



# **Placa absorvente de um coletor solar produzida a partir de compósitos de partículas**

Mestrado em *Product Design Engineering*

Pedro Rafael Figueiredo Sérgio

Leiria, novembro de 2019



# **Placa absorvente de um coletor solar produzida a partir de compósitos de partículas**

Mestrado em *Product Design Engineering*

Pedro Rafael Figueiredo Sérgio

Dissertação realizado sob a orientação do Professor Doutor Carlos Capela

Leiria, novembro de 2019

# Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em *Product Design Engineering*, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

A finalização deste trabalho não poderia ocorrer sem o auxílio e apoio das seguintes pessoas, a quem fica aqui expresso o meu agradecimento.

- Ao Professor Doutor Carlos Capela, pela coordenação e apoio prestado na realização da dissertação;
- À Engenheira Fernanda Carvalho, pelo auxílio prestado na execução dos provetes e ensaios a realizar;
- Ao Professor Sérgio Santos, pelo apoio na execução dos ensaios de tração;
- Ao Professor Marcelo Gaspar pelo apoio prestado;
- À *Escola Superior de Tecnologia e Gestão*, pela disponibilização das instalações e laboratórios.
- Ao *Centro Tecnológico de Cerâmica e Vidro*, pela os ensaios realizados;
- À minha família pelo apoio e motivação.

A todos o meu obrigado.

# Resumo

Os painéis solares térmicos são sistemas que captam e absorvem energia proveniente da radiação solar, com finalidade de aquecimento de redes de água. São alternativas com vantagens ambientais e económicas em relação aos sistemas convencionais de queima de carvão e/ou combustíveis fósseis.

A preocupação ambiental e a procura de métodos alternativos de maior sustentabilidade a nível energético deram origem à realização deste projeto.

O coletor solar – elemento principal de um sistema solar de aquecimento de água, é geralmente produzido em alumínio ou cobre revestido. Este trabalho consiste no estudo de materiais alternativos para a construção de um coletor solar de placa plana. Os materiais selecionados são materiais compósitos de partículas metálicas, com intuito de melhorar a rentabilidade do coletor e apresentar um material com maior sustentabilidade a um menor custo.

A partir do estudo dos materiais alternativos foi possível definir uma solução alternativa, viável ao fabrico do coletor solar – material compósito de partículas alumínio (60%) com resina polimérica L74, sem influenciar o rendimento final do produto – 75,5%.

**Palavras-chave:** “sistemas de aquecimento de água”; “painel solar térmico”; “materiais compósitos”; “compósito de partículas metálicas”; “coletor solar”; “coletor solar de placa plana”.

# Abstract

Thermal solar panels are systems that capture and absorb energy from solar radiation with the purpose of heating water networks. They are alternatives with environmental and economic advantages over conventional systems of burning coal and/or fossil fuels.

The environmental awareness and the search of alternative methods more sustainable in terms of energy led to the realization of this project.

The collector solar – the main element of a solar water heating system, it is usually produced in coated aluminium or copper. This work study alternative materials for the construction of a flat plate solar collector. The select materials are composite materials of metallic particles, in order to improve the performance and present a material more sustainable at a lower cost.

From the study of the alternative materials with was possible define an alternative solution, viable to the manufacture the solar collector – aluminium particle (60%) composite material with polymeric resin *L74*, without influencing the final product yield – 75,5%.

**Keywords:** “water heating systems”; “thermal solar panel”; “composite materials”; “metallic particle composite”; “solar collector”; “flat plate solar collector”.

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Sistema solar de aquecimento de água .....</b>	<b>2</b>
2.1.1. Coletor solar .....	4
2.1.1.1. Coletor placa plana .....	6
2.1.2. Mercado Nacional – Concorrência .....	9
<b>2.2. Materiais Compósitos.....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Matriz .....	13
2.2.1.1. Matriz Metálica.....	13
2.2.1.2. Matriz Cerâmica .....	14
2.2.1.3. Matriz Polimérica .....	14
2.2.1.3.1. Matrizes Termoplásticas.....	14
2.2.1.3.2. Matrizes Termoendurecíveis .....	15
2.2.2. Reforço .....	15
2.2.2.1. Configurações da Fibra.....	16
2.2.2.2. Tipo de Fibras .....	17
2.2.2.2.1. Fibras de Vidro .....	17
2.2.2.2.2. Fibra de Carbono .....	18
2.2.2.2.3. Fibras Aramídicas.....	20
2.2.3. Semi-Produtos .....	20
2.2.4. Cargas e aditivos.....	21
2.2.5. Processos de fabrico .....	22
2.2.5.1. Moldação manual ( <i>Hand lay-up</i> ).....	22
2.2.5.2. Moldação por projeção ( <i>Spary up</i> ) .....	23
2.2.5.3. Moldação por compressão .....	23
2.2.5.4. Moldação por Vácuo .....	25
2.2.5.5. Moldação por injeção .....	25
2.2.5.6. Autoclave.....	26
2.2.5.7. Moldação por injeção a baixa pressão e transferência - RTM .....	27
2.2.5.8. Pultrusão .....	28

2.2.5.9.	Enrolamento filamentar .....	29
2.2.5.10.	Moldação por centrifugação .....	30
2.2.5.11.	Fiber placement .....	31
2.2.5.12.	Fabrico aditivo ( <i>3D Printing</i> ).....	32
<b>2.3.</b>	<b>Transmissão de calor .....</b>	<b>33</b>
<b>3.</b>	<b>Material e procedimentos experimentais .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.</b>	<b>Placa absorvente de compósitos de partículas .....</b>	<b>38</b>
3.1.1.	Ensaio à tração .....	38
3.1.2.	Ensaio à condutividade térmica.....	42
<b>4.</b>	<b>Apresentação e discussão de resultados .....</b>	<b>44</b>
<b>5.</b>	<b>Casos de estudo.....</b>	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>52</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>53</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 Avaliação do potencial de SSAA [5].....	4
Figura 2 Coletor de placa plana [3].....	5
Figura 3 Coletor de tubos de vácuo [3].....	5
Figura 4 Coletor parabólico concentrado [6] .....	6
Figura 5 Área transversal de um básico coletor de placa plana [9].....	6
Figura 6 Comparação de eficiência de vários coletores a duas radiações - 500 e 1000 W/m <sup>2</sup> [4] .....	7
Figura 7 Cobertura solar das necessidades de água quente durante o ano [2].....	8
Figura 8 Coletor Solar VULCANO® Gama PremiumSun (FKT-2) [14].....	9
Figura 9 Coletor Solar VULCANO® Gama WarmSun (FKC-2) [15].....	10
Figura 10 Coletor Solar VULCANO® Gama Compacto (FCC-2S) [16].....	11
Figura 11 Representação de alguns formatos de reforços [22] .....	16
Figura 12 Moldação manual [28].....	22
Figura 13 Moldação por projeção [28].....	23
Figura 14 Moldação por compressão [29].....	24
Figura 15 Moldação por injeção [29].....	25
Figura 16 Panorâmica geral de um autoclave [20].....	27
Figura 17 Representação esquemática da moldação por pultrusão [20] .....	29
Figura 18 Representação esquemática da moldação por centrifugação [20].....	31
Figura 19 Caracterização de um phonon [44] .....	34
Figura 20 Representação esquemática de dispersão: (a) phonon-phonon (b) phonon-impureza (c) phonon-fronteira [44] .....	34
Figura 21 Fatores que afetam a condutividade térmica de um compósito polimérico [44].....	36
Figura 22 Máquina de ensaios de tração .....	38
Figura 23 Provete analisado com extensómetro .....	39
Figura 24 Detalhe da colocação do extensómetro .....	39
Figura 25 Extensómetro utilizado nos ensaios .....	39
Figura 26 Ensaio à tração .....	40
Figura 27 Holometrix C-Matic TCA200 [48].....	42

Figura 28 Amostras dos provetes para ensaio à condutividade térmica [48].....	42
Figura 29 Montagem da amostra [48].....	43
Figura 30 Gráficos tensão-extensão dos provetes .....	44
Figura 31 Painel Solar Térmico .....	48
Figura 32 Seção transversal do painel solar térmico .....	49
Figura 33 Resultado da simulação em regime estacionário - temperatura .....	50

# Lista de tabelas

Tabela 1 Tabela de comparação coletores VULCANO® [17].....	12
Tabela 2 Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro[20].....	18
Tabela 3 Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono [20].....	19
Tabela 4 Propriedades de fibras de aramídicas [20].....	20
Tabela 5 Provetes de material analisados .....	38
Tabela 6 Módulos de elasticidade e coeficiente de poisson de cada provete.....	45
Tabela 7 Propriedades térmicas dos provetes [48].....	46
Tabela 8 Propriedade térmicas do provete 03.....	46



# 1. Introdução

A sustentabilidade é um tema que tem ganhado importância nos últimos anos, isto deve-se à preocupação ambiental e à conscientização do uso responsável de recursos sem comprometer a gestão de recursos das seguintes gerações.

O aproveitamento dos recursos naturais para fins energéticos é por isso uma mais valia. As energias renováveis são uma alternativa viável ao uso de carvão e/ou combustíveis fósseis, utilizando os elementos naturais como o sol, a água e o vento para obtenção de energia, tendo vantagens ambientais, económicas e sociais.

A preocupação ambiental e a procura de métodos alternativos de maior sustentabilidade a nível energético e a um menor custo deram origem à realização deste projeto.

Os sistemas solares térmicos são sistemas que através da energia proveniente do sol aquecem redes de água. O coletor solar, elemento em estudo, absorve a radiação solar e fornece energia ao fluido que circula na rede. Geralmente são produzidos em alumínio ou cobre revestido. Este projeto corresponde ao estudo e desenvolvimento de um painel solar térmico com o coletor solar de placa plana num material alternativo – composto de partículas, de modo a alcançar um material alternativo à sua construção com maior sustentabilidade. O estudo em causa permitirá entender se é possível a utilização de materiais alternativos ao fabrico do coletor sem prejudicar a sua eficiência.

O projeto descrito a baixo é subdividido em 6 capítulos. No *Capítulo 1* é apresentado o tema deste trabalho e a motivação – *Introdução*. O *Capítulo 2 – Estado da Arte*, é indicado as definições e diversos modelos de sistemas solares de aquecimento de água e materiais compostos, tal como, é definido o procedimento de transmissão de calor neste tipo de materiais. No *Capítulo 3*, são apresentadas as condições, máquinas e normas dos ensaios experimentais executados – *Materiais e procedimentos experimentais*. O *Capítulo 4 – Apresentação e discussão de resultados*, são avaliados os resultados obtidos no capítulo anterior. O seguinte capítulo é realizado o protótipo do coletor solar e apresentado o trabalho de simulação 3D – *Casos de estudo*. No último capítulo – *Conclusão*, são realizadas as análises e observações finais dos dados obtidos.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Sistema solar de aquecimento de água

Os Sistemas Solares de Aquecimento de Água (SSAA) utilizam a energia solar com fim de aquecer água. A utilização da energia solar em alternativa ao uso de combustíveis fósseis leva a vantagens, não só em termos económicos como ambientais [1].

Um SSAA elementar é composto pelos seguintes componentes:

- Coletor solar;
- Água/fluido de trabalho;
- Depósito da água/fluido de trabalho.

O sistema solar absorve energia através da radiação solar, que é absorvida com a utilização de um coletor solar que transfere a energia recolhida na forma de energia térmica para o aquecimento da água. Este aquecimento poderá ocorrer de duas formas distintas, diferenciando dois tipos de sistemas possíveis de aplicar na utilização do SSAA:

- Sistema direto: a água que circula no sistema é aquecida diretamente no coletor [1];
- Sistema indireto: o aquecimento da água ocorre num permutador de calor com a utilização de um fluido de trabalho que é aquecido no coletor solar [1].

Os sistemas de aquecimento solar podem ser ainda categorizados através da circulação dos fluidos do sistema (água; água + fluido de trabalho):

- Circulação passiva: a circulação do(s) fluido(s), no sistema, ocorre devido à variação de densidades induzidas pela variação de temperatura, exemplo disso são os sistemas de termossifão – sistemas simples e de pouca manutenção, a água quando aquecida expande e torna-se menos densa o que provoca o fluxo da água ao depósito (localizado numa posição superior ao coletor), quando a água arrefece retorna ao coletor. São a solução mais económica, de fácil instalação, ideal para espaços mais reduzidos, normalmente são destinados a habitações unifamiliares [2]. Sistemas diretos e de circulação passiva são suscetíveis ao risco de congelamento e de circulação reversa [1], [3].
- Circulação ativa: a circulação do(s) fluido(s), no sistema, ocorre com a utilização de bombas [1]. Este tipos de sistema são ideais para aplicações individuais e coletivas, como habitações, serviços e indústrias.[2]

Em condições em que existe risco de congelamento do(s) fluido(s) é vantajoso a utilização de técnicas como:

- fluidos anticongelantes: a utilização de fluidos anticongelantes, como propileno glicol, adicionados ao circuito secundário, de forma a evitar o congelamento do fluido de trabalho.

- recirculação: a recirculação de água já aquecida no sistema previne o congelamento da água, poderá ser utilizado um equipamento de aquecimento auxiliar (situação híbrida), dois depósitos de armazenamento retornam à entrada do coletor [4].
- *drain-down*: um sistema direto o que não é apropriado para as condições em que exista risco de congelamento, porém através de uma válvula de drenagem e entradas de ar no coletor, isola e drena o coletor do circuito e a água que contém [1, 4].
- *drain-back*: sistema indireto. A isolamento e drenagem do fluido de trabalho do coletor para o tanque de armazenamento, é executada através da gravidade (circulação passivo) ou com válvulas de alívio (circulação ativa) [4].

“O emprego de SSAA poderá provocar um grande impacto em termos económicos, ambientais e de conservação de energia” [1]. De acordo com a referência [1], na Grécia um SSAA com um coletor solar de área aproximadamente  $2 \times 10^6 \text{ m}^2$ , estimou-se uma poupança de energia cerca de  $1200 \text{ GW-h/ano}$ . A fiabilidade do sistema é influenciada por fatores técnicos e não-técnicos, como [1]:

- Fatores técnicos:
  - Orientação do local de instalação;
  - Tamanho mínimo do coletor solar;
  - Período de tempo/Proporção de sombra que cobre o coletor;
  - Capacidade de fornecimento de água quente, de acordo com a exigência de uso.
- Fatores não-técnicos:
  - Estimação de custos do SSAA;
  - Estéticos;
  - Normas de construção.

O desempenho económico do sistema solar depende de vários fatores, como [1]:

- O material e método de isolamento;
- Materiais aplicados na construção;
- Eficácia da união dos elementos do sistema;
- Condutividade térmica dos elementos do sistema;
- Resistência à corrosão dos componentes expostos ao ambiente e ao contacto da água;
- O ciclo de vida do SSAA em variadas condições.

“Um dos fatores mais influentes no funcionamento do SSAA é a qualidade da água”/fluido de trabalho [1].

A *Figura 1* representa os fatores que influenciam a definição e decisão do modelo do sistema solar, as entradas, e a potencial avaliação (saídas) do mesmo.

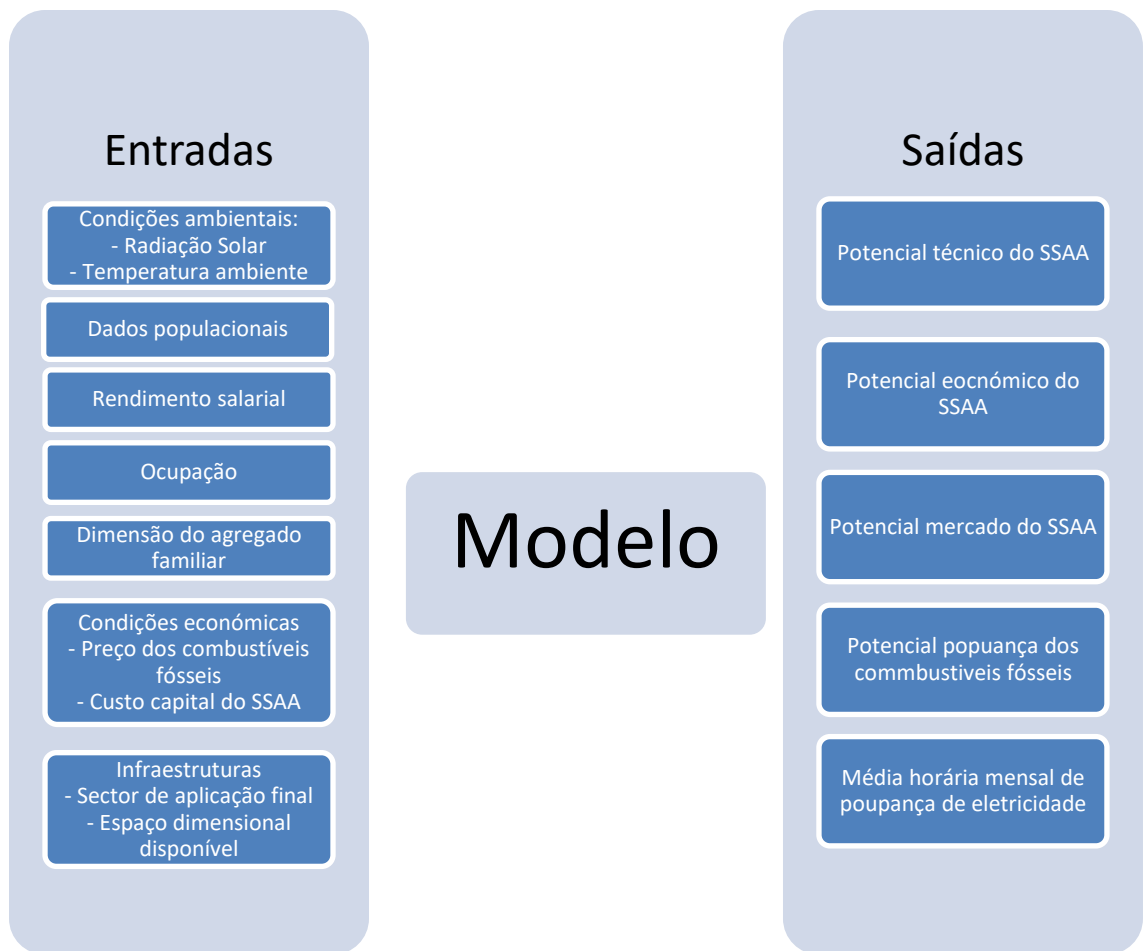


Figura 1 Avaliação do potencial de SSAA [5]

### 2.1.1. Coletor solar

O coletor solar é geralmente o componente de maior dimensão, funcionando como um permutador de calor [3].

