



Dissertação

Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Caracterização física e mecânica de compósitos  
híbridos de matriz polimérica***

**Lécio Manuel Gonçalves Lourenço**

Leiria, Setembro de 2017

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



Dissertação

Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Caracterização física e mecânica de compósitos  
híbridos de matriz polimérica***

**Lécio Manuel Gonçalves Lourenço**

Dissertação 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, Setembro de 2017

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Dedicatória

---

Dedico este trabalho à minha mãe  
que estará sempre comigo.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Agradecimentos

---

Em primeiro lugar quero agradecer à minha mãe que sempre lutou pelo meu sucesso, enquanto conseguiu. Agradeço também à minha namorada, família e amigos, pelo apoio e motivação nesta etapa da minha vida.

O Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela merece um agradecimento especial pelo incansável apoio, orientação e transmissão de conhecimentos.

Aos restantes Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria que contribuíram para o meu crescimento intelectual deixo também o meu agradecimento.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, pelo acolhimento em mais uma jornada da minha vida académica.

À Roca, S.A. pela experiência profissional e académica que me permitiu adquirir ao longo destes anos, pela flexibilidade de horários, e pela progressão na carreira.

Ao fabricante de torneiras pela cedência das partículas de latão.

Ao grupo de amigos e ex-estudantes de Engenharia Mecânica, do Núcleo Duro.

Em último, e não menos importante a todos os amigos e colegas que conheci ao longo do meu percurso académico, pelo tempo despendido em estudos, partilha de experiências, e convívios.

A todos Muito Obrigado!

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Resumo

---

Neste trabalho são apresentados um conjunto de estudos relativos ao desenvolvimento, fabrico e caracterização mecânica e física de materiais compósitos híbridos de matriz de resina epóxida Biresin L74 com diferentes frações mássicas de partículas metálicas, alumínio e latão (proveniente de desperdícios da indústria metalomecânica), aos quais foram adicionadas partículas curtas de fibra de vidro. Estes estudos permitiram selecionar um material para a construção de um absorvedor de um painel solar de águas quentes sanitárias AQS. Este absorvedor foi usado num protótipo de painel solar AQS, o qual foi testado ao nível de temperaturas de aquecimento da água produzida.

No processamento destes materiais foi utilizada a técnica de mistura de vazamento em vácuo. Foram realizados ensaios de absorção de água ao longo do tempo e ensaios de densidade, por forma a poder avaliar a técnica de processamento utilizada. Foram, também, determinados os coeficientes de condutividade térmica para os diferentes materiais processados, a partir dos quais foi possível concluir que os valores aumentam com o aumento da fração mássica das partículas metálicas. A partir dos ensaios mecânicos estáticos concluiu-se que tanto o módulo como a tensão máxima aumentava com o aumento da fração mássica.

A partir dos ensaios de DMA foi possível observar que os resultados obtidos apresentam a mesma tendência (módulo) para a temperatura ambiente. Foram obtidas as temperaturas de transição vítrea, a partir das curvas da tangente de perda e do módulo de perda e verificou-se que estes diminuem com o aumento da fração mássica.

Verifica-se que as condições climáticas têm uma forte influência no comportamento do painel solar AQS ao nível do aquecimento das águas produzidas.

*Palavras-chave:* Compósito de Latão; Compósito de Alumínio; Compósitos híbridos; Painel Solar AQS;

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Abstract

---

In this work, a set of studies on the development, manufacture and mechanical and physical characterization of composite materials hybrids of Biresin L74 epoxy resin matrix with different mass fractions of metallic particles, aluminum and brass (from wastes of the metallomechanical industry) are presented, short glass fiber particles were added. These studies allowed to select a material for the construction of an absorber of a hot water solar panel AQS. This absorber was used in a prototype solar panel AQS, which was tested at the temperature of heating the produced water.

In the processing of these materials the vacuum cast mixing technique was used. Water absorption tests were carried out over time and density tests, in order to evaluate the processing technique used. The thermal conductivity coefficients were also determined for the different materials processed, from which it was possible to conclude that the values increase with the increase of the mass fraction of the metallic particles. From the static mechanical tests it was concluded that both the modulus and the maximum stress increased with the increase of the mass fraction.

From the DMA tests it was possible to observe that the obtained results show the same trend (modulus) for the ambient temperature. The glass transition temperatures were obtained from the loss tangent curves and the loss modulus, and it was found that they decreased with the increase of the mass fraction.

It is verified that the climatic conditions have a strong influence on the behavior of the solar panel AQS in the heating of the water produced.

Keywords: Brass composite; Aluminum Composite; Hybrid composites; AQS Solar Panel;

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Lista de figuras

---

Figura 1 - Fases de um compósito: Carga, fase dispersa; Matriz, fase contínua; Interface. (adaptado de [4]).....	5
Figura 2 – Fatores de que dependem as propriedades dos compósitos. a) Concentração; b) Tamanho; c) Forma; d) Distribuição; e) Orientação; [9].....	9
Figura 3 - Classificação dos vários tipos de compósito (adaptado de [10]).....	10
Figura 4 - Tipos de cargas (partículas; fibras curtas; fibras longas; laminado e Sandwich), numa matriz polimérica (adaptado de [4], [1] e [9]) .....	10
Figura 5 – Densidade de empacotamento em função da forma da partícula (adaptado de [10]) .....	12
Figura 6 – Transferência de calor. a) Condução; b) Convecção; c) Radiação. [13].....	13
Figura 7 – Transferência de calor numa placa plana [13] .....	14
Figura 8 - Convecção. a) Convecção forçada; b) Convecção natural. (adaptado [17]).....	16
Figura 9 – Transferência de calor de uma placa quente, por convecção (adaptado [17]) ...	16
Figura 10 – Espectro eletromagnético [18] .....	18
Figura 11 – Energia solar e respetiva absorção [19] .....	19
Figura 12 – Ciclo Solar [19].....	20
Figura 13 – Separação por granulometria, com a utilização de peneiros manuais.....	23
Figura 14 –Densidade aparente. a) Medição de volume; b) Medição de massa. ....	23
Figura 15 – Representação esquemática para obter a densidade real.....	24
Figura 16 - Molde metálico para o processamento de placas. a) Aplicação de desmoldante; b) Aplicação de película antiaderente e fita-cola; c) Montagem do molde; d) Molde com placa em processo de cura. ....	25
Figura 17 – Compósito Resina + Latão com frações volúmicas: a) $V_p=50\%$ ; b) $V_p=40\%$ ; c) $V_p=30\%$ ; d) $V_p=20\%$ .....	26
Figura 18 – Processo de vazamento. a) Doseamento da carga; b) Doseamento da resina; c) Agitação da resina e carga; d) Aplicação de vácuo. ....	27
Figura 19 – Dimensões dos provetes. a) Flexão em 3 pontos; b) DMA – flexão em 3 pontos e absorção de água; c) Compressão;.....	28
Figura 20 – a) Balança Eletrónica de Precisão, modelo Mettler Toledo AG204; b) Acessórios medição de densidades;.....	29
Figura 21 – Placa usada nos ensaios de condutividade térmica. a) Placa de resina Biresin L74; b) Placa de compósito reforçado com partículas de latão ( $V_p = 10\%$ ).....	31

Figura 22 – Equipamento usado para medir o coeficiente de condutividade térmica a) Caixa isolada; b) Lâmpada 46W; c) Câmara de infravermelhos; d) Multímetro com termopar do tipo k. ....	33
Figura 23 – Medição do coeficiente de condutividade térmica. a) Conjunto de equipamentos usados na medição do coeficiente de condutividade térmica; b) Pormenor de leitura de temperatura da face exterior. ....	33
Figura 24 – Ensaios de Flexão em 3 pontos. a) Máquina ZWICK – Z100; b) pormenor de teste de provete à flexão. ....	34
Figura 25 - Ilustração do esquema de ensaio de flexão.....	35
Figura 26 - Ensaios de compressão na máquina ZWICK – Z100.....	37
Figura 27 - Ilustração do esquema de ensaio à compressão.....	37
Figura 28 – Equipamento utilizado nos ensaios de DMA: a) máquina Triton Tritec 2000; b) pormenor de montagem na máquina de um provete de alumínio para a realização de ensaio em flexão em 3 pontos. ....	38
Figura 29 - Absorção de água versus tempo, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.....	40
Figura 30 – Imagens de infravermelhos. a) Placa de compósito de matriz resina L74 com partículas de latão $V_m=70\%$ ; b) Placa resina L74 $V_m=0\%$ .....	41
Figura 31 – Valores de Condutividade Térmica para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	43
Figura 32 - Tensão à flexão em função do deslocamento, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	45
Figura 33 - Tensão à flexão em função da fração mássica para partículas de latão, resina e alumínio.....	46
Figura 34 – Efeito da fibra de vidro, na tensão à flexão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.....	46
Figura 35 - Módulo à flexão em função da fração mássica para partículas de latão, resina e alumínio.....	47
Figura 36 – Efeito da fibra de vidro, no módulo à flexão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.....	47
Figura 37 - Módulo à flexão da fração mássicas para partículas de latão, em função de dias em água, 0, 4, 25 e 63.....	48
Figura 38 - Módulo à flexão da fração mássicas para partículas de alumínio, em função de dias em água, 0, 4, 25 e 63. ....	49

Figura 39 - Tensão à compressão em função do deslocamento, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	51
Figura 40 - Tensão à compressão em função da fração mássica e tipo de material das partículas.....	51
Figura 41 – Efeito da fibra de vidro, na tensão à compressão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio. ....	52
Figura 42 - Módulo à compressão em função da fração mássica e tipo de material das partículas.....	53
Figura 43 - Efeito da fibra de vidro, no módulo à compressão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio. ....	53
Figura 44 - Módulo em função da temperatura, para diferentes frações mássicas de resina e alumínio.....	54
Figura 45 - Módulo em função da temperatura, para diferentes frações mássicas de resina e latão. ....	55
Figura 46 - Módulo de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de alumínio. ....	57
Figura 47 - Módulo de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de latão.....	57
Figura 48 - Tangente de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de alumínio. ....	58
Figura 49 - Tangente de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de latão.....	58
Figura 50 – Componentes de um painel solar AQS [24].....	59
Figura 51 – Esboço do absorvedor .....	60
Figura 52 – Esquema de construção do protótipo de painel solar AQS.....	61
Figura 53 – Render do painel solar AQS.....	62
Figura 54 – Construção do absorvedor, dobragem do tube de cobre ¼” .....	63
Figura 55 – Construção do absorvedor, vazamento da resina, alumínio e fibra de vidro ...	63
Figura 56 – Construção / Montagem do painel solar AQS.....	63
Figura 57 – Testes do painel solar AQS.....	64

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Lista de tabelas

---

Tabela 1 - Valores típicos de condutividade térmica (adaptado [16]).....	15
Tabela 2 – Propriedades da resina epóxida Sika - Biresin® L74, com endurecedor .....	21
Tabela 3 – Propriedades principais do Latão.....	22
Tabela 4 – Propriedades principais do Alumínio .....	22
Tabela 5 - Valores de densidade teórica e experimental, referentes aos diferentes compósitos com diferentes frações mássicas ( $V_m$ ) de partículas de latão e alumínio e fibra de vidro (FV). .....	39
Tabela 6 – Dados obtidos nos ensaios de condutividade térmica, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	42
Tabela 7 – Valores de coeficiente de condutividade térmica, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	42
Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios de flexão para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	44
Tabela 9 - Valores obtidos nos ensaios de compressão para resina L74 e os diferentes compósitos processados com partículas de latão e alumínio e fibras curtas de vidro (FV).49	
Tabela 10 – Valores do módulo à flexão ( $E'$ ) versus fração mássica e para as temperaturas 30, 80, 160, 170 e 200 °C .....	55
Tabela 11 – Valores de temperatura de transição vítrea, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. ....	56
Tabela 12 – Dados obtidos no teste ao protótipo do painel solar AQS. ....	64

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Lista de siglas

---

$\sigma_{flex}$	Tensão à flexão
$E_{flex}$	Módulo de elasticidade à flexão
$\sigma_{comp}$	Tensão à compressão
$E_{comp}$	Módulo de elasticidade à compressão
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
N	Newton
kN	Kilo Newton
F	Força aplicada
$M_f$	Momento fletor
$y$	Linha Neutra
$I$	Momento de Inércia
$\epsilon$	Deformação
$\delta$	Extensão
DMA	Análise dinâmico-mecânica
$E'$	Módulo de elasticidade
$E''$	Módulo de perda
$\tan \delta$	Tangente de perda
$T_g$	Temperatura de transição vítrea
$k$	Coefficiente de condutividade térmica
$Q_{cond}$	Taxa de fluxo de calor por condução
$A$	Área
$dT$	Gradiente de temperaturas
$dx$	Gradiente de espessura
$Q_{conv}$	Taxa de fluxo de calor por convecção
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$T_p$	Temperatura da placa
$T_\infty$	Temperatura do fluido
$Q_{rad}$	Taxa de fluxo de calor por radiação
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

$F_{\epsilon}$	Função emissividade;
$F_G$	Função “fator de forma” geométrico;
W	Watt
°C	Grau Centigrado
K	Kelvin
$V_p$	Fração volúmica de partículas
$V_m$	Fração mássica de partículas
$\rho$	Densidade
$m$	Massa
$V$	Volume
$f$	Fração de empacotamento
$d_{ap}$	Densidade aparente
$d_r$	Densidade real
$\mu\text{m}$	Micrómetro
mm	Milímetro
L	Comprimento
$W(\%)$	Percentagem de absorção de água
AQS	Águas quentes sanitárias

# Índice

---

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura do relatório	2
<b>2. ESTADO DA ARTE</b>	<b>4</b>
2.1. Compósito	4
2.2. Matriz	5
2.2.1. Matriz Metálica	6
2.2.2. Matriz Cerâmica	6
2.2.3. Matriz Polimérica	7
2.2.3.1. Matriz Termoplástica	7
2.2.3.2. Matriz Termoendurecível	8
2.3. Carga	9
2.3.1. Compósitos reforçados com partículas	11
2.3.2. Empacotamento de Pós	12
2.4. Transferência de calor	13
2.4.1. Condução	14

2.4.2.	Convecção	15
2.4.3.	Radiação	17
2.5.	Termografia por infravermelhos	18
2.6.	Energia Solar	18
2.6.1.	Aproveitamento de energia solar	19
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>21</b>
3.1.	Matriz e Cargas	21
3.2.	Granulometria	22
3.3.	Densidade aparente das cargas	23
3.4.	Densidade real da carga	24
3.5.	Moldes	25
3.6.	Fração de empacotamento	25
3.7.	Vazamento em vácuo	26
3.8.	Cura e pós cura	27
3.9.	Retificação dimensional e acabamento dos provetes	28
3.10.	Densidade real e experimental do compósito	28
3.11.	Ensaio de absorção de água	30
3.12.	Ensaio de condutividade térmica	31
3.13.	Ensaio de flexão	34
3.14.	Ensaio de compressão	36
3.15.	Ensaio de DMA	38
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO</b>	<b>39</b>
4.1.	Densidades	39
4.2.	Ensaio de absorção de água	40
4.3.	Ensaio de condutividade térmica	41
4.4.	Ensaio de flexão	43
4.5.	Ensaio de compressão	49

<b>4.6.</b>	<b>Ensaio de DMA</b>	<b>53</b>
<b>5.</b>	<b>CASO DE ESTUDO</b>	<b>59</b>
<b>5.1.</b>	<b>Esboço do protótipo</b>	<b>60</b>
<b>5.2.</b>	<b>Fabrico de protótipo</b>	<b>62</b>
<b>5.3.</b>	<b>Resultados do painel solar AQS</b>	<b>64</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>69</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>73</b>

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 1. Introdução

---

Atualmente a preocupação com a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade dos recursos estão cada vez mais presentes na nossa sociedade. O conceito dos 3R's (erres), Reduzir, Reutilizar e Reciclar vem consciencializar os projetistas que devem assentar todo o desenvolvimento do produto dentro da visão de design sustentável. Isto quer dizer que o produto em desenvolvimento, logo na fase de conceção deve ser pensado com possíveis reutilizações, com maior durabilidade, com baixa utilização de recursos naturais, com materiais que permitam a sua reciclagem, assim como produtos que utilizem energias renováveis.

Neste trabalho foram desenvolvidos e fabricados um conjunto de materiais compósitos híbridos, reforçados com fillers, de alumínio e latão (material proveniente de desperdícios da indústria metalomecânica), aos quais foram adicionadas fibras curtas de vidro. O material compósito com melhor comportamento físico e mecânico foi utilizado no desenvolvimento e fabrico de um protótipo de um absorvedor de um painel solar para aquecimento de águas quentes sanitárias AQS.

## 1.1. Objetivos

---

Pretende-se com este trabalho efetuar o desenvolvimento e fabrico de materiais compósitos híbridos com matriz polimérica de resina epóxida Biresin L74, com cargas de partículas metálicas, latão e alumínio, aos quais foram adicionadas fibras curtas de vidro com o objetivo de obter um compósito com boas propriedades de condução de calor, otimizar os diferentes parâmetros de processamento e construir um protótipo de painel solar AQS.

A partir de placas/provetes em material compósito com frações mássicas e diferentes materiais de reforço, processadas por vazamento em vácuo, serão caracterizadas as suas propriedades mecânicas e físicas, através das seguintes análises:

- Ensaio de Densidade;
- Ensaio de Absorção de água em função do tempo;
- Ensaio de Condutividade Térmica;
- Ensaio de Flexão em 3 pontos versus tempo de imersão em água;
- Ensaio de Compressão;

- Ensaios de DMA em Flexão em 3 pontos: variação do Storage modulus, Loss modulus (determinação de Tg) e Tan Delta (determinação de Tg);

A realização destes ensaios irá permitir estudar o comportamento mecânico e físico dos materiais processados, obtendo as seguintes propriedades:

- Propriedades físicas:
  - Variação da densidade em função da variação da fração mássica;
  - Curvas de variação da absorção de água com a variação da fração mássica em função do tempo;
  - Curvas de variação da condutividade térmica com a fração mássica;
- Propriedades mecânicas:
  - Curvas de variação da resistência mecânica à flexão em 3 pontos ( $\sigma_{flex}$  e  $E_{flex}$ ) com a fração mássica;
  - Curvas de variação da resistência à compressão ( $\sigma_{comp}$  e  $E_{comp}$ ) versus fração mássica;
  - Curvas do módulo, módulo de perda, tangente de perda em função da temperatura;
  - Temperatura de transição vítrea, obtida a partir do módulo de perda, e da tangente de perda, para os vários materiais processados.

Terminados estes estudos será produzido um painel solar AQS, cujo absorvedor será constituído pelo material compósito em estudo que tenha as características mais adequadas a esse objetivo, no sentido de avaliar a temperatura de saída da água.

## 1.2. Estrutura do relatório

---

Este relatório foi elaborado de acordo com a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo apresenta uma abordagem geral do relatório, identificando os objetivos do mesmo.

- Capítulo 2 – Estado da arte

Introduz-se os assuntos teóricos relativos aos vários tópicos em estudo neste trabalho. Estes tópicos irão servir como suporte teórico à seleção de materiais, técnicas de processamento e à discussão dos resultados experimentais obtidos.

- Capítulo 3 – Materiais e procedimentos experimentais

Ao longo deste capítulo serão detalhados os procedimentos experimentais relativos ao processamento de matérias compósitos, normas e equipamentos de ensaio considerados nos ensaios físicos e mecânicos.

- Capítulo 4 – Resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos nos estudos mecânicos e físicos dos diferentes materiais compósitos com partículas processados.

- Capítulo 5 – Caso de estudo

Neste ponto será apresentado um estudo relativo ao desenvolvimento e fabrico de um protótipo de um painel solar AQS, cujo absorvedor será desenvolvido em compósito processado com as melhores propriedades mecânicas e físicas obtidas nos capítulos anteriores.

- Capítulo 6 – Conclusões

Com este capítulo são apresentadas as principais conclusões relativas aos materiais processados e ao protótipo desenvolvido.

- Capítulo 7 - Trabalhos futuros

No capítulo serão apresentadas sugestões relativas a trabalhos futuros.

## 2. Estado da arte

---

Grande parte dos componentes atuais requer a utilização de combinações de materiais que não se encontram nos materiais tradicionais, como o aço, os cerâmicos e os polímeros. Esta necessidade surge principalmente na indústria aeroespacial, e automóvel, onde se pretendem materiais com baixas densidades, alta resistência mecânica, alta resistência ao impacto, baixa abrasão, etc.

Na natureza encontramos compósitos naturais, como a madeira, constituída por uma matriz de lenhina que envolve as fibras de celulose, assim como os ossos dos animais vertebrados que são constituídos por uma matriz de colagénio e hidroxiapatita, em que a orientação das fibras se formam segundo a direção que melhor se adapta ao animal [1].

Uma das primeiras referências à utilização de materiais compósitos ocorreu no antigo Egipto na criação do contraplacado de madeira, alternando tiras de madeira de qualidade superior com tiras de madeira de qualidade inferior [1].

Em Israel, os nossos antepassados utilizavam materiais compósitos na construção de habitações, isto é, adicionavam palha ao barro para fazer tijolos, que para além de lhes aumentar a resistência mecânica diminuía o aparecimento de gretas [2]. Os materiais compósitos eram também utilizados na construção de arcos e carroças constituídos pela união de paus, ossos e chifres de animais [3].

A evolução da humanidade deve-se às solicitações que o mundo lhe foi colocando à medida que esta foi descobrindo novos materiais passando pelas eras do cobre, bronze, ferro, ouro, etc. Os materiais compósitos fazem parte da história da humanidade há milhares de anos sendo que hoje estão muito mais evoluídos em termos de desempenho e gamas de aplicações.

### 2.1. Compósito

---

Pode dizer-se que não há uma definição de compósito que seja universalmente aceite, mas também se pode dizer que um material compósito consiste na mistura de dois ou mais materiais de naturezas distintas, com o objetivo de obter novas propriedades, quer sejam as inerentes a cada constituinte, quer sejam intermédias decorrentes da formação de uma região interfacial.

Um compósito pode ser considerado um material estrutural com pelo menos dois constituintes combinados ao nível macroscópico e que não são solúveis entre si [3]. A um dos constituintes dá-se o nome de carga que é a fase dispersa e que é responsável por suportar as forças aplicadas ao compósito. Ao outro constituinte dá-se o nome de matriz que é a fase contínua, e cuja principal função é a de transmitir as solicitações mecânicas a que é submetida a carga e protegê-las do meio ambiente em que se encontra. A ligação entre os dois constituintes é chamada interface, cuja qualidade influencia o desempenho mecânico do compósito. Na Figura 1 encontram-se esquematizadas as fases e interface de um compósito.

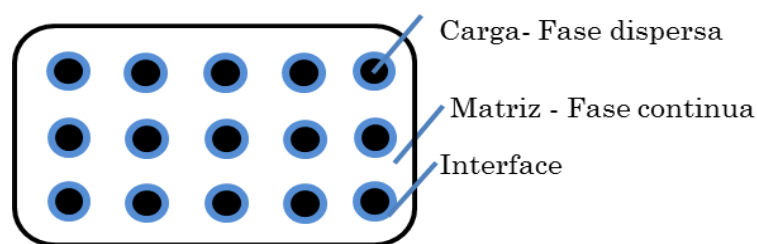


Figura 1 - Fases de um compósito: Carga, fase dispersa; Matriz, fase contínua; Interface. (adaptado de [4])

As propriedades físicas e mecânicas do compósito estão dependentes das propriedades de cada constituinte, tais como a geometria, a fração volúmica / mássica, o seu processamento, a distribuição de partículas, o método de cura, etc. Estas variáveis permitem assim o desenvolvimento de inúmeros compósitos com uma extensa faixa de combinações de módulo de elasticidade, resistência mecânica, tenacidade, entre outros. Quer isto dizer que no desenvolvimento de um material compósito há que considerar vários fatores, como por exemplo o tipo de material da matriz, o tipo de material da carga, a fração volúmica ou mássica de cada constituinte, tendo sempre em conta os esforços a que este vai estar sujeito, assim como o meio onde vai atuar.

## 2.2. Matriz

---

A matriz faz parte da fase contínua de um compósito, e pode dizer-se que tem duas funções principais. A primeira é a de ligar as fibras entre si, agindo como meio de transmissão das solicitações mecânicas a que é submetida a carga. A segunda é a de proteger as cargas do meio ambiente em que se encontra, como por exemplo de danos superficiais como um resultado de abrasão mecânica ou reações químicas.

A matriz tipicamente apresenta propriedades mecânicas de densidade, rigidez e tensão inferiores, comparando com as cargas. A nível de comportamento poderá ser frágil, dúctil, elástica ou plástica, consoante a finalidade da sua construção [1].

A matriz pode ser classificada de acordo com a sua estrutura, ou natureza química:

- Compósito de Matriz Metálica;
- Compósito de Matriz Cerâmica;
- Compósito de Matriz Polimérica;

### **2.2.1. Matriz Metálica**

---

Os metais são atrativos para matriz, pois apresentam boa resistência à corrosão, alta resistência mecânica, tenacidade à fratura, e boa condutividade térmica [5].

