaios de fratura	34
Figura 27 - Esquema de aplicação de carga do ensaio de tenacidade à fratura	35
Figura 28 - Determinação da complacência [47].....	36
Figura 29 - Máquina Triton Tritec 2000 com acessórios para ensaios de flexão em três pontos	37
Figura 30 - (Esq.) Broca metal-Duro DIN338N utilizada na maquinação das placas em material compósito; (Dir.) Esquema da Broca Izar [49]	38
Figura 31 - (Esq.) Esquema da área do furo, da área danificada e da linha de contorno da área danificada; (Dir.) Pormenor da placa com as zonas danificadas (L=4mm Wf =45% Saida).....	39
Figura 32 - Áreas de dano medidas com recurso ao programa Autodesk Inventor (L=4mm, Wf =30% Entrada)	40
Figura 33 - Valores da densidade experimental e teórica (lei das misturas)	42
Figura 34 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=2mm	44
Figura 35 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=4mm	45
Figura 36 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=6mm	46
Figura 37 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina	49
Figura 38 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2 e Resina.	49
Figura 39 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=2mm.....	50
Figura 40 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=2mm.....	50
Figura 41 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=2mm.....	50

Figura 42 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina	53
Figura 43 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4 e Resina.....	53
Figura 44 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=4mm.....	54
Figura 45 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=4mm.....	54
Figura 46 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=4mm.....	54
Figura 47 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6mm e Resina	57
Figura 48 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6 e Resina.....	57
Figura 49 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=6mm.....	58
Figura 50 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=6mm.....	58
Figura 51 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=6mm.....	58
Figura 52 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina.	61
Figura 53 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina.	61
Figura 54 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm.....	62
Figura 55 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm.....	62
Figura 56 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm.....	62
Figura 57 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina.	65
Figura 58 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina.	65
Figura 59 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=4mm.....	66

Figura 60 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 20 dias de exposição a radiação UV para L=4mm	66
Figura 61 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 30 dias de exposição a radiação UV para L=4mm	66
Figura 62 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6mm e Resina.	69
Figura 63 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6mm e Resina.	69
Figura 64 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=6mm	70
Figura 65 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 20 dias de exposição a radiação UV para L=6mm	70
Figura 66 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 30 dias de exposição a radiação UV para L=6mm	70
Figura 67 - Valores K_Q versus fração mássica para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm, L=4mm, L=6mm e Resina.	72
Figura 68 - Valores G_Q versus fração mássica para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm, L=4mm, L=6mm e Resina.	72
Figura 69 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=2mm e para a resina.	74
Figura 70 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=2mm e para a resina.	74
Figura 71 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=4mm e para a resina.	75
Figura 72 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=4mm e para a resina.	76
Figura 73 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=6mm e para a resina.	77
Figura 74 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=6mm e para a resina.	77
Figura 75 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de resina	79

Figura 76 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 15% de fração de fibra	80
Figura 77 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 30% de fração de fibra	82
Figura 78 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 45% de fração de fibra	83
Figura 79 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 4mm com 15% de fração de fibra	85
Figura 80 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 4mm com 30% de fração de fibra	86
Figura 81 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 4mm com 45% de fração de fibra	87
Figura 82 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 15% de fração de fibra	89
Figura 83 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 30% de fração de fibra	90
Figura 84 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 45% de fração de fibra	91

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Lista de frações em peso de fibras curtas de carbono e resina.....	22
Tabela 2 - Valores da densidade experimental e teórica (lei das misturas), desvio padrão e diferença em percentagem dos materiais processados.....	41
Tabela 3 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm	43
Tabela 4 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm	45
Tabela 5 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm	46
Tabela 6 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm	48
Tabela 7 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm	52
Tabela 8 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm	56
Tabela 9 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm	60
Tabela 10 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm	64
Tabela 11 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm	68
Tabela 12 - Valores de K_Q e G_Q versus fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono (L=2mm, L=4mm e L=6mm) e resina	71

Tabela 13 - Valores de Storage Modulus, Loss Modulus e Tan Delta versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm 73

Tabela 14 - Valores de Storage Modulus, Loss Modulus e Tan Delta versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm 75

Tabela 15 - Valores de Storage Modulus, Loss Modulus e Tan Delta versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm 76

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

Acrónimo	Descrição
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
mm	Milímetros
L	Comprimento
d	Diâmetro
°C	Temperatura (graus Celcius)
%	Porcentagem
bar	Unidade de pressão
m	Metros
cm	Centímetros
Kg/m ³	Densidade - quilograma por metro cúbico
$\sigma_{\text{max.flexão}}$	Tensão máxima à flexão [MPa]
kg	Quilograma
ρ	Densidade do corpo [g/cm ³]
M	Momento máximo de flexão [Nmm ⁻²]
Y	Distância do eixo à fibra externa [mm]
I	Momento de Inercia [mm ⁴]
P	Carga aplicada [N]
l	Distância entre as bases de apoio [mm]
b	Largura do provete [mm]
h	Altura do provete [mm]
$E_{\text{flexão}}$	Módulo de elasticidade à flexão [MPa]
y	Deslocamento em y [mm]
Tg	Temperatura de transição vítrea [°C]
N	Newton
Wt; Wf	Fração Mássica
r.p.m.	Rotações Por Minuto

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SIGLAS	XX
ÍNDICE	XXII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura	2
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Polímeros	3
2.2. Materiais Compósitos	4
2.3. Compósitos de matriz polimérica	5
2.4. Classificação de compósitos	6
2.5. Reforços	7
2.5.1. Reforços Fibrosos	7

2.5.2.	Reforços particulados	9
2.6.	Matrizes Poliméricas	10
2.6.1.	Matrizes termoplásticas	10
2.6.2.	Matrizes termoendurecíveis	11
2.7.	Técnicas de processamento de compósitos	11
2.7.1.	Moldação Manual	13
2.7.2.	Moldação manual por projeção	14
2.7.3.	Moldação manual assistida por vácuo	15
2.7.4.	Processo de moldação por compressão	15
2.7.5.	RTM (Resin Transfer Molding)	16
2.7.6.	Equipamentos de auxílio ao processamento	17
2.8.	Compósitos de matriz epóxi com fibras curtas	19
2.8.1.	Propriedades mecânicas	19
2.8.2.	Aplicações	20
3.	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
3.1.	Materiais	22
3.1.1.	Resina Epóxi	22
3.1.2.	Fibras curtas	23
3.1.3.	Dispersão de fibras	24
3.1.4.	Técnicas de processamento utilizados	25
3.1.5.	Provetes	26
3.2.	Ensaio de caracterização física e mecânica	28
3.2.1.	Densidade	28
3.2.2.	Absorção	30
3.2.3.	Flexão em três pontos	30
3.2.3.1.	Flexão em três pontos com absorção de água	32
3.2.3.2.	Flexão em três pontos com exposição a radiação ultravioleta	33
3.2.4.	Fratura	34
3.2.5.	DMA	37
3.2.6.	Furação	38
4.	RESULTADOS	41
4.1.	Densidades	41

4.2.	Propriedades mecânicas em flexão em três pontos	43
4.2.1.	Propriedades mecânicas em flexão em três pontos <i>versus</i> absorção de água	47
4.2.2.	Propriedades mecânicas em flexão em três pontos <i>versus</i> radiação UV	59
4.3.	Fratura	71
4.4.	DMA	73
4.5.	Furação	78
4.5.1.	Resina	78
4.5.2.	Fibras curtas de carbono com L=2mm	79
4.5.3.	Fibras curtas de carbono com L=4mm	84
4.5.4.	Fibras curtas de carbono com L=6mm	88
5.	CONCLUSÕES	92
5.1.	Trabalhos futuros	94
6.	BIBLIOGRAFIA	95

1. Introdução

1.1. Motivação

Após ter elaborado o projeto final do curso de Engenharia Mecânica, relacionado com o processamento de compósitos de matriz epóxi com fibras curtas de carbono, onde os resultados não foram os mais bem conseguidos ou satisfatórios, surgiu a oportunidade de voltar a trabalhar com este tipo de materiais, mas desta vez, com um processo de processamento diferente, assim como, percentagens e comprimentos de fibra diferentes. Assim, o insucesso do passado serve de motivação para a elaboração de um novo estudo com o objetivo de obter materiais compósitos de matriz polimérica para aplicações futuras nas mais diversas indústrias.

1.2. Objetivos

O presente estudo tem por objetivo, o processamento e caracterização de um novo material compósito de matriz epóxi (SR 1500) com fibras de carbono com três comprimentos de fibra diferentes: L=2mm, L=4mm e L=6mm.

A metodologia considerada foi a criação de materiais compósitos reforçados com as fibras curtas de carbono com o recurso ao processo, anteriormente referido, de moldação por compressão.

Pretende-se com este estudo conhecer o comportamento destes compósitos, de modo a viabilizar e justificar a sua aplicação como material de engenharia capaz de satisfazer as exigências das mais diversas indústrias.

Os objetivos fundamentais deste trabalho são os seguintes:

- ✓ Determinar as propriedades mecânicas, físicas dos compósitos processados com diferentes frações mássicas de fibras curtas de carbono;
- ✓ Analisar a influência do efeito do tempo de imersão em água e, também, o feito da radiação UV nas propriedades mecânicas destes materiais compósitos processados com diferentes frações em peso de fibras de carbono.

1.3. Estrutura

Este trabalho está dividido em sete capítulos, perfeitamente definidos e destintos, isto é, este estudo inicia-se com as considerações iniciais, passando para o estado da arte, de seguida temos o capítulo dos materiais e procedimentos experimentais, de seguida, o capítulo dos resultados e por fim, as conclusões, referências e anexos.

Nas considerações iniciais podemos ficar a conhecer a motivação para o tema escolhido, assim como, os objetivos que me proponho realizar neste trabalho e a estrutura deste estudo.

No capítulo referente ao estado da arte vamos poder adquirir algumas bases para podermos compreender melhor o trabalho realizado. Teremos informação acerca de materiais, processos de fabrico, propriedades dos materiais, entre outros.

No terceiro capítulo, de materiais e procedimentos experimentais, ficamos a conhecer os materiais utilizados neste estudo, assim como, os procedimentos experimentais utilizados desde o processamento dos materiais, processos de fabrico e ensaios realizados.

No capítulo seguinte, são apresentados os resultados dos vários ensaios realizados neste trabalho, assim como, uma breve discussão dos mesmos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas deste estudo e apresentadas algumas possibilidades de trabalhos futuros que foram surgindo com o decorrer deste trabalho, que por falta de tempo e por não pertencerem aos objetivos propostos, não foram executados.

Por fim, temos o capítulo das referências, onde são referenciados todos os trabalhos consultados, que serviram de inspiração e me ajudaram a adquirir mais conhecimento para a realização deste estudo.

2. Estado da Arte

2.1. Polímeros

Os polímeros são formados por moléculas de dimensões elevadas. Estas moléculas, designadas de macromoléculas são unidades estruturais repetitivas, unidas através de ligações covalentes. Estes são obtidos através da polimerização, um processo onde os monómeros (moléculas simples) formam cadeias de modo linear ou tridimensional, através de reações químicas entre si [1].

Este tipo de materiais divide-se em dois grupos, naturais ou sintéticos como se pode ver na seguinte Figura 1:

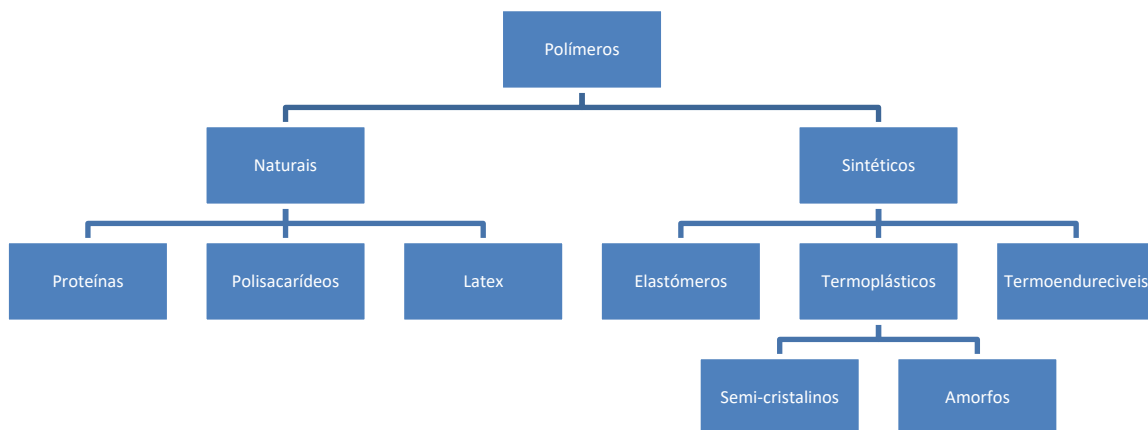


Figura 1 - Diagrama dos tipos de polímeros[1]

Focando-me no grupo de polímeros sintéticos e indo de encontro ao tema do trabalho os dois grupos mais importantes seriam os termoplásticos e os termoendurecíveis, mas não poderia falar destes sem antes definir o que são plásticos. O termo plástico é utilizado quando queremos falar de polímeros que foram alterados com aditivos, de modo a obter os requisitos para um processamento ou aplicação específica, assim sendo, são polímeros, também eles macromoleculares mas com aditivos, deixando assim de estarem no seu estado puro [1].

Os termoplásticos são materiais formados por macromoléculas (plásticos), que adotam formas específicas, quando fundem, através de aquecimento, e que retêm a forma quando arrefecidos novamente. Este procedimento pode ser repetido sem grandes perdas de propriedades [1].

Os termoendurecíveis após serem processados uma vez, não há possibilidade de reprocessamento, pois a sua polimerização ocorre através de uma reação química que é irreversível [1].

2.2. Materiais Compósitos

Na década de 1940, com o aparecimento dos compósitos mais avançados, foi possível obter benefícios em várias áreas desde a área médica à área aeroespacial, passando pela área automóvel e aeronáutica. Através da mistura e compactação de uma resina termoendurecível, com os respetivos endurecedores, e um reforço fibroso, seja ele sintético ou natural, é possível obter materiais leves e com propriedades específicas a cada tipo de aplicação. Devido a este avanço tecnológico, os processos de fabricação foram sendo desenvolvidos e aplicados à tecnologia dos compósitos de modo a obter materiais cada vez mais exigentes [2].

Motivado pelo desenvolvimento aeroespacial no período da guerra fria, onde as propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizados eram cada vez mais exigentes devido ao tipo de aplicações extremas, como por exemplo a resistência a temperaturas elevadas ($T > 1000^{\circ}\text{C}$). Neste caso as ligas metálicas, aços especiais, cumpriam este requisito específico, assim como boa resistência mecânica ($\sigma > 500\text{MPa}$) e módulo de elasticidade ($E > 100\text{GPa}$), mas tinham o “problema” de ter uma densidade elevada ($\rho = 7,8\text{ g/cm}^3$) assim como, estavam sujeitos a esforços por fluência, quando solicitados por longa duração [3]. Assim sendo, os exigentes requisitos da indústria aeroespacial, foram os responsáveis pela pesquisa de materiais mais leves, mas que ainda assim não comprometessem as propriedades mecânicas exigidas pelas aplicações dessa indústria [4].

A definição de material compósito, pode ser dada de diversas formas, embora num contexto geral, seja uma mistura de dois ou mais materiais diferentes, de modo a originar uma melhoria nas propriedades mecânicas. Tanto microscópica, como macroscopicamente, um compósito, pode ser inserido numa classe de materiais heterogêneos. São resultantes de duas ou mais fases, química e fisicamente distintas, tornando-os uma combinação racional multifásica [5].

Os compósitos, são frequentemente formados por dois tipos de componentes diferentes, as matrizes e os reforços, sendo estes respetivamente, os elementos de ligação

que têm como principal função a transferência de cargas para o(s) reforço(s), funcionando como meio de transferência de esforços e os elementos contínuos ou descontínuos de suporte de esforços, que conferem a resistência do compósito [6].

Podemos afirmar que os constituintes de um material compósito, não se misturam nem se dissolvem entre si, portanto, mantêm a sua identidade, com a possibilidade de serem caracterizados através de meios físicos [7].

2.3. Compósitos de matriz polimérica

Nos compósitos de matriz polimérica, esta é caracterizada por três principais propriedades, sendo elas, a baixa densidade, resistência mecânica e estabilidade térmica. Nestes compósitos, são incorporadas cargas ou reforços, de modo a impulsionar melhorias, entre outros, mas principalmente, na resistência mecânica, na rigidez e na tenacidade dos compósitos. Denomina-se de interface, a zona de fronteira entre matriz e reforço onde são transferidas as cargas da resina para as fibras, logo, para existirem boas propriedades mecânicas, é de extrema importância uma adesão forte e uniforme na interface. Esta adesão pode variar consoante a natureza química dos seus componentes (Resina e fibras), pois durante a fase de polimerização, podem ocorrer mudanças na estrutura molecular dos mesmos.

Quando falamos de desempenho mecânico do compósito, não nos podemos esquecer dos coeficientes de expansão térmica, que podem, em alguns casos, serem responsáveis por falhas nos componentes construídos neste tipo de material. Na construção de compósitos, temos de ter em conta os coeficientes tanto da matriz como do reforço, porque caso não sejam aproximados, durante o processo de cura, estes tendem a causar falhas, levando assim a roturas e outras causas de falha prematura [8].

2.4. Classificação de compósitos

Os materiais compósitos podem ser divididos em três categorias (Figura 2):

- Compósitos reforçados com partículas, onde o reforço tem a forma geométrica de partículas de um determinado tipo de material, ligadas entre si através de uma matriz de outro material diferente;
- Compósitos reforçados com fibras, onde o reforço é composto por materiais fibrosos (fibras de carbono, vidro, Juta, sisal, entre outros), podendo ter diversos comprimentos, ligados entre si, na maior parte dos casos, por uma matriz polimérica;
- Compósitos laminares, nesta categoria, os compósitos são estruturais e podem, ser compostos por materiais das duas categorias anteriores, estes são formados por lâminas ou camadas de diferentes materiais como é o caso dos laminados de fibras e resina, placas de contraplacado ou painéis sandwich [9].

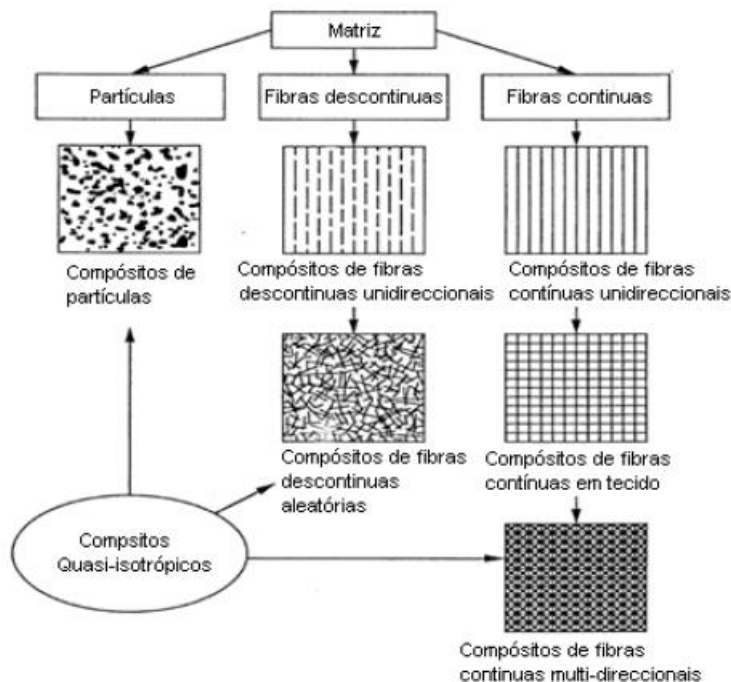


Figura 2 - Tipos de materiais compósitos[9]

2.5. Reforços

No caso dos compósitos de matriz polimérica, as principais razões para a adição de reforços ou cargas, passam pela melhoria das propriedades térmicas, físicas, mecânicas, técnicas de processamento, e eventualmente, alterar o aspeto visual da superfície. A adição destes reforços, pode também reduzir o preço do compósito, visto ser possível reforçá-lo com materiais de baixo custo [10][11].

Os reforços podem apresentar diversos tipos de distribuições na matriz, consoante a sua forma geométrica, estes podem ter a forma de fibras, laminados ou partículas, que por sua vez, podem ser classificados em unidirecionais, bidirecionais ou tridimensionais (forma geométrica) e como orgânicos ou inorgânicos (natureza química) [12]–[14].

2.5.1. Reforços Fibrosos

Uma vez que neste trabalho são utilizados reforços fibrosos, procurei aprofundar um pouco mais sobre os mesmos.

Os reforços fibrosos, de entre os mais conhecidos, as fibras de vidro, carbono e carbono/kevlar, são reforços utilizados maioritariamente para melhorar propriedades mecânicas da matriz. Quando combinados com a matriz correta, este tipo de reforços pode oferecer melhoramentos na resistência mecânica e na rigidez, assim como melhorar o comportamento a elevadas temperaturas e proporcionar uma estabilidade dimensional.

Como referido anteriormente, dentre as fibras sintéticas mais conhecidas temos as fibras de vidro e fibras de carbono, existindo ainda fibras naturais e híbridas, das quais, fibras de juta, sisal ou ráfia (Naturais) e de fibra de vidro/kevlar ou carbono/kevlar (Híbridas) [15].

Este tipo de reforço pode admitir dois tipos de formas geométricas, assim como, diversos tipos de orientações. Como visto anteriormente na Figura 2 as fibras podem ser contínuas ou descontínuas e apresentar diversos tipos de orientações, tais como, no caso das fibras contínuas, unidirecionais, bidirecionais, ou multidirecionais e no caso das descontínuas, parcialmente alinhadas ou totalmente aleatório [9].

2.5.1.1. Orientação das fibras nos compósitos

Estas orientações influenciam no comportamento deste tipo de reforço, dependendo da aplicação, a sua orientação é normalmente escolhida para suportar esforços no longo do comprimento da fibra. Assim sendo, com o aumento da fração de fibra, quer em peso, quer em volume e com o aumento do seu comprimento, podemos afirmar que irá obter melhores propriedades mecânicas. De modo a apresentar melhores valores de módulo de elasticidade e resistência mecânica, é conveniente, que na construção do compósito, o reforço fibroso seja alinhado no sentido ao qual irá ser solicitado. No caso de serem alinhadas no sentido transversal aos esforços, a prestação do compósito irá ser inferior, embora esse problema poder ser minimizado com o tipo de construção do compósito. Na sua construção o reforço é colocado por camadas e em cada camada, o mesmo é colocado de forma transversal à camada anterior. Para se ter uma ideia da influencia da orientação e da fração das fibras, podemos observar a Figura 3, que relaciona esses dados com a resistência mecânica [16].

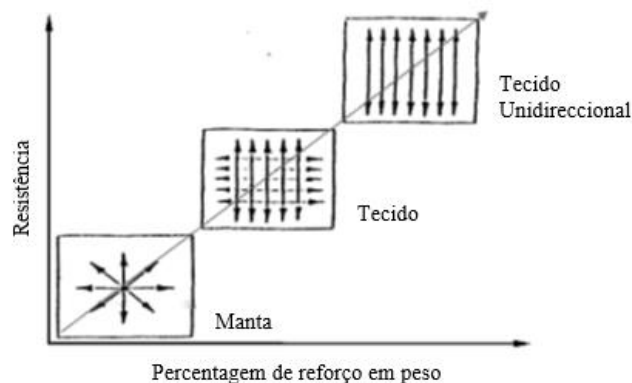


Figura 3 – Gráfico de resistência mecânica versus fração e orientação das fibras nos compósitos reforçados com fibras [17].

2.5.1.2. Fração de fibras nos compósitos

Partindo do princípio de que é o reforço que suporta as cargas aplicadas no compósito, a fração do mesmo deve de ser considerada, de modo a obter melhores prestações. Isto é, de uma forma simplista, quanto maior for a proporção de fibras utilizadas, melhor será o comportamento do compósito.

Os compósitos reforçados com uma fração de fibras superior, quando solicitados mecanicamente, transferem as cargas mais uniformemente devido ao alto teor de fibras, resultando assim numa resistência à tração e módulo de elasticidade superiores.

No entanto existem limites para o aumento da fração de fibras, pois nem sempre podemos associar aumento de fibras com o melhoramento das propriedades do compósito final. O aumento da fração de fibra deve de ter em conta uma relação com a matriz, de modo a que a matriz não perca a capacidade da correta união entre fibras, que é possível observar através de uma redução da resistência à tração [16]. Caso se verifique o contrário, pouca fração de reforço, irá ser possível observar falhas de ligação entre matriz e o mesmo, originando pontos frágeis de possível rotura [18].

2.5.1.3. Comprimentos das fibras

Este é um dos fatores que também influencia nas propriedades dos compósitos. Quando um compósito é submetido a uma carga, esta é aplicada na matriz e posteriormente transferida para o reforço, reforço este, que varia segundo o diâmetro, comprimento, orientação e fração. Podemos afirmar que os reforços fibrosos contínuos, são mais resistentes ao impacto e tem uma maior estabilidade dimensional relativamente aos reforços fibrosos descontínuos, embora estes últimos se tornem mais fáceis de processar e mais baratos [19], [20].

2.5.2. Reforços particulados

Os reforços particulados ou partículas, podem não promover um aumento das propriedades mecânicas, podendo ser apenas utilizados como cargas inertes. Este tipo de reforço pode ser utilizado como uma mistura de partículas de várias dimensões e incorporadas na matriz com propriedades físicas e químicas distintas [21].

Dois exemplos mais conhecidos deste tipo de compósitos são, o betão na área da construção, que na sua mistura composta por cimento, areia, brita, entre outros podemos identificar o cimento como matriz e as areias e britas como um reforço particulado, e o cermeto que é um material utilizado nas ferramentas de corte de aços, composto por uma

matriz metálica (níquel ou cobalto) e reforçado com partículas cerâmicas refratárias de elevada dureza [21].

Neste tipo de compósitos, a sua resistência deve-se à dispersão das partículas. Estas podem ter diâmetros que variam entre os 0,01 e 0,1 μm e apresentam propriedades de rigidez e resistência, superiores à matriz. Estes reforços têm por objetivo a redução de custos, alterar as propriedades elétricas e térmicas, assim como aumentar a rigidez do compósito, pois quando utilizados numa matriz polimérica, estes reforços são considerados aditivos ou cargas de enchimento [22]. Este tipo de reforço suporta uma fração da carga aplicada na matriz, e transferida através da mesma. Isto ocorre devido ao facto das partículas restringirem o movimento da matriz em torno de si mesmas [23].

2.6. Matrizes Poliméricas

Na construção de materiais compósitos compostos por fibras, como já foi referido anteriormente, existe um agente aglomerante, que tem como principais funções unir e proteger as fibras, conferir uma estrutura estável ao compósito e por sua vez distribuir a carga pelas fibras, a este aglomerante se dá o nome de matriz. Existem vários tipos de matrizes, tais como, cerâmicas, metálicas ou poliméricas onde a sua designação corresponde ao material utilizado. Por sua vez as matrizes poliméricas dividem-se em dois grupos: matrizes termoplásticas e matrizes termoendurecíveis [24].

2.6.1. Matrizes termoplásticas

Os compósitos com matriz polimérica termoplástica, compostos, grande parte deles, por plásticos técnicos, têm como vantagem, relativamente aos polímeros termoendurecíveis, maior resistência ao impacto e química, baixa densidade, menor capacidade de absorver e libertar humidade, maior rigidez e tenacidade e baixo custo, em virtude de, contrariamente aos termoendurecíveis, estes são formados por macromoléculas, na ordem de 20/30nm que são mantidas nas suas posições através de ligações secundárias. Ao serem aquecidos, estas ligações são quebradas momentaneamente e este material passa a ser viscoso ou mesmo líquido, de modo a poder ser trabalhado e moldado facilmente. Após ser arrefecido, esse material restabelece as suas ligações químicas e o que outrora era viscoso ou líquido passa

ao estado sólido e ganha a forma por nós aplicada, o que faz deste tipo de compósito, excelente para a injeção e termoformação. Outra das suas grandes vantagens é ser reciclável, o que não acontece nos termoendurecíveis, pois não podem ser reprocessados, mas também sofrem de uma grande desvantagem, pois não é fácil juntar reforços a este tipo de compósito, porque não é de fácil impregnação [25].

2.6.2. Matrizes termoendurecíveis

Os compósitos de matriz termoendurecível, após serem processados e curados, admitem uma forma final, impossibilitando assim, de serem processados novamente, sendo esta uma das maiores desvantagens em relação aos termoplásticos e relativamente à sua reciclagem [9].

Estes compósitos são compostos por uma estrutura tridimensional molecular de ligações cruzadas criadas após a sua polimerização, designado neste tipo de compósitos por cura. Com o aumento do número de ligações, aumenta também a sua rigidez e estabilidade térmica da matriz.

Para ocorrer a cura, algumas resinas necessitam de calor ou pressão, por outro lado, outras apenas à temperatura ambiente iniciam o seu processo de cura. Após a cura e para melhorar as suas propriedades mecânicas, pode ser efetuado um segundo tratamento designado de pós-cura a elevadas temperaturas.

Outra das vantagens deste tipo de matriz é a baixa viscosidade antes da cura, isto permite uma maior impregnação das fibras e por conseguinte mais fácil processamento [26].

2.7. Técnicas de processamento de compósitos

No processamento dos materiais compósitos existe um vasto leque de técnicas de processamento com diferentes especificidades. A seleção de um processo de fabrico está dependente do tipo de materiais a processar, das propriedades que se pretende obter nos componentes finais, das dimensões e da complexidade dos componentes a processar [17].

Os processos de fabrico podem ser classificados em dois tipos:

- Processamento em molde aberto, que consiste em fabricar componentes com bom acabamento em apenas uma face e que tem como vantagens, o processamento de componentes de grandes dimensões e/ou geometrias complexas.
- Processamento em molde fechado, que consiste em fabricar componentes com bom acabamento nas duas faces. Este tipo de processos já apresentam uma capacidade de reprodutibilidade maior que os processos de molde aberto. Pelo facto de serem processados em molde fechado, a emissão de gases é reduzida significativamente [9].

Nos compósitos reforçados com fibras, a geometria mais frequente na sua construção são as típicas estruturas delgadas, devido a esse facto, o processo de fabrico mais utilizado para a compactação de fibras contínuas ou curtas, passa pelo processo de moldação manual. Este processo, caracterizado pelo baixo custo e investimento quando comparado com processos inerentes, consiste na impregnação das fibras com a resina através de um pincel [27].

Devido aos avanços da tecnologia e aos exigentes requisitos das indústrias, outras técnicas e processos foram desenvolvidos, para colmatar as falhas resultantes do processo anteriormente referido. Exemplo disso, é o processo de moldação por vácuo, que ao incluir uma bomba de vácuo no processo, a pressão atmosférica é utilizada como auxílio na compactação e por vezes na remoção do excesso de resina, resultando assim num compósito com melhores propriedades mecânicas [2].

