



# **Caracterização das Propriedades Mecânicas de PLA Reforçado com Manta de Fibras de Linho**

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Joana Manuela da Silva

Leiria, março de 2024



# **Caracterização das Propriedades Mecânicas de PLA Reforçado com Manta de Fibras de Linho**

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Joana Manuela da Silva

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben e  
coorientação do Professor Doutor Mário António Simões Correia

Leiria, março de 2024

# **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 mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia para a Fabricação Digital Direta, no ano letivo 2023/2024, 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.

# Dedicatória

Dedico a presente dissertação, ao meu avô materno, Joaquim Soares da Silva, que, apesar de já não estar entre nós, sempre me motivou a seguir os meus sonhos, demonstrando carinho e orgulho pelas minhas conquistas.

Ao meu avô, atribuo a minha constante ambição por adquirir conhecimento e aprimorar-me, mantendo sempre o respeito pelos outros.

# Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Ruben e coorientador Professor Doutor Mário António Simões Correia, pela partilha de conhecimentos e pela disponibilidade colocada na realização desta dissertação.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão pela disponibilidade de utilização dos espaços laboratoriais/equipamentos.

À empresa Grandesign, pela disponibilização de equipamentos e materiais necessários à concretização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho pela ajuda e compreensão durante a realização desta dissertação.

A todos os meus amigos e família.

E um infinito agradecimento aos meus pais e irmã, pelo apoio, compreensão e constante motivação neste trabalho, assim como em todos os meus objetivos pessoais.

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Resumo

Neste estudo, foram produzidos provetes em resina bio por vazamento sob vácuo em molde de silicone, com o objetivo de entender o modo de processamento e o comportamento dessa resina. Além disso, foram fabricados provetes de PLA- Poli(ácido lático por FDM (*Fused Deposition Modelling*) em diferentes orientações de construção. Uma parte desses provetes de PLA foi posteriormente reforçada por laminação manual com manta de fibra de linho e resina bio, criando um compósito do tipo sanduíche.

As propriedades mecânicas dos provetes foram avaliadas por meio de ensaios de tração e flexão a 3 pontos. Os resultados destacaram a importância da orientação de construção no processo de fabricação de peças por FDM. No entanto, observou-se uma redução desse impacto com a aplicação de fibras.

Quanto à utilização da resina bio para vazamento em moldes de silicone sob vácuo, o modo de processamento foi validado. No entanto, os resultados das propriedades mecânicas obtidas foram diferentes dos mencionados na ficha técnica do material.

A fácil adesão da manta de fibra de linho com resina bio ao PLA, bem como o comportamento do compósito resultante, validou a viabilidade desse tipo de reforço em peças construídas por FDM. Essa combinação pode abrir caminho para produtos mais robustos e sustentáveis

**Palavras-chave:** Fabrico Aditivo, FDM, Material Compósito, PLA, Resina Bio, Fibras Naturais.

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Abstract

In this study, bio-based resin specimens were produced using vacuum casting in silicone molds, with the aim of understanding the processing mode and behavior of this resin. Additionally, PLA (Polylactic Acid) specimens were fabricated using Fused Deposition Modeling (FDM) in different build orientations. A portion of these PLA specimens was subsequently reinforced through manual lamination with flax fiber and bio-based resin, creating a sandwich-type composite.

The mechanical properties of the specimens were evaluated through tensile and three-point flexural tests. The results highlighted the importance of build orientation in the FDM manufacturing process. However, the impact was reduced with the application of fibers.

Regarding the use of bio-based resin for vacuum casting in silicone molds, the processing method was validated. However, the mechanical property results obtained differed from those stated in the material datasheet.

The easy adhesion of flax fiber mat with bio-based resin to PLA, along with the behavior of the resulting composite, validated the feasibility of this reinforcement type in FDM-built parts. This combination may pave the way for more robust and sustainable products.

**Keywords:** Additive Manufacturing, FDM, Composite Material, PLA, Bio-Based Resin, Natural Fibers

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatória .....</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>v</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de siglas .....</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Organização do trabalho. ....</b>	<b>3</b>
<b>2. Revisão da Literatura.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Fabricação Aditiva .....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Modelação por Deposição de Fundido (FDM).....	7
2.1.1.1. Tipos de máquinas de FDM.....	9
2.1.1.2. Tipos de Extrusores .....	11
2.1.1.3. Parâmetros de impressão .....	12
2.1.1.4. PLA- Poli(ácido láctico).....	14
<b>2.2. Ferramentas de Curta Tiragem – <i>Rapid Soft Tooling</i>.....</b>	<b>15</b>
2.2.1. Vazamento sob vácuo em moldes de silicone .....	16
2.2.1.1. Tipos de silicone.....	16
2.2.1.2. Tipos de Resinas.....	17
2.2.1.1. Etapas do processo .....	18
<b>2.3. Materiais Compósitos.....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Estruturas compósitas do tipo Sandwich.....	21
2.3.2. Tipos de fibras .....	21
2.3.2.1. Fibras de Linho.....	23
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>24</b>
3.1.1. PLA 4032D.....	24
3.1.2. Resina Bio - GreenPoxy® 56 + Surf Clear .....	25
3.1.3. Fibra de linho.....	26
3.1.4. Silicone – VTV 800.....	26

<b>3.2. Métodos .....</b>	<b>27</b>
3.2.1. Obtenção dos provetes .....	28
3.2.1.1. Provetes Vazados em Molde de Silicone sob Vácuo .....	28
3.2.1.2. Construção de provetes por FDM .....	31
3.2.2. Construção das estruturas Sandwich - Aplicação das fibras .....	33
3.2.3. Testes de Caracterização Mecânica.....	35
3.2.3.1. Testes de Tração.....	35
3.2.3.2. Testes de Flexão .....	38
<b>4. Resultados .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1. Produção de provetes em Resina Bio.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2. Produção de provetes por FDM.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3. Produção da estrutura compósita do tipo Sandwich .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. Ensaio de tração .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5. Ensaio de Flexão .....</b>	<b>46</b>
<b>5. Discussão de Resultados.....</b>	<b>49</b>
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>54</b>
<b>6.1. Trabalhos Futuros: .....</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>56</b>

# Lista de Figuras

Figura 1- Alguns condicionamentos externos que podem estar presentes no design de um produto [6].....	5
Figura 2 - (A) Métodos de Fabricação subtrativa; (B) Fabricação Aditiva [8].....	5
Figura 3 – Primeira máquina RepRap, desenvolvida por Adrian Bowyer [17].....	8
Figura 4 - Representação Esquemática de uma máquina cartesiana de FDM com <i>direct driver</i> . 1- Mesa de construção; 2- Filamento; 3 – Extrusor; 4-Bloco de aquecimento; 5- Modelo físico 3D [20]. ....	8
Figura 5- Etapas do processo de fabrico aditivo por FDM [8]. ....	9
Figura 6 - Representação esquemática de uma máquina de FDM cartesiana [22]. ....	10
Figura 7 - Representação esquemática de uma máquina de FDM do tipo Delta [22].....	10
Figura 8 - Representação esquemática de uma máquina de FDM polar [22]. ....	11
Figura 9 - Tipos de Extrusores [22].....	11
Figura 10 - Efeitos da altura das camadas na resolução e tempo de impressão. Adaptado de [23].....	12
Figura 11 - Efeitos do fator de extrusão. À esta representado um exemplo de um fator de extrusão demasiado baixo e à direita um fator demasiado elevado. Adaptado de [24].....	13
Figura 12 - Diferentes tipos de preenchimento [25].....	13
Figura 13 - Diferentes tipos de percentagem de preenchimento [25].....	13
Figura 14 - Representação de secções de uma peça obtida por FDM com 100% de preenchimento e alteração do ângulo de impressão entrecamadas de 90° em relação à camada anterior [26].....	14
Figura 15 - Tipos de estruturas geradas pelo software CAM de aderência à mesa. Adaptado de [28].....	14
Figura 16 - Estrutura molecular do PLA [30].....	14
Figura 17 - Exemplos de moldes de silicone para vazamento sob vácuo [35]. ....	16
Figura 18 - Classificação de materiais compósitos consoante o tipo de Matriz e o tipo de reforço [41].....	20
Figura 19 - Compósitos reforçados com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras descontínuas unidireccionais; (c) fibras descontínuas aleatórias; (d) fibras contínuas unidireccionais; (e) fibras contínuas e (f) fibras contínuas multidireccionais [42]. ....	20
Figura 20 - Representação esquemática de uma estrutura sandwich [41]. ....	21
Figura 21 - Exemplos de aplicações das fibras de folha de ananás [45].....	23
Figura 22 - Resina Bio - <i>GreenPoxy 56 + endurecedor SD Surf Clear</i> . ....	25
Figura 23 - Tempo vs Temperatura da reação exotérmica de 500g de mistura a 20°C e a 30°C [48].....	25
Figura 24 - Disposição da fibra de linho, malha tafetá [49]. ....	26
Figura 25 - Fluxograma do trabalho experimental. ....	27

Figura 26 - Provete utilizado como master na construção do molde de silicone. À esquerda, estão os provetes antes dos acabamentos e à direita os provetes já estão prontos a serem utilizados.....	28
Figura 27 - Construção do molde de silicone. 1º-Criação da linha de junta; 2º-Fixação os masters na caixa e criação dos canais de alimentação; 3º- Enchimento do molde; 4º- Desgaseificação do silicone; 5º- Cura do silicone; 6º-Molde retirado da caixa; 7º- Abertura do molde; 8º- Molde aberto. ....	29
Figura 28 - Misturadora de Silicone.....	29
Figura 29 - Vazamento de peças. 1º Abertura de fugas no molde; 2º- preparação do vazamento; 3º Vazamento. ....	30
Figura 30 - Máquina de vazamentos sob vácuo- 001LC- MCP, HEK- GMBH.....	30
Figura 31 - Provete vazado sem acabamentos. ....	31
Figura 32 - Máquina de FDM - CR10 Max da marca <i>Creativity</i> [54]. ....	33
Figura 33 - Diferentes orientações de construção dos provetes obtidos por FDM.....	33
Figura 34 - Reforço dos provetes de PLA. A) Fibra de linho; B) Tecido de poliamida - <i>Peel ply</i> ; C) Material absorvente - <i>Breather</i> ; D) Filme perfurado; E) Saco de vácuo; F) Panela de vácuo.....	34
Figura 35 - Provete de PLA com reforço de fibras de linho ainda em excesso. ....	34
Figura 36 - Máquina universal de ensaios mecânicos Zwick Z100. ....	35
Figura 37- Representação de um ensaio de tração [56].....	35
Figura 38 - Ensaio de tração.....	36
Figura 39 - Diferentes tipos de curvas típicas obtidas em ensaios de tração de polímeros: a) frágeis; b) dúcteis; c) elastômeros [56]. ....	37
Figura 40 - Obtenção do módulo de elasticidade segundo a norma ISO 527-1:2012 [58].....	38
Figura 41 - Esquema de um ensaio de tração em 3 pontos [59].....	38
Figura 42- Representação dos tipos de esforços originados pela flexão [62].....	39
Figura 43 - Provete de PLA construído na vertical.....	41
Figura 44 - Provete de flexão de PLA reforçado com fibras de linho.....	42
Figura 45 - Gráfico Tensão vs Deformação - ensaios de tração de provetes de resina. ....	43
Figura 46 - Gráfico Tensão vs Deformação - Ensaios de Tração - provetes de PLA construídos na vertical e horizontal (PLA V e PLA H, respectivamente) e provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal reforçados com fibras de linho (Fibra V e Fibra H, respectivamente). ....	43
Figura 47 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de tração. ....	45
Figura 48 - Gráfico Tensão vs Deformação - Ensaios de Flexão - provetes de PLA construídos na vertical e horizontal (PLA V e PLA H, respectivamente) e provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal reforçados com fibras de linho (Fibra V e Fibra H, respectivamente). ....	46
Figura 49 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de flexão. À esquerda está um provete reforçado construído na vertical e à direita um provete reforçado construído na horizontal.....	48

Figura 50 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de flexão .....	48
Figura 51 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, sem reforço .....	50
Figura 52 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na horizontal com e sem reforço. ....	50
Figura 53 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical com e sem reforço .....	51
Figura 54 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, com reforço .....	51
Figura 55 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, sem reforço .....	52
Figura 56 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA construídos na horizontal, com e sem reforço. ....	52
Figura 57 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical, com e sem reforço .....	53

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Potencial de substituição de polímeros convencionais por biodegradáveis. (-Não substituível; + Substituição parcial; ++ Substituição completa). Adaptado de [2].....	1
Tabela 2 - Materiais processáveis por cada categoria de Fabrico Aditivo segundo a norma ISO 17296-2:2015 [12]. .....	7
Tabela 3 -Propriedades de alguns exemplos de fibras naturais e sintéticas [39]. .....	22
Tabela 4 - Propriedades de impressão do Filamento de PLA da Tucab, segundo a mesma [47]. .....	24
Tabela 5 - Propriedades do Filamento de PLA 4032D da Tucab. A sigla MD, refere-se à direção de processamento do material e a sigla TD à direção perpendicular à direção de extrusão do material [47].....	24
Tabela 6 - Características Mecânicas da resina <i>GreenPoxy 56</i> + endurecedor <i>SD Surf Clear</i> com polimerização de 7h a 23°C [48]. .....	26
Tabela 7 - Propriedades de processamento do silicone VTV 800 – Renishaw [50]. .....	27
Tabela 8 - Dimensões dos provetes do tipo 1A conforme a norma ISO 527-2 [51], [52]. .....	28
Tabela 9 – Dimensões dos provetes conforme a norma ISO 527-2 – Tipo 1B [51], [52]. .....	31
Tabela 10 - Dimensões dos provetes conforme a norma ASTM D790-10 [53]. .....	31
Tabela 11 - Parâmetros de impressão utilizados na construção dos provetes.....	32
Tabela 12 - Dimensões da secção dos provetes de tração ( <i>masters</i> e peças vazadas). .....	40
Tabela 13 - Dimensões da secção dos provetes construídos por FDM.....	41
Tabela 14 - Dimensões da secção dos provetes de PLA reforçados.....	42
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de tração da resina bio - GreenPoxy® 56 + Surf Clear.....	44
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na vertical. ....	44
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na horizontal. ....	44
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na vertical reforçados com fibra de linho e resina bio. ....	45
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na horizontal reforçados com fibra de linho e resina bio. ....	45
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na vertical. ....	47
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na horizontal.....	47
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na vertical reforçados com fibra de linho e resina bio .....	47
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na horizontal reforçados com fibra de linho e resina bio .....	47

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Lista de siglas

3DFP	3D Food Printing
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
DDM	Direct Digital Manufacturing
FA	Fabrico Aditivo
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
FGF	Fused Granulate Fabrication
HDPE	High-density polyethylene
ISSO	International Organization for Standardization
LDPE	Low-density polyethylene
MEX	Material Extrusion
PA	Poliamida
PBT	Polibutileno tereftalato
PC	Policarbonato
PET	Polietileno tereftalato
PHB	Polihidroxibutirato
PLA	Poli(ácido láctico)
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoroetileno
PVC	Policloroeteno

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# 1. Introdução

Com o aumento da preocupação e consciencialização da população para um consumo, produção e gestão de resíduos, os bioplásticos biodegradáveis devem ser considerados não só como opção para embalagens descartáveis, mas também no desenvolvimento de produto [1].

Os biopolímeros têm propriedades capazes de substituir na totalidade ou de forma parcial os materiais poliméricos convencionais não biodegradáveis, que são promotores de problemas ambientais tanto de esgotamento de matéria-prima como de poluição.

**Tabela 1 - Potencial de substituição de polímeros convencionais por biodegradáveis. (-Não substituível; + Substituição parcial; ++ Substituição completa). Adaptado de [2]**

Materiais	PVC	HDPE	LDPE	PP	PS	PMMA	PA	PET	PC
<b>PA (Bio)</b>	-	+	+	+	+	-	-	-	-
<b>PLA</b>	-	+	-	+	+	-	+	+	-
<b>PET (Bio)</b>	-	-	-	+	-	-	++	++	+
<b>PBT</b>		-	-	++	-	-	+	++	+
<b>PHB</b>	-	+	-	++	+	-	-	-	-
<b>PHB/HHX</b>	+	++	++	++	+	-	-	+	-

No entanto, a maioria deles ainda não estão totalmente otimizados para serem utilizados em grande escala em processos de fabrico como a injeção ou extrusão, pois os biopolímeros apresentam alguns limites em propriedades como a processabilidade, resistência térmica, propriedades mecânicas, propriedades reológicas, permeabilidades a gases e taxa de degradação o que leva a procurar cargas ou fibras para os reforçar, alterando-os, no sentido de viabilizar e aumentar o leque de aplicabilidade dos mesmos.