Exemplos típicos de materiais usados neste tipo de matriz são o alumínio, o cobre, o magnésio e o titânio. Estes materiais destacam-se em diversas áreas:

- Aeroespacial: O *Space Shuttle* utiliza tubos de boro/alumínio na sua fuselagem. Para além de diminuir a massa em 145 kg também reduz o isolamento térmico [3].
- Militar: Utilizado em componentes de precisão de sistemas de guias de mísseis, devido à sua estabilidade dimensional, como é o caso de compósitos de matriz SiC e compósitos de alumínio [3].
- Automóvel: Na construção de discos de travagem com matriz de alumínio, assim como nos blocos de motores.

No entanto, este tipo de matriz apresenta algumas limitações, como o facto do seu elevado preço de produção e processamento.

### **2.2.2. Matriz Cerâmica**

---

Os compósitos de matriz cerâmica foram dos primeiros compósitos a serem usados pelos nossos antepassados na construção de tijolos misturando barro com palha.

A utilização deste tipo de matriz deve-se ao facto de que estes materiais existem num grande tipo de composições. As suas principais características são o baixo coeficiente de expansão térmica, diminuindo as tensões térmicas entre a matriz e a carga, o baixo módulo de elasticidade assim como o seu baixo custo [5].

As principais vantagens deste tipo de matriz são a sua alta resistência, dureza e elevada temperatura de serviço. No entanto sendo cerâmica tem por si só uma baixa tenacidade à fratura, o que quer dizer que sob tensão ou impacto pode falhar catastróficamente [3].

Exemplos típicos deste tipo de matriz são o cimento, a alumina, o nitreto de silício e a zircônia. Estes materiais são usados:

- Em aplicações de altas temperaturas, principalmente quando os compósitos de matriz polimérica ou metálica não podem ser usados.
- Ferramentas de corte em ambientes oxidantes e de alta temperatura.
- Indústria aeronáutica, no fabrico de turbinas.
- Medicina dentária na construção de próteses.

### **2.2.3. Matriz Polimérica**

---

Os compósitos de matriz polimérica são os compósitos mais comuns devido ao seu baixo custo, alta resistência e processos de fabrico [3]. As matrizes poliméricas podem ser divididas entre termoplásticas e termoendurecíveis. Os polímeros termoplásticos sofrem deformações com o aumento da temperatura, e portanto são indicados para processos de injeção. Os polímeros termoendurecíveis necessitam de efetuar o processo de cura, reação esta que é irreversível e que os torna mais resistentes por interligar quimicamente as suas cadeias moleculares.

#### **2.2.3.1. Matriz Termoplástica**

---

Uma matriz termoplástica é uma resina com alta massa molecular, constituída por cadeias lineares e, em alguns casos com ramificações. Estas cadeias são emaranhadas, o que permite que o material apresente integridade física, mas com facilidade em deformar-se plasticamente quando submetidos a tensões. Esta deformação ocorre através de um escorregamento entre as moléculas adjacentes, devido às forças de Van de Waals especialmente com temperaturas altas [6]. A este tipo de matriz dá-se o nome de termoplástica, pois a sua plasticidade aumenta com a temperatura, tornando-se rígida com o seu arrefecimento.

Os polímeros termoplásticos são uma alternativa às matrizes termoendurecíveis na aplicação em estruturas, devido à maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância a danos em relação aos termoendurecíveis [6], [7].

As matrizes termoplásticas são constituídas por moléculas de grandes dimensões e lineares, sem qualquer reticulação entre si, sendo estas mantidas por ligações secundárias, tais como forças de Van der Waals e pontes de hidrogénio [7]. Como as ligações são fracas, é possível deformar plasticamente o material, pois o aquecimento provoca a quebra destas ligações permitindo assim a mobilidade das moléculas. Uma vez perdida a temperatura, as moléculas mantêm-se nas posições em que ficaram, e restabelecem as ligações químicas anteriormente referidas.

### **2.2.3.2. Matriz Termoendurecível**

---

Neste tipo de matriz, a polimerização desenvolve-se numa estrutura tridimensional, pois ocorre uma ligação covalente onde não é possível ocorrer um escorregamento entre as moléculas e por sua vez a plasticidade não aumenta com a temperatura [6]. São matrizes que apresentam propriedades isotrópicas e quando curadas não se conseguem fundir nem dissolver. Perdem as suas propriedades plásticas com o aumento da temperatura, tornando limitada a sua utilização em componentes estruturais, por outro lado, apresentam melhor estabilidade dimensional, resistência ao calor, resistência química e elétrica do que as matrizes termoplásticas.

As matrizes termoendurecíveis são conhecidas por não permitirem ser reprocessadas, pois as suas moléculas formam uma cadeia tridimensional de ligações cruzadas bastante rígidas, durante o processo de cura [7]. Visto que estas matrizes apresentam uma viscosidade baixa antes da cura, permitem uma melhor impregnação da carga. As matrizes termoendurecíveis mais utilizadas em aplicações industriais são as epóxicas, poliéster e fenólicas [6] e [7].

As principais vantagens dos polímeros termoendurecíveis são as seguintes [7], [8]:

- Boa estabilidade térmica e dimensional;
- Resistência ao calor;
- Rigidez elevada;
- Estabilidade dimensional elevada;
- Maior resistência química que os termoplásticos;
- Baixa densidade

## 2.3. Carga

A carga é a fase responsável pelo desempenho mecânico dos materiais compósitos, pois é ela que suporta a maioria das forças que são exercidas no material compósito.

Para o fabrico de compósitos de matriz polimérica com bom desempenho mecânico, devem ser considerados alguns aspetos relevantes para a escolha da carga, tais como:

- O módulo de elasticidade deve ser superior ao da matriz;
- A tensão de rotura deverá ser superior à da matriz;
- Deve ter baixa densidade;
- Geometria conveniente para ser combinado com a matriz;
- Assegurar uma boa adesão com a matriz;
- Não se deteriorar no contacto com a matriz e/ou outros constituintes químicos presentes no compósito;
- Facilidade de manuseamento;
- Baixo custo.

As propriedades dos materiais compósitos para além de depender das propriedades do material usado para carga e matriz, dependem também da concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação da carga, como esquematizado na Figura 2.

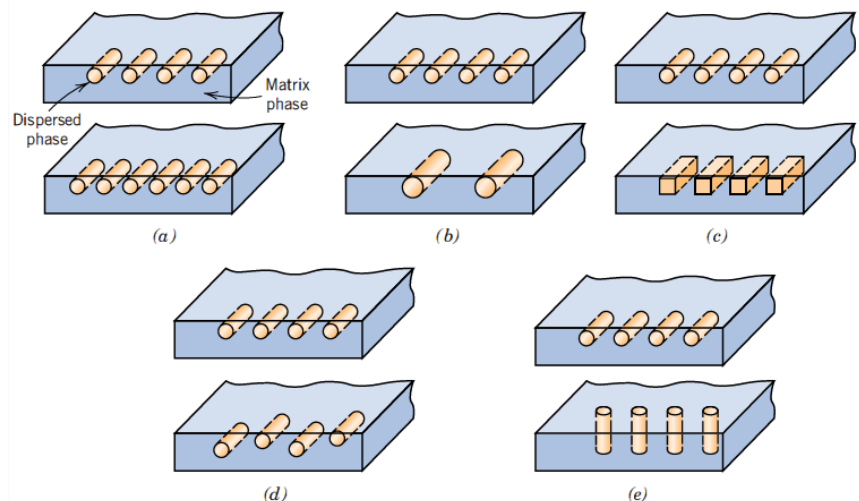


Figura 2 – Fatores de que dependem as propriedades dos compósitos. a) Concentração; b) Tamanho; c) Forma; d) Distribuição; e) Orientação; [9]

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de carga, sendo apresentada essa classificação na Figura 3 [10].



Figura 3 - Classificação dos vários tipos de compósito (adaptado de [10])

As cargas podem ser constituídas por partículas, fibras curtas ou longas, laminado ou sandwich, sendo apresentados na Figura 4 os vários tipos.

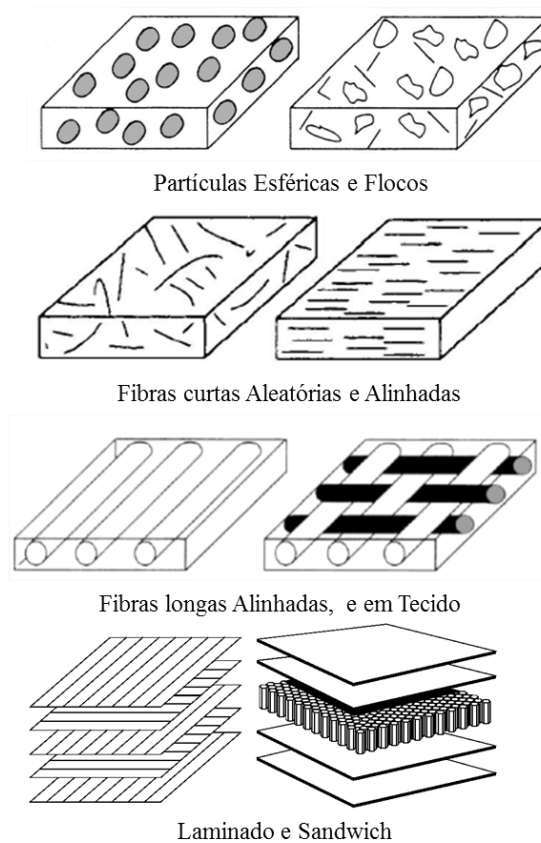


Figura 4 - Tipos de cargas (partículas; fibras curtas; fibras longas; laminado e Sandwich), numa matriz polimérica (adaptado de [4], [1] e [9])

Os compósitos laminados são formados colocando várias camadas umas em cima de outras, impregnadas com resina, apresentando uma resistência elevada numa diversidade de direções no plano bidimensional.

Os compósitos do tipo sandwich dependem da matriz, do reforço e da ligação destes elementos através de um filme adesivo que garante a integridade do conjunto. Este tipo de compósito contém duas faces externas mais resistentes, tendo no seu núcleo uma camada de material menos denso, que apresenta uma menor rigidez e menor resistência.

Os compósitos reforçados com fibras têm uma fase dispersa com geometria da fibra com uma relação entre comprimento e diâmetro, podendo ser curtas ou longas.

Os materiais compósitos reforçados com partículas são caracterizados por apresentarem uma fase dispersa equiaxial, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções.

### **2.3.1. Compósitos reforçados com partículas**

---

Como vimos na Figura 3, os compósitos reforçados com partículas podem dividir-se em duas subclasses, isto é, reforçados com partículas grandes ou reforçados por dispersão.

A distinção entre as duas classes é baseada principalmente no tamanho das partículas. O termo grande é usado para indicar que a interação entre a partícula e a matriz não pode ser analisada a nível atômico ou molecular [9]. Nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas são muito menores, apresentando diâmetros entre 0,01 e 0,1 $\mu$ m [9]. O grau de esforço ou o crescimento da resistência mecânica depende da ligação na interface partícula/matriz, e o módulo de elasticidade depende da fração volúmica, do tamanho e da forma da carga [9].

São conhecidas várias formas de partículas, entre elas, destacam-se as quadradas, triangulares e redondas. A resistência do compósito depende do diâmetro das partículas, do espaço entre as partículas e da fração volúmica da carga/resina, e obviamente as propriedades da matriz também influenciam o comportamento do compósito [2].

A forma das partículas é um dos parâmetros que influencia diretamente as propriedades dos compósitos. As partículas esféricas têm a menor razão possível entre superfície e volume, o que limita a área de absorção de resina, permitindo a colocação de uma maior carga de partículas, quando comparado com partículas de outro tipo [11].

Ao nível de partículas de formas irregulares, apresentam arestas afiadas e pontos que levam à concentração de tensões, que podem originar a falha prematura do compósito, contudo, apresentam melhores resultados quando o sujeito a forças de tração [11].

## 2.3.2. Empacotamento de Pós

A densidade de empacotamento indica-nos a fração máxima de carga admissível no compósito, e está diretamente relacionada com a forma, tamanho, distribuição e orientação das cargas no compósito [10]. A fração de empacotamento de pó determina a fração volúmica, e influencia a condutividade térmica, o tempo de cura e a homogeneidade do produto final [12]. Uma das principais funções da resina num compósito com pós metálicos, é o de preencher os vazios entre as partículas de pó, servindo de ligação entre estes.

A fração de empacotamento de materiais na forma de partículas,  $f$ , é obtida a partir da equação (1):

$$f = \frac{d_{ap}}{d_r} \times 100 \quad (1)$$

em que:

$f$  é a Fração de Empacotamento [%];

$d_{ap}$  é a Densidade Aparente [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$d_r$  é a Densidade Real [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

Na Figura 5, pode ver-se que a densidade de empacotamento aumenta à medida que as partículas se aproximam de uma forma redonda.

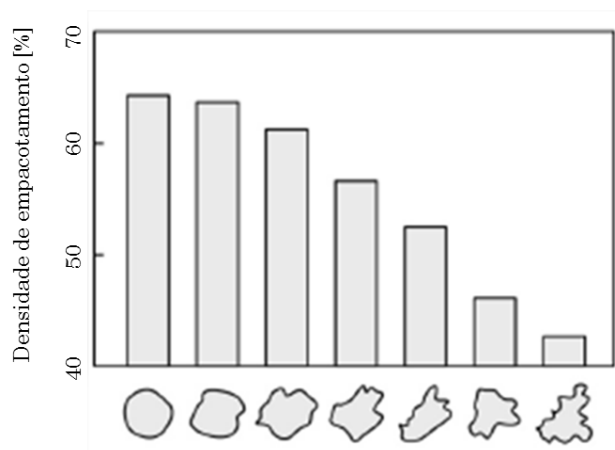


Figura 5 – Densidade de empacotamento em função da forma da partícula (adaptado de [10])

Geralmente, os compósitos com granulometrias elevadas, originam poros de grandes dimensões, enquanto os de granulometrias pequenas originam poros de pequenas dimensões. Analisando este facto, verifica-se que a possibilidade de aumentar o

empacotamento passa pela mistura de pós de diferentes tamanhos, para que as partículas de menor dimensão possam preencher os espaços entre as partículas de dimensões superiores.

A fração de empacotamento máxima ocorre quando as partículas pequenas preenchem todos os espaços deixados pelas partículas grandes quando se encontram em contacto entre si. Se o teor de partículas pequenas for baixo, continua a haver vazios por preencher, se o teor for alto, acaba por afastar as partículas grandes, reduzindo o empacotamento.

A quantidade de carga adicionada num compósito processado por vazamento é menor que a sua densidade de empacotamento permite, pois há um aumento da viscosidade à medida que se adicionar carga à resina. Neste caso, a viscosidade atua com um limitante pois a partir de um determinado ponto o material perde a sua capacidade de processamento por vazamento [10].

## 2.4. Transferência de calor

---

A transmissão de calor não é mais nem menos do que a transmissão de energia de uma região para outra devido a uma diferença de temperaturas entre elas. A experiência diz-nos que um corpo quente em contacto com um corpo frio ficará mais frio, enquanto o corpo frio ficará mais quente, o que nos leva a considerar que efetivamente há a ocorrência de uma transferência de calor.

A transferência de calor pode ocorrer por três formas distintas: condução (Figura 6 a); convecção (Figura 6 b); e a radiação (Figura 6 c).

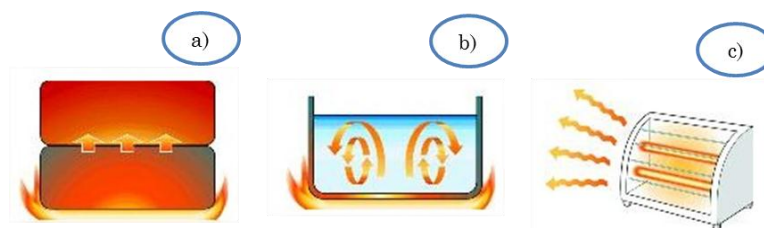


Figura 6 – Transferência de calor. a) Condução; b) Convecção; c) Radiação. [13]

- Transmissão por Condução: passagem de calor de uma região para outra de um mesmo corpo, ou de um corpo para outro quando estes se encontram em contacto.
- Transmissão por Convecção: passagem de calor de uma zona para outra de um fluido em consequência do movimento relativo das partículas do mesmo.
- Transmissão por Radiação: emissão de energia da superfície de um corpo sob a forma de ondas electro magnéticas, não necessitando de um meio de suporte.

## 2.4.1. Condução

---

A condução de calor é o modo de transferência de calor em que a troca de energia ocorre na região de alta temperatura para a de baixa temperatura pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso de fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais [14].

O calor é transmitido ao longo de um meio material, como efeito da transmissão de vibração entre as moléculas, ocorrendo uma transferência de energia das moléculas com maior temperatura para as moléculas de menor temperatura [15]. Na região mais quente, as partículas têm mais energia térmica, vibrando com mais intensidade. Com essa vibração, cada partícula transmite energia para a partícula vizinha, que, ao receber energia, passa a vibrar com maior intensidade, e transmite energia para a seguinte e, assim, sucessivamente.

A lei que permite obter a taxa de fluxo de calor por condução, baseada em experiências foi enunciada por Biot, mas recebe geralmente o nome do matemático e físico francês Josep Fourier [14].

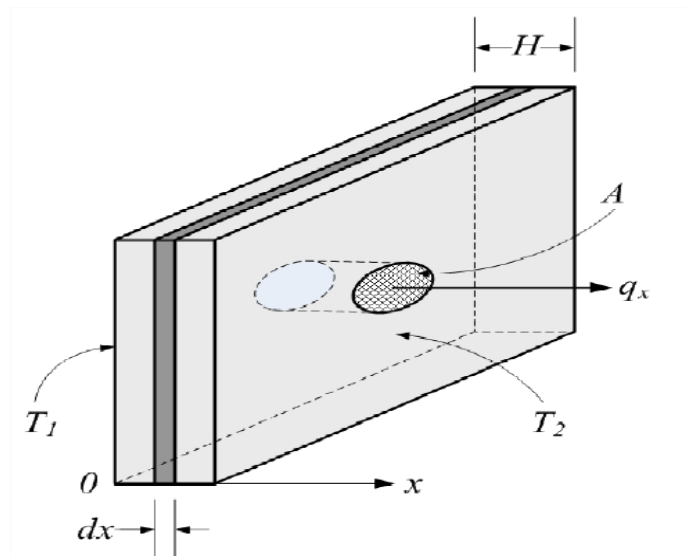


Figura 7 – Transferência de calor numa placa plana [13]

Esta lei estabelece que a taxa do fluxo de calor por condução, numa determinada direção é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção, representado esquematicamente na Figura 7. Com o fluxo de calor na direção X, a lei de Fourier é dada por:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

em que:

$Q_{cond}$  é a Taxa de fluxo de calor por condução [W];

$k$  é a Coeficiente de condutividade térmica [W/m.K];

$A$  é a Área no sentido positivo dos x [m<sup>2</sup>];

$dT$  é a Gradiente de temperaturas [K];

$dx$  é a Gradiente de espessura [m];

A condutividade térmica quantifica a capacidade dos materiais conduzirem calor. Materiais com alta condutividade térmica conduzem calor de forma mais rápida que os materiais com baixa condutividade térmica. Desta maneira, materiais com alta condutividade térmica são utilizados como dissipadores de calor e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados como isolamentos térmicos. Na Tabela 1 são apresentados valores do coeficiente de condutividade térmica para alguns materiais.

**Tabela 1 - Valores típicos de condutividade térmica (adaptado [16])**

	<b>k [W/m.K]</b>
<b>Prata</b>	410
<b>Cobre</b>	385
<b>Alumínio</b>	204
<b>Latão</b>	111
<b>Aço ao carbono</b>	54

## 2.4.2. Convecção

---

A convecção pode ser definida como a transferência de calor a partir de um fluido em movimento (e não ao nível molecular, como a condução). Geralmente o movimento é provocado de duas formas distintas: utilização de um sistema de agitação, ou por diferença de densidades. No primeiro caso é chamado convecção forçada (Figura 8 a)), e no segundo caso convecção natural ou livre (Figura 8 b)).

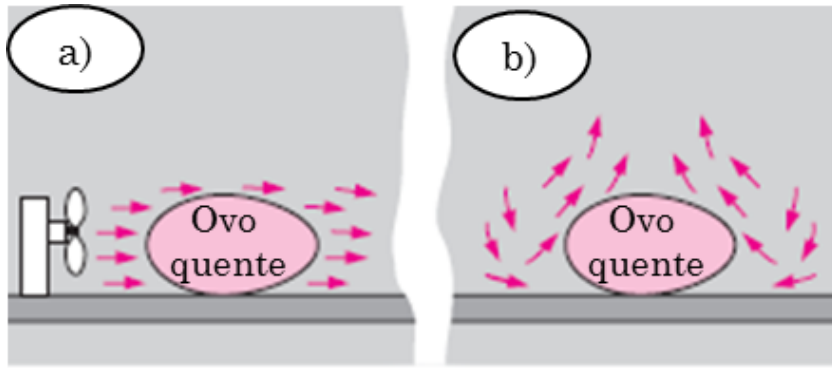


Figura 8 - Convecção. a) Convecção forçada; b) Convecção natural. (adaptado [17])

Na Figura 9, está representado o comportamento da variação da velocidade do ar, e a variação da temperatura do ar, onde se verifica que a velocidade do ar é igual a zero na superfície da placa, enquanto temperatura é máxima nesta zona.

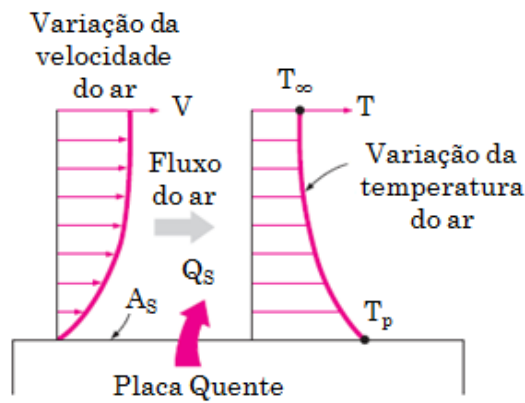


Figura 9 – Transferência de calor de uma placa quente, por convecção (adaptado [17])

O efeito global de convecção pode ser expresso através da lei de Newton para o arrefecimento, isto é [16]:

$$Q_{conv} = hA (T_p - T_{\infty}) \quad (3)$$

em que:

$Q_{conv}$  é a Taxa de fluxo de calor por convecção [W];

$h$  é o Coeficiente de transferência de calor de convecção [ $W/m^2.K$ ];

$A$  é a Área superficial [ $m^2$ ];

$T_p$  é a Temperatura da placa [K];

$T_{\infty}$  é a Temperatura do fluido [K];

### 2.4.3. Radiação

---

Todos os corpos emitem ondas eletromagnéticas, cuja intensidade aumenta com a temperatura. Essas ondas propagam-se no vácuo e é dessa forma que a luz e o calor são transmitidos do Sol para a Terra [15].

Quando nos aproximamos de uma fogueira, ou de um aquecedor elétrico, sentimos o calor emitido. Parte desse calor é obtido por convecção através do ar. No entanto é uma parcela muito pequena, pois na realidade, a maior parte do calor que recebemos dessas fontes de calor vem por radiação de ondas eletromagnéticas.

Considerações termodinâmicas mostram que um radiador ideal, ou corpo negro, emite energia numa taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo [16]. Quando dois corpos trocam calor por radiação, a troca líquida de calor é proporcional à diferença em  $T^4$ . Assim, para corpos negros, podemos calcular a taxa de fluxo de calor através da lei de Stefan-Boltzmann da radiação térmica:

$$Q_{rad} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

em que:

$Q_{rad}$  é a Taxa de fluxo de calor por radiação [W];

$\sigma$  é a Constante de proporcionalidade, também chamada constante de Stefan-Boltzmann, que é igual a  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  ;

$A$  é a Área superficial [ $\text{m}^2$ ];

$T_1$  é a Temperatura do corpo 1 [K];

$T_2$  é a Temperatura do corpo 2 [K];

Noutros tipos de superfícies, por exemplo superfícies pintadas, não emitem tanta energia comparativamente a um corpo negro, mas mesmo assim a radiação total que é emitida por estes corpos ainda é proporcional a  $T^4$  [16]. Para que se tenha em conta a natureza “cinzenta” destas superfícies tem que se introduzir a emissividade, que relaciona a radiação de uma superfície “cinzenta” com a de uma superfície negra ideal. A emissividade apresenta valores compreendidos entre 0 e 1, sendo 1 para o corpo negro ideal [17]. Para além disso, é necessário considerar que nem toda a radiação que deixa uma superfície chega à outra, uma vez que a radiação eletromagnética se propaga segundo linhas retas, ocorrendo perdas para o ambiente.

