



# **Estudo Termomecânico de Compósitos de Base Orgânica**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Inês Marques Martins

Leiria, junho de 2025



# **Estudo Termomecânico de Compósitos de Base Orgânica**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Inês Marques Martins

Trabalho de Projeto realizada o sob a orientação da Professora Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves e do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, ambos Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, junho de 2025

# **Originalidade e Direitos de Autor**

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o 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 o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2024/2025, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, professora Leopoldina Alves e ao professor Joel Vasco, pela orientação, paciência e apoio fundamentais ao longo deste trabalho. A sua experiência e disponibilidade foram essenciais para a conclusão deste projeto bem como todos os desafios que me propuseram

Ao Instituto Politécnico de Leiria, e em especial à Escola Superior de Tecnologia e Gestão, pelo acesso aos espaços laboratoriais e equipamentos, fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradecer também à Engenheira Fernanda Carvalho e ao Engenheiro Jorge Domingues, técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo suporte técnico prestado durante todo o processo laboratorial, essenciais para o sucesso dos resultados obtidos. À doutora Margarida Franco, pelo acompanhamento e orientação no CDRSP (Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentável do produto), o meu reconhecimento pelo contributo indispensável ao desenvolvimento desta investigação e manuseio dos aparelhos.

À Amorim Cork Composites, deixo o meu agradecimento pela prontidão na disponibilização da cortiça, elemento central deste projeto.

Aos meus pais, pela força e incentivo contínuos, e à minha irmã, pelo exemplo de perseverança que sempre demonstrou.

Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho, pelo apoio e motivação constantes, que foram fundamentais para ultrapassar os desafios deste percurso.

# Resumo

A utilização de materiais compósitos tem vindo a ganhar interesse em diversos setores industriais, devido à sua versatilidade e à possibilidade de oferecer um bom equilíbrio entre propriedades mecânicas, peso e sustentabilidade, em comparação com materiais convencionais. Nesse contexto, a cortiça, aliada a uma matriz polimérica de PLA (ácido polilático), apresenta-se como uma alternativa sustentável para a fabricação de peças, combinando leveza, resistência e menor impacto ambiental.

Neste projeto investigou-se a influência da incorporação de cortiça num compósito de base orgânica, PLA, comparando este material com o PLA virgem. Foram analisados dois processos de fabrico: moldação por injeção e fabricação por fusão de filamento (FFF), de modo a compreender as diferenças no desempenho mecânico e térmico dos materiais utilizados.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente para entender as propriedades da cortiça e do PLA, bem como as principais técnicas de processamento utilizadas. Em seguida, foram conduzidos ensaios para avaliar a influência da adição de cortiça nas propriedades termomecânicas de uma matriz de PLA e comparar os resultados entre os dois métodos de fabrico utilizados.

Os resultados demonstraram que a cortiça apresenta potencial para a fabricação de compósitos sustentáveis, influenciando as propriedades do material de forma distinta dependendo do processo de fabrico utilizado. A análise comparativa entre FFF e moldação por injeção permite compreender as vantagens e limitações de cada método, fornecendo informações valiosas para futuras aplicações industriais de compósitos de base orgânica.

Este estudo mostrou que a incorporação de cortiça em compósitos de PLA contribui para a redução da massa e para a sustentabilidade dos materiais, embora o impacto nas propriedades mecânicas varie consoante o processo de fabrico.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos, cortiça, moldação por injeção, fabrico aditivo

# Abstract

The use of composite materials has been gaining interest in various industrial sectors due to their versatility and the ability to offer a good balance between mechanical properties, weight, and sustainability compared to conventional materials. In this context, cork combined with a PLA (polylactic acid) polymer matrix presents itself as a sustainable alternative for manufacturing parts, combining lightness, strength, and lower environmental impact.

This project investigated the influence of incorporating cork into an organic-based composite (PLA), comparing this material with virgin PLA. Two manufacturing processes were analyzed: injection molding and fused filament fabrication (FFF), in order to understand the differences in mechanical and thermal performance of the materials used.

Initially, a comprehensive literature review was carried out to understand the properties of cork and PLA, as well as the main processing techniques used. Then, tests were conducted to assess the influence of cork addition on the thermomechanical properties of a PLA matrix and to compare the results between the two manufacturing methods.

The results showed that cork has potential for the production of sustainable composites, influencing the material properties in distinct ways depending on the manufacturing process used. The comparative analysis between FFF and injection molding helps to understand the advantages and limitations of each method, providing valuable information for future industrial applications of organic-based composites.

This study showed that incorporating cork into PLA composites contributes to weight reduction and material sustainability, although the impact on mechanical properties varies depending on the manufacturing process.