As fibras naturais têm-se revelado uma boa aposta para o melhoramento das propriedades dos biopolímeros, bem como uma forma de reutilizar os desperdícios de algumas indústrias, aumentando o ciclo de vida dos materiais.

As aplicações dos biopolímeros têm sido na sua maioria em embalagens e em produtos flexíveis descartáveis devido às suas propriedades ou então em aplicações biomédicas devido ao elevado custo de produção.

Faz sentido continuar a explorar diferentes combinações de biopolímeros com cargas ou fibras naturais, pois essas combinações podem ser integradas em tecnologias de fabrico aditivo que se têm revelado com grande potencial para indústria e também se têm mostrado mais ecológicas por não haver tanto consumo e/ou desperdício de matéria-prima por construção.

A Grandesign, empresa do grupo Vangest que há mais de 25 anos presta serviços de design e desenvolvimento de produto, dando um forte apoio aos clientes no fabrico e produção de pequenas séries sentiu a necessidade de inovação e quis avaliar a possibilidade de integrar resinas bio nos seus serviços de vazamento sob vácuo em moldes de silicone, assim como, estudar a possibilidade de reforço de produtos fabricados em PLA (Poli(ácido láctico)) por fabrico aditivo (FA) com fibras naturais e resina bio através da técnica de laminação manual, diminuindo a assim a sua pegada ecológica.

Na Grandesign, já se desenvolveram projetos de prototipagem rápida com a técnica de FDM (*Fused Deposition Modelling*) em PLA que posteriormente foram reforçados por laminação manual com fibra de vidro e resina epóxi devido às limitações mecânicas do PLA. No entanto, não se conhece a possibilidade de utilizar a técnica de laminação manual com fibras e resinas de origem natural para o reforço de produtos finais funcionais contruídos por FDM em PLA.

Como técnica de produto da Grandesign e aluna do mestrado em Engenharia para a Fabricação Digital Direta, aceitei o desafio proposto e desenvolvi a presente dissertação.

Neste estudo foram produzidos provetes em resina bio por vazamento sob vácuo em molde de silicone de forma a conhecer o funcionamento e comportamento da resina e provetes de PLA construídos por FDM em diferentes orientações de construção. Parte dos provetes de PLA foram posteriormente reforçados por laminação manual com fibra de linho e resina bio criando um compósito do tipo sandwich.

Através de ensaio de tração e de flexão em 3 pontos avaliou-se o impacto do reforço e da orientação de construção dos provetes.

## **1.1. Organização do trabalho.**

Após este capítulo de introdução, segue-se o Capítulo 2 que diz respeito ao estado da arte/fundamentação teórica sobre fabrico aditivo desde a sua generalidade até a uma mais pormenorizada descrição do processo de fabrico de FDM e da sua utilização no processamento de materiais termoplásticos. Ainda neste capítulo é abordado o tema das ferramentas de curta tiragem, e o tema dos materiais compósitos.

No Capítulo 3, são apresentadas todas as técnicas de fabrico necessárias à obtenção dos provetes assim como os métodos utilizados para a caracterização das propriedades mecânicas estudadas nesta dissertação.

No Capítulo 4, são encontrados os resultados obtidos através das técnicas de processamento e de caracterização mecânica dos provetes construídos.

No Capítulo 5, são comparados os valores das propriedades mecânicas obtidas em cada técnica de caracterização mecânica.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões retiradas sobre o trabalho realizado e sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

## 2. Revisão da Literatura

O termo Fabricação Digital Direta (em inglês: *Direct Digital Manufacturing* ou DDM) é a designação dada às várias tecnologias que permitem o fabrico de produtos finais diretamente a partir da informação de um ficheiro Digital (CAD), através de processos de fabrico aditivo [3].

O desenvolvimento do Fabrico Digital Direto está associado aos avanços nas áreas das tecnologias informáticas e computacionais que possibilitaram a criação de *softwares* industriais como o desenho assistido por computador (CAD), a engenharia assistida por computador (CAE) e o fabrico assistido por computador (CAM) [4]. Estes softwares vieram facilitar o desenvolvimento de produtos industriais.

Na conceção de um produto há vários fatores influenciam o seu valor (figura 1) para além do design, nomeadamente, o fator qualidade, o fator custo, o fator serviço e o fator ambiente.

-Fator Qualidade: tem em conta uma definição clara das especificações do produto e a escolha das melhores soluções para as resolver, ou seja, se o produto está bem projetado de forma a satisfazer as necessidades do cliente e se é fiável.

- Fator Custo: é a condição determinante da viabilidade de um projeto. Qualquer custo existente que pode ser reduzido. Este fator avalia os gastos, os lucros e o tempo de desenvolvimento de um projeto.

-Fator Serviço: ter sempre presente a satisfação do cliente.

-Fator Ambiente: as implicações do produto no ambiente e na sociedade, nomeadamente a sua vida após utilização.

A fabricação digital direta tem sido uma das principais apostas da indústria, com o objetivo de tornar a mesma mais sustentável, produtiva e lucrativa [5].

“Só uma boa ligação entre o design, o marketing e a engenharia poderá criar sinergias e produtos com sucesso.” [6].

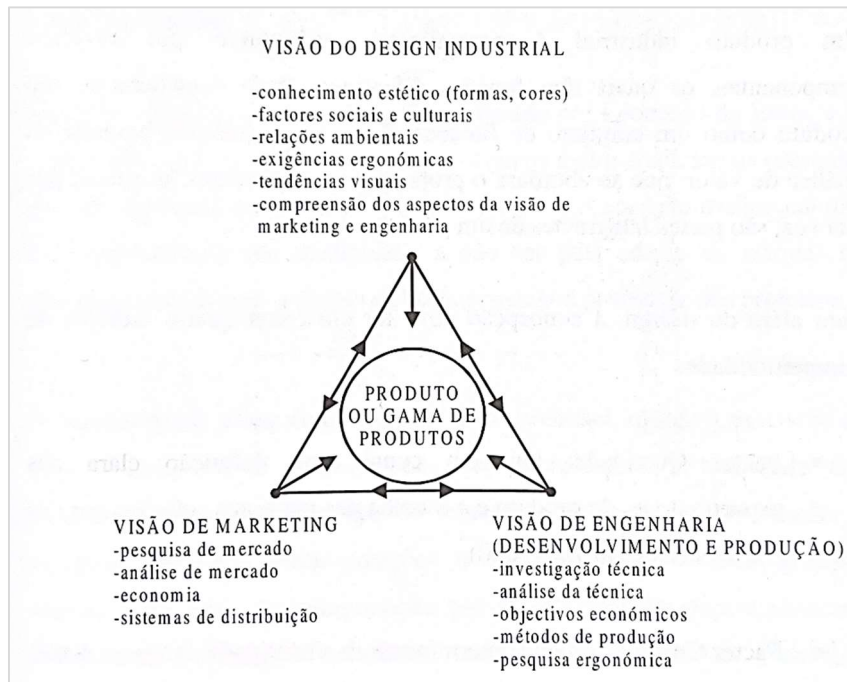


Figura 1- Alguns condicionamentos externos que podem estar presentes no design de um produto [6].

## 2.1.Fabricação Aditiva

A fabricação aditiva, é um processo de fabrico oposto aos processos de fabrico convencionais subtrativos. Enquanto os processos subtrativos trabalham a partir de um bloco de material sobre o qual vão retirando material até que este tenha a forma pretendida, os processos de fabricação aditiva vão adicionando material de forma sucessiva, camada sobre camada, de modo a produzir objetos segundo a informação de um modelo digital 3D (figura 2) [7], [8].

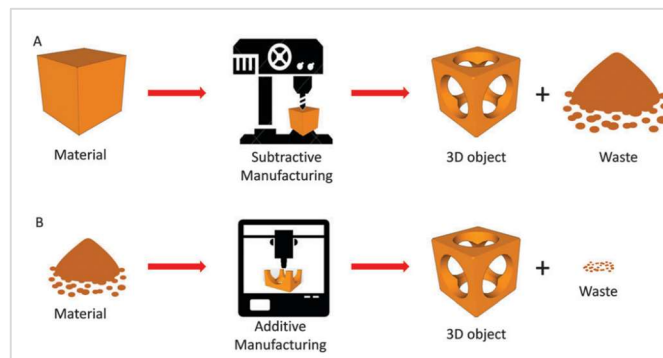


Figura 2 - (A) Métodos de Fabricação subtrativa; (B) Fabricação Aditiva [8].

Desta forma, a fabricação aditiva também se distingue dos processos convencionais de conformação, como compressão, moldagem por fusão ou moldagem por injeção [9].

Ou seja, na fabricação aditiva há uma redução do desperdício de matéria-prima e são desnecessários moldes ou ferramentas, tornando o processo de fabrico com menos etapas e, por isso, mais rápido e mais barato para pequenas produções [10].

Outra vantagem, que tem impulsionado o desenvolvimento das tecnologias de fabricação aditiva é a possibilidade de criar peças com geometrias mais complexas que eram impossíveis ou muito difíceis de fabricar pelos processos de fabrico convencionais.

Uma maior liberdade de design traz com ela a possibilidade de otimizar o design tanto para uma melhor funcionalidade como para redução do peso das peças finais [3].

O potencial da fabricação aditiva é bastante claro e, por isso, têm sido feitos esforços para que a panóplia de materiais processáveis por estas tecnologias seja cada vês maior, de modo a aumentar as aplicações da mesma.

Atualmente, os processos de fabrico aditivo são capazes de processar uma grande variedade de materiais como plásticos, metais, cerâmicas ou compósitos, sendo que o desempenho mecânico dos mesmos tem sido estudado e otimizado recorrendo a diferentes reforços como fibras de carbono, partículas, nanomateriais ou mesmo utilizando polímeros de alto desempenho [11].

Os processos de fabrico aditivo (FA) podem ser distinguidos, segundo a norma ISO 17296-2:2015, em 7 categorias, de acordo com o método e a estratégia tecnológica utilizada para a construção aditiva das peças (tabela 2), sendo que, a panóplia de materiais processáveis em cada categoria também varia.

Tabela 2 - Materiais processáveis por cada categoria de Fabrico Aditivo segundo a norma ISO 17296-2:2015 [12].

<b>Categorias de Processos de Fabrico Aditivo</b>	<b>Materiais Processáveis</b>
<b>Fotopolimerização em Câmara</b>	Resinas Fotopoliméricas
<b>Impressão de Material</b>	Polímeros e Ceras
<b>Impressão de Aglomerante</b>	Polímeros, Metais e Pós Cerâmicos
<b>Extrusão de Material</b>	Polímeros e Compósitos
<b>Fusão em Camada de Pó</b>	Polímeros, Metais e Pós Cerâmicos
<b>Laminação em Folhas</b>	Papel, Metais e Polímeros
<b>Deposição Direcionada de Energia</b>	Metais

A categoria de Extrusão de Material, em inglês, *Material Extrusion*- MEX, engloba as tecnologias de FDM/FFF (tecnologia descrita abaixo), que utilizam materiais termoplásticos, simples ou compostos, na forma de filamento, tecnologias de impressão por fusão de granulados (*pellets*) - FGF-*Fused Granulate Fabrication* [13], tecnologias de impressão de alimentos por extrusão 3DFP- *3D Food Printing* [14], e ainda tecnologias de impressão de células vivas (*Bioplotter*) ou pastas [8], [15], [16].

### 2.1.1. Modelação por Deposição de Fundido (FDM)

A tecnologia FA de Modelação por Deposição de Fundido, em inglês *Fused Deposition Modelling*- FDM, criada por Scott Crump in 1989, baseia-se na extrusão e deposição de material fundido, camada a camada, numa mesa de construção, formando um modelo físico 3D [8].

Esta tecnologia foi pela primeira vez comercializada e patenteada pela *Stratasys* em 1991. Desde essa data que outras empresas deixaram de poder comercializar a tecnologia dando-lhe o nome de FDM. As outras empresas e interessados em comercializar a tecnologia viram-se assim obrigados a dar um novo nome à mesma, nascendo o termo de FFF- *Fused Filament Fabrication* [6], [15].

Atualmente, existe o projeto *RepRap*, criado por Adrian Bowyer em 2005, que tem como objetivo a partilha de forma gratuita e livre de conhecimento, projetos e inovações à cerca da tecnologia de impressão 3D. Permitindo assim que um público mais abrangente possa aceder à tecnologia e/ou participar no desenvolvimento da mesma.

Uma *RepRap* é uma máquina de FA construída através de designs e softwares disponíveis de forma gratuita, sendo a mesma capaz de reproduzir os componentes plásticos que a integram. A primeira máquina *RepRap* está em exposição no Museu da Ciência em Londres (figura 3) [17].

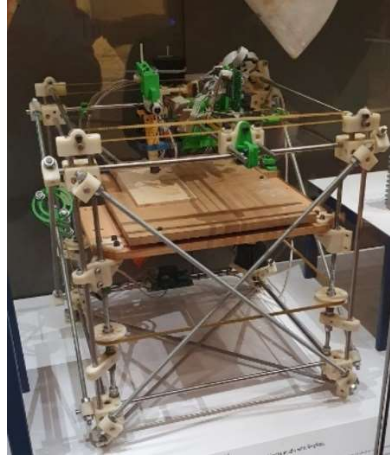


Figura 3 – Primeira máquina RepRap, desenvolvida por Adrian Bowyer [17].

O material termoplástico, na forma de filamento, é conduzido através do extrusor até ao bloco de aquecimento, onde por ação de calor é fundido e reduzido ao diâmetro do bico de saída da cabeça de impressão da máquina, sendo posteriormente depositado para formar a peça. A cabeça de impressão da máquina descreve a trajetória necessária para preencher cada camada de construção (figura 4) [18]. Sendo que essa trajetória pode ser dada através de coordenadas cartesianas ou polares [19].

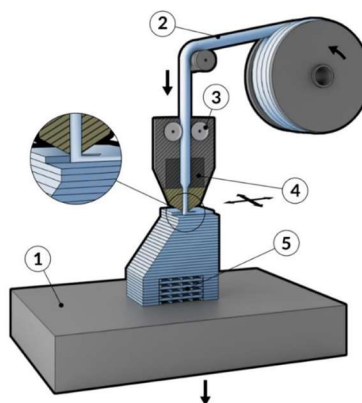


Figura 4 - Representação Esquemática de uma máquina cartesiana de FDM com *direct driver*. 1- Mesa de construção; 2- Filamento; 3 – Extrusor; 4-Bloco de aquecimento; 5- Modelo físico 3D [20].

Ao ficheiro com a informação das coordenadas a percorrer pela cabeça de impressão da máquina, camada a camada, e com os parâmetros de impressão que é lido pela máquina dá-se o nome de *g.code*. Este ficheiro é gerado por um software *slicer* (CAM) onde é carregado o ficheiro da peça que se pretende construir em formato STL e são definidos os parâmetros de construção (posicionamento da peça, velocidade de impressão, percentagem de enchimento, altura de camada, etc...)

O ficheiro em formato STL pode ter origem num ficheiro criado por um *software* de modelação (CAD) ou através de técnicas de engenharia inversa (figura 5) [8].

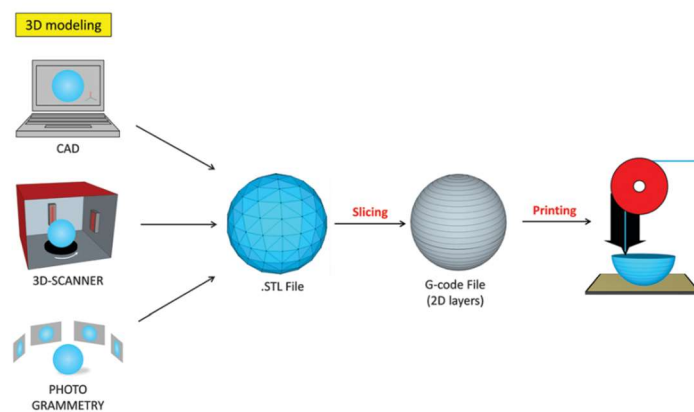


Figura 5- Etapas do processo de fabrico aditivo por FDM [8].

#### 2.1.1.1. Tipos de máquinas de FDM

Atualmente, as máquinas de FDM, podem ser de diferentes tipos, nomeadamente, cartesiana, delta, polar, braços robóticos e híbridas [19], [21].

Maquinas Cartesianas- são as mais comuns do mercado e utilizam um sistema de coordenadas cartesiano, ou seja, 3 eixos ortogonais (x,y e z) que são usados para determinar a posição da cabeça de impressão da máquina em relação à mesa de construção. A mesa pode ser estática, sendo a cabeça de impressão movel nos 3 eixos, ou móvel e, neste caso, a cabeça de impressão deixa de ser livre na totalidade dos eixos. Na figura 6, está representado um exemplo de máquina deste tipo.