## 2.5. Termografia por infravermelhos

---

Os raios infravermelhos foram descobertos em 1800 por Sir William Herschel, enquanto este estudava quais as cores que eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos, tendo concluído que a temperatura aumentava quando se passava do violeta para o vermelho, e que a maior temperatura ocorria para além do vermelho, isto é para além do visível pelo ser humano [21].

Considerando que todos os materiais emitem radiação, esta dependerá da temperatura, e da capacidade de emitir radiação. Desta forma, a termografia por infravermelhos, permite a captação de imagens de calor, também chamados termogramas, que não são visíveis pelo olho humano. Basicamente, uma câmara de termografia por infravermelhos deteta o calor, converte num sinal elétrico, e produz imagens, indicando também as temperaturas da mesma.

A termografia é uma técnica que estende a visão humana através do espectro infravermelho. A visão humana apenas deteta uma pequena parte desse espectro, isto é, em que o comprimento de onda se situa entre  $0,4 \mu\text{m}$  e  $0,7 \mu\text{m}$  [18]. Mesmo assim, podemos dividir os raios infravermelhos entre ondas curtas ( $2\text{-}5 \mu\text{m}$ ) e ondas longas ( $8\text{-}14 \mu\text{m}$ ), sendo que geralmente são estas últimas as detetadas pelas câmaras de infravermelhos, conforme se detalha na figura 10.

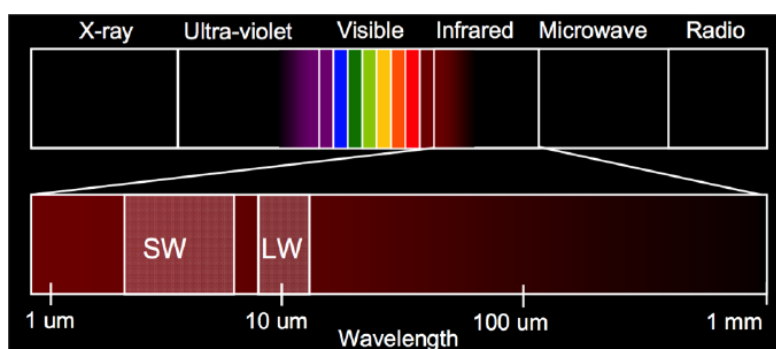


Figura 10 – Espectro eletromagnético [18]

## 2.6. Energia Solar

---

O Sol é a principal fonte de energia, e sem ela não seria possível a vida no planeta Terra. Esta energia consegue ao mesmo tempo ser a fonte mais antiga, e mais moderna utilizada pela humanidade. A energia solar proveniente da radiação solar direta, e indireta

foi a base que permitiu aos nossos antepassados a sua sobrevivência, permitindo ainda com o seu desenvolvimento criar tecnologias para a controlar, em benefício do seu bem-estar.

Para que uma fonte de energia possa ser considerada sustentável, esta não pode ser comprometida com o seu uso continuado, não pode emitir gases poluentes em quantidades significativas, não pode dar lugar a outros problemas ambientais, e não pode criar problemas graves de saúde. Com esta definição, conclui-se que as fontes de energia renováveis são bastantes sustentáveis, comparativamente com os combustíveis fósseis ou nucleares. A energia renovável apresenta-se como uma solução para alguns problemas sociais que estão relacionados com o consumo de combustíveis fósseis. Esta solução é fulcral para países como Portugal, onde este recurso é escasso, e como tal consegue-se diminuir a dependência económica e ainda reduzir o impacto negativo que resulta da queima dos combustíveis.

### 2.6.1. Aproveitamento de energia solar

No Sol, ocorre um processo de fusão nuclear, onde dois núcleos de hidrogénio se fundem com um de hélio, o que provoca radiação de uma grande quantidade de energia, em forma de ondas eletromagnéticas. A energia que é dissipada continuamente no espaço é de cerca de  $3,87 \times 10^{26}$  W, sendo apenas uma pequena parte direcionada para o planeta Terra, pela razão de este estar a uma grande distância, e de ter uma dimensão muito inferior ao Sol. É estimado que a pequena parte de energia que é direcionada para a Terra é de cerca de 173.000 TW, o que equivale a cerca de 4500 vezes todas as necessidades energéticas mundiais [19].

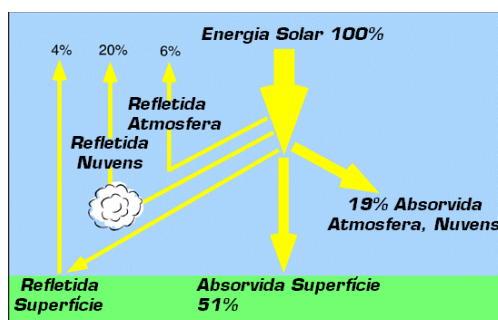


Figura 11 – Energia solar e respetiva absorção [19]

Na Figura 11 encontra-se um esquema da energia solar e a respetiva absorção. Verifica-se que a energia radiante recebida pela Terra, 30% é refletida, 19% absorvida pela atmosfera e radiada posteriormente sendo os restantes 51% absorvidos pela superfície.

A luz solar é composta por fotões que podem penetrar em alguns materiais e até atravessá-los. No caso dos painéis, os materiais devem ter a capacidade de absorver a luz visível, de forma que parte do fluxo luminoso absorvido seja restituída sob a forma de energia elétrica.

Um raio luminoso que incida sobre um material que pode sofrer 3 fenómenos físicos:

- A reflexão: a luz é refletida pela superfície do material;
- A refração: a luz atravessa o material;
- A absorção: a luz penetra no material mas não sai. A energia é restituída sob outra forma;

O planeta Terra apresenta uma forma esférica, e o seu eixo tem várias inclinações ao longo do ano, o que fará por consequência que a incidência solar tome diferentes valores, e origina as estações do ano em que se observa diferentes níveis de temperaturas médias. Para além da variação do ângulo de declinação, o movimento de translação do planeta Terra em torno do Sol descreve uma rota elíptica, fazendo com que a distância entre os dois astros varie ao longo do ano, conforme se apresenta na Figura 12.

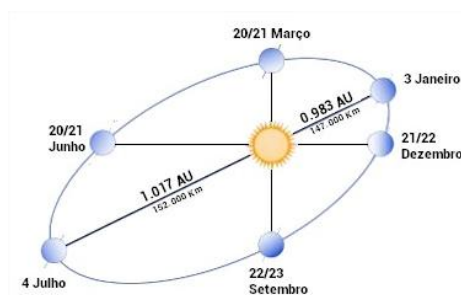


Figura 12 – Ciclo Solar [19]

Deste modo, verifica-se uma distribuição dos níveis de irradiação solar que diferem essencialmente com a latitude, o que faz com que Portugal seja um dos países da Europa com maior número anual de horas de disponibilidade solar.

A energia solar tem três formas principais de aplicação:

- Calor passivo: Calor que recebemos diretamente do sol. Importante na conceção de edifícios, de forma a aproveitar o aquecimento gerado por esta fonte.
- Energia fotovoltaica: utiliza a energia do sol para gerar eletricidade para utilização em vários aparelhos elétricos.
- Solar térmico: utilização do calor do sol para fornecer água quente sanitária ou para aquecimento.

### 3. Materiais e Procedimentos Experimentais

---

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais, os respectivos ensaios assim como os equipamentos utilizados na caracterização mecânica e física dos compósitos processados com diferentes frações mássicas de fillers.

#### 3.1. Matriz e Cargas

---

No desenvolvimento das placas, foi usada a resina epóxida Biresin L74, dois tipos de cargas diferentes, nomeadamente, partículas de latão, partículas de alumínio e fibra curtas de vidro.

A resina epóxida utilizada no estudo é fabricada pela Sika e comercializada com o nome comercial Biresin<sup>®</sup> L74. As principais características desta resina são: boa impregnação, boas propriedades termomecânicas, e grande resistência ao calor (depois de submetida a pós-cura). Nos anexos do presente relatório encontra-se a ficha técnica desta resina, onde é possível ver todas as suas propriedades. Na Tabela 2, são apresentadas as principais propriedades, necessárias para o estudo em causa.

**Tabela 2 – Propriedades da resina epóxida Sika - Biresin<sup>®</sup> L74, com endurecedor**

	<b>Resina</b>
<b>Densidade</b>	1,18 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Módulo à Flexão</b>	2900 [MPa]
<b>Tensão à Flexão</b>	140 [MPa]
<b>Temperatura de Transição Vítrea</b>	180 [°C]

O latão foi cedido por uma fábrica de torneiras, de origem Espanhola. Este latão resulta do processo de corte do jito, e da separação de torneiras (cada molde tem duas cavidades), e portanto encontra-se na forma de partículas de latão. Por motivos de confidencialidade não foi cedida a ficha técnica deste material, e como tal, foram obtidas as suas principais propriedades, mediante os equipamentos dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica, e do Departamento de Engenharia Civil da ESTG. As principais propriedades, granulometria, densidade aparente, densidade real, e fração de empacotamento, foram determinantes para este estudo, e encontram-se na Tabela 3.

O pó de alumínio utilizado é fornecido pela empresa Rebelco, e é na realidade um pó de alumínio atomizado sem revestimento, com grau de pureza mínima de 99,5%. Apresenta uma granulometria de 99% menos que 150 µm, uma densidade aparente de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, densidade real de 2,7 g/cm<sup>3</sup> e o tamanho médio das partículas é de 50 µm. Nos

anexos do presente relatório encontra-se a ficha técnica do alumínio, onde é possível ver todas as suas propriedades. Na Tabela 4, são apresentadas as principais propriedades, necessárias para o estudo em causa.

As fibras de vidro utilizadas como reforço, são do tipo E, com 6 mm de comprimento, e densidade de 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Estas fibras são fornecidas pela PPG industries, com o nome comercial Chopped Strand 3313. Nos anexos do presente relatório encontra-se a ficha técnica da fibra de vidro, onde é possível ver as suas propriedades.

**Tabela 3 – Propriedades principais do Latão**

	<b>Latão</b>
<b>Granulometria</b>	0 a 75 [µm]
<b>Densidade Aparente</b>	2,15 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Densidade Real</b>	8,16 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Fração de Empacotamento</b>	26%

**Tabela 4 – Propriedades principais do Alumínio**

	<b>Latão</b>
<b>Granulometria</b>	0 a 150 [µm]
<b>Densidade Aparente</b>	1,2 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Densidade Real</b>	2,7 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Fração de Empacotamento</b>	44%

## 3.2. Granulometria

---

A separação por granulometria pode ser entendida como a separação de um material em duas ou mais classes de tamanhos. A classificação granulométrica foi realizada recorrendo a peneiros manuais disponíveis para o efeito.

Na Figura 13, é apresentado o procedimento de separação por granulometrias, com recurso a peneiros manuais. Este método consiste em colocar as partículas no peneiro superior (malha de maior dimensão), agitar, de forma que estas atravessem as várias malhas, colocadas de forma decrescente, em termos de tamanho da malha, até ficarem depositados numa delas, ou na panela de fundo.

O peneiro onde as partículas ficarem depositadas indica-nos que a sua granulometria se encontra entre a classe desse peneiro, e a do imediatamente acima. No caso de as partículas ficarem depositadas na panela de fundo, significa que os peneiros usados têm a malha demasiado grande para as partículas em estudo.



Figura 13 – Separação por granulometria, com a utilização de peneiros manuais

### 3.3. Densidade aparente das cargas

A densidade aparente corresponde a uma massa a dividir pelo volume que é ocupado por uma massa de um sólido (pó ou granulado), incluindo a sua porosidade, ou seja, considera também o espaço ente os grãos de partículas.

Para obter a densidade aparente, em primeiro lugar pesou-se uma proveta graduada, e descontou-se a sua tara. De seguida colocou-se uma determinada massa de partículas até obter um volume indicado na proveta (Figura 14 a), medindo depois a sua massa na balança analítica (Figura 14 b).

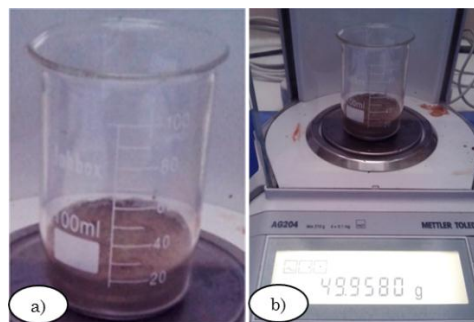


Figura 14 – Densidade aparente. a) Medição de volume; b) Medição de massa.

Terminados os passos anteriores, e sabendo que a densidade é dada pela Equação (5), foi possível calcular a densidade aparente.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

em que:

$\rho$  é a Densidade [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  é a Massa [Kg]

$V$  é o Volume [ $\text{m}^3$ ]

### 3.4. Densidade real da carga

---

A densidade real corresponde a uma massa a dividir pelo volume real, isto é, sem considerar os espaços entre os grãos de partículas.

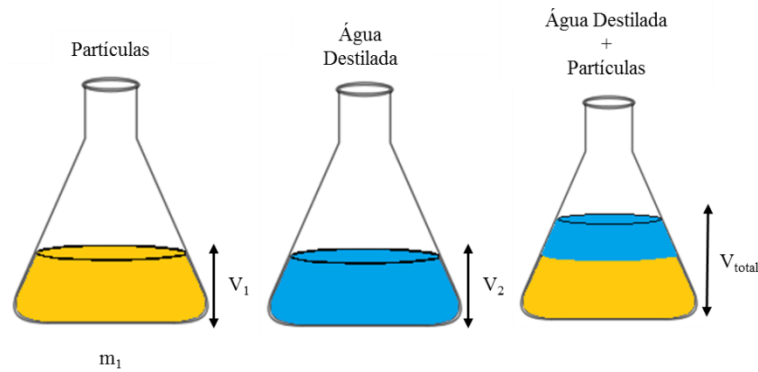


Figura 15 – Representação esquemática para obter a densidade real

Para se conseguir medir a densidade real, usou-se o método esquematizado na Figura 15. O primeiro passo foi pesar uma proveta, descontar a sua tara, colocar de seguida uma determinada massa de partículas até obter um volume indicado na proveta, obtendo desta forma a massa ( $m_1$ ), e o volume ( $V_1$ ). De seguida repetiram-se os passos, mas com água destilada, obtendo-se o volume ( $V_2$ ). A partir daqui, fez-se a mistura das partículas com a água, submetendo-se de seguida a vácuo para garantir que não há bolhas de ar. Posto isto, foi possível medir o volume total ( $V_{total}$ ) da mistura através da escala da proveta.

Este método usa a água destilada para ocupar os interstícios entre os vários grãos da matéria-prima, fazendo com que o volume da mistura seja inferior à soma dos volumes em separado. Desta forma, o volume ocupado pelas partículas é igual ao volume total, menos o volume da água destilada.

Adaptando a Equação (5) a este método, obtemos a Equação (6):

$$\rho = \frac{m_1}{V_{total} - V_2} \quad (6)$$

em que:

$\rho$  é a Densidade [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m_1$  é a Massa das partículas [Kg]

$V_{total}$  é o Volume total (partículas + água destilada) [ $\text{m}^3$ ]

$V_2$  é o Volume da água destilada [ $\text{m}^3$ ]

### 3.5. Moldes

---

No fabrico das placas com diferentes materiais compósitos foi usado um molde de alumínio, apresentado na Figura 16, que permite produzir placas por vazamento em vácuo.

Por forma a facilitar a limpeza do molde e evitar a aderência do compósito processado, foi aplicado desmoldante nas zonas moldantes do molde (Figura 16 a)), assim como também foi aplicada uma película antiaderente na base do molde (Figura 16 b)).

Na Figura 16 c), pode-se observar os procedimentos relativos à montagem no molde. Esta operação é finalizada com o aperto de vários parafusos de fixação das partes laterais. Na Figura 16 d), é possível observar o molde com uma placa de compósito em processo de cura.

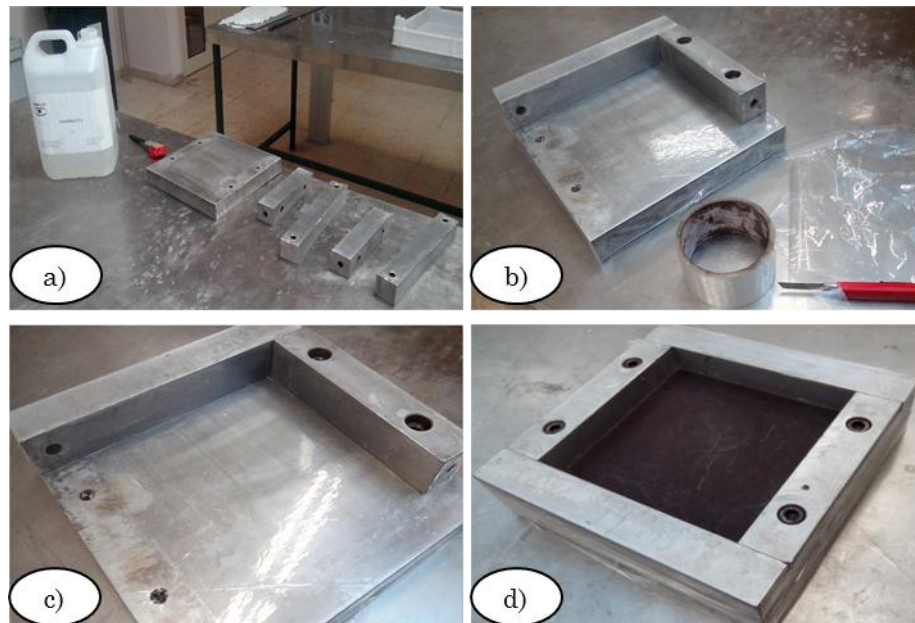


Figura 16 - Molde metálico para o processamento de placas. a) Aplicação de desmoldante; b) Aplicação de película antiaderente e fita-cola; c) Montagem do molde; d) Molde com placa em processo de cura.

### 3.6. Fração de empacotamento

---

A partir das equações relativas à fração de empacotamento, para compósitos com particuladas de latão e partículas de alumínio, obtém-se valores de fração volúmica relativamente baixa. No entanto, foram feitas misturas de partículas de latão com frações volúmicas de 50%, 40%, 30% e 20% e na análise da Figura 17, é possível comprovar que só com frações inferiores a 30% se começa a ter alguma fluidez necessária ao processamento dos compósitos.

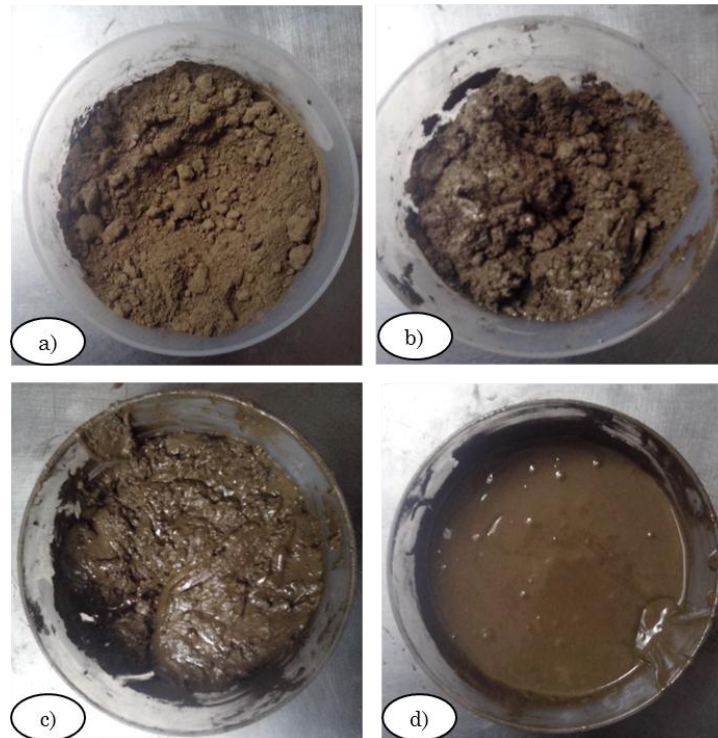


Figura 17 – Compósito Resina + Latão com frações volúmicas: a)  $V_p=50\%$ ; b)  $V_p=40\%$ ; c)  $V_p=30\%$ ; d)  $V_p=20\%$ .

No enchimento do molde com frações volúmicas de latão superiores a 25% (corresponde a 70% fração mássica) constatou-se a dificuldade em preencher toda a cavidade do molde, tendo sido detetadas a existência de bolhas no interior dos provetes, inviabilizando a sua produção.

No caso dos compósitos com partículas de alumínio, a fração de empacotamento é superior à do latão (fração volúmica de 44%), verificando-se a mesma situação que no latão no que respeita à fluidez, originando provetes com defeitos. No presente trabalho, usou-se a fração volúmica de 40%, que corresponde a uma fração mássica de 60%.

### 3.7. Vazamento em vácuo

Para se obter provetes homogéneos, e com o mínimo de defeitos, há que ter muito cuidado na preparação dos materiais de adição, assim como durante a fase de mistura da resina, endurecedor, cargas e fibras.

O fabrico dos provetes seguiu a metodologia abaixo discriminada:

- Aplicação de 3 camadas de desmoldante no molde;
- Doseamento da carga, e resina (Figura 18 a) e (Figura 18 b), respetivamente;
- Aquecimento da resina e carga a 80°C durante 10 minutos, para que esta fique com fluidez mais alta;

- Agitação da resina e da carga (Figura 18 c));
- Colocação em vácuo durante 10 minutos (Figura 18 d));
- Doseamento e adição do endurecedor;
- Agitação da resina, endurecedor, e carga;
- Vazamento para o molde.
- Colocação em vácuo durante 20 minutos;

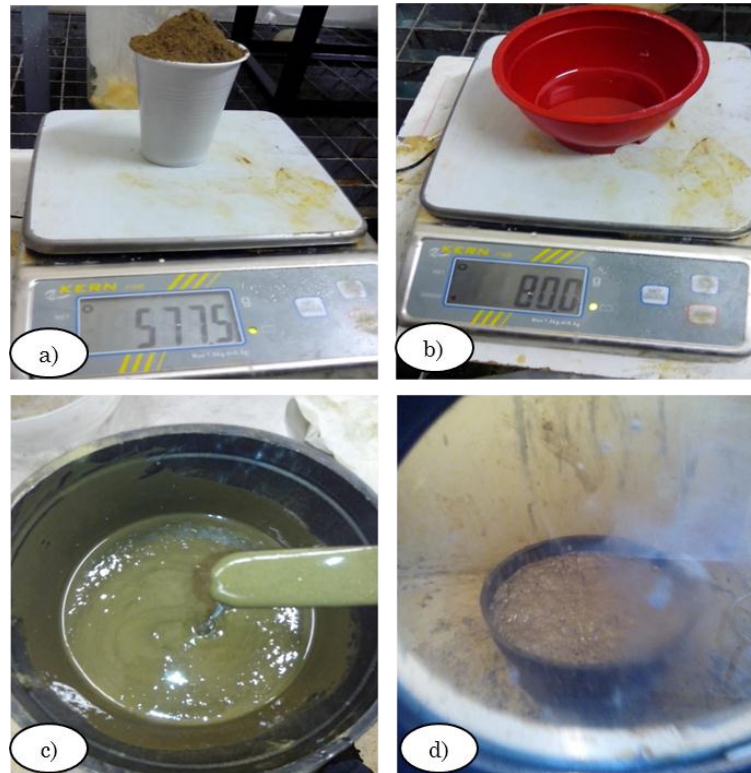


Figura 18 – Processo de vazamento. a) Doseamento da carga; b) Doseamento da resina; c) Agitação da resina e carga; d) Aplicação de vácuo.

### 3.8. Cura e pós cura

O processo de cura foi sempre realizado com a placa dentro do molde, de forma a não haver risco da mesma partir ao desmoldar.

A cura e pós cura foram realizadas de acordo com as indicações na ficha técnica da resina, disponível nos anexos deste relatório, recorrendo à estufa do laboratório de prototipagem rápida.

Após o processamento do material, esperou-se sempre pelo menos 16 horas antes de efetuar a cura a uma temperatura de 80 °C durante 5 horas. Depois disso, aguardou-se mais 24 horas, efetuando-se a pós cura durante 8 horas a uma temperatura de 160 °C.

### 3.9. Retificação dimensional e acabamento dos provetes

---

Os provetes foram obtidos a partir de placas, e portanto houve a necessidade de as cortar em provetes. O corte foi realizado por processos de corte de arranque de apara. Por uma questão de uniformização da rugosidade superficial, todos os provetes foram submetidos a lixa, e polimento. Após o corte e acabamento dos provetes, estes ficaram com as dimensões indicadas na Figura 19.