A sua seleção deve ser feita de acordo os requisitos de aquecimento e as condições ambientais locais. De acordo com esses parâmetros, é posteriormente determinando o tipo de coletor solar pretendido, entre [3]:

- não-concentrados/estacionários: a área refletora é a mesma que a área de absorção de radiação;
- concentrados: habitualmente de forma concava, a radiação solar é refletida para uma área localizada ou ponto localizado, aumentando o fluxo de radiação.

Existem principalmente três tipos de modelos de coletores solares, coletor de placa plana, coletor de tubos de vácuo e coletor parabólico concentrado. As Figuras 2,3 e 4 são imagens representativas desses mesmo coletores.

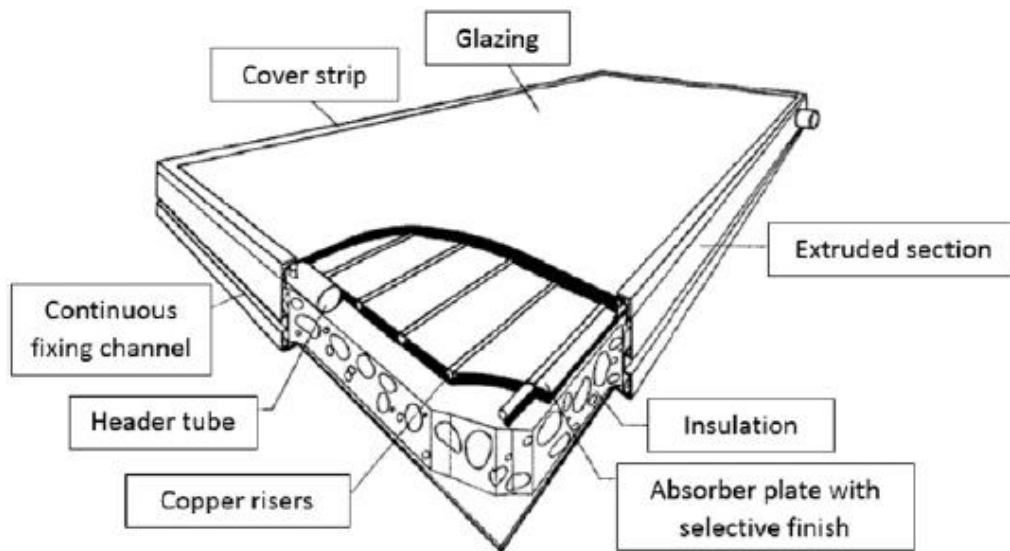


Figura 2 Coletor de placa plana [3]

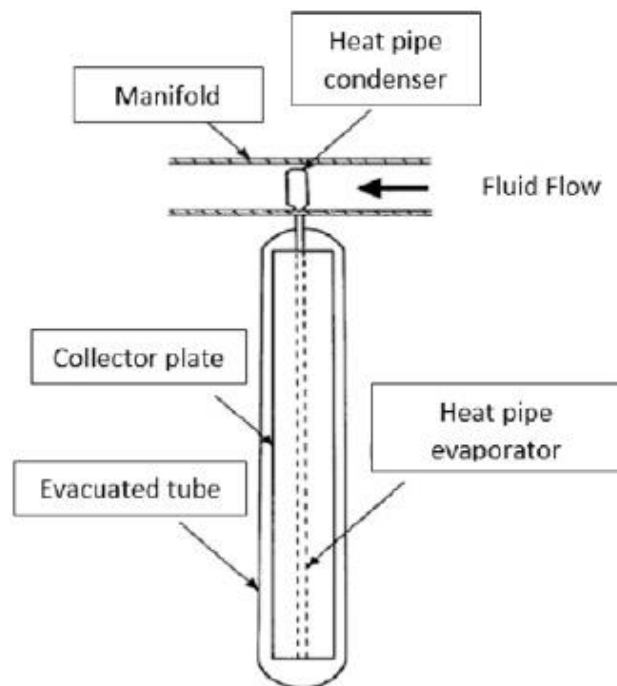


Figura 3 Coletor de tubos de vácuo [3]

- Coletor parabólico concentrado;

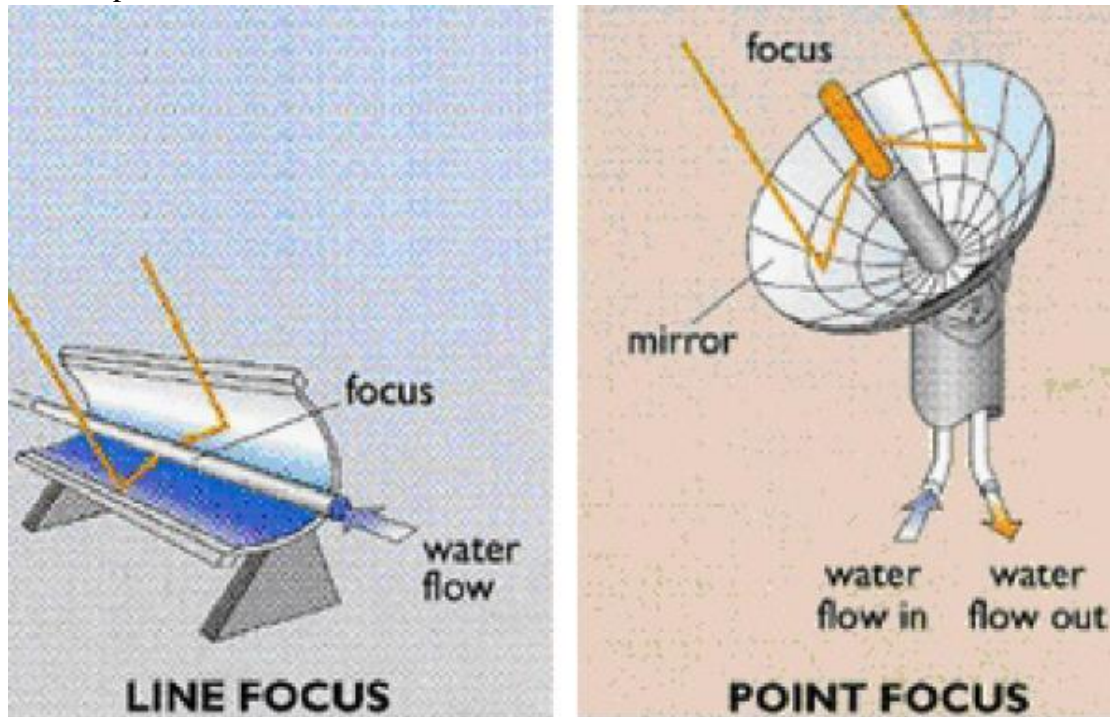


Figura 4 Coletor parabólico concentrado [6]

#### 2.1.1.1. Coletor placa plana

O coletor de placa plana (CPP) é destacado pela sua simplicidade, é composto por [7, 8]:

- Superfície absorvente, a placa plana onde incide a radiação solar;
- Cobertura em vidro, película translúcida que trespassa a radiação do sol à superfície absorvente, reduzindo as perdas de energia por radiação e convecção por parte da superfície absorvente, criando um efeito de estufa;
- Rede de tubagens que contém o fluido de trabalho a ser aquecido pela energia térmica transferida pelo coletor;
- Estrutura de suporte;
- Moldura isolante de forma a reduzir as perdas de energia do coletor.

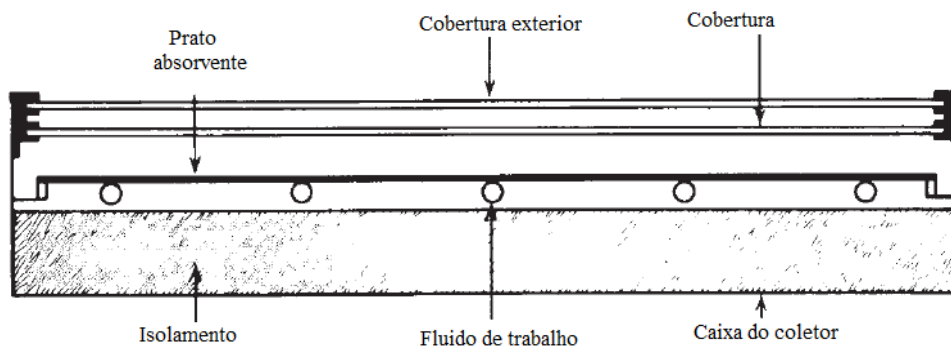


Figura 5 Área transversal de um básico coletor de placa plana [9]

A eficiência máxima é obtida geralmente no intervalo de temperaturas compreendida entre  $30^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , deve ser instalado com uma orientação para a linha do equador para obter um maior rendimento. A eficiência dos variados coletores foi comparada na referência [4] – *Figura 6*, é possível verificar o rendimento para níveis de radiação de  $500$  e  $1000\text{ W/m}^2$ . Verifica-se que o *CPP* apresenta boa eficiência a altas temperaturas em relação aos restantes coletores, entre eles o coletor de tubos de vácuo e o coletor concentrado parabólico. “As condições ideais para a colocação dos coletores solares num telhado são: orientação a sul e inclinação de  $35^{\circ}$  a  $40^{\circ}$ ”[10]. Para uma melhor performance anual para aplicações de aquecimento de água a inclinação ótima do coletor é uma latitude de  $+5^{\circ}$  [7, 8].

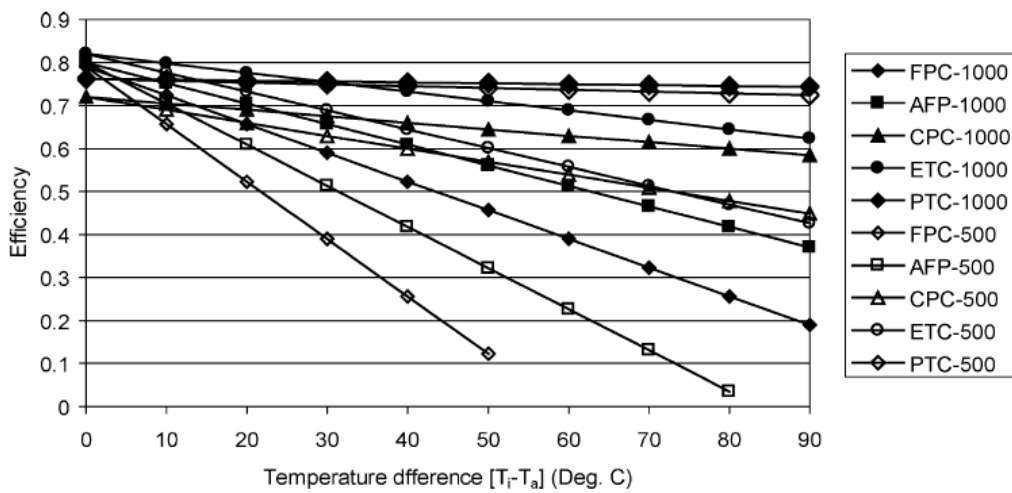


Figura 6 Comparação de eficiência de vários coletores a duas radiações -  $500$  e  $1000\text{ W/m}^2$  [4]

O CPP apresenta vantagens, como [7, 8]:

- Facilidade de fabrico;
- Baixo custo;
- Posicionamento permanente (não necessita de posições específicas ou equipamentos de monitorização);
- Baixa manutenção.

O CPP é caracterizado pelas seguintes especificações [11]:

- Área do coletor;
- Espessura da placa plana;
- Condutividade térmica da placa plana;
- Espessura do material isolante;
- Condutividade térmica do material isolante;
- Diâmetro dos tubos
- Espessura dos tubos;
- Condutividade térmica dos tubos;
- Distanciamento entre os tubos.

Para a construção do coletor deve ser tido em conta as seguintes considerações [7, 8]:

- Maximizar a absorção;
- Minimizar a reflexão;
- Reduzir as perdas por radiação;
- Obter uma boa ligação térmica entre o prato de absorvente e a rede de tubagens.

“O dimensionamento e seleção dos sistemas solares térmicos é baseado nas necessidades de água quente sanitária (AQS) por ocupante”. Em habitações a necessidade de AQS estimadas por ocupante são de 40 l por pessoa a uma temperatura de referência de 60° [10]. A Figura 7 apresenta a comparação de necessidade energética para o aquecimento da água com a energia fornecida com a utilização de um sistema solar.

“Um valor de 17 MJ/m<sup>2</sup>/dia anualmente, equivalente à energia obtida na utilização de 141 m<sup>3</sup> de gás natural ou 127 m<sup>3</sup> de gás butano/propano, por cada metro quadrado.”[2]

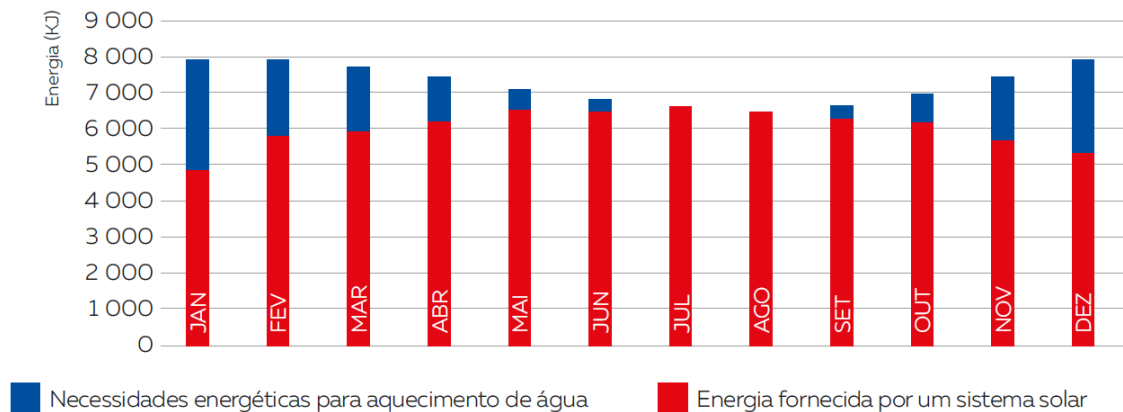


Figura 7 Cobertura solar das necessidades de água quente durante o ano [2]

A performance do coletor de placa plana é influenciada pelos seguintes parâmetros [12]:

- Espessura e revestimento da cobertura de vidro: para obter melhor rendimento deve-se optar por duas camadas de vidro e uma espessura de 4 mm.
- Espessura e material da placa absorvente: para a seleção do material da placa deve ser tido em conta os seguintes critérios condutividade térmica, custo e durabilidade. O aumento da espessura provoca um aumento do fator de transferência de calor do coletor ( $F_R$  – fator de correção, representativo da eficiência associada ao coletor), o que conseqüentemente eleva a eficiência do sistema. A placa plana pode ainda ser revestida para que melhor a performance e durabilidade.
- Espaçamento de ar entre placa plana e cobertura de vidro: a distância entre a placa plana e a cobertura de vidro ótima, de modo a minimizar as perdas energéticas, é de 4 a 5 cm.

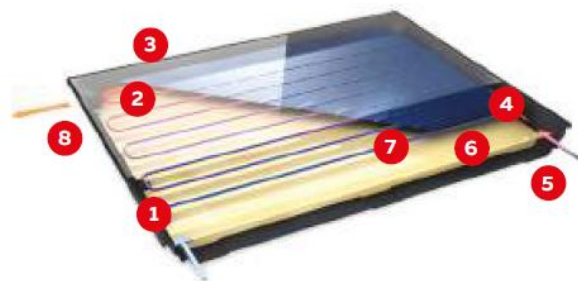
A rede de tubagens deve ser projetada para que consiga o melhor rendimento e performance do CPP. Para isso é necessário alcançar o melhor compromisso entre a

tensão máxima suportada pelos tubos devido à pressão da água, o espaçamento entre tubos e a dimensão da rede. De acordo com a referência [13] os tubos deve ter 25 mm e 2,5 mm de diâmetro e espessura respectivamente e um espaçamento entre os mesmo de 75 mm.

### 2.1.2. Mercado Nacional – Concorrência

No mercado nacional foi destacada, para posterior comparação de resultados, a marca *VULCANO*<sup>®</sup>, devido à elevada experiência demonstrada, posicionamento e tempo no mercado de sistemas solares térmicos.

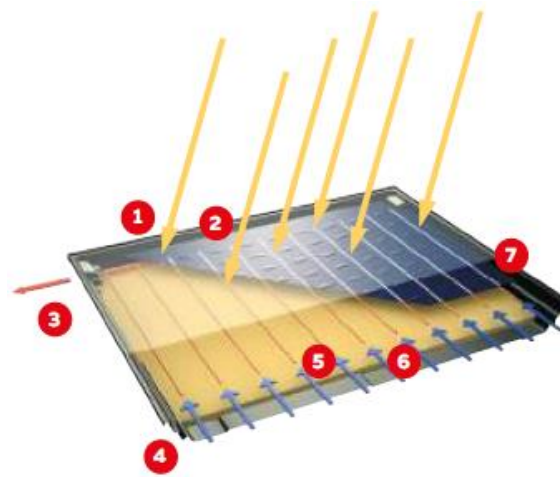
A *VULCANO*<sup>®</sup> apresenta três diferentes gamas de produto: *PremiumSun* (rendimento mais elevado e maior eficiência); *WarmSun* (elevada eficiência e robustez); *Compacto* (solução mais económica e de fácil instalação) [2].