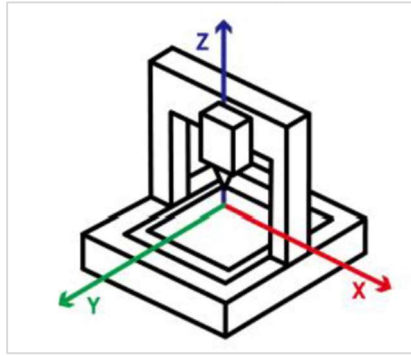


Figura 6 - Representação esquemática de uma máquina de FDM cartesiana [22].

Máquinas Delta- Conhecidas por conseguirem atingir altas velocidades de construção, trabalham também com coordenadas cartesianas, no entanto, distinguem-se pela forma redonda da mesa de construção e pela configuração triangular da fixação da cabeça de impressão da máquina à qual se deve o nome “Delta”. Cada um dos 3 braços pode mover-se nas 3 dimensões e a mesa de construção é fixa (figura 7).

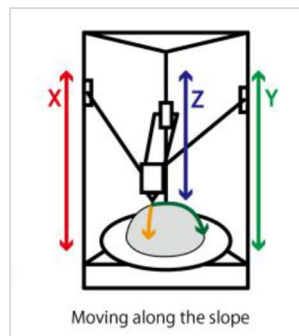


Figura 7 - Representação esquemática de uma máquina de FDM do tipo Delta [22].

Máquinas polar- ao contrário das máquinas cartesianas e delta estas impressoras não usam coordenadas cartesianas, mas sim polares. O sistema de coordenadas polar usa um ângulo e um comprimento para definir os pontos. Estas máquinas apresentam uma mesa de construção redonda e rotativa. São indicadas para a construção de modelos que sigam uma forma espiral, no entanto à medida que a cabeça de impressão se afasta do centro da mesa vai perdendo precisão. Uma vantagem destas máquinas em relação às restantes é a possibilidade de trabalharem apenas com dois motores, enquanto as cartesianas ou delta necessitam de um motor para cada eixo, tornando-se assim mais económicas a longo prazo (figura 8).

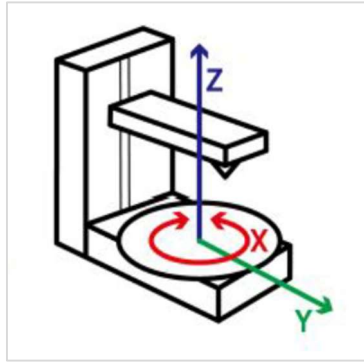


Figura 8 - Representação esquemática de uma máquina de FDM polar [22].

Braços Robóticos- são utilizados principalmente na área da construção civil, no entanto este tipo de construção por FDM está a ganhar cada vez mais peso por não ser necessário uma mesa de impressão fixa e permitir uma maior mobilidade. Através destes braços de robot o movimento da cabeça de impressão é extremamente flexível.

Máquinas híbridas- combinam métodos de fabrico aditivos e métodos de fabrico subtrativos. Apresentam normalmente uma estrutura cartesiana, ou um braço robótico e permitem a troca de ferramentas de forma a conseguirem produzir através de ambos os métodos [19], [21].

#### 2.1.1.2. Tipos de Extrusores

Existem dois tipos de Extrusores, nomeadamente, Direct Drivers e Extrusores Bowden (figura 9).

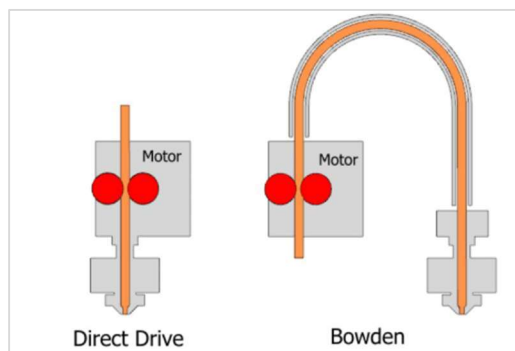


Figura 9 - Tipos de Extrusores [22].

Extrusor de acionamento direto - *Direct Driver*- o caminho que o filamento tem de percorrer entre o extrusor e o bloco de aquecimento é menor, oferecendo assim menos resistência e melhor controlo do material a extrudir. Permite uma maior precisão na extrusão,

principalmente para filamentos flexíveis, e velocidades de impressão mais altas. No entanto, o motor do extrusor ao estar próximo do bloco de aquecimento adiciona peso à cabeça de impressão.

Extrusores *Bowden* - O motor do extrusor fica longe do bloco de aquecimento e o material é conduzido até ao bloco de aquecimento por um tubo de PTFE-Politetrafluoroetileno. Este tipo de extrusor não é adequado para filamentos flexíveis e em velocidades de impressão altas pode perder precisão [22].

### 2.1.1.3. Parâmetros de impressão

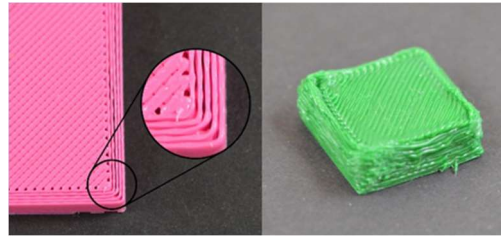
Como referido anteriormente, os parâmetros de impressão definidos no *software slicer* são decididos pelo operador da máquina e afetam de forma direta o aspeto e propriedades mecânicas e físicas das peças obtidas pela tecnologia.

Altura da camada - quanto menor for a altura da camada menos visível é o efeito escada provocado pelo “fatiamento” do objeto. E quanto maior for a camada menos camadas são necessárias para a construção do objeto e desta forma há uma diminuição do tempo de construção (figura 10). O valor máximo e mínimo da altura das camadas está dependente do diâmetro do bico de impressão [23].



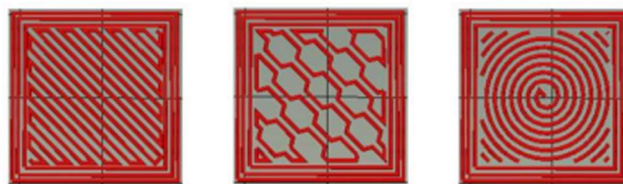
Figura 10 - Efeitos da altura das camadas na resolução e tempo de impressão. Adaptado de [23].

Largura da camada - é a extensão horizontal da linha impressa e a mesma é determinada pelo do diâmetro do bico de impressão, pelo fator de extrusão e pela distância do bico de impressão à mesa (figura 11) [24].



**Figura 11 - Efeitos do fator de extrusão. À esquerda representado um exemplo de um fator de extrusão demasiado baixo e à direita um fator demasiado elevado. Adaptado de [24].**

Tipo e percentagem de preenchimento - o padrão de preenchimento de cada camada pode ser de diferentes formas e de diferentes percentagens (figura 12 e 13), definindo a densidade final da peça, a sua resistência mecânica e os tempos de impressão. Consoante o tipo de preenchimento devido aos movimentos necessários da cabeça de impressão o tempo de impressão pode ser maior ou menor. Uma maior percentagem de preenchimento obriga a um aumento do número de trajetórias feitas pela cabeça de impressão, aumentando o tempo de impressão e o consumo de material, no entanto, a resistência mecânica final da peça também aumenta.[25] As peças obtidas por FDM sofrem de anisotropia, no entanto esta pode ser diminuída através do preenchimento. Ao variar o ângulo de impressão entre as camadas consegue-se obter peças ortotrópicas nos eixos x e y, permanecendo apenas a anisotropia no eixo do Z (figura 14)[26].



**Figura 12 - Diferentes tipos de preenchimento [25].**



**Figura 13 - Diferentes tipos de percentagem de preenchimento [25].**

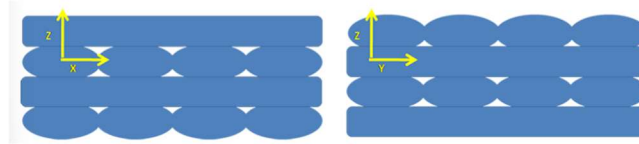


Figura 14 - Representação de seções de uma peça obtida por FDM com 100% de preenchimento e alteração do ângulo de impressão entrecamadas de 90° em relação à camada anterior [26].

Orientação de construção - consoante a orientação da peça na mesa de construção, pode haver a necessidade de suporte ou não. E devido à natureza anisotrópica das peças obtida por FDM a posição de construção também influencia a resistência mecânica das mesmas pois quando submetidas a forças de tração ou compressão, as peças respondem de maneira diferente com base na orientação das camadas [23], [27].

Outros parâmetros que também podem ser definidos são: a velocidade de impressão, a temperatura da mesa e da extrusão do material, o tipo de estruturas de aderência à mesa (*skirt*, *brim* ou *raft*) (figura 15). Consoante o software CAM o número de parâmetros que se podem alterar pode ser maior ou menor [20].

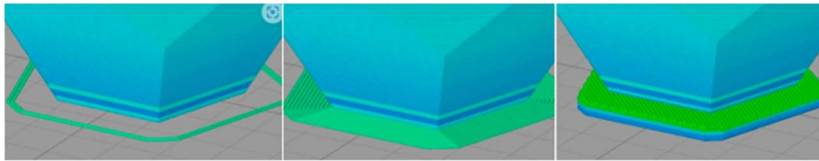


Figura 15 - Tipos de estruturas geradas pelo software CAM de aderência à mesa. Adaptado de [28].

#### 2.1.1.4. PLA- Poli(ácido lático)

O poli(ácido lático) - PLA, representado na figura 16, é um material termoplástico, biocompatível que pode ser obtido através do ácido lático de recursos renováveis, como o açúcar do milho, batata, cana de açúcar, entre outros ou reciclado [29].

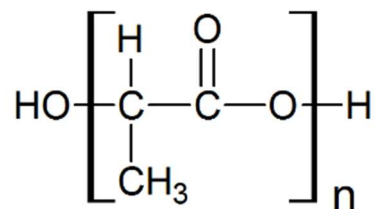


Figura 16 - Estrutura molecular do PLA [30].

O PLA tem propriedades bastante interessantes e duráveis que o tornam capaz de substituir os plásticos de origem fóssil e é um exemplo de biopolímero com propriedades mecânicas, térmicas e de processamento superiores às de outros biopolímeros comerciais [30].

Este polímero sofre biodegradação em condições de compostagem (industrial) num curto período e a compostagem pode transformar resíduos biodegradáveis em solo fértil, potencializando o crescimento da agroeconomia. Já em condições de solo a sua degradação leva mais tempo [31]. O tempo de degradação varia entre 6 meses e 2 anos [29].

O PLA pode ser processado por várias tecnologias, entre elas a extrusão, sendo esta característica bastante explorada pela técnica de fabrico aditivo de FDM, pois comparando com outros plásticos comuns como o ABS, o PLA apresenta uma maior facilidade de impressão, por não serem necessárias altas temperaturas de extrusão (em volta dos 210°C), nem ser obrigatório o uso de uma mesa aquecida. É um material que comparado com outros não tem uma grande tendência a empenar e gera menos gases tóxicos [32].

Este material devido à sua biocompatibilidade e biodegradabilidade tem bastante aplicabilidade para a produção de produtos de uso comum e de materiais de embalagens como cuvetes, garrafas ou filmes, e até mesmo na indústria médica [33].

## **2.2.Ferramentas de Curta Tiragem – *Rapid Soft Tooling***

Apesar das tecnologias de fabrico aditivo já permitirem obter peças finais em uma grande panóplia de materiais, estas, por vezes, não são capazes de satisfazer a necessidade de colocar rapidamente no mercado pequenas series de produtos, ou então o preço de fabrico não é sustentável. Surge assim a necessidade de recorrer a tecnologias de conversão que permitem converter um protótipo obtido por um processo qualquer, num produto final, com características mecânicas, tecnológicas e de utilização muito próximas dos componentes obtidos pelos processos de fabricação convencionais (injeção, por exemplo).

Estas tecnologias de conversão recorrem às chamadas ferramentas de curta tiragem-*Rapid Soft Tooling*. O processo mais conhecido é o vazamento sob vácuo em moldes de silicone [6].

### 2.2.1. Vazamento sob vácuo em moldes de silicone

Este processo permite a fabricação de pequenas series de peças com variadas dimensões e com grande liberdade de design\complexidade de uma forma relativamente rápida e mais barata comparando com outros processos de fabrico (figura 17) [34].



Figura 17 - Exemplos de moldes de silicone para vazamento sob vácuo [35].

Cada peça demora cerca de 1 hora dentro do molde silicone e um molde de silicone tem um limite médio de vida de cerca de 25 vazamentos.

Para a conversão de protótipos em peças plásticas utilizam-se resinas (plástico termoendurecível) nos vazamentos que, atualmente, apresentam características muito semelhantes a plásticos como ABS, nylon, PMMA, polipropileno, elastómeros, etc... [6].

#### 2.2.1.1. Tipos de silicone

Os silicones são utilizados na construção de moldes por permitirem reproduzir modelos sem saídas e pela sua característica auto desmoldante, não sendo necessário o uso de desmoldantes na maioria dos casos. Os silicones podem ser divididos consoante o tipo de polimerização, sendo que os dois principais tipos de silicones são: silicones com polimerização por condensação e silicones com polimerização por adição.

O processo de polimerização (cura) destes silicones pode ser inibido por alguns contaminantes que possam estar presentes no master (modelo a ser reproduzido), dando origem a uma superfície pegajosa na zona de contacto entre o molde e o master, ou até mesmo a total ausência de cura.

Os silicones com polimerização por condensação são os mais económicos, no entanto apresentam valores superiores de contração e são menos duros. A sua utilização em aplicações técnicas é desaconselhada, pois estas exigem uma elevada precisão dimensional.

A inibição da cura deste tipo de silicones raramente acontece, no entanto, masters de materiais que contenham enxofre na sua composição podem retardar a sua cura e em casos de severa inibição o tempo necessário para que ocorra a cura completa dos mesmos pode demorar dias. Ao contrário dos silicones de adição, se os agentes inibidores forem removidos a cura dá-se.

Os silicones com polimerização por adição são ideais para aplicações técnicas por apresentarem baixos valores de contração durante a cura (normalmente inferiores a 0.1%). A inibição da cura dos silicones por adição é geralmente causada pela utilização de materiais com enxofre, borrachas naturais (latex), resinas, silicones de condensação, etc... [6].

### **2.2.1.2. Tipos de Resinas**

Os plásticos termoendurecíveis, que comercialmente se dá o nome de resinas, podem ser de vários tipos, nomeadamente, poliésteres, poliuretanos, viniléster e resinas fenólicas.

O uso de resinas é cada vez maior e cada vez mais difundido devido às várias vantagens que apresentam relativamente aos materiais termoplásticos, como, resistência química e térmica, boa rigidez, baixa massa molecular, estabilidade dimensional e a adaptabilidade a vários métodos de processamento, permitindo assim a sua utilização nas mais diversas áreas.

As resinas epoxídicas são mais caras e são utilizadas em aplicações estruturais, pois apresentam melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à humidade do que os restantes tipos de resinas.

O processo de cura das resinas é causado por uma reação química entre a resina e um catalisador, alterando de forma irreversível as propriedades químicas e físicas de ambos. É um processo altamente exotérmico que pode ser dividido em 3 etapas:

1ª Etapa- Gelificação- Inicia-se assim que se dá início á mistura da resina com o catalisador até ao ponto de gel da resina (*Pot Life*). Durante esta etapa dá-se o aumento de temperatura atingindo-se o ponto exotérmico da reação.

2ª Etapa- Endurecimento- Corresponde ao período necessário para que a resina obtenha grande parte das suas propriedades mecânicas.

3ª Etapa- Maturação- Etapa final onde o compósito atinge toda a sua estabilidade e dureza. Esta etapa pode demorar dias ou talvez semanas, dependendo das condições a que se der a cura, sendo que, de uma forma geral quanto maior for a temperatura de cura menor é o tempo necessário para que esta ocorra na sua totalidade [36].

Nos últimos anos, as resinas derivadas de recursos renováveis têm recebido uma especial atenção devido à necessidade de desenvolver produtos que sejam menos nocivos para o meio ambiente [37].

Exemplo disso, é a empresa Sicomin que tem investido recursos e conhecimento no desenvolvimento de novos sistemas de base biológica e atualmente tem no mercado a gama de resinas *GreenPoxy*<sup>®</sup>. As resinas desta gama são produzidas com até 51% de carbono de origem vegetal, como é o caso da resina *GreenPoxy 56*, e podem ter diversas aplicações como laminação, moldagem por injeção, enrolamento de filamentos, processos de prensagem e vazamentos [37].