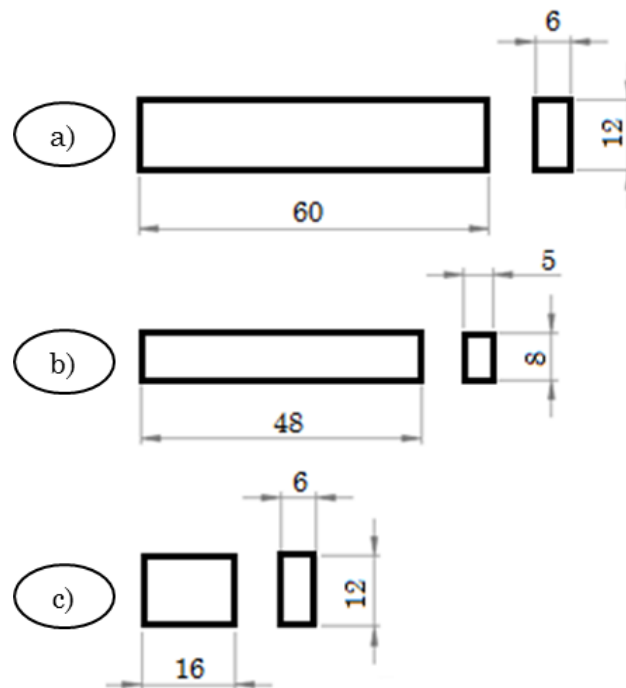


Figura 19 – Dimensões dos provetes. a) Flexão em 3 pontos; b) DMA – flexão em 3 pontos e absorção de água; c) Compressão;

### 3.10. Densidade real e experimental do compósito

---

Para a determinação das densidades foi usada a balança eletrônica de precisão, disponível no laboratório de materiais, modelo Mettler Toledo AG204 (Figura 20 a)), equipada com os acessórios para o efeito (Figura 20 b)), e um termómetro. Para este ensaio, não é necessário um tipo de provete específico, bastando apenas uma pequena amostra do material.

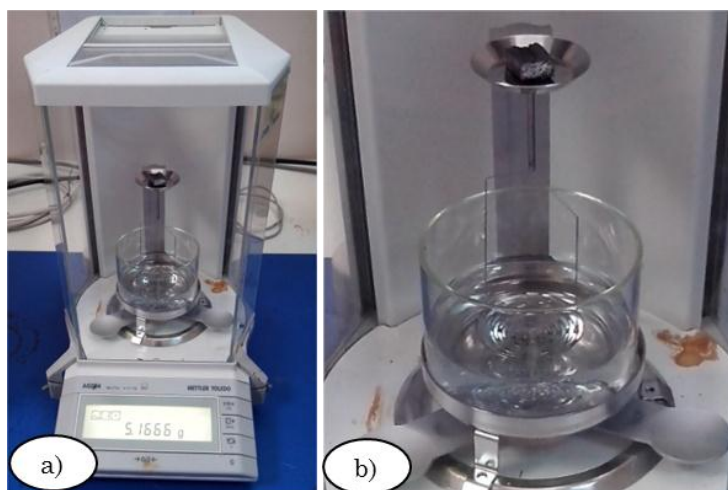


Figura 20 – a) Balança Eletrónica de Precisão, modelo Mettler Toledo AG204; b) Acessórios medição de densidades;

Para a determinação das densidades, teve-se em conta o Princípio de Arquimedes, de acordo com os passos abaixo indicados:

- Montagem da balança com os respetivos acessórios;
- Colocação de água destilada no copo;
- Medição da temperatura da água destilada, e retirado o valor da massa volúmica desta, em função da temperatura ( $\rho_{\text{água destilada}}$ ).
- Descontou-se a tara do copo, e da água destilada;
- Medição da massa do provete fora de água ( $M_{\text{fora de água}}$ );
- Medição da massa do provete dentro de água ( $M_{\text{dentro água}}$ );
- Repetição dos passos para todos os provetes;

A partir dos valores obtidos, e recorrendo à Equação (7), foi possível obter o valor da densidade experimental dos provetes.

$$\rho_{\text{proвете}} = \frac{M_{\text{fora de água}}}{M_{\text{fora de água}} - M_{\text{dentro água}}} \times \rho_{\text{água destilada}} \quad (7)$$

em que:

$\rho_{\text{proвете}}$  é a Densidade do provete [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$M_{\text{fora de água}}$  é a Massa do provete fora de água [g]

$M_{\text{dentro água}}$  é a Massa do provete dentro de água [g]

$\rho_{\text{água destilada}}$  é a Densidade da água destilada [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

Para além da densidade experimental, foi calculada a densidade teórica, a partir da Lei das Misturas. Esta lei estabelece que as propriedades do compósito serão intermédias entre as propriedades da carga e da matriz, e é dada pela Equação (8).

$$\rho_{comp} = f_{vc} \times \rho_c + f_{vm} \times \rho_m \quad (8)$$

em que:

$\rho_{comp}$  é a Densidade do compósito [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$f_{vc}$  é a Fração volúmica da carga

$\rho_c$  é a Densidade da carga [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$f_{vm}$  é a Fração volúmica da matriz

$\rho_m$  é a Densidade da matriz [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

A partir da comparação entre a densidade experimental, e a densidade teórica, podemos retirar conclusões sobre o método de fabrico dos provetes, e alterar os parâmetros do mesmo até conseguir chegar ao pretendido.

### 3.11. Ensaio de absorção de água

---

Para avaliar o comportamento mecânico dos compósitos em estudo, foram efetuados ensaios de absorção de água. Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D570-98, e de acordo com a metodologia a seguir indicada:

- Efetuou-se a secagem dos provetes. Para isso foram colocados durante duas horas a  $110\text{ }^\circ\text{C}$  na estufa, tendo sido arrefecidos, e pesados, de forma a obter o seu peso em seco;
- Foram colocados um a um, com intervalos de quinze minutos, num recipiente com água destilada;
- Um a um, foram retirados do recipiente, pela ordem anterior, e com o mesmo intervalo de tempo, tendo sido limpo as suas superfícies e colocado na balança analítica;
- Foi registado a massa dos provetes com a periodicidade definida;
- Após o registo dos dados, e a criação de gráficos das massas obtidas em função do tempo, usando regressão linear aos vários gráficos obteve-se o valor da massa para  $t=0s$ ;

Para obter a percentagem de absorção de água,  $W$ , recorreu-se à Equação (9):

$$W(\%) = \frac{(Massa_{seco} - Massa_{molhado})}{Massa_{seco}} \times 100 \quad (9)$$

### 3.12. Ensaios de condutividade térmica

---

A condutividade térmica pode ser definida como a capacidade de uma material conduzir calor e permite obter o gradiente de temperatura ao longo da sua geometria.

Foi testada uma placa correspondente a cada carga, e fração mássica (Resina; 43, 63 e 70  $V_m$  para partículas de latão; 67 e 68%  $V_m$  para partículas de latão e fibra de vidro; 40 e 60%  $V_m$  para partículas de alumínio; 58 e 59%  $V_m$  para partículas de alumínio e fibra de vidro). Na Figura 21, é possível visualizar o aspeto de uma placa de resina Biresin L74 (Figura 21 a)), e de uma placa de compósito reforçado com partículas de latão com 10% de fração volúmica (Figura 21 b)).

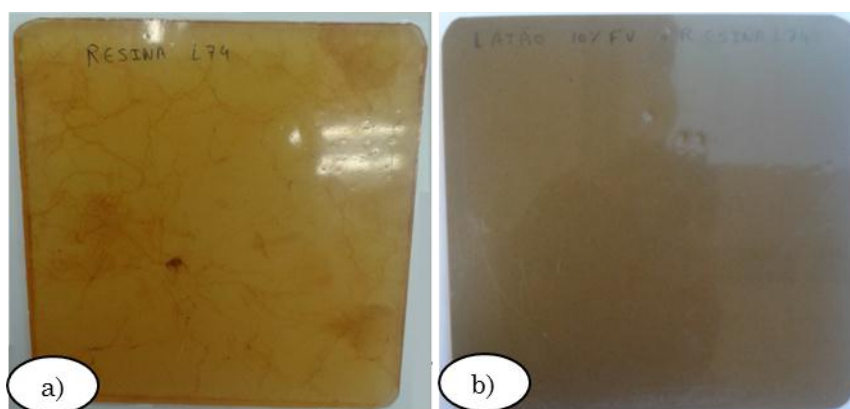


Figura 21 – Placa usada nos ensaios de condutividade térmica. a) Placa de resina Biresin L74; b) Placa de compósito reforçado com partículas de latão ( $V_p = 10\%$ ).

A medição do coeficiente de condutividade térmica foi efetuada numa sala fechada, tendo sido utilizado o equipamento a seguir indicado para obter os dados necessários para o cálculo da condutividade térmica:

- Caixa isolada;
- Lâmpada de 46W;
- Câmara de infravermelhos FLUKE Ti45;
- Multímetro Kayse My64;
- Termopar tipo K;
- Termómetro para medir a temperatura ambiente;

Nas Figura 22 é possível visualizar os equipamentos de forma isolada, e na Figura 23 em funcionamento.

Na Figura 22 a), apresenta-se a caixa isolada, com uma placa de resina L74 com  $V_m=0\%$  em fase de ensaio. A parte exterior da caixa é de madeira, tendo no seu interior

outra caixa em metal, para receber a fonte de calor. O isolamento foi efetuado com poliestireno expandido. Esta caixa permite a abertura da parte frontal para a colocação da placa, dispondo de uma janela com uma área de 140 x 145 mm que permite a passagem de calor para a placa.

A Figura 22 b) apresenta o interior da caixa com a fonte de aquecimento, isto é, uma lâmpada de 46W. Esta zona da caixa é em metal, e dispõe de um casquilho também metálico para receber a lâmpada, que foi usada como fonte de calor. Esta caixa é metálica, por forma a refletir as ondas de calor, e fazer com que estas passem apenas pela parte frontal da caixa, que é onde se encontra a placa a ser ensaiada.

Na Figura 22 c), visualiza-se a câmara de infravermelhos FLUKE Ti45. Este modelo de câmara termográfica dispõe de um detetor de 160 x 120 e de uma sensibilidade à temperatura até 0,08 °C, que proporcionam imagens de alta resolução que permitem ver as mais pequenas diferenças de temperatura [20]. Este modelo de câmara de infravermelhos pode incluir a opção de temperaturas elevadas, permitindo leituras até 1200 °C.

Na Figura 22 d), pode visualizar-se o multímetro, e uma parte do termopar do tipo k utilizado. Este equipamento permitiu obter a leitura da face interior da placa, tendo sido colado a ponta do termopar nesta. O termopar do tipo k é um termopar de uso genérico, tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas que cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  [21].

Na Figura 23 pode visualizar-se o sistema em funcionamento. O sistema de montagem do equipamento consiste em colar o termopar do tipo k na face interior da placa a ser testada, seguindo-se o seu posicionamento na zona específica da caixa. Após isso, é ligada a fonte de calor. Sensivelmente duas horas depois é ligada a câmara infravermelhos FLUKE Ti45, que se encontrava distanciada a aproximadamente 1000 mm da caixa isolada, e se fazia a leitura da temperatura, através das imagens de infravermelhos e dos valores de temperatura apresentados. Quando a câmara indicava que a temperatura se encontrava no regime permanente, registava-se o valor indicado por esta (Figura 23 b)), que é a temperatura da face exterior da placa, assim com o registo da temperatura ambiente, e da temperatura interior da placa, que era obtida a partir do termopar.

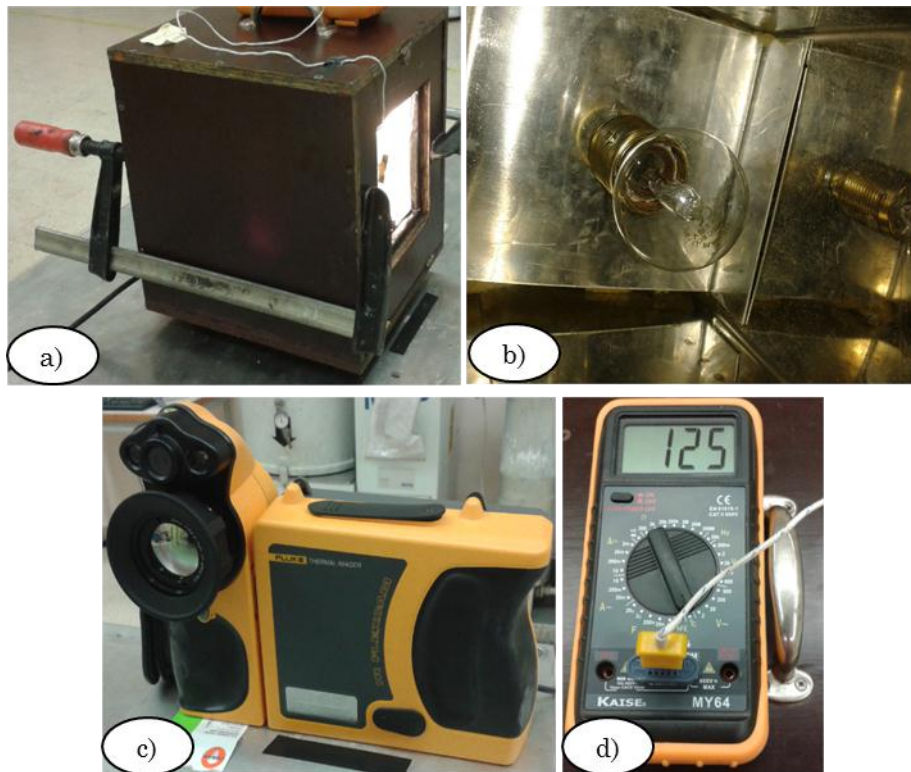


Figura 22 – Equipamento usado para medir o coeficiente de condutividade térmica a) Caixa isolada; b) Lâmpada 46W; c) Câmara de infravermelhos; d) Multímetro com termopar do tipo k.

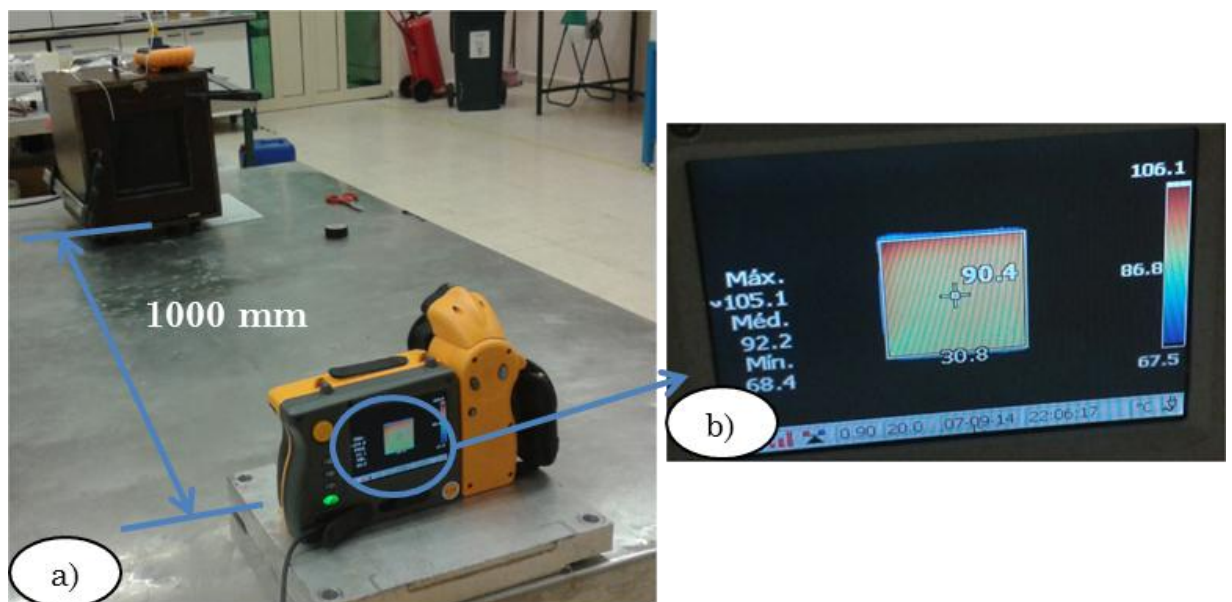


Figura 23 – Medição do coeficiente de condutividade térmica. a) Conjunto de equipamentos usados na medição do coeficiente de condutividade térmica; b) Pormenor de leitura de temperatura da face exterior.

A partir dos dados obtidos por este método, e utilizando a equação de Fourier, foi possível obter o coeficiente de condutividade térmica para as várias placas com diferentes cargas e frações mássicas.

### 3.13. Ensaios de flexão

---

Os ensaios de flexão em três pontos foram efetuados no laboratório de materiais, de acordo com a norma ASTM D790. Estes ensaios foram efetuados na máquina universal, modelo ZWICK - Z100. Esta máquina (Figura 24 a)) é eletromecânica e permite a aplicação de ensaios com aplicações de cargas de 100kN. A grande vantagem de ser uma máquina universal, é que basta trocar os acessórios de ensaio para poder efetuar outro tipo de ensaios. Na Figura 24 b), é possível ver em pormenor a máquina equipada com acessórios para ensaios de flexão em 3 pontos, com um provete.

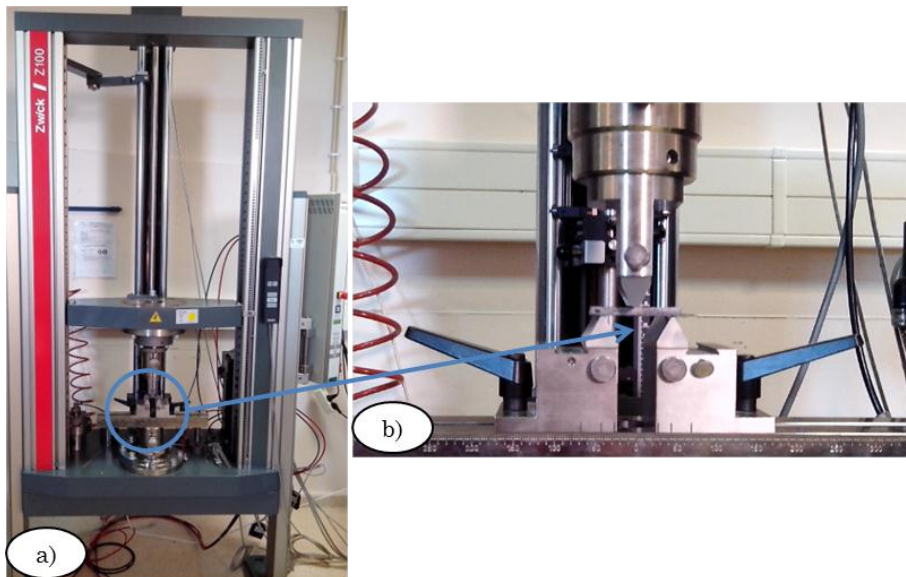


Figura 24 – Ensaios de Flexão em 3 pontos. a) Máquina ZWICK – Z100; b) pormenor de teste de provete à flexão.

A máquina ZWICK - Z100 é comandada a partir de um computador com software para o efeito, permitindo o registo de dados tais como força e deslocamento, e ainda a criação de gráficos instantâneos de força/deslocamento ao longo do ensaio.

Foram testados 3 provetes de cada material compósito (resina L74, latão, latão com fibra de vidro, alumínio e alumínio com fibra de vidro) e fração mássica.

Na Figura 25 encontra-se o esquema do ensaio efetuado. Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente, e consiste em colocar o provete apoiado nos dois apoios, a uma distância de 45 mm, onde é aplicada uma força, com uma velocidade de 2,5 mm/min até à rotura do material.

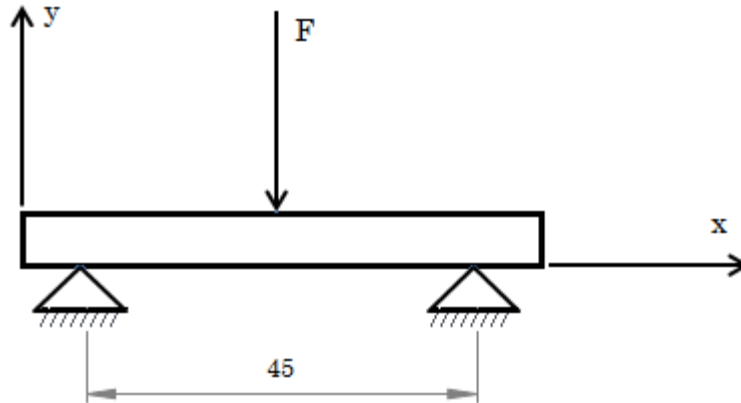


Figura 25 - Ilustração do esquema de ensaio de flexão

No fim de todos os ensaios realizados, seguiu-se o tratamento dos dados. O primeiro passo, foi calcular a tensão de flexão, cuja qual se fez com base na Equação (10):

$$\sigma_{flex} = \frac{M_f y}{I} \quad (10)$$

em que:

$\sigma_{flex}$  é a Tensão à flexão [MPa]

$M_f$  é o Momento fletor máximo [N.mm]

$y$  é a Linha neutra [mm]

$I$  é o Momento de inércia inicial [mm<sup>4</sup>]

No caso em estudo sabemos que o momento fletor é máximo a meio da viga, e portanto dado pela Equação (11):

$$M_{f \text{ máx}} = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \quad (11)$$

em que:

$F$  é a Força aplicada [N]

$L$  é a Distância entre eixos [mm]

Sabemos ainda que para secções retangulares o momento de inercia é dado pela Equação (12):

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (12)$$

em que:

$b$  é a Base [mm]

$h$  é a Altura [mm]

Desta forma, e considerando que a linha neutra é dada por  $h/2$  podemos reescrever a Equação (10) da seguinte forma:

$$\sigma_{flex} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (13)$$

Com estes valores calculados, procedeu-se à elaboração de gráficos força/deslocamento e tensão/deslocamento por forma a analisar os vários provetes.

O segundo passo, foi o cálculo do módulo de elasticidade à flexão, com base na Equação (14):

$$E_{flex} = \frac{FL^3}{48yI} \quad (14)$$

em que:

$E_{flex}$  é o Módulo de elasticidade à flexão [N/mm]

$F$  é a Força aplicada [N]

$L$  é a Distância entre eixos [mm]

$I$  é o Momento de inércia inicial [mm<sup>4</sup>]

Com os dados obtidos, foi possível calcular o módulo de elasticidade à flexão em função do deslocamento, tendo sido obtido o seu valor através da aplicação de uma regressão linear na zona elástica, aos valores do gráfico.

### 3.14. Ensaios de compressão

---

Os ensaios de compressão, foram efetuados segundo a norma ASTM D638, na mesma máquina que os ensaios de flexão, isto é, na máquina ZWICK - Z100 mas com os acessórios adequados a testes de compressão, como se pode ver na Figura 26.

Na Figura 27 encontra-se o esquema do ensaio efetuado. O ensaio consiste em colocar o provete entre o prato superior e prato inferior da máquina de forma a este ser comprimido por ação de uma força  $F$ , exercida a uma velocidade de 2,5 mm/min até à rotura do material. Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente.



Figura 26 - Ensaio de compressão na máquina ZWICK – Z100

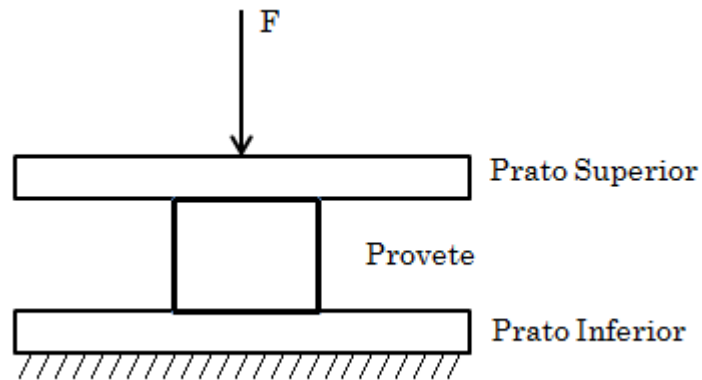


Figura 27 - Ilustração do esquema de ensaio à compressão

Tal como nos ensaios de flexão, foram testados 3 provetes de cada material, e fração mássica. No fim de todos os ensaios realizados, seguiu-se o tratamento dos dados. O primeiro passo, foi calcular a tensão de compressão, cuja qual se fez com base na Equação (15):

$$\sigma_{comp} = \frac{F}{A} \quad (15)$$

em que:

$\sigma_{comp}$  é a Tensão de compressão [MPa]

$F$  é a Força aplicada [N]

$A$  é a Área [mm<sup>2</sup>]

Com estes valores calculados, procedeu-se à criação de gráficos força/deslocamento e tensão/deslocamento por forma a analisar os vários provetes.

O segundo passo, foi o cálculo da deformação, com base na Equação (16):

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (16)$$

em que:

$\epsilon$  é a Deformação

$\delta$  é a Extensão [mm]

$L$  é a Comprimento do provete [mm]

O módulo de elasticidade à compressão foi obtido através do declive da reta, no gráfico tensão/deformação, na zona elástica.

### 3.15. Ensaios de DMA

---

A partir dos ensaios DMA (Dynamic Mechanical Analysis) de flexão em 3 pontos, pode-se avaliar o comportamento mecânico do material quando sujeito a um programa de temperatura controlada e obter a temperatura de transição vítrea  $T_g$  do provete (picos das curvas módulo de perda ou tangente de perda).