No que diz respeito ao processamento dos materiais compósitos de matriz termoendurecível com fibras curtas, têm uma grande vantagem, pelo facto de ser possível obter geometrias complexas através de processos que permitem altas taxas de produção como é o caso dos processos de RTM ou moldação por compressão. Por outro lado, ao ser processado o seu teor de fibra terá de ser mais reduzido, de modo a permitir uma maior processabilidade [24].

2.7.1. Moldação Manual

Como referido anteriormente, este é um processo simples e relativamente barato, não automatizado e utilizado para pequenas séries. Neste processo, a construção do compósito é realizada de forma manual, posicionando e impregnando cada camada em molde aberto com o auxílio de uma ferramenta manual (pincel, rolo, etc), como ilustra a Figura 4 [24].

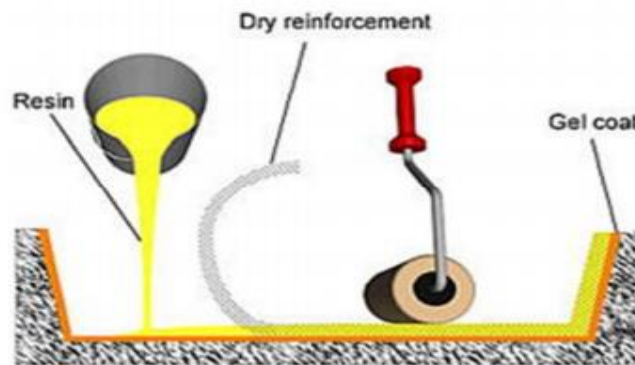


Figura 4 - Moldação manual [28]

Este, é um processo que pode ter elevados custos de produção, embora tenha um custo de investimento baixo, requer muita mão-de-obra o que acaba por encarecer o produto final [24].

Vantagens:

- Simplicidade – Esta é uma das principais vantagens, pois para este tipo de processo a mão-de-obra necessária é pouco qualificada;
- Investimento inicial reduzido;
- Geometrias com poucas restrições – É possível construir componentes com diversas geometrias com raios de curvatura superiores a 5mm e espessuras superiores a 1mm.

Desvantagens:

- Elevada necessidade de mão-de-obra;
- Elevada necessidade de perfeccionismo do operador;
- Baixa produtividade;
- Bom acabamento superficial apenas numa face;
- Heterogeneidade do teor de fibra;
- Necessidade de melhoramento de acabamentos.

Com a facilidade na execução de compósitos através deste processo, foi possível aumentar a procura deste tipo de materiais, embora os primeiros componentes tivessem um comportamento mecânico um pouco aquém das expectativas, limitando assim, as suas aplicações para fins apenas estéticos. Aliado às desvantagens deste tipo de processo, podemos incluir o tipo de cura realizada à resina, que na maioria dos casos, é efetuada com recurso a endurecedores de cura a frio, o que limita as propriedades mecânicas do compósito para qualquer tipo de aplicação, que não estética [2].

2.7.2. Moldação manual por projeção

O processo de moldação manual por projeção, embora com uma maior produtividade e uma maior homogeneidade na mistura, é um processo que tem por base os mesmos princípios do processo de moldação manual. A moldação manual por projeção ou Spray-up, consiste na projeção de resina e fibra, simultaneamente, através de uma pistola. Esta pistola faz o corte e projeção do reforço, normalmente fibroso alimentado por rolo, sob a forma de filamento, simultaneamente com a resina e por meio de ar comprimido. Após a projeção da mistura (Matriz e reforço), esta pode ganhar bolsas de ar no seu interior ou pode até haver uma falha na impregnação das fibras, de modo a evitar estes dois inconvenientes, é passado um rolo para compactar e tentar uniformizar a mistura. Este processo pode ser repetido por várias camadas até obtermos a espessura final pretendida (Figura 5) [28].

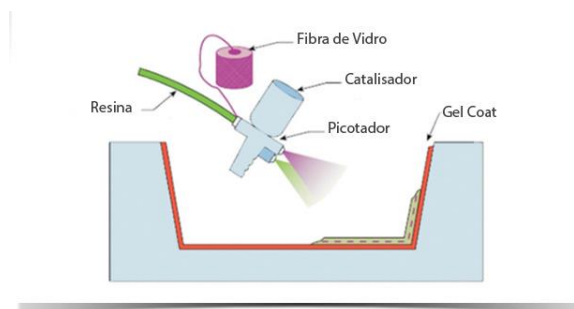


Figura 5 - Moldação manual por projeção [29]

2.7.3. Moldação manual assistida por vácuo

A moldação por contacto manual assistido por vácuo é um complemento que visa ajudar a moldação manual e que consiste na aplicação de vácuo no interior do molde que passou pelo processo referido anteriormente (Figura 6). Este processo, comparativamente à moldação manual, permite a obtenção de duas faces lisas, redução das bolhas de ar promovidas pela mistura da resina catalisada e remoção de excesso de resina, conseguindo assim percentagens de fibra até 70%, resultando assim, em compósitos com um desempenho mecânico superior [9].

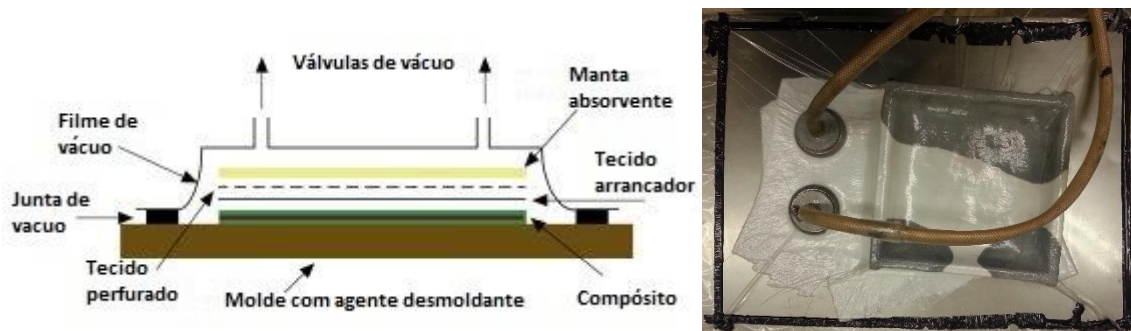


Figura 6 - Moldação manual assistida por vácuo: a) Esquema de montagem de vácuo (adaptado) [30];
b) Exemplo de saco de vácuo

2.7.4. Processo de moldação por compressão

A moldação por compressão é um processo que pode ser executado a frio ou a quente. A diferença entre eles consiste, essencialmente, no processo de cura. Neste processo não é necessária a mistura prévia da resina com o reforço. Basta colocar as fibras na cavidade do molde e de seguida a resina, após o fecho do molde, é aplicada uma carga no mesmo e a matriz vai impregnar o material de reforço. O material resultante deste processo apresenta uma boa compactação e uma baixa percentagem de porosidade, ainda assim, é possível o aparecimento de alguns poros que podem ser “eliminados” com recurso ao sistema de vácuo, aumentando a complexidade e custo do molde, mas resultando assim num bom acabamento final [31].

Na moldação por compressão a frio, a sua cura é efetuada à temperatura ambiente, onde são, habitualmente, utilizadas resinas de poliésteres insaturados às quais se associam sistemas catalíticos bastante ativos e fortemente exotérmicos, de modo a que assegurem o aquecimento progressivo do molde, onde as temperaturas se situam numa gama entre os

30°C e os 45°C e permite ciclos de produção médios, cerca de 4 a 12 peças por hora. Esta tecnologia pressupõe um investimento relativamente baixo em equipamentos, pelo facto das temperaturas e pressões utilizadas no processamento serem relativamente baixas (pressões inferiores a 4 bar). Os equipamentos mais relevantes serão uma prensa de baixa pressão e os moldes poderão ser fabricados com materiais de baixa resistência mecânica.

Na moldação por compressão a quente, as temperaturas utilizadas no processamento de componentes, são mais elevadas, na ordem dos 80°C a 170°C, o que origina ciclos de moldação mais rápidos comparativamente ao processo a frio. Para este tipo de processamento, já é necessário moldes metálicos, devido às pressões utilizadas serem mais elevadas (pressões entre os 5 e 150 bar) e uma prensa hidráulica com pratos aquecidos. As especificações do material a processar, o tempo de cura da resina, a temperatura do molde e a complexidade e espessura da peça a moldar, são algumas das variáveis que influenciam o tempo de processamento entre o fecho do molde e a sua abertura, este tempo pode variar entre 2 a 4 minutos por peça. Como processo de elevado volume de produção, este é um dos mais económicos. O acabamento superficial e o possível esmagamento das fibras, devido a pressões de processamento excessivas, são algumas das desvantagens deste tipo de tecnologia [32], [33].

2.7.5. RTM (Resin Transfer Molding)

O processo de RTM pertence aos processos designados de processos de molde fechado onde, neste caso, é possível executar componentes com frações volúmicas de fibra na ordem dos 60%. O processo consiste na colocação do reforço na cavidade do molde, que posteriormente é fechado com a outra metade do mesmo, para posteriormente, com recurso a pressão, ser injetada a mistura composta por resina, cargas, catalisador e outros possíveis compostos, como podemos verificar na Figura 7. De seguida inicia-se o processo de cura no interior do molde que tem uma duração de 6 a 30 minutos, em função dos parâmetros de processamento selecionados, tais como, catalisador, temperatura, materiais, entre outros [24].

O RTM possibilita o processamento de componentes próximos da sua forma final com bom acabamento nas duas superfícies, pelo facto de ser um processo de molde fechado. Este processo comparativamente com o processamento por injeção e por compressão, permite a

utilização de reforços nos mais variados formatos e assim criar componentes estruturais. Permite produzir componentes com custos inferiores pelo facto de o custo das ferramentas ser menos dispendioso. Neste processo temos como variáveis o fluxo de resina, o processo de cura e a transferência de calor [9], [24].

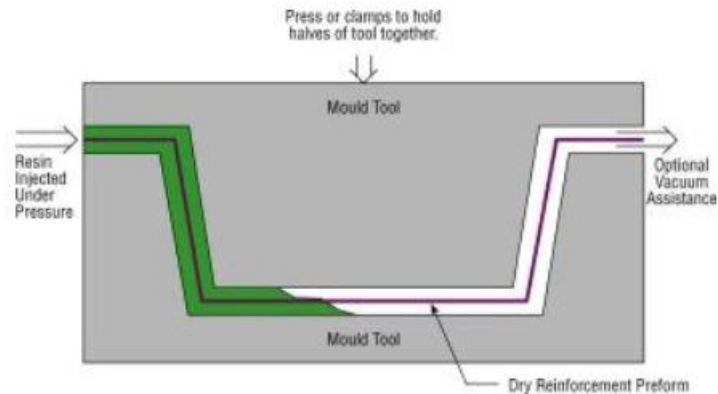


Figura 7 - Processo de RTM [34]

2.7.6. Equipamentos de auxílio ao processamento

Como descrito anteriormente, a moldação manual é a base de todos os tipos de processamento, isto é, comparativamente aos restantes processos, adicionámos equipamentos ou melhorámos técnicas que visam o melhoramento do compósito, tanto a nível estético como de performance. Com as elevadas exigências da indústria aeronáutica, na década de 1940 foram introduzidos os materiais compósitos para a construção de estruturas primárias de grande responsabilidade. Mas estes compósitos tinham lacunas, tais como a baixa resistência às tensões de corte interlaminar (<50MPa em compósitos epóxi com fibras de carbono). De forma a colmatar esta necessidade, foram introduzidas as autoclaves e os hidroclaves no processo de fabrico dos compósitos [27], [33], [35].

Com o uso de autoclaves Figura 8 (A), é possível combinar três elementos distintos, temperatura, pressão e vácuo, no fabrico de peças preformadas. De uma forma geral, na utilização deste tipo de equipamento, o material é sujeito a três fases ou ciclos distintos: Um aumento gradual, um estágio a valores constantes e uma diminuição gradual. Isto é, numa fase inicial, o objetivo será baixar a viscosidade da resina para eliminação de voláteis e facilitar o escoamento da mesma de modo a homogeneizar o compósito mesmo para teores

de fibra elevados. As fases seguintes serão a cura e consolidação do componente, onde o fator mais relevante é a pressão [24].

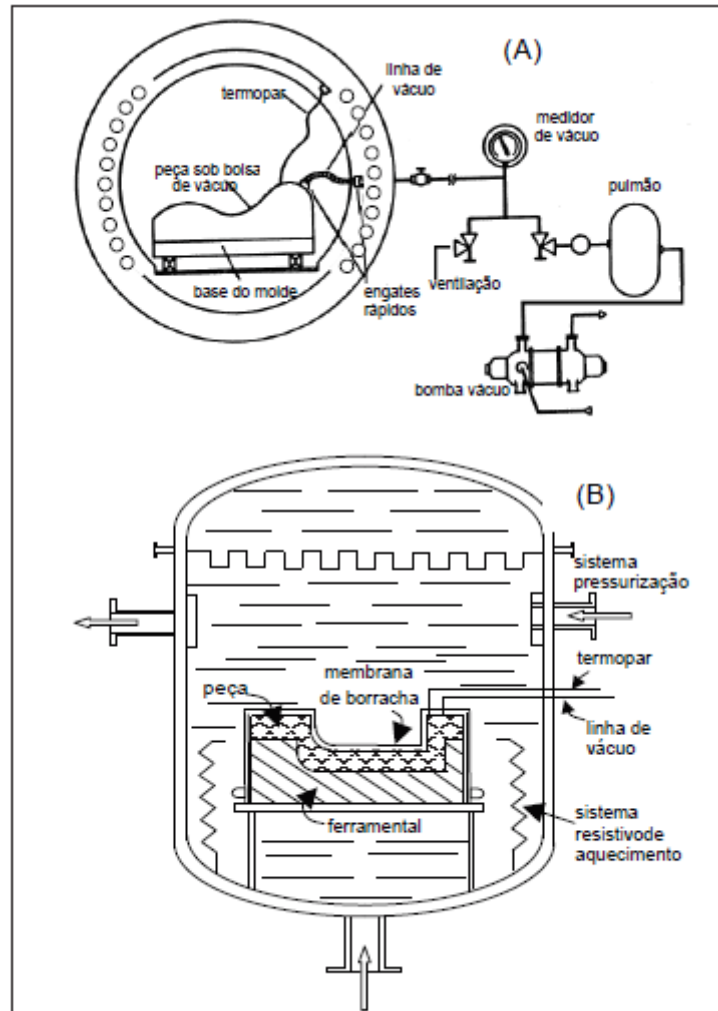


Figura 8 - Equipamentos de auxílio no processamento de compósitos: (A) Autoclave, (B) Hidroclave [36]

Desta forma, combinando pressão, uma atmosfera inerte e vácuo, em simultâneo, foi possível melhorar a resistência às tensões de corte interlaminar, para valores aproximados de 70-80MPa em compósitos bidirecionais, com a possibilidade de processamento de geometrias complexas e de grandes dimensões, solicitados pela indústria aeronáutica [37].

No caso dos hidroclaves Figura 8 (B), o funcionamento é idêntico às autoclaves, mas a pressão é obtida através de água. Este possibilita aumentos mais significativos na resistência a tensões de corte, comparativamente às autoclaves possibilitando aumentos das frações de fibra na construção do compósito [35].

2.8. Compósitos de matriz epóxi com fibras curtas

2.8.1. Propriedades mecânicas

Podemos definir propriedades mecânicas como sendo as características que determinam a resposta do material aos esforços mecânicos sofridos. Existem diversos fatores tais como, a temperatura, a estrutura do material, o peso molecular, as condições de ensaio, a preparação da amostra, entre outros, que influenciam nas propriedades mecânicas do compósito final, assim sendo e segundo os autores Estevão Freire, Elisabeth Monteiro e Julio Cyrino, podemos afirmar que [38]:

“A previsão de propriedades mecânicas em compósitos de fibra curta é dificultada, devido ao largo espectro de comprimentos e orientações que as fibras apresentam, que são consequência do processamento do compósito [39]” [7].

Neste tipo de compósitos de fibras curtas as propriedades finais dos compósitos não dependem só das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, mas também da orientação, do comprimento e da quantidade de fibras. De acordo com o gráfico da Figura 9, onde temos o comprimento das fibras no eixo das abcissas e a resistência do compósito no eixo das ordenadas, podemos verificar as várias influências que as variáveis do processo apresentam no compósito. A elevada quantidade de fibras ou a sua orientação mais cuidada, elevam o gráfico na vertical resultando assim num aumento da resistência do compósito, assim como o maior ou menor comprimento das fibras que provoca um aumento ou decréscimo, respetivamente, da resistência do compósito ao longo da curva em “S” [40].

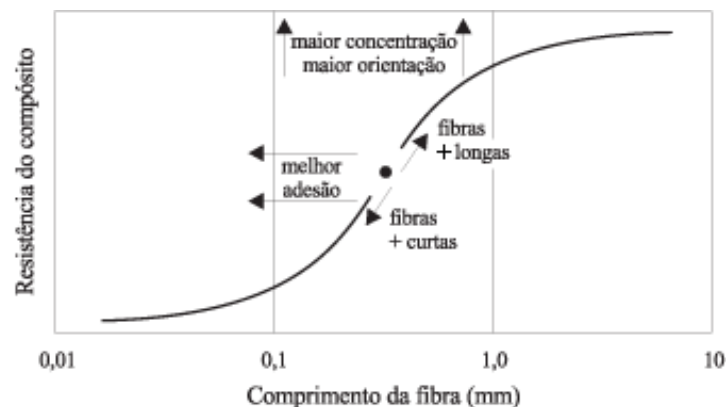


Figura 9 - Principais fatores que afetam a resistência mecânica dos compósitos reforçados com fibras curtas [40]

2.8.2. Aplicações

Este tipo de materiais compósitos, podem ser aplicados nas mais diversas indústrias, tais como aeroespacial, aeronáutica, automóvel, construção, desportiva, militar, entre outras. Após alguma pesquisa, não são encontrados muitos exemplos concretos acerca de aplicações já realizadas para este tipo específico de compósitos, mas existem alguns exemplos idênticos que se pode referir [41].

Uma das aplicações, já realizadas, muito idêntica ao material em estudo, é o material estudado pela Callaway Golf, a Automobili Lamborghini e a Universidade de Washington, e apelidado pelas mesmas de “Forged composite”. Um material estudado e desenvolvido para a aplicação nos braços de suspensão (Figura 10 (Esq.)) e *cockpit* do automóvel da Lamborghini, modelo *Sesto elemento* apresentado em 2010 no salão automóvel de Paris (Figura 10 (Drt.)).



Figura 10 - (Esq.) Braço de suspensão do Lamborghini Sesto Elemento construído em “Forged Composite” [41]; (Drt.) Lamborghini Sesto Elemento [42]

Para o processamento deste material (*Forged Composite*) são utilizadas fibras curtas de carbono com $L=25,4\text{mm}$ distribuídas aleatoriamente entre duas camadas de resina viniléster e o seu processamento é idêntico ao dos compósitos pré-impregnados, ou seja, a fibra é comprimida entre as duas camadas de resina através de rolos. Neste compósito em especial é utilizado uma fração mássica de 53% de fibras curtas de carbono. Este material é processado para ser posteriormente comprimido a quente com temperaturas entre os 132°C e os 160°C , pressões na ordem dos 69 a 103 bar e num tempo de cura entre 3 a 5 minutos. A carga é aplicada entre 60% a 70% do molde [41].

Esta tecnologia permitiu a construção dos primeiros braços de suspensão em fibra de carbono, substituindo os antigos braços em alumínio forjado, conseguindo baixar o peso dos componentes finais em 27%, assim como, baixou o tempo de produção dos componentes, desde o material simples até à peça acabada, para apenas 6 minutos de processamento (este

tempo não inclui os processos de maquinação para inserção da rótula, nem a instalação dos casquilhos e da rótula (Figura 11) [41].



Figura 11 - Braço de suspensão construído com fibras curtas de carbono, já com a instalação da rótula e respectivos casquilhos [41].

3. Materiais e procedimentos experimentais

De modo a elucidar o que foi realizado em laboratório, este capítulo vai dar a conhecer os materiais utilizados, as diversas técnicas de processamento e os ensaios realizados assim como os procedimentos relativos aos mesmos.

3.1. Materiais

Para a realização deste trabalho foi utilizada a resina epóxi de dois componentes Sicomin SR1500 com o respetivo endurecedor Sicomin SD2503 em conjunto com fibras curtas de carbono de 2mm (Apply Carbon CF-2mm), 4mm (Apply Carbon CF-6mm) e 6mm (Apply Carbon CF-6mm). Para a realização dos provetes para os diversos ensaios, foram processadas placas com frações em peso diferentes Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de frações em peso de fibras curtas de carbono e resina

Designação	Fibras Carbono Wf [%]	Resina SR1500 + Endurecedor SD2503 [%]
Resina	0	100
2mm15%	15	85
2mm30%	30	70
2mm45%	45	55
4mm15%	15	85
4mm30%	30	70
4mm45%	45	55
6mm15%	15	85
6mm30%	30	70
6mm45%	45	55

3.1.1. Resina Epóxi

Na elaboração dos exemplares para os diversos ensaios foi utilizado uma resina epóxi de dois componentes da marca Sicomin. A resina SR1500, com uma densidade de 1.13 g/cm^3 a 20°C e uma viscosidade de $5300 \pm 1000 \text{ mPa.s}$ a 15°C e o endurecedor SD2503, com uma densidade de 1.00 g/cm^3 a 20°C . A relação de mistura utilizada em peso foi de 100:33g com

uma posterior pós-cura de 24h a 23°C em conjunto com mais um ciclo de 8h a 60°C, resultando assim, nas seguintes propriedades teóricas:

- Módulo de elasticidade à flexão: 2,76 GPa
- Resistência máxima à flexão: 123 MPa
- Temperatura de transição vítrea (Tg): 70-76°C

3.1.2. Fibras curtas

Foi nos anos 60, que um cientista britânico descobriu um tipo de fibras revolucionário ao qual designou de fibras de carbono. Estas fibras surgiram por meio de oxidação/carbonização de fios Rayon (seda), a uma temperatura de 2800°C e com excelentes propriedades mecânicas, baixa densidade e elevada dureza. Devido ao elevado custo de produção destas fibras e à incerteza de existência de matérias-primas, o seu desenvolvimento e produção progrediu a um ritmo demasiado lento acabando por levar ao abandono do projeto, ficando a sua utilização restringida apenas para a indústria aeronáutica. Alguns anos mais tarde e ultrapassado o problema nos custos de produção, a sua utilização nas mais diversas áreas tem crescido, nomeadamente no fabrico estrutural. Nos dias de hoje, este tipo de fibras já é bastante utilizado e em alguns dos casos como substituto do aço e do alumínio [43].

Neste trabalho são utilizadas fibras de carbono curtas de dimensões distintas, 6mm, 4mm e 2mm (Figura 12) da empresa Procotex, previamente cortadas e com uma dispersão de comprimentos de $\pm 0,5$ mm.



Figura 12 - Fibras curtas de carbono (6mm, 4mm e 2mm)

3.1.3. Dispersão de fibras

Através da análise de experiências anteriores, foi possível constatar que a utilização das fibras curtas “agrupadas” como são adquiridas (Figura 13), poderia influenciar nas propriedades do material final. Isto é, no seu processamento, não era possível impregnar o interior desses aglomerados de fibras, acabando por ficar pequenas zonas sem o material ligante (resina), criando assim, pontos de rotura do material.



Figura 13 - Fibras "agrupadas"/sem tratamento de dispersão

De forma a colmatar este problema, foi elaborado um pequeno estudo pelo Eng. André Fonseca sobre a dispersão das fibras, onde foram elaborados ensaios a 4 solventes diferentes: água destilada, acetona, diclorometano e éter (Figura 14). Concluiu-se então que o solvente com melhores resultados na dispersão das fibras seria o diclorometano.



Figura 14 - Teste de dispersão de fibras com água destilada, acetona, diclorometano e éter

Embora a experiência tenha sido realizada numa proporção de 150ml de solvente para 1g de fibras, tal não era possível de aplicar ao tratamento das fibras para a realização deste trabalho, pois era necessária uma grande quantidade de solvente o que tornaria o processo

extremamente dispendioso. Como tal, o processo de dispersão foi alterado para o tratamento de quantidades de fibras superiores, como passo a explicar de seguida.

Para o processo de dispersão de fibras começou-se por quantificar os solventes (água destilada e diclorometano) e a fibra (Figura 15 (Esq.)), que variam consoante o comprimento da mesma. De seguida iniciou-se a mistura da fibra com o diclorometano e adicionou-se a água destilada.

Para uma melhor dispersão, foi utilizado um aparelho de ultrassons de modo a auxiliar a atuação dos solventes na fibra. Para esse efeito, a mistura foi dividida por goblés e introduzida no equipamento de ultrassons durante 3 horas (Figura 15 (Drt.)). Por fim é necessário secar as fibras, inicialmente e para remover o excesso de líquido, recorreu-se a duas chapas de aquecimento e duas tinas de inox e de seguida, para a secagem final, colocou-se as fibras na estufa a 120°C durante 12h.



Figura 15 – Solventes e fibra já quantificados (Esq.); Mistura no equipamento de ultrassons (Drt.)

3.1.4. Técnicas de processamento utilizados

Os materiais compósitos em estudo foram processados por compressão através de um molde metálico previamente desenvolvido e fabricado para o efeito (Figura 16 (Esq.)). Para as diferentes frações em peso (15%, 30% e 45%) assim como para os vários comprimentos de fibra (2mm, 4mm e 6mm), o processo de produção das placas foi o mesmo. Iniciou-se esse processo pela pesagem dos três componentes (Resina, endurecedor e fibras) e a sua mistura.

A fim de evitar bolhas de ar na placa final, a mistura foi colocada no vácuo durante 10 minutos. Em seguida, a mistura foi colocada no molde previamente preparado com desmoldante, fechado e colocado na prensa hidráulica (Figura 16 (Drt.)) durante 24h (primeira cura aconselhada pelo fabricante da resina), com uma carga de compressão de 1500kg que corresponde, sensivelmente a 45bar. Ao fim das 24h as placas de material são então sujeitas à pós-cura (8h a 60°C).

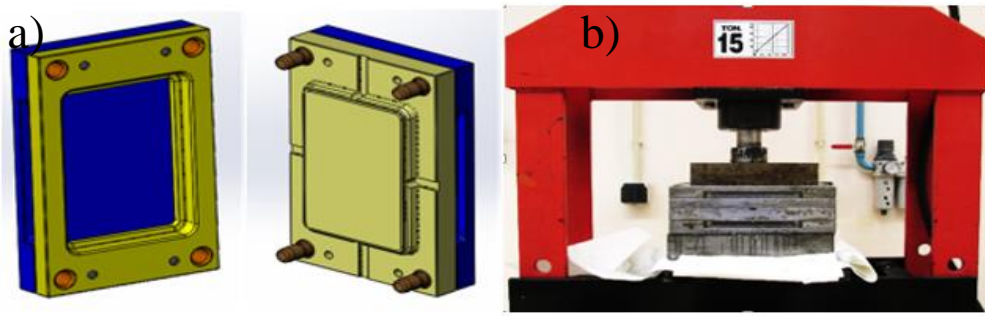


Figura 16 - Molde de compressão metálico (Esq.); Prensa hidráulica para compressão do molde (Drt.)

3.1.5. Provetes

No fim do seu processo de fabrico e curas, as placas finais (Figura 17) com as dimensões 150x100x6 [mm], foram então transformadas em provetes para os diversos ensaios.



Figura 17 - Placas de matriz epóxi reforçadas com fibras curtas

Para os diversos ensaios foram cortados provetes diferentes. No caso dos ensaios de flexão em três pontos e fratura, os provetes utilizados tinham as seguintes dimensões

50x10x6 [mm] (Figura 18 (Esq.)), nos de fratura tinham ainda um entalhe como podemos verificar na Figura 18 (Drt.)

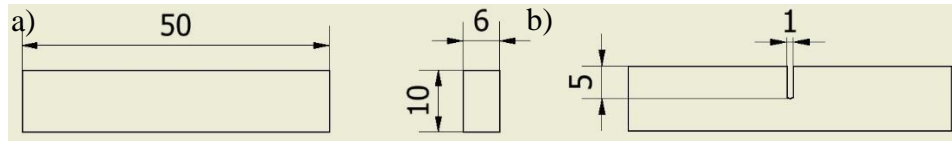


Figura 18 - Dimensões em milímetros dos provetes de flexão e fratura (Esq.); Dimensões em milímetros do entalhe dos provetes de fratura (Drt.)

Para o corte dos provetes foi utilizada uma serra de disco circular própria para o corte de provetes, da marca Struers e modelo Lobotom-3 (Figura 19 (Esq.)). Para os provetes dos ensaios de tenacidade à fratura o entalhe foi maquinado com recurso a uma fresadora da marca Meimac com um disco de 0,8mm de espessura (Figura 19 (Drt.)) e posteriormente acabados com uma lâmina de modo a “afiar” o entalhe.



Figura 19 – (Esq.) Máquina de corte de provetes; (Drt.) Maquinação do entalhe para os provetes de fratura

Como preparação das placas para os ensaios de furação, as mesmas foram maquinadas numa fresadora CNC, com três diâmetros de broca, velocidades e avanços diferentes e segundo o esquema da Figura 20.

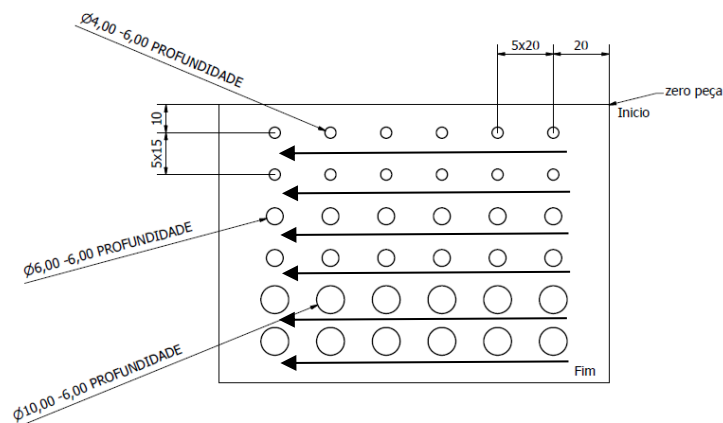


Figura 20 - Esquema de furação das placas de compósito de fibras curtas de carbono

3.2. Ensaios de caracterização física e mecânica

3.2.1. Densidade

Para obter as densidades experimentais dos compósitos processados, foi utilizada uma balança hidrostática da marca e modelo Mettler Toledo AG204 com o respectivo kit específico para efetuar as pesagens necessárias (Figura 21 (Esq.)). Essas pesagens foram realizadas segundo o princípio de Arquimedes que pressupõe que: "Um corpo mergulhado num fluido (líquido ou gás) sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima (Impulso), cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo" [44].