#### **2.2.1.1. Etapas do processo**

O processo de replicação de peças plásticas por vazamento sob vácuo em moldes de silicone pode ser dividido em etapas:

1-Produção e Preparação do Modelo Protótipo (*Master*) - regra geral esta etapa corresponde à construção e pós processamento das peças obtidas por fabricação aditiva. Nesta etapa o master é acabado de forma a ter o aspeto superficial que se pretende replicar e tenta-se eliminar possíveis agentes de contaminação para o silicone;

2-Construção da linha de junta- através de fita cola que é colada no master, é criada a zona pela qual o molde vai ser dividido;

3-Construção do molde- o master é fixado dentro de uma caixa com as dimensões pretendidas para o molde em questão. É nesta etapa que se constroem também os canais de alimentação e posteriormente enche-se a caixa com silicone;

4-Abertura do molde-após o período de cura do silicone, o molde é aberto através de vários cortes irregulares no silicone e é extraído o master do seu interior. É também nesta etapa que se criam os canais para a fuga do ar da zona moldante (abertura de fugas);

5- Vazamento – são pesados os vários componentes que compõem a resina e, dentro da máquina de vazamentos, os mesmos são misturados e vazados para dentro do molde.

6-Remoção da peça obtida- após a o período de cura da resina a peça pode ser removida de dentro do molde [6].

### **2.3.Materiais Compósitos**

Um material compósito é um material constituído dois ou mais componentes com propriedades químicas e físicas diferentes. As propriedades do compósito são superiores quando comparadas às dos componentes que o constituem individualmente, possibilitando a obtenção de diferentes propriedades através da mistura de diferentes materiais [38].

O uso deste tipo de materiais remonta à era antes de Cristo, um exemplo disso, são as máscaras mortuárias egípcias feitas de linho ou papiro embebido em gesso. No século XX, após a revolução industrial, o avanço das tecnologias e materiais impulsionou o desenvolvimento e o uso destes materiais por parte de diversas indústrias [39], [40].

Os materiais constituintes do compósito são selecionados consoante o tipo de utilização para a qual se pretende obter o compósito e quais os requisitos que este tem de ter, como resistência à corrosão, peso, rigidez e resistência à fadiga.

Os materiais compósitos podem ser classificados consoante o tipo de matriz, fase contínua, e consoante o tipo de reforço, fase descontínua. Na figura 18 encontra-se a classificação por tipo de matriz e a classificação por tipo de reforço [41].

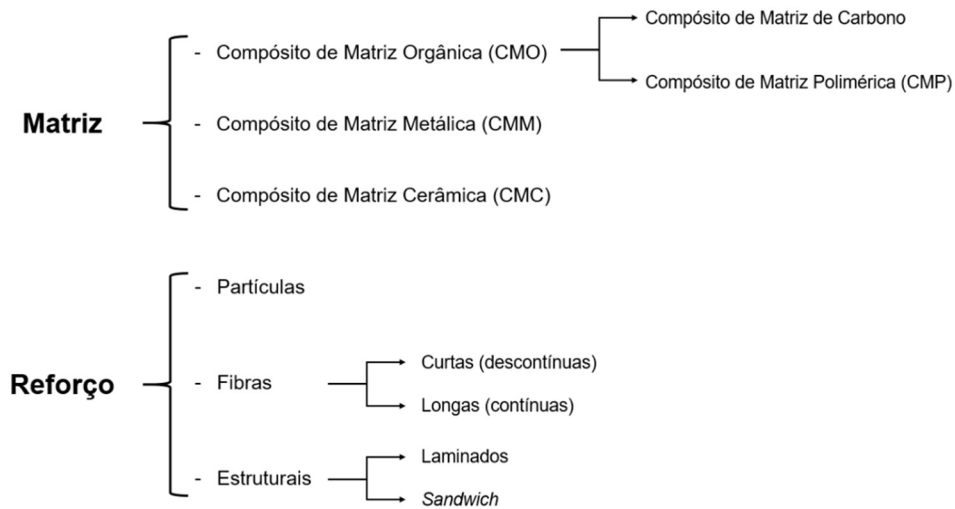


Figura 18 - Classificação de materiais compósitos consoante o tipo de Matriz e o tipo de reforço [41].

A forma das fibras, a orientação entre elas, a percentagem das mesmas em relação à matriz e o tipo de distribuição no compósito faz variar as propriedades resultantes da combinação. Na figura que se segue, está uma representação das possíveis configurações de orientação que as fibras podem ter [42].

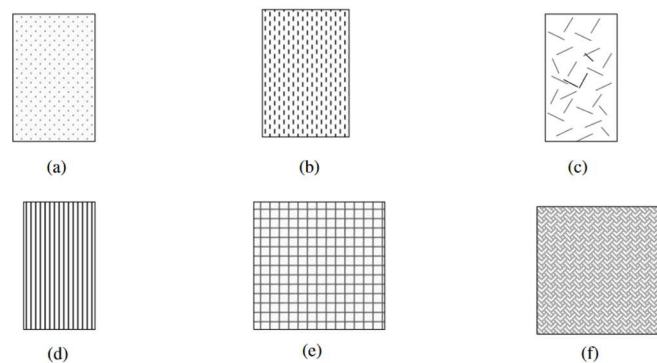


Figura 19 - Compósitos reforçados com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras descontínuas unidirecionais; (c) fibras descontínuas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas e (f) fibras contínuas multidirecionais [42].

O foco de estudo deste trabalho foram os materiais compósitos de Matriz polimérica com reforço do tipo sandwich com fibras naturais.

### 2.3.1. Estruturas compósitas do tipo Sandwich

Uma estrutura compósita sandwich, consiste na união de duas ou mais lâminas (camadas de fibras) a um núcleo, com recurso ou não de adesivos para garantir a adesão entre o núcleo e as lâminas (figura 20).

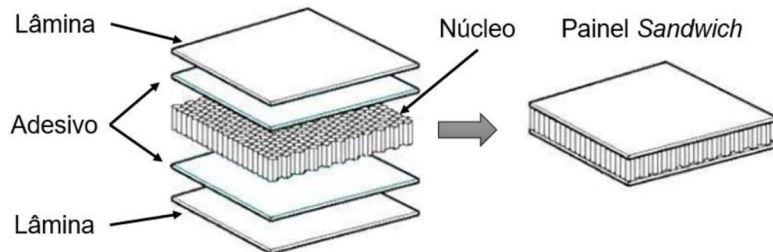


Figura 20 - Representação esquemática de uma estrutura sandwich [41].

O núcleo apresenta valores de densidade, rigidez e resistência inferiores às das lâminas. A função das lâminas é suportar os esforços de flexão da estrutura, trabalhando essencialmente à compressão e à tração. Já o núcleo, suporta os esforços de corte e torção, contribuindo para que não haja descolamento das lâminas.

Devido às funções atribuídas às lâminas, estas devem apresentar resistência elevada, resistência ao impacto, à corrosão e ao desgaste, e dessa forma os materiais que usualmente são utilizados como lâminas são:

- Materiais metálicos: aço, aço inoxidável, ligas de alumínio e cobre.
- Não metálicos: Madeira e materiais compósitos reforçados com fibras.

Quando há a necessidade de usar adesivos estes têm uma grande influência no comportamento final do painel sandwich. O adesivo deve ser o elemento mais forte e com propriedades mecânicas que o permitam resistir aos processos de fabrico do compósito e às solicitações da vida útil do mesmo, de forma que este não perca a integridade estrutural [41].

### 2.3.2. Tipos de fibras

As fibras podem ser de origem sintética ou natural. E as fibras naturais podem ser organizadas de acordo com a sua origem, nomeadamente em fibras minerais, animais e vegetais [43].

As fibras vegetais naturais podem ser designadas apenas como fibras naturais ou como fibras celulósicas, visto que a celulose é o componente químico principal das mesmas, ou

também como fibras lignocelulósicas, já que a maioria dessas fibras contém lignina, um polímero polifenólico natural.

Ultimamente, os reforços têxteis à base de fibras vegetais naturais em aplicações de compósitos estruturais têm substituindo outros reforços à base de fibras sintéticas devido aos seus benefícios ambientais, aos preços mais acessíveis e propriedades específicas comparáveis [44]. Na tabela que se segue é possível comparar algumas das propriedades entre exemplos de fibras naturais e fibras sintéticas.

**Tabela 3 -Propriedades de alguns exemplos de fibras naturais e sintéticas [39].**

Reforço	Origem	Massa Volúmica (g cm <sup>-3</sup> )	Resistência à tração (Gpa)	Módulo de Young (Gpa)	Alongamento na Rotura (%)
Fibra de Carbono	PAN (poliacrilonitrila)	1,8	3,53 – 7,06	230 - 540	0,7 – 2,0
Fibra de Carbono	Petróleo	1,8	0,85 – 2,2	42 - 820	0,2 – 2,1
Fibra de Vidro E	Sintética	2,53 – 2,55	1,5 – 3,7	72 – 76	2,5 – 4,9
Fibra de Vidro S	Sintética	2,48 – 2,49	3,5 – 4,59	86 – 91	2,9 – 5,8
Aramida	Sintética	1,38 – 1,47	2,75	70,5 – 112,4	2,4 – 3,6
Linho	Vegetal	1,5 – 3	0,2 – 0,77	13 – 55	1,8 – 8
Sisal	Vegetal	1,45	0,47 – 0,64	9,4 – 22	2 – 7
Cânhamo	Vegetal	1,47	0,31 – 0,90	30 – 70	1,6 – 4

As fibras vegetais naturais, como o linho, o sisal, a banana, o cânhamo e a juta, têm sido utilizadas em diversas aplicações para melhorar o desempenho mecânico e ambiental de alguns compósitos [45].

Na figura 21, encontram-se alguns exemplos de aplicações das fibras de folha de ananás.

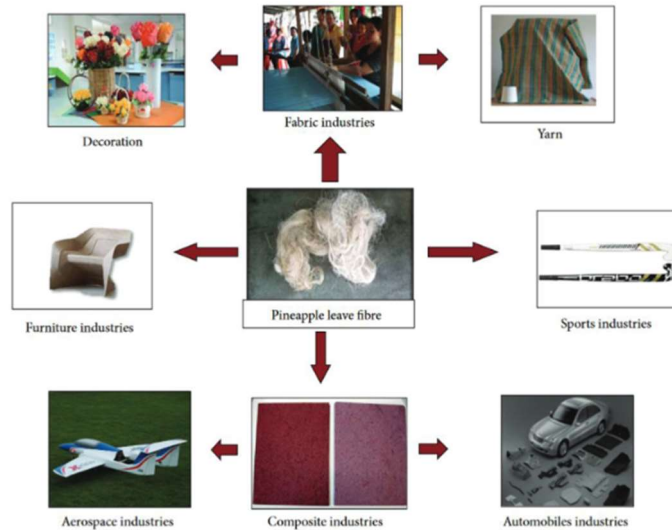


Figura 21 - Exemplos de aplicações das fibras de folha de ananás [45].

### 2.3.2.1. Fibras de Linho

A utilização de fibras de linho tem vindo a aumentar de forma gradual em aplicações técnicas industriais, como por exemplo, na indústria automóvel, em materiais compósitos, por serem de baixo preço relativamente a outras fibras, por apresentarem boas propriedades mecânicas, capacidade de absorção sonora, baixa densidade e por ser um material reciclável [46].

## 3. Materiais e Métodos

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. PLA 4032D

O PLA utilizado neste trabalho apresentava-se na forma de filamento de 1.75 mm de diâmetro e de cor preta. É comercializado pela Tucab, com o nome de PLA 4032D e apresenta características como acabamentos de boa qualidade, fácil de trabalhar, elevada precisão, boa adesão à mesa de construção, elevada rigidez e baixa probabilidade de ocorrer *stringing* (“cabelos” durante a impressão). As propriedades de impressão recomendadas pela Tucab encontram-se representadas pela tabela 4 e as propriedades mecânicas do material pela tabela 5 [47].

Tabela 4 - Propriedades de impressão do Filamento de PLA da Tucab, segundo a mesma [47].

Propriedades de impressão	Valores Típicos
Temperatura da mesa de construção	55±5°C
Temperatura de extrusão	210±20°C
Temperatura do bico de impressão	200°C

Tabela 5 - Propriedades do Filamento de PLA 4032D da Tucab. A sigla MD, refere-se à direção de processamento do material e a sigla TD à direção perpendicular à direção de extrusão do material [47].

Propriedade	Norma	Valores Típicos
Resistência à Tração	D882	MD 0.15MPa / TD 0.10MPa
Alongamento na Rótura	D882	MD 180% / TD 100%
Densidade	D1505	1.24g/ cc

### 3.1.2. Resina Bio - GreenPoxy® 56 + Surf Clear

A resina bio utilizada neste trabalho foi a resina *GreenPoxy 56* com o endurecedor SD Surf Clear (figura 22). Na proporção de 100g de resina para 37g de endurecedor, o tempo de gelificação de 500g de mistura a uma temperatura de 20°C e a 30°C encontram-se representados na figura 23 sob a forma de um gráfico, onde é visível a variação da temperatura da mistura ao longo do tempo de reação de polimerização. O tempo de endurecimento da resina pode variar consoante a quantidade de mistura e consoante a temperatura a que se dá a reação, sendo que para 1 mm de filme o tempo de endurecimento a 20°C é de 4h, a 25°C é de 3h e 10min, a 30°C é de 2h e 25min e a 40°C de 1h e 25min. E após o período de maturação de 7h a 25°C a resina obtém as propriedades mecânicas apresentadas na tabela 6.



Figura 22 - Resina Bio - *GreenPoxy 56* + endurecedor *SD Surf Clear*.

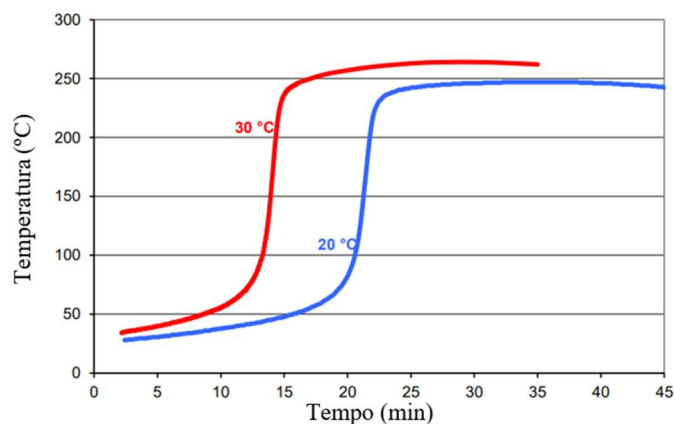


Figura 23 - Tempo vs Temperatura da reação exotérmica de 500g de mistura a 20°C e a 30°C [48].

Tabela 6 - Características Mecânicas da resina *GreenPoxy 56* + endurecedor *SD Surf Clear* com polimerização de 7h a 23°C [48].

<i>GreenPoxy 56 + SD Surf Clear</i>			
<b>Tração (ISO 527-2)</b>	Módulo Elasticidade Longitudinal	N/mm <sup>2</sup>	3 200
	Tensão Máxima ou Rotura	N/mm <sup>2</sup>	50
	Tensão de fratura	N/mm <sup>2</sup>	49
	Alongamento à força máxima	%	1.6
	Alongamento à fratura	%	1.6
<b>Flexão (ISO 178)</b>	Módulo de Flexão	N/mm <sup>2</sup>	3 300
	Tensão Máxima ou Rotura	N/mm <sup>2</sup>	114
	Alongamento à força máxima	%	4.5
	Alongamento à fratura	%	4.7

### 3.1.3. Fibra de linho

Neste estudo, as fibras utilizadas como reforço foram as fibras de linho, comercializadas na forma de manta pela empresa Rebelco. Este tipo de fibras é compatível com o uso de resinas epóxi e apresenta a disposição apresentada na figura 24 [49].



Figura 24 - Disposição da fibra de linho, malha tafetá [49].

### 3.1.4. Silicone – VTV 800

O silicone utilizado foi o silicone de condensação VTV 800 comercializado pela *Renishaw*, transparente e sem cor. As propriedades do silicone podem variar consoante o razão da mistura dos componentes e da temperatura de cura do mesmo. A razão de mistura

utilizada neste trabalho foi de 100 g de silicone VTV 800 para 10 g de catalisador CAT 800, com as propriedades de processamento apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades de processamento do silicone VTV 800 – Renishaw [50].

VTV 800 (100:10)					
Pot life (100g)			Tempo de Cura		
a 25°C	a 40°C	a 60°C	a 25°C	a 40°C	a 60°C
120 min	26 min	15 min	24h	10 a 12h	3 a 6h

### 3.2.Métodos

A metodologia adotada no trabalho experimental deste trabalho e apresentada na forma de diagrama pela figura 25, pode ser dividida em duas fases: a primeira fase que são os procedimentos necessários para a obtenção dos provetes e a segunda fase que corresponde, aos ensaios mecânicos realizados para a caracterização dos materiais utilizados.