- |                                       |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 Caixa em fibra de vidro (SMC)       | 5 Entrada de líquido solar frio |
| 2 Vidro de segurança solar            | 6 Isolamento                    |
| 3 Bainha para sensor de temperatura   | 7 Dupla serpentina              |
| 4 Absorvedor altamente seletivo (PVD) | 8 Saída de líquido solar quente |

Figura 8 Coletor Solar VULCANO<sup>®</sup> Gama PremiumSun (FKT-2) [14]

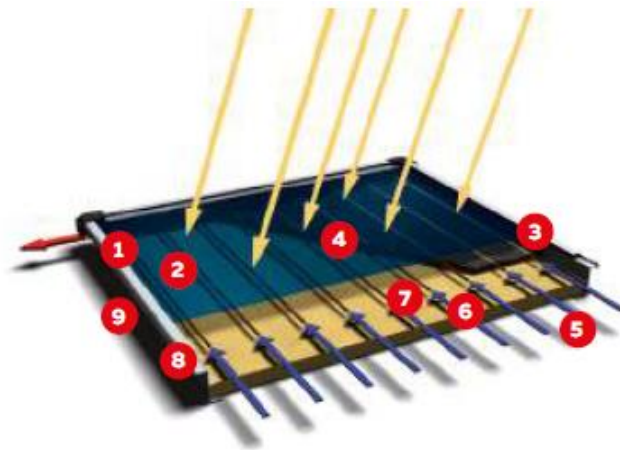
A gama *PremiumSun* (FKT-2) é caracterizada pelo alto rendimento. O coletor solar contém as maiores dimensões, exibe o absorvedor em alumínio com um acabamento seletivo em titânio – PVD (*physical deposition vapour*). A caixa exterior é peça única, produzida em fibra de vidro (tecnologia SMC), permitindo a redução de perdas térmicas. Contém um vidro estruturado para que atinja maiores rendimentos. É equipado com um circuito hidráulico em dupla serpentina, permite ainda ligações em paralelo até 10 coletores com ligação cruzada, e até 5 coletores com ligação do mesmo lado. O isolamento térmico é realizado com lã mineral de 55 mm de espessura. Têm uma área útil coletável de 2,55 m<sup>2</sup>. Apresenta rendimentos na ordem dos 80% [14].



- 1 Bainha para sensor de temperatura
- 2 Vidro de segurança solar
- 3 Saída de líquido solar quente
- 4 Caixa em fibra de vidro (SMC)
- 5 Grelha de tubos
- 6 Isolamento
- 7 Absorvedor altamente seletivo (PVD)

Figura 9 Coletor Solar VULCANO® Gama WarmSun (FKC-2) [15]

A gama *WarmSun* (FCK-2) é indicada para qualquer tipo de instalação aliando eficiência e robustez. O coletor solar em alumínio/cobre com tratamento altamente seletivo (PVD). O circuito hidráulico é composto por uma grelha de tubos com 11/22 tubos para o modelo vertical/horizontal respectivamente. Permite ainda ligações em paralelo até 10 coletores com ligação cruzada. As ligações flexíveis em EPDM (Etileno-Propileno-Dieno-Monómero) reforçadas com nylon, possibilitando uma instalação simples e resistente. A bandeja é uma só peça em fibra de vidro (SMC), de grande leveza e elevada resistência mecânica e aos raios UV. O isolamento térmico é realizado com lã mineral de 55 mm de espessura. Têm uma área útil coletável de 2,55 m<sup>2</sup>. Apresenta rendimentos na ordem dos 75% [15].



- |   |   |   |                               |
|---|---|---|-------------------------------|
| 1 | Esquinas de plástico sintético reforçadas | 5 | Entrada de líquido solar frio |
| 2 | Vidro de segurança solar                  | 6 | Isolamento                    |
| 3 | Bainha para sensor de temperatura         | 7 | Grelha de tubos               |
| 4 | Absorvedor altamente seletivo             | 8 | Caixa de alumínio             |
|   |   | 9 | Saída de líquido solar quente |

**Figura 10** Coletor Solar VULCANO® Gama Compacto (FCC-2S) [16]

A gama *Compacto* (FCC-2S) é a solução mais económica, de reduzidas dimensões e grande facilidade de instalação. Exibe um ótimo compromisso entre qualidade e preço. O coletor solar tem um acabamento altamente seletivo (*PVD*) com absorvedor em alumínio. Possui um circuito hidráulico em grelha de tubos, possibilita a ligação em paralelo até 10 coletores. As ligações flexíveis em borracha *EPDM* permite a fácil montagem proporcionando estanquidade e durabilidade. A estrutura de suporte é fabricada em alumínio, demonstrando elevada resistência mecânica. O isolamento térmico é realizado com lã mineral de 25 mm de espessura. Têm uma área útil coletável de 1,936 m<sup>2</sup>. Apresenta rendimentos na ordem dos 75% [16].

De seguida na *Tabela 1* é representado as características das três gamas e feita a comparação entre as mesmas.

Gama		PremiumSun		WatrmSun		Compacto
Modelo	Uni.	FKT-2 S	FKT-2W	FKC-2 S	FKC-2 W	FCC-2 S
Montagem		vertical	horizontal	vertical	horizontal	vertical
Dimensões (AxLxP)	mm	1175x2170x87	2170x1175x87	1175x2017x87	2017x1175x87	1032x2026x67
Área total	m <sup>2</sup>	2,55	2,55	2,37	2,37	2,09
Área de abertura	m <sup>2</sup>	2,43	2,43	2,25	2,25	1,94
Área do absorvedor	m <sup>2</sup>	2,35	2,35	2,18	2,18	1,92
Volume do absorvedor	l	1,6	1,96	0,94	1,35	0,8
Peso vazio	kg	44,8	44,8	40	40	30
Pressão de trabalho máxima	bar	10	10	6	6	6
Caudal nominal	l/h	50	50	50	50	50
Moldura		Fibra de Vidro com tecnologia SMC	Fibra de Vidro com tecnologia SMC	Fibra de Vidro com tecnologia SMC	Fibra de Vidro com tecnologia SMC	Alumínio
Isolamento		Lã mineral, com 55mm de espessura	Lã mineral, com 55mm de espessura	Lã mineral, com 55mm de espessura	Lã mineral, com 55mm de espessura	Lã mineral, com 25mm de espessura
Absorvedor		Altamente seletivo	Altamente seletivo	Altamente seletivo	Altamente seletivo	Altamente seletivo
Cobertura do absorvedor		PVD	PVD	PVD	PVD	PVD
Circuito hidráulico		Dupla Serpentina	Dupla Serpentina	Grelha de tubos	Grelha de tubos	Grelha de tubos
Curva de rendimento instantâneo segundo EN 12975-2 (com base na área de abertura)						
Fator de eficiência $\eta_0$		0,79	0,802	0,766	0,77	0,761
Coefficiente perdas linha	W/m <sup>2</sup> k <sup>2</sup>	3,86	3,833	3,216	3,871	4,083
Coefficiente perdas secundárias	W/m <sup>2</sup> k <sup>2</sup>	0,013	0,015	0,015	0,012	0,012

**Tabela 1** Tabela de comparação coletores VULCANO® [17]

O projeto em causa consiste no estudo de materiais alternativos para o fabrico da superfície absorvente de um coletor solar de placa plana. Desse modo os materiais compósitos foram estudados como uma alternativa que permita a obtenção de um menor custo de fabrico e maior sustentabilidade devido à reciclabilidade da matriz polimérica, isto tudo sem comprometer a rentabilidade do coletor.

## 2.2. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são definidos como a combinação de dois (2) ou mais materiais distintos para conseguir um novo material, obtendo geralmente um material de melhor performance, conjugando as melhores propriedades dos materiais associados. A principal vantagem do uso de compósitos é a associação de uma elevada resistência e tenacidade a uma baixa densidade, reduzindo o peso do componente final [18].

O primeiro conhecimento do uso de materiais compósitos remota a 3400 A.C. onde na região da Mesopotâmia se colava tiras de madeira em diferentes ângulos de forma a obter contraplacado [19]. Outro exemplo do uso de compósitos é referido no *Antigo Testamento* – uso de tijolos de argila reforçados com fibras de palha [20]. Porém o uso de compósitos só se tornou comum em meados do século 20, com a aplicação de matrizes de poliéster reforçadas com fibra de vidro em modelos da Ford (anos 30). Desde então a sua utilização industrial continuou em expansão. Hoje é possível visualizar o uso deste tipo de materiais em produtos do cotidiano, a aplicações de estruturas e componentes para a indústria automível, aeronáutica e aeroespacial [20].

Os compósitos são formulados por um reforço e uma matriz. O reforço tem como função o suportar os esforços solicitados e conferir resistência, tenacidade, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais, normalmente o reforço é mais rígido, tenaz e resistente que a matriz. Cabe à matriz é dar forma à estrutura, assegurar a distribuição da carga eficientemente pelo reforço, fornecer um acabamento superficial ao compósito e proteger o reforço de possíveis ataques químicos, biológicos e de danos mecânicos (desgaste) [20].

### **2.2.1. Matriz**

As matrizes mais utilizadas podem ser subdivididas em três grupos de acordo com o material:

- Metálicas;
- Cerâmicas;
- Poliméricas.

#### **2.2.1.1. Matriz Metálica**

As matrizes metálicas são compostas por um ou mais metais dúcteis, como ligas de alumínio, titânio, entre outros. São empregues em utilizações de elevadas temperaturas. As vantagens principais do seu uso é a capacidade de funcionamento e processamento a elevadas temperaturas, não inflamável e elevada resistência à degradação por parte de fluidos orgânicos, porém o seu uso é restrito devidos aos altos custos associados à matriz. Devido a algumas combinações matriz-reforço serem reativas a altas temperaturas, é necessário aplicar um revestimento protetor ao reforço ou modificar a composição da liga da matriz, de forma a evitar a degradação do material na aplicação de temperaturas altas durante o fabrico ou quando em serviço a matriz é sujeita a elevadas temperaturas. Normalmente os processos de fabrico de matrizes metálicas envolvem, pelo menos, dois (2) passos: consolidação ou síntese – a introdução do reforço na matriz, e operação de forma [21].

### **2.2.1.2. Matriz Cerâmica**

Os materiais compósitos de matriz cerâmica, tal como, os materiais de matriz metálica são ideais para aplicações de elevada temperatura e altas pressões. Os materiais cerâmicos são resilientes à oxidação e deterioração a altas temperaturas. Apesar disto, apresentam baixa resistência à fratura por impacto. No entanto é possível melhorar esta propriedade através da interação entre fissuras e partículas dispersas. Geralmente o aumento de percentagem do reforço aumenta a resistência e dureza ao impacto. A utilização de matrizes cerâmicas melhora o comportamento à fluência de elevadas temperaturas e a resistência a rápidas e amplas variações de temperatura. Os processos de fabrico podem variar entre prensagem a quente, prensagem a quente isostática e sinterização em fase líquida [21].

### **2.2.1.3. Matriz Polimérica**

Os compósitos de matriz polimérica têm uma grande e diversa aplicação, isto deve-se as suas propriedades a temperatura ambiente, ao fácil processamento e baixo custo [21].

A temperatura é um fator com elevada importância no processamento das matrizes poliméricas. De forma, a processar a matriz é necessário alterar a sua viscosidade, isso ocorre normalmente com alteração (aumento) de temperatura. Ao atingir o ponto de temperatura transição vítrea ( $T_g$ ) ocorre no material uma “mudança de um comportamento rígido para um comportamento caracterizado pelo amolecimento”. Com o contínuo aumento da temperatura o polímero alcança um “estado de líquido viscoso a uma temperatura designada por temperatura de fusão ( $T_m$ )”. Porém nem todos os polímeros apresentam estas características. “Os polímeros termoendurecíveis não apresentam fusão”, elevadas temperaturas provocam a decomposição do material. “A temperatura de utilização não deve exceder  $T_g$ .” Os polímeros amorfos – sem qualquer organização estrutural a nível molecular, são caracterizados pela  $T_g$ , a temperatura máxima de utilização deve ser inferior a esta mesma temperatura. Os polímeros totalmente cristalinos – apresentam os átomos organizados estruturalmente, não apresentam  $T_g$ . “Ao aproximar da  $T_m$  a estrutura sofre um colapso passando a um estado de líquido viscoso.” A temperatura de utilização de polímeros semicristalinos está compreendida entre  $T_g$  e  $T_m$  [20].

As matrizes poliméricas são subdivididas em dois grupos: termoplásticas e termoendurecíveis.

#### **2.2.1.3.1. Matrizes Termoplásticas**

Os plásticos técnicos formam grande parte das matrizes termoplásticas, estes plásticos “são formados por macromoléculas individuais lineares sem qualquer

reticulação entre si”. As moléculas são ligadas entre si através forças intermoleculares, que quando aquecidas são quebradas o que permitir mobilidade molecular – remodelagem. No arrefecimento da temperatura as moléculas estabilizam a sua posição restabelecendo as ligações secundárias. As matrizes termoplásticas apresentam uma maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor higroscopicidade, em relação às termoendurecíveis. São ainda facilmente processadas por injeção ou termoformação e podem ser reciclados. Porém o seu uso é condicionado pela dificuldade em obter a impregnação completa do reforço [20].

#### **2.2.1.3.2. Matrizes Termoendurecíveis**

As matrizes termoendurecíveis (também conhecidas por termoestáveis) são compostas por polímeros com moléculas que “formam estruturas tridimensionais bastante rígidas.” Uma vez aquecidas não poderão ser reprocessadas, ou seja, a forma final obtida é a permanente do componente. A sua estrutura é obtida através da polimerização (cura) de dois (2) ou três (3) componentes – resina, acelerador e catalisador. Algumas resinas necessitam de adição de temperatura e/ou pressão no processo de cura. É possível através de tratamentos pós-cura a altas temperaturas melhorar as propriedades mecânicas da matriz. Apresenta ainda uma maior facilidade de impregnação total do reforço, devido à menor viscosidade [20].

#### **2.2.2. Reforço**

Os materiais compósitos podem ser caracterizados pelo seu reforço. Categorizam-se em materiais de fibras (curtas ou longas), partículas e compósitos estruturais.

As partículas possuem uma igual dimensão em todas as direções, podendo ter qualquer geometria. Contém uma menor resistência e tenacidade que as fibras contínuas, todavia são menos dispendiosas. Devido à fragilidade e dificuldade de processamento os compósitos reforçados com partículas contêm uma menor percentagem de volume de partículas em relação ao volume total do componente (40 a 50 %) [18].

As fibras têm um comprimento relativamente maior ao seu diâmetro, quanto menor o seu diâmetro menor a probabilidade de defeitos e maior a resistência e flexibilidade, o que leva a uma maior facilidade de manobrabilidade durante o processamento do material, contudo a diminuição do diâmetro acarreta um aumento do preço da fibra. As fibras são disponibilizadas em fibras longas/contínuas ou fibras curtas/descontínuas. As fibras longas são normalmente predispostas numa certa orientação enquanto as fibras curtas são colocadas aleatoriamente. A percentagem de volume de reforço nas fibras tem um limite máximo de 70%, de forma a garantir a correta impregnação da matriz e reforço [18].

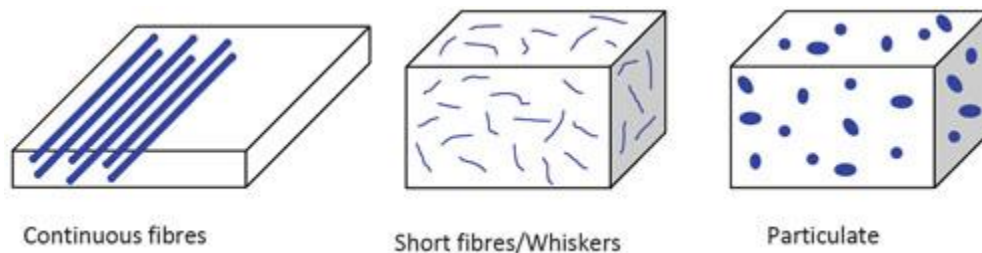


Figura 11 Representação de alguns formatos de reforços [22]

### 2.2.2.1. Configurações da Fibra

As fibras podem apresentar variadas configurações, entre elas estão [20]:

- *Roving* – fibras com diâmetros compreendidos entre 9 e 13  $\mu\text{m}$  enroladas continuamente de forma helicoidal em bobines [20];
- Mantas – “as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial em emulsão ou em pó que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação.” [20];
- Tecidos 2D e 3D – fibras interligadas num plano com diferentes orientações de acordo com o desejável para uma melhor prestação às cargas a suportar. Esta configuração permite obter propriedades mecânicas elevadas, quando as fibras são orientadas de acordo com a direção das cargas planares exercidas [20]. As orientações mais comuns são [20]:
  - *plane weave* – “cada fibra orientada a  $0^\circ$  passa, alternadamente, por baixo e por cima de cada fibra orientada a  $90^\circ$ ”,
  - *twill weave* – “fibras a  $0^\circ$  são interligadas, alternadamente, por cima e por baixo e duas ou mais fibras a  $90^\circ$ , de forma regular ou repetida”,
  - *satín weave* – idênticos aos tecidos *twill weave*, contudo configurados para “provocar poucas interseções entre as fibras a  $0^\circ$  e as fibras a  $90^\circ$ ”.

Os tecidos 3D diferenciam-se por conter “fibras orientadas na direção da espessura”, o que melhora resistência interlaminar. Contudo o teor de fibras no plano é limitado, de forma a garantir uma boa impregnação [20];

- Malhas – “ligação sucessiva de camadas alinhadas” (...) “as camadas são cozidas em conjunto”. Através de variadas configurações é possível aproximar o comportamento do material a um comportamento isotrópico [20];
- Entrelaçados – “disponíveis em configuração tubular e plana” [20];
- Pré-formas – de fibras curtas são obtidas através de sobreposição manual ou projeção da mistura fibras e ligante; fibra contínua resultam da união de várias camadas 2D com várias orientações [20].