Figura 21 - Balança hidrostática e respetivo kit para determinação de densidades; Tabela de valores padrão da densidade da água

As amostras dos diferentes materiais foram submetidas a dois tipos de pesagens, ao ar e dentro de água destilada, este procedimento pode ser visualizado na Figura 22. Tendo em conta que a sala estava a uma temperatura de 15°C e segundo a tabela de valores padrão da densidade da água, o valor utilizado para a mesma foi de $0.9991 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Figura 21 (Drt.)).



Figura 22 - Kit de determinação de densidades

Para o tratamento das pesagens efetuadas foi utilizada a seguinte equação (Equação 1), que tem por base o Princípio de Arquimedes:

Equação 1

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \times \rho_{H_2O}$$

ρ – Densidade do corpo (g/cm^3)

M_1 – massa da amostra fora de água (g);

M_2 – massa da amostra dentro de água (g);

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – densidade da água destilada (g/cm^3).

3.2.2. Absorção

Segundo a norma ASTM D570-98, foram realizados testes de absorção de água com o objetivo de perceber o comportamento dos diversos compósitos em estudo (diferentes comprimentos e frações de fibra) em função do tempo de imersão em água destilada.

Para iniciar o procedimento de ensaio, os provetes foram secos numa estufa durante 60 minutos a uma temperatura de 100°C e de seguida arrefecidos no seu interior até à temperatura ambiente de modo a registar o seu peso seco. Após as pesagens iniciais, os provetes foram colocados em recipientes com água destilada, devidamente identificados.

Inicialmente o registo de pesagens começou por ser diário, aumentando gradualmente à medida que se observaram poucas variações nos valores registados. Estes valores foram posteriormente registados e utilizados para, através de gráficos, analisar a percentagem de absorção de água de cada tipo de compósito. Para o cálculo da percentagem de absorção de água foi utilizado a seguinte Equação 2:

Equação 2

$$W(\%) = \frac{(\text{Peso molhado} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}} \times 100$$

3.2.3. Flexão em três pontos

Para os ensaios mecânicos de flexão, foi utilizada uma máquina servo-mecânica Zwick Z100, com o respetivo módulo para trabalhar á flexão. Os provetes utilizados foram construídos segundo a norma ASTM D790 e os ensaios foram todos realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de carregamento de $5\text{mm}/\text{min}$ e um vão de 40mm , registando-se a carga e o deslocamento.



Figura 23 - Máquina servo-mecânica Zwick Z100

Este equipamento possui uma consola de controlo e possibilidade de conexão a um computador, que por sua vez, permite a visualização da curva carga-deslocamento no decorrer do ensaio, assim como, a retirada de dados relativos ao mesmo, tais como, a carga, a velocidade, o deslocamento, entre outros.

Para o cálculo da tensão máxima/última à flexão aplicada ao provete de compósito, foi considerada a Equação 3:

Equação 3

$$\sigma_{max} = \frac{M_{f_{max}} \cdot Y}{I}$$

Onde $M_{f_{m\acute{a}x}}$ é o momento fletor máximo, Y é metade da sua secção, ou seja, metade da espessura do provete e o I é o momento de inércia. Decompondo a fórmula anterior, temos a Equação 4 para o momento fletor máximo:

Equação 4

$$M_{f_{max}} = \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{2}$$

Onde P é a carga aplicada, L é o vão da máquina, isto é, o comprimento entre os dois apoios do ensaio à flexão. A Equação 5 para Y :

Equação 5

$$Y = \frac{h}{2}$$

Onde h é a espessura do provete. A Equação 6 da inércia será:

Equação 6

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

Onde b é a largura do provete. Na junção de todas estas fórmulas temos a Equação 7 da tensão máxima/última.

Equação 7

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{P \cdot L \cdot h}{2 \cdot 2 \cdot 2}}{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}$$

3.2.3.1. Flexão em três pontos com absorção de água

De modo a conhecer as propriedades mecânicas em função do tempo em imersão em água, dos diferentes compósitos de fibras curtas de carbono ($L=2\text{mm}$, $L=4\text{mm}$ e $L=6\text{mm}$) com diferentes frações mássicas, estes materiais foram submersos em água destilada (Figura 24), de modo a que todos os materiais tivessem uma absorção de água uniforme. Estes testes foram executados com provetes previamente imersos em água durante, aproximadamente, 240 horas (10 dias), 480 horas (20 dias) e 720 horas (30 dias).



Figura 24 - Provetes imersos em água destilada.

3.2.3.2. Flexão em três pontos com exposição a radiação ultravioleta

De modo a conhecer as propriedades mecânicas em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta, dos diferentes compósitos de fibras curtas de carbono ($L=2\text{mm}$, $L=4\text{mm}$ e $L=6\text{mm}$) com diferentes frações mássicas, estes materiais foram colocados numa câmara com duas lâmpadas de radiação ultravioleta com uma potência de 40w, câmara esta construída para este efeito, de modo a respeitar a norma ASTM G26 na exposição à radiação ultravioleta.

Estes testes foram realizados com provetes previamente sujeitos a exposição de radiação ultravioleta durante períodos de 240 horas (10 dias), 480 horas (20 dias) e 720 horas (30 dias) o que corresponde a aproximadamente a períodos reais de exposição de 3, 6 e 9 meses respetivamente em climas tropicais (Figura 25) [45].

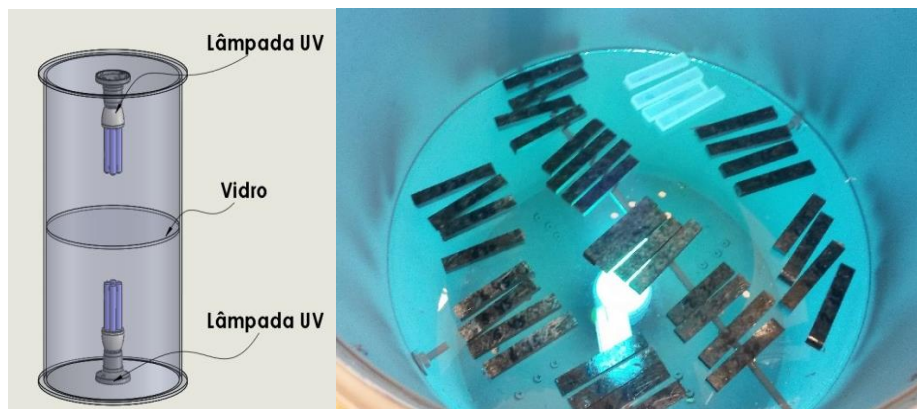


Figura 25 - Esquema da câmara desenvolvida para a realização dos ensaios de radiação UV; Provetes no interior da câmara de radiação UV

3.2.4. Fratura

Os testes de tenacidade à fratura foram concebidos para determinar o fator de tensão crítica (K_Q) caracterizando os polímeros e materiais compósitos quanto à sua tenacidade, isto é, quando estes materiais atingem esta tensão a sua fenda propaga-se instantaneamente levando à rotura do material. Este fator é determinado consoante o protocolo de determinação de K_Q para materiais poliméricos e compósitos [24].

Assumindo que no processo os provetes fraturados possuem um comportamento linear elástico, impõem-se algumas restrições na espessura do provete e na linearidade do diagrama carga/deslocamento de modo a obter ensaios válidos. Deste modo foram utilizadas as seguintes restrições:

- Regra para o valor inicial da espessura: $h=2b$;
- Relação para a profundidade do entalhe: $0,45 < a/h < 0,55$, (a – comprimento de fenda).

Estes ensaios foram realizados com a mesma máquina dos ensaios à flexão (Zwick Z100) assim como, com os mesmos acessórios para flexão em três pontos (Figura 26). Os ensaios foram também executados segundo a norma ASTM E399-83 com uma velocidade de carregamento de 10mm/min e um vão de 40mm.

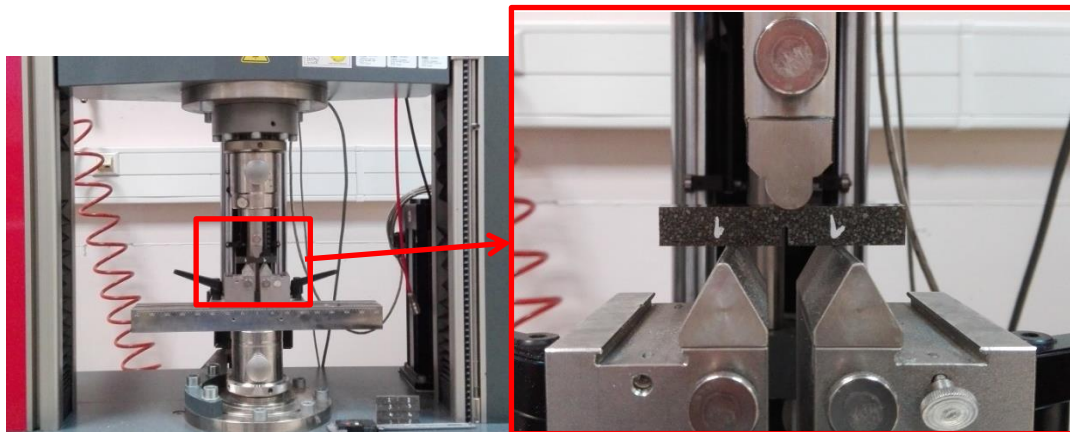


Figura 26 - Máquina Zwick Z100 com os acessórios para flexão utilizados nos ensaios de fratura

Para cada fração em peso, assim como, para cada comprimento de fibra, foram realizados seis ensaios. Para a realização dos ensaios, foi considerado o seguinte esquema de aplicação de carga Figura 27, assim como, a devida posição do provete.

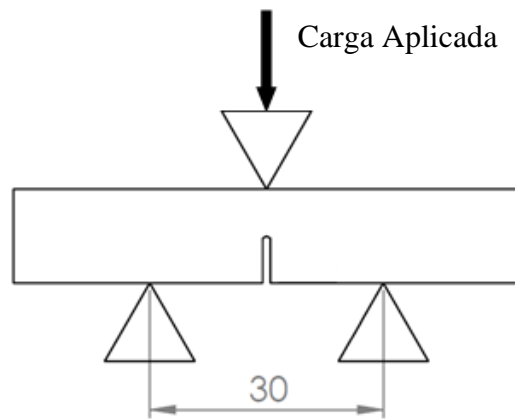


Figura 27 - Esquema de aplicação de carga do ensaio de tenacidade à fratura

Para determinar o tamanho médio de fenda originada pelos ensaios, foram realizadas medições dos vários comprimentos de fenda dos provetes fraturados, com recurso ao programa de modelação Autodesk Inventor.

O resultado deste tipo de teste é um diagrama de carga/deslocamento, que no caso ideal, é linear até ao instante do início de propagação da fenda, onde ocorre uma queda abrupta. Este seria o caso ideal e K_Q pode ser encontrado para a carga máxima, mas na maioria dos casos existem não linearidades no diagrama possivelmente originadas pelos seguintes motivos [46]:

- Deformação plástica da ponta da fenda;
- Elasticidade não linear;
- Viscoelasticidade geral;
- Crescimento estável da fenda depois da iniciação.

Quando temos um crescimento estável da fenda depois da iniciação, significa que a verdadeira carga de iniciação não é definida pelo máximo. Assim sendo, é necessário recorrer à determinação da complacência inicial C , como mostra a Figura 28 onde é traçada uma reta coincidente com o gráfico. De seguida é traçada uma nova reta com o mesmo ponto inicial, mas com uma diminuição de 5% no seu declive.

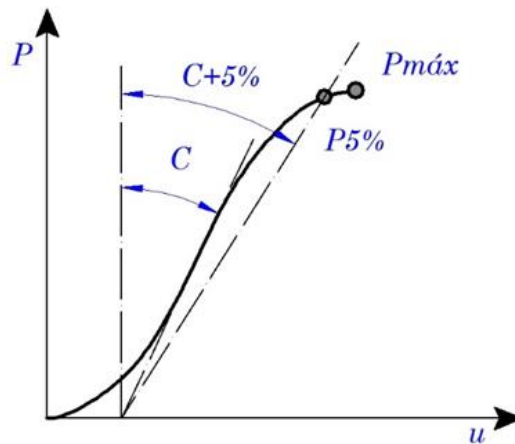


Figura 28 - Determinação da complacência [47]

Caso o $P_{máx}$ se encontre entre as duas linhas desenhadas, este é utilizado no cálculo de K_Q . Caso a linha C+5% intersestar a linha de carga, é encontrado o valor P5% e é este o valor utilizado como valor de iniciação de fenda.

Para o cálculo do valor de K_Q nos ensaios de tenacidade à fratura, é utilizada a seguinte Equação 8 onde o parâmetro $f(a/h)$ é obtido através de valores tabelados.

Equação 8

$$K_Q = \frac{P_Q \times L}{bh^{3/2}} \times f(a/h)$$

Para a devida confirmação/verificação os valores de K_Q devem ser aplicados na seguinte Equação 9:

Equação 9

$$a, b, (h - a) > 2,5 \times \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ced}} \right)^2$$

Se as relações $0,45 < a/h < 0,55$ e $h=2b$ forem consideradas na preparação dos provetes, normalmente, esta condição é satisfeita. No caso do critério apresentado, este cobre duas limitações no qual a espessura deve ser suficiente para assegurar a deformação plana, mas o valor $(h - a)$ tem de ser suficiente para evitar excessiva plasticidade. Caso estas condições não se verifiquem, é necessário repetir os ensaios com provetes de maiores dimensões.

Outro dos fatores abordados é a taxa crítica de libertação de energia (G_Q) cujo seu índice (Q) significa “material quase frágil” é utilizado para quantificar a taxa energia libertada na ponta da fissura quando é aplicada uma carga num material dito “quase frágil”

[48]. Este fator é determinado consoante o protocolo de determinação de G_Q para materiais poliméricos e compósitos.

Para o cálculo do valor de G_Q nos ensaios de tenacidade à fratura, é utilizada a seguinte Equação 10:

Equação 10

$$G_Q = \frac{U}{bh\phi}$$

Onde o fator U é dado pela seguinte Equação 11:

Equação 11

$$U = \frac{1}{2P_Q u_Q}$$

3.2.5. DMA

O ensaio DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) é um ensaio dinâmico-mecânico que consiste em medir o comportamento mecânico de um material através da aplicação de uma força, que varia ao longo do tempo num programa de temperatura controlada. Nestes ensaios foi utilizada uma Triton Tritec 2000 (Figura 29), que conta com um programa, que após recolher os dados os envia para um computador, para posteriormente, serem tratados e analisados.

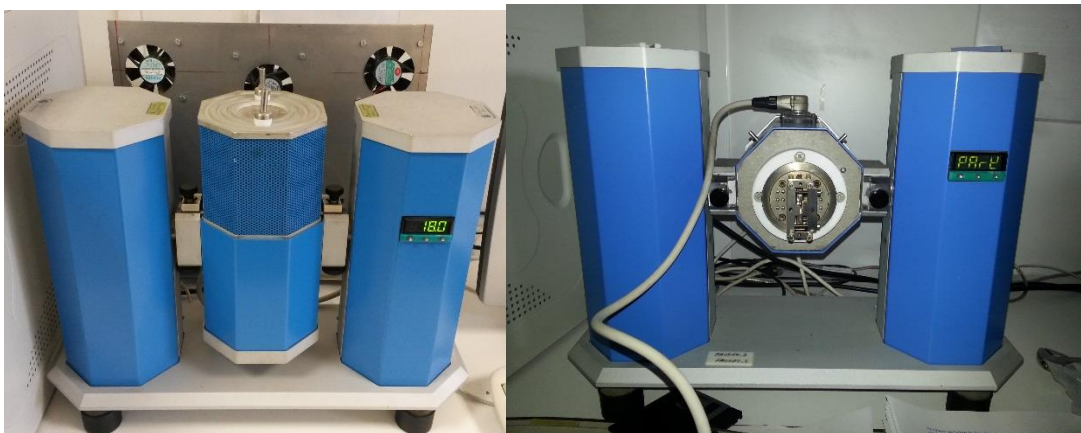


Figura 29 - Máquina Triton Tritec 2000 com acessórios para ensaios de flexão em três pontos

Os ensaios realizados foram de flexão em 3 pontos com variação de temperaturas entre os 20°C e os 140°C com uma velocidade de aquecimento de 3°C/min. Estes ensaios têm como principal objetivo ficar a conhecer alguns dos parâmetros dos materiais, tais como, a temperatura de transição vítrea (T_g), os diversos módulos elásticos (*storage modulus*; *loss modulus*), o fator de dissipação de calor (*tan delta*), entre outros. Neste ensaio foi também seguida a norma alemã DIN53457, sendo esta, a norma de referência nos ensaios de análise térmica.

3.2.6. Furação

Por forma a avaliar os danos de furação versus parâmetros de corte (Diâmetro da broca, velocidade de corte e velocidade de avanço) foram efetuados testes de maquinação com as diferentes placas processadas com diferentes frações mássicas de fibras curtas de carbono (2mm, 4mm, 6mm e Resina).

Para realizar as diversas furações foram utilizados três diâmetros de broca diferentes (4mm, 6mm e 10mm) da marca Izar, serie corta, referencia 9010 e fabricadas em metal duro (Figura 30).



Figura 30 - (Esq.) Broca metal-Duro DIN338N utilizada na maquinação das placas em material compósito; (Dir.) Esquema da Broca Izar [49]

Características das brocas utilizadas [49]:

Broca Izar 4mm:

- Norma DIN338N;
- Características: D-4.00mm; d-4,00mm; L-75.00mm; I-43mm;
- Ângulo de ponta 118°;
- Aplicações: Titânio, materiais sintéticos, plásticos, aço, alumínio, magnésios, cobre, bronze e latão.
- Nota: Nos termoplásticos é possível trabalhar com velocidades de corte entre os 80 e os 170 (m/min.)

Broca Izar 6mm:

- Norma DIN338N;
- Características D-6.00mm; d-6,00mm; L-93.00mm; I-57mm;
- Ângulo de ponta 118°
- Aplicações: materiais sintéticos, plásticos, aço, alumínio, magnésios, cobre, bronze e latão;
- Nota: Nos termoplásticos é possível trabalhar com velocidades de corte entre os 80 e os 170 (m/Min.)

Broca Izar 10mm:

- Norma DIN338N;
- Características D-10.00mm; d-10,00mm; L-133.00mm; I-87mm;
- Ângulo de ponta 118°
- Aplicações: materiais sintéticos, plásticos, aço, alumínio, magnésios, cobre, bronze e latão;
- Nota: Nos termoplásticos é possível trabalhar com velocidades de corte entre os 80 e os 170 (m/Min.)

Para as medições das áreas danificadas nos compósitos foi utilizado o programa de modelação 3D, Autodesk Inventor. Estas medições foram executadas através de digitalizações das placas de compósito, onde são visíveis os danos de entrada ou saída das ferramentas. Inicialmente foi desenhado o contorno do dano (Figura 31 (Esq.)) e com a ajuda de uma ferramenta do programa de desenho foi possível conhecer a área danificada (Figura 31 (Dir.)).

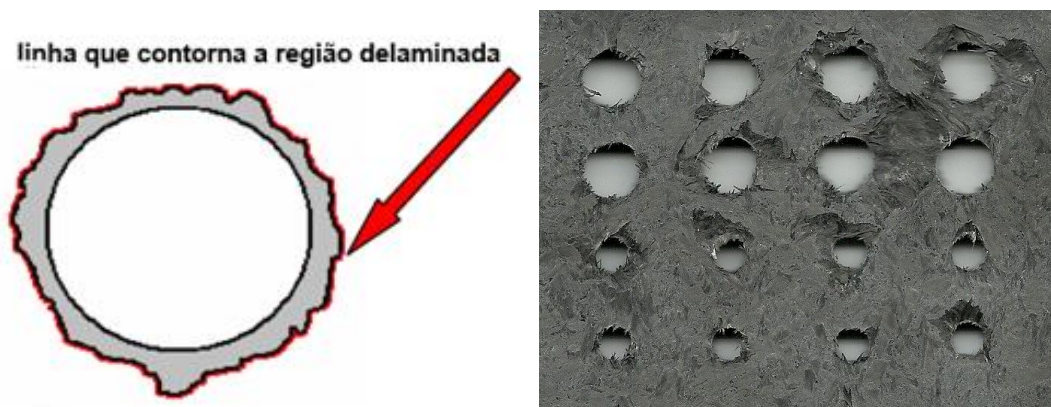


Figura 31 - (Esq.) Esquema da área do furo, da área danificada e da linha de contorno da área danificada; (Dir.) Pormenor da placa com as zonas danificadas (L=4mm Wf=45% Saida).

Na seguinte Figura 32 é possível observar as diferentes áreas de dano referentes à placa de fibras curtas de carbono com L=4mm e Wf =30%, do lado da entrada.

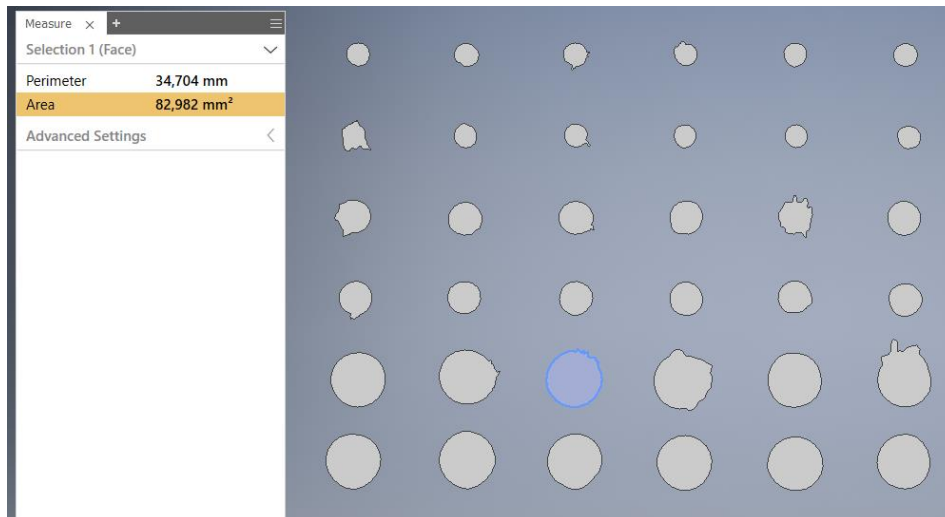


Figura 32 - Áreas de dano medidas com recurso ao programa Autodesk Inventor ($L=4\text{mm}$, $W_f=30\%$ Entrada)

4. Resultados

4.1. Densidades

Para o cálculo das densidades dos materiais processados com fibras de carbono curtas foi utilizado o princípio de Arquimedes. Na Tabela 2 pode-se observar os valores experimentais obtidos, bem como os resultados calculados a partir da lei das misturas e a sua diferença em porcentagem. Pode-se atribuir as causas dessas diferenças a erros de pesagem e do processo de fabrico dos materiais compósitos em estudo (distribuição das fibras na matriz, tempo e temperaturas de cura, porosidades, entre outras).

Tabela 2 - Valores da densidade experimental e teórica (lei das misturas), desvio padrão e diferença em porcentagem dos materiais processados

Material	Densidade medida [g/cm ³]	Desv. Padrão	Lei das misturas [g/cm ³]	Diferença [%]
Resina	1,1633	0,0001	1,1300	-3,33
L=2mm; Wt=15%	1,1945	0,0111	1,2066	1,22
L=2mm; Wt=30%	1,2787	0,0162	1,2953	1,66
L=2mm; Wt=45%	1,3522	0,0488	1,3991	4,69
L=4mm; Wt=15%	1,1703	0,0103	1,2066	3,63
L=4mm; Wt=30%	1,2647	0,0014	1,2953	3,06
L=4mm; Wt=45%	1,3503	0,0191	1,3991	4,88
L=6mm; Wt=15%	1,1657	0,0302	1,2066	4,09
L=6mm; Wt=30%	1,2715	0,0078	1,2953	2,38
L=6mm; Wt=45%	1,4063	0,0105	1,3991	-0,73

Na Figura 33 pode-se observar as variações de densidade versus fração mássica para os diferentes materiais processados com diferentes tipos de fibras curtas de carbono e frações mássicas. A partir da análise da Figura 33 e dos resultados da Tabela 2 é possível concluir-se que há porosidades nestes materiais, embora em alguns casos, tendo em conta os desvios padrão, podemos afirmar que os valores seguem a tendência da lei das misturas (valores teóricos).

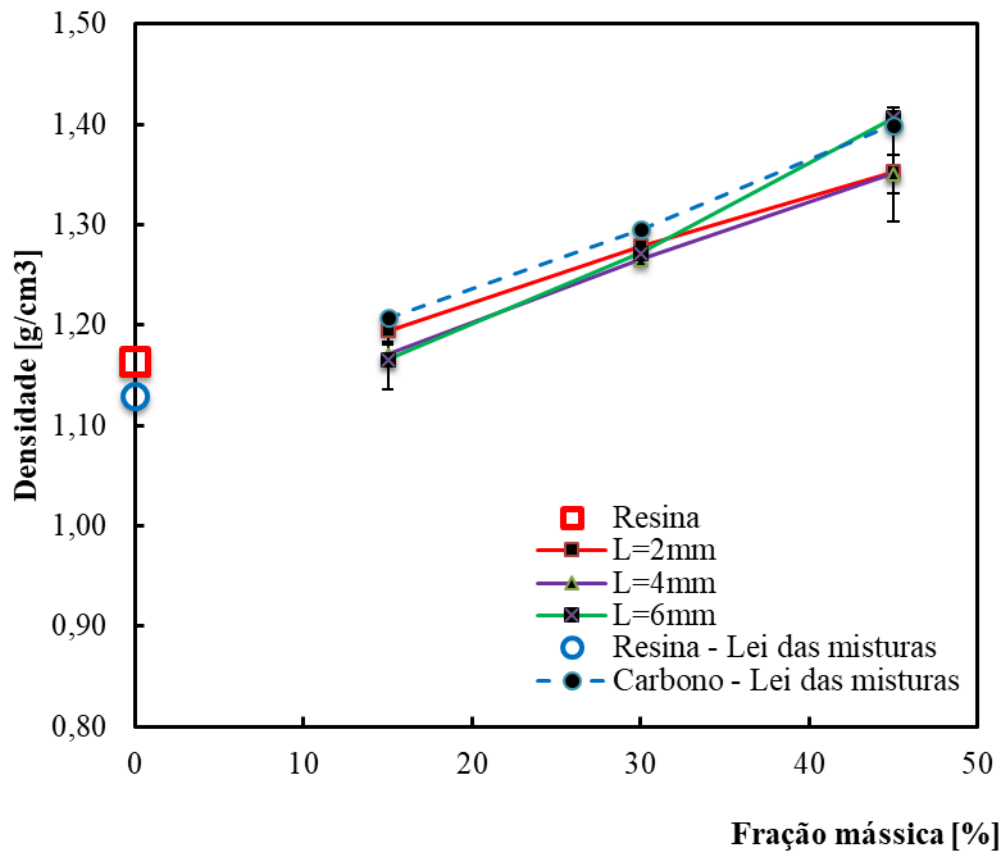


Figura 33 - Valores da densidade experimental e teórica (lei das misturas)

4.2. Propriedades mecânicas em flexão em três pontos

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados relativos à variação das propriedades mecânicas versus fração em peso de fibras curtas de carbono e para os diferentes comprimentos de fibras curtas de carbono (L=2mm, L=4mm e L=6mm).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados relativos aos ensaios a flexão a três pontos versus fração em peso para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm, bem como os desvios padrão obtidos para os diferentes materiais processados. Com o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono pode-se constatar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) em três pontos aumenta com o aumento da fração em peso das fibras curtas de carbono. No caso do módulo de elasticidade médio observa-se a mesma tendência, ou seja, um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da fração de fibras curtas de carbono.

Tabela 3 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm

	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP		60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	2mm_15%	643,1	1,0	145,4	6,6	0,9991
DP		45,7	0,1	3,2	0,6	0,0002
Média	2mm_30%	833,8	0,9	171,7	10,9	0,9994
DP		25,4	0,0	6,7	1,1	0,0002
Média	2mm_45%	964,8	0,7	188,0	13,3	0,9994
DP		70,5	0,0	13,9	1,2	0,0002

Na Figura 34 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=2mm. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta e a extensão diminui abruptamente da resina para os compósitos reforçados. A diminuição da extensão é acentuada com o aumento da fração de peso de fibras curtas de carbono.

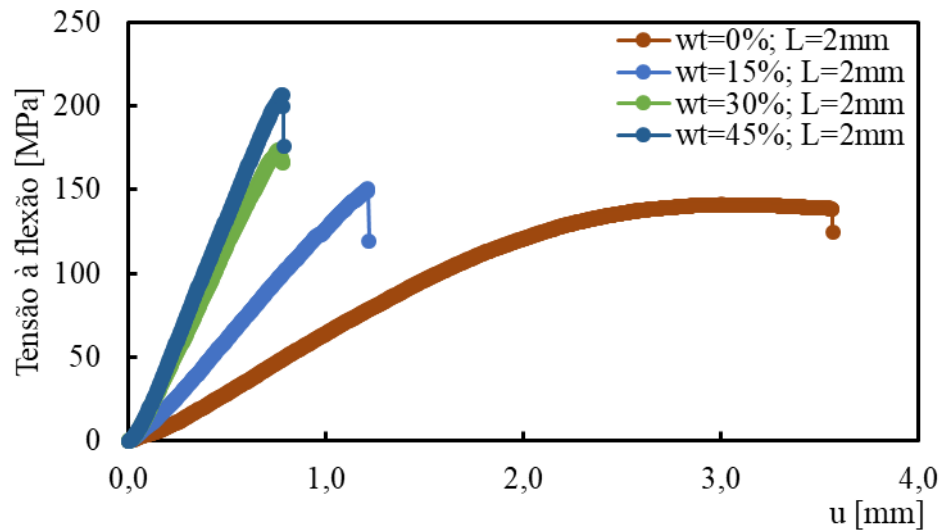


Figura 34 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=2mm

Na Tabela 4 são apresentados os resultados relativos aos ensaios a flexão a três pontos versus fração em peso para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm, bem como os desvios padrão obtidos para os diferentes materiais processados. Com o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono pode-se constatar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) em três pontos aumenta com o aumento da fração em peso das fibras curtas de carbono. No caso do módulo de elasticidade médio observa-se a mesma tendência, ou seja, um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da fração de fibras curtas de carbono.