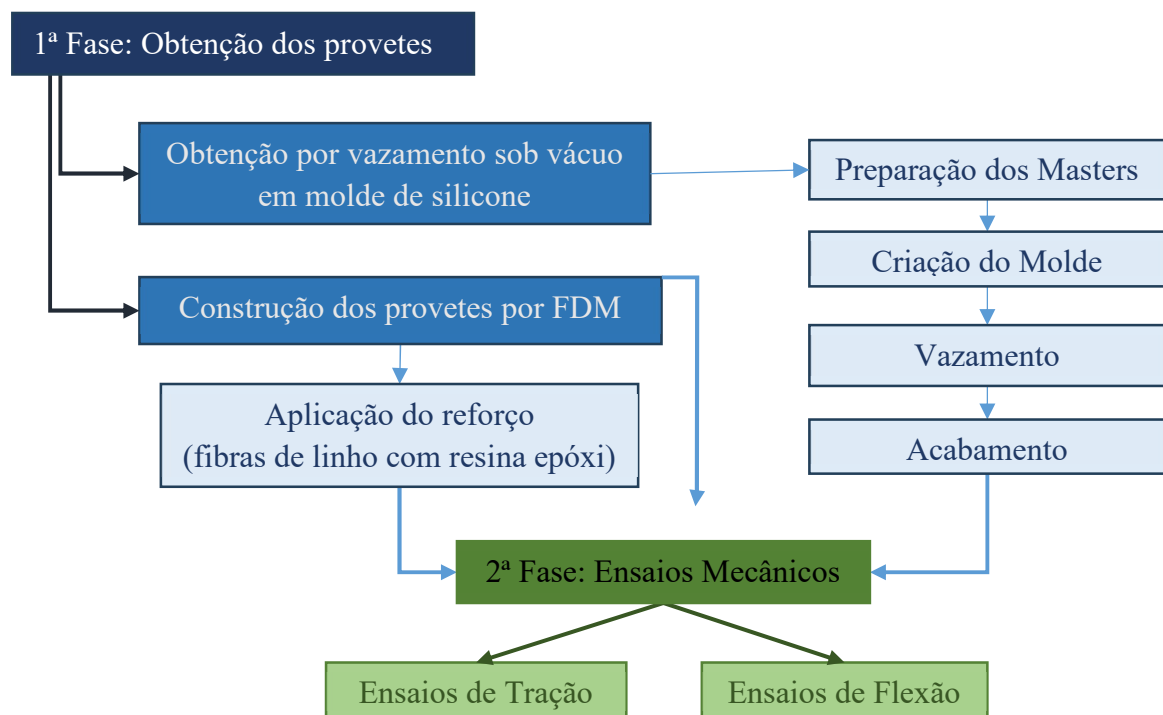


Figura 25 - Fluxograma do trabalho experimental.

### 3.2.1. Obtenção dos provetes

Os provetes utilizados nos ensaios mecânicos foram obtidos por dois tipos de fabrico. Os provetes de resina foram obtidos por vazamento em molde de silicone sob vácuo e os provetes de PLA foram construídos por meio da tecnologia de FDM e posteriormente alguns foram reforçados com as fibras de linho e resina bio, formando um compósito do tipo sandwich.

#### 3.2.1.1. Provetes Vazados em Molde de Silicone sob Vácuo

O procedimento para a obtenção dos provetes de resina pode ser dividido em 4 etapas:

1ª Etapa - Preparação dos Masters - Utilizaram-se provetes injetados com dimensões segundo o tipo 1A da norma ISO 527-2 como masters, cujas dimensões se encontram representadas na tabela 8 e estes para que pudessem ser utilizados sem que o silicone utilizado reagisse com os mesmos tiveram de ser acabados. A superfície dos provetes foi desengordurada com recurso a jato de areia e posteriormente pintados de forma a revestir os mesmos e eliminar possíveis contaminações, figura 26.

Tabela 8 - Dimensões dos provetes do tipo 1A conforme a norma ISO 527-2 [51], [52].

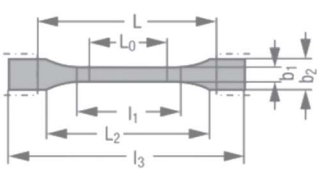
Dimensão conforme a norma ISO 527-1 – Tipo 1A						
	l3	l1	b2	b1	h	L0
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	≥170	80±0,5	20±0,2	10±0,2	4,0±0,2	50±0,5



Figura 26 - Provetes utilizados como masters na construção do molde de silicone. À esquerda, estão os provetes antes dos acabamentos e à direita os provetes já estão prontos a serem utilizados.

2ª Etapa - Criação do molde (figura 27) - A criação do molde iniciou-se com a construção da linha de junta, colando fita cola nos masters e de seguida fez-se uma caixa de cartão onde foram fixados os masters + linha de junta. Após a fixação dos masters na caixa e criação dos canais de alimentação encheu-se o molde de silicone. O silicone utilizado foi misturado com o catalisador, com recurso a uma máquina misturadora de silicone (figura 28), na proporção por peso de 100:10 à temperatura ambiente  $\pm 23^{\circ}\text{C}$ . Após o enchimento da caixa com o silicone, utilizou-se uma máquina de vácuo para desgaseificar o silicone durante 15 min e eliminar possíveis bolhas no molde. O molde foi curado à temperatura ambiente e aberto 24h depois com recurso a um bisturi e alicate.



**Figura 27 - Construção do molde de silicone. 1º-Criação da linha de junta; 2º-Fixação os masters na caixa e criação dos canais de alimentação; 3º- Enchimento do molde; 4º- Desgaseificação do silicone; 5º- Cura do silicone; 6º-Molde retirado da caixa; 7º- Abertura do molde; 8º- Molde aberto.**



**Figura 28 - Misturadora de Silicone.**

3ª Etapa - Vazamento – Após a criação do molde e antes de serem vazadas as primeiras peças abrem-se fugas no molde para que o ar durante o vazamento não ficasse preso nas cavidades do molde, criando bolhas nas peças vazadas. Após a abertura de fugas, o molde foi fechado com fita cola e aquecido dentro de uma estufa a 45°C. Depois de se ter aquecido o molde, pesaram-se os componentes da resina na proporção de 100/37g e de seguida deu-se início ao vazamento. Dentro da máquina de vazamentos (figura 30), foram colocados dois copos, um com o componente A e outro com o componente B da resina. Ao dar-se início ao vazamento, o copo do componente B é vertido para dentro do copo do componente A e ambos foram misturados durante 60 segundos antes de se verter a mistura para dentro do molde, sob vácuo, figura 29. Por fim, é retirado o vácuo da máquina de vazamentos aos poucos, e de seguida levou-se o molde de volta para a estufa a 45°C para acelerar o processo de cura da resina durante 1 h.



Figura 29 - Vazamento de peças. 1º Abertura de fugas no molde; 2º- preparação do vazamento; 3º Vazamento.



Figura 30 - Máquina de vazamentos sob vácuo- 001LC- MCP, HEK- GMBH.

4ª Etapa – Acabamentos – As peças vazadas foram retiradas de dentro do molde e deixadas à temperatura ambiente. Só no dia seguinte é que se removeram os gitos, fugas e rebarbas existentes (figura 31).



Figura 31 - Provetes vazados sem acabamentos.

### 3.2.1.2. Construção de provetes por FDM

Os provetes foram modelados no software CAD da *Siemens NX* segundo o tipo 1B da norma ISO 527-2 com as dimensões apresentadas na tabela 9 e segundo a norma ASTM D790-10 com as dimensões descritas na tabela 10.

Tabela 9 – Dimensões dos provetes conforme a norma ISO 527-2 – Tipo 1B [51], [52].

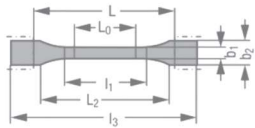
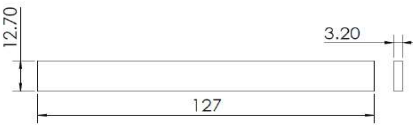
Dimensão conforme a norma ISO 527-2 – Tipo 1B						
	13	11	b2	b1	Altura	L0
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	≥150	60±0,5	20±0,2	10±0,2	4,0±0,2	50±0,5

Tabela 10 - Dimensões dos provetes conforme a norma ASTM D790-10 [53].

Dimensão conforme a norma ASTM D790-10			
	l	b	Altura
	(mm)	(mm)	(mm)
	127	12.7	3.2

Os ficheiros de modelação foram exportados do NX com formatação STL e de seguida importados para o *Cura* (software *slicer* gratuito) onde foram definidos os parâmetros de impressão e obtidos os ficheiros de impressão g.code.

**Tabela 11 - Parâmetros de impressão utilizados na construção dos provetes.**

Parâmetros de Impressão	
Diâmetro do filamento	1.75 mm
Temperatura de extrusão	210°C
Temperatura da mesa	60°C
Ø do bico de impressão	0.6 mm
Largura da camada	0.6 mm
Altura da camada	0.32 mm
% de preenchimento	100%
Nº de <i>perímetros</i>	3
Tipo de preenchimento	Cubico (+45°/-45°)
% de percentagem de sobreposição do enchimento	10%
Velocidade de impressão	50 mm/s
Velocidade de preenchimento	50 mm/s
Velocidade de <i>perímetros</i>	25 mm/s
Velocidade da primeira camada	10 mm/s
Tipo de estrutura de adesão à mesa	Brim

A máquina de FDM utilizada para a construção dos provetes foi uma impressora cartesiana de nome CR10Max da marca *Creality*, com extrusor do tipo Bowden, volume de construção de 450x450x470 mm e consumo energético de 750W.



Figura 32 - Máquina de FDM - CR10 Max da marca *Creality* [54].

Ambos os tipos de provetes de PLA foram contruídos em duas diferentes orientações, na vertical e horizontal como ilustrado na figura 33. Os provetes contruídos na vertical foram impressos 1 a 1 de forma a evitar marcas de *stringing*.

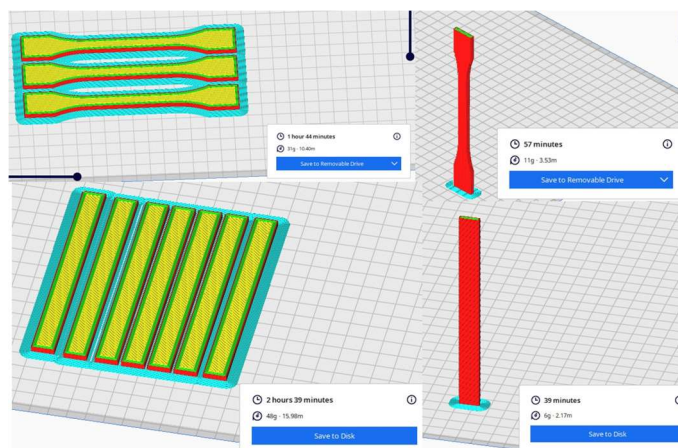


Figura 33 - Diferentes orientações de construção dos provetes obtidos por FDM.

### 3.2.2. Construção das estruturas Sandwich - Aplicação das fibras

Na aplicação do reforço da manta de fibras de linho nos provetes de PLA utilizou-se a técnica de laminação manual sob vácuo. Recortaram-se os vários tipos de material na medida necessária, assim como se recortou a fibra de linho com as dimensões dos provetes. De seguida, a fibra de linho foi pincelada com a resina bio contra o provete de forma a “colar” a fibra no provete e a impregnar a mesma. Cada provete foi revestido com uma camada de fibra de cada lado. Por fim, os provetes foram colocados num saco de vácuo.

Conforme o procedimento para a produção de laminados compósitos foram utilizados outros materiais. Assim, diretamente em contacto com os provetes utilizou-se um tecido de poliamida, chamado de *peel ply*, utilizado com a função de ajudar na desmoldagem e retirada dos restantes materiais após a cura da resina. Em cima do *peel ply* colocou-se um filme perfurado para que o excesso de resina utilizado possa passar-se para o material seguinte, chamado *breather*. O material *breather* é um material absorvente que para além de absorver o excesso de resina facilita a distribuição do vácuo [55].

O saco de vácuo foi selado com uma fita emborrachada de dupla face e fita-cola.

O vácuo dentro do saco foi assegurado com recurso a uma panela de vácuo, como se pode observar na figura 34. Os provetes com o reforço foram mantidos sob vácuo durante 24h à temperatura ambiente e só depois é que foram desmoldados.



**Figura 34 - Reforço dos provetes de PLA. A) Fibra de linho; B) Tecido de poliamida - *Peel ply*; C) Material absorvente - *Breather*; D) Filme perfurado; E) Saco de vácuo; F) Panela de vácuo.**

Após desmoldar os provetes foi achou-se necessário remover o excesso de fibra em volta dos provetes, como é visível na figura 35, com recurso a uma multiferramenta de alta velocidade da marca *Dremel*.



**Figura 35 - Provetes de PLA com reforço de fibras de linho ainda em excesso.**

### 3.2.3. Testes de Caracterização Mecânica

Os testes de caracterização mecânica neste trabalho foram realizados com recurso à máquina universal de ensaios mecânicos Zwick Z100, presente no Laboratório de Materiais do departamento de engenharia mecânica da ESTG (figura 36).



Figura 36 - Máquina universal de ensaios mecânicos Zwick Z100.

#### 3.2.3.1. Testes de Tração

Este tipo de ensaio baseia-se na aplicação de uma força de tração uniaxial nas extremidades de um provete fabricado com o material em estudo, de forma a provocar uma deformação no mesmo, figura 37 e 38 [56].

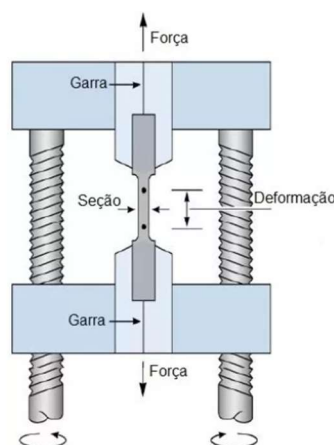


Figura 37- Representação de um ensaio de tração [56].



Figura 38 - Ensaio de tração

Nos ensaios de tração, os provetes dos materiais em estudo foram fixados nas extremidades a uma distância entre garras conhecida (figura 36) e de seguida foi solicitada uma velocidade de deformação uniaxial constante, por forma a deformar o material até o levar à rotura. Os ensaios de tração, assim como os ensaios de flexão, foram repetidos 3 vezes, por cada variedade de material de forma validar os dados obtidos.

Os valores da força exercida e do alongamento, ao longo do tempo, foram registados e através das equações 1 e 2, foi possível obter os valores de força vs deformação, que foram posteriormente organizados na forma de um gráfico tensão vs deformação [56], [57].

$$\sigma = \frac{F (N)}{A_0 (mm^2)} (MPa) \quad (1)$$

$\sigma$  representa a tensão,  $F$  a força exercida na amostra e  $A_0$  área da secção do provete.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l (mm)}{l_0 (mm)} (mm/mm) \quad (2)$$

$\varepsilon$  representa a deformação,  $\Delta l$  representa a variação da distância entre amarras e  $l_0$  a distância inicial entre amarras.

A curva do gráfico tensão vs deformação é uma descrição do comportamento de deformação de um material devido à ação da carga de tração uniaxial, que pode ter diversas formas, dependendo do tipo de material ensaiado. Na figura 39, apresentam-se algumas curvas típicas. Sendo a curva A típica de polímeros frágeis, a curva B típica de polímeros dúcteis e a curva C típica para elastómeros [16], [56].

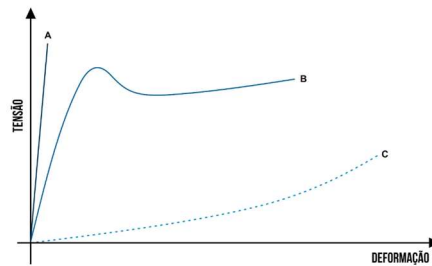


Figura 39 - Diferentes tipos de curvas típicas obtidas em ensaios de tração de polímeros: a) frágeis; b) dúcteis; c) elastômeros [56].

A definição de material dúctil e de material frágil é feita através da análise da curva tensão-deformação. Quanto maior for a área abaixo da curva obtida, maior será o indicador que o material apresenta comportamento dúctil. Um material de comportamento frágil apresenta essencialmente a parte da curva com comportamento linear (parte inicial) e é praticamente inexistente o domínio plástico nestes materiais. À tensão que separa o regime elástico do regime plástico do material dá-se o nome de tensão de cedência ( $\sigma_c$ ). Uma vez ultrapassada a tensão de cedência o material deixa de ter capacidade de retomar à sua forma original quando a tensão for libertada.

No caso de materiais onde não exista uma clara evidência da tensão de cedência, deverá-se aplicar uma regressão linear a uma certa percentagem da deformação, sendo que o valor da mesma varia consoante o tipo de material em estudo.