Os compósitos estruturais definem-se por laminados ou do tipo sandwich.

Os laminados consistem na sobreposição de laminas – fibras orientadas num plano impregnadas em resina. As laminas são sobrepostas de forma à orientação das fibras corresponder à direção da carga primária aplicada, estas são alternadamente orientadas com intuito de obter uma variação da orientação da fibra de cada lamina obtendo um

equilíbrio direcional em termos de capacidade de carga. As orientações de empilhamento mais comum são feitas com  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  e  $90^\circ$  [18].

Os painéis sandwich consistem em duas placas de maior resistência e tenacidade agregadas nas extremidades de um outro material de menor densidade, rigidez e resistência – o núcleo. As placas exteriores fornecem as propriedades mecânicas necessárias de modo a sustentar as solicitações em serviço, estas são geralmente ligas de alumínio, titânio ou lâminas de compósitos fibrosos. O núcleo deve ter capacidade de suportar tensão de corte transversal e denso o suficiente de modo a obter rigidez ao corte. Tipicamente são divididos de acordo com o seu material: espumas poliméricas rígidas, madeira e *honeycomb* – estrutura favo de mel geralmente ligas de alumínio ou poliamida[18].

#### **2.2.2.2. Tipo de Fibras**

Entre os reforços mais comuns é possível distinguir os seguintes:

- Vidro;
- Carbono;
- Boro;
- Aramídicas;

##### **2.2.2.2.1. Fibras de Vidro**

As fibras de vidro entre todos os reforços são os mais utilizados, onde é possível identificar a fibra Vidro E (*E-glass*) como a mais empregue, geralmente para aplicações de isolamento (térmico ou elétrico). Isto deve-se ao baixo custo apresentado e ao seu prematuro desenvolvimento [23].

As fibras de vidro são produzidas através do estiramento de vidro fundido através de uma fieira com orifícios de dimensões da grandeza do micrómetro ( $\mu m$ ) [20, 24]. O resultado é uma superfície livre de defeitos microscópios e uma fibra com um diâmetro demasiado pequeno para apresentar defeitos. É necessário, portanto proteger as fibras contra a abrasão e corrosão, que poderá provocar falhas superficiais e perda da elevada resistência obtida durante o seu fabrico [24]. Os tratamentos superficiais variam entre revestimento têxtil ou revestimento plástico, de acordo com o fim do reforço. O revestimento plástico concilia a inclusão da fibra em diferentes matrizes, consiste em quatro componentes [20]:

- Ligante;
- Agente de adesão;
- Lubrificante;
- Agente anti-estático e/ou agente de impregnação.

O vidro é um material com uma elevada estabilidade química, porém após a temperatura de transição perde resistência mecânica. Material frágil, não liberta a concentrações de tensão em possíveis fissuras existentes, fraturando antes de chegar ao regime plástico. Apresenta ainda uma baixa condutividade térmica e baixa resistência térmica ao choque. A fibra de Vidro E revela baixo módulo de elasticidade e suscetibilidade à rutura por fluência. Através da modificação da composição química do material é possível modificar as suas propriedades. O Vidro S (*S-glass*) contém melhores propriedades térmicas e melhor estabilidade, o Vidro HS (*HS-glass*) é mais rígido e resistente, demonstrando uma melhor resistência à fadiga e fluência [23, 24].

Propriedades	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young	73,0	85,5	86,0
Tensão de Rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação de Rotura	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de Expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5,0	2,9	4,0

**Tabela 2 Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro[20]**

“Os filamentos poliméricos carece pelos defeitos causados durante o seu fabrico e pela fraca ligação química da cadeia molecular.” De modo a melhorar a resistência dos filamentos, estes são submetidos a processos de dilatação, oxidantes e carbonização que convertem o polímero em fibras maioritariamente compostas por carbono e uma estrutura cristalina idêntica à grafite. Os filamentos no final do processo apresentam um diâmetro da ordem de grandeza do micrómetro ( $\mu\text{m}$ ), que traduz em defeitos residuais muito pequenos, revela ainda uma elevada capacidade de solitação à carga [24].

A resistência do filamento é influenciada pela ligação atômica e/ou molecular e os defeitos que contêm. “Quanto mais forte for a ligação C-C mais resistente e rígida será a fibra polimérica.” “Os elementos mais resistência são: carbono, boro e silício.” A combinação de elementos é feita para obter elevada performance, exemplos disso são sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carboneto de silício ( $\text{SiC}$ ), nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) – reforços cerâmicos [24].

#### **2.2.2.2.2. Fibra de Carbono**

“As fibras de carbono são caracterizadas pela elevada resistência e rigidez e apresentarem uma baixa densidade e baixo coeficiente térmico de expansão (CTE)”. Exibem elevada tensão à fratura, resistência à fluência, fadiga e a ambientais corrosivos, porém oxidam a elevadas temperaturas. Devido a elevada anisotropia das fibras propriedades, como rigidez, resistência à tração e à compressão e condutividade térmica são muito mais elevadas axialmente do que na direção radial. “A curva tensão-extensão

é não linear”, com o aumento da extensão o material comporta-se de diferente forma à tração e à compressão, a elasticidade aumenta e diminuí, respetivamente [23].

Algumas das fibras de carbono tem grande condutividade térmica, que se revela um fator importante para aplicações onde a dissipação de energia e controlo térmico sejam fatores determinantes. Tem coeficiente de expansão térmica baixo e negativo, ou seja, quando aquecida a fibra reduz o seu volume [23]. “Associadas a materiais com coeficiente de dilatação positivo podem dar origem ao aparecimento de tensões prejudiciais na interface.” Caso a conjugação seja criteriosa é possível produzir materiais compósitos com coeficiente de expansão térmica nula [20].

O aumento da tensão de cedência é influenciado pelos defeitos presentes na fibra limitadores e as impurezas presentes no espaço de produção das fibras. As fibras normalmente são submetidas a processo químicos ou oxidação eletrolítica para o tratamento superficial da fibra de modo a melhorar a qualidade da adesão fibra/matriz [24].

A produção das fibras de carbono é realizada através da decomposição térmica de vários precursores, entre os essenciais é possível destacar:

- a celulose que origina às *rayon fibers*, que caiu rapidamente em desuso muito devido à baixas propriedades exibidas,
- o alcatrão (*pitch*), exibem geralmente propriedade mecânicas inferiores, contudo estão presentes num vasto mercado demonstrando vantagens económicas,
- e o poliacrilonitrilo (PAN), o precursor mais utilizado, fornecem excelentes resistência à tração e compressão, apesar da resistência mecânica tende a reduzir com o aumento da elasticidade.

Propriedades	PAN	Alcatrão <i>Picth</i>	<i>Rayon Fibers</i>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young	200 – 400	300 – 700	415 – 680
Tensão de Ruptura (MPa)	2480 – 5600	1900 – 2200	2070 – 2760
Deformação de Ruptura	0,6 – 1,2	1 – 1,5	0,5 – 0,6
Coeficiente de Expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	-0,7 – -0,5	-1,6 – -0,9	–

Tabela 3 Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono [20]

O método de produção para obter fibras de carbono a partir do precursor PAN é descrito pelas seguintes etapas:

- oxidação;
- carbonização;
- grafitação;
- tratamento superficial.

### 2.2.2.2.3. Fibras Aramídicas

As fibras aramídicas são introduzidas pela *Dunpot* em 1972. São normalmente designadas por fibras *Kevlar*. São produzidas através da extrusão de uma solução polimérica obtida a partir de poliamidas aromáticas. A solução polimérica é conservada a temperaturas entre  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $-80^{\circ}\text{C}$  e posteriormente extrudido a  $200^{\circ}\text{C}$  [20].

As fibras aramídicas são maioritariamente aplicadas em poliméricos, cimento e proteção balística [23]. A elevada dureza e resistência ao impacto são algumas das seguintes vantagens da utilização das fibras aramídicas [20]:

- excelente resistência química, mecânica;
- ótima relação rigidez-peso;
- boa resistência ao impacto e à fadiga;
- boa capacidade de amortecimento de vibrações;
- boas características dielétricas
- elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes;
- boa resistência a ácidos e alcalis.

Propriedades	Kevlar29	Kevlar49	Twaron
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,44	1,45	1,44
Módulo de Young	60	129	60
Tensão de Ruptura (MPa)	3000	3000	2600
Deformação de Ruptura	3,6	1,9	3
Coefficiente de Expansão térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-2,0	-2,0	–

Tabela 4 Propriedades de fibras de aramídicas [20]

Contudo a fibra tem uma baixa resistência à compressão e flexão, elevada sensibilidade ao corte laminar e à humidade [24].

### 2.2.3. Semi-Produtos

“Os semi-produtos são pré-combinações de fibra e matriz para posteriormente ser processados para obtenção da peça compósito final.” Caracterizam-se em dois tipos composto de moldação e pré-impregnados (*prepreg*) [20].

Os compostos de moldação são normalmente utilizados para moldação por injeção ou compressão. Entre os mais comuns é possível destacar [20, 25]:

- SMC (*sheet molding compound*) – apresenta uma forma planar, constituída por fibras e resina (maioritariamente poliéster ou vinilester saturado), com espessuras até 6 mm. A sua utilização incide a serviço que necessitam de um resistência mecânica moderada e uma elevada cadencia de produção. O teor de fibras ronda os 30% do peso final do componente. Para uso que requeiram elevada resistência mecânica e ao impacto existem variantes do SMC, designadas HMC (*High Impact SMC*). Considerando o formato da fibra pode-se distinguir três tipos:

SMC-R – fibras curtas aleatoriamente dispostas, SMC-CR – fibras unidirecionais e fibras curtas dispersas aleatoriamente e XMC – fibras curtas aleatoriamente distribuídas e fibras contínuas numa configuração ‘X’ [20], [26]. A sua produção resulta de uma primeira mistura de resina e fibra, que de seguida atravessa por um compressor de rolos.

- TMC (*thick molding compound*) – Semelhantes aos SMC, fibras curtas distribuídas aleatoriamente num formato tridimensional (3D), contudo apresentam espessura mais elevadas (até 50 mm), isto reduz a possibilidade de empilhamento.
- DMC ou BMC (*dough molding compound* ou *bulk moulding compound*) – mistura pastosa de resina com fibras curtas. Apresenta teores de fibra entre 15% a 20%, o que resulta numa menor resistência mecânica comparado à dos SMC.

Os pré-impregnados são misturas de resina e fibras para futura consolidação, normalmente através de autoclave. Recorre-se a este semi-produto quando o serviço em causa exige elevada performance, contudo o seu preço é elevado. Quando a resina é termoendurecível são adicionados inibidores de cura que impede a polimerização do semi-produto, mas para isso é necessário que este seja armazenado a baixas temperaturas, no entanto tem tempo limitado de validade. Possuem uma boa maneabilidade, auto-adesão no empilhamento de camadas e boa conformação ao molde. Na utilização de resina termoplásticas o tempo de vida é ilimitado à temperatura ambiente, todavia são mais difíceis de manter em posição no empilhamento, não tem capacidade de auto-adesão e é necessário um pré-aquecimento antes de iniciar o processamento [20].

#### **2.2.4. Cargas e aditivos**

Os compósitos além das fibras e resina podem ainda conter cargas e outros aditivos de modo a melhorar certas características do material ou processamento. Entre estas características enuncia-se [20]:

- Diminuição de custos;
- Facilidade de manuseamento;
- Melhoria das características de moldação;
- Melhoria das propriedades pós-cura;
- Introdução de motivos decorativos.

“As cargas mais comuns são obtidas a partir de depósitos naturais”. Os principais atributos que devem conter são [20]:

- Boa dispersabilidade;
- Estabilidade de suspensão;
- Baixa densidade;
- Cor clara;
- Baixa percentagem de humidade;

- Baixa absorção de óleo;
- Resistência ao calor;
- Resistência química.

Para o melhoramento de certas propriedades são adicionados aditivos que desempenha funções como [20]:

- Diminuição da contração da matriz durante a polimerização;
- Melhoria da resistência ao fogo;
- Diminuição da emissão de voláteis;
- Supressão da emissão de estireno;
- Condutibilidade elétrica;
- Melhoria da tenacidade;
- Estabilizadores de ultravioletas;
- Coloração;
- Efeitos anti estáticos.

### 2.2.5. Processos de fabrico

O processamento de materiais na maioria dos casos consiste no empilhamento de laminas para uma posterior moldação em molde aberto ou fechado. Existe ainda novos avanços em relação à automatização dos processos, como é o caso do fabrico aditivo (comumente designado por *impressão 3D*).

O processamento de materiais compósitos apresenta uma elevada importância nos custos, ciclos e volumes de produção, performance e aplicações finais dos materiais. As características finais do material são definidas pela quantidade e qualidade de monitorização de fatores como a pressão, temperatura, viscosidade e impregnação.

#### 2.2.5.1. Moldação manual (*Hand lay-up*)

A moldação manual consta do empilhamento sucessivo de camadas de fibras (normalmente no formato de tecidos) num molde aberto. As fibras são impregnadas e compactas com a utilização de equipamento convencionais como pincéis ou rolos. O uso destas ferramentas aplica pressão o que provoca uma melhor impregnação da fibra com a resina [20, 27].



Figura 12 Moldação manual [28]

De forma a garantir um bom acabamento superficial é aplicado uma resina de poliéster – *gel-coat*, na superfície do molde. Posteriormente é aplicado um agente desmoldante para facilitar a retirar do molde o componente no final do processo. A cura do material é geralmente feita à temperatura ambiente [20, 27].

Este é um processo de bastante simplicidade e baixo investimento inicial, porém apresenta uma baixa cadência de produção e as qualidades finais são muito influenciadas pela mão-de-obra. A libertação de voláteis no decurso do método é algo a ter em atenção para com a saúde do operador. Os componentes finais apresentam um teor de percentagem de fibras de cerca de 25%, e geralmente necessitam de pós processamento [20, 27].

#### 2.2.5.2. Moldação por projeção (*Sparry up*)

Técnica similar à moldação manual. A fibra (na configuração de *roving*) e a resina são projetadas para um molde, por meio de um equipamento de projeção onde a fibra é cortada e projetada no jato de resina.

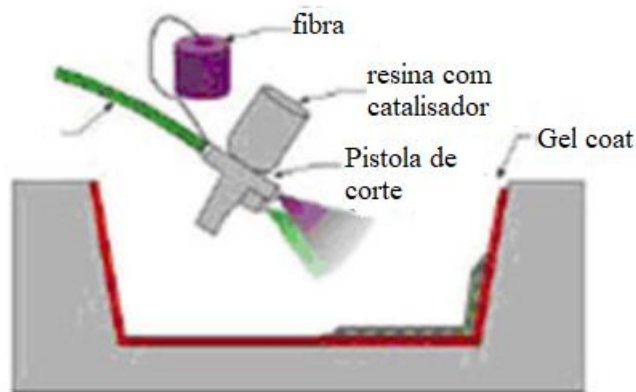


Figura 13 Moldação por projeção [28]

Empregue para pequenas séries de fabrico. Apresenta teores de fibras de cerca de 15%, exibindo piores características mecânicas que componentes executados por *hand lay-up* [20].

#### 2.2.5.3. Moldação por compressão

Método executado por meio de um molde fechado. A conformação da peça pode ser feita a frio ou a quente [20].

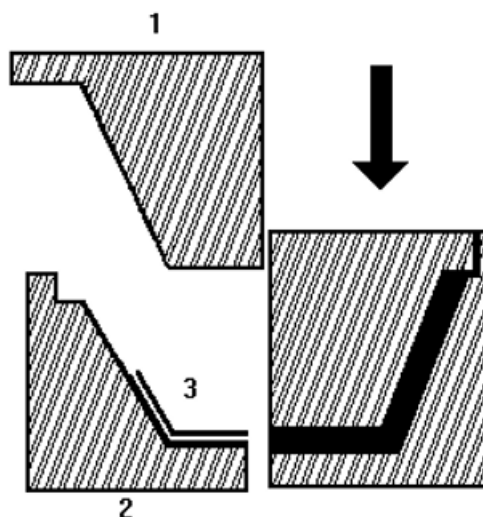


Figura 14 Moldagem por compressão [29]

Na moldagem a frio as resinas utilizadas são termoestáveis, estas são misturadas com um catalisador exotérmico que fornece o calor necessário à plastificação do componente e reduz os ciclos de produção. O processo consiste na compressão do reforço seco e de seguida é adicionado a resina e o reforço é novamente comprimido para se dar a impregnação do reforço/matriz. A utilização de resinas termoendurecíveis possibilita um melhor preenchimento do molde devido à baixa viscosidade apresentada. As baixas pressões e temperaturas envolvidas (inferiores a 4 bar e entre 30 a 45 °C respetivamente) permite a utilização de equipamento mais leves e menos dispendiosos. Tem ciclos de produção médios – entre 4 a 12 peças por hora, é uma técnica utilizada em casos onde a precisão dimensional e acabamentos não são significativos para o produto final [20, 30–33].

A moldagem por compressão a quente utiliza maioritariamente resinas termoplásticas, estas são aquecidas até valores aproximados da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). A resina é transferida para o molde que é pré-aquecido (entre 80° e 170° C) e a mistura da resina/fibra é comprimida, com pressões à volta de 0,5 a 15 MPa. Os moldes na moldagem a quente necessitam de corresponder à solicitações de temperatura e pressão, por isso, mesmo estes são produzidos em metal e/ou materiais similares. Após a impregnação da resina e devido às temperaturas envolvidas dá-se a cura do material ainda dentro do molde, após o arrefecimento é possível extrair o produto final. De notar a crescente utilização de composto de moldagem que permite menores ciclos de fabrico levando a uma maior cadência de produção [20, 30–33].

Em ambos os métodos (a quente ou a frio) a qualidade do produto final é influenciada por parâmetros como velocidade de fecho e pressão do molde, temperaturas e tempo envolvido no processo de cura, a geometria, dimensão e orientação do material e o fluxo da resina ao longo da impregnação. Evitando assim e/ou reduzindo deformações, contrações e porosidades na peça final [20, 30–33].