Este ensaio foi realizado segundo a norma DIN 53457 Standard. Para isso recorreu-se ao analisador mecânico diferencial Triton Tritec 2000 (Figura 28 a)), equipado com os respetivos acessórios para efetuar o ensaio de DMA de flexão em três pontos (Figura 28 b)), com a variação de temperatura entre 20 °C e 220 °C, e uma taxa de aquecimento de 5 °C por minuto.

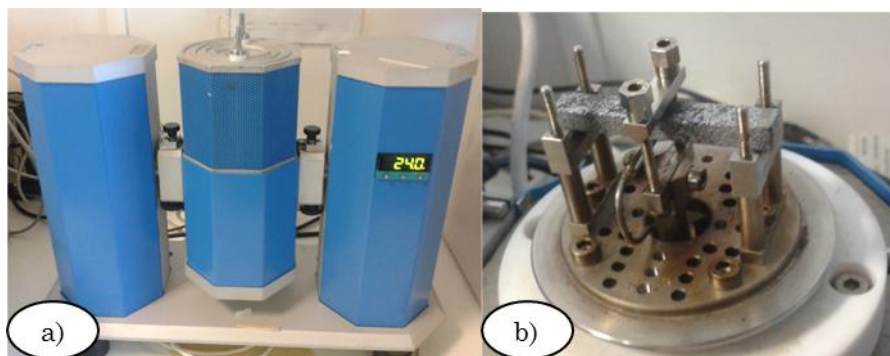


Figura 28 – Equipamento utilizado nos ensaios de DMA: a) máquina Triton Tritec 2000; b) pormenor de montagem na máquina de um provete de alumínio para a realização de ensaio em flexão em 3 pontos.

## 4. Resultados Experimentais e Discussão

---

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos diferentes ensaios mecânicos e físicos realizados de acordo com os procedimentos experimentais indicados no Capítulo 3.

Na análise de resultados foram considerados os valores médios e os desvios padrão dos provetes obtidos a partir de placas de resina com diferentes frações mássicas de partículas de latão, alumínio, aos quais foram adicionados fibras curtas de vidro.

### 4.1. Densidades

---

A determinação da densidade dos materiais em estudo permite avaliar se o tipo de processamento utilizado foi o mais adequado, considerando a diferença entre a densidade teórica e a densidade experimental (com base na lei das misturas).

Neste estudo, foram analisadas as densidades dos vários materiais utilizados nos diferentes ensaios mecânicos e físicos. Os valores teóricos e experimentais são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Valores de densidade teórica e experimental, referentes aos diferentes compósitos com diferentes frações mássicas ( $V_m$ ) de partículas de latão e alumínio e fibra de vidro (FV).**

Material	Densidade Teórica [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade Experimental [g/cm <sup>3</sup> ]	%
Resina	1,18	1,17	0,84%
Latão 43%	1,88	1,86	0,92%
Latão 63%	2,57	2,54	1,04%
Latão 70%	2,92	2,91	0,29%
Latão 67% + FV 3%	2,79	2,81	-0,67%
Latão 68% + FV 2%	2,85	2,86	-0,28%
Alumínio 40%	1,52	1,53	-0,55%
Alumínio 60%	1,79	1,80	-0,38%
Alumínio 58% + FV 2%	1,77	1,76	0,73%
Alumínio 59% + FV 1%	1,78	1,76	1,27%

Analisando os resultados, pode-se concluir que a técnica de processamento de fabrico dos provetes é adequada, pois a diferença entre a densidade teórica e a densidade máxima é de 1,27%, e a média é de 0,32 %. Esta diferença é mínima, e pode ser atribuída a fatores, tais como: processo de mistura (resina, endurecedor, cargas e fibras); erros de

leitura (medição da massa dos vários constituintes); porosidades devido ao processo de vazamento; aglomerados de partículas; distribuição das partículas; etc.

## 4.2. Ensaios de absorção de água

Os materiais poliméricos de um modo geral têm tendência para absorver água e naturalmente, tem tendência para terem uma diminuição das propriedades mecânicas em função do tempo de imersão em água. Por outro lado, as cargas utilizadas no fabrico dos compósitos híbridos em estudo não têm essa tendência. Assim, os materiais processados com maior fração mássicas de cargas irão ter uma menor absorção de água e, conseqüentemente uma menor diminuição das propriedades mecânicas. Na Figura 29 foi possível constatar que os materiais com maiores frações mássicas de partículas apresentam uma tendência de menor absorção de água relativamente à matriz polimérica utilizada (resina epóxida Biresin L74) no fabrico dos materiais compósitos.

Verifica-se ainda que a partir de aproximadamente 25 dias, os valores de absorção de água tendem a estabilizar, o que leva a crer que a resina atingiu a capacidade máxima de saturação para estas frações mássicas (Figura 29).

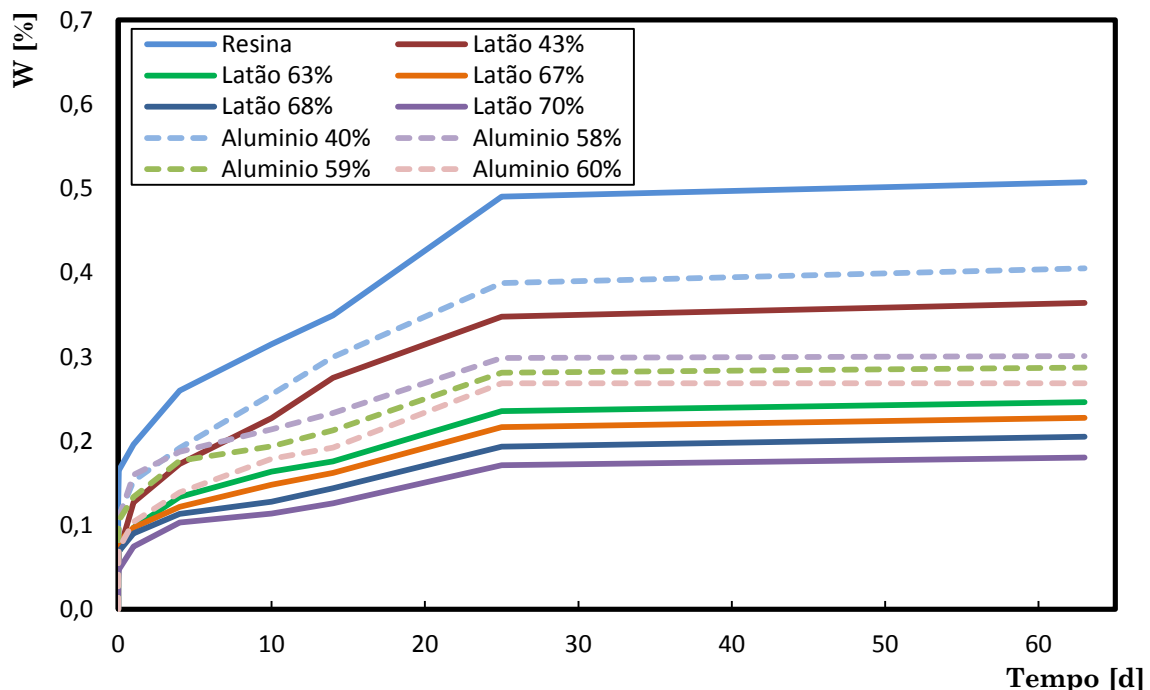


Figura 29 - Absorção de água versus tempo, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.

### 4.3. Ensaios de condutividade térmica

Na determinação da condutividade térmica foi utilizado um equipamento específico (capítulo 3.12) para obter os dados necessários ao cálculo da condutividade térmica:  $T_{ext}$ ,  $T_{int}$ ,  $T_{amb}$ .

Na medição da temperatura da face exterior ( $T_{ext}$ ) das placas, foi usado a câmara de infravermelhos FLUKE TI45. Esta câmara apresenta uma imagem térmica onde se pode ver a gama de temperaturas ao longo da placa, assim como a temperatura máxima, média e mínima. A câmara permite ainda a gravação de imagens em infravermelhos e imagens “reais”.

Na Figura 30, podem ver-se duas imagens obtidas com a câmara de infravermelhos. A placa da Figura 30 a) corresponde a uma placa de latão com uma fração mássica de 70% que atingiu uma temperatura média superior à placa da Figura 30 b) que corresponde uma placa de resina L74 ( $V_m=0\%$ ). Verifica-se portanto que há uma distribuição maior de calor na placa da Figura 30 a), e ainda se verifica que nas duas placas a parte superior apresenta uma temperatura superior, pois como as placas foram testadas na vertical, há uma tendência para o calor fluir para a parte superior da caixa isolada.

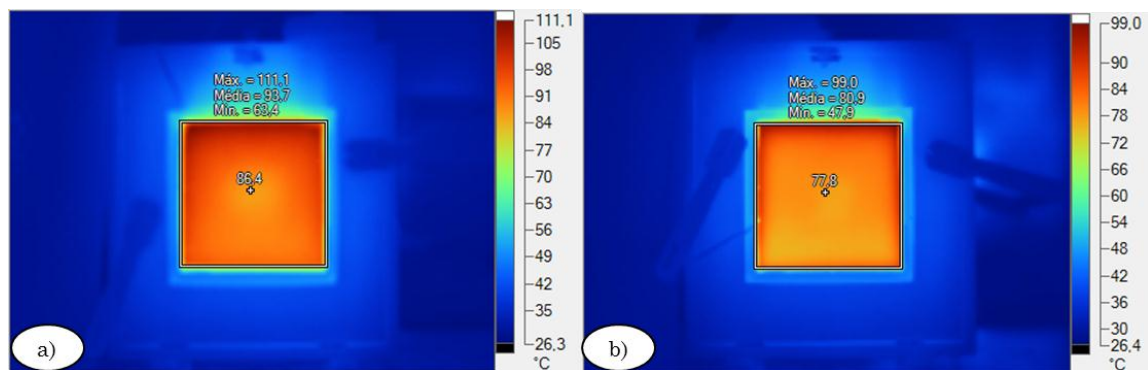


Figura 30 – Imagens de infravermelhos. a) Placa de compósito de matriz resina L74 com partículas de latão  $V_m=70\%$ ; b) Placa resina L74  $V_m=0\%$ .

Após a temperatura da face exterior da placa em compósito estabilizar, isto é, entrar em regime permanente, foram registados os dados por forma a calcular o coeficiente de condutividade térmica, conforme se pode observar na Tabela 6. Os dados registados foram a potência da lâmpada ( $P$ ) que é de 46W, a área no sentido perpendicular ao escoamento do calor ( $A$ ) que é de  $0,0203\text{m}^2$ , a temperatura exterior na superfície da placa ( $T_{ext}$ ), a temperatura interior na superfície da placa ( $T_{int}$ ), a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) e a espessura ( $e$ ) das placas processadas com resina, e com diferentes frações mássicas de

partículas de latão, latão com fibras curtas de vidro, alumínio e alumínio com fibras curtas de vidro.

**Tabela 6 – Dados obtidos nos ensaios de condutividade térmica, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.**

<b>Material</b>	<b>T<sub>ext</sub> [K]</b>	<b>T<sub>int</sub> [K]</b>	<b>T<sub>amb</sub> [K]</b>	<b>esp [m]</b>
Resina	348,15	394,15	297,8	0,0070
Latão 43%	344,15	383,15	298,2	0,0083
Latão 63%	346,15	377,15	298,6	0,0076
Latão 70%	349,15	380,15	298,3	0,0079
Latão 67% +FV 3%	348,15	379,65	298,2	0,0078
Latão 68% + FV 2%	346,35	377,15	298,2	0,0077
Alumínio 40%	351,15	382,15	298,2	0,0077
Alumínio 60%	353,15	378,15	298,2	0,0078
Alumínio 58% + FV 2%	354,15	379,15	298,2	0,0075
Alumínio 59% + FV 1%	353,15	378,65	298,2	0,0078

Os valores do coeficiente de condutividade térmica (k) apresentados na Tabela 7 foram obtidos com base na Equação (2) e dos dados apresentados na Tabela 6.

**Tabela 7 – Valores de coeficiente de condutividade térmica, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.**

<b>Material</b>	<b>k [W/m.K]</b>
Resina	0,346
Latão 43%	0,482
Latão 63%	0,555
Latão 70%	0,577
Latão 67% +FV 3%	0,552
Latão 68% + FV 2%	0,561
Alumínio 40%	0,564
Alumínio 60%	0,706
Alumínio 58% + FV 2%	0,684
Alumínio 59% + FV 1%	0,697

Na Figura 31 são apresentados os valores do coeficiente de condutividade térmica em função da fração mássica de carga e diferente tipo de material das partículas, onde se verifica que ocorre um aumento da condutividade térmica, com o aumento da carga.

Verifica-se claramente que os materiais com partículas de alumínio apresentam um coeficiente de condutividade térmica muito superior aos materiais com latão e muito superiores à resina L74 (0,346 W/m.K). Considerando materiais virgens, há que ter em conta que a condutividade térmica de referência do alumínio é quase o dobro do latão.

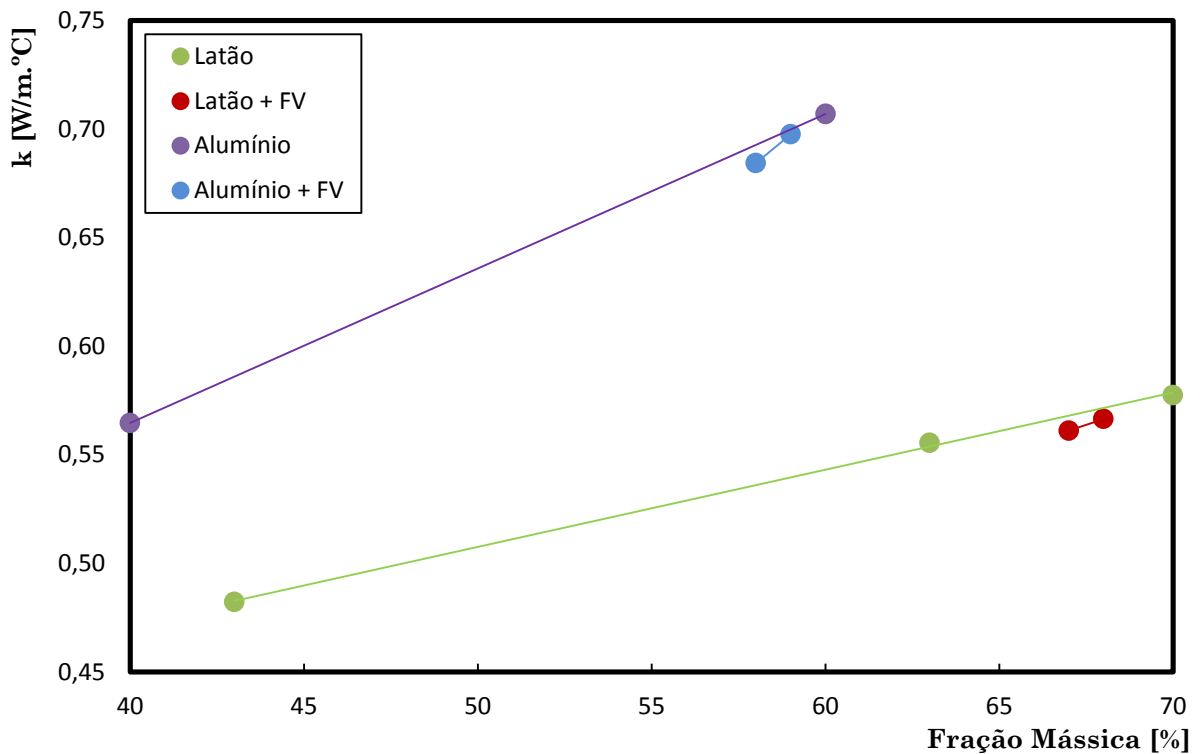


Figura 31 – Valores de Condutividade Térmica para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.

Analisando a Figura 31, verifica-se que nos compósitos com partículas de latão, há um aumento de 20% de coeficiente de condutividade térmica entre as frações mássicas de 43% e 70%, enquanto nos compósitos com partículas de alumínio há um aumento de 25% entre as frações de 40% e 60%, o que confirma que a condutividade térmica é superior nos compósitos processados com partículas de alumínio.

Comparando 40% de fração mássica de partículas de alumínio, com 43% fração mássica de latão, verifica-se que a condutividade térmica do alumínio é 17% superior. Nas frações mássicas de 60% de partículas de alumínio, e 70% fração mássica de latão, verifica-se que a condutividade térmica do alumínio é 22% superior.

Nos compósitos com fibras curtas de vidro, a condutividade térmica é ligeiramente inferior comparativamente às frações mássicas mais próximas, sem fibra de vidro.

#### 4.4. Ensaios de flexão

Na Tabela 8, apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de flexão aos vários provetes, no que diz respeito à tensão de flexão máxima e ao módulo à flexão, ao dia zero. Os valores são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão.

Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios de flexão para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.

Material	V <sub>m</sub> [%]	Nº Provete	σ <sub>flex. máx</sub> [MPa]	E <sub>flex</sub> [MPa]	
Resina	0%	1º	128,19	2531,80	
	0%	2º	145,06	2507,60	
	0%	3º	144,17	2522,10	
		<b>Média</b>	<b>139,14</b>	<b>2520,50</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>9,49</b>	<b>12,18</b>	
Latão	43%	1º	68,36	2927,10	
	43%	2º	77,80	2843,70	
	43%	3º	71,45	3175,23	
		<b>Média</b>	<b>72,54</b>	<b>2982,01</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>4,81</b>	<b>172,45</b>	
	63%	1º	88,39	5789,56	
	63%	2º	84,21	6052,25	
	63%	3º	81,66	6258,69	
		<b>Média</b>	<b>84,75</b>	<b>6033,50</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,40</b>	<b>235,13</b>	
Latão	70%	1º	89,68	7458,59	
	70%	2º	94,18	7025,36	
	70%	3º	84,07	6921,54	
		<b>Média</b>	<b>89,31</b>	<b>7135,16</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>5,07</b>	<b>284,87</b>	
	Latão + Fibra de Vidro	68% + 2%	1º	95,41	7225,58
		68% + 2%	2º	95,38	7369,69
		68% + 2%	3º	85,23	7586,69
			<b>Média</b>	<b>92,01</b>	<b>7393,99</b>
			<b>Desvio Padrão</b>	<b>5,87</b>	<b>181,78</b>
67% + 3%		1º	94,23	7589,69	
67% + 3%		2º	97,53	7358,89	
67% + 3%		3º	102,58	7458,25	
		<b>Média</b>	<b>98,11</b>	<b>7468,94</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>4,21</b>	<b>115,77</b>	
Alumínio	40%	1º	113,85	4589,58	
	40%	2º	102,35	5622,36	
	40%	3º	110,35	4859,00	
		<b>Média</b>	<b>108,85</b>	<b>5023,65</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>5,90</b>	<b>535,71</b>	
	60%	1º	112,83	6859,58	
	60%	2º	110,59	7258,55	
	60%	3º	116,98	7051,50	
		<b>Média</b>	<b>113,47</b>	<b>7056,54</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,24</b>	<b>199,53</b>	
Alumínio + Fibra de Vidro	59% + 1%	1º	110,29	7158,58	
	59% + 1%	2º	118,58	7058,69	
	59% + 1%	3º	122,58	7369,69	
		<b>Média</b>	<b>117,15</b>	<b>7195,65</b>	
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>6,27</b>	<b>158,78</b>	
	58% + 2%	1º	123,70	7400,58	

58% + 2%	2ª	128,96	7728,69
58% + 2%	3ª	118,58	7525,26
<b>Média</b>		<b>123,75</b>	<b>7551,51</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>5,19</b>	<b>165,62</b>

Na Figura 32 são apresentadas as curvas de tensão à flexão em 3 pontos versus deslocamento, da resina L74 e dos vários materiais compósitos híbridos de matriz epóxida L74 processados com diferentes frações mássicas de partículas de latão, resina, alumínio, aos quais foram adicionadas fibras curtas de vidro. Verifica-se que os materiais compósitos ensaiados apresentam o mesmo tipo de comportamento. Observa-se ainda que a resina epóxida L74 apresenta os maiores valores de tensão à flexão e de deslocamento. Apresenta, no entanto, valores de módulo à flexão inferiores aos vários compósitos de matriz epóxida processada com diferentes frações mássicas.

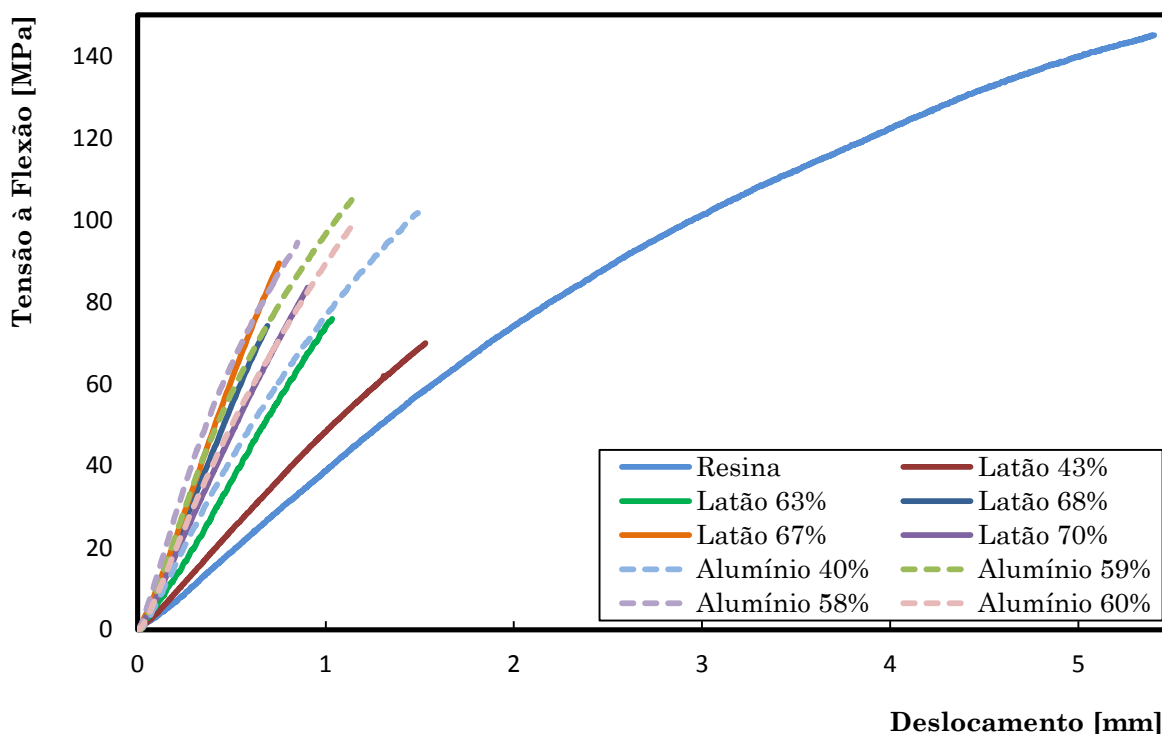


Figura 32 - Tensão à flexão em função do deslocamento, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.

Na Figura 33, são apresentados os valores máximos da tensão à flexão dos diferentes materiais compósitos processados com diferentes frações mássicas. A resina epóxida L74 apresenta o maior valor de tensão à flexão 139,14 MPa, em comparação com os compósitos processados com diferentes frações mássicas de partículas. Por outro lado, é possível observar que os restantes compósitos têm tendência de valores crescentes.

Na Figura 34, são apresentados os valores máximos da tensão à flexão dos materiais compósitos processados com diferentes frações mássicas de cargas metálicas, com fibras curtas de vidro. Verifica-se que há uma melhoria das propriedades do compósito, com o aumento da percentagem de fibra de vidro. Verifica-se ainda que o alumínio apresenta melhores propriedades comparativamente ao latão.