O módulo de Young ( $E$ ), através da lei de Hooke (equação 3), pode ser definido como o declive da parte linear da curva do ensaio de tração, para valores de deformação entre 0,0005 e 0,0025 (figura 40). O módulo de elasticidade representa a rigidez do material no regime elástico.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (3)$$

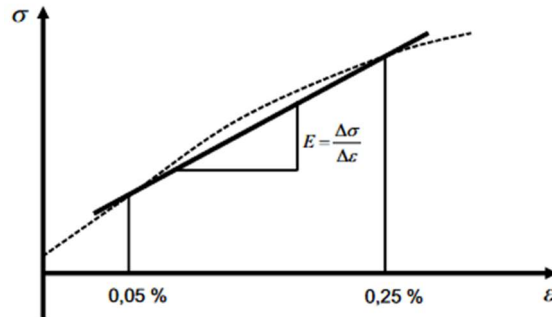


Figura 40 - Obtenção do módulo de elasticidade segundo a norma ISO 527-1:2012 [58].

Podem ser ainda retirados os seguintes dados num ensaio de tração: tensão de resistência à tração ( $\sigma_R$ ), maior valor de tensão atingida no ensaio; tensão de fratura ou tensão última ( $\sigma_u$ ), tensão registada na rotura do provete.

Regra geral, os projetos em engenharia, são projetados para suportarem solicitações sem que se ultrapasse a tensão de cedência e desta forma a estrutura encontra-se sempre dentro do regime elástico. Nos projetos, tem-se em conta não só o valor da tensão de cedência do material com também um fator de segurança, obtendo-se assim um valor a que se dá o nome de tensão admissível ( $\sigma_{adm}$ ) [16].

### 3.2.3.2. Testes de Flexão

Um ensaio de flexão consiste na solicitação de uma deformação paralela à secção transversal do provete, de velocidade constante, estando o provete apoiado em dois pontos a uma distância definida pela norma, como se pode observar na figura 41. Aplica-se força até que o provete quebre ou atinja um valor de deformação predeterminado pela norma.

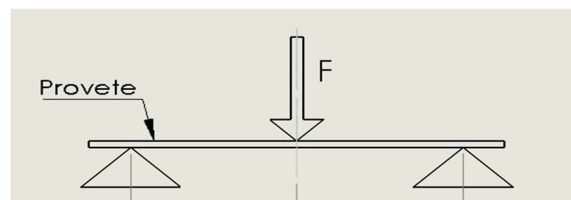


Figura 41 - Esquema de um ensaio de tração em 3 pontos [59].

Os valores devolvidos do ensaio são novamente em força vs alongamento (flecha), que podem ser convertidos em dados de tensão vs deformação através das equações 4 e 5, respetivamente.

$$\sigma_f = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 \times S \times h}{l^2} \quad (5)$$

$b$  representa a largura (mm) e  $h$  a espessura do provete (mm),  $l$  a distância entre apoios (mm) e  $S$  o valor de flecha (mm).

Através de um ensaio de flexão, também é possível obter o módulo de elasticidade à flexão ( $E_f$ ) do material, através da equação 6.

$$E_f = \frac{m \times l^3}{4 \times b \times h^3} \quad (6)$$

Onde,  $m$  representa o declive da tangente à curva força-deflexão (N/mm),  $l$  a distância entre os apoios (mm),  $b$  a largura do corpo de prova (mm) e  $h$  o espessura do provete (mm). [60], [61]

Neste tipo de ensaio, o provete experimenta dois tipos de esforços originados pela flexão. Abaixo da linha média, lado convexo do provete deformado, irá existir tensões de tração, e do lado concavo existirá tensões de compressão (figura 42). Este conjunto de tensões com sentidos opostos irá originar tensão de corte no material.

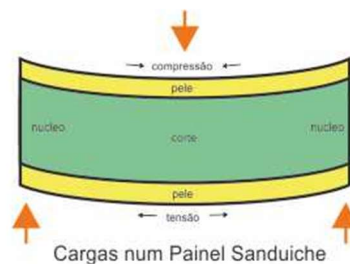


Figura 42- Representação dos tipos de esforços originados pela flexão [62].

No ensaio de flexão em três pontos também se deve utilizar a regressão linear num determinado valor da deformação, em função do material em estudo, para se calcular a tensão de cedência do material, como no ensaio de tração, assim como para calcular o módulo de elasticidade à flexão, determina-se o declive da reta no gráfico tensão-deformação [16].

## 4. Resultados

### 4.1. Produção de provetes em Resina Bio

A resina mostrou ser de fácil processamento, foi possível tirar provetes sem bolhas logo no primeiro vazamento. As medidas dos provetes vazados apesar dos erros associados às várias etapas do processo (acabamentos de forma manual, construção do silicone, contração da resina) apresentaram dimensões dentro das tolerâncias na norma acima citada

Tabela 12 - Dimensões da secção dos provetes de tração (*masters* e peças vazadas).

	Espessura (h)	Largura (b)
Master 1	4.18 mm	10.00 mm
Master 2	4.20 mm	10.10 mm
Master 3	4.19 mm	10.00 mm
Provete de Resina 1	4.12 mm	10.08 mm
Provete de Resina 2	4.11 mm	10.15 mm
Provete de Resina 3	4.12 mm	10.12 mm

### 4.2. Produção de provetes por FDM

Os provetes produzidos em PLA por FDM apresentaram o aspeto superficial desejado, o tempo de produção e quantidade de material não se distanciaram de forma considerável do estimado pelo software *slicer*. Não houve empenos (quer por descolamento do material da plataforma quer por contração após impressão), nem marcas de *stringing*, o que indica que a temperatura e velocidade impressão se adequavam ao objetivo proposto.

A altura de camadas utilizada foi de 0.32 mm, forçando o software *slicer* a “fatiar” o ficheiro 3D dos provetes em camadas de 0.32 mm, prejudicando assim a dimensão do eixo do Z (perpendicular à mesa de construção), como é possível ver na tabela 13. Na tabela, os provetes construídos na vertical estão nomeados por “PLA V” e os provetes construídos na horizontal por “PLA H”.

Tabela 13 - Dimensões da secção dos provetes construídos por FDM.

	Provetes de Tração		Provetes de Flexão	
	Espessura (h)	Largura (b)	Espessura (h)	Largura (b)
PLA V 1	4.09 mm	9.98 mm	3.30	12.65
PLA V 2	4.11 mm	9.99 mm	3.28	12.63
PLA V 3	4.12 mm	10.03 mm	3.31	12.66
PLA H 1	4.20 mm	10.08 mm	3.27	12.80
PLA H 2	4.18 mm	10.15 mm	3.24	12.81
PLA H 3	4.23 mm	10.12 mm	3.25	12.82

Os provetes construídos na vertical apresentam cantos arredondados devido à geometria do bico de impressão, tornando-se ainda mais evidente tendo em conta o seu diâmetro de 0.6 mm, como se pode ver na figura 43, mas que não tem implicação formal nos ensaios a realizar.



Figura 43 - Provetes de PLA construído na vertical

### 4.3. Produção da estrutura compósita do tipo Sandwich

As camadas de fibra e resina aderiram ao PLA permitindo levar a cabo a presente dissertação. Foi inclusive, possível remover com facilidade o excesso de manta de fibra dos provetes sem que esta descolasse, como é possível observar na figura abaixo.



Figura 44 - Provetes de flexão de PLA reforçados com fibras de linho.

As camadas de fibra e resina (uma de cada lado do provete) incrementaram espessura aos mesmos. Na tabela 14, os provetes reforçados construídos na vertical estão nomeados por “Fibras V” e os provetes reforçados construídos na horizontal por “Fibras H”.

Tabela 14 - Dimensões da secção dos provetes de PLA reforçados.

	Provetes de Tração		Provetes de Flexão	
	Largura da secção	Altura da secção	Largura da secção	Altura da secção
Fibra V1	5.15 mm	10.08 mm	12.68 mm	4.30 mm
Fibra V2	5.16 mm	10.10 mm	12.71 mm	4.27 mm
Fibra V3	5.18 mm	10.15 mm	12.73 mm	4.32 mm
Fibra H1	5.31 mm	10.10 mm	12.88 mm	4.23 mm
Fibra H2	5.30 mm	10.18 mm	12.86 mm	4.21 mm
Fibra H3	5.33 mm	10.16 mm	12.84 mm	4.24 mm

#### 4.4. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados com uma distância entre amarras de 110 mm e a velocidade de taxa constante de 2mm/min. Os cálculos realizados para tratamento dos dados fornecidos pelo software da máquina de ensaios (força vs deformação) tiveram em conta as dimensões dos provetes acima apresentadas.

Na figura 45, encontram-se os resultados obtidos, tratados na forma de gráfico de tensão vs deformação, para os provetes de resina, e na figura 46 o gráfico de tensão vs deformação com os restantes resultados.

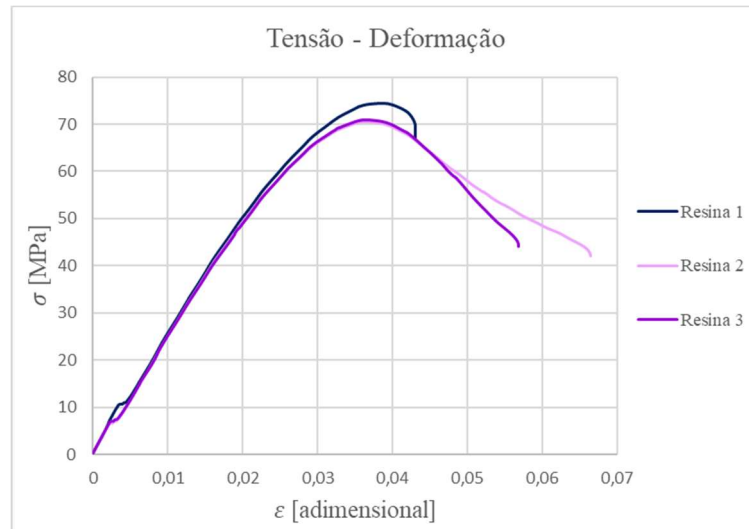


Figura 45 - Gráfico Tensão vs Deformação - ensaios de tração de provetes de resina.

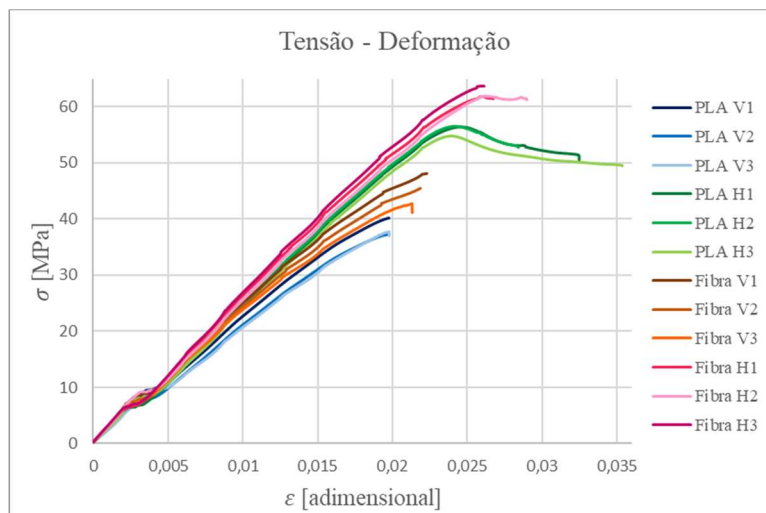


Figura 46 - Gráfico Tensão vs Deformação - Ensaios de Tração - provetes de PLA construídos na vertical e horizontal (PLA V e PLA H, respetivamente) e provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal reforçados com fibras de linho (Fibra V e Fibra H, respetivamente).

Todas as curvas obtidas apresentavam uma zona de comportamento linear, correspondente à zona de comportamento elástico, desta forma, os valores de módulo de *Young* foram retirados a partir do declive da mesma.

De forma a facilitar a análise de dados, os mesmos também foram organizados na forma de tabelas. Na tabela 15, encontram-se os resultados referentes aos provetes de resina.

**Tabela 15 - Resultados dos ensaios de tração da resina bio - GreenPoxy® 56 + Surf Clear**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Resina 1</b>	<b>Resina 2</b>	<b>Resina 3</b>	<b>Média</b>
Módulo de Young, E (MPa)	2959,9	2871,0	2922,7	<b>2917,87</b>
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ (MPa)	74,5	70,5	70,9	<b>71,97</b>
Tensão Última ou Tensão de final, $\sigma_u$ (MPa)	66,90	42,07	44,04	<b>51,00</b>
Alongamento à Força Máxima (%)	3,86	3,64	3,64	<b>3,71</b>
Alongamento à Rotura (%)	4,30	6,64	5,68	<b>5,54</b>

Os resultados dos ensaios de tração executados aos provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, encontram-se na tabela 16 e 17 respetivamente.

**Tabela 16 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na vertical.**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>PLA V1</b>	<b>PLA V2</b>	<b>PLA V3</b>	<b>Média</b>
Módulo de Young, E (MPa)	2722,60	2492,20	2579,60	<b>2598,13</b>
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ (MPa)	40,18	37,22	37,75	<b>38,38</b>
Tensão Última ou Tensão de final, $\sigma_u$ (MPa)	40,18	37,01	37,01	<b>38,07</b>
Alongamento à Força Máxima (%)	1,98	1,96	1,98	<b>1,97</b>
Alongamento à Rotura (%)	1,98	1,96	1,98	<b>1,97</b>

**Tabela 17 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na horizontal.**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>PLA H1</b>	<b>PLA H2</b>	<b>PLA H3</b>	<b>Média</b>
Módulo de Young, E (MPa)	2850,80	2964,30	2913,40	<b>2909,50</b>
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ (MPa)	56,41	56,50	54,78	<b>55,90</b>
Tensão Última ou Tensão de final, $\sigma_u$ (MPa)	50,46	52,74	49,49	<b>50,90</b>
Alongamento à Força Máxima (%)	2,46	2,42	2,39	<b>2,42</b>
Alongamento à Rotura (%)	3,25	2,84	3,54	<b>3,21</b>

Já nas tabelas 18 e 19, encontram-se os resultados que correspondem aos provetes de PLA, construídos em ambas as orientações, reforçados com a manta de fibra de linho e resina bio.

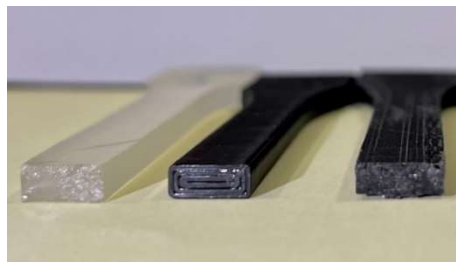
**Tabela 18 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na vertical reforçados com fibra de linho e resina bio.**

Propriedades Mecânicas	Fibra V1	Fibra V2	Fibra V3	Média
Módulo de Young, E (MPa)	3141,50	3011,00	2865,20	<b>3005,90</b>
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ (MPa)	48,11	45,49	42,74	<b>45,44</b>
Tensão Última ou Tensão de final, $\sigma_u$ (MPa)	48,11	45,49	41,14	<b>44,91</b>
Alongamento à Força Máxima (%)	2,23	2,19	2,13	<b>2,18</b>
Alongamento à Rotura (%)	2,23	2,19	2,13	<b>2,18</b>

**Tabela 19 - Resultados dos ensaios de tração de provetes de PLA construídos na horizontal reforçados com fibra de linho e resina bio.**

Propriedades Mecânicas	Fibra H1	Fibra H2	Fibra H3	Média
Módulo de Young, E (MPa)	2910,30	3161,60	2991,20	<b>3021,03</b>
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ (MPa)	61,80	61,88	63,67	<b>62,45</b>
Tensão Última ou Tensão de final, $\sigma_u$ (MPa)	61,42	61,23	63,66	<b>62,10</b>
Alongamento à Força Máxima (%)	2,59	2,62	2,60	<b>2,60</b>
Alongamento à Rotura (%)	2,67	2,90	2,61	<b>2,73</b>

Os provetes de resina, antes da rotura apresentaram um ligeiro estiramento na zona central do provete. Já os restantes provetes apenas apresentaram rotura frágil. Na figura 47, é possível ver as zonas de rotura correspondentes a um provete de resina, a um provete de PLA construído na vertical e, por fim, zona de rotura apresentada por um provete de PLA construído na horizontal. Os provetes impressos na vertical quebraram na zona de união entre camadas. Observando, a olho nu, a zona de rotura do provete impresso na horizontal não é possível identificar as diferentes camadas que o constituem.