Tabela 4 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm

	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP		60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	4mm_15%	774,8	1,1	165,3	8,1	0,9988
DP		58,3	0,1	16,3	0,8	0,0006
Média	4mm_30%	1087,6	1,0	221,7	11,9	0,9993
DP		175,2	0,1	43,6	1,8	0,0002
Média	4mm_45%	1324,6	0,8	261,0	16,5	0,9991
DP		364,5	0,2	65,6	1,9	0,0002

Na Figura 35 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=4mm. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta e a extensão diminui consideravelmente da resina para os compósitos reforçados mantendo-se praticamente constante para os diferentes materiais compósitos com diferentes frações em peso de fibras de carbono.

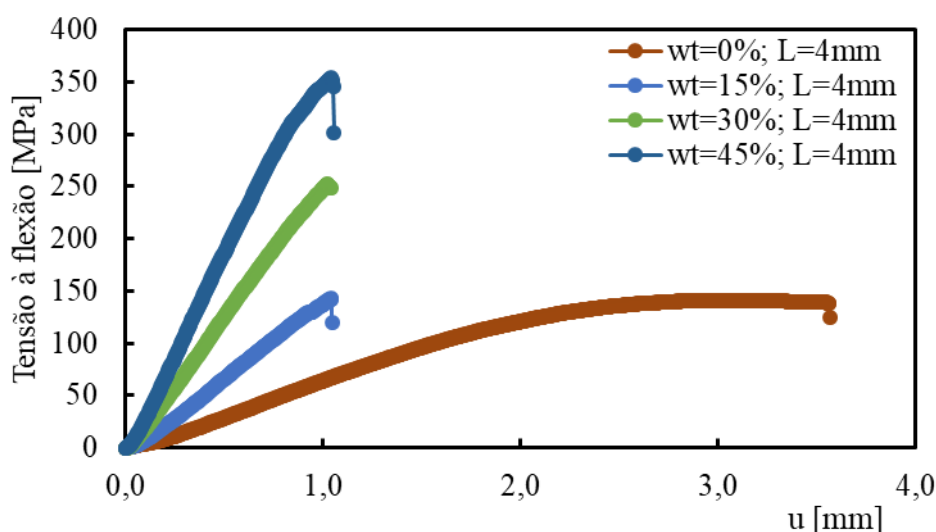


Figura 35 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=4mm

Na Tabela 5 são apresentados os resultados relativos aos ensaios a flexão a três pontos versus fração em peso para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6mm, bem como os desvios padrão obtidos para os diferentes materiais processados. Com o aumento da percentagem de fibras curtas de carbono pode-se constatar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) em três pontos aumenta com o aumento da fração em peso das fibras curtas de carbono. No caso do módulo de elasticidade médio observa-se a mesma tendência,

ou seja, um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da fração de fibras curtas de carbono.

Tabela 5 - Valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade à flexão versus percentagens em peso dos compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm

	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP		60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	6mm_15%	689,2	1,1	141,5	6,9	0,9994
DP		132,7	0,1	27,1	0,8	0,0002
Média	6mm_30%	1022,9	0,8	210,7	11,4	0,9995
DP		86,3	0,2	19,4	0,6	0,0001
Média	6mm_45%	1360,3	1,0	282,7	16,4	0,9989
DP		292,3	0,2	61,8	1,5	0,0004

Na Figura 36 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=6mm. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta. A extensão diminui abruptamente da resina para os compósitos reforçados e ligeiramente com o aumento da fração de peso de fibras curtas de carbono.

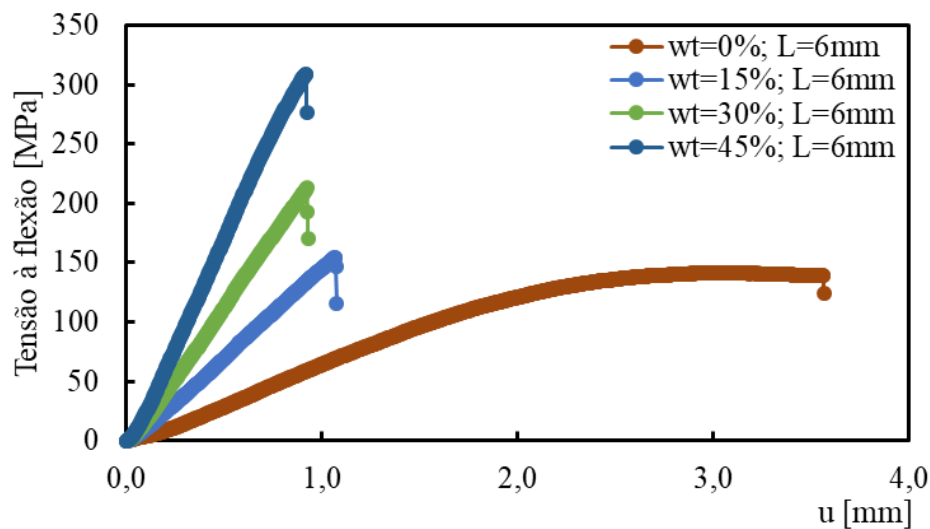


Figura 36 - Tensão/Extensão T=0 dias em água/UV L=6mm

4.2.1. Propriedades mecânicas em flexão em três pontos *versus* absorção de água

Neste subcapítulo serão apresentadas as propriedades mecânicas dos compósitos processados com fibras curtas de carbono versus o tempo de imersão em água, para cada fração em peso (15%, 30% e 45%) e para cada comprimento de fibra (2mm, 4mm e 6mm).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de imersão em água, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com $L=2$ mm. Neste tipo de fibras curtas de carbono com $L=2$, podemos afirmar que a fração mássica de 30% é a que apresenta uma menor diminuição de valores de tensão máxima à flexão apresentando os valores 171,7MPa e 161,3MPa para 0 dias e 30 dias de imersão em água, respectivamente. Já no caso do módulo de elasticidade é o compósito com 15% de fibras curtas de carbono com $L=2$ que apresenta uma menor variação tendo como valores para 0 dias e 30 dias de imersão em água, respectivamente, 6,6GPa e 6,3GPa.

Tabela 6 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm

	Dias de imersão em água	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	937,4	3,0	141,9	2,9	0,9988
DP			44,6	0,0	0,6	0,0	0,0001
Média	10		760,6	3,1	135,4	3,1	0,9992
DP			31,1	0,1	2,8	0,1	0,0002
Média	20		739,0	2,9	129,3	2,9	0,9994
DP			89,2	0,2	3,9	0,1	0,0001
Média	30		760,6	2,9	128,7	3,0	0,9997
DP			754,1	3,0	127,2	2,9	0,9996
Média	0	2mm_15%	643,1	1,0	145,4	6,6	0,9991
DP			45,7	0,1	3,2	0,6	0,0002
Média	10		636,9	1,1	134,1	6,4	0,9995
DP			102,2	0,2	20,1	0,3	0,0001
Média	20		596,6	1,1	125,7	5,9	0,9993
DP			30,6	0,1	6,5	0,3	0,0002
Média	30		576,8	1,1	125,6	6,3	0,9996
DP			145,0	0,1	27,1	0,7	0,0002
Média	0	2mm_30%	833,8	0,9	171,7	10,9	0,9994
DP			25,4	0,0	6,7	1,1	0,0002
Média	10		779,5	0,9	162,4	9,7	0,9993
DP			112,0	0,1	22,1	0,8	0,0003
Média	20		796,1	0,9	164,3	10,0	0,9992
DP			59,2	0,1	11,6	1,6	0,0002
Média	30		759,8	0,8	160,3	10,0	0,9994
DP			69,6	0,0	17,4	0,7	0,0002
Média	0	2mm_45%	964,8	0,7	188,0	13,3	0,9994
DP			70,5	0,0	13,9	1,2	0,0002
Média	10		958,7	0,8	180,8	11,7	0,9982
DP			206,2	0,1	35,3	1,7	0,0007
Média	20		963,8	0,8	185,0	11,8	0,9989
DP			4,8	0,0	1,5	0,2	0,0005
Média	30		975,0	0,9	168,3	10,4	0,9966
DP			74,6	0,0	11,4	0,2	0,0021

Com o aumento do tempo de imersão em água pode-se constatar que tanto a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{máx.flexão}$) em três pontos bem como os valores de módulo de elasticidade ($E_{flexão}$) diminuem (Figura 37/Figura 38). É possível observar uma forte diminuição das propriedades mecânicas nos primeiros dez dias de imersão em água seguida de manutenção das propriedades mecânicas com o aumento do tempo de imersão em água. Os pequenos picos ascendentes ou descendentes de tensão e de módulo de elasticidade

existentes, podem ser explicados por possíveis desvios dos valores médios que são demonstrados através dos valores dos desvios padrão.

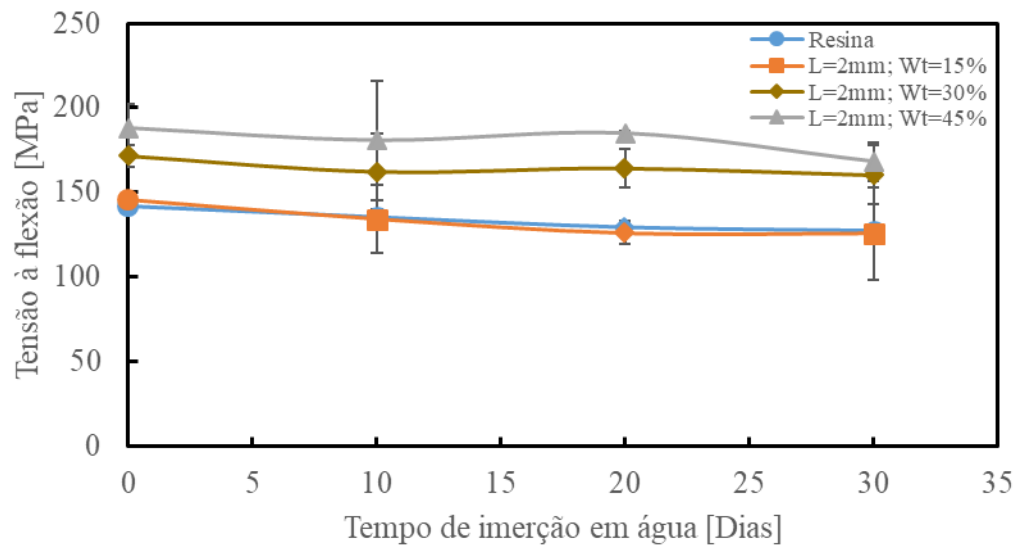


Figura 37 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina

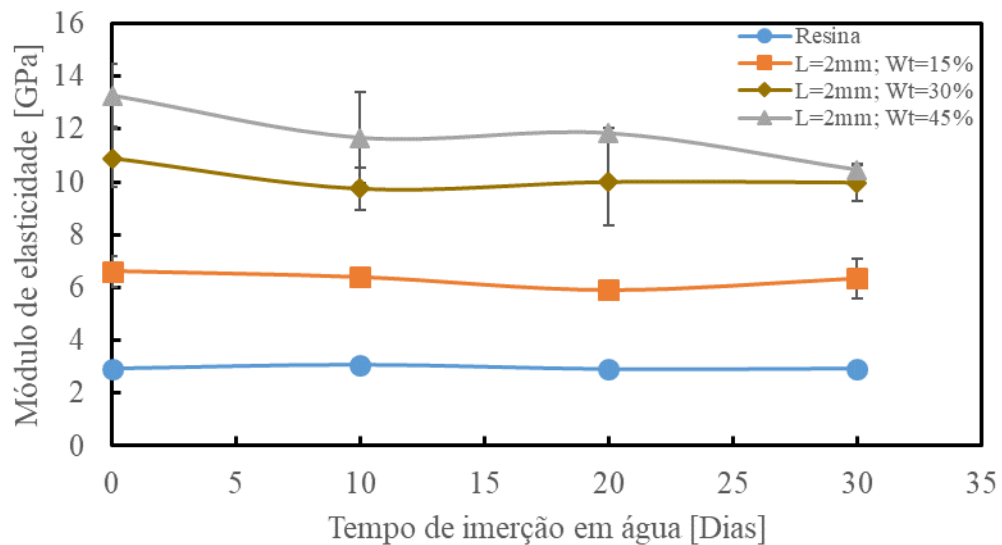


Figura 38 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2 e Resina.

Nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=2mm para 10, 20 e 30 dias de imersão em água, respetivamente. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta. A extensão diminui abruptamente da resina para os compósitos reforçados e ligeiramente com o aumento da fração de peso de fibras curtas de carbono.

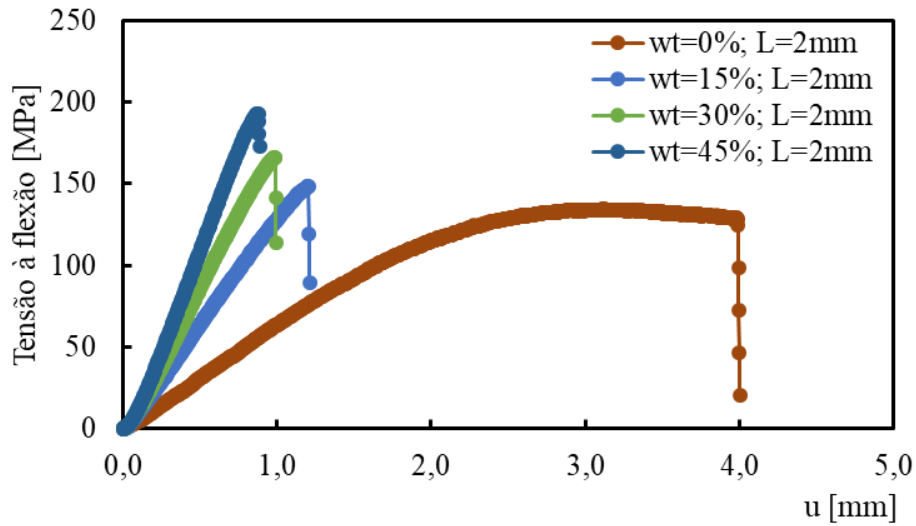


Figura 39 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=2mm

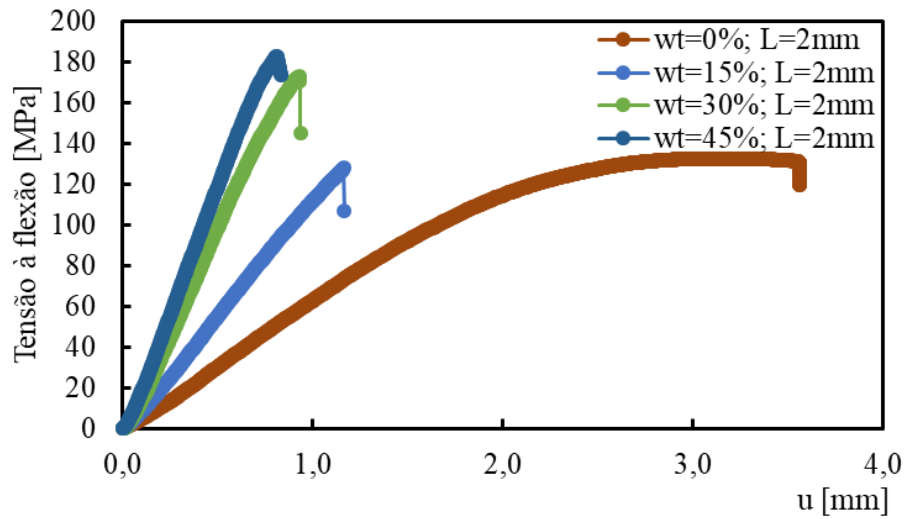


Figura 40 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=2mm

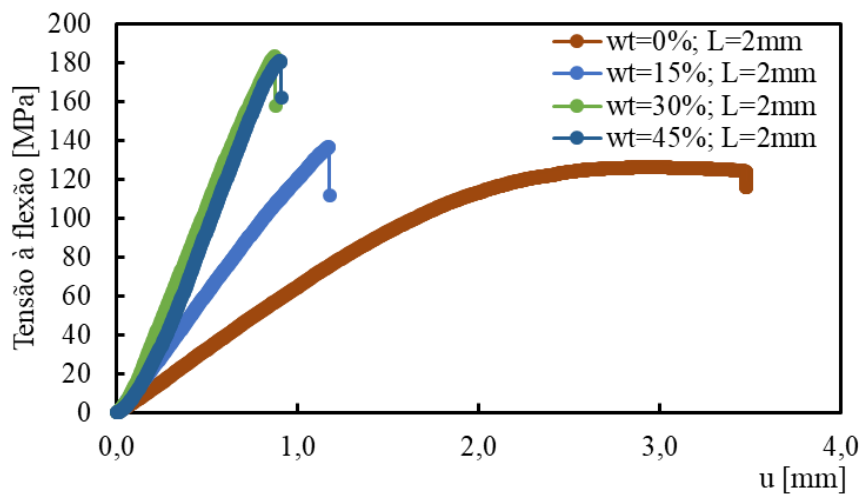


Figura 41 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=2mm

Na Tabela 7 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de imersão em água, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$. Neste tipo de fibras curtas de carbono com $L=4$, podemos afirmar que a fração mássica de 15% é a que apresenta uma menor diminuição de valores de tensão máxima à flexão e de módulo de elasticidade, apresentando os valores 165,3MPa e 150,0MPa para 0 dias e 30 dias de imersão em água, respetivamente para a tensão máxima e para o módulo de elasticidade, os valores 8,1GPa e 7,5GPa para os mesmos 0 dias e 30 dias de imersão em água.

Tabela 7 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm

	Dias de imersão em água	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP			60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	10		760,6	3,1	135,4	3,1	0,9992
DP			31,1	0,1	2,8	0,1	0,0002
Média	20		739,0	2,9	129,3	2,9	0,9994
DP			89,2	0,2	3,9	0,1	0,0001
Média	30		754,1	3,0	127,2	2,9	0,9996
DP			30,0	0,1	1,1	0,0	0,0002
Média	0	4mm_15%	774,8	1,1	165,3	8,1	0,9988
DP			58,3	0,1	16,3	0,8	0,0006
Média	10		799,5	1,1	163,9	7,9	0,9995
DP			57,6	0,1	10,2	0,8	0,0002
Média	20		650,8	1,0	134,7	7,2	0,9994
DP			70,2	0,1	16,5	0,4	0,0002
Média	30		741,5	1,1	150,0	7,5	0,9993
DP			23,6	0,1	5,9	0,5	0,0000
Média	0	4mm_30%	1087,6	1,0	221,7	11,9	0,9993
DP			175,2	0,1	43,6	1,8	0,0002
Média	10		1039,5	1,1	213,4	11,2	0,9993
DP			201,7	0,2	46,0	1,4	0,0002
Média	20		850,4	0,8	175,5	11,0	0,9993
DP			48,2	0,0	12,2	0,7	0,0001
Média	30		844,0	0,9	171,8	9,8	0,9992
DP			64,6	0,1	9,4	0,7	0,0005
Média	0	4mm_45%	1324,6	0,8	261,0	16,5	0,9991
DP			364,5	0,2	65,6	1,9	0,0002
Média	10		1410,7	1,1	272,8	14,1	0,9990
DP			109,6	0,1	21,1	0,7	0,0002
Média	20		1160,9	0,9	239,6	14,3	0,9993
DP			187,6	0,1	33,8	1,3	0,0002
Média	30		1038,8	0,8	209,0	14,0	0,9991
DP			178,4	0,1	33,1	1,1	0,0001

Com o aumento do tempo de imersão em água pode-se constatar que tanto a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{máx.flexão}$) em três pontos bem como os valores de módulo de elasticidade ($E_{flexão}$) diminuem (Figura 42/Figura 43). Os pequenos picos ascendentes ou descendentes existentes podem ser explicados por possíveis desvios dos valores médios que são demonstrados através dos valores dos desvios padrão.

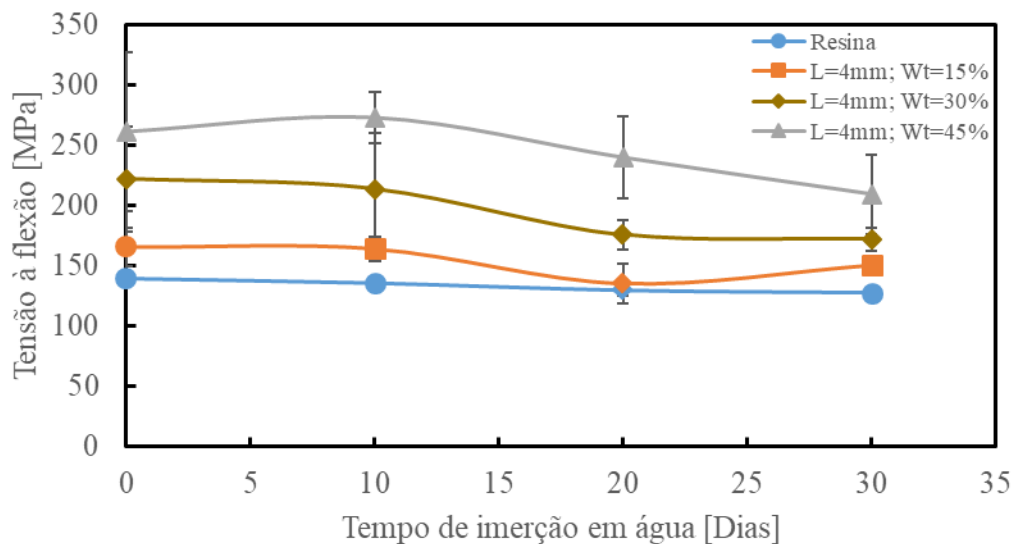


Figura 42 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina

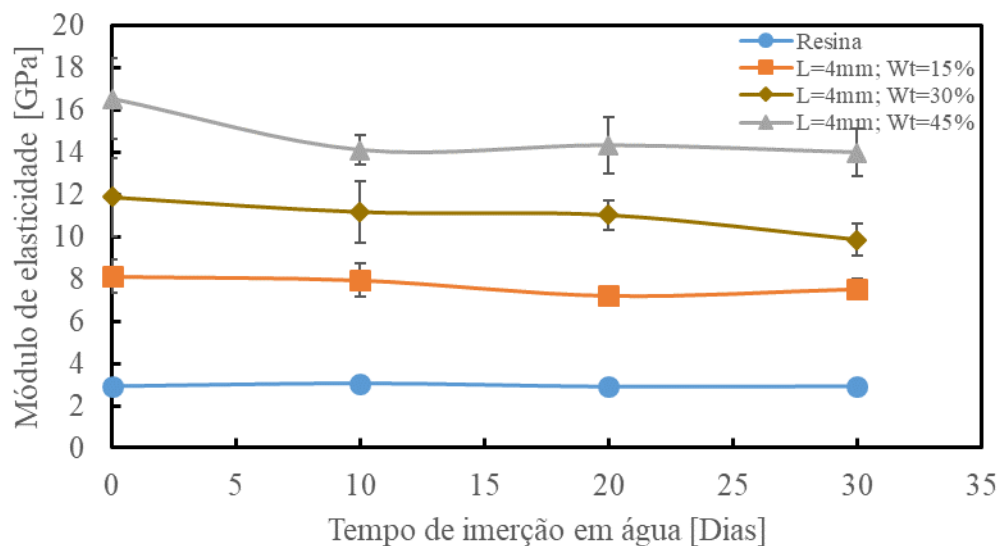


Figura 43 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4 e Resina.

Nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=4mm para 10, 20 e 30 dias de imersão em água, respetivamente. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta. A extensão varia muito pouco, mantendo-se praticamente constante.

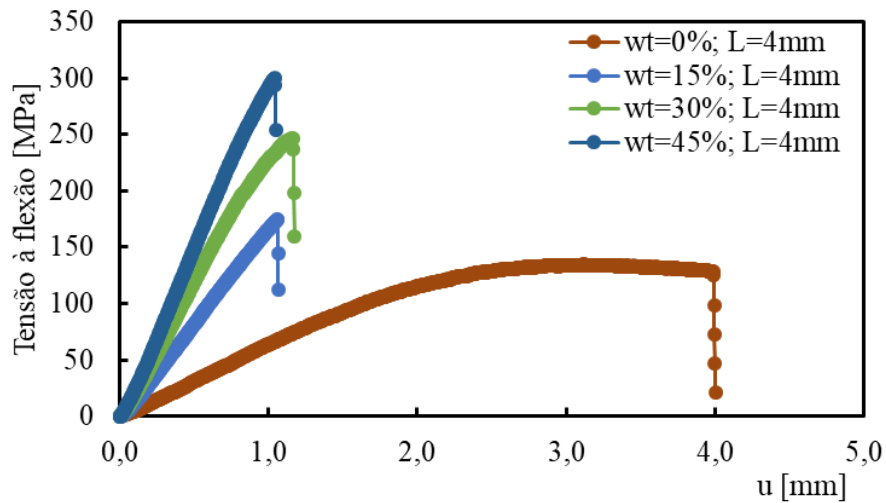


Figura 44 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=4mm

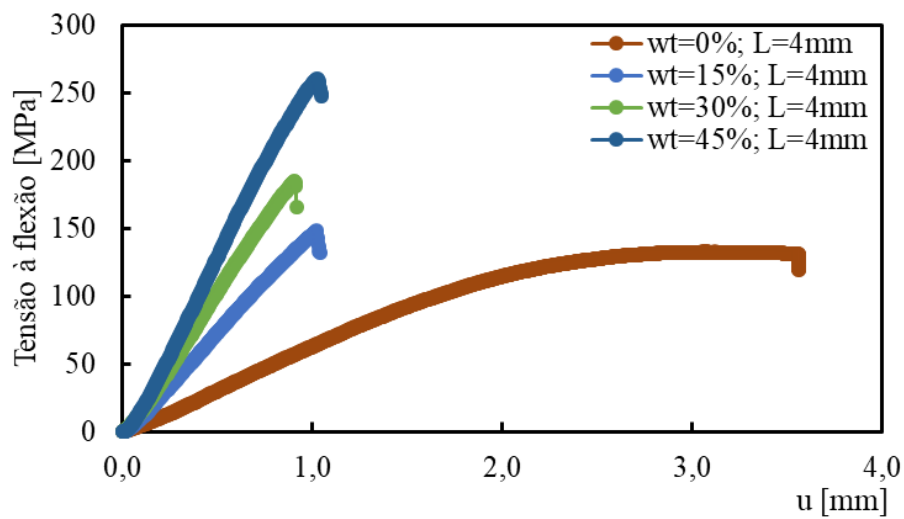


Figura 45 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=4mm

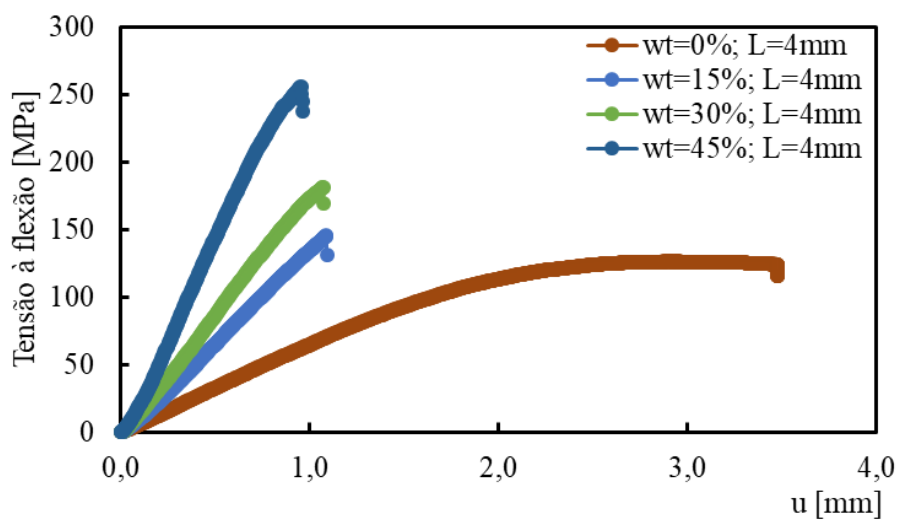


Figura 46 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=4mm

Na Tabela 8 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de imersão em água, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com $L=6$ mm. Neste tipo de fibras curtas de carbono com $L=6$ mm, podemos afirmar que a fração mássica de 15% é a que apresenta uma menor diminuição de valores de tensão máxima à flexão e de módulo de elasticidade, apresentando os valores 141,5 MPa e 129,3 MPa para 0 dias e 30 dias de imersão em água, respetivamente para a tensão máxima e para o módulo de elasticidade, os valores 6,9 GPa e 6,9 GPa para os mesmos 0 dias e 30 dias de imersão em água embora este último valor de 6,9 GPa nos 30 dias de imersão em água tenha um desvio padrão de 1,7 GPa.

Tabela 8 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de imersão em água para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm

	Dias de imersão em água	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP			60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	10		760,6	3,1	135,4	3,1	0,9992
DP			31,1	0,1	2,8	0,1	0,0002
Média	20		739,0	2,9	129,3	2,9	0,9994
DP			89,2	0,2	3,9	0,1	0,0001
Média	30		754,1	3,0	127,2	2,9	0,9996
DP			30,0	0,1	1,1	0,0	0,0002
Média	0	6mm_15%	689,2	1,1	141,5	6,9	0,9994
DP			132,7	0,1	27,1	0,8	0,0002
Média	10		588,3	1,0	119,4	6,2	0,9993
DP			111,7	0,1	21,9	0,5	0,0004
Média	20		646,6	1,1	133,8	6,3	0,9991
DP			104,2	0,1	23,5	0,8	0,0008
Média	30		632,9	1,0	129,3	6,9	0,9994
DP			155,1	0,0	32,3	1,7	0,0001
Média	0	6mm_30%	1022,9	0,8	210,7	11,4	0,9995
DP			86,3	0,2	19,4	0,6	0,0001
Média	10		1051,4	1,0	209,5	11,2	0,9987
DP			143,2	0,2	28,7	1,4	0,0011
Média	20		970,2	1,1	197,0	9,9	0,9994
DP			200,7	0,2	40,5	1,3	0,0001
Média	30		894,0	0,9	182,1	10,2	0,9992
DP			130,5	0,0	29,5	1,6	0,0004
Média	0	6mm_45%	1360,3	1,0	282,7	16,4	0,9989
DP			292,3	0,2	61,8	1,5	0,0004
Média	10		1256,6	1,1	258,4	14,6	0,9991
DP			209,9	0,1	44,1	1,3	0,0003
Média	20		1176,0	0,9	238,9	14,8	0,9990
DP			212,3	0,2	43,0	0,8	0,0004
Média	30		1213,8	1,1	251,3	13,3	0,9992
DP			125,5	0,2	26,7	0,6	0,0002

Com o aumento do tempo de imersão em água pode-se constatar que tanto a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{m\acute{a}x,flex\tilde{a}o}$) em três pontos bem como os valores de módulo de elasticidade ($E_{flex\tilde{a}o}$) diminuem (Figura 47 e Figura 48). Os pequenos picos ascendentes ou descendentes existentes podem ser explicados por possíveis desvios dos valores médios que são demonstrados através dos valores dos desvios padrão.