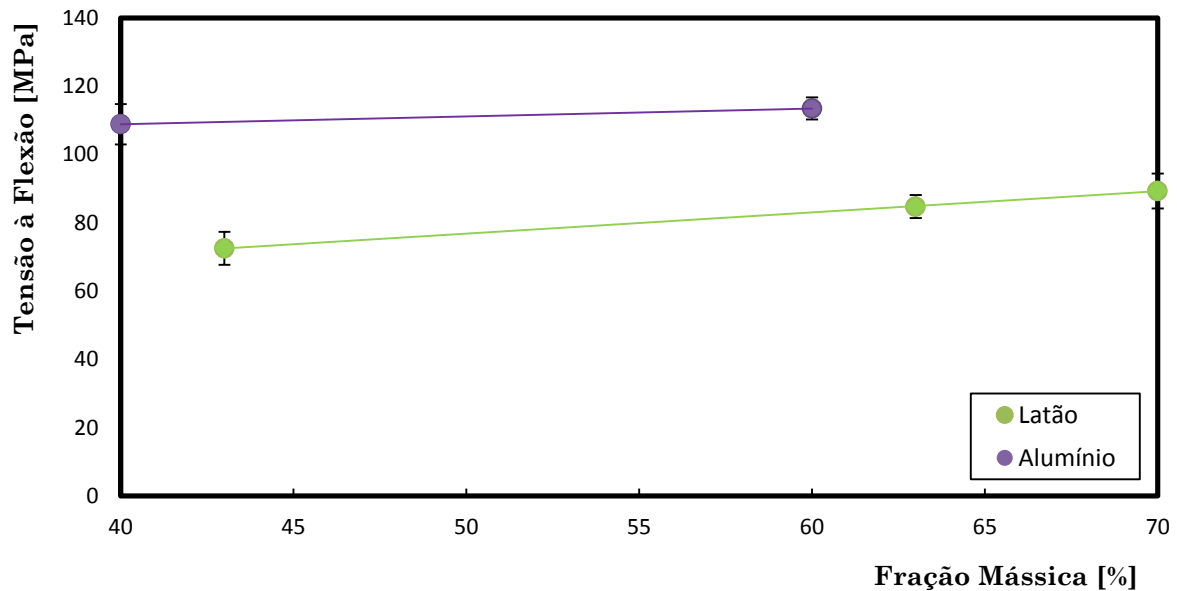


Figura 33 - Tensão à flexão em função da fração mássica para partículas de latão, resina e alumínio.

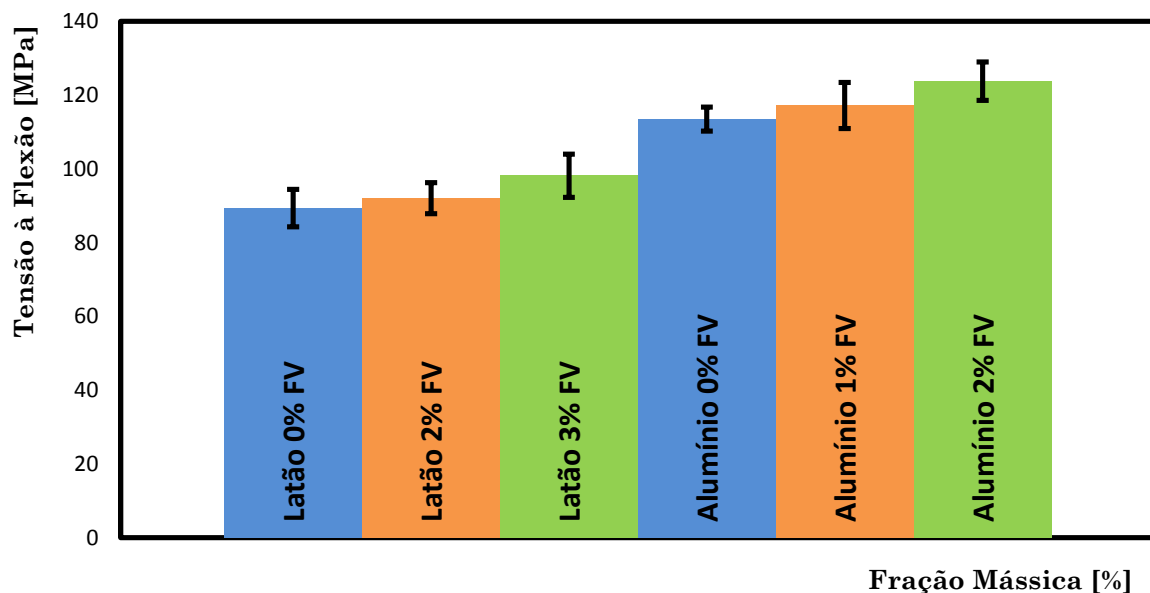


Figura 34 – Efeito da fibra de vidro, na tensão à flexão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.

Na Figura 35, pode-se observar que os vários compósitos de matriz de resina L74 com partículas metálicas processados apresentam valores crescentes do módulo à flexão

com o aumento de fração mássica das partículas. O aumento do módulo à flexão dos compósitos processados com partículas de latão é mais efetivo que com alumínio, 27% de aumento de fração mássica de partículas de latão corresponde a um aumento de 2,39% de módulo à flexão, enquanto nos compósitos com alumínio, um aumento da fração mássica em 20%, corresponde a um aumento de apenas de 1,40%.

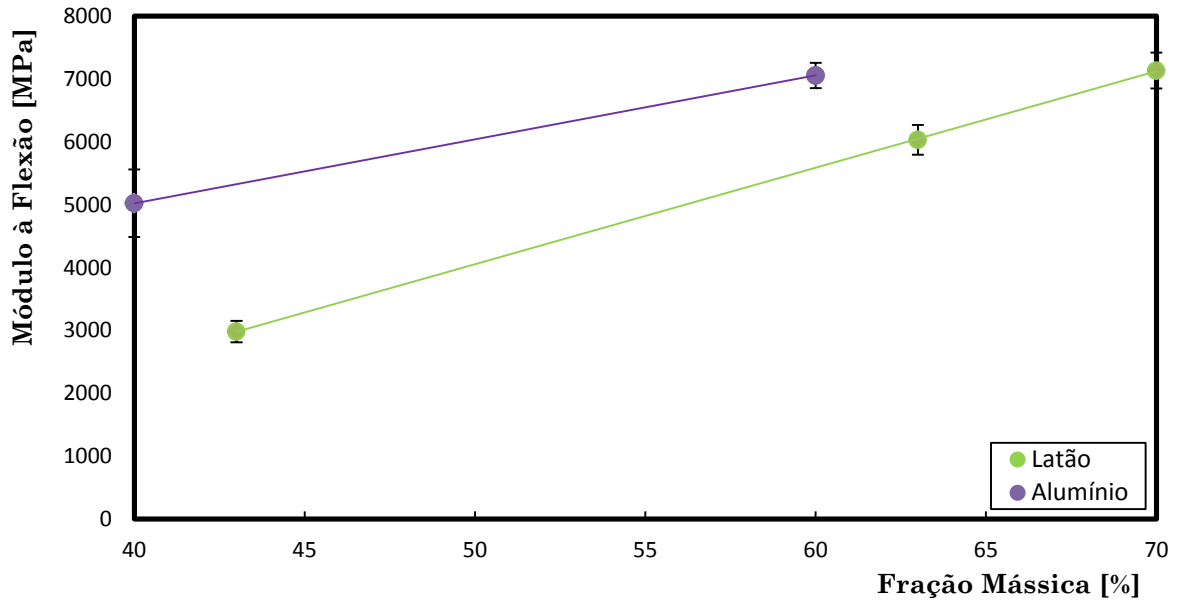


Figura 35 - Módulo à flexão em função da fração mássica para partículas de latão, resina e alumínio.

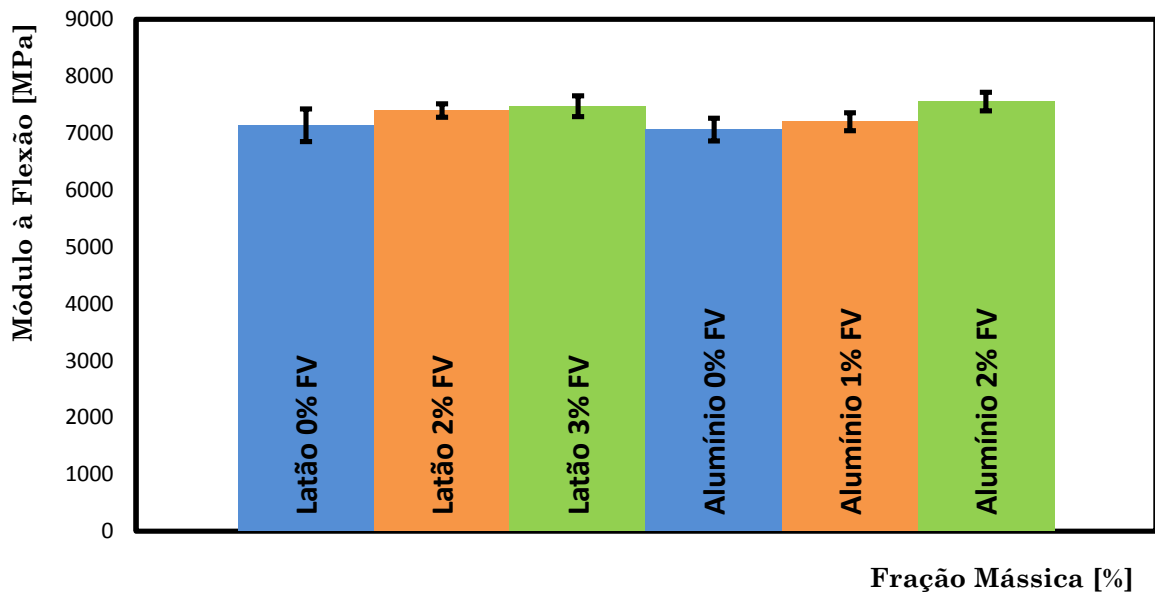


Figura 36 – Efeito da fibra de vidro, no módulo à flexão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.

Na Figura 36, são apresentados os valores do módulo à flexão referentes ao efeito da fibra de vidro nos compósitos de latão e alumínio. Há um aumento do módulo com a adição de fibra de vidro, tendo o alumínio com 2% de fibra de vidro o resultado maior.

Na Figura 37 apresentam-se os valores do módulo à flexão para compósitos processados com resina, partículas de latão, e fibras curtas de vidro, e na Figura 38 para compósitos processados com resina, partículas de alumínio, e fibras curtas de vidro, em função de dias de imersão em água, 0, 4, 25 e 63. A partir destas figuras pode-se verificar que ocorre a perda de propriedades para todos os provetes estudados, ou seja, com o aumento do tempo de permanência em água, ocorre uma diminuição dos valores de módulo para os materiais processados, pois a difusão de água tanto na matriz, como na interface, pela sua natureza hidrófila poderá absorver água, provocando o aumento de volume, gerando tensões internas e por sua vez micro-deformações

Com exceção da resina, para tempos de permanência superiores a 25 dias, a perda de propriedades tende a estabilizar, não apresentando variações significativas, o que se justifica com o facto da absorção de água atingir o máximo.

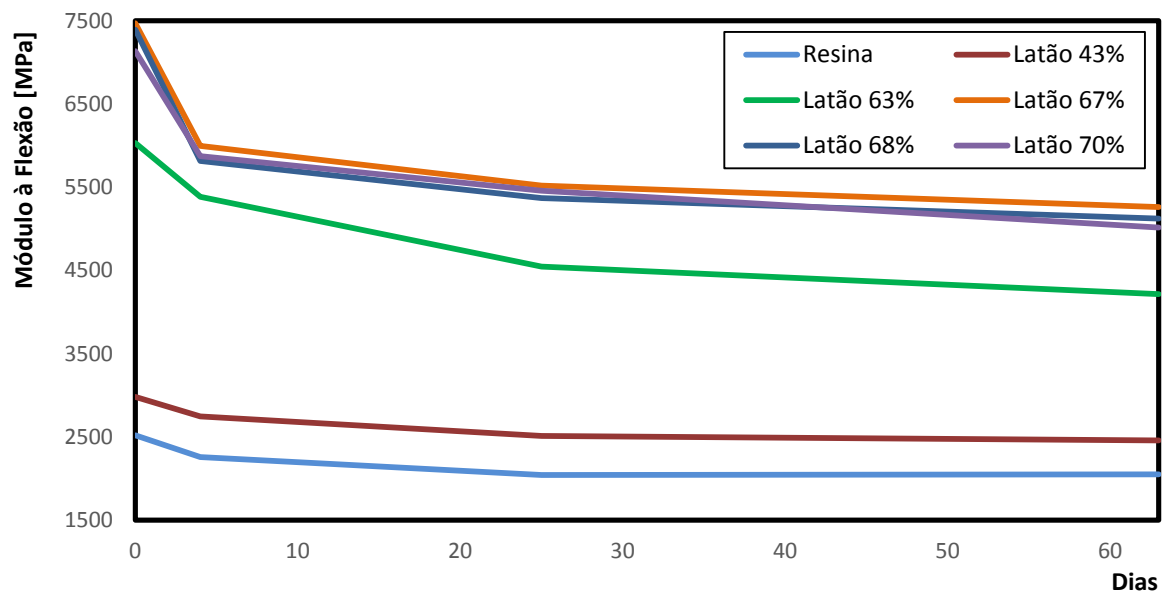


Figura 37 - Módulo à flexão da fração mássicas para partículas de latão, em função de dias em água, 0, 4, 25 e 63.

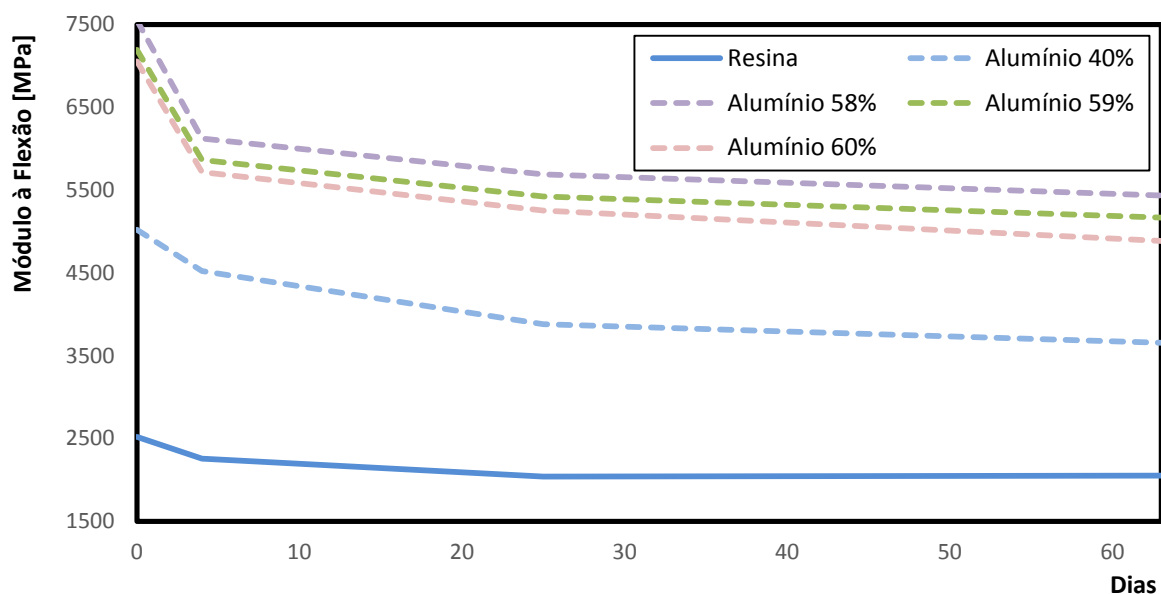


Figura 38 - Módulo à flexão da fração mássicas para partículas de alumínio, em função de dias em água, 0, 4, 25 e 63.

## 4.5. Ensaios de compressão

Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de compressão, tensão máxima à compressão e módulo de elasticidade à compressão. Os valores são apresentados em termos dos seus valores médios e desvios padrão.

Tabela 9 - Valores obtidos nos ensaios de compressão para resina L74 e os diferentes compósitos processados com partículas de latão e alumínio e fibras curtas de vidro (FV).

Material	V <sub>m</sub> [%]	Nº Provete	$\sigma_{comp. máx}$ [	E <sub>comp</sub> [MPa]
Resina	0	1º	179,93	1778,30
	0	2º	186,79	1675,10
	0	3º	177,70	1746,70
	<b>Média</b>		<b>181,48</b>	<b>1733,37</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>4,74</b>	<b>52,88</b>
Alumínio	43	1º	148,58	1833,50
	43	2º	140,69	1932,40
	43	3º	159,69	2187,40
	<b>Média</b>		<b>149,65</b>	<b>1984,43</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>9,55</b>	<b>182,60</b>
Alumínio	63	1º	192,53	2454,10
	63	2º	170,69	2490,90
	63	3º	198,48	2706,90
	<b>Média</b>		<b>187,23</b>	<b>2550,63</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>14,63</b>	<b>136,58</b>
Latão	70	1º	185,69	2693,10
	70	2º	205,69	2670,20
	70	3º	195,96	2823,40
	<b>Média</b>		<b>195,78</b>	<b>2728,90</b>

		<b>Desvio Padrão</b>	<b>10,00</b>	<b>82,64</b>
<b>Latão + Fibra de Vidro</b>	67% + 3%	1º	240,58	2678,60
	67% + 3%	2º	230,59	2834,59
	67% + 3%	3º	225,66	2990,80
		<b>Média</b>	<b>232,28</b>	<b>2834,66</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>7,60</b>	<b>156,10</b>
	68% + 2%	1º	220,36	2684,40
	68% + 2%	2º	200,36	2698,25
	68% + 2%	3º	210,60	2895,96
		<b>Média</b>	<b>210,44</b>	<b>2759,54</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>10,00</b>	<b>118,35</b>
<b>Alumínio</b>	40	1º	256,84	1510,50
	40	2º	252,53	1652,70
	40	3º	268,64	1690,60
		<b>Média</b>	<b>259,34</b>	<b>1617,93</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>8,34</b>	<b>94,95</b>
	60	1º	318,98	1700,00
	60	2º	294,16	1826,60
	60	3º	297,89	1924,60
		<b>Média</b>	<b>303,68</b>	<b>1817,07</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>13,38</b>	<b>112,60</b>
<b>Alumínio + Fibra de Vidro</b>	58% + 2%	1º	345,69	2025,69
	58% + 2%	2º	315,69	2183,80
	58% + 2%	3º	320,69	2059,66
		<b>Média</b>	<b>327,36</b>	<b>2089,72</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>16,07</b>	<b>83,23</b>
	59% + 1%	1º	305,69	1953,00
	59% + 1%	2º	325,69	1896,69
	59% + 1%	3º	302,25	1758,69
		<b>Média</b>	<b>311,21</b>	<b>1869,46</b>
		<b>Desvio Padrão</b>	<b>12,66</b>	<b>99,98</b>

Na Figura 39 é possível analisar o comportamento mecânico à compressão da resina L74 e dos vários materiais compósitos de matriz L74 com diferentes frações mássicas de partículas de latão, resina, alumínio, e com fibras curtas de vidro, que é idêntico entre todos eles. A partir da figura pode-se concluir que a resina epóxida L74 apresenta os maiores valores de tensão à compressão, e de deslocamento. Apresenta no entanto, valores de módulo à compressão inferiores aos vários compósitos de matriz epóxida processados com diferentes frações mássicas. Pode-se observar que com o aumento da fração mássica que as curvas se deslocam para a esquerda, o que significa que o módulo aumenta, enquanto o deslocamento diminuí.

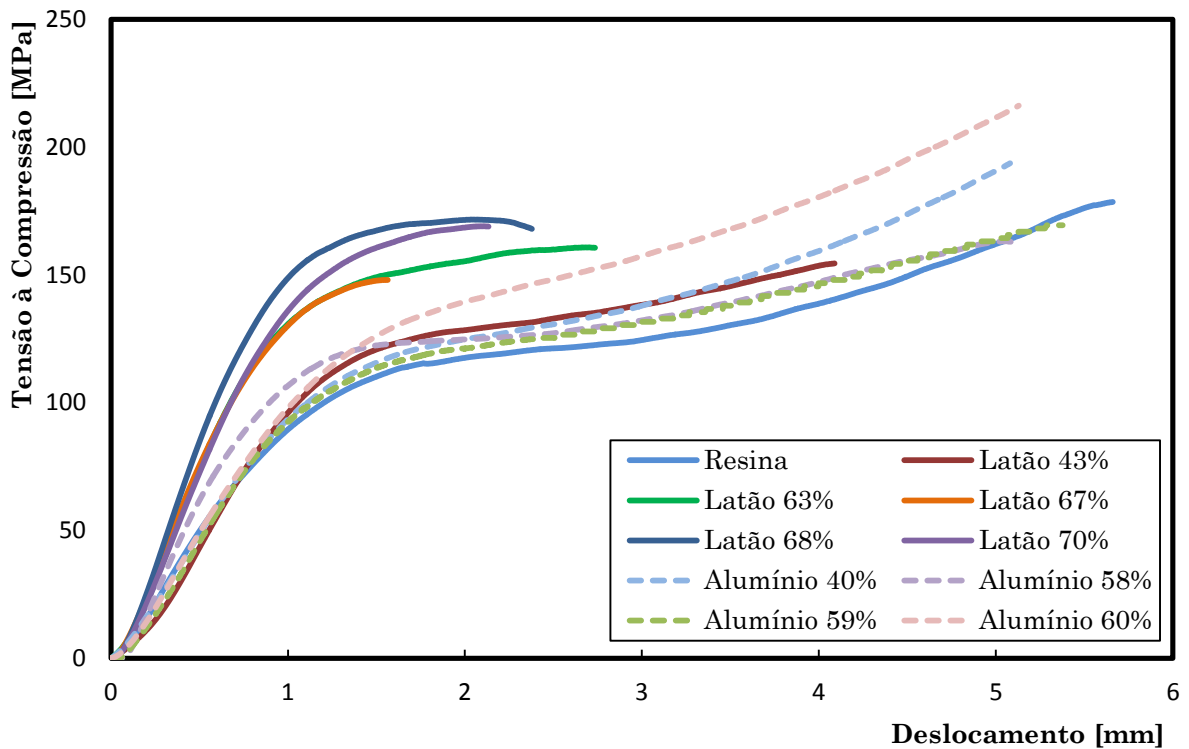


Figura 39 - Tensão à compressão em função do deslocamento, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.

Na Figura 40 são apresentados os valores máximos da tensão à compressão dos diferentes materiais compósitos com diferentes frações mássicas de cargas metálicas. É possível observar que os materiais compósitos com frações mássicas acima dos 43% (compósitos com partículas de latão) e acima dos 40% (compósitos com alumínio) apresentam valores crescentes de tensão à compressão até aos 70 e 60% respetivamente.

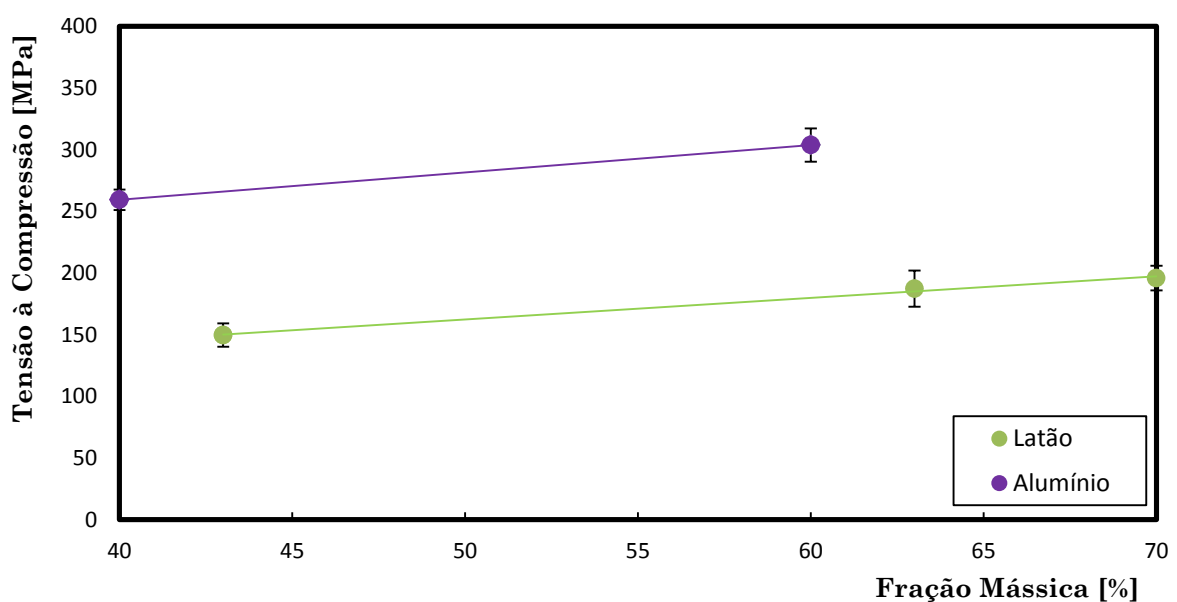


Figura 40 - Tensão à compressão em função da fração mássica e tipo de material das partículas.

Na Figura 41, são apresentados os valores máximos da tensão à compressão dos materiais compósitos processados com diferentes frações mássicas de cargas metálicas, com fibras curtas de vidro. Verifica-se que há uma melhoria das propriedades do compósito, com o aumento da percentagem de fibra de vidro. Verifica-se ainda que o alumínio apresenta melhores propriedades comparativamente ao latão.