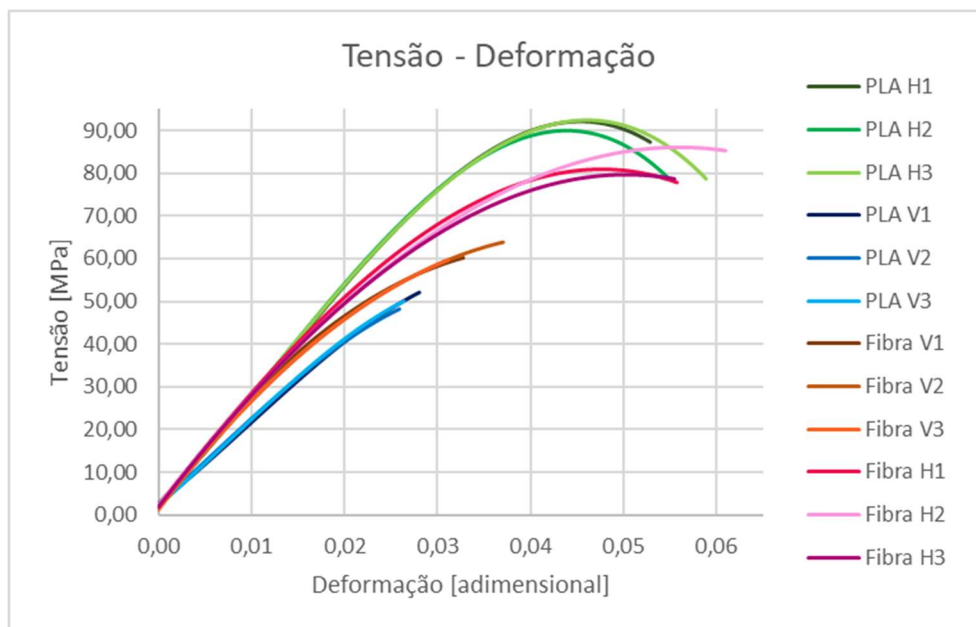
**Figura 47 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de tração.**

## 4.5. Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão, foram realizados com uma distância entre apoios de relação de 1:16 para a espessura apresentada pelos provetes, a uma velocidade de taxa constante de 5mm/s e raios de apoios e punção de 5 mm.

Os cálculos realizados para tratamento dos dados fornecidos pelo software da máquina de ensaios (força vs deformação) tiveram em conta as dimensões dos provetes acima apresentadas.

Na figura 48, encontram-se os resultados obtidos, tratados na forma de gráfico de tensão vs deformação, dos ensaios de flexão.



**Figura 48 - Gráfico Tensão vs Deformação - Ensaios de Flexão - provetes de PLA construídos na vertical e horizontal (PLA V e PLA H, respetivamente) e provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal reforçados com fibras de linho (Fibra V e Fibra H, respetivamente).**

Assim como nos ensaios de tração, todas as curvas obtidas pelos ensaios de flexão também apresentavam uma zona inicial de comportamento linear, correspondente à zona de comportamento elástico, assim sendo, os valores de módulo de *Young* foram também obtidos utilizando o declive destas.

Nas tabelas 20 e 21, estão apresentados os valores das propriedades mecânicas calculadas a partir dos resultados dos ensaios de flexão aos provetes de PLA.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na vertical.

Propriedades Mecânicas	PLA V1	PLA V2	PLA V3	Média
Módulo de <i>Young</i> , E (MPa)	1927,4	1924,6	1869,4	1907,13
Tensão de Flexão, $\sigma_R$ (MPa)	52,10	48,21	50,05	50,12
Tensão Última, $\sigma_u$ (MPa)	52,10	48,21	50,05	50,12
Alongamento à Força Máxima (%)	2,81	2,59	2,64	2,68
Alongamento à Rotura (%)	2,71	2,59	2,62	2,64

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na horizontal.

Propriedades Mecânicas	PLA H1	PLA H2	PLA H3	Média
Módulo de <i>Young</i> , E (MPa)	2575,1	2594,5	2613	2594,20
Tensão de Flexão, $\sigma_R$ (MPa)	92,11	89,96	92,40	91,49
Tensão Última, $\sigma_u$ (MPa)	87,27	78,83	78,69	81,60
Alongamento à Força Máxima (%)	5,29	5,48	5,89	5,55
Alongamento à Rotura (%)	4,71	4,96	5,50	5,06

As propriedades mecânicas que dizem respeito aos provetes de PLA reforçados com fibra de linho e resina bio, encontram-se nas tabelas 22 e 23.

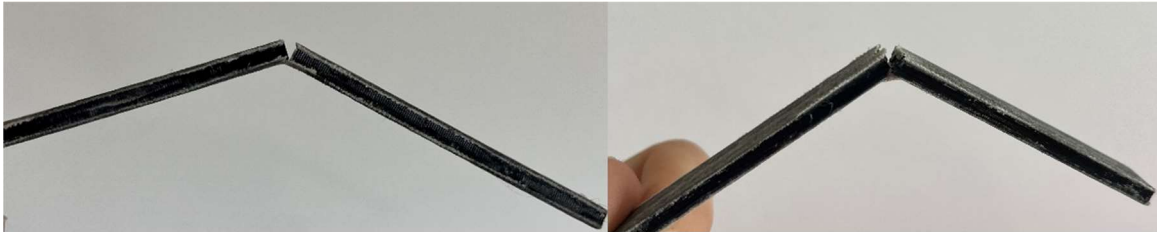
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na vertical reforçados com fibra de linho e resina bio

Propriedades Mecânicas	Fibra V1	Fibra V2	Fibra V3	Média
Módulo de <i>Young</i> , E (MPa)	2757,8	2679,6	2586	2674,47
Tensão de Flexão, $\sigma_R$ (MPa)	60,19	63,86	59,72	61,26
Tensão de Rotura, $\sigma_r$ (MPa)	60,19	63,86	59,72	61,26
Alongamento à Força Máxima (%)	3,28	3,71	3,12	3,37
Alongamento à Rotura (%)	3,26	3,62	3,08	3,32

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de flexão de provetes de PLA construídos na horizontal reforçados com fibra de linho e resina bio

Propriedades Mecânicas	Fibra H1	Fibra H2	Fibra H3	Média
Módulo de <i>Young</i> , E (MPa)	2715	2760,6	2721,5	2732,37
Tensão de Flexão, $\sigma_R$ (MPa)	78,28	78,19	76,31	77,59
Tensão última, $\sigma_u$ (MPa)	76,14	86,06	64,44	75,55
Alongamento à Força Máxima (%)	5,77	5,58	5,55	5,63
Alongamento à Rotura (%)	5,35	5,11	5,45	5,30

Os ambos os tipos de provetes reforçados, apresentaram rotura do núcleo, da estrutura sandwich, e de apenas uma das camadas de reforço. A camada de reforço correspondente ao lado concavo, lado que sofreu tensões de compressão, não quebrou, como se pode ver na figura 49.



**Figura 49 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de flexão. À esquerda está um provete reforçado construído na vertical e à direita um provete reforçado construído na horizontal.**

Na figura 50, pode-se observar a zona de rotura dos provetes de PLA, sem reforço. Os provetes de PLA construídos na vertical quebraram pela união entre camadas. Na zona de rotura dos provetes construídos na horizontal, ao contrário do sucedido nos ensaios de tração, já é possível distinguir, a olho nu, as diferentes camadas que constituem o mesmo, assim como é possível distinguir a zona de preenchimento das linhas exteriores de contorno.



**Figura 50 - Tipos de quebra obtidos durante os ensaios de flexão**

## 5. Discussão de Resultados

Em relação aos provetes vazados, a cor da resina foi de acordo com o que estava apresentado na ficha técnica assim como as condições de processamento. Não foi necessário fazer nenhum ajuste ao procedimento sugerido pela ficha técnica da mesma. É só de notar que o cheiro da resina é bastante intenso em comparação com outras resinas.

Comparando os valores dos ensaios de tração da resina com os apresentados na ficha técnica da mesma, é de referir que o comportamento foi mais dúctil que o esperado, os valores de alongamento à força máxima e de alongamento à rotura na ficha técnica eram ambos de 1.6% e os resultados obtidos foram em média de 3.7% e de 5.5%, respetivamente.

Os valores de módulo de *Young* apesar de distintos, foram mais próximos que os valores de alongamento, sendo que, o valor obtido foi 9.6% inferior ao esperado. O valor de resistência à tração foi 30.5% superior e o valor de tensão de rotura superior 3.9%.

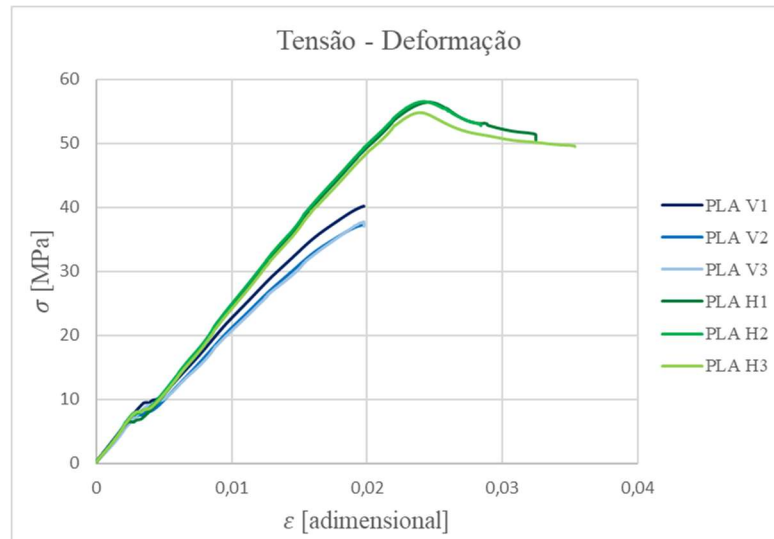
Observando as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e flexão dos provetes de PLA com e sem reforço, é notório que há uma maior resistência dos provetes quando o esforço é perpendicular à direção de construção dos mesmos.

Comparando os valores médios, obtidos nos ensaios de tração, obteve-se um aumento de 11.98% no valor de módulo de *Young* para provetes construídos na horizontal (provetes H), sem reforço, em relação aos construídos na vertical (provetes V), também sem reforço. E apenas um aumento de 0.5%, comparando ambos os tipos de provetes reforçados. O reforço fez variar o valor de E, 15.7% em provetes contruídos na vertical e 3.83% em provetes construídos na horizontal.

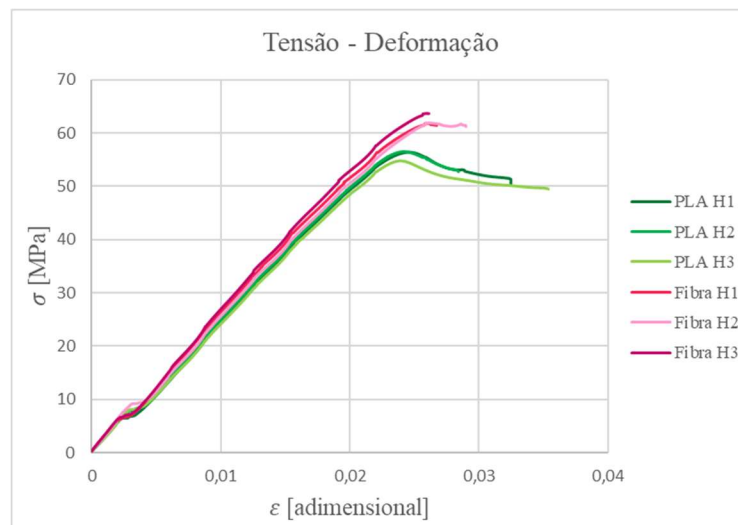
O valor de tensão de resistência à tração, assim como o módulo de *Young* também aumentou com a aplicação do reforço, tendo aumentado 18.4% para provetes V. e 11.7% para provetes H.

A tensão de rotura à tração é muito próxima dos valores de tensão máxima. A rotura ocorreu muito próximo de se atingir a tensão máxima. Prova disso, são as percentagens médias obtidas de alongamento à tensão máxima e de alongamento à rotura, de 2.3% e 2.5%, respetivamente.

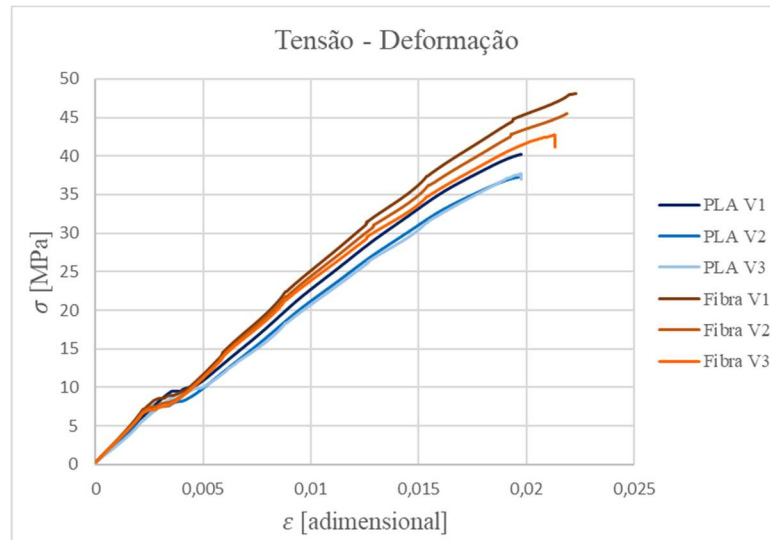
De forma a comparar de uma forma mais fácil e gráfica as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração aos diferentes materiais, pode-se observar os gráficos das figuras 51, 52, 53 e 54.



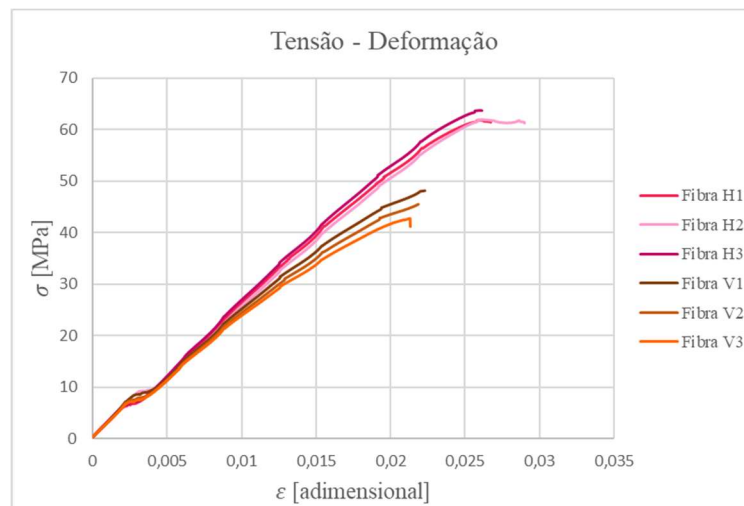
**Figura 51 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, sem reforço.**



**Figura 52 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na horizontal com e sem reforço.**



**Figura 53 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical com e sem reforço**



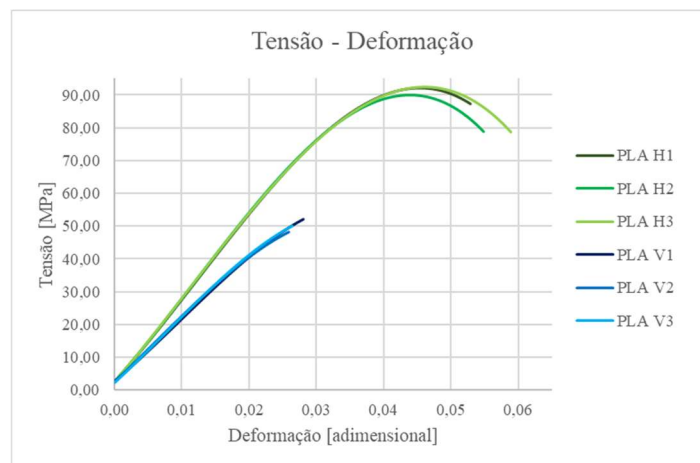
**Figura 54 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, com reforço**

Por fim, comparando os valores médios, obtidos nos ensaios de flexão obteve-se um aumento de 26.4% no valor de módulo de *Young* para provetes H., sem reforço, em relação aos provetes V., também sem reforço. E apenas um aumento de 2.12%, comparando ambos os tipos de provetes reforçados. O reforço fez variar o valor de E, 28.7% em provetes contruídos na vertical e 5.1% em provetes contruídos na horizontal.

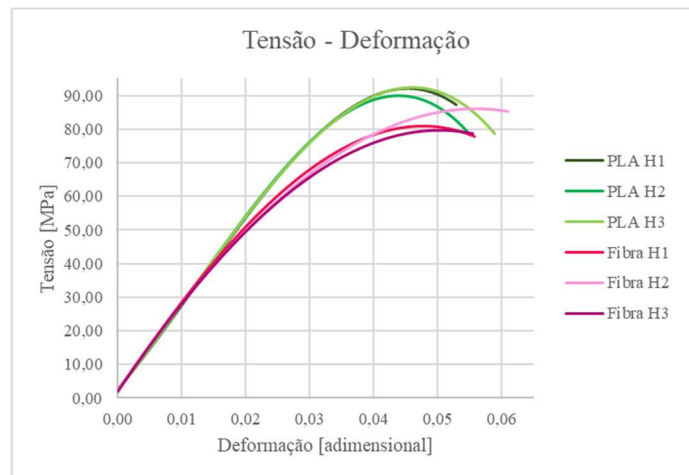
O valor de tensão à flexão, aumentou com a aplicação do reforço para provetes V. 18.2%, no entanto, fez diminuir 11.7% para provetes H.