#### 2.2.5.4. Moldação por Vácuo

A moldação por vácuo é um processo semelhante à moldação por compressão a frio, porém acarreta menores custos de investimentos em equipamentos. A técnica consiste em posicionar as fibras no molde, de seguida fechar o molde e transferir a resina através do vácuo ou as fibras e resina são previamente colocadas no molde e aciona-se o vácuo. O molde poderá ser fechado ou aberto, em caso de o molde ser aberto a aplicação de vácuo dá-se com o uso de um saco de vácuo e a peça apenas apresentará uma superfície lisa [20, 34, 35].

A aplicação de vácuo possibilita redução de porosidades, uma melhor compactação (teor de fibras de cerca de 70%) e impregnação das fibras isto reflete-se numa melhor qualidade e melhores características ao serviço do componente final. Porém exibe um limite de pressão e um nível máximo de compactação das fibras o que leva a um maior controlo das particularidades de processamento. É uma técnica adequada para séries de 500 a 5000 peças por ano e componentes de média e grandes dimensões, todavia são necessárias certas particularidades em peças de grande dimensão de modo a assegurar o devido cobrimento das fibras [20, 34, 35].

#### 2.2.5.5. Moldação por injeção

O procedimento consiste na extrusão de material para um molde fechado. Técnica adequada para componentes de elevada cadência de produção. Geralmente recorre ao uso de misturas de resinas termoendurecíveis com fibras curtas, onde se diferencia granulados reforçados ou composto de moldação – do tipo *BMC*. Devido a orientação das fibras indefinida e baixo teor de fibras o componente final exibe propriedades inferiores (comparado com materiais de fibras longas) [20, 25, 36].

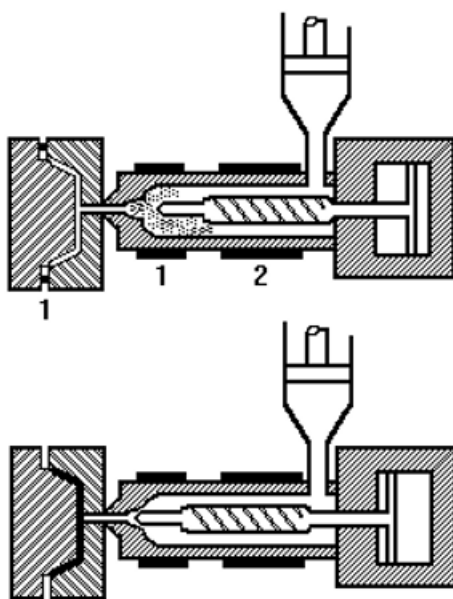


Figura 15 Moldação por injeção [29]

A injeção da mistura resina/fibra para o interior do molde ocorre por meio de um êmbolo ou parafuso helicoidal. A quantidade de matéria prima injetada é controlada por este mesmo êmbolo ou parafuso. O material é transportado até à câmara de injeção – onde se procede ao aquecimento e homogeneização do material. Posteriormente é executada a injeção no interior de um molde aquecido e pressurizado. A cura do material ocorre dentro do molde. O molde é equipado com canais de água para o arrefecimento da peça e sua extração. Normalmente a mistura da resina e fibra ocorre anteriormente à injeção na cavidade do molde, isto resulta [20, 25, 36]:

- menor danificação do material,
- possibilidade de utilizar fibras longas – melhorando as propriedades do componente,
- maior flexibilidade de controlo do material,
- maior eficiência energética e
- menor influência de fatores externos, devido ao processo de ciclo fechado.

As propriedades e qualidade do componente final, assim como, os ciclos de produção são influenciados por alguns parâmetros essenciais, como [20, 25, 36]:

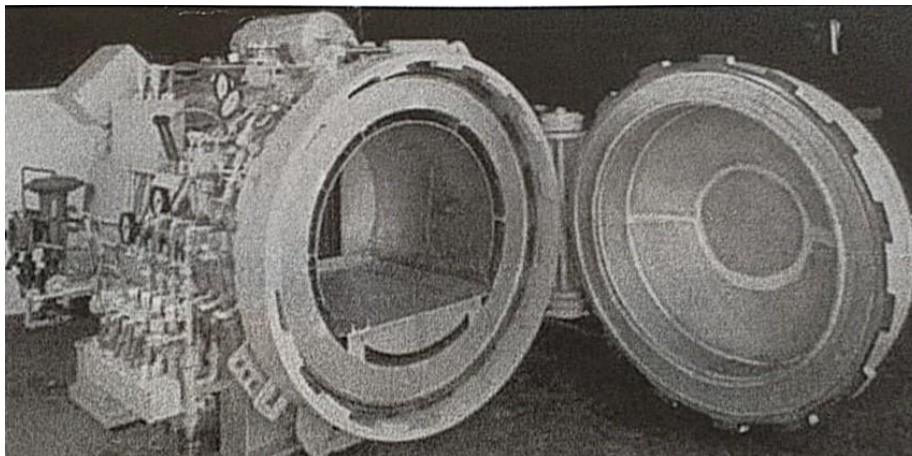
- quantidade de matéria prima injetada;
- temperatura de aquecimento da matéria prima;
- temperatura de injeção;
- velocidade de injeção;
- pressão de injeção;
- temperatura do molde;
- pressão do molde
- velocidade de rotação do parafuso

As vantagens associadas à moldação por injeção são a possibilidade de executar peças numa única operação, em ciclos rápidos, tal como a estabilidade dimensional da peça (menor deformações e contrações em relação a outros processos). Como o uso de materiais recicláveis. Todavia, é uma técnica que envolve elevados investimentos em equipamentos e possibilita a ocorrência de anisotropia do material [20, 25, 36].

#### **2.2.5.6. Autoclave**

O autoclave é um processo de consolidação de pré-formas (*prepregs*), para aplicações que exijam elevada qualidade e performance às solicitações mecânicas em serviço. O processamento consiste na produção de componentes através de aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Os ciclos de aplicação destes mesmos parâmetros são definidos de acordo com o material, e apresentam variações graduais, com estágios a valores constantes, mas fases desfaçadas. Numa primeira estância o objetivo é diminuir a viscosidade da resina para um melhor fluxo da mesma, eliminando voláteis e garantindo uma impregnação de qualidade como um elevado teor de fibra e homogeneidade. A aplicação de vácuo, tal como, o aumento de temperatura tem um fator

decisivo. De seguida sucede-se a cura e consolidação da peça. A aplicação de pressão é um fator com bastante relevância, esta é exercida por meio de um gás inerte de nitrogénio. O constante controlo e monitorização dos parâmetros principais – temperatura, pressão e vácuo, são essenciais para o processamento da peça e correspondente qualidade e propriedades mecânicas e térmicas finais [20, 33].



**Figura 16** Panorâmica geral de um autoclave [20]

O processo envolve o corte e empilhamento dos pré-impregnados sobre o molde na sequência e espessura pretendida. O laminado “está inserido entre 2 películas de Teflon® poroso”, de modo a facilitar a desmoldagem e permitir o escoamento do excesso de resina para a camada seguinte onde se encontra o tecido absorvente. Após a colocação dos tecidos absorventes é inserido um tecido homogeneizador de forma a uniformizar o vácuo a todo conjunto. Este conjunto é inserido num saco de vácuo que posteriormente é colocado no interior do autoclave [20, 33].

O autoclave é empregue em pequenas séries para componentes de elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas sem grandes constrangimentos em relação à geometria ou dimensão do componente a produzir, contudo necessita de um elevado investimento inicial e o autoclave é um equipamento de grande dimensão, ou seja, é necessário um espaço físico igualmente grande para albergar o equipamento. É ainda necessário ter atenção que ao fabricar mais que uma peça no mesmo ciclo de produção, para que o processo seja o mais económico possível, estas terão de ter espessuras semelhantes de forma a garantir uma cura eficaz dos componentes, tendo em noção que serão sujeitas ao mesmo ciclo de cura [20, 33].

#### **2.2.5.7. Moldação por injeção a baixa pressão e transferência - RTM**

Os processos de moldação por injeção a baixa pressão e transferência são processos que ocorrem em molde fechados e normalmente envolve resinas termoendurecíveis – resinas de baixa viscosidade que permite a injeção a baixas pressões (1 a 5 bar). Oferece uma alternativa muito menos dispendiosa ao processo de autoclave [20, 33, 37, 38].

O método consiste na colocação do reforço no molde, depois injeta-se a resina no interior do molde sob pressão. A resina impregna a fibra e procede-se a cura com o aquecimento ou não do molde. O reforço quando colocado no molde já exibe a configuração final. A utilização de subprodutos diminui os ciclos de produção, que consequentemente aumenta a cadência de fabrico [20, 33, 37, 38].

É um processo que exibe variadas vantagens possibilita [20, 33, 37, 38]:

- a execução de componentes de formatos complexos e grande dimensão,
- uma boa reprodutibilidade,
- boas propriedades mecânicas semelhantes aos *prepreg*, devido à percentagem de teor de fibras entre 50% e 70%,
- bom acabamento superficial,
- boa precisão e exatidão dimensional,
- redução de custos, devido ao baixo investimento inicial em equipamento (comparado com outros métodos como o autoclave),
- redução de ciclos de produção.

Porém é um método que contém desvantagens, como [20, 33, 37, 38]:

- custos excessivos na produção e execução de moldes, quando as peças apresentam geometrias complexas,
- a minuciosa monitorização necessária no decorrer do fabrico,
- a grande limitação de efetuar mudanças geométricas, após a conclusão do molde.

O RTM contém outras variantes onde o procedimento sofre pequenas alterações, uma destas é a utilização de vácuo durante o processo – VARTM. O que melhora a impregnação das fibras que leva a uma maior percentagem de teor de fibras em relação ao peso final do componente e uma minimização de porosidade (virtualmente nula) [20, 33, 37, 38].

#### **2.2.5.8. Pultrusão**

A pultrusão é um processo contínuo e automatizado que permite o fabrico de perfis de secção constante, de forma económica [20, 25, 33, 39–41].

As fibras na forma de *roving*, manta ou tecido são fornecidas por um tear ou bobines a linha de processamento. Estas são tracionadas ao longo de todo o processo de um modo unidirecional. São primeiramente orientadas a um banho de resina no estado líquido, onde se dá a impregnação. Após retirada a resina em excesso as fibras são conduzidas através de um molde pré-aquecido. No molde dá-se a conformação do perfil e ocorre a consolidação, calibração e a cura do material. No final da linha do processo o perfil é cortado nas dimensões pretendidas [20, 25, 33, 39–41].

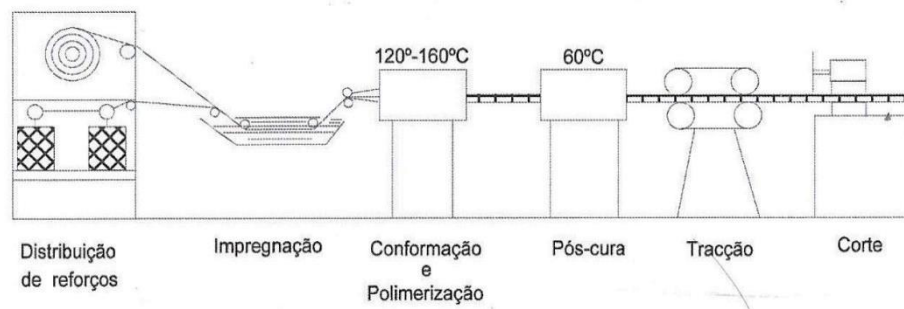


Figura 17 Representação esquemática da moldação por pultrusão [20]

A pultrusão permite a utilização de resinas termoplásticas ou termoendurecíveis, porém as resinas termoplásticas apresentam uma maior viscosidade, o que leva à imposição de temperaturas de processamento mais elevadas. Isto provoca uma necessidade de maior controlo nas variações de temperatura ocorridas no molde, tornando o processo mais complexo [20, 25, 33, 39–41].

As principais vantagens consistem na automatização (pouca influencia da mão-de-obra no produto final) e produção contínua, excelentes características mecânicas na direção longitudinal, devido às elevadas percentagens de fibras (30 a 70%) e a variação de secções de perfis possíveis de fabrico. Contudo o processo apresenta desvantagens como: a limitação à produção de componentes de secção constante, não apresenta grande rigor dimensional, o reforço é limitado à direção longitudinal (para melhorar as propriedades transversais são adicionados tecidos [20, 25, 33, 39–41]).

Os principais parâmetros do processo são [20, 25, 33, 39–41]:

- Velocidade de pultrusão (tipicamente 0,5 a 2 metros/minuto);
- Tempo de cura;
- Contração da matriz;
- Viscosidade da resina;
- Quantidade de fibra.

#### 2.2.5.9. Enrolamento filamental

O enrolamento filamental é um processo simples e automatizado para a produção de componentes geralmente de forma cilíndrica ou esférica, como reservatórios de pressão ou tubos de variadas secções, os diâmetros produzidos mais comuns estão entre 25 e 6 mm. Permitindo a produção de componentes de elevada qualidade e reprodutibilidade sem deslizamentos ou falhas da fibra [20, 25, 33].

O processo resume-se à deposição de fibra na forma de *roving* previamente impregnada com resina sobre um mandril em rotação. O reforço é desenrolado por meio de um sistema de guiamento, para posterior impregnação e enrolamento sobre o mandril. A orientação das fibras é obtida através dos movimentos de translação do carro e rotação do mandril. A polimerização pode ser feita em forno ou por infravermelhos, após a cura o componente é retirado do mandril [20, 25, 33].

A pressão executada durante o processo de enrolamento promove a união e compactação das fibras, o que por sua vez tem influência direta nas características mecânicas finais adquiridas. A quantidade de resina tem uma forte relação com a pressão efetuada, um certo valor é benéfico para remoção de possíveis bolhas de ar e voláteis, contudo uma pressão excessiva pode provocar diferenças significativas de resina entre as camadas externas e internas, assim como diminuir a resistência ao corte interlaminar, a resistência à compressão e resistência à encurvadura. A impregnação das fibras pode ser feita anteriormente ao desenrolamento do *roving* (*prepreg winding*), antes do enrolamento (*wet winding*) ou após o enrolamento (*dry winding*) [20, 25, 33].

As vantagens deste método consistem na simplicidade, automatização e boas características mecânicas resultantes da elevada percentagem de fibra (60% a 75%), possibilidade de orientação de reforço conforme desejado e produzir componentes de grandes dimensões. As desvantagens associadas ao processo são as limitações nas formas a produzir, a necessidade constante de controlo de qualidade e manutenção – troca de bobines e verificação de deslizamentos de fibras, e a dificuldade de obter ângulos baixos (0 a 15°) na orientação das fibras [20, 25, 33].

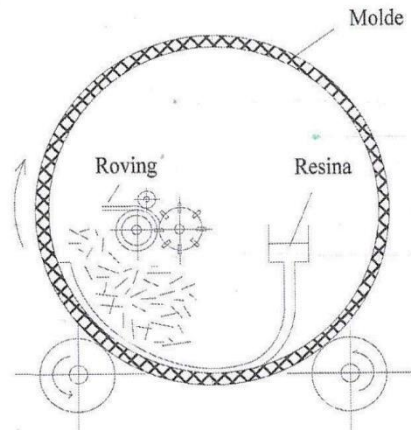
Os fatores decisivos para as propriedades finais do enrolamento filamentar são [20, 25, 33]:

- Ângulo de hélice;
- Quantidade e distribuição de resina;
- Tensão de enrolamento;
- Condições de impregnação do reforço;
- Variação de largura do reforço;
- Posicionamento do reforço;
- Ciclo de cura.

#### **2.2.5.10. Moldação por centrifugação**

O método de moldação por centrifugação é empregue para o fabrico de componentes ocas de forma cilíndrica ou cônica., como tubos e depósitos de fluidos com a capacidade não contaminar o fluido [20].

A técnica consiste na inserção de resina e fibras para um molde cilíndrico em contínua rotação. Através da força centrífuga gerada por essa rotação a resina impregna o reforço e a mistura é forçada a deslocar-se contra as paredes do molde obtendo uma forma cilíndrica/cônica (negativo do respetivo molde). Após a polimerização adquire-se o produto final. A velocidade de rotação produzida depende de características como quantidade e tipo de reforço, espessura e diâmetro do componente final pretendido e viscosidade da matriz [20].



**Figura 18** Representação esquemática da moldação por centrifugação [20]

É um processo que demonstra limitações em relação às possíveis geometrias de fabricar, exige também mão-de-obra qualificada, tal como, precisão na produção e parâmetros rotação do molde e apresenta elevados investimentos iniciais. Têm como vantagens a boa reprodutibilidade, apresentar um bom acabamento superficial nas duas fases e o controlo do material durante o processamento. A força centrífuga possibilita a aplicação e controlo do reforço, a distribuição uniforme da resina, a eliminação da porosidade e elevadas características mecânicas (correspondente ao elevado teor de fibra) [20].

#### 2.2.5.11. Fiber placement

O processamento por *Fiber Placement* – “posicionamento de fibra”, é distinguido por duas técnicas: *ATL* (*automated tape layup*) e *AFP* (*automated fiber placement*), consistem na deposição automatizada de fitas unidirecionais de *prepreg's* ou fibras contínuas respetivamente, normalmente sobre um mandril ou superfície plana [25, 33, 42].

Com a utilização de robots articulados, com cerca de 10 graus de liberdade, que deposita o as fitas/fibras contínuas na superfície do molde, cortando no comprimento desejado. No emprego de fitas *prepreg's* de resinas termoestáveis leva a necessidade de o equipamento ter um armazenamento de baixas temperatura e os rolos do braço robótico serem revestidos com um agente desmoldante, no caso de resinas termoplásticas não necessita destas características, mas as ferramentas de corte e posicionamento das fitas/fibras terão de ser mais rígidas. A técnica *ATL* é adequada para peças de grande dimensão de preferência planas e sem grande complexidade geométricas – raios apertados são propícios ao aparecimento de contrações e encurvadura do material. *AFP* apresenta um controlo individual da fibra, que leva a possibilidade de depositar a fibra com diferentes velocidades, permitindo uma maior flexibilidade na forma do componente, porém apresenta um limite máximo do comprimento o reforço. Ambos os métodos exibem um elevado custo inicial em equipamentos [25, 33, 42].