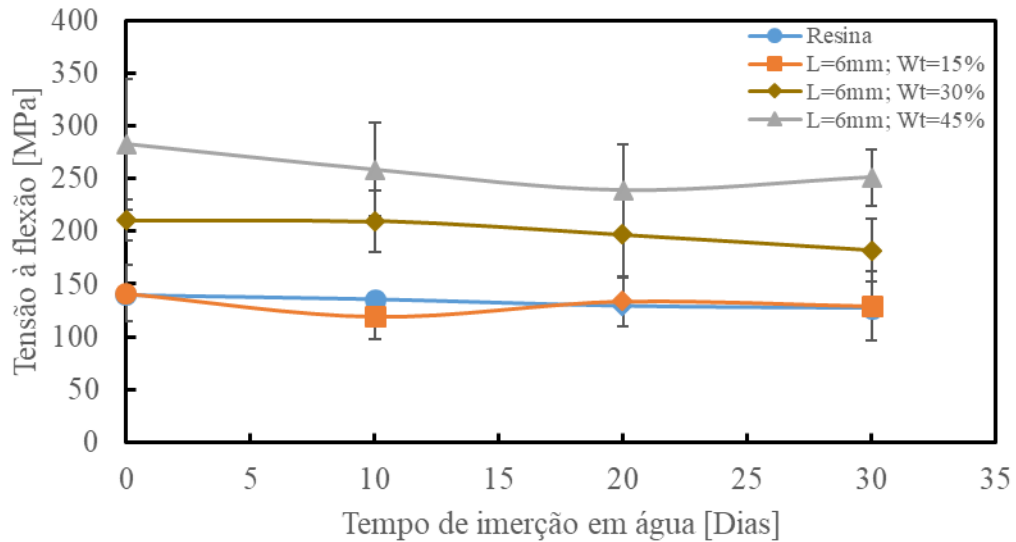


Figura 47 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6mm e Resina

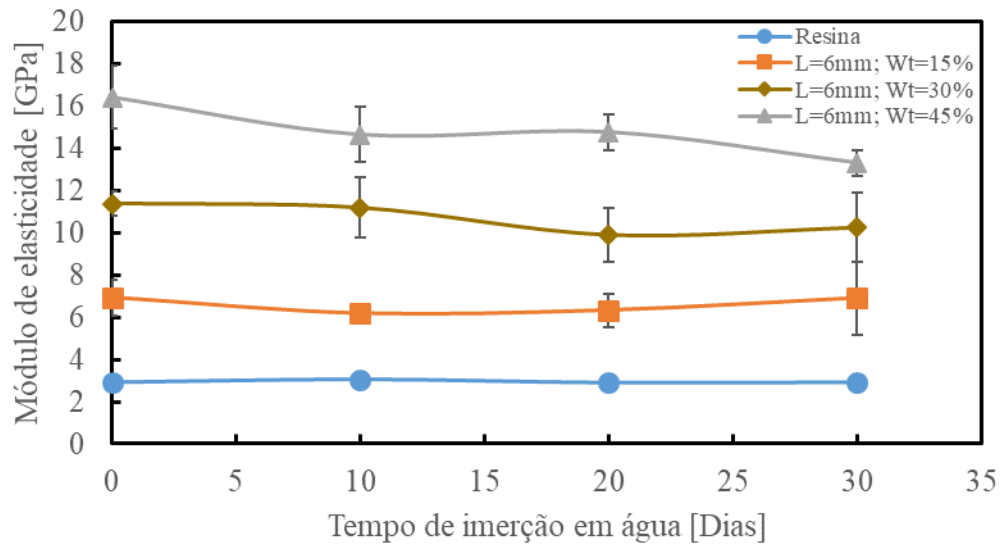


Figura 48 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de imersão em água para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=6 e Resina.

Nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=6mm para 10, 20 e 30 dias de imersão em água, respetivamente. Pode-se concluir que com o aumento da fração em peso de fibras curtas de carbono, a tensão máxima à flexão aumenta.

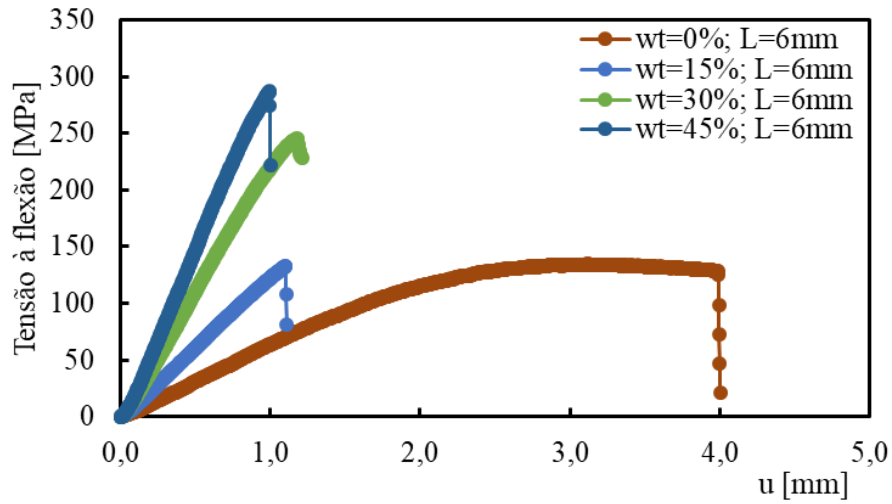


Figura 49 - Gráfico Tensão/Extensão T=10 dias em água L=6mm

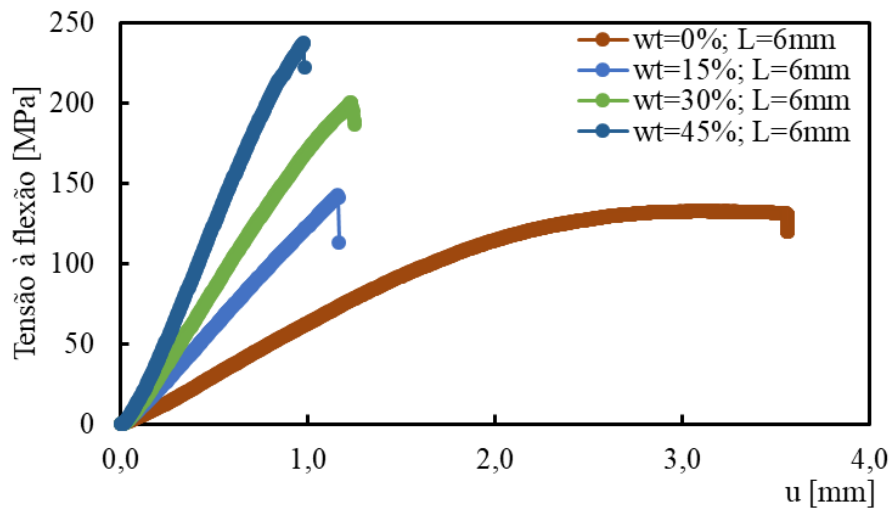


Figura 50 - Gráfico Tensão/Extensão T=20 dias em água L=6mm

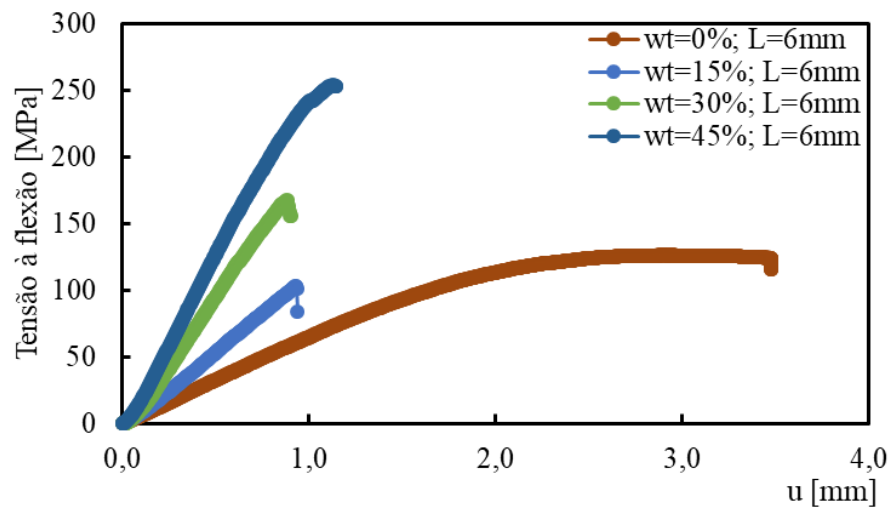


Figura 51 - Gráfico Tensão/Extensão T=30 dias em água L=6mm

4.2.2. Propriedades mecânicas em flexão em três pontos *versus* radiação UV

Neste subcapítulo serão apresentadas as propriedades mecânicas dos compósitos processados com fibras curtas de carbono versus o tempo de exposição a radiações UV, para cada fração em peso (15%, 30% e 45%) e para cada comprimento de fibra (2mm, 4mm e 6mm).

Na Tabela 9 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de exposição a radiações UV, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com L=2mm. Com o aumento do tempo de radiação por UV pode-se constatar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) em três pontos, aumenta para tempos de radiação por UV de 20 dias para a resina e para o compósito com 45% de fibras curtas de carbono com L=2mm. No caso dos dois outros materiais compósitos (15 e 30%) é possível constatar uma pequena tendência de diminuição das propriedades mecânicas nos primeiros dez dias de exposição às radiações ultravioletas, seguida de manutenção das propriedades mecânicas com o aumento do tempo de exposição às radiações ultravioletas (Figura 52).

Tabela 9 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=2mm

	Dias de exposição a radiações UV	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP			60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	10		783,9	3,1	136,9	2,9	0,9992
DP			96,3	0,1	2,2	0,1	0,0002
Média	20		815,8	3,1	144,8	3,1	1,7988
DP			105,9	0,1	3,0	0,1	1,3845
Média	30		852,8	2,9	141,4	3,0	0,9993
DP			69,8	0,1	2,9	0,1	0,0002
Média	0	2mm_15%	605,6	1,0	130,4	6,6	0,9991
DP			81,5	0,1	17,5	0,6	0,0002
Média	10		578,2	1,0	120,9	6,2	0,9996
DP			13,1	0,1	3,2	0,4	0,0000
Média	20		541,7	0,9	114,7	6,6	0,9996
DP			38,9	0,1	8,7	0,3	0,0001
Média	30		532,1	1,0	114,3	6,1	0,9995
DP			70,6	0,2	14,6	0,5	0,0002
Média	0	2mm_30%	786,0	0,9	162,4	10,7	0,9995
DP			85,6	0,1	17,1	1,0	0,0003
Média	10		748,4	0,9	152,6	8,9	0,9990
DP			56,9	0,1	13,5	0,6	0,0004
Média	20		686,3	0,8	144,7	9,9	0,9993
DP			116,7	0,1	25,4	0,9	0,0001
Média	30		678,8	0,8	140,2	9,9	0,9993
DP			100,2	0,1	17,9	0,1	0,0002
Média	0	2mm_45%	964,8	0,7	188,0	13,3	0,9994
DP			70,5	0,0	13,9	1,2	0,0002
Média	10		914,4	0,7	167,7	12,6	0,9970
DP			104,1	0,0	27,8	2,3	0,0017
Média	20		1073,2	1,0	196,9	10,5	0,9975
DP			51,1	0,1	9,0	0,6	0,0023
Média	30		1018,9	0,8	185,0	12,2	0,9975
DP			35,6	0,1	10,9	2,0	0,0020

Em termos do módulo ($E_{\text{flexão}}$) Figura 53) pode-se observar uma ligeira oscilação de valores no caso da resina e do compósito com 15% de fibras curtas de carbono. No compósito de 30% de fibras curtas de carbono, verifica-se uma diminuição dos valores do módulo até aos 10 dias exposição às radiações ultravioletas apresentando um aumento dos valores de rigidez para os 20 dias e uma manutenção desta propriedade com o aumento do tempo de radiação. No caso do compósito com 45% de fibras curtas de carbono, pode-se observar uma

diminuição dos valores de módulo até aos 20 dias de radiação por UV, apresentando um aumento dos valores de rigidez para os 30 dias de tempo de radiação.

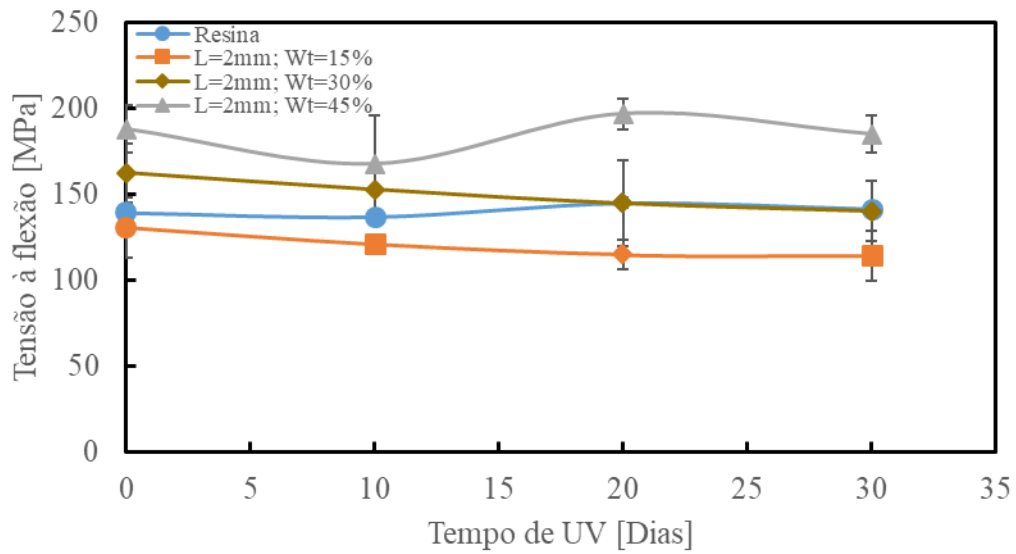


Figura 52 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina.

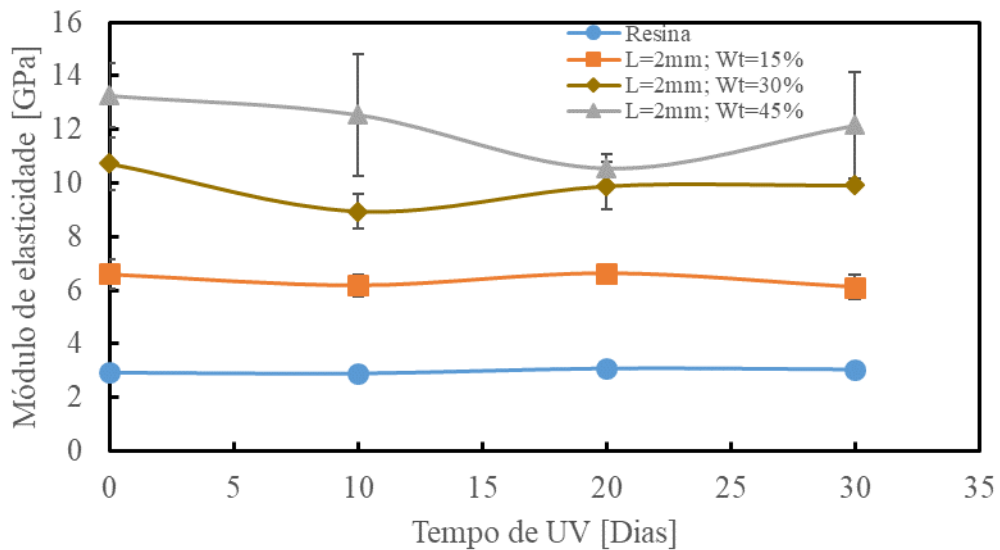


Figura 53 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=2mm e Resina.

Nas Figura 54, Figura 55 e Figura 56 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=2mm para 10, 20 e 30 dias de exposição às radiações ultravioletas, respetivamente.

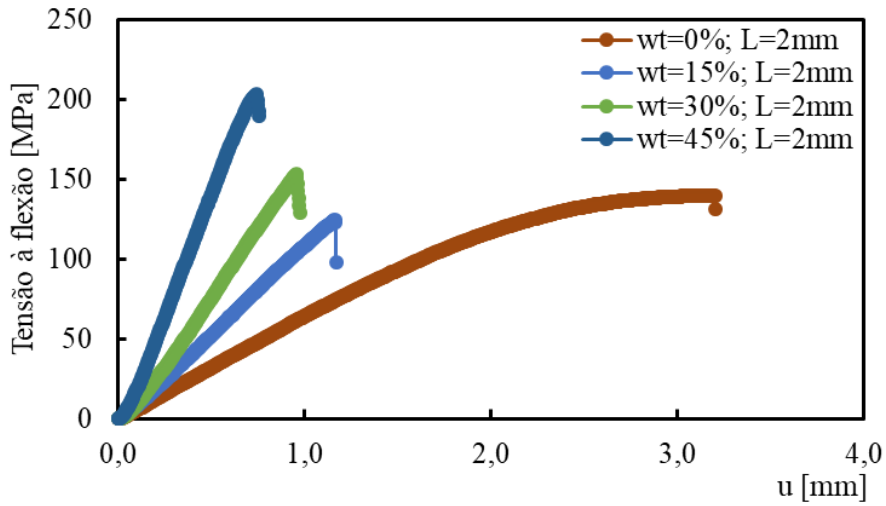


Figura 54 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm

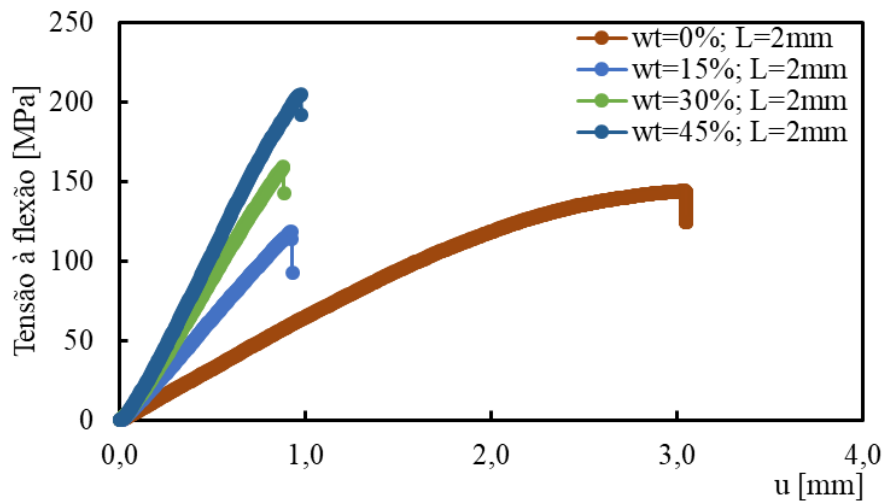


Figura 55 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm

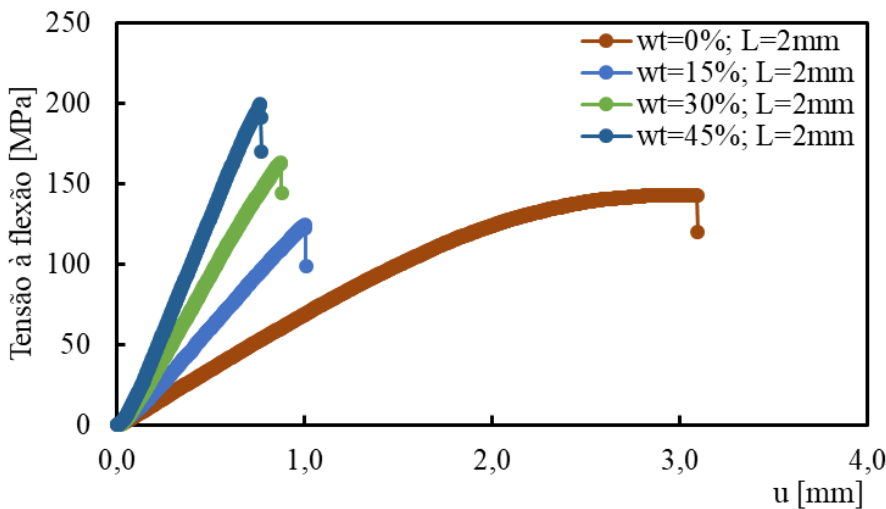


Figura 56 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=2mm

Na Tabela 10 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de exposição a radiações UV, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$. Com o aumento do tempo de radiação por UV pode-se observar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) em três pontos (Figura 57), diminui para tempos de radiação por UV de 10 dias para os compósitos com 30 e 45% de fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$, apresentando um aumento dos valores de rigidez para os 20 dias e uma manutenção desta propriedade com o aumento do tempo de radiação. No caso do material compósito com 15% é possível observar uma pequena tendência de diminuição das propriedades mecânicas nos primeiros dez dias de exposição às radiações ultravioletas, seguida de manutenção das propriedades mecânicas com o aumento do tempo de exposição às radiações ultravioletas.

Tabela 10 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm

	Dias de exposição a radiações UV	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP			60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	10		783,9	3,1	136,9	2,9	0,9992
DP			96,3	0,1	2,2	0,1	0,0002
Média	20		815,8	3,1	144,8	3,1	1,7988
DP			105,9	0,1	3,0	0,1	1,3845
Média	30		852,8	2,9	141,4	3,0	0,9993
DP			69,8	0,1	2,9	0,1	0,0002
Média	0	4mm_15%	711,6	1,0	151,0	7,9	0,9988
DP			120,5	0,2	28,4	0,8	0,0006
Média	10		698,5	1,0	142,7	7,8	0,9995
DP			147,4	0,2	27,1	0,2	0,0001
Média	20		675,8	1,0	140,7	7,8	0,9990
DP			112,9	0,2	25,3	0,5	0,0008
Média	30		688,0	1,0	142,3	7,3	0,9996
DP			102,5	0,1	20,6	0,3	0,0000
Média	0	4mm_30%	1087,6	1,0	221,7	11,9	0,9993
DP			175,2	0,1	43,6	1,8	0,0002
Média	10		1000,0	0,9	206,5	11,8	0,9993
DP			76,0	0,1	18,2	1,0	0,0002
Média	20		1046,7	0,9	211,7	11,9	0,9994
DP			63,2	0,0	19,7	1,1	0,0001
Média	30		1008,0	1,0	205,1	11,8	0,9991
DP			209,1	0,2	38,0	0,4	0,0007
Média	0	4mm_45%	1211,7	0,8	240,4	15,3	0,9991
DP			371,3	0,1	67,1	2,7	0,0002
Média	10		1068,2	0,8	217,3	14,2	0,9994
DP			150,6	0,1	27,0	1,0	0,0003
Média	20		1094,7	0,8	225,4	14,4	0,9990
DP			54,8	0,0	7,9	0,5	0,0004
Média	30		1165,5	0,8	227,4	14,4	0,9986
DP			101,2	0,1	24,6	1,2	0,0004

Em relação ao módulo ($E_{\text{flexão}}$), Figura 58) pode-se observar ligeiras oscilações com tendência a diminuir os valores do módulo de elasticidade com o aumento do tempo de exposição às radiações ultravioletas. No caso do compósito com 45% de fibras curtas de carbono, pode-se observar uma diminuição mais acentuada dos valores de módulo até aos 10 dias de radiação por UV.

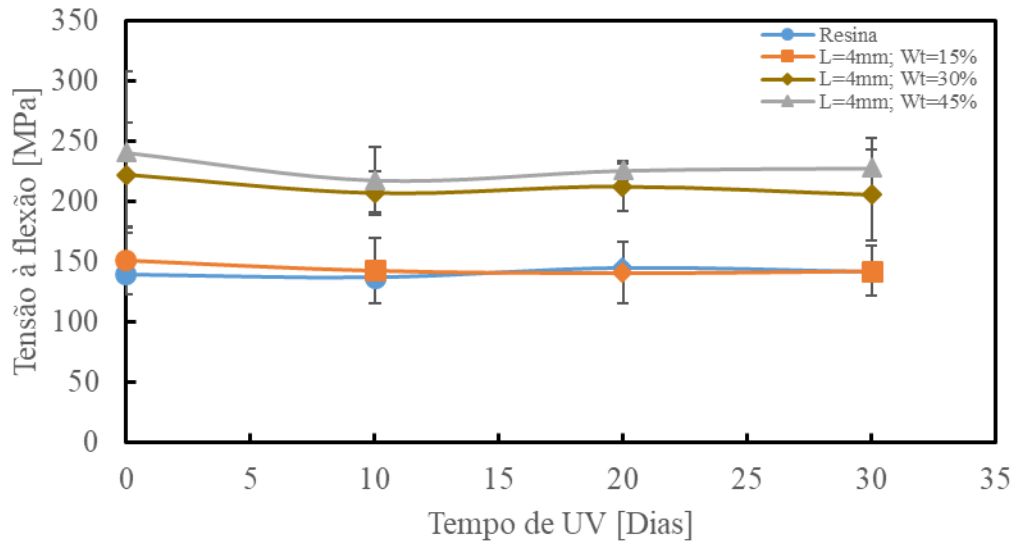


Figura 57 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina.

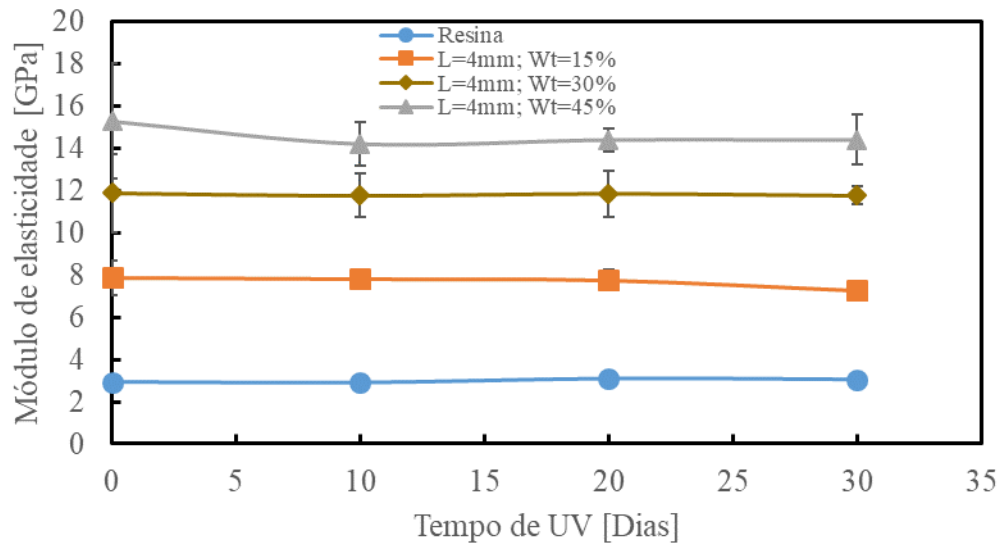


Figura 58 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com L=4mm e Resina.

Nas Figura 59, Figura 60 e Figura 61 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com L=4mm para 10, 20 e 30 dias de exposição às radiações ultravioletas, respetivamente.

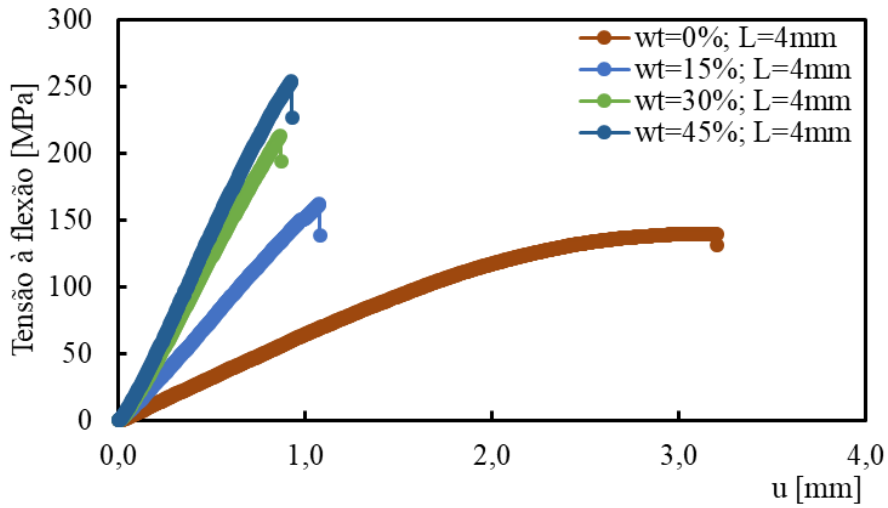


Figura 59 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=4mm

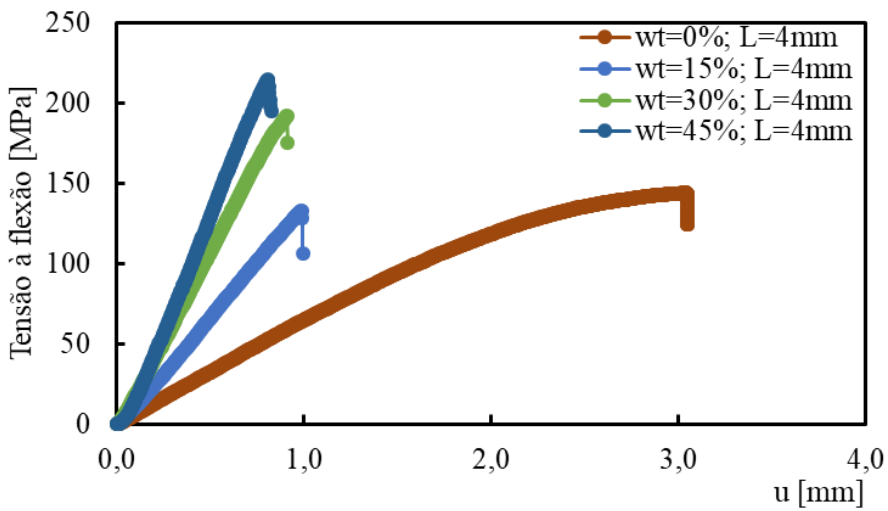


Figura 60 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 20 dias de exposição a radiação UV para L=4mm

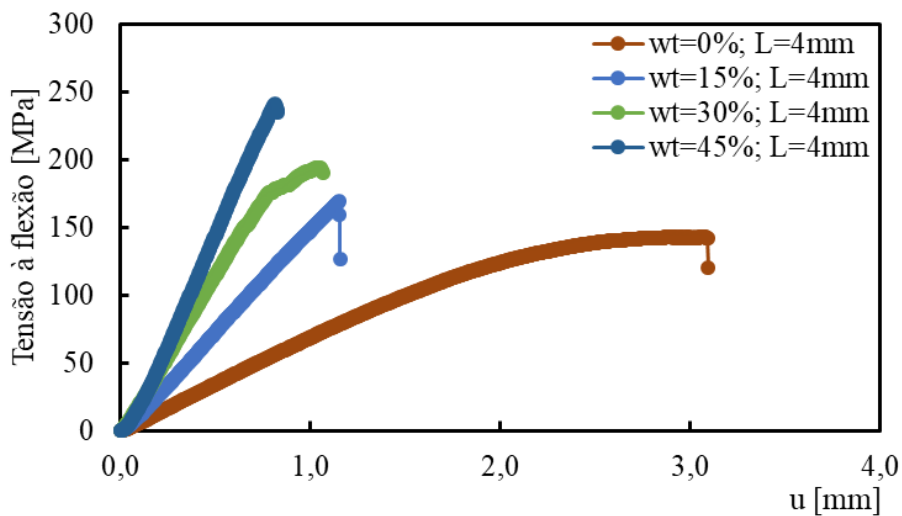


Figura 61 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 30 dias de exposição a radiação UV para L=4mm

Na Tabela 11 são apresentados os resultados relativos aos ensaios à flexão a três pontos versus tempo de exposição a radiações UV, assim como os desvios padrão obtidos para os materiais processados com fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$. Com o aumento do tempo de radiação por UV pode-se constatar que a tensão média máxima em flexão ($\sigma_{\text{máx.flexão}}$) (Figura 62) em três pontos apresenta uma tendência para diminuir com o aumento dos tempos de radiação por UV para os três compósitos com fibras curtas de carbono. No entanto, os compósitos com 15% de fibras curtas de carbono apresentam um ligeiro aumento dos valores de tensão ao fim de 20 dias, seguida de manutenção das propriedades mecânicas com o aumento do tempo de exposição às radiações ultravioletas.