A tensão à flexão, mais uma vez, manteve-se sempre muito próxima dos valores de tensão máxima. As percentagens médias obtidas de alongamento à tensão máxima e de alongamento à rotura, foram de 2.98% e de 3.03%, respetivamente, para provetes V (com e sem reforço) e de 5.18% e 5.59%, para provetes H (com e sem reforço).

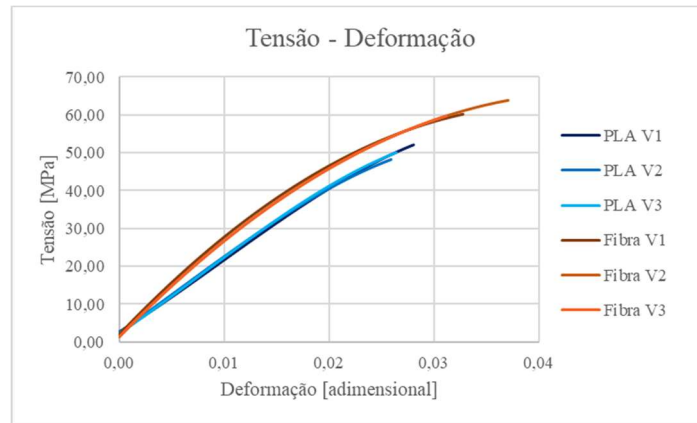
Novamente de forma a comparar de uma forma mais fácil e gráfica as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de flexão aos diferentes materiais, pode-se observar os gráficos das figuras 55, 56, 57 e 58



**Figura 55 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA construídos na vertical e na horizontal, sem reforço.**



**Figura 56 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA construídos na horizontal, com e sem reforço.**



**Figura 57 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA construídos na vertical, com e sem reforço.**

## 6. Conclusões

O fabrico aditivo é claramente um processo de fabrico com muitas vantagens para oferecer à indústria e à sociedade no geral, pois já existem equipamentos a preços acessíveis e também já é possível contruirmos a nossa própria máquina de fabrico aditivo (*RepRap*).

O conhecimento das propriedades mecânicas de um material, seja este simples ou compósito, é fundamental para que se possa dimensionar com segurança peças produzidas por fabrico aditivo.

A orientação de construção no fabrico de peças por FDM, mostrou mais uma vez ser um fator muito importante no comportamento das peças finais, no entanto, foi possível ver a redução desse impacto com a aplicação de fibras.

A boa adesão da manta de fibra de linho com resina bio ao PLA, sem a necessidade de recorrer a adesivos, validou a possibilidade de usar este tipo reforço em peças contruídas por FDM.

O entendimento do comportamento mecânico de uma peça construída por FDM, permite que indústrias como a dos transportes, de equipamentos industriais, indústria automóvel e a indústria médica, na construção de próteses ou aparelhos ortopédicos personalizados, à sua utilização em serviço.

As possíveis limitações poderão ser a temperatura de serviço (devido ao núcleo de matriz polimérica) e a existência de porosidade, que inviabilizará a sua utilização em peças onde a estanquicidade seja requisito e são zonas onde há mais probabilidade de se iniciarem fissuras e propagarem fendas.

Desta forma, cumpriu-se com um dos objetivos propostos que se baseava em validar a utilização de fibras de linho como reforço de peças produzidas em PLA por FDM, avaliando não só o impacto do reforço, mas também da orientação de construção das peças.

Em relação, à utilização da resina bio para vazamento em moldes de silicone sob vácuo, o seu modo de processamento também ficou validado, no entanto, os resultados obtidos foram distintos aos mencionados na ficha técnica do material.

Com a medição dos provetes vazados, foi possível validar também a possível utilização da resina em peças onde as tolerâncias dimensionais sejam pequenas, pois as dimensões dos provetes vazados foram muito próximas das dimensões dos provetes utilizados como masters.

Assim, faz sentido continuar a explorar diferentes combinações de biopolímeros com reforços de fibras naturais, pois essas combinações podem ser integradas em produtos funcionais.

### **6.1.Trabalhos Futuros:**

Como trabalhos futuros, de forma a complementar este trabalho, sugiro:

- Fazer variar as percentagens de preenchimento do núcleo para percentagens mais baixas e estudar as propriedades mecânicas dos compósitos resultantes.

## Bibliografia

- [1] S. Mudgal, K. Muehmel, E. Hoa, M. Grémont, and E. Labouze, “Options to improve the biodegradability requirements in the Packaging Directive,” no. February, pp. 1–158, 2012.
- [2] J. Geraldo, C. Pradella, and S. Paulo, “Biopolímeros e Intermediários Químicos,” 2006.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Direct Digital Manufacturing,” in *Additive Manufacturing Technologies*, New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 375–397. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3\_16.
- [4] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J. G. Steingrímsson, and S. Thiede, “Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications,” *J Clean Prod*, vol. 107, pp. 615–625, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- [5] A. Majeed, Y. Zhang, S. Ren, J. Lv, T. Peng, S. Waqar, and E. Yin, “A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 67, no. February 2020, p. 102026, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102026.
- [6] F. J. L. Alves, F. J. S. Braga, M. S. Simão, R. J. de L. Neto, and T. M. G. P. Duarte, *Proclick*. Porto, 2001.
- [7] “ISO/ASTM 52900:2015.” pp. 1–19, 2015.
- [8] A. Ambrosi and M. Pumera, “3D-printing technologies for electrochemical applications,” *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 10. Royal Society of Chemistry, pp. 2740–2755, May 21, 2016. doi: 10.1039/c5cs00714c.
- [9] M. Q. Khairuzzaman, “Estudo e Diagnóstico das Oportunidades da Manufatura Aditiva Metálica para o setor Aeroespacial da Região Sudoeste,” vol. 4, no. 1, pp. 64–75, 2016.
- [10] P. Maldonado, “A utilização do fabrico aditivo no desenvolvimento de componente para a indústria automóvel,” p. 90, 2019.
- [11] M. Pagac, J. Hajnys, Q. P. Ma, L. Jancar, J. Jansa, P. Stefek, and J. Mesicek, “A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/polym13040598.
- [12] “International Standard ISO 17296-2,” 2015.

- [13] EMETRÊS, “FFF vs. FDM vs. MEX - Significado dos Principais Acrónimos Usados no Mundo da Impressão 3D - EMETRÊS.” Accessed: Mar. 21, 2024. [Online]. Available: [https://emetres.pt/fff-vs-fdm-vs-mex-significado-dos-principais-acronimos-usados-no-mundo-da-impressao-3d/?doing\\_wp\\_cron=1711061539.7741088867187500000000](https://emetres.pt/fff-vs-fdm-vs-mex-significado-dos-principais-acronimos-usados-no-mundo-da-impressao-3d/?doing_wp_cron=1711061539.7741088867187500000000)
- [14] J. D. Loureiro, “Tecnologias de Fabrico Aditivo em Produção de Alimentos Caso de estudo | Alimentos para Idosos com Disfagia,” Dissertação, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2022.
- [15] J. Garcia, “FFF vs FDM: Is there any difference? - Maker Industry.” Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: [https://makerindustry.com/fff-vs-fdm/?utm\\_content=cmp-true](https://makerindustry.com/fff-vs-fdm/?utm_content=cmp-true)
- [16] P. E. M. F. Garcia, “Caracterização das propriedades mecânicas do Nylon 12CF utilizado no processo MEX,” Projeto de Tese em Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2023. doi: 10.13140/RG.2.2.23379.18724.
- [17] “RepRap.” Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [18] V. Shanmugam, O. Das, K. Babu, U. Marimuthu, A. Veerasimman, D. J. Johnson, R. E. Neisiany, M. S. Hedenqvist, S. Ramakrishna, and F. Berto, “Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials,” *Int J Fatigue*, vol. 143, pp. 142–1123, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106007.
- [19] jornalelite, “Tipos de Impressoras 3D FDM: Delta, Cartesiano, Polar e Braço Robótico – Jornal Tropa de Elite.” Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.jornaltropadeelite.com.br/tipos-de-impressoras-3d-fdm-delta-cartesiano-polar-e-braco-robotico/>
- [20] J. T. F. de Abreu, “Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta,” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2017.
- [21] 3Dnatives, “The Types Of FDM 3D Printer - 3Dnatives.” Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>
- [22] Z. Fischer, T. Lee, and L. Sullivan, “Palm Print: Handheld 3D Printer,” A Major Qualifying Project, WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, WORCESTER.
- [23] SyBridge Technologies, “Fused Deposition Modeling (FDM) Design for Manufacturing Guide - SyBridge Technologies.” Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://sybridge.com/fdm-design-for-manufacturing-guide/>

- [24] Simplyfy 3D, “Print Quality Guide | Simplify3D Software.” Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>
- [25] B. M. D. S. André Filipe, “Impressora FDM tipo Delta: estudo de impressão de cor e comparação de propriedades,” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2018.
- [26] Filament2print, “A importância da isotropia na impressão 3D.” Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: [https://filament2print.com/pt/blog/91\\_isotropia-impresao-3d.html](https://filament2print.com/pt/blog/91_isotropia-impresao-3d.html)
- [27] V. Schöppner and A. Bagsik, “Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ULTEM\*9085,” Paderborn, Jan. 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/284341800>
- [28] 3Dlab, “Raft 3D, Brim ou Skirt? Entenda a diferença entre esses recursos!,” 2019. Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://3dlab.com.br/diferencas-entre-raft-3d-brim-e-skirt/>
- [29] N. H. Yusoff, K. Pal, T. Narayanan, and F. G. de Souza, “Recent trends on bioplastics synthesis and characterizations: Polylactic acid (PLA) incorporated with tapioca starch for packaging applications,” *J Mol Struct*, vol. 1232, p. 129954, 2021, doi: 10.1016/j.molstruc.2021.129954.
- [30] C. A. Correia, “Obtenção e caracterização de PLA reforçado com nanocelulose,” Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [31] N. K. Kalita, A. Sarmah, S. M. Bhasney, A. Kalamdhad, and V. Katiyar, “Demonstrating an ideal compostable plastic using biodegradability kinetics of poly(lactic acid) (PLA) based green biocomposite films under aerobic composting conditions,” *Environmental Challenges*, vol. 3, no. January, p. 100030, 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100030.
- [32] A. D. C. S. Netto, L. Santana, I. Pereira, R. A. Paggi, and D. C. Lencina, “Avaliação de corpos de prova produzidos em PLA por manufatura aditiva por extrusão e moldagem por injeção,” Lisboa, 2017.
- [33] T. N. B. de A. B. Zão, “Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polímeros bio-derivados reforçados com fibras para aplicações estruturais,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2018.
- [34] M. Wortmann and N. Frese, “Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review,” *Applied Research*, vol. 1, no. 1–2, Jun. 2022, doi: 10.1002/appl.202100012.

- [35] “Produção Rápida - Grandesign.” Accessed: Feb. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.grandesign.pt/pt/producao-de-pequenas-series/>
- [36] C. A. B. Capela, “Processamento de Plásticos e Materiais Compósitos: Comportamento Mecânico de componentes em serviço,” Candidatura Título de Especialista, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2010.
- [37] Sicomin, “GREENPOXY® BIO-BASED SYSTEMS SUSTAINABLE MATERIALS WITH UNCOMPROMISING PERFORMANCE,” 2024. [Online]. Available: [www.sicomin.com](http://www.sicomin.com)
- [38] S. de M. Tomar, “Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Origem Natural,” Trabalho Final de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2018.
- [39] fibrenamics, “Materiais Compósitos: O Que são e Quais as Suas Propriedades?” Accessed: Mar. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.fibrenamics.com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades>
- [40] A. T. Bhatt, P. P. Gohil, and V. Chaudhary, “Primary Manufacturing Processes for Fiber Reinforced Composites: History, Development & Future Research Trends,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/330/1/012107.
- [41] M. A. D. S. Venâncio, “Comportamento de estruturas compósitas usando uma abordagem multicamada,” Trabalho Final de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017.
- [42] H. P. Da Silva, “Comportamento Mecânico de compósitos de fibra de Vidro/Epoxy Nano-reforçados,” Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.
- [43] A. S. Getme and B. Patel, “A review: Bio-fiber’s as reinforcement in composites of polylactic acid (PLA),” *Mater Today Proc*, vol. 26, pp. 2116–2122, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.457.
- [44] E. Haq, A. Saifullah, A. Habib, A. Y. M. A. Azim, S. Alimuzzaman, H. N. Dhakal, and F. Sarker, “Improved mechanical properties of environmentally friendly jute fibre reinforced metal laminate sandwich composite through enhanced interface,” *Heliyon*, vol. 10, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24345.
- [45] A. Karimah, M. R. Ridho, S. S. Munawar, D. S. Adi, Ismadi, R. Damayanti, B. Subiyanto, W. Fatriasari, and A. Fudholi, “A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 13. Elsevier Editora Ltda, pp. 2442–2458, Jul. 01, 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.014.

- [46] P. V. Souto, “Capítulo\_Linho,” *Guia de Turismo Científico de Guimarães*, vol. 203. 2009.
- [47] S. Maurício, “PLA 4032D - Ficha Técnica,” Leiria, Jun. 2021.
- [48] Sicomin, “SR\_GreenPoxy\_56\_SD\_SC\_FT\_Fr.” Mar. 14, 2016. [Online]. Available: <https://www.boutique-resine-epoxy.fr/en/bio-based-epoxy-resin/352-epoxy-resin-greenpoxy-56-hardener-sd-surf-clear.html>
- [49] Rebelco, “TecidoLinho 2125-1610 .” 2024.
- [50] Renishaw, “Silicone rubber VTV 800,” 2018. [Online]. Available: [www.renishaw.com/additive](http://www.renishaw.com/additive)
- [51] ZwickRoell, “Ensaio de tração - plásticos - ISO 527-1| ISO 527-2 | ZwickRoell.” Accessed: Mar. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/ensaio-de-tracao-iso-527-1-2/>
- [52] International Organization for Standardization, “International Standard ISO 527-2,” Feb. 2012.
- [53] T. Letcher and M. Waytashek, “Material property testing of 3D-printed specimen in pla on an entry-level 3D printer,” *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, vol. 2A, no. February, 2014, doi: 10.1115/IMECE2014-39379.
- [54] Garmade, “CREALITY CR-10 Max 750W Automatic Leveling Golden Triangle DIY 3D Prin – Garmade.” Accessed: Mar. 09, 2024. [Online]. Available: [https://garmade.com/en-pt/products/creality-cr-10-max-750w-automatic-leveling-golden-triangle-diy-3d-printer-print-size-45-x-45-x-47cm-eu-plug?variant=40644932960413&utm\\_medium=cpc&utm\\_source=google&utm\\_campaign=Google+Shopping&stkn=184cbace4266&gad\\_source=1&gclid=EA1aIQobChMIqf7L4JrnhAMVhQgGAB2ALAdAEAQYAIAiABEgIpSfD\\_BwE](https://garmade.com/en-pt/products/creality-cr-10-max-750w-automatic-leveling-golden-triangle-diy-3d-printer-print-size-45-x-45-x-47cm-eu-plug?variant=40644932960413&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Google+Shopping&stkn=184cbace4266&gad_source=1&gclid=EA1aIQobChMIqf7L4JrnhAMVhQgGAB2ALAdAEAQYAIAiABEgIpSfD_BwE)
- [55] “Laminação por Vacuum Bag - Manual de Construção de Barcos.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/laminacao-por-vacuum-bag/>
- [56] Biopdi, “Ensaio de tração | Ensaio de materiais | Biopdi.” Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://biopdi.com/ensaio-de-tracao/>
- [57] ADMET, “Tensile Testing,” Testing Application. Accessed: Mar. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.admet.com/testing-applications/test-types/tension-testing/>
- [58] International Organization for Standardization, “International Standard ISO 527-1,” Feb. 2012. [Online]. Available: [www.iso.org](http://www.iso.org)

- [59] F. Cardona, “Estudo da Produção de Towpreg e Transformação por Pultrusão,” no. November 2015, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.2496.9845.
- [60] F. Alexandre and M. Carvalho, “Estudo de Materiais de Matriz Polimérica Reforçados Com Cargas Recicláveis,” 2020.
- [61] ASTM International, “D790-10 | Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,” May 2013. doi: 10.1520/D0790-10.
- [62] OXY, “Laminados e Sanduiches - Loja Fibra de Carbono.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.lojadafibradecarbono.pt/2020/02/15/laminados-e-sanduiches/?v=35357b9c8fe4>