### 2.2.5.12. Fabrico aditivo (3D Printing)

O fabrico aditivo consiste na deposição sucessiva de camadas uma por cima da outra – *layer-by-layer*. É um processo que minimiza as despesas relacionadas com o uso de moldes e ferramentas utilizadas nos processos convencionais – técnicas subtrativas [43].

É uma técnica que permite a produção rápida e económica de protótipos, com a capacidade de customização das peças com custo reduzidos, pois é possível fazer facilmente modificações à geometria dos componentes a fabricar. Apresenta uma variedade de materiais aplicáveis – polímeros, metálicos e cerâmicos [43].

Através da sua utilização é possível fabricar geometria complexas e de várias dimensões com alta precisão, com grande flexibilidade no design e com um melhor rendimento de matéria prima utilizada. Todavia, os produtos poderão apresentar propriedades mecânicas baixas e comportamento anisotrópico. Por vezes, é necessário pós-processamento, após a produção do elemento. Existem variadas técnicas de fabrico aditivo, entre elas estão [43]:

- *Fused deposition modelling (FDM)* – extrusão de filamento contínuo de polímero termoplástico com mistura de fibras curtas, de modo a promover melhores propriedades mecânicas. Processo *layer-by-layer*, onde o filamento é aquecido no bocal até ao estado semilíquido e de seguida extrudido para a plataforma, onde o material funde e posteriormente polimeriza à temperatura ambiente. *FDM* é uma técnica que revela limitações na variedade de materiais aplicáveis, propriedades mecânicas apresentadas baixas, fraco acabamento superficial e aparência interlaminar. A distorção interlaminar é um dos fatores que debilita a resistência mecânica do componente final. Porém, é um processo simples e económico, com ciclos de produção rápido.
- *Powder bed fusion* – numa plataforma fechada deposita pós de material que através de um laser (apenas em pós que exibe temperatura de fusão/sinterização baixas) ou agente ligante são fundidas camada após camada – processo *layer-by-layer*. A distribuição, tamanho e compactação das partículas de pós tem fatores decisivos para o sucesso e qualidade do componente final fabricado. É possível distinguir duas variantes: *SLS (selective laser sintering)* e *SLM (selective laser melting)* – apenas é aplicável em certos metais, como o alumínio. Na aplicação da técnica *SLS* as partículas não derretem, as temperaturas elevadas provocam uma fusão molecular entre as partículas. Por outro lado, quando utilizado *SLM* as partículas são derretidas e de seguida com a passagem do laser funde as partículas, isto promove melhores propriedades mecânicas. O processo não necessita de estruturas de

suporte, o pó não sintetizado serve de suporte ao componente. É ainda uma técnica que demonstra excelente precisão e exatidão geométrica. Porém tem ciclos de produção lentos, e que envolve elevados investimentos.

- *Stereolithography (SLA)* – o processo consiste no uso de um feixe de fótons ou luzes ultravioletas (UV) de formar e consolidar uma solução polimérica ou monomérica. O feixe promove a ligação e polimerização dos monômeros, que de seguida solidifica. Poderá ser necessário tratamentos após o processo para obter melhores propriedades mecânicas. A reação dos monômeros e o processo de cura são etapas complexas e fulcrais. A aplicação de *SLA* permite peças de elevada qualidade e precisão. Todavia é um processo com custos altos e ciclos de fabrico demorados com um número de materiais possíveis de empregar limitado. A intensidade e duração de exposição do feixe são determinantes para a qualidade do produto final.
- *Laminated object manufacturing (LOM)* – camadas sobrepostas de material (laminados de material compósito polimérico, cerâmico, papel ou fitas de metal) são cortadas por laser ou lâminas e de seguida unidas (*form-then-bond*) ou vice-versa (*bond-then-form*). Dependendo da aplicação do produto é necessário pós-tratamentos térmicos para melhorar as características do material. A sua aplicação promove a redução de investimento em equipamentos e de tempos de fabrico, adequado para produção de componentes de grande escala. Contudo, apresenta fraco acabamento superficial e baixa precisão dimensional, não sendo adequado para peças com geometrias complexas.<sup>7</sup>

A transmissão de calor em materiais compósitos difere de materiais isotrópicos. Para que se possa compreender e entender melhor como decorre o fluxo térmico é em baixo descrito o seu procedimento.

### **2.3. Transmissão de calor**

A transmissão de calor em materiais não metálicos, como os materiais compósitos, a nível microscópico ocorre maioritariamente por *phonons*. *Phonon* designa a quantificação de energia reticular de vibração, caracterizado pela natureza da partícula e onda do *phonon* – *Figura 19*. Qualquer material quando sujeito a um aumento de temperatura provoca a excitação por parte das partículas do mesmo. “A propagação da energia ocorre pela transmissão da vibração das moléculas entre si o que leva à transmissão de energia por “pacotes” conhecido como *phonon*.” “Quanto menores

impedimentos existirem no “transporte” de energia maior condutividade térmica têm o material. Nos polímeros o controle do transporte de *phonon* é depende principalmente de três fatores: velocidade, percurso livre médio e calor específico [44].



Figura 19 Caracterização de um phonon [44]

O *phonon* podem sofrer mudanças de direção momento ou perda de energia, durante a propagação de energia. A dispersão do *phonon* é o principal fator de redução da condutividade de energia. Pode ser distinguido em três tipos [44]:

- Dispersão *phonon-phonon*;
- Dispersão *phonon-impureza*;
- Dispersão *phonon-fronteira*;

[44]

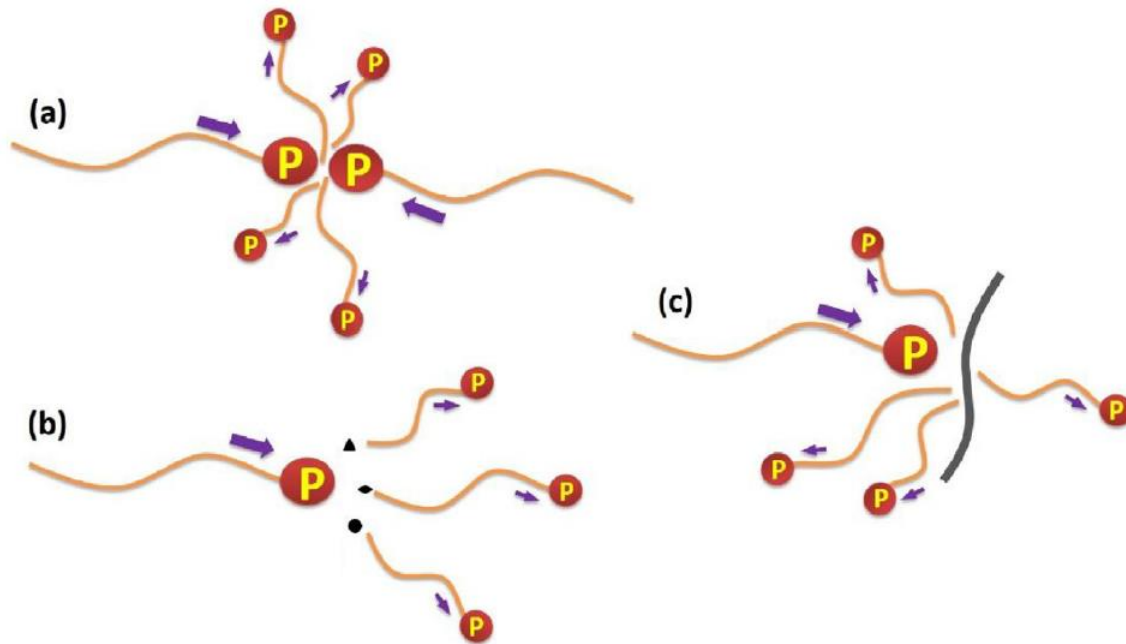


Figura 20 Representação esquemática de dispersão: (a) *phonon-phonon* (b) *phonon-impureza* (c) *phonon- fronteira* [44]

Os polímeros termoplásticos apresentam condutividade térmica baixa o que se deve à inibição do transporte do *phonon*. A inibição ocorre devido a características dos termoplásticos como [44]:

- Baixa densidade atômica;
- Ligação química covalente;
- Anisotropia estrutural;
- Desajuste na vibração molecular.

Apesar da baixa condutividade térmica os materiais poliméricos apresentam [45]:

- fácil processamento,
- baixa densidade,
- baixa absorção de água,
- resistência à corrosão,
- elevada resistência elétrica,
- e baixo custo.

Através da introdução de cargas/reforços no material polimérico é possível aumentar a condutividade térmica do material, contudo a inclusão de cargas promove o aparecimento de defeitos e impurezas o que conseqüentemente leva a um aumento de dispersão de *phonons* [45]. O aumento da condutividade térmica é obtido através [44]:

- “do aumento do volume específico do reforço, seja pela maior quantidade de carga disposta seja pela maior dimensão do reforço, isto resulta na diminuição do espaçamento entre partículas”,
- “da modificação superficial da carga que origina a diminuição da resistência interfacial térmica”,
- “da otimização dos percursos térmicos através da manipulação do alinhamento do reforço”.

A condutividade térmica do compósito é influenciada por fatores relativos ao reforço e à matriz, como a interceção reforço/matriz. Entre os principais fatores que afetam a transmissão de energia estão os seguintes [44–46]:

- Dimensão do reforço;
- Forma do reforço;
- Concentração volúmica da partícula em relação à matriz;
- Tratamento superficial da carga;
- Método de fabrico do compósito;
- Distribuição dimensional da partícula;
- Orientação/alinhamento da carga;
- Dispersão e distribuição do reforço;
- Estrutura química da matriz polimérica;
- Viscosidade do polímero;
- Temperatura.

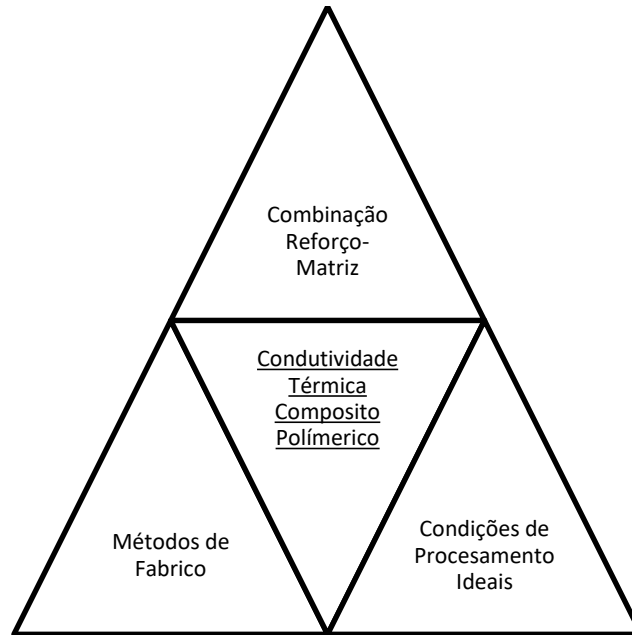
“A interface do material é um fator determinante na determinação do transporte térmico por parte do *phonon*.” Para uma melhor condutividade térmica, e por sua vez uma melhor transmissão de energia deve-se ter como “objetivo a produção de ligações térmicas eficientes entre matriz e reforço e a redução da resistência interfacial térmica”[44].

A transmissão de energia térmica é correlativa à condutividade térmica. No processo de transmissão de fluxo de calor entre as tubagens e o fluido e, de modo a elevar a condutividade térmica, deve-se promover o máximo de área de contacto, regime turbulento por parte do fluido e reduzida dimensão do diâmetro e espessura do tubo que conduz o fluido de trabalho [44]. quanto menos for a interface entre partícula e matriz, maior será a resistência interfacial térmica, que por sua vez diminui a condutividade

térmica [46]. A condutividade térmica é ainda caracterizada pelos seguintes parâmetros [45]:

- Espessura da parede dos tubos;
- Resistência interfacial entre fluido de trabalho e as paredes do tubo
- Velocidade de escoamento do fluido.

A *Figura 21* demonstra os principais fatores que influenciam a condutividade térmica de um compósito polimérico: a combinação reforço-matriz, as condições de processamento ideais e o método de fabrico.



**Figura 21** Fatores que afetam a condutividade térmica de um compósito polimérico [44]

A energia útil adquirida por um coletor solar é equivalente à energia absorvida pelo coletor menos as perdas de energia associadas. Considerando um estado estacionário é possível obter o valor da energia térmica útil transmitida pelo coletor através da equação 1 [4, 9].

$$q_u = A_c * (S - U_l(T_p - T_s)) = \dot{m} * c_p * (T_0 - T_i) \quad (1)$$

Assumindo a temperatura de entrada no coletor pela ( $T_i$ ) igual temperatura média da superfície absorvente ( $T_p$ ) é possível obter a equação 2, aplicando um fator de correção –  $F_R$  – fator de transferência de calor do coletor, representativo da eficiência associada ao *CPP*.  $F_R$  é obtido pelo rácio entre a transferência real de energia térmica e a energia térmica máxima que seria possível transmitir [4, 9].

$$q_u = A_c * F_R(S - U_l(T_i - T_s)) \quad (2)$$

A radiação incidente no sistema pode ser distribuída por três vertentes – radiação direta do feixe solar, radiação difusa e radiação refletida pelo solo [4, 9].

$$S = G_t * (\tau\alpha)_i \quad (3)$$

Com a equação 4 é possível adquirir valores para expressar o rendimento de um coletor solar [4, 9].

$$\eta = \frac{q_u}{A_c * G_t} \quad (4)$$

$q_u$  – taxa de energia útil fornecida ao coletor (W);

$A_c$  – área total de abertura do coletor ( $m^2$ );

$S$  – energia absorvida ( $W/m^2$ );

$G_t$  – energia solar total incidente na área de abertura do coletor ( $W/m^2$ );

$\tau\alpha_i$  – produto transmissão-absorção relativo a radiação ( $i$ ) – direta/difusa/refletida do solo;

$U_L$  – coeficiente de perdas de energia do coletor solar ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ );

$T_p$  – temperatura média da superfície absorvente ( $^\circ C$ );

$T_a$  – temperatura ambiente ( $^\circ C$ );

$\dot{m}$  - caudal mássico ( $kg/s^2$ );

$c_p$  – calor específico do material ( $J/kg \cdot K$ );

$T_0$  – temperatura do fluido à entrada do coletor ( $^\circ C$ )

$T_i$  – temperatura do fluido à saída do coletor ( $^\circ C$ )

$F_R$  – fator de transferência de calor do coletor

O estudo em causa estudará alternativas à construção da superfície absorvente do coletor solar de placa plana, geralmente fabricado em alumínio ou cobre revestido. Como alternativa será estudado materiais compósitos de partículas metálicas – alumínio e latão, materiais de boa condutividade térmica, de modo a encontrar soluções alternativas ao fabrico do coletor com um menor custo e maior sustentabilidade e sem comprometer o funcionamento e rendimento do painel solar térmico.

### 3. Material e procedimentos experimentais

#### 3.1. Placa absorvente de compósitos de partículas

O conceito a projetar consiste no desenvolvimento da placa plana absorvente do coletor solar num material alternativo – compósito de partículas, de modo a obter uma maior eficácia e sustentabilidade. Na continuidade do estudo nesta área [47] os materiais estudados são compósitos de partículas de latão ou alumínio, impregnadas em resina epóxi polimérica L74. Os provetes foram realizados através de moldação manual (vazamento). Os materiais foram fabricados e caracterizados no estudo anterior [47]. As amostras de material analisadas estão representadas na *Tabela 5*, através de testes experimentais à tração e à condutividade térmica foram obtidas as propriedades pretendidas para a realização da simulação numérica do coletor solar.

	Partículas e percentagem	Resina
Provete 01	Latão – 70%	Polimérica L74
Provete 02	Latão – 43%	
Provete 03	Alumínio – 60%	
Provete 04	Alumínio – 40%	

Tabela 5 Provetes de material analisados

#### 3.1.1. Ensaio à tração

Os ensaios de tração foram realizados nas máquinas do laboratório de engenharia mecânica da *Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Leira – Figura 22*.