Tabela 11 - Valores de carga máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade à flexão versus tempo de exposição a radiações UV para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=6mm

	Dias de exposição a radiações UV	Material e % de fibra	P máx [N]	u [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [GPa]	R
Média	0	Resina	910,4	3,0	139,3	2,9	0,9987
DP			60,6	0,0	1,8	0,0	0,0001
Média	10		783,9	3,1	136,9	2,9	0,9992
DP			96,3	0,1	2,2	0,1	0,0002
Média	20		815,8	3,1	144,8	3,1	1,7988
DP			105,9	0,1	3,0	0,1	1,3845
Média	30		852,8	2,9	141,4	3,0	0,9993
DP			69,8	0,1	2,9	0,1	0,0002
Média	0	6mm_15%	758,0	1,1	156,2	7,3	0,9994
DP			67,8	0,0	10,4	0,5	0,0001
Média	10		681,6	1,1	135,2	6,9	0,9998
DP			98,7	0,1	15,1	0,5	0,0000
Média	20		731,1	1,2	145,7	6,4	0,9990
DP			54,3	0,2	10,1	0,4	0,0009
Média	30		687,8	1,1	143,3	6,8	0,9994
DP			46,2	0,1	8,4	0,6	0,0003
Média	0	6mm_30%	1022,9	0,8	210,7	11,4	0,9995
DP			86,3	0,2	19,4	0,6	0,0001
Média	10		1019,8	1,1	212,5	10,6	0,9993
DP			172,0	0,1	36,2	1,7	0,0001
Média	20		956,0	0,9	198,2	9,7	0,9994
DP			367,0	0,2	76,6	3,0	0,0001
Média	30		848,3	1,0	175,9	9,8	0,9994
DP			141,5	0,2	26,5	1,8	0,0001
Média	0	6mm_45%	1360,3	1,0	282,7	16,4	0,9989
DP			292,3	0,2	61,8	1,5	0,0004
Média	10		1331,6	1,0	268,8	14,9	0,9988
DP			224,6	0,1	43,7	1,5	0,0009
Média	20		1186,1	0,9	243,2	15,0	0,9990
DP			210,7	0,1	45,1	1,7	0,0006
Média	30		1027,8	0,8	213,6	13,5	0,9990
DP			203,1	0,1	42,6	1,4	0,0003

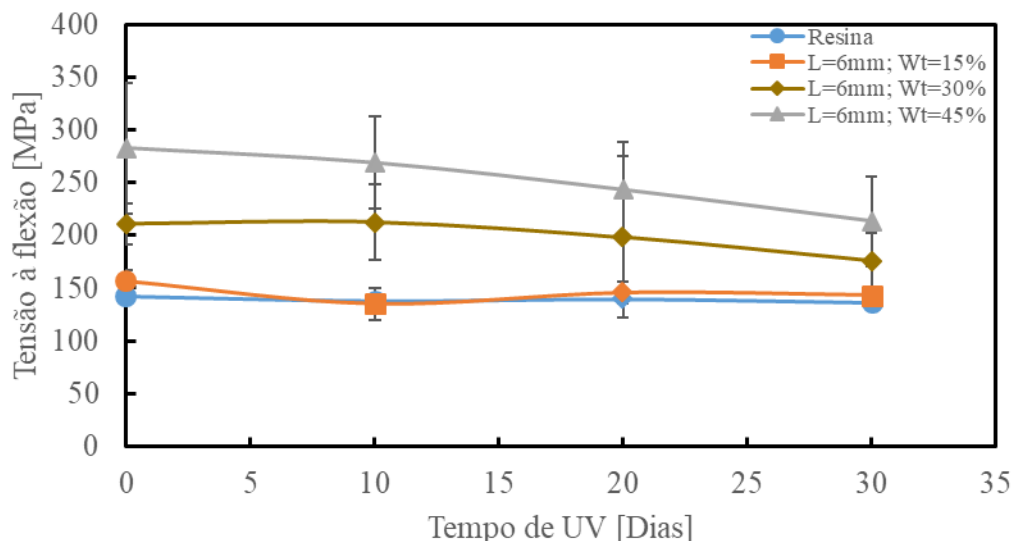


Figura 62 - Valores de tensão média máxima à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e Resina.

Em relação ao módulo ($E_{\text{flexão}}$), Figura 63) pode-se observar ligeiras oscilações com tendência a diminuir os valores com o aumento do tempo de exposição às radiações ultravioletas. No caso do compósito com 45% de fibras curtas de carbono, pode-se observar um aumento dos valores do módulo ao fim de 20 dias, seguida de uma nova diminuição para os 30 dias de exposição às radiações ultravioletas.

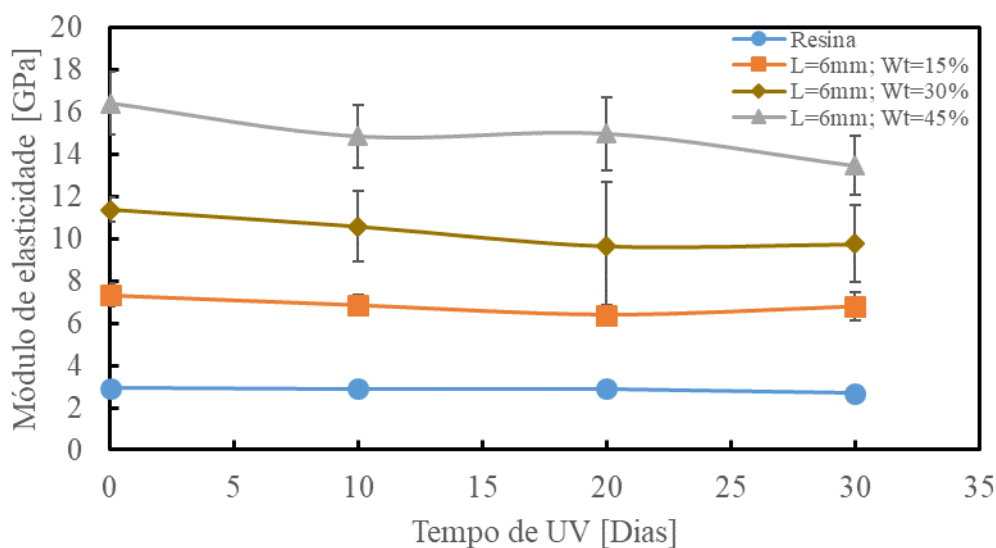


Figura 63 - Valores de módulo de elasticidades à flexão versus tempo de exposição às radiações ultravioletas para os compósitos com fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e Resina.

Nas Figura 64, Figura 65 e Figura 66 pode-se observar as curvas típicas de tensão versus extensão para as diferentes frações em peso dos compósitos com $L=6\text{mm}$ para 10, 20 e 30 dias de exposição às radiações ultravioletas, respetivamente.

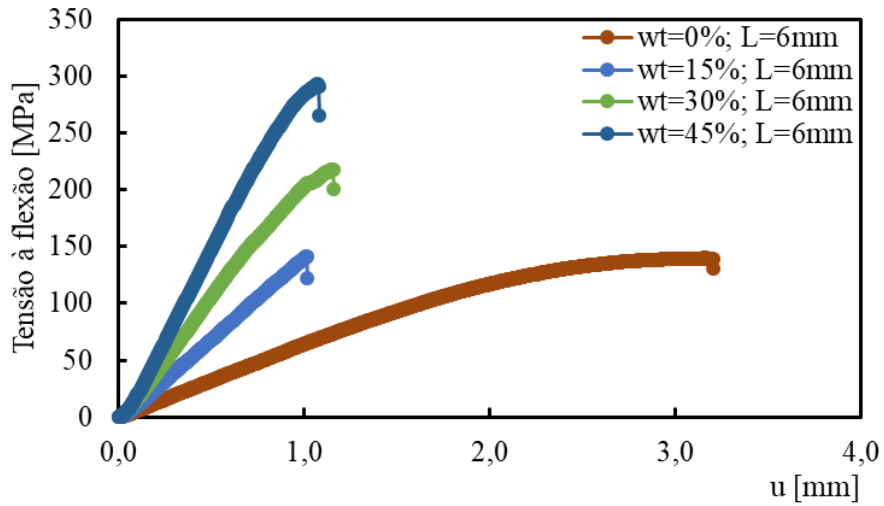


Figura 64 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 10 dias de exposição a radiação UV para L=6mm

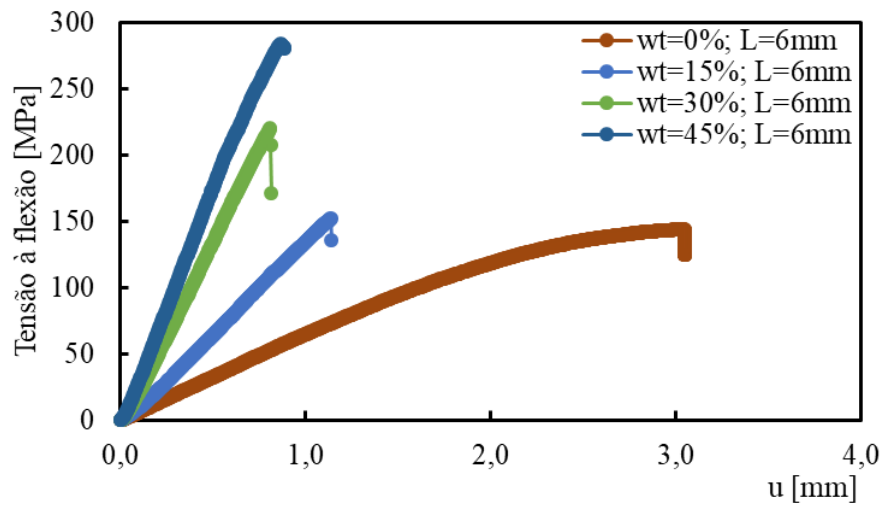


Figura 65 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 20 dias de exposição a radiação UV para L=6mm

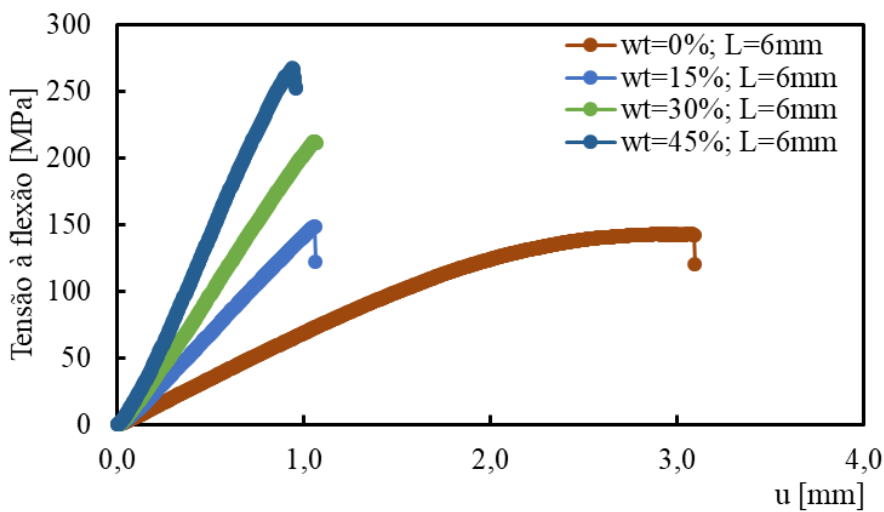


Figura 66 - Curvas típicas de Tensão/Extensão com 30 dias de exposição a radiação UV para L=6mm

4.3. Fratura

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura versus fração mássica são apresentados na Tabela 12, para os compósitos processados com fibras curtas de carbono. Os resultados são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão, dos fatores de fratura K_Q e G_Q .

Através da tabela podemos concluir que ambos os fatores aumentam com o aumento da fração mássica das fibras curtas de carbono. Isto verifica-se para os três comprimentos de fibra diferentes ($L=2\text{mm}$, $L=4\text{mm}$ e $L=6\text{mm}$).

Tabela 12 - Valores de K_Q e G_Q versus fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono ($L=2\text{mm}$, $L=4\text{mm}$ e $L=6\text{mm}$) e resina

Material	Wt[%]	K_Q [MPa.mm ^{0,5}]	Desvio Padrao [KQ]	G_Q [J/mm ²]	Desvio Padrao [GQ]
Resina	0	99,62	3,22	3,19	0,16
2mm	15	127,51	13,48	2,67	0,45
	30	271,95	27,54	6,69	0,50
	45	316,25	37,87	6,75	1,37
4mm	15	230,74	19,85	6,67	1,66
	30	352,89	39,65	11,33	2,04
	45	508,37	63,67	16,67	3,94
6mm	15	171,38	15,63	3,74	0,75
	30	384,57	26,42	14,93	4,75
	45	626,88	68,59	21,57	5,66

Nas Figura 67 e Figura 68 podemos ainda concluir que as fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$, são as que têm um aumento mais acentuado de ambos os fatores, no caso das fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$, estas têm um crescimento quase linear ou constante, enquanto as fibras curtas de carbono de $L=2\text{mm}$ observa-se um crescimento acentuado de ambos os fatores na fração mássica de 30% e um aumento menor nas frações mássicas de 15% e 45%.

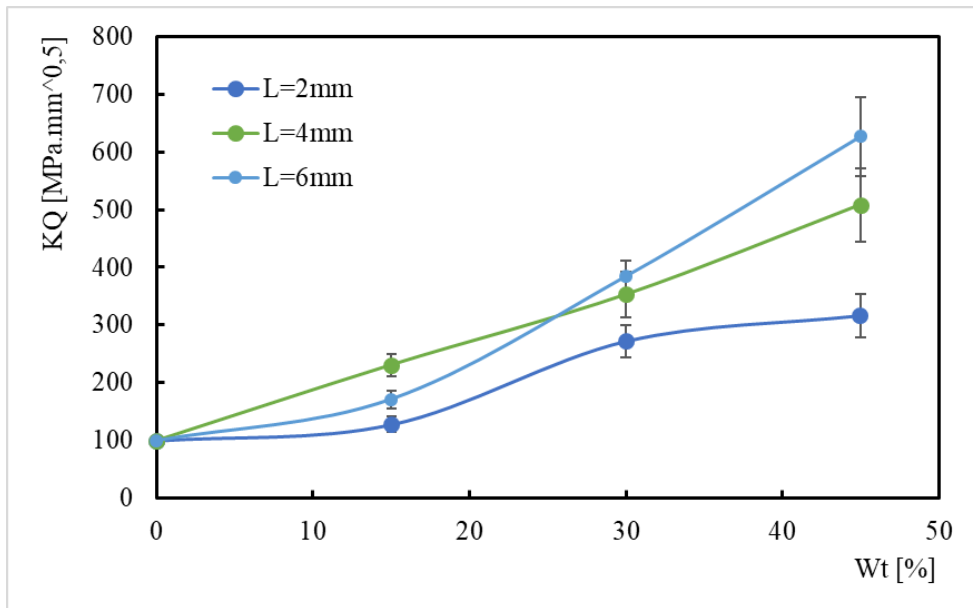


Figura 67 - Valores K_Q versus fração mássica para os compósitos com fibras curtas de carbono com $L=2mm$, $L=4mm$, $L=6mm$ e Resina.

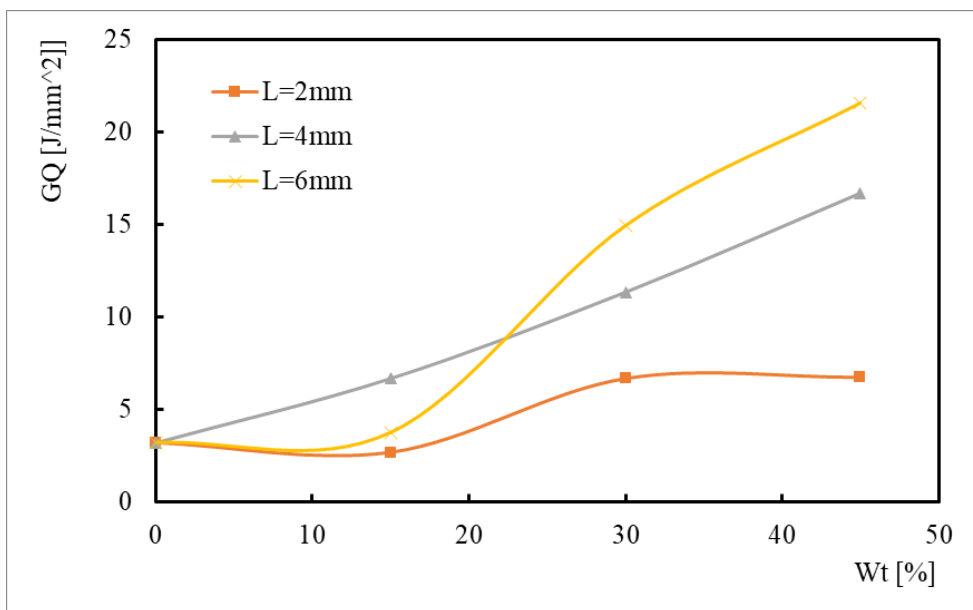


Figura 68 - Valores G_Q versus fração mássica para os compósitos com fibras curtas de carbono com $L=2mm$, $L=4mm$, $L=6mm$ e Resina.

4.4. DMA

A partir dos ensaios de DMA é possível obter as curvas de variação do módulo de elasticidade E' (*Storage Modulus*), do módulo de perda ou módulo viscoso E'' (*Loss Modulus*) e da tangente de perda $\tan \delta$ (*Tan Delta*) em função da temperatura.

Através da Tabela 13 pode-se observar que o *Storage Modulus* e o *Loss Modulus* à temperatura de 25°C aumentam com a fração mássica do material, enquanto a temperatura de transição vítrea, segundo os gráficos de *Tan Delta*, diminui com o aumento da fração mássica para os compósitos processados com fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$. É possível ainda de observar que o *Storage Modulus* (para 80°C) diminui, relativamente ao valor para 25°C, com o aumento da temperatura.

Tabela 13 - Valores de *Storage Modulus*, *Loss Modulus* e *Tan Delta* versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono $L=2\text{mm}$

L=2 mm Fração massica	E', Storage Modulus, p/25°C [GPa]	E', Storage Modulus, p/80°C [GPa]	E'', Loss Modulus, p/25°C [GPa]	Tg [°C] (curva tan delta)
0	3,23	0,06	0,07	82
15	6,31	1,49	0,09	80
30	9,98	3,44	0,14	80
45	10,19	2,56	0,16	77

Na Figura 69 pode-se observar a variação do *Storage modulus* com o aumento da temperatura para os vários compósitos de matriz epóxi processados com fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$. Os resultados obtidos nestes ensaios mostram que os valores apresentam a mesma tendência observada nos ensaios estáticos de flexão em 3 pontos: os compósitos, para a temperatura de 20°C, os valores do módulo aumentam com a fração mássica de fibras curtas de carbono.

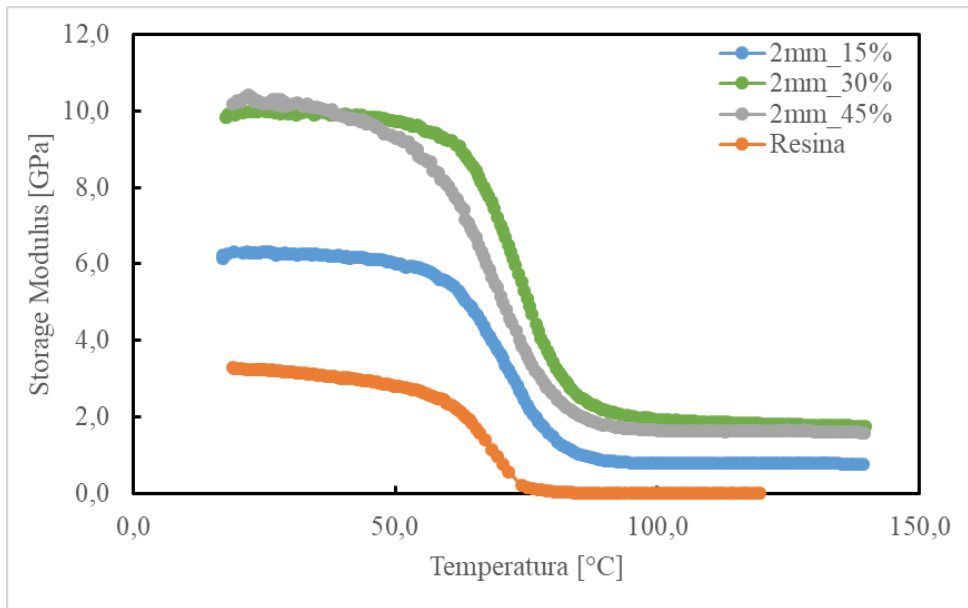


Figura 69 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$ e para a resina.

Na Figura 70 são apresentadas as curvas de variação de *Tan Delta* versus temperatura para os compósitos processados com fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$. A partir dos picos destas curvas é possível determinar as temperaturas de transição vítrea destes materiais processados. Foi também possível observar que existe uma tendência para diminuir a T_g com o reforço das fibras curtas de carbono, pois estas são boas condutoras de calor.

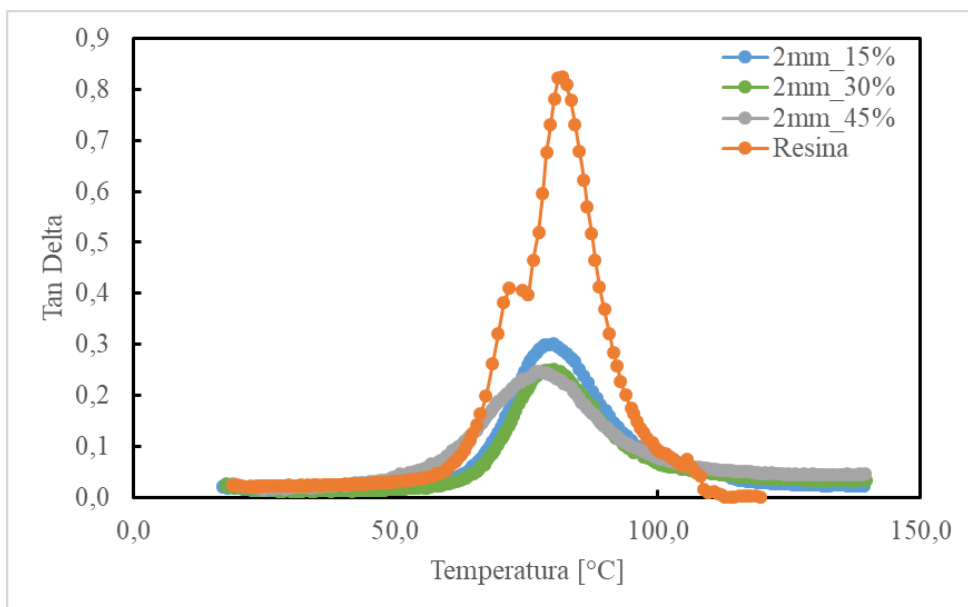


Figura 70 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$ e para a resina.

Através da Tabela 14 observa-se que o *Storage Modulus* e o *Loss Modulus* à temperatura de 25°C aumentam com a fração mássica do material, enquanto a temperatura

de transição vítrea, segundo os gráficos de *Tan Delta*, diminui com o aumento da fração mássica para os compósitos processados com fibras curtas de carbono com L=4mm. É possível ainda de observar que o Storage Modulus (para 80°C) diminui, relativamente ao valor para 25°C, com o aumento da temperatura.

Tabela 14 - Valores de Storage Modulus, Loss Modulus e Tan Delta versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono L=4mm

L=4 mm Fração mássica	E', Storage Modulus, p/25°C [GPa]	E', Storage Modulus, p/80°C [GPa]	E'', Loss Modulus, p/25°C [GPa]	Tg [°C] (curva tan delta)
0	3,23	0,06	0,07	82
15	7,51	1,96	0,09	81
30	10,90	3,13	0,12	80
45	15,49	3,99	0,15	77

Na Figura 71 pode-se observar a variação do *Storage modulus* com o aumento da temperatura para os vários compósitos de matriz epóxi processados com fibras curtas de carbono com L=4mm. Os resultados obtidos nestes ensaios mostram que os valores apresentam a mesma tendência observada nos ensaios estáticos de flexão em 3 pontos: os compósitos, para a temperatura de 20°C, os valores do módulo aumentam com a fração mássica de fibras curtas de carbono.

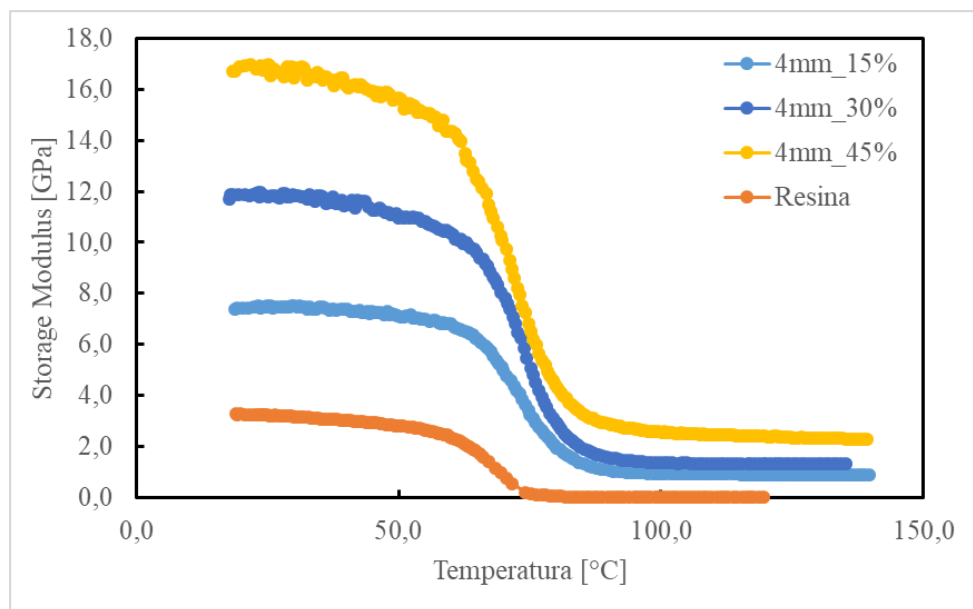


Figura 71 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com L=4mm e para a resina.

Na Figura 72 são apresentadas as curvas de variação de *Tan Delta* versus temperatura para os compósitos processados com fibras curtas com L=4mm. A partir dos picos destas

curvas é possível determinar as temperaturas de transição vítrea destes materiais processados.

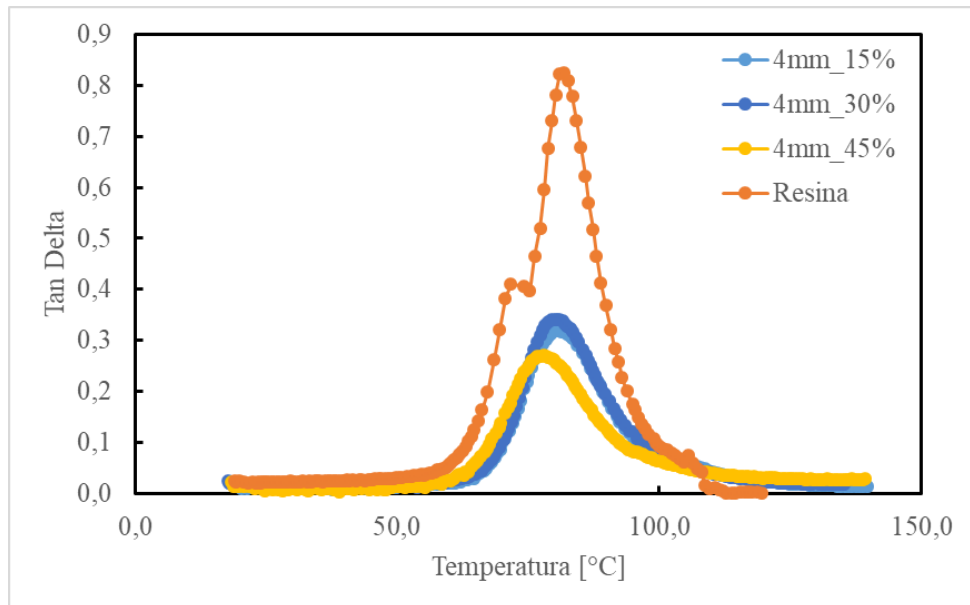


Figura 72 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$ e para a resina.

Através da Tabela 15 pode-se observar que o *Storage Modulus* e o *Loss Modulus* à temperatura de 25°C aumentam com a fração mássica do material, enquanto a temperatura de transição vítrea, segundo os gráficos de *Tan Delta*, diminui com o aumento da fração mássica para os compósitos processados com fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$. É possível ainda de observar que o *Storage Modulus* (para 80°C) diminui, relativamente ao valor para 25°C , com o aumento da temperatura.

Tabela 15 - Valores de *Storage Modulus*, *Loss Modulus* e *Tan Delta* versus tempo de fração mássica para os vários materiais compósitos com fibras curtas de carbono $L=6\text{mm}$

L=6 mm Fração massica	E', Storage Modulus, p/25°C [GPa]	E', Storage Modulus, p/80°C [GPa]	E'', Loss Modulus, p/25°C [GPa]	Tg [°C] (curva tan delta)
0	3,23	0,06	0,07	82
15	6,10	1,25	0,09	80
30	12,11	2,81	0,13	80
45	22,83	10,72	0,27	79

Na Figura 73 pode-se observar a variação do *Storage modulus* com o aumento da temperatura para os vários compósitos de matriz epóxi processados com fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$. Os resultados obtidos nestes ensaios mostram que os valores apresentam a mesma tendência observada nos ensaios estáticos de flexão em 3 pontos: os

compósitos, para a temperatura de 20°C, os valores do módulo aumentam com a fração mássica de fibras curtas de carbono.