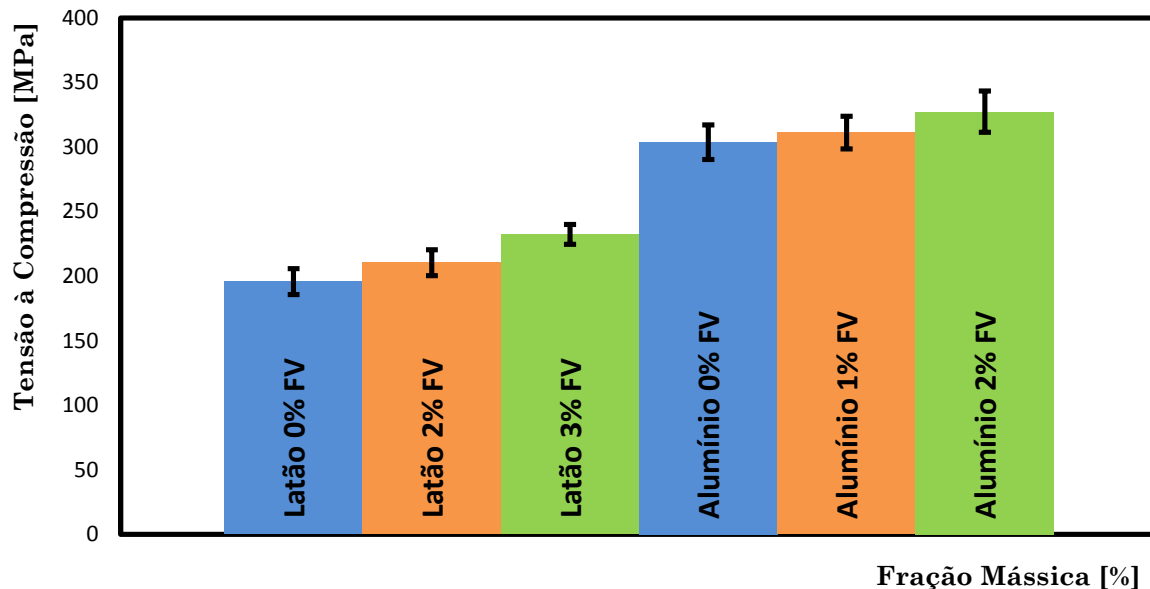


Figura 41 – Efeito da fibra de vidro, na tensão à compressão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.

Na Figura 42, pode observar-se que a adição de partículas de latão ou alumínio tem um papel importante no aumento do módulo à compressão. Os vários compósitos processados com partículas metálicas apresentam valores crescentes do módulo à compressão com o aumento de fração mássica das partículas. Por outro lado, o aumento do módulo à compressão dos compósitos processados com partículas de latão é mais efetivo que com alumínio para as frações mássicas consideradas.

Na Figura 43, são apresentados os valores do módulo à compressão referentes ao efeito da fibra de vidro nos compósitos de latão e alumínio. Verifica-se que há um aumento do módulo com a adição de fibra de vidro, tendo o latão com 3% de fibra de vidro o melhor resultado.

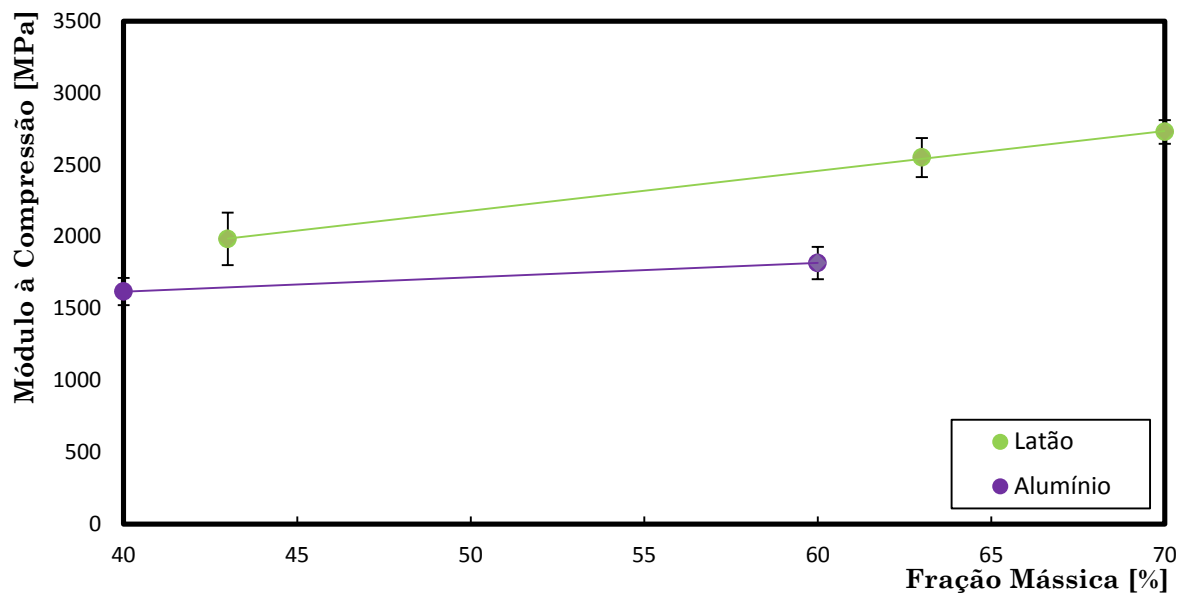


Figura 42 - Módulo à compressão em função da fração mássica e tipo de material das partículas.

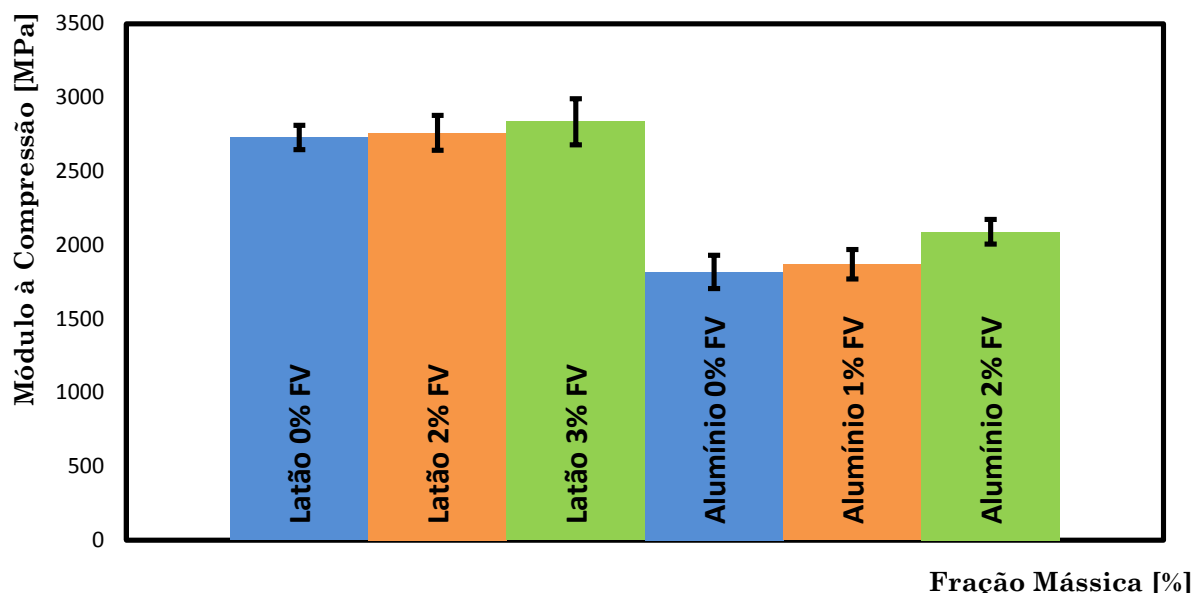


Figura 43 - Efeito da fibra de vidro, no módulo à compressão em função da fração mássica para partículas de latão e alumínio.

## 4.6. Ensaios de DMA

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

Na Figura 44 e na Figura 45, é possível analisar o módulo à flexão em 3 pontos em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. A

partir da análise dos gráficos, pode-se observar que as curvas de variação do módulo flexão versus temperatura diminuem com o aumento da temperatura. Os compósitos com alumínio e latão apresentam valores de módulo maiores para os compósitos com maiores frações mássicas, nos compósitos com fibras curtas de vidro, verifica-se valores de módulo maiores com o aumento da fração de fibras curtas de vidro. Estes valores estão de acordo com os resultados obtidos nos ensaios estáticos para a temperatura ambiente. Por outro lado, estes resultados apresentam a mesma tendência que os realizados por outros investigadores que realizaram trabalhos com compósitos com cargas metálicas [22].

Neste estudo, os provetes foram ensaiados com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. Quanto maior a taxa de aquecimento, maior será o gradiente de temperatura entre a superfície e o interior do provete, logo a temperatura média do material será maior resultando num menor valor medido para o módulo com o aumento da temperatura [22].

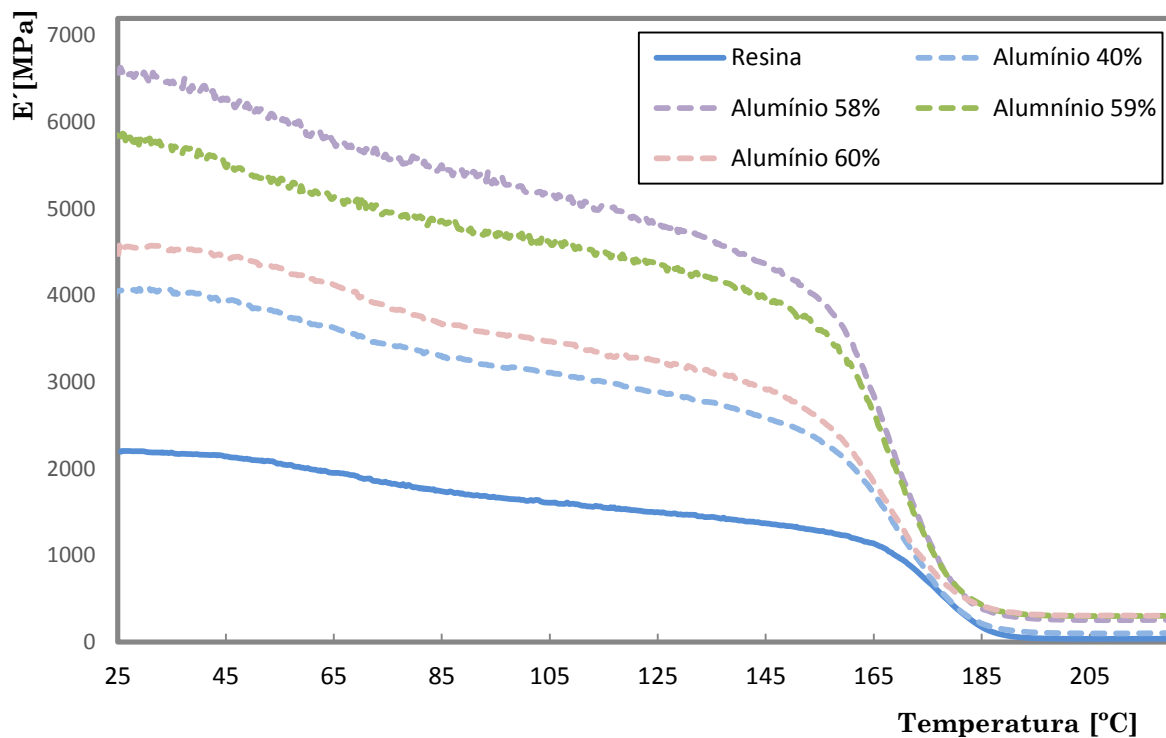


Figura 44 - Módulo em função da temperatura, para diferentes frações mássicas de resina e alumínio.

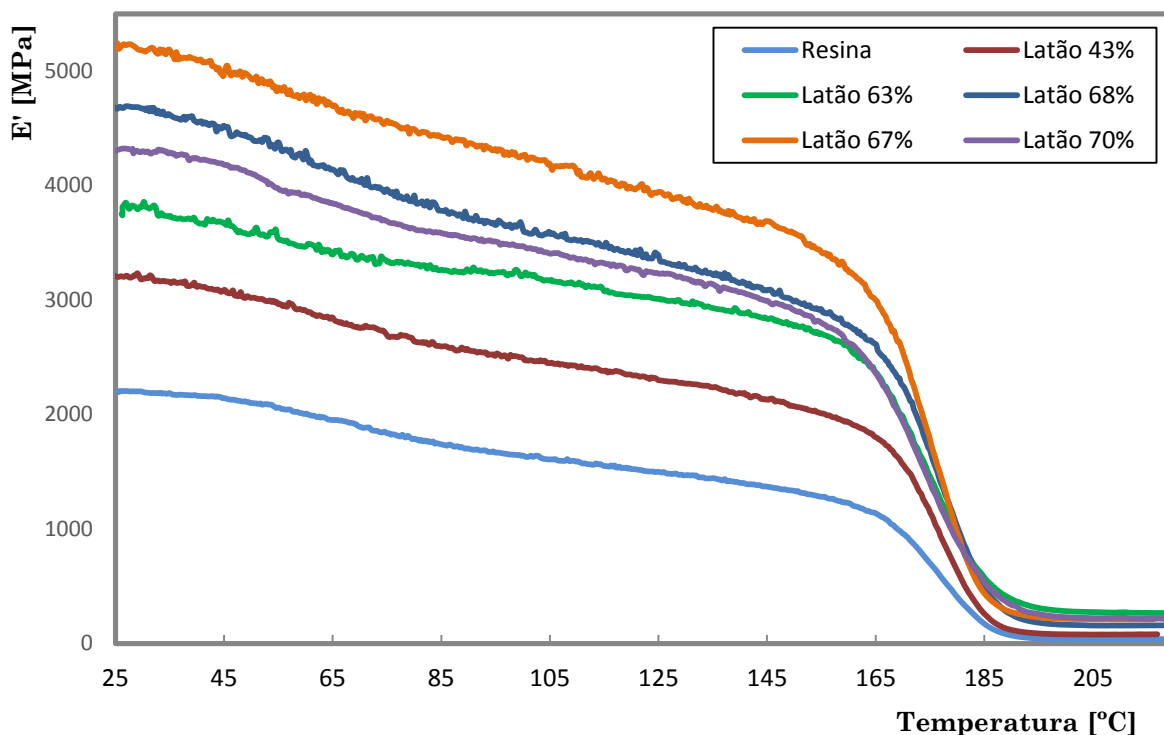


Figura 45 - Módulo em função da temperatura, para diferentes frações mássicas de resina e latão.

Na Tabela 10 é possível analisar os valores do módulo à flexão versus fração mássica e para as temperaturas 30, 80, 160, 170 e 200 °C. A análise desta tabela permite observar que os valores de módulo à flexão diminuem com o aumento temperatura até cerca de 170 °C, diminuindo estes significativamente após esta temperatura (temperatura de transição vítrea).

Tabela 10 – Valores do módulo à flexão ( $E'$ ) versus fração mássica e para as temperaturas 30, 80, 160, 170 e 200 °C

Material	$V_m$ [%]	$E'$ [MPa]				
		30 °C	80 °C	160 °C	170 °C	200 °C
Resina	0	2193	1789	1226	953	38
Latão	43	3188	2636	1929	1557	80
Latão	63	3858	3306	2579	1965	283
Latão	67	5175	4484	3243	2516	216
Latão	68	4673	3914	2770	2247	163
Latão	70	4300	3623	2621	1936	229
Alumínio	40	4090	3377	2084	1236	102
Alumínio	58	6534	5581	3546	1894	257
Alumínio	59	5794	4894	3213	1803	303
Alumínio	60	4560	3772	2275	1313	307

A temperatura de transição vítrea pode ser determinada de diversas formas, nomeadamente através dos picos representados em gráficos de variação do módulo de

perda com a temperatura ou da variação da tangente de perda com a temperatura, em que os valores obtidos por estes dois métodos podem diferir entre si [23].

Quando a temperatura atinge valores próximos da temperatura de transição vítrea, o valor do módulo regista uma forte diminuição, enquanto o módulo de perda e a tangente de perda apresentam valores de pico máximos [23]. Na Tabela 11, apresentam-se as temperaturas de transição vítrea para os vários materiais compósitos processados, obtidas pelo módulo de perda e pela tangente de perda. A partir da análise dos resultados da Tabela 11 e das Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49 é possível concluir que os valores das temperaturas de transição vítreas diminuem com o aumento da fração mássica e que os valores obtidos pelos métodos são diferentes, sendo que os valores obtidos pelos picos das curvas de variação da tangente de perda são superiores.

**Tabela 11 – Valores de temperatura de transição vítrea, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas.**

<b>Material</b>	<b>Vm [%]</b>	<b>T<sub>g</sub> [°C] pelo E''</b>	<b>T<sub>g</sub> [°C] pelo tan δ</b>
Resina	0	176	188
Latão	43	174	186
Latão	63	174	184
Latão	67	173	182
Latão	68	173	181
Latão	70	172	180
Alumínio	40	168	183
Alumínio	58	167	181
Alumínio	59	165	180
Alumínio	60	164	178

Na Figura 48 e Figura 49, pode observar-se as curvas do módulo de perda, em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas. Nestas curvas de variação do módulo de perda versus temperatura, é possível observar um aumento das temperaturas de transição vítrea (T<sub>g</sub>) com o aumento da fração mássica.

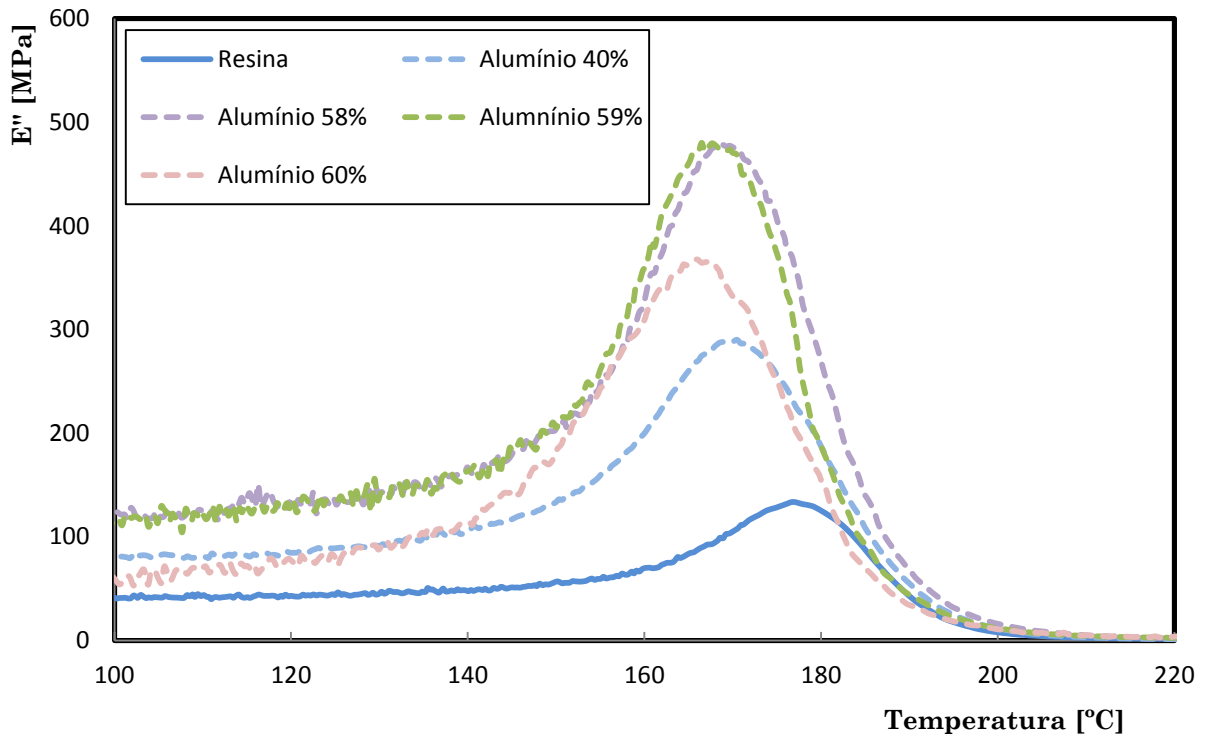


Figura 46 - Módulo de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de alumínio.

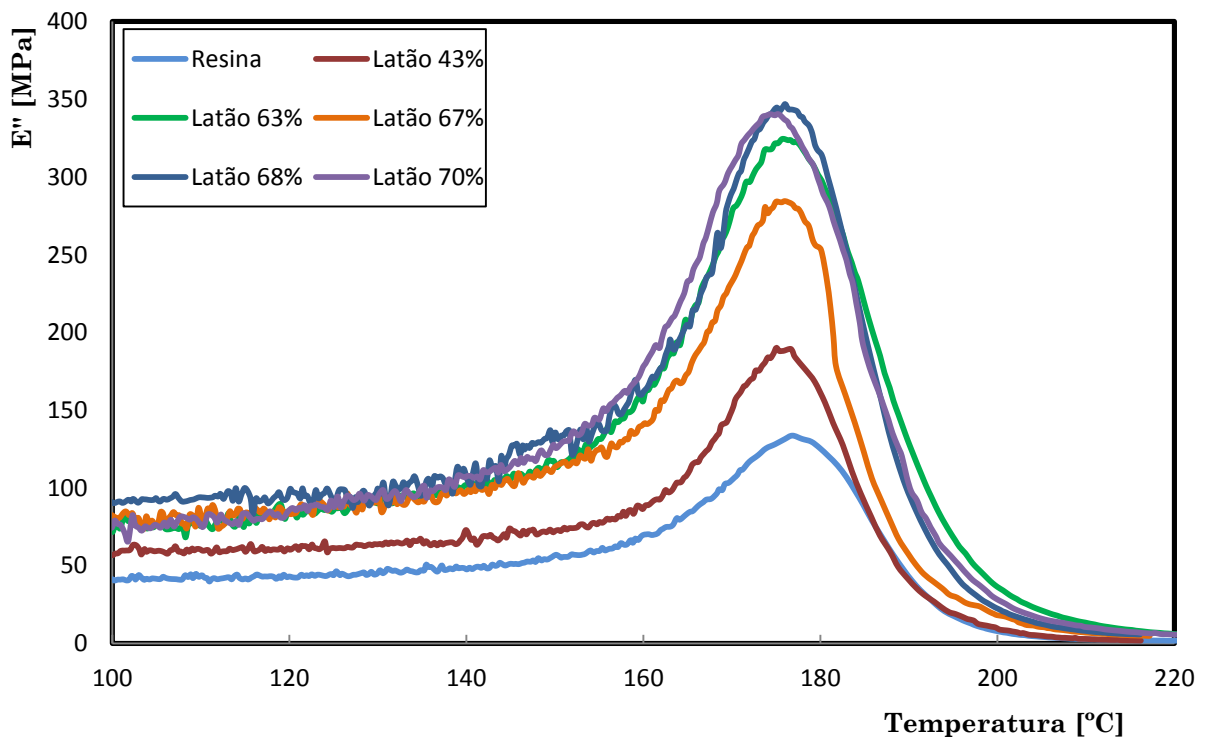


Figura 47 - Módulo de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de latão.

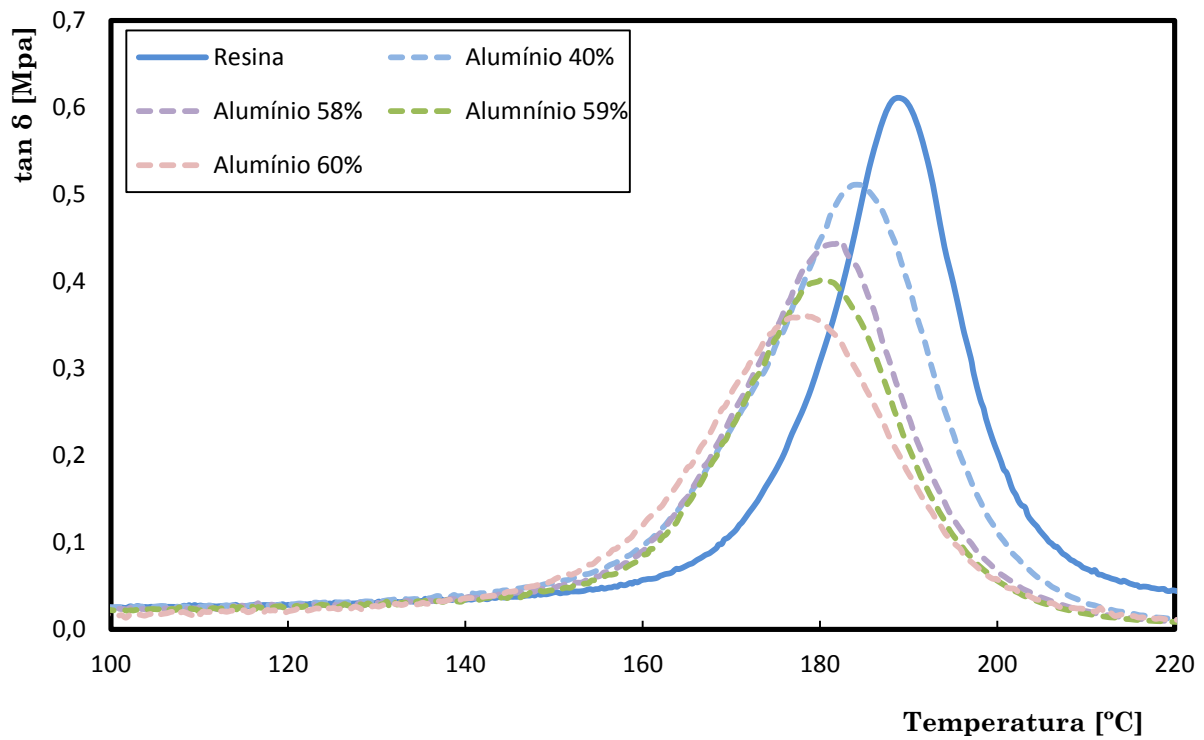


Figura 48 - Tangente de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de alumínio.