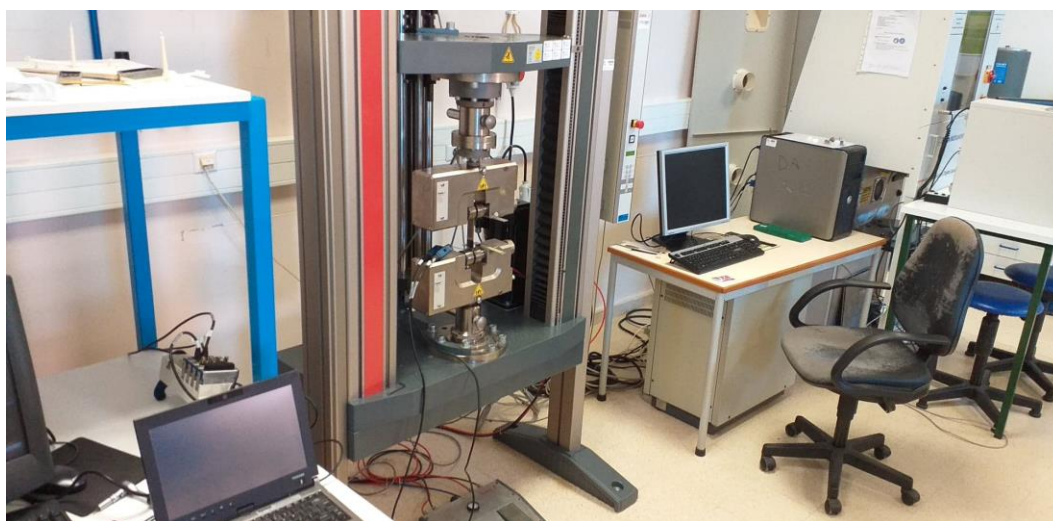
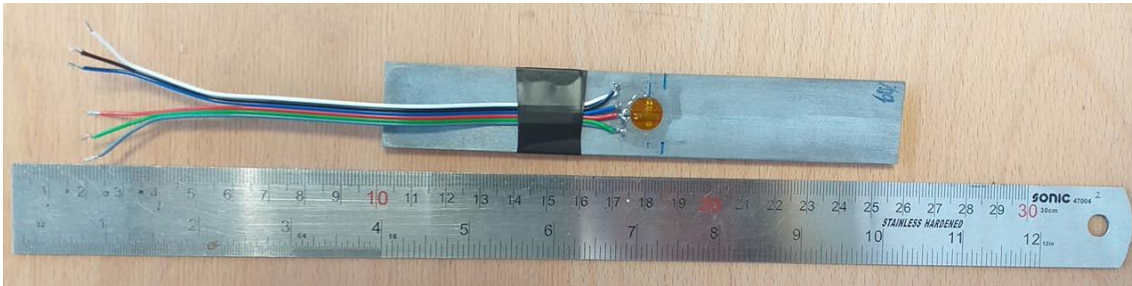
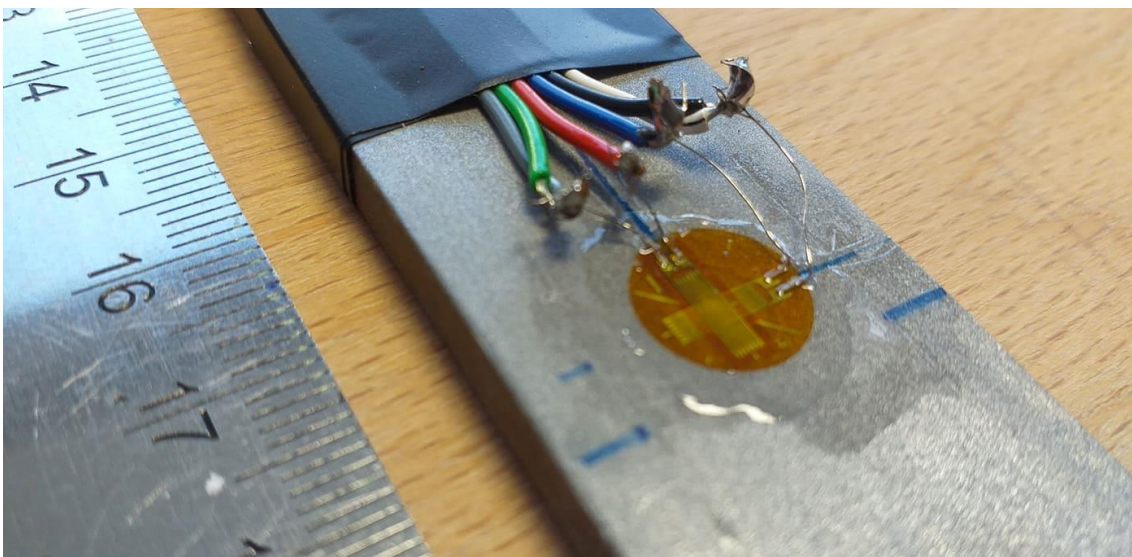


Figura 22 Máquina de ensaios de tração

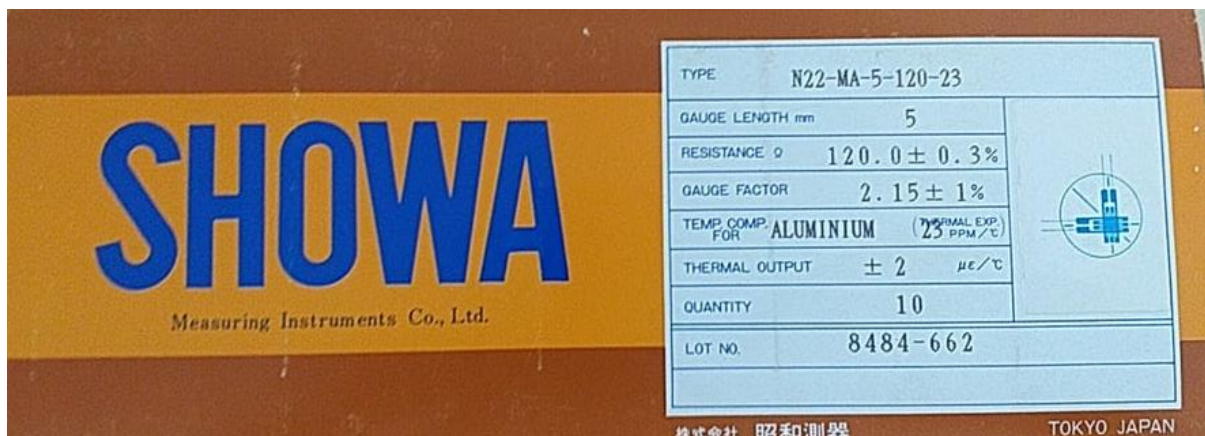
Os provetes foram maquinados e cortados de modo a obter as seguintes dimensões: *largura = 25 mm; comprimento = 150 mm e espessura = 4 mm*. De seguida foram limpos e polidos, e posteriormente colocado o extensómetro em meia ponte – *Figura 23 e 24*.



**Figura 23** Provette analisado com extensómetro



**Figura 24** Detalhe da colocação do extensómetro



**Figura 25** Extensómetro utilizado nos ensaios

Os provetes foram tracionados (*Figura 26*) até  $1500\text{ N}$  de força, de forma a não alcançar o regime plástico, valor obtido através de cálculos referentes à secção transversal dos provetes. A dimensão de prova é cerca de  $100\text{ mm}$ . A partir dos dados obtidos do ensaio – deformação do provete, força exercida no provete e extensão transversal e longitudinal do provete; e com auxílio das fórmulas abaixo descritas é possível obter os valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal.



**Figura 26** Ensaio à tração

Primeiramente é obtida a extensão longitudinal, com a recurso à *equação (8)*. Com a utilização da *equação (5)* obtém o valor da tensão exercida no provete. Através dos quais é possível projetar os gráficos tensão-extensão ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) no domínio plástico. Com base nos gráficos e recorrendo a uma regressão linear adquire-se o valor do módulo de elasticidade longitudinal – *equação (7)*. Com os dados da extensão longitudinal e

transversal adquiridos nos ensaios alcança-se o coeficiente de *poisson* – equação (9), a partir do qual é possível obter o valor do módulo de elasticidade transversal.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_{prova}} = \frac{|l-l_0|}{l_{prova}} \quad (8)$$

$$\sigma = E * \varepsilon \Leftrightarrow \frac{F}{A_0} = E * \varepsilon_L \quad (6)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (9)$$

$$\sigma = E * \varepsilon \equiv y = m * x \quad (7)$$

$$\nu = \frac{E}{2 * G} - 1 \Leftrightarrow \frac{E}{2 * (\nu + 1)} = G \quad (10)$$

$\sigma$  – tensão exercida (MPa);

$E$  – módulo de elasticidade longitudinal (GPa);

$\varepsilon_L$  – extensão longitudinal;

$\varepsilon_T$  – extensão transversal;

$F$  – força exercida (N);

$A_0$  – área inicial do provete (mm<sup>2</sup>);

$\Delta l$  – deformação do provete (mm);

$l$  – dimensão do provete (mm);

$l_0$  – dimensão inicial do provete (mm);

$l_{prova}$  – dimensão de prova (mm);

$\nu$  – coeficiente de *poisson*;

$G$  – módulo de elasticidade transversal (GPa).

### 3.1.2. Ensaio à condutividade térmica

De modo a obter a condutividade térmica dos provetes foram solicitados ensaios ao *Centro Tecnológico de Cerâmica e Vidro*. A condutibilidade térmica foi medida com base na *Lei de Fourier* usando um medidor de fluxo de calor. O equipamento utilizado no ensaio é *Holometrix C-Matic TCA200* – *Figura 27*.



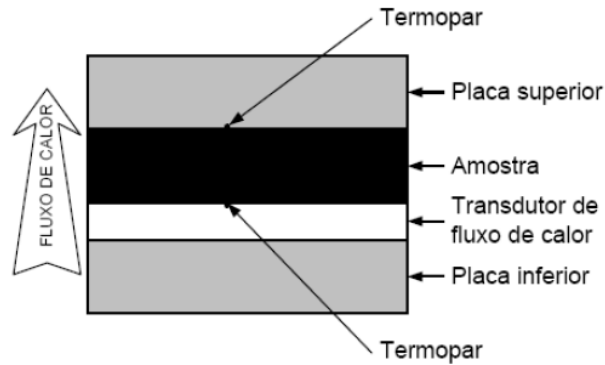
**Figura 27** Holometrix C-Matic TCA200 [48]

As amostras foram realizadas no laboratório de engenharia mecânica da *Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Leira*, com as seguintes dimensões: 50 mm de diâmetro e 7 mm de espessura.



**Figura 28** Amostras dos provetes para ensaio à condutividade térmica [48]

A amostra é colocada no equipamento entre termopares e sob um transdutor de fluxo de calor (HFT), esta montagem é posteriormente colocada entre duas placas a diferentes temperaturas para que produza um fluxo de calor – *Figura 29*. A montagem é isolada termicamente e mantida a uma temperatura intermédia minimizando a dissipação de energia na espessura da amostra. É aplicada e mantida uma pressão na montagem de modo a reproduzir a resistência térmica nas áreas de contato [48].



**Figura 29** Montagem da amostra [48]

Em estado estacionário as temperaturas das superfícies da amostra são obtidas pelos termopares e o calor medido pelo transdutor de fluxo de calor. Aplicando a *Lei de Fourier* é obtida a resistência térmica, devido a proporcionalidade com o calor medido. A proporcionalidade é conseguida pela calibração do sistema com amostras de condutibilidade conhecida, realizada nas mesmas condições, para que a resistência nos contactos da superfície da amostra sejam reproduzíveis [48].

## 4. Apresentação e discussão de resultados

Através dos ensaios de tração é possível determinar os módulos de elasticidade dos materiais em estudo caracterizando os materiais em relação à sua rigidez. A partir do declive dos gráficos *tensão-extensão* é possível obter o valor do módulo de elasticidade longitudinal.

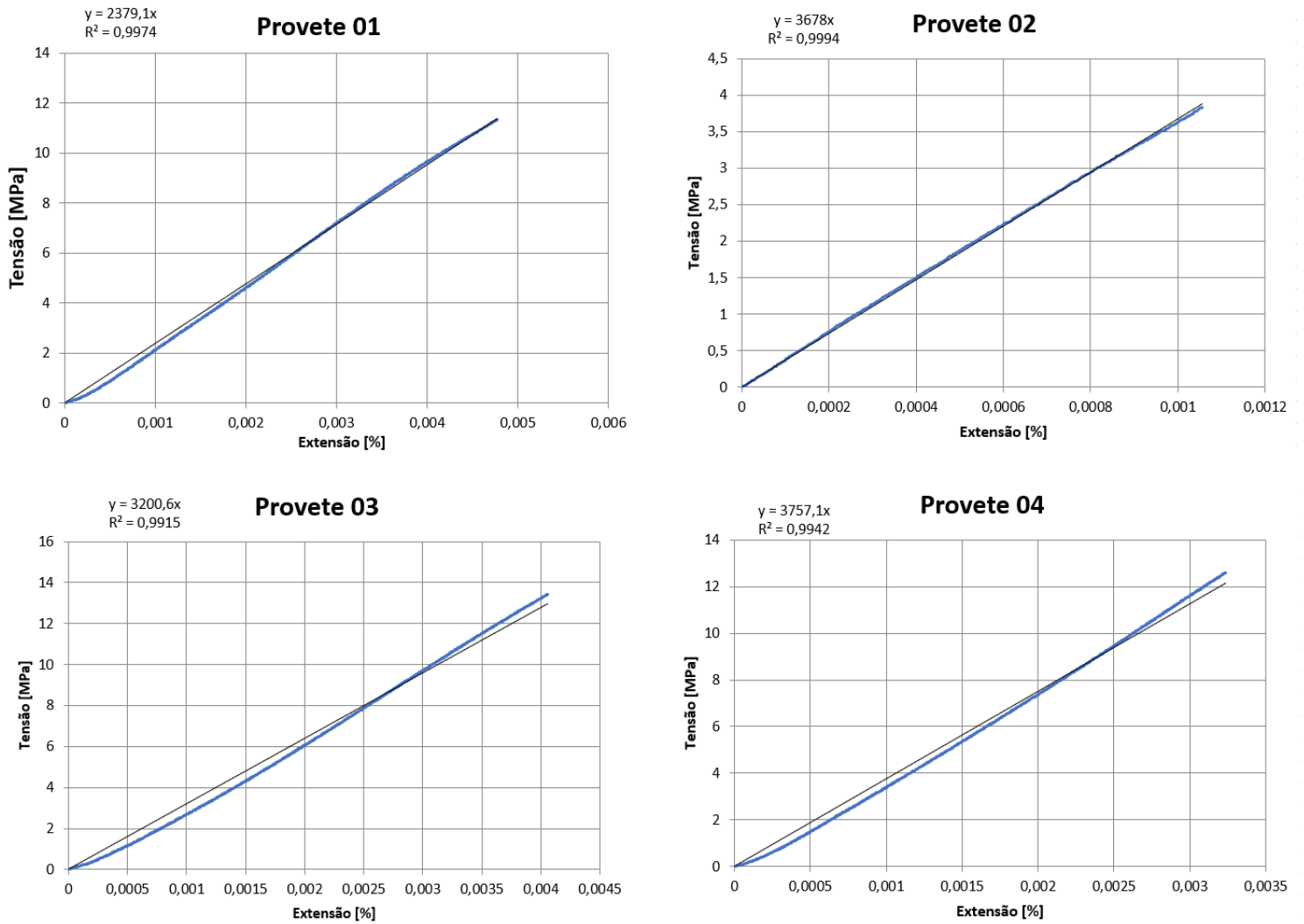


Figura 30 Gráficos tensão-extensão dos provetes

Deste modo é possível identificar os módulos de elasticidade de cada provete –  
Tabela 6.

	Módulo de elasticidade longitudinal, $E$ (GPa)	Módulo de elasticidade transversal, $G$ (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$
Provetete 01 – Latão 70% + Resina L74	2,379	0,894	0,334
Provetete 02 – Latão 43% + Resina L74	3,678	0,579	2,175
Provetete 03 – Alumínio 60% + Resina L74	3,200	1,372	0,342
Provetete 04 – Alumínio 40% + Resina L74	3,757	1,649	3,328

Tabela 6 Módulos de elasticidade e coeficiente de poisson de cada provete

A partir dos ensaios à tração foi possível adquirir os valores referentes ao módulo de elasticidade longitudinal dos materiais, sendo possível caracterizar os materiais quanto à sua rigidez. É possível observar que o valor do módulo de elasticidade diminui com o aumento de percentagem de partículas.

A partir dos valores obtidos é verificável que os valores do coeficiente de *poisson* que o Provetete 02 e o Provetete 04 apresentam valores que não são plausíveis. Os valores do coeficiente de *poisson* são obtidos através dos valores da extensão longitudinal e transversal, dados que são obtidos diretamente do ensaio à tração. A obtenção destes valores poderá ter sido corrompida por motivos relacionados com a máquina de ensaios. Deste modo não é possível verificar os valores do coeficiente de *poisson* e respetivos módulos de elasticidade transversal destes mesmos provetes.

A partir dos ensaios à condutibilidade térmica dos provetes é possível obter os seguintes resultados para as seguintes temperaturas:

Provete	Propriedades Térmicas		
	Temperatura, °C	Condutibilidade Térmica, W/m.K	Resistência Térmica, m <sup>2</sup> K/W
Provete 01 – Latão 70% + Resina L74	10	0,715	-
	24	0,816	0,00872
	24	0,819	0,00868
	25	0,824	0,00863
	26	0,830	0,00857
Provete 02 – Latão 40% + Resina L74	10	0,418	-
	24	0,477	0,0133
	25	0,479	0,0132
	25	0,483	0,0131
	26	0,487	0,0130
Provete 03 – Alumínio 60% + Resina L74	10	1,023	-
	25	1,134	0,00688
	25	1,136	0,00687
	25	1,137	0,00686
	26	1,144	0,00682
Provete 04 – Alumínio 43% + Resina L74	10	0,553	-
	24	0,595	0,0135
	25	0,599	0,0134
	26	0,600	0,0134
	27	0,603	0,0133

Tabela 7 Propriedades térmicas dos provetes [48]

Através da análise da *Tabela 7* é possível identificar que o material que melhor se adequa para utilização no fabrico do coletor solar e do mesmo modo apresenta melhores propriedades térmicas corresponde ao *Provete 03* – compósito de partículas de alumínio (60%) com resina polimérica L74. Deste modo será este o material a estudar. É ainda possível verificar que quanto maior percentagem de partículas o material contém melhor condutividade térmica apresenta, resultados que suportam a afirmação mencionada na referência [44], que indica que a percentagem de partículas que o compósito contém é proporcional ao valor da condutividade térmica. Na *Tabela 8* é indicado a os valores médios e respetivo desvio-padrão referentes ao *Provete 03* – compósito de partículas de alumínio (60%) com resina polimérica L74, valores obtidos através do ensaio de um provete.