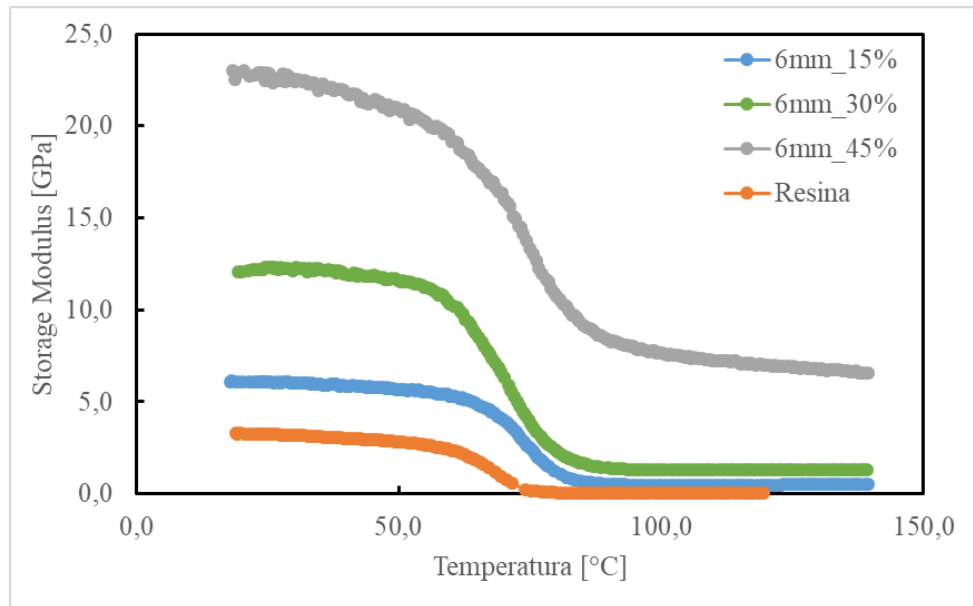


Figura 73 - Variação do Storage modulus (E') versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e para a resina.

Na Figura 74 são apresentadas as curvas de variação de *Tan Delta* versus temperatura para os compósitos processados com fibras curtas com $L=6\text{mm}$. A partir dos picos destas curvas é possível determinar as temperaturas de transição vítrea destes materiais processados. Foi também possível observar que existe uma tendência para diminuir a T_g com o reforço das fibras curtas de carbono, pois estas são boas condutoras de calor.

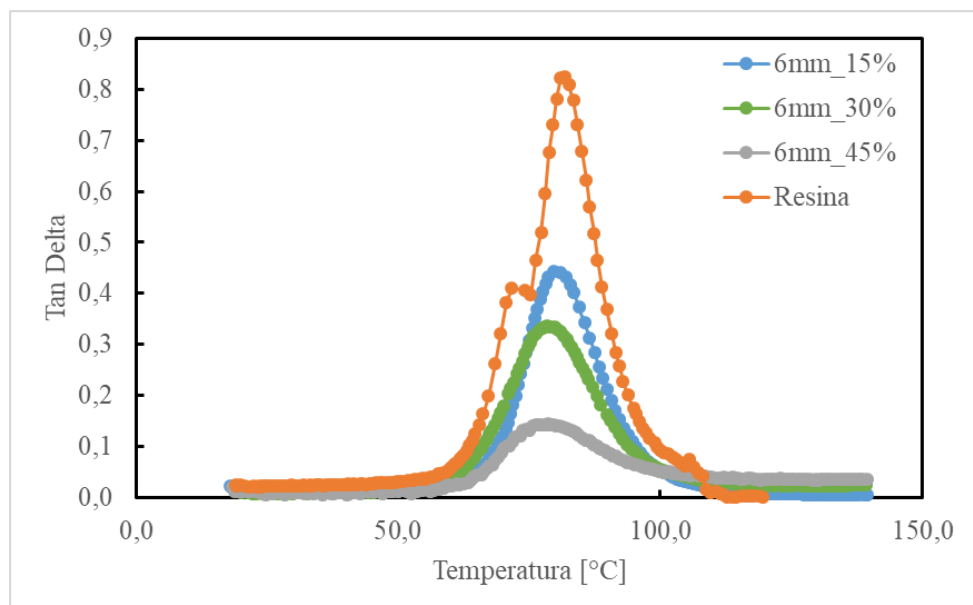


Figura 74 - Variação do Tan Delta versus temperatura para os compósitos de fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e para a resina.

4.5. Furação

Foram realizados ensaios de furação com diferentes velocidades angulares e diâmetros das ferramentas por forma a determinar os valores de dano nas superfícies das diferentes placas. Nos gráficos apresentados nos seguintes subcapítulos, pode-se verificar variações aleatórias. As variações observadas podem ser explicadas com base em diferenças de distribuição de fibras nas superfícies das placas.

4.5.1. Resina

Na Figura 75 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de resina. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano para a velocidade da ferramenta de 2000 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm é possível observar que a velocidade ideal de corte serão os 3000r.p.m. visto que é a velocidade que menos dano causa na entrada e saída de ferramenta. No caso da ferramenta de 4mm observa-se um aumento abrupto dos valores de dano de saída para a velocidade da ferramenta de 1500 r.p.m. e os restantes valores são igualmente altos.

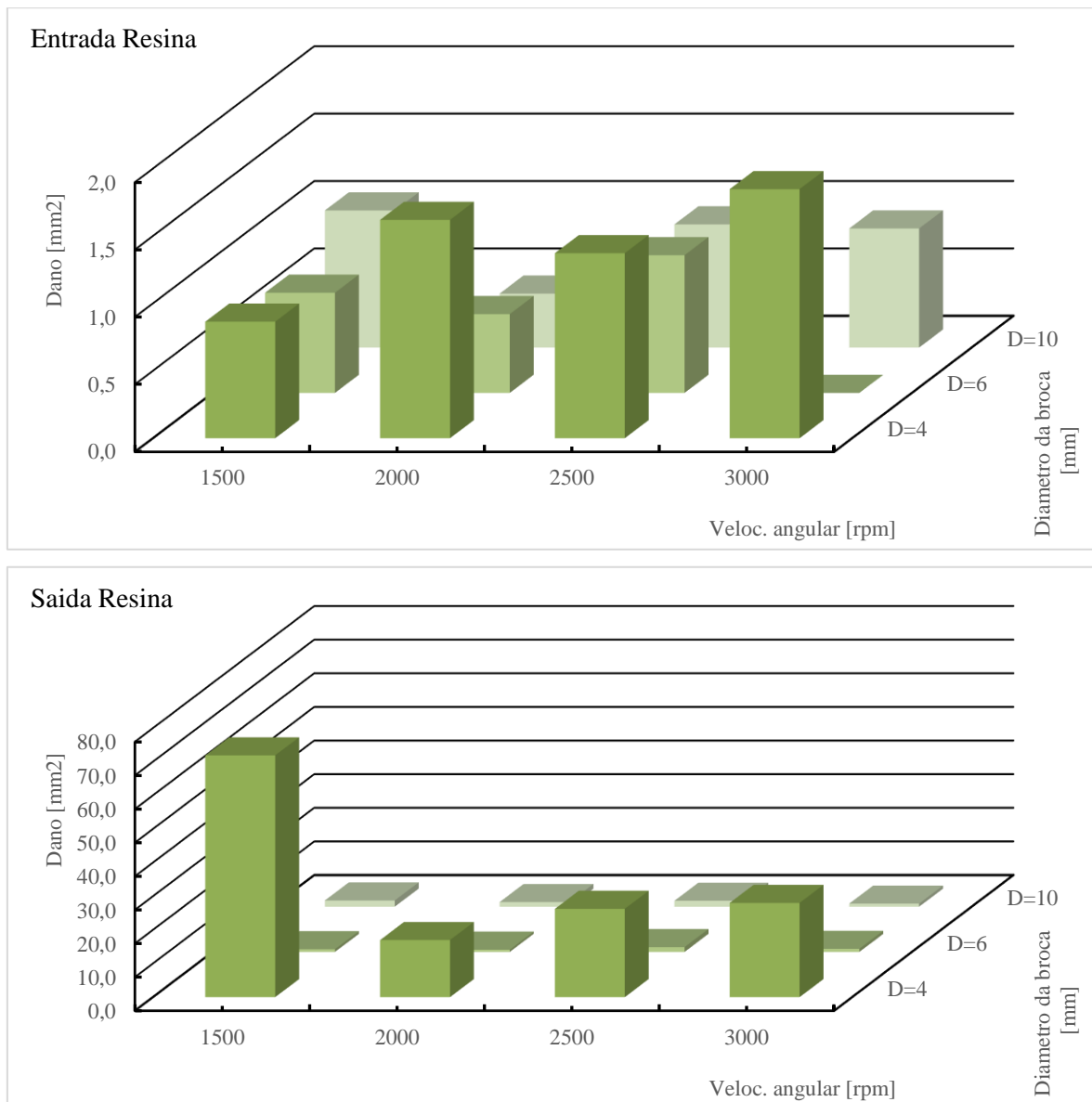


Figura 75 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de resina

4.5.2. Fibras curtas de carbono com L=2mm

Na Figura 76 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolvidas dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com L=2mm e Wf =15%. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m, mesmo com este aumento, esta é a velocidade que apresenta uma diminuição dos valores de dano de saída, considerando-a assim, a melhor velocidade para esta ferramenta. Para um

diâmetro de 6mm é possível observar que a velocidade ideal de corte serão os 2000r.p.m. visto que é a velocidade que menos dano causa na entrada e saída de ferramenta. No caso da ferramenta de 4mm observa-se uma diminuição dos valores de dano de saída com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m., concluindo assim, que a velocidade de 2500 r.p.m. é a velocidade indicada para esta ferramenta.

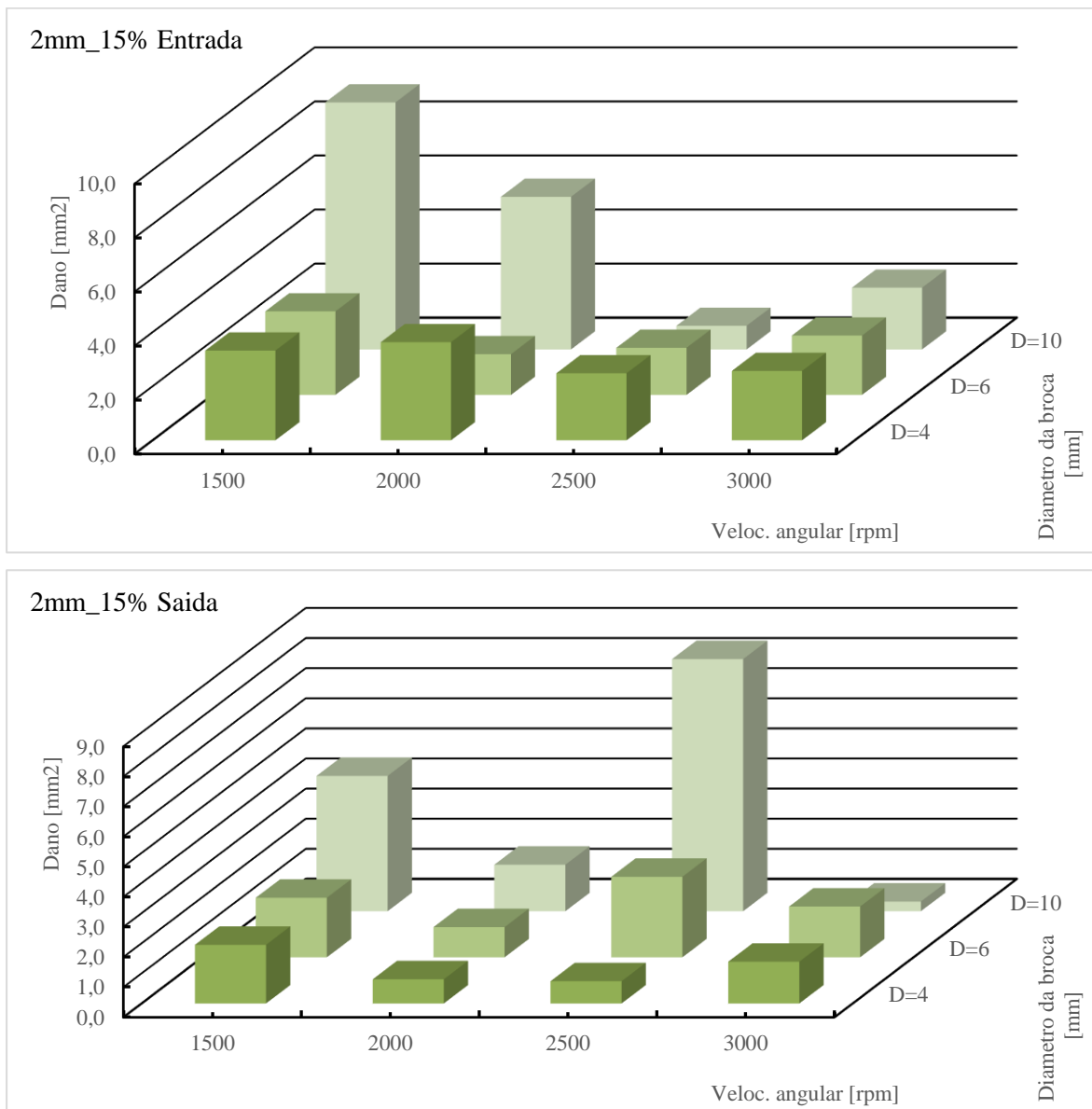


Figura 76 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 15% de fração de fibra

Na Figura 77 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$ e $W_f=30\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de saída com a diminuição da velocidade de 3000 r.p.m. para os 2000 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 1500 r.p.m., tendo em conta que os valores de dano na entrada estão muito equiparados, é possível considerar que a melhor velocidade para esta ferramenta seria as 2000 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm observa-se uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m., nos danos de saída é a velocidade de 3000 r.p.m. é a que apresenta menos dano. No caso da ferramenta de 4mm é possível observar que a velocidade ideal de corte serão os 3000r.p.m. visto que é a velocidade que menos dano causa na entrada e saída de ferramenta

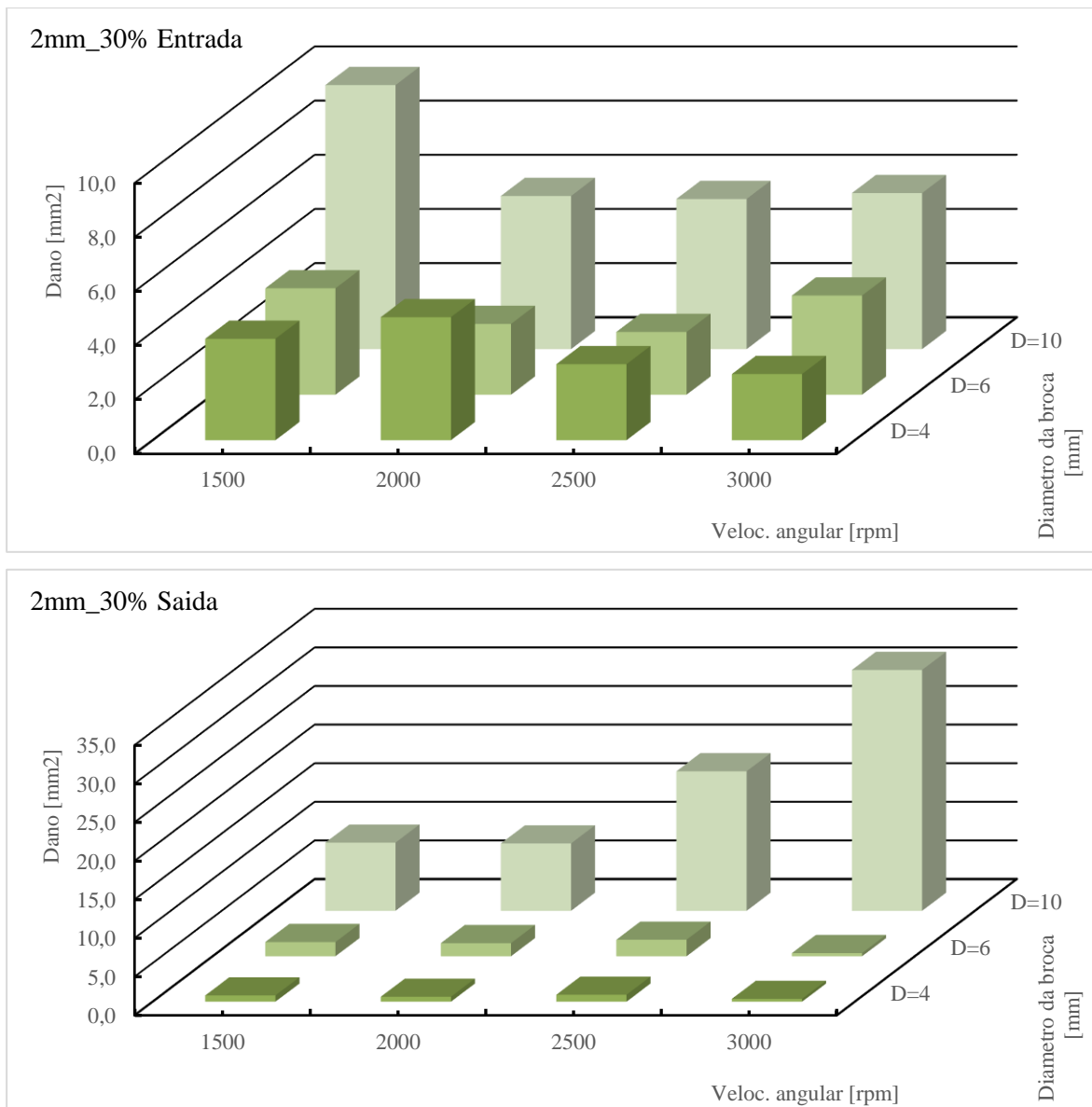


Figura 77 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 30% de fração de fibra

Na Figura 78 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=2\text{mm}$ e $W_f=45\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar um aumento dos valores de dano de entrada para uma velocidade da ferramenta de 1500 r.p.m., no caso dos danos de saída esta é a velocidade (1500 r.p.m.), que apresenta menos dano. Para um diâmetro de 6mm observa-se uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 2000 r.p.m. para os 3000 r.p.m., nos danos de saída é possível observar uma diminuição dos valores de dano com a diminuição da velocidade de 3000 r.p.m. para os 2000 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 1500

r.p.m.. No caso da ferramenta de 4mm é possível observar que a velocidade ideal de corte serão os 2000r.p.m. visto que é a velocidade que menos dano causa na entrada e saída de ferramenta

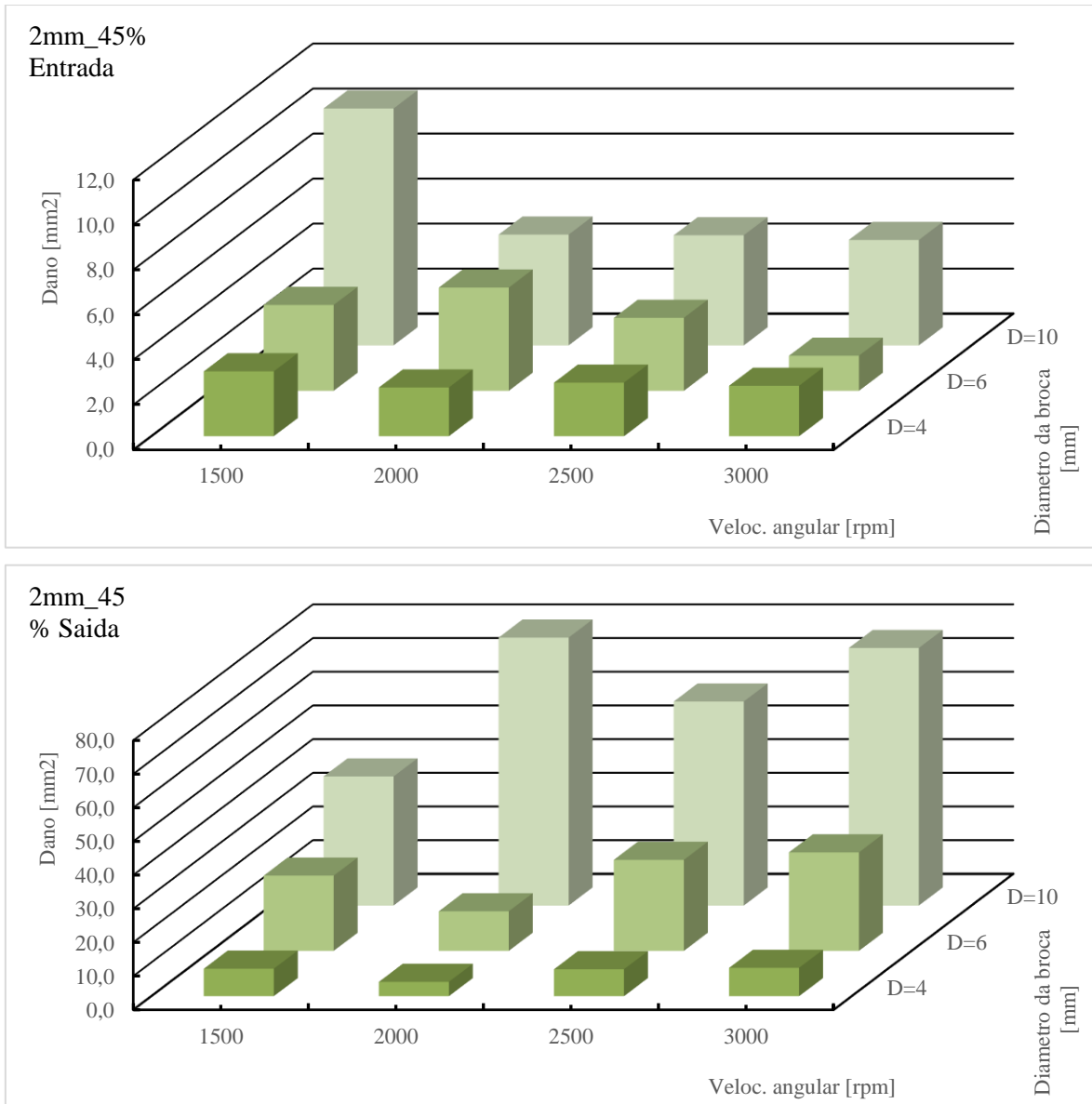


Figura 78 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 2mm com 45% de fração de fibra

4.5.3. Fibras curtas de carbono com L=4mm

Na Figura 79 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$ e $W_f=15\%$. Para um diâmetro de 10mm somando os danos de entrada com os danos de saída das respectivas velocidades, é possível afirmar que a velocidade de 2000 r.p.m. é a que permite menos danos (entrada e saída). Para um diâmetro de 6mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m., enquanto nos danos de saída é possível verificar uma diminuição dos valores de dano com diminuição da velocidade de 2500 r.p.m. para os 1500 r.p.m.. No caso da ferramenta de 4mm somando os danos de entrada com os danos de saída das respectivas velocidades, é possível afirmar que a velocidade de 1500 r.p.m. é a que permite menos danos (entrada e saída).

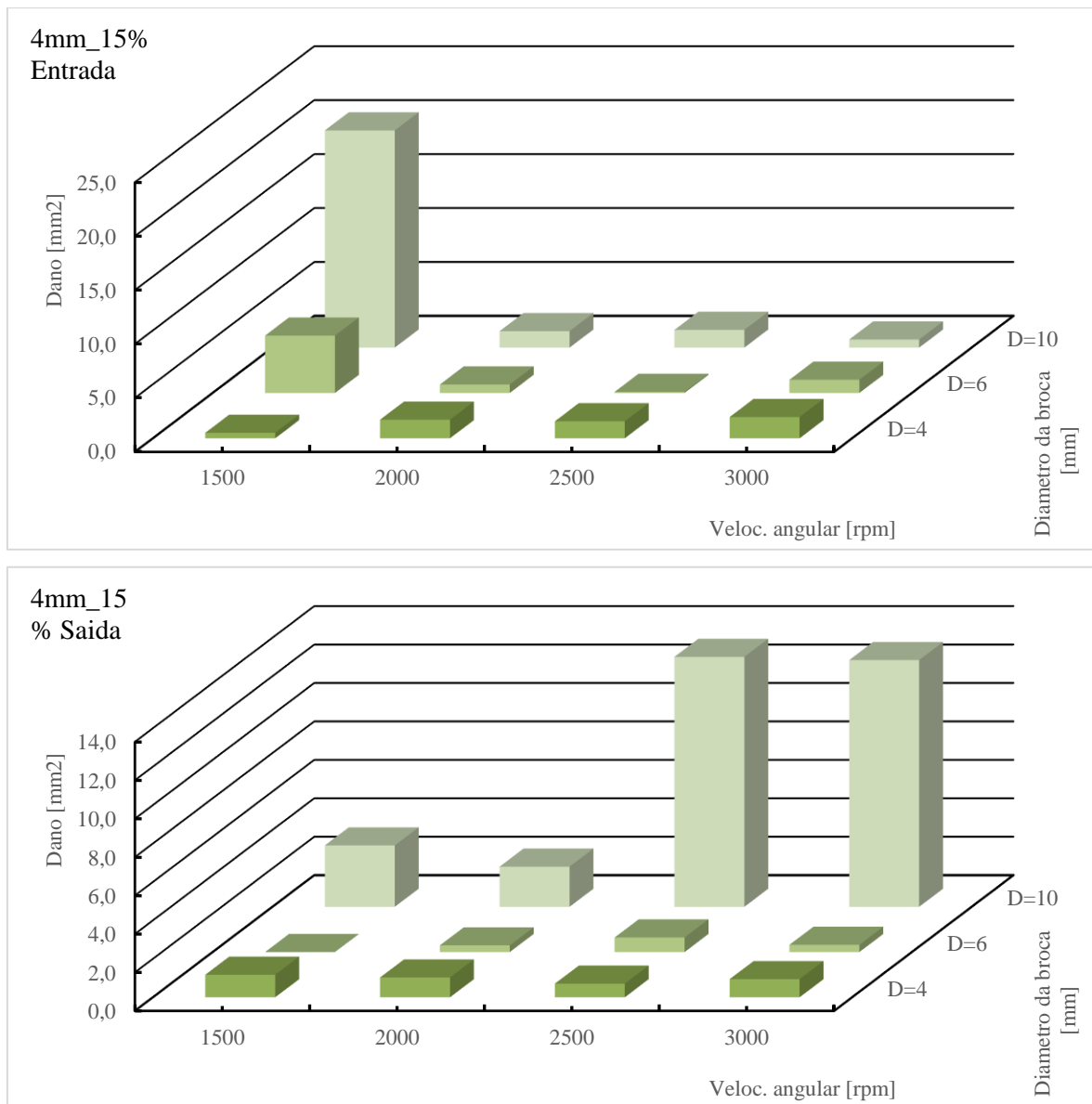


Figura 79 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 4mm com 15% de fração de fibra

Na Figura 80 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$ e $W_f=30\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m., enquanto nos danos de saída é possível verificar uma diminuição dos valores de dano com diminuição da velocidade de 2500 r.p.m. para os 1500 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada para uma velocidade da ferramenta de 2500 r.p.m., enquanto nos danos de saída é possível verificar uma diminuição

do dano com o aumento da velocidade de 2000 r.p.m. para os 3000 r.p.m. No caso da ferramenta de 4mm, somando os danos de entrada com os danos de saída das respectivas velocidades, é possível afirmar que a velocidade de 2000 r.p.m. é a que permite menos danos (entrada e saída).

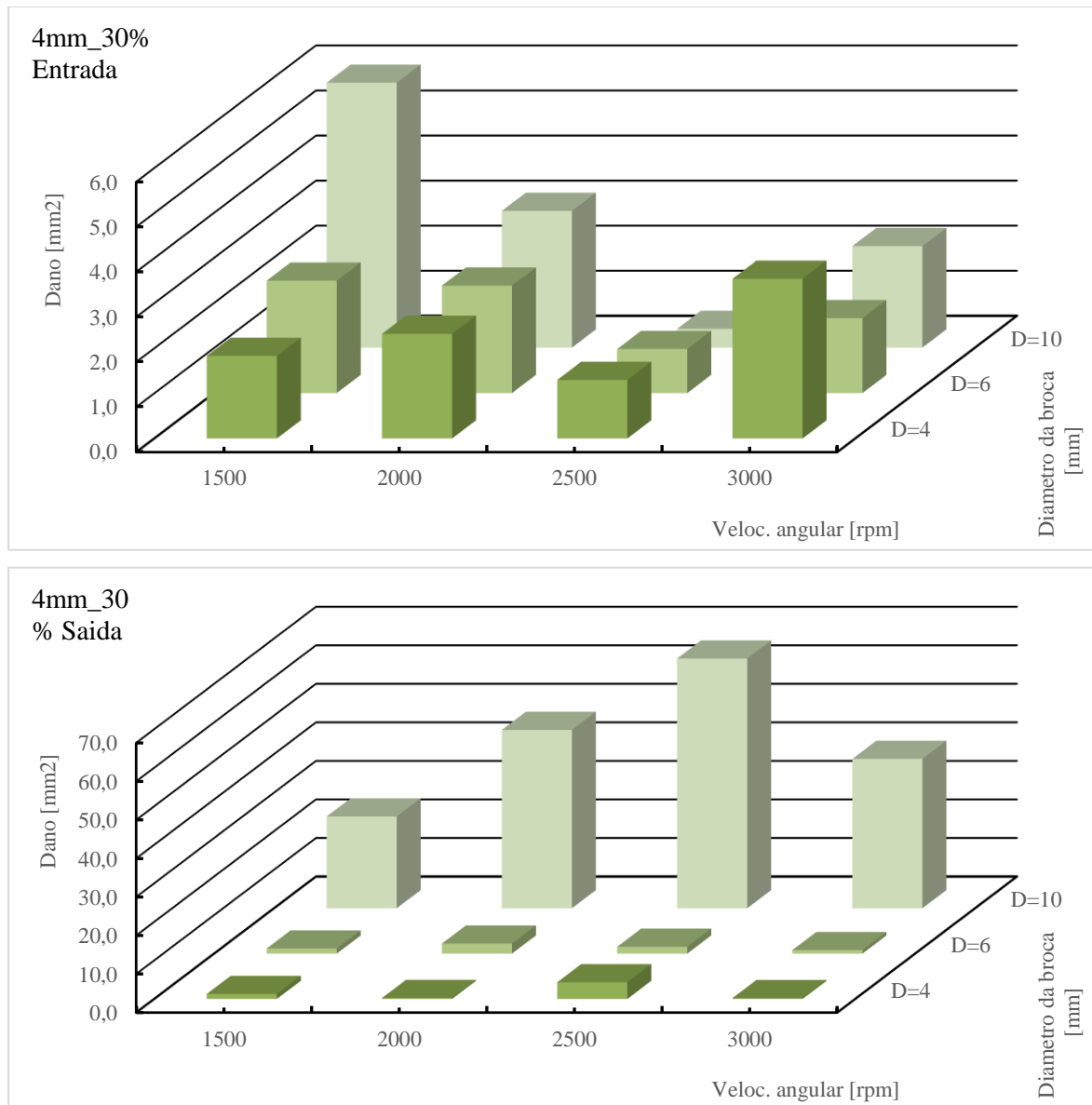


Figura 80 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de composto de 4mm com 30% de fração de fibra

Na Figura 81 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=4\text{mm}$ e $W_f=45\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de saída para uma velocidade da

ferramenta de 3000 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm é possível observar um aumento dos valores de dano para uma velocidade da ferramenta de 2500 r.p.m.. No caso da ferramenta de 4mm, são significativamente mais baixos que os obtidos com as outras ferramentas.