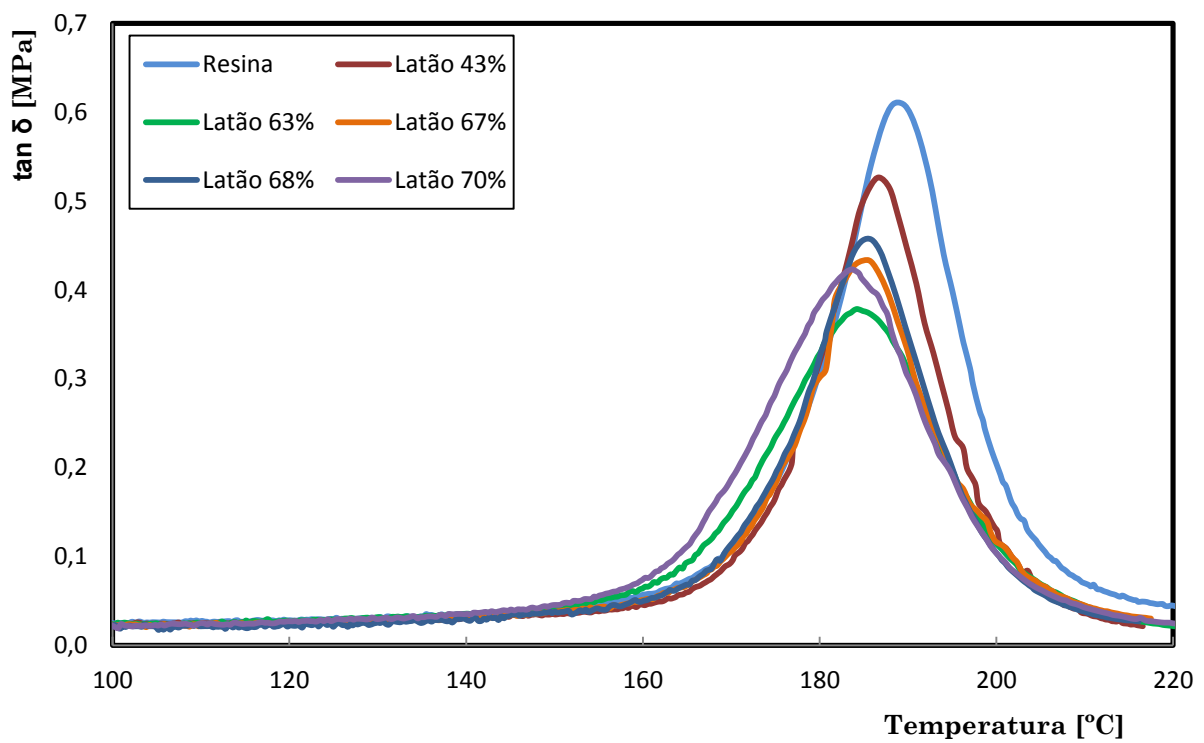


Figura 49 - Tangente de perda em função da temperatura, para diferentes frações mássicas e tipo de material das partículas de latão.

## 5. Caso de Estudo

Neste capítulo são apresentados os detalhes de fabrico de um protótipo de painel solar AQS. Para a construção do absorvedor, foi usado o material compósito com as melhores características para este tipo de aplicação, conforme se analisou no capítulo 4, e se explica a razão no capítulo 6.

Aliando a reutilização de materiais e o poder da diversidade dos materiais compósitos, foi realizado o estudo de um material compósito com propriedades mecânicas adequadas, e alta condutividade térmica. Neste sentido, foi aplicado material compósito de resina, alumínio 58% de  $V_m$  e fibra de vidro 2% de  $V_m$ , num absorvedor de um painel solar AQS. Num painel convencional, a água é transportada mediante tubos de cobre que são previamente soldados ao absorvedor. Neste estudo o tubo de cobre fica no interior do compósito, ou seja o absorvedor e o tubo são apenas um componente.

Um painel solar AQS é composto por vários componentes. Na Figura 50 encontra-se um esquema com os principais componentes de um painel solar AQS convencional: caixa, vidro, absorvedor, tubos, e o seu isolamento. O painel solar AQS em estudo neste trabalho também é constituído por estes componentes, com a mesma função que os referidos anteriormente, no entanto o absorvedor e os tubos devido ao processo de fabrico, são apenas um componente.



Figura 50 – Componentes de um painel solar AQS [24]

## 5.1. Esboço do protótipo

---

Fazer um esboço tem a vantagem de se conseguir representar a ideia em mente, e evoluir sobre a mesma, de forma a alcançar a forma final para o produto.

Na Figura 51 encontra-se um esboço com dois tipos de absorvedores, cujas serpentinas são diferentes. Analisando o esboço numero um, verifica-se que há uma distribuição mais uniforme do tubo por todo o absorvedor, e por esse motivo foi este o selecionado. Por outro lado, no absorvedor número dois há a sobreposição do tubo, o que implica uma espessura maior do absorvedor, e portanto aproximadamente o dobro do peso.

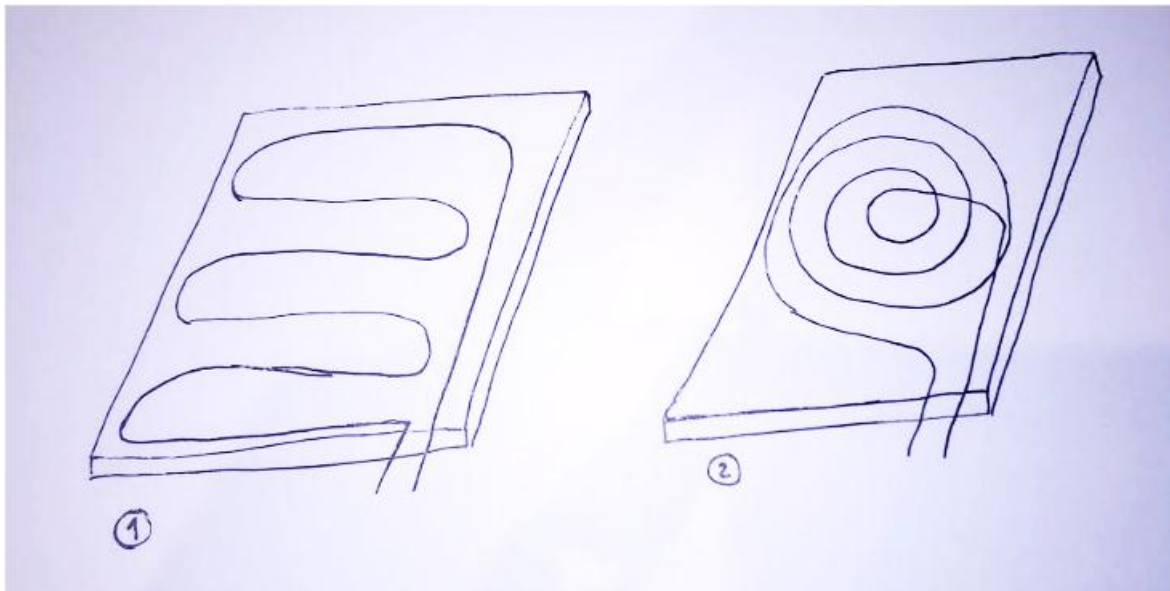


Figura 51 – Esboço do absorvedor

Na Figura 52 encontra-se o esboço inicial do painel solar AQS em estudo, estando dividido em quatro sistemas principais, vidro, absorvedor, isolamento e caixa, com o tipo de serpentina selecionado anteriormente.

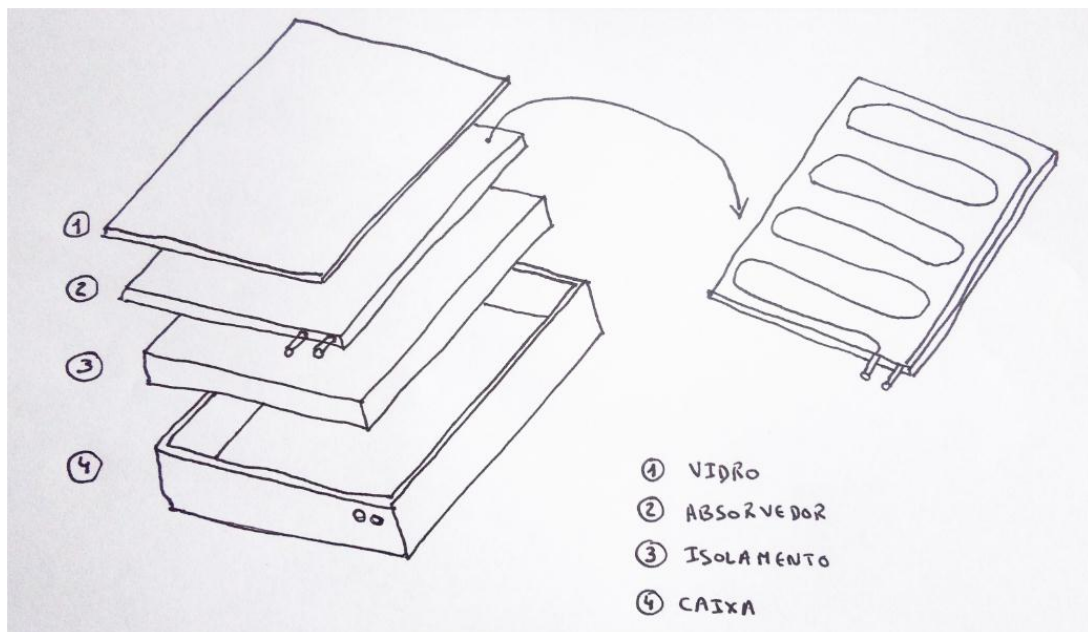


Figura 52 – Esquema de construção do protótipo de painel solar AQS.

Na Figura 53 encontra-se um render do painel solar AQS, onde é possível visualizar o aspeto do mesmo. Este render é também uma vista explodida do protótipo que irá ser construído para analisar o seu comportamento ao nível de fluidos. Esta análise irá permitir em primeiro lugar verificar se os materiais seleccionados para o absorvedor são funcionais, assim como analisar os restantes materiais escolhidos para os outros componentes.

Para efeitos de protótipo, vão ser construídos nos materiais indicados abaixo:

- Caixa: madeira;
- Isolamento: lã de vidro;
- Absorvedor: compósito de resina, alumínio 58% Vm e fibra de vidro 2% Vm, e tubo de cobre de 1/4”.
- Vidro.

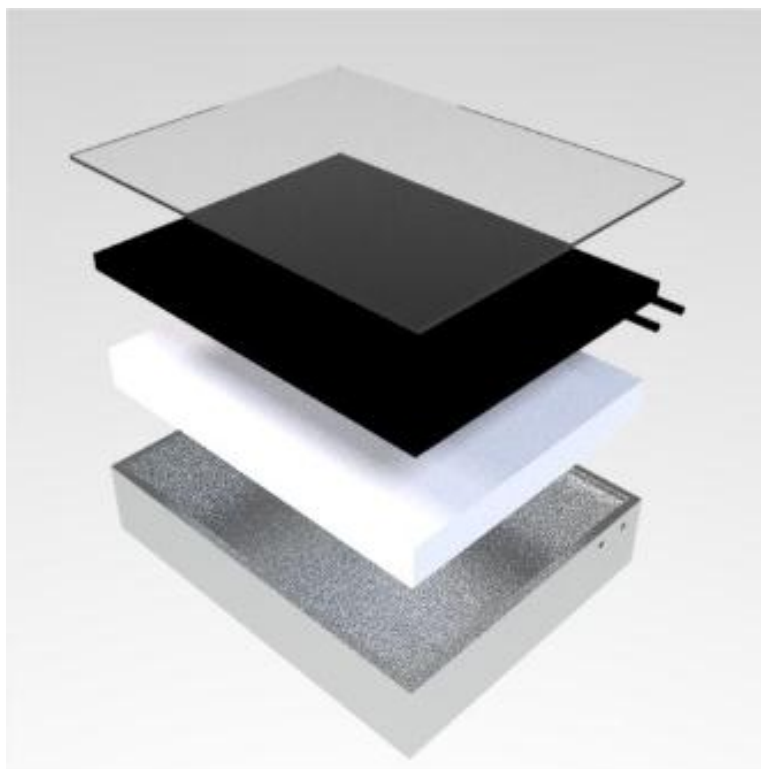


Figura 53 – Render do painel solar AQS

## 5.2. Fabrico de protótipo

---

Para fabricar o absorvedor, iniciou-se pelas dobragens do tubo de cobre de  $\frac{1}{4}$ ", conforme se apresenta na Figura 54. Visto que o diâmetro do tubo é pequeno, foi possível efetuar as dobras em recorrer a ferramentas específicas para o efeito. Neste protótipo foi usado 3 metro de tubo de cobre.



Figura 54 – Construção do absorvedor, dobragem do tube de cobre ¼"

Foi construído um molde em madeira, para receber o material compósito no estado líquido, como se vê na Figura 55. Após o vazamento, e de acordo com os tempos e temperaturas adequadas, o absorvedor foi submetido a cura e pós cura.



Figura 55 – Construção do absorvedor, vazamento da resina, alumínio e fibra de vidro

Após a construção do absorvedor, procedeu-se à construção/montagem do painel solar AQS, como se verifica na Figura 56. A caixa foi construída em madeira, sendo isolada na parte inferior com lã de rocha. O absorvedor conta com cerca de 3 cm de material compósito envolvendo 3 metros de tubo de cobre de ¼". Na parte superior, foi aplicado vidro.



Figura 56 – Construção / Montagem do painel solar AQS.

### 5.3. Resultados do painel solar AQS

Para testar o painel usou-se um balde com água, uma bomba de água e um termómetro digital para as leituras, conforme se analisa na Figura 57. O procedimento do teste de aquecimento de água é descrito abaixo:

- Coloca-se água à temperatura de entrada (medida com o termómetro);
- Liga-se a bomba de água que alimenta o painel solar AQS;
- Mede-se a temperatura água de saída com o termómetro colocado no balde.



Figura 57 – Testes do painel solar AQS.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos, onde se indicam os principais influenciadores do painel solar AQS, nomeadamente, o dia e hora em que foi testado, as condições climáticas e a temperatura de entrada e de saída da água.

Tabela 12 – Dados obtidos no teste ao protótipo do painel solar AQS.

Dia	Hora	Condições Climáticas	Temperatura água entrada [°C]	Temperatura água saída [°C]	Graus de aumento de temperatura	% Aumento de Temperatura
23/09/2017	15h00	Nublado	21,6	32,9	11,3	152%
23/09/2017	18h30	Muito Nublado	20,2	28,9	8,7	143%
24/09/2017	12h30	Nublado	19,4	35,8	16,4	185%
24/09/2017	14h00	Pouco nublado	20,1	47,7	27,6	237%
25/09/2017	18h00	Nublado	19,8	33,5	13,7	169%
26/09/2017	18h00	Nublado	18,9	32,9	14	174%
27/09/2017	18h00	Nublado	21,0	34,2	13,2	163%

No âmbito deste estudo, infelizmente não foi possível testar o painel com Sol, sendo a maioria dos dias com céu nublado. Verifica-se que a temperatura mais alta é de 47,7 °C, o que é bastante bom para as condições climáticas testadas e horas em que se realizou o ensaio. Estes dados permitem concluir que as condições climáticas têm uma grande influência na eficiência do painel solar AQS.

## 6. Conclusões

---

Foram processados e caracterizados diferentes materiais compósitos de matriz polimérica com diferentes frações mássicas de partículas de latão e de alumínio, aos quais foram adicionadas fibras curtas de vidro. Os materiais em estudo foram processados por técnicas de mistura e vazamento em vácuo.

### **Ao nível das propriedades físicas:**

- Foram determinadas as curvas de variação de densidade experimental e teórica (com base na lei das misturas) de forma a avaliar a técnica de processamento utilizada. Foi possível observar pequenas variações que permitem concluir que as técnicas de processamento utilizadas foram adequadas. As diferenças observadas podem ser explicadas com base no processo de mistura, por erros de pesagem, porosidade, por aglomerados de partículas e distribuição não uniforme das partículas no compósito.
- A partir das curvas de absorção de água para as diferentes formulações, pode concluir-se que os materiais processados com maiores frações mássicas absorvem menos água, como seria de esperar e como referenciado na literatura científica. Assim, os materiais processados com as maiores frações mássicas de cargas irão ter uma menor absorção de água e, conseqüentemente uma menor diminuição das propriedades mecânicas.
- Foram realizados ensaios para a determinação do coeficiente de condutividade térmica a partir de placas com diferentes frações mássicas de partículas de latão, alumínio e compósitos híbridos com fibras curtas de vidro. Foi possível concluir que com o aumento da fração mássica, se verifica um aumento dos coeficientes de condutividade térmica. Os compósitos com partículas de alumínio, apresentam coeficientes condutividade térmica superior aos compósitos com partículas de latão.

### **Quanto às propriedades mecânicas:**

- Foram obtidos os valores da resistência mecânica e do módulo de elasticidade a partir dos ensaios de flexão em três pontos e foi possível concluir que a tensão à flexão e o módulo aumentam com o aumento da fração mássica de partículas. Por outro lado, é possível verificar que os compósitos processados

com partículas de alumínio apresentam valores superiores face aos compósitos processados com partículas de latão. Nos compósitos processados com a adição de fibras curtas de vidro, verificou-se que com o aumento da percentagem de fibra de vidro ocorre uma melhoria das propriedades mecânicas.

- Nos ensaios de flexão versus tempo de imersão em água, verificou-se uma diminuição das propriedades mecânicas de todos os compósitos processados, estabilizando aproximadamente para 25 dias, onde os materiais atingem a capacidade de saturação. Verifica-se ainda que para valores de fração mássica baixas, se obtém maiores valores de absorção de água e, conseqüentemente maior perda de propriedades mecânicas.
- Nos ensaios de compressão, foi possível observar que a tensão à compressão e o módulo aumentam com o aumento da fração mássica. Nestes ensaios verificou-se que o alumínio apresenta valores superiores de tensão, mas valores inferiores de módulo à compressão. Tal como nos ensaios de flexão, verificou-se que nos compósitos processados com a adição de fibras curtas de vidro, com o aumento da percentagem de fibra de vidro ocorre uma melhoria das propriedades mecânicas.
- A partir das curvas dos ensaios de DMA (módulo à flexão em 3 pontos) versus temperatura, foi possível concluir que com o aumento da temperatura, os valores do módulo à flexão diminuem e que os valores de módulo para os diferentes materiais processados e para a temperatura ambiente, estão de acordo com os obtidos nos ensaios estáticos.
- Foram determinadas as temperaturas de transição vítrea a partir das curvas de variação do módulo de perda e das curvas da tangente de perda: as temperaturas de transição vítrea diminuem com o aumento da fração mássica.

#### **Protótipo com absorvedor em material compósito híbrido:**

Finalizado o estudo relativo aos materiais compósitos, foi construído um protótipo de painel solar AQS, em que o absorvedor foi fabricado com o material com as melhores características para esse objetivo. Desta forma, foi selecionado o compósito de resina epóxida Berisen L74, com partículas de latão 58% fração mássica com 2% de fração mássica de fibras curtas de vidro, pois apresenta as seguintes características: *densidade*

*baixa; baixa absorção de água; boa condutividade térmica; melhor comportamento de tensão à flexão versus do tempo de imersão em água.*

Nos resultados dos testes ao painel solar, verificou-se que a temperatura mais alta foi de 47,7 °C, o que é bastante bom para as condições climáticas em que se realizou o ensaio. Verifica-se ainda que as condições climáticas têm uma grande influência na eficiência do painel solar AQS.

## 7. Trabalhos futuros

---

No seguimento deste estudo, podem ser considerados trabalhos futuros os seguintes estudos:

### **Estudo dos materiais:**

- Analisar a influência da geometria, e do tamanho de partículas, de forma a conseguir aumentar a fração de empacotamento, e consequentemente a condutividade térmica.
- Realizar ensaios de tenacidade à fratura;

### **Estudo do painel solar:**

- Fabrico de painel solar AQS com dimensões standard (caixa, vidro, isolamento, diâmetro de tubo de cobre), de forma a aumentar o caudal de água quente;
- Ensaaios com bomba de água com variação de velocidade, acumulador em circuito fechado.

## 8. Bibliografia

---

- [1] R. A. M. Preto, “Estudo experimental do comportamento mecânico de compósitos em fibras de basalto,” Tese Mestrado Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.
- [2] A. M. F. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas,” *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 21, n.º 3/4, 2009.
- [3] K. A. Kaw, *Mechanics of Composite Materials Second Edition*, London: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [4] I. M. Daniel e O. Ishau, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York: Oxford University Press, 1994.
- [5] J. P. B. d. Souza, “Análise Térmica de Polímero DGEBA (Diglicidil Éter de Bisfenol A) e sua relação na resistência de juntas coladas,” Tese de Mestrado Ciências em Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.
- [6] F. Levy Neto e L. Pardini, *Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia*. 1ed, Ed. Edgard Blücher, 2006.
- [7] S. C. R. Furtado, “Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo,” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- [8] C. M. N. Romão, “Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais,” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [9] J. W. D. Callister, *Materials Science and Engineering - An Introduction*, Seven Edition, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [10] A. d. C. S. Netto, “Desenvolvimento de Compósito de Resina Epóxi e Fibras Curtas de Aço para Fabricação Rápida de Moldes para Injeção de Termoplásticos,” Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa

Catarina, Florianópolis, 2008.

- [11] M. S. Jesus, “Desenvolvimento de um compósito polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos,” Tese de mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [12] P. V. d. S. M. e. Vasconcelos, “Fabrico Rápido Indirecto de Ferramentas Compósitas a Partir de Modelos de Prototipagem Rápida,” Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.
- [13] N. F. d. Carvalho, “Esquemas para Calcular a Condutividade Térmica nas Faces de Volumes Finitos,” Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Panamá, Curitiba, 2011.
- [14] M. N. Ozisik, Transferência de Calor, Um texto Básico, Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.
- [15] P. R. F. Carvalho, “Física Aplicada - Termometria, Calorimetria e transmissão de calor,” Petrobras, Curitiba, 2002.
- [16] J. P. Holman, Transferência de Calor 8ª Edición, Madrid: Mc Graw Hill, 1998.
- [17] Y. A. Çengel, Transferencia de calor y massa - Un enfoque práctico 3ª edición, México: Mc Graw Hill, 2007.
- [18] L. V. Mendonça, M. M. d. Amaral e P. S. Catarino, “A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios,” Spy Building - Inspeção de edifícios.
- [19] Electronica-pt, “Electronica-pt,” 2017. [Online]. Available: <https://www.electronica-pt.com/energia-solar>. [Acedido em 11 06 2017].
- [20] FLUKE, “<http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Camaras-Termograficas/Fluke-Ti40-Series.htm?PID=56187>,” [Online]. [Acedido em 28 08 2014].
- [21] Prolab, “<http://www.protolab.com.br/Termopar.pdf>,” [Online]. [Acedido em 28 8 2014].
- [22] J. Bolrão, C. Capela, F. Antunes e P. Camaño, “Study of a Composite Material

With Metallic Particles for Application in an Automobile Component”.

- [23] J. P. Manaia, “Processamento e caracterização de materiais compósitos com fibras naturais,” Tese de Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Leiria, 2012.
- [24] Baxi, “Soluções Solares: Eficiência, poupança e garantia,” 2008.
- [25] C. A. X. Ramos, “Materiais Compósitos Inteligentes,” Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.
- [26] T. H. Panzera, “Desenvolvimento de um Material Compósito Cerâmico para Aplicação em Mancais Porosos,” Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [27] R. German, “Powder metallurgy science,” Metal Powder Industries Federation, EUA, 1994.
- [28] L. V. Mendonça, “Termografia por Infravermelhos Aplicações em Edifícios,” *Engenharia & Vida*, nº 16, pp. 53-57, Setembro 2005.
- [29] DGS, “Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação,” 2004.
- [30] N. Ferreira, C. Capela, J. M. Ferreira e J. M. Costa, “Effect of Water and Fiber Length on the Mechanical Properties of Polypropylene Matrix Composites,” *Fibers and Polymers 0000*, , Vols. %1 de %2Vol.0, No.0, 1-6, 2013.

## Anexos

---

Ficha técnica da Resina

Ficha técnica do Alumínio

Ficha técnica da Fibra de Vidro