	Condutibilidade Térmica, W/m.K	
	Valor Médio	Desvio-padrão
Provete 03 – Alumínio 60% + Resina L74	1,115	0,046

Tabela 8 Propriedade térmicas do provete 03



## 5. Casos de estudo

Através dos dados obtidos pelos ensaios experimentais e recorrendo a um software de CAD, é possível modelar o coletor solar para posterior simulação do funcionamento do mesmo. O coletor solar de placa plana a desenvolver apresenta as seguintes dimensões  $1246 \times 866 \times 120$  (comprimento x largura x profundidade). O painel solar térmico a conceber será integrado num sistema de aquecimento de água direto e de circulação passiva, isto é, a circulação da água é aquecida diretamente no coletor e ocorre através da variação de densidades induzidas pela variação de temperatura, a água quando aquecida expande e torna-se menos densa o que provoca o fluxo da água ao depósito (localizado numa posição superior ao coletor), quando a água arrefece retorna ao coletor.

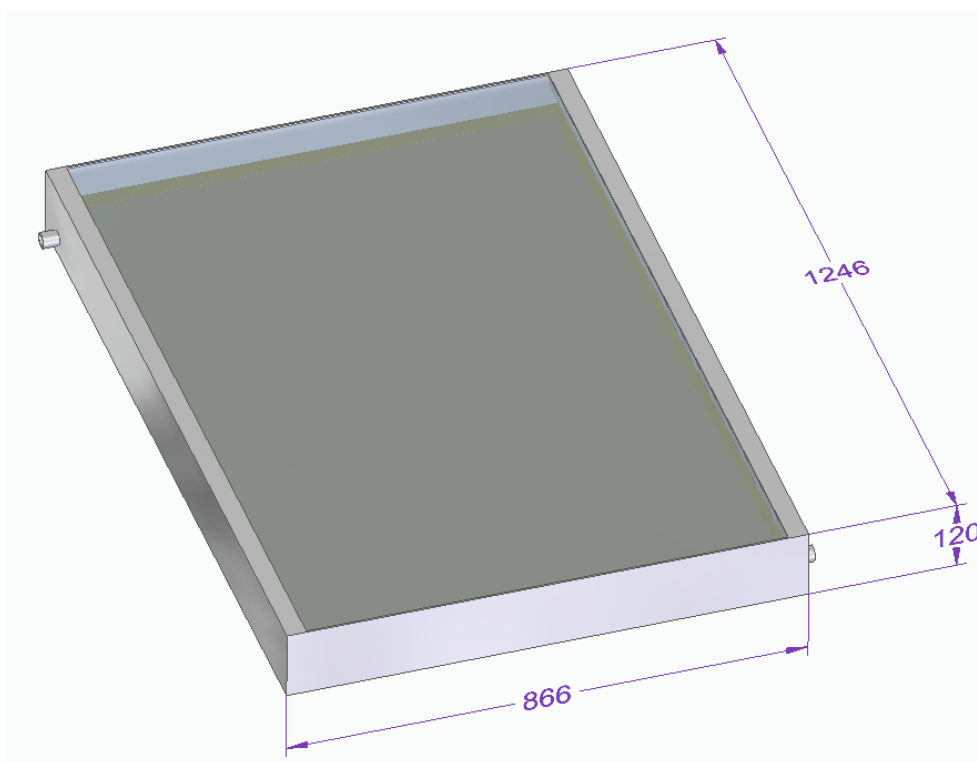
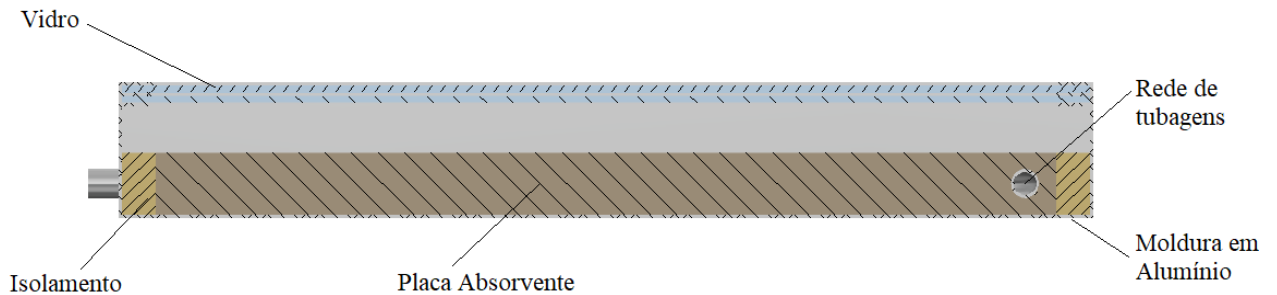


Figura 31 Painel Solar Térmico

O coletor solar é composto pelos seguintes elementos – *Figura 32*:

- placa absorvente em compósitos de partículas;
- rede em serpentina de tubagens de alumínio;
- moldura isolante de lã mineral;
- dois vidros;
- moldura em alumínio.



**Figura 32 Seção transversal do painel solar térmico**

A placa plana de absorção será produzida através de moldação manual. A rede tubagens em serpentina ficará suspensa no molde retangular e posteriormente será vertido o compósito de resina polimérica *L74* com partículas de alumínio (60%) em estado líquido. De seguida é feita a cura do material obtendo o conjunto da placa plana com a rede de tubagens integrada. É realizada a moldura envolvente de lã mineral para isolar termicamente a placa plana. O conjunto da placa plana, rede de tubagens e moldura de lã mineral é depois colocado na moldura exterior de alumínio, e posteriormente é colocado os vidros e selada a moldura.

De acordo com a norma *EN 12975* [49] para estudar a performance térmica do coletor solar, este deve ser submetido a um fluxo de energia de  $700 \text{ W/m}^2$  durante  $5 \text{ h}$ . O estudo deve ser feito em regime estacionário e com temperatura de entrada de água igual a  $80^\circ\text{C}$  [49].

A partir da modelação do coletor e dos dados do material é executada a simulação do teste à performance térmica, de acordo com a norma em cima referida, utilizando uma ferramenta de CAE – *ANSYS*<sup>®</sup>, de modo a obter a temperatura de saída da água. A malha foi gerada automaticamente apresentando no final 267558 nós e 121664 elementos. Foi considerada uma temperatura ambiente inicial de  $25^\circ\text{C}$  e uma temperatura de entrada de água de  $80^\circ\text{C}$ . Foi emitido um fluxo de energia de radiação de  $700 \text{ W/m}^2$  sob a placa absorvente, de modo a estudar a transmissão de energia por parte da superfície absorvente. A simulação foi executada durante um regime estacionário e durante  $5 \text{ h}$ . Na *Figura 33* é possível visualizar o resultado da simulação – a evolução do aumento de temperatura ao longo do estudo alcançando o valor máximo de  $144,24^\circ\text{C}$ .

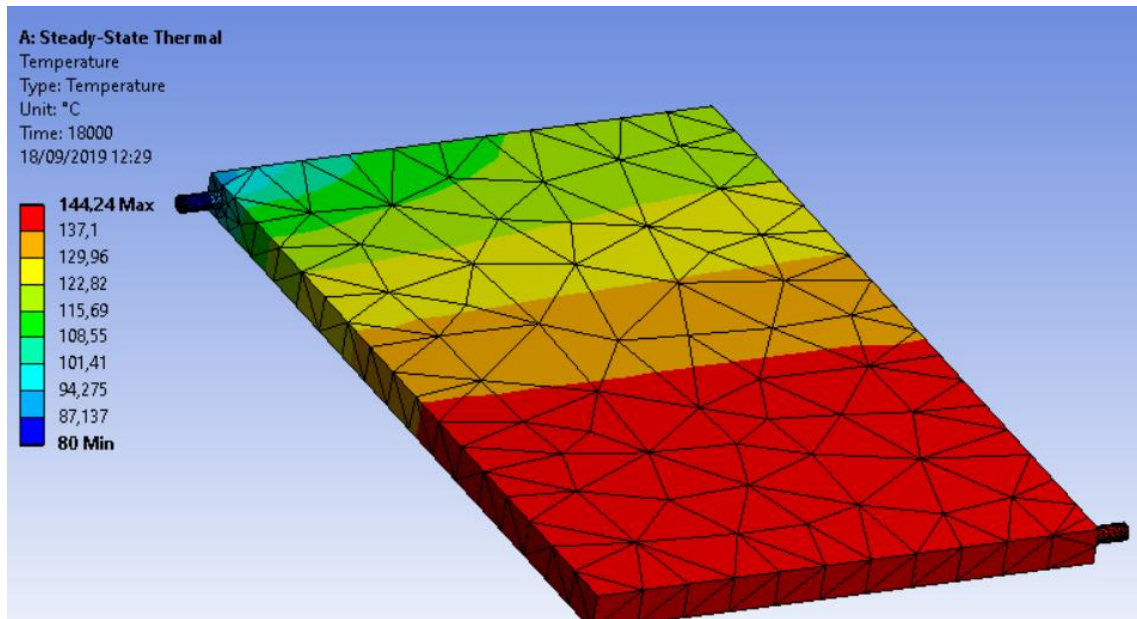


Figura 33 Resultado da simulação em regime estacionário - temperatura

Com o resultado da temperatura de saída de água obtido –  $144,24^{\circ}\text{C}$  e com o recurso às equações (1) e (4) é possível definir o rendimento do coletor solar. Assumindo um caudal mássico de  $40 \text{ l/dia}$  por ocupante e admitindo o coletor para uma habitação de 4 pessoas, obtém-se assim o valor de 75,5% de rendimento, valores idênticos aos valores praticados no mercado (Tabela 1) e verificáveis através da referência [4] – Figura 6.

$$\dot{m} = 40 \frac{\text{l}}{\text{dia}} * 4 = 1,85 * 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$c_{p_{\text{água}}} = 4200 \text{ J/kg.k}$$

$$T_0 = 144,24^{\circ}\text{C} = 417,39 \text{ K}$$

$$T_i = 80^{\circ}\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

$$q_u = \dot{m} * c_p * (T_0 - T_i) = 499,15 \text{ W}$$

$$A_c = 0,944 \text{ m}^2$$

$$G_t = 700 \text{ W/m}^2$$

$$\eta = \frac{q_u}{A_c * G_t} = 0,755 = 75,5\%$$



## 6. Conclusões e trabalhos futuros

O material selecionado para a conceção do coletor solar corresponde ao material com melhor condutibilidade térmica – compósito de partículas de alumínio (60%) e resina polimérica *L74*, com uma condutibilidade de valor médio  $1,115 \text{ W/m.K}$ . Com o material selecionado foi possível simular o funcionamento do sistema, obtendo um rendimento de 75,5%, sendo equiparado aos valores praticados no mercado. Desta forma é possível afirmar que a escolha do material compósito é uma opção válida para o fabrico de coletores solares, pois apresenta uma solução alternativa de menor custo e maior sustentabilidade ao fabrico do coletor sem comprometer o rendimento do mesmo.

No seguimento deste trabalho de modo a consolidar o conhecimento obtido poderá ser verificado o envelhecimento do material compósito devido à exposição aos elementos externos, nomeadamente à radiação UV, analisadas as tensões originadas por diferenças de dilatação térmica entre o compósito e as tubagens e por fim ser executado um protótipo físico e realizar teste experimentais a esse mesmo protótipo, de modo a compreender melhor o funcionamento do coletor solar fabricado a partir de compósitos de partículas.

## Referências Bibliográficas

- [1] M. R. Islam, K. Sumathy, and S. Ullah, "Solar water heating systems and their market trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 17, pp. 1–25, 2013.
- [2] A. De and E. Do, "Solar Térmico," pp. 1–5, 2010.
- [3] A. Jamar, Z. A. A. Majid, W. H. Azmi, M. Norhafana, and A. A. Razak, "A review of water heating system for solar energy applications ☆," vol. 76, pp. 178–187, 2016.
- [4] S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, vol. 30. 2004.
- [5] I. R. Pillai and R. Banerjee, "Methodology for estimation of potential for solar water heating in a target area," vol. 81, pp. 162–172, 2007.
- [6] Z. Wang, W. Yang, F. Qiu, X. Zhang, and X. Zhao, "Solar water heating : From theory , application , marketing and research," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 68–84, 2015.
- [7] "3.1 Overview of Flat Plate Collectors." [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/685%0D>. [Accessed: 26-Jun-2019].
- [8] S. . Kalogirou, *Solar Energy Engineering*. 2009.
- [9] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 53, no. 4. 2006.
- [10] "Vulcano - Energia Renováveis." [Online]. Available: [https://www.vulcano.pt/consumidor/servicos/aconselhamento/energias\\_renovaveis/aconselhamentoenergiasrenovaveis](https://www.vulcano.pt/consumidor/servicos/aconselhamento/energias_renovaveis/aconselhamentoenergiasrenovaveis). [Accessed: 09-Aug-2019].
- [11] K. K. Matrawy and I. Farkas, "STUDY FOR THREE TYPES OF SOLAR," vol. 38, no. 9, pp. 861–869, 1997.
- [12] S. A. Sakhaei and M. S. Valipour, "Performance enhancement analysis of The flat plate collectors: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 102, no. November 2018, pp. 186–204, 2019.
- [13] X. Y. Miao, T. Zheng, U. J. Görke, O. Kolditz, and T. Nagel, "Thermo-mechanical analysis of heat exchanger design for thermal energy storage systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 1082–1089, 2017.
- [14] Esfera Energia Solar, "Coletores Solares Premium," p. 12975, 2013.
- [15] Esfera Energia Solar, "Coletores Solares Warm," p. 12975, 2013.
- [16] Esfera Energia Solar, "Coletores Solares Compactos," p. 12975, 2013.
- [17] F.- Junkers, "Painéis solares Top : Excellence Painéis solares Top : S-Comfort Painéis solares Smart : Comfort," 2018.
- [18] B. J. Ever, "Introduction to COMPOSITE MATERIALS DESIGN," p. 509, 2011.
- [19] "History of Composite Materials." [Online]. Available: <https://www.mar->

- bal.com/language/en/applications/history-of-composites/.
- [20] M. F.S.F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. de Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2<sup>o</sup> Edição. Biblioteca Nacional de Portugal - Catalogação de Comunicação, Lda., 2005.
- [21] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering - An introduction*, 7th Editio. 2012.
- [22] “Module 1: Introduction to Composites.” [Online]. Available: [https://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture1/1\\_2.htm](https://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture1/1_2.htm).
- [23] Carl Zweben, “Composite Materials,” in *Mechanical Engineer’s Handbook*, M. Kutz, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [24] B. Harris, “Engineering Composites.pdf,” 1999.
- [25] J. Fleischer, R. Teti, G. Lanza, P. Mativenga, H. C. Möhring, and A. Caggiano, “Composite materials parts manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 2, pp. 603–626, 2018.
- [26] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*. CRC press, 2002.
- [27] N. Johri, R. Mishra, and H. Thakur, “Design parameter optimization of Jute-chicken fiber reinforced polymeric hybrid composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19862–19873, 2018.
- [28] “Métodos de processamento de compósitos na industria aeronáutica e aeroespacial - Processamento do Kevlar.” [Online]. Available: <http://compositoskevlar.blogspot.com/2006/12/mtodos-de-processamento-de-compositos-na.html>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [29] L. Shrink and L. Profile, “Smc - Sheet Molding Compound Composites,” pp. 19–20, 2015.
- [30] Y. Song *et al.*, “CAE method for compression molding of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite using bulk materials,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 114, no. August, pp. 388–397, 2018.
- [31] M. S. Kim, W. Il Lee, W. S. Han, and A. Vautrin, “Optimisation of location and dimension of SMC precharge in compression moulding process,” *Comput. Struct.*, vol. 89, no. 15–16, pp. 1523–1534, 2011.
- [32] E. Guzman-Maldonado, N. Hamila, N. Naouar, G. Moulin, and P. Boisse, “Simulation of thermoplastic prepreg thermoforming based on a visco-hyperelastic model and a thermal homogenization,” *Mater. Des.*, vol. 93, pp. 431–442, 2016.
- [33] P. Neuzil, *Polymer composites in the aerospace industry*, vol. 34, no. 11. 2006.
- [34] B. Yenilmez and E. M. Sozer, “Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 4, pp. 499–510, 2009.
- [35] M. K. Kang, W. I. Lee, and H. T. Hahn, “Analysis of vacuum bag resin transfer molding process,” *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 11, pp. 1553–1560, 2001.
- [36] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural

- fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012.
- [37] G. Bardl *et al.*, "Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data," *Compos. Part B Eng.*, vol. 96, pp. 312–324, 2016.
- [38] F. Ballier, J. Schwennen, J. Berkmann, and J. Fleischer, "The hybrid RTM process chain: Automated insertion of load introducing elements during subpreform assembly," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 794, pp. 312–319, 2015.
- [39] K. van Rijswijk and H. E. N. Bersee, "Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 3, pp. 666–681, Mar. 2007.
- [40] K. . Raper, J. . Roux, T. . McCarty, and J. . Vaughan, "Investigation of the pressure behavior in a pultrusion die for graphite/epoxy composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 9, pp. 1123–1132, Sep. 1999.
- [41] Y. Yu, R. Liu, Y. Huang, F. Meng, and W. Yu, "Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 1032–1039, 2017.
- [42] J. Frketic, T. Dickens, and S. Ramakrishnan, "Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 14, pp. 69–86, 2017.
- [43] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018.
- [44] N. Mehra *et al.*, "Thermal transport in polymeric materials and across composite interfaces," *Appl. Mater. Today*, vol. 12, pp. 92–130, 2018.
- [45] A. R. J. Hussain, A. A. Alahyari, S. A. Eastman, C. Thibaud-Erkey, S. Johnston, and M. J. Sobkowicz, "Review of polymers for heat exchanger applications: Factors concerning thermal conductivity," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 113, pp. 1118–1127, 2017.
- [46] H. Chen *et al.*, "Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 59, pp. 41–85, 2016.
- [47] L. Lourenço, "Caracterização física e mecânica de compósitos híbridos de matriz polimérica," 2017.
- [48] J. Valente de Almeida and F. Ferreira, "Medição de condutibilidade térmica de materiais mecânicos," pp. 1–9, 2019.
- [49] P. Kovacs, "a Guide To the Standard," *Tech. Res. Inst. Sweden*, pp. 1–80, 2012.