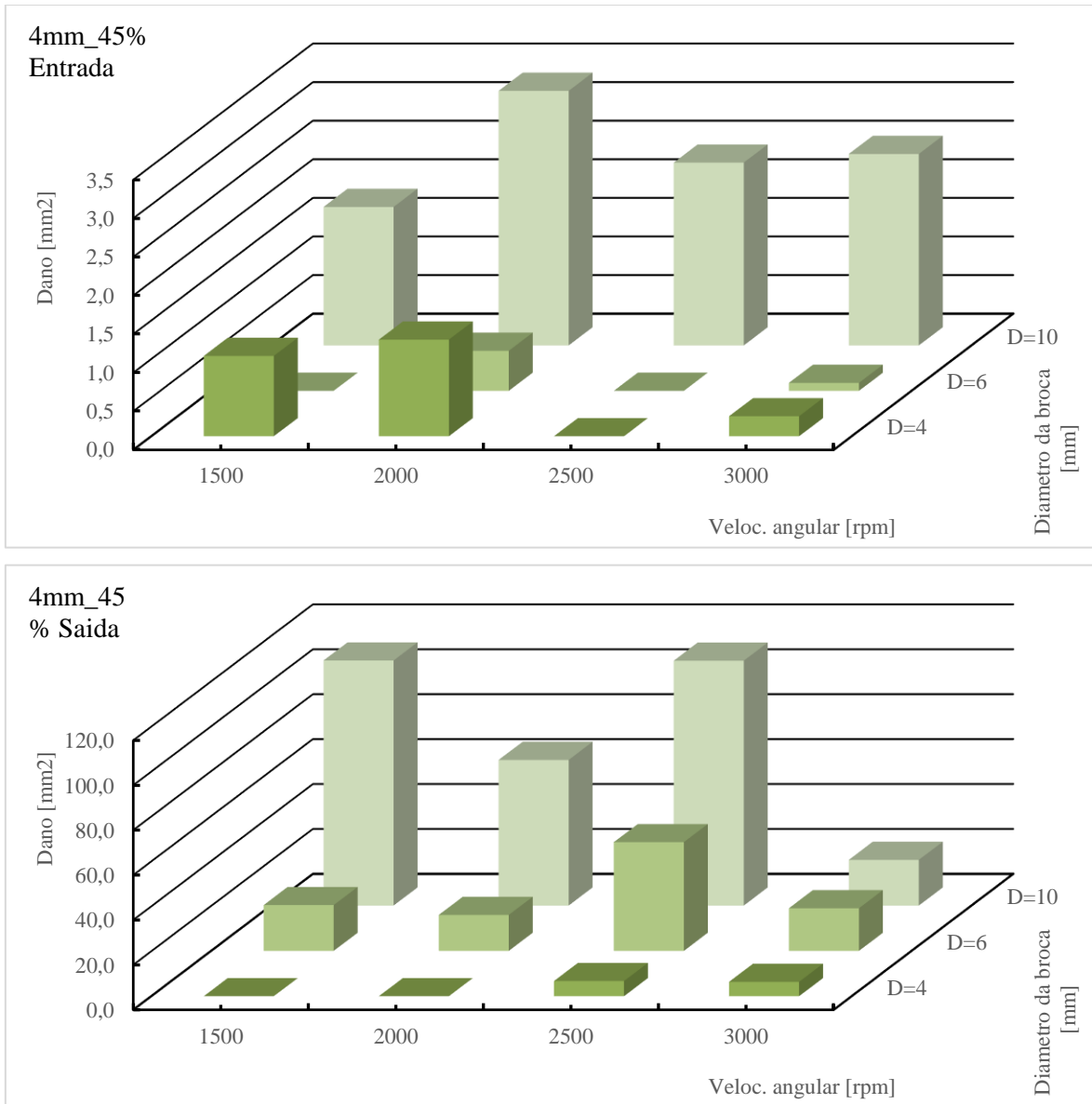


Figura 81 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 4mm com 45% de fração de fibra

4.5.4. Fibras curtas de carbono com L=6mm

Na Figura 82 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e $W_f=15\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m, nos danos de saída é possível observar um aumento do dano para uma velocidade da ferramenta de 2500 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano, tanto de entrada como de saída, com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m. tendo um ligeiro aumento com os 3000 r.p.m. No caso da ferramenta de 4mm, é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada para uma velocidade de 2500 r.p.m. e observa-se uma diminuição dos valores de dano de saída com o aumento da velocidade de 2000 r.p.m. para os 3000 r.p.m., concluindo assim, que a velocidade de 2500 r.p.m. é a velocidade indicada para esta ferramenta.

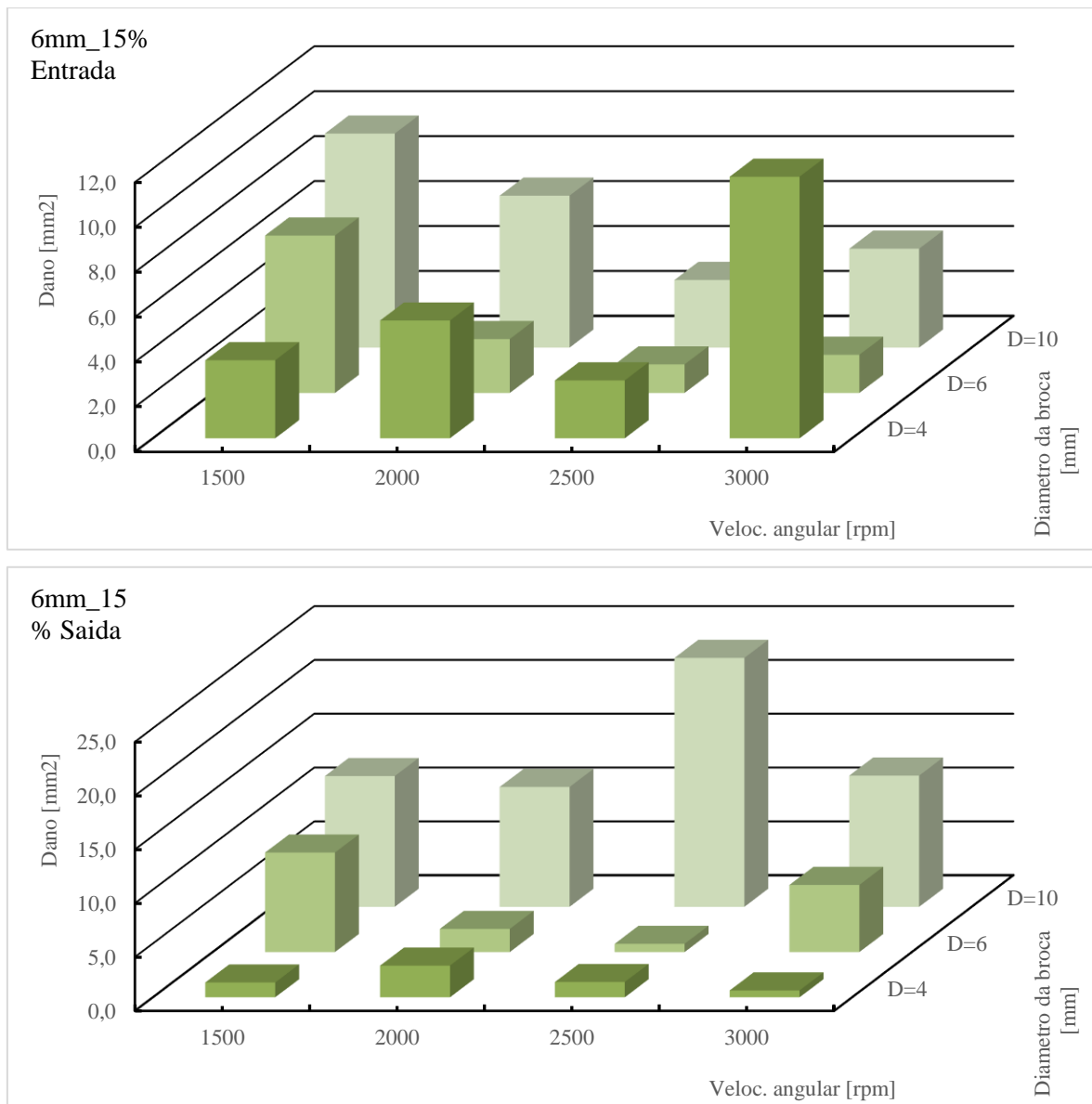


Figura 82 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 15% de fração de fibra

Na Figura 83 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e $W_f=30\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar que o menor valor de dano ocorre para uma velocidade de 2500 r.p.m., nos danos de saída é possível verificar uma diminuição dos valores de dano com a diminuição da velocidade. Para um diâmetro de 6mm é possível observar que o menor valor de dano de entrada ocorre para uma velocidade de 2500 r.p.m., enquanto que nos danos de saída é possível observar um aumento dos valores de dano para uma velocidade da ferramenta de 2500 r.p.m.. No caso da ferramenta de 4mm, é possível observar uma

diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 2000 r.p.m. para os 3000 r.p.m., nos danos de saída é possível verificar uma diminuição dos valores de dano com a diminuição da velocidade.

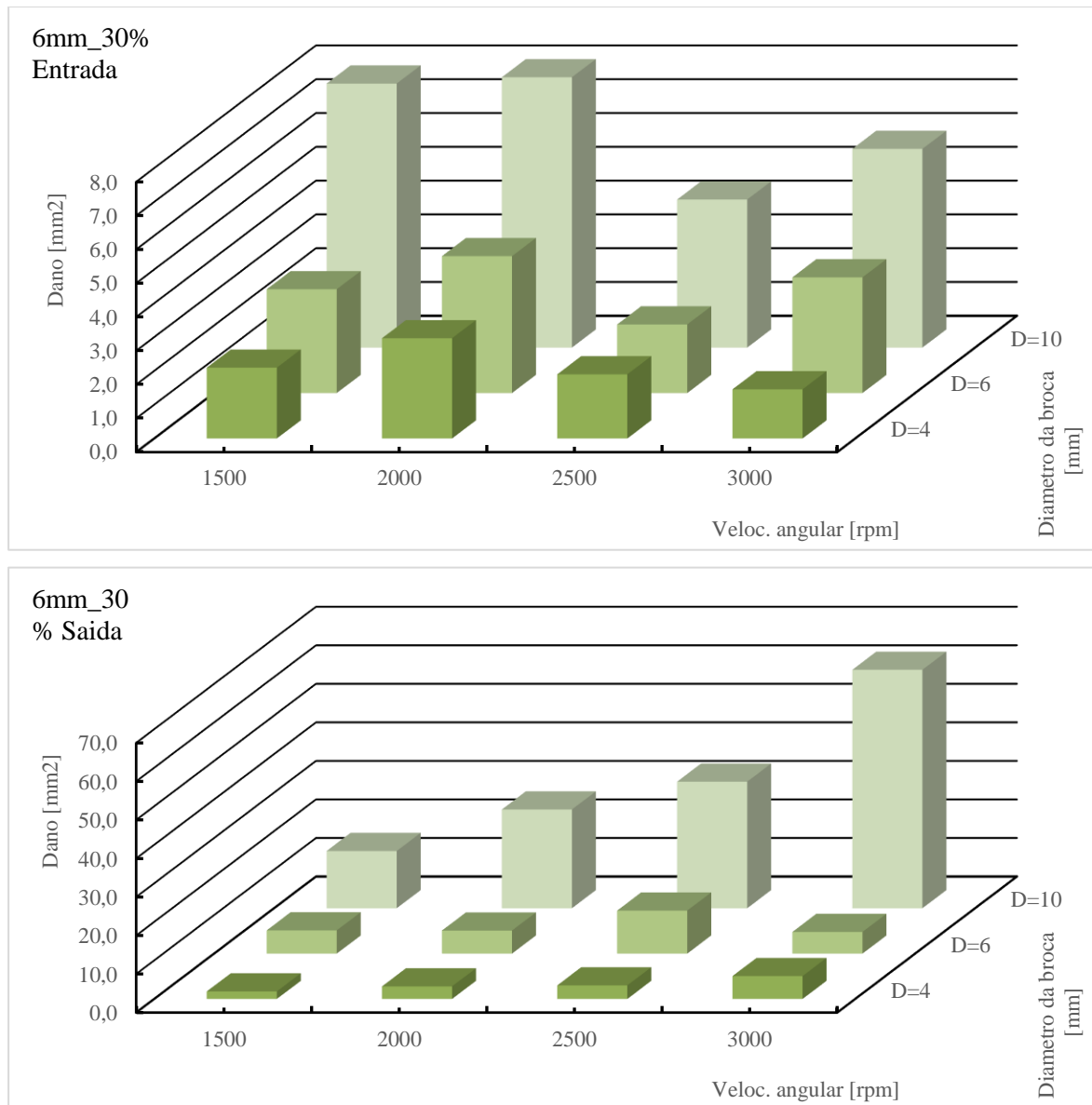


Figura 83 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 30% de fração de fibra

Na Figura 84 pode-se observar a influência do diâmetro da ferramenta para diferentes velocidades angulares nos valores de dano das superfícies envolventes dos furos maquinados em placas de fibras curtas de carbono com $L=6\text{mm}$ e $W_f=45\%$. Para um diâmetro de 10mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da

velocidade de 2000 r.p.m. para os 3000 r.p.m., nos danos de saída é possível verificar um aumento dos valores de dano para uma velocidade da ferramenta de 2000 r.p.m.. Para um diâmetro de 6mm é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada para uma velocidade da ferramenta de 2500 r.p.m.. No caso da ferramenta de 4mm, é possível observar uma diminuição dos valores de dano de entrada com o aumento da velocidade de 1500 r.p.m. para os 2500 r.p.m., nos danos de saída é possível verificar uma diminuição dos valores de dano com a diminuição da velocidade de 2500 r.p.m. para os 1500 r.p.m..

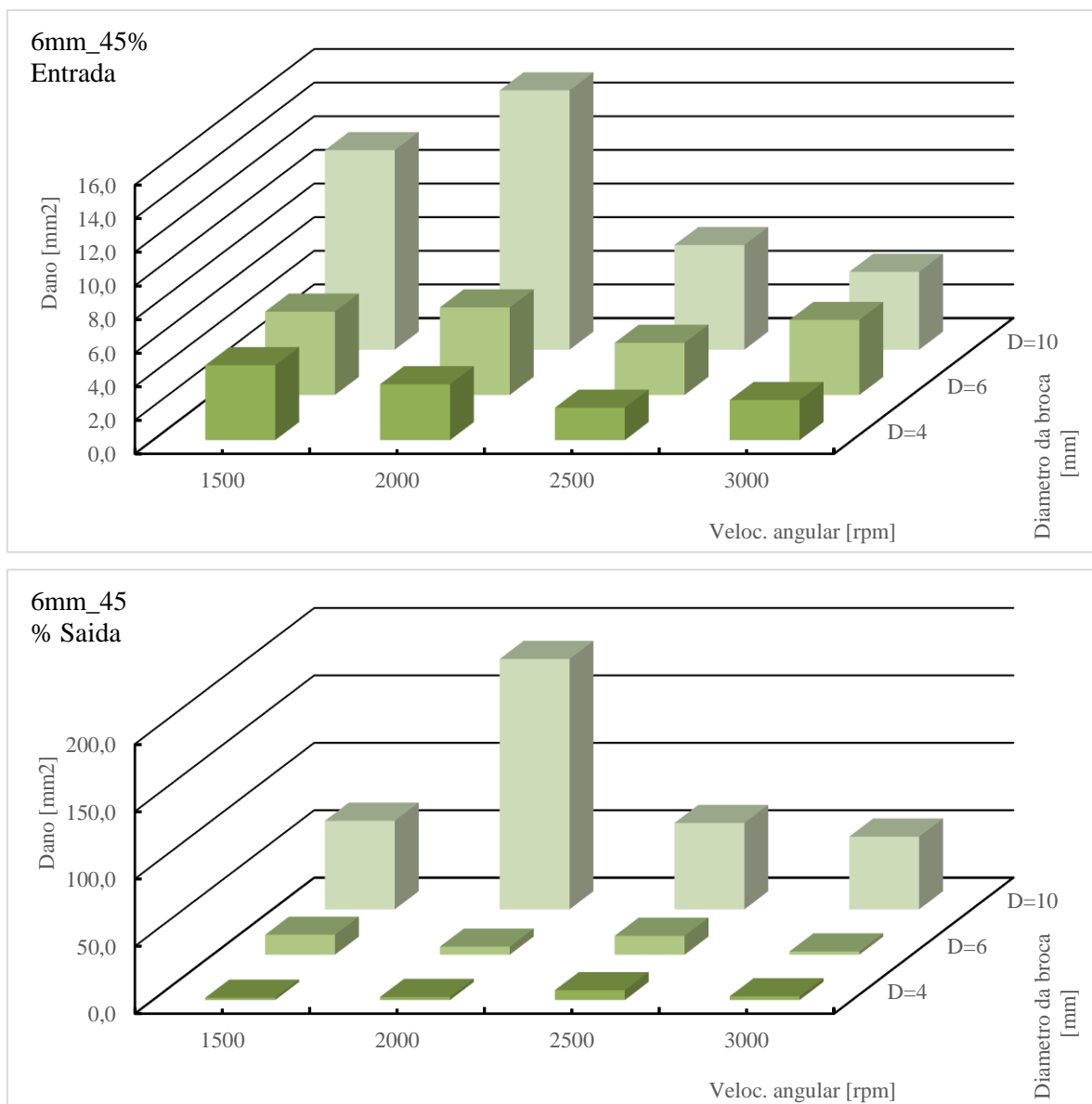


Figura 84 - Valores de Dano versus veloc. Angular e diâmetro de ferramenta para a placa de compósito de 6mm com 45% de fração de fibra

5. Conclusões

Propriedades físicas: Densidade

Foram obtidos os valores experimentais e teóricos (lei das misturas) da densidade dos diferentes materiais processados (diferentes frações mássicas e diferentes comprimentos de fibras de carbono) e não foram obtidas diferenças significativas. As diferenças observadas podem ser explicadas com base em erros de pesagem e de processo de fabrico dos materiais compósitos (distribuição das fibras na matriz, tempo e temperaturas de cura, porosidades, entre outras).

Propriedades mecânicas em flexão em 3P

Foram processados por moldação por compressão, compósitos com diferentes frações em peso de fibras curtas de carbono (15, 30 e 45%) com diferentes comprimentos de fibra (L=2mm, L=4mm e L=6mm). Estes materiais foram caracterizados em termos físicos (densidade) e mecânicos. Nestes ensaios, foram analisados os seguintes efeitos: tempo de imersão em água e tempo da radiação por UV nas propriedades mecânicas de flexão em 3 pontos. Foram, também, realizados ensaios de tenacidade à fratura (determinação dos parâmetros K_Q e G_Q), ensaios de DMA e análise de dano em placas maquinadas por brocas com três diâmetros).

Propriedades mecânicas

A partir das diferentes curvas de tensão em flexão em 3 pontos versus deslocamento é possível concluir que tanto o módulo como a tensão máxima aumentam com a fração mássica de fibra de carbono e, também, com o aumento do comprimento das fibras. Por outro lado, a deformação diminui com o aumento da fração mássica e com o aumento do comprimento das fibras curtas de carbono.

Propriedades mecânicas versus efeito do tempo de imersão em água

A partir destes ensaios foi possível observar que tanto a tensão máxima como o módulo diminuem com o tempo de imersão em água. A matriz polimérica apresenta ao longo do tempo de imersão em água a menor variação quando comparada com os compósitos. As maiores variações com os compósitos podem ser explicadas com o fato dos provetes terem sido maquinados e, por motivo, existir falta de adesão entre a matriz e as fibras.

Propriedades mecânicas versus efeito do tempo de radiação UV

A partir destes ensaios foi possível observar que tanto a tensão máxima como o módulo apresentam uma tendência para diminuir com o tempo de radiação UV. A matriz polimérica apresenta ao longo do tempo de radiação UV a menor variação quando comparada com os compósitos. As maiores variações com os compósitos podem ser explicadas com problemas relacionados com o processamento dos diferentes materiais compósitos.

Mecânica da fratura (parâmetros KQ e GQ)

Foram realizados ensaios de fratura em 3 P para os diferentes materiais compósitos processados com diferentes frações mássicas e diferentes comprimentos de fibra de carbono. A partir dos dois parâmetros de fratura, K_Q e G_Q, foi possível observar que estes aumentam com a fração mássica e com o comprimento de fibras curtas de carbono.

Ensaio de DMA

Foram obtidas as curvas de variação do *Storage modulus versus* temperatura para os vários compósitos processados. Os resultados obtidos apresentam a mesma tendência que a observada nos ensaios estáticos de flexão em 3 pontos para os compósitos com as diferentes frações mássicas consideradas e para fibras com comprimento de 2, 4 e 6 mm.

Foi também possível obter os valores de T_g, obtidos a partir das curvas de variação de *Tan Delta versus* temperatura para estes compósitos. Foi possível constatar que existe uma tendência para diminuir a temperatura de transição vítrea (T_g) com o aumento da fração mássica de fibras curtas de carbono, pois estas são melhores condutoras de calor do que o material da matriz.

Análise de dano em placas maquinadas

Foram realizados ensaios de avaliação de dano de maquinação de furos nas diferentes placas processadas (resina e compósitos com 15, 30 e 45% de fibras curtas). As placas com maior fração em peso de fibra apresentam maiores valores de dano. A influência da velocidade da ferramenta apresenta alguma incoerência que pode ser explicada com base em diferenças de distribuição de fibras nas superfícies das placas e em erros na operação de maquinação, outro dos fatores que influencia é a velocidade de avanço que, num futuro estudo, pode ser alterada de modo a obter melhores resultados. De salientar que não foram utilizados quaisquer métodos para auxiliar a furação das placas, a furação foi efetuada diretamente no material em estudo.

5.1. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros seria de realizar um conjunto de estudos para completar e melhorar significativamente o trabalho realizado. Estes estudos seriam os seguintes:

- ✓ Ensaios acústicos
- ✓ Absorção de água
- ✓ Condutibilidade térmica
- ✓ Análise micrográfica

6. Bibliografia

- [1] C. A. A. Bernardo, “Introdução aos Polímeros,” Universidade do Minho Departamento de Engenharia de Polímeros, 2004.
- [2] V. J. S. Prado, “Molding of Composites by the Resin Infusion Process: Property Correlationo Title,” Technology Institute of Aeronautics, São José dos Campos, SP., 2009.
- [3] J. D. Buckley and D. D. (Dan D. Edie, *Carbon-carbon materials and composites*. Noyes Publications, 1993.
- [4] L. C. Pardini and M. L. Gregori, “Modeling Elastic and Thermal Properties of 2.5D Carbon Fiber C/SiC Hybrid Matrix Composites by Homogenization Method,” Stuttgart, Germany, 2009.
- [5] E. B. Mano, *Polímeros Como Materiais de Engenharia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.
- [6] E. FREIRE, “Caracterização e análise estrutural de polipropileno reforçado com fibra de vidro através do método de elementos finitos,” IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, 1992.
- [7] E. Freire, E. E. C. Monteiro, and J. C. R. Cyrino, “Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro,” *Polímeros Ciência e Tecnol.*, pp. 25–32, 1994.
- [8] A. Lima, “Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósitos,” Universidade do porto - Faculdade de Engenharia, Porto., 1997.
- [9] S. C. R. Furtado, “Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo,” Instituto Superior técnico - Universidade técnica de Lisboa, 2009.
- [10] R. S. V. Nascimento, “The potential of Brazilian oil shale as a filler for thermoplastics,” Cranfield Institute of Tech., 1987.
- [11] F. M. Lavengood, R. E.; Silver, “Interpretating-supplier data sheets,” *Eng. Mater. Handbook, Eng. Plast. vol. 2, ASM Int’i., Met. Park*, pp. 638–645, 1988.
- [12] L. K. English, “Mater. Eng., 105,” *Mater. Eng., 105*, pp. 53–57, 1988.
- [13] D. Feldman, “Prog. Polym. Sei., 15,” *Prog. Polym. Sei., 15*, pp. 603–628, 1990.
- [14] D. V. Rosato, “An overview of composites,” *m Lubin, G., “handb. eomposites”, eap*.

- I, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 1–14, 1982.*
- [15] M. G. Bader, “Reinforced thermoplastics,” *em Kelly, A; Mileiko, S. T. “handb. composites”, cap. 4, Elsevier Science Publ. London, no. 177219, 1983.*
- [16] C. M. N. Romão, “Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [17] C. A. X. Ramos, “Materiais compósitos inteligentes,” Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 2007.
- [18] T. F. Fernandes, “Preparação e caracterização de novos materiais compósitos baseados em fibras de celulose,” Universidade de Aveiro.
- [19] A. M. V. Lima, “Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósitos : (PRFV),” Universidade do Porto, 1988.
- [20] A. C. Milanese, “CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE SISAL E DE VIDRO,” Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2008.
- [21] K. D. Asmus, “Rev. Plast. Mod., 42,” *Rev. Plast. Mod., 42*, pp. 314–323, 1985.
- [22] C. Júnior, “Avaliação das propriedades mecânicas de poliuretano tendo como agente de reforço uma nova fibra inorgânica natural.,” *Tese Mestr. em Eng. Mecânica. Univ. Católica Minas Gerais, Belo Horizonte.*, 2003.
- [23] E. A. dos Santos, “Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.
- [24] M. F. de S. F. Moura, A. M. B. de. Moraes, and A. G. de. Magalhaes, *Materiais compósitos : materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Publindústria, 2005.
- [25] N. Ferreira, “Estudo de materiais compósitos com fibras processados por injeção,” Leiria: Instituto Politecnico de Leiria., 2011.
- [26] S. K. Mazumdar, *Composites manufacturing : materials, product, and process engineering*. CRC Press, 2002.
- [27] K. F. Mason, “Autoclave quality outside the autoclave?: Pioneers of out-of-autoclave

- processing in aerospace applications answer a qualified but enthusiastic Yes!,” *High Perform. Compos.*, vol. 14, no. 2, p. 44, 2006.
- [28] R. P. Leal, “Processamento de materiais compósitos. Moldação fechada,” Coimbra, 2007.
- [29] “CPIC Fiberglass.” [Online]. Available: <http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=2&cat=Processos>. [Accessed: 12-Mar-2018].
- [30] “Composite materials guide: Manufacturing - Vacuum Bagging | NetComposites.” [Online]. Available: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/vacuum-bagging/>. [Accessed: 12-Mar-2018].
- [31] C. A. Silva, “Design sustentável: a importância das fibras de juta, sisal e coco, no planejamento de produtos e éticas sustentáveis.” MSc. Thesis, Universidade Estadual Paulista, 2006.
- [32] D. de F. Kersting, “Avaliação de resinas Epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- [33] M. L. Costa, S. frascino M. De Almeida, and M. C. Rezende, “The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 14, pp. 2101–2108, 2001.
- [34] “Composite materials guide: Manufacturing - Resin Transfer | NetComposites.” [Online]. Available: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/resin-transfer/>. [Accessed: 12-Mar-2018].
- [35] S. F. M. de Almeida and Z. dos S. N. Neto, “Effect of void content on the strength of composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 28, no. 2, pp. 139–148, 1994.
- [36] L. C. Pardini and A. Gonçalves, “Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono,” *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 231–241, 2009.
- [37] A. C. Ancelotti Jr., “Effects of porosity on the Shear Strength and Dynamic Properties of Carbon Fiber/ Epoxy Composites,” São José dos Campos, S.P., 2006.
- [38] J. Sauer, “Mechanical properties of high polymers,” *John Wiley Sons, Inc., Introd. to*

- Polym. Sci. Technol.*, pp. 301–423, 1977.
- [39] H. W. Rayson, G. C. McGrath, and A. A. Collyer, “Fibres, whiskers and flakes for composite applications,” in *Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics*, Springer, 1986, pp. 29–64.
- [40] P. E. Lopes and J. A. de Sousa, “Influência das condições de processamento nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibras de vidro,” *Polímeros*, vol. 9, no. 1, pp. 85–96, 1999.
- [41] P. Feraboli *et al.*, “Lamborghini ‘Forged composite’ technology,” *26th Annu. Tech. Conf. Am. Soc. Compos. 2011 2nd Jt. US-Canada Conf. Compos.*, vol. 2, no. September 2010, pp. 1203–1215, 2011.
- [42] “Track-only Lamborghini Sesto Elemento Driving on Public Roads.” [Online]. Available: <http://www.thesupercarblog.com/track-only-lamborghini-sesto-elemento-driving-on-public-roads/>. [Accessed: 20-Mar-2018].
- [43] S. T. Peters, “Handbook of composites Chapman & Hall,” *London*, vol. 839, p. 855, 1998.
- [44] UALG, “Guia do principio de Arquimedes,” *Universidade do Algarve, Páginas pessoais Universidade do Algarve*, 2017. [Online]. Available: <http://w3.ualg.pt/~pjsilva/guias/principio de Arquimedes.htm>. [Accessed: 15-Mar-2018].
- [45] G. M. Cândido, M. C. Rezende, and S. F. M. De Almeida, “EFEITOS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (UV) NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO INTERLAMINAR DE COMPÓSITOS DE CARBONO / EPÓXI,” *An. do 7o Congr. Bras. Polímeros*, pp. 310–311.
- [46] C. de O. Affonso and R. J. Sassi, “Aplicação de redes NeuroFuzzy ao processamento de peças automotivas por meio de injeção de polímeros,” *Production*, p. 0, 2014.
- [47] F. L. Westrupp, “Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção,” Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2008.
- [48] F. H. B. T. da Silva, “Análise numérica da fratura no concreto em modo misto utilizando elemento de junta,” Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, 2017.

[49] “9010.” [Online]. Available: <http://www.izartool.com/es/catalogos/catalogo-industrial/taladro/brocas-mango-cilindrico/9010>. [Accessed: 20-Mar-2018].