**Keywords:** Composite materials, cork, injection, additive manufacturing

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Estrutura .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Moldação por injeção de termoplásticos .....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Processo convencional de moldação por injeção .....	3
2.1.2. Ciclo de moldação por injeção .....	5
<b>2.2. Fabricação Aditiva .....</b>	<b>7</b>
2.2.1. Fabricação aditiva: Categorias e tecnologias.....	11
<b>2.3. Fabricação por fusão de filamento - <i>Fused Filament Fabrication</i> (FFF).....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Princípios de funcionamento .....	19
2.3.2. Parâmetros de trabalho impressão .....	20
2.3.3. Comparação entre o processo de moldação por injeção e impressão 3D .....	21
<b>2.4. Materiais.....</b>	<b>22</b>
2.4.1. Ácido Polilactico (PLA) .....	23
2.4.2. Cortiça .....	24
2.4.3. Compósitos .....	26
<b>3. Materiais e métodos.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Materiais e métodos para a moldação por injeção .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2. Materiais e métodos para o fabrico aditivo.....</b>	<b>34</b>
<b>4. Procedimentos laboratoriais.....</b>	<b>41</b>

<b>4.1. Propriedades físicas.....</b>	<b>41</b>
4.1.1. Morfologia 3D / Distribuição de Materiais .....	41
<b>4.2. Propriedades térmicas .....</b>	<b>45</b>
4.2.1. Análise termogravimétrica (TGA) .....	45
4.2.2. Calorimetria diferencial de varrimento (DSC).....	48
<b>4.3. Propriedades mecânicas .....</b>	<b>49</b>
4.3.1. Ensaio de Flexão em Três Pontos .....	49
4.3.2. Ensaio de Tração .....	53
<b>5. Análise e Discussão de Resultados .....</b>	<b>57</b>
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>68</b>
<b>7. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>70</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>74</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração de uma injetora de parafuso sem-fim utilizada atualmente [3] .....	5
Figura 2 - Ciclo de moldação [4].....	5
Figura 3 - Fases impressão 3D [14].....	9
Figura 4 - Tecnologias de fabricação 3D.....	11
Figura 5 -Processo de Fotopolimerização em Cuba (Adaptado de [18]).....	12
Figura 6 - Jato de material (adaptado de [18]).....	13
Figura 7 - Jacto de aglutinante (adaptado de [19]).....	14
Figura 8 - Fusão a laser de camada de pó (Adaptado de [19]).....	15
Figura 9 – Laminação de folhas (adaptado de [23]) .....	16
Figura 10 - Deposição direta de energia (adaptado de [19]).....	18
Figura 11 – Extrusão material (Adaptado de [19]).....	18
Figura 12 - Orientação das linhas de preenchimento: a) cruzado (-45°/+45°); b) linear (0°) .....	21
Figura 13 - Orientação de construção: a) Vertical; b) Horizontal.....	21
Figura 14 - Estrutura Química PLA [29].....	24
Figura 15 - Processamento da cortiça [34] .....	25
Figura 16 - Ilustração material compósito [37] .....	26
Figura 17 - Fluxograma processo de obtenção de provetes através da moldação por injeção.....	29
Figura 18 – Processo de peneiração da cortiça .....	30
Figura 19 - Secagem dos materiais na estufa.....	31
Figura 20 – Combinação do Material Compósito 1 (PLA + 30% Cortiça) .....	31
Figura 21 – Combinação do Material Compósito 2 (PLA + 40% Cortiça) .....	31
Figura 22 - Extrusora vertical.....	32
Figura 23 - Novelos do material obtido na extrusora .....	32
Figura 24 – Compósito 1 granulado obtido no processo de extrusão .....	32
Figura 25 - Máquina injeção Lien YU D80.....	33
Figura 26 - Cavidade do molde .....	33
Figura 27 - Provetes injetados (30% cortiça, 39,8% cortiça, PLA virgem).....	34

Figura 28 - Fluxograma processo de obtenção de provetes através da impressão 3D.....	35
Figura 29 - Filamento CorkFill .....	35
Figura 30 - Filamento PLA Ultimaker .....	35
Figura 31 – Impressora Ultimaker S5 .....	36
Figura 32 - Modelação dos provetes para ensaios de tração .....	37
Figura 33 – Modelação dos provetes para ensaios de flexão .....	37
Figura 34 - <i>Slicing</i> provete de tração .....	38
Figura 35 - Impressão CT.2.1 .....	40
Figura 36 - Fluxograma resumo .....	40
Figura 37 - SkyScan 1174 Compact Desk-Top Micro-CT.....	42
Figura 38 – Amostra peça impressa em 3D na máquina de Micro-CT .....	42
Figura 39 - Imagem obtida através de MicroCT do filamento CorkFill, imagem não tratada .....	44
Figura 40 - Imagem obtida através de MicroCT do filamento CorkFill, imagem tratada CTan .....	44
Figura 41 - Morfologia material PLA/Cortiça depois de impresso .....	45
Figura 42 - Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 6000 – PerkinElmer .....	46
Figura 43 - Amostra de uma peça .....	46
Figura 44 - TGA e DSC do filamento CorkFill.....	47
Figura 45 - TGA e DSC do material processado CorkFill .....	47
Figura 46 - Ensaio de flexão num provete de PLA virgem.....	50
Figura 47 - Provetes submetidos ao ensaio de flexão: a) Provetes injetados; b) Provetes de PLA obtidos por FFF; c) Provetes CorkFill obtidos por FFF .....	51
Figura 48 - Gráfico Tensão - Deformação à flexão dos provetes injetados .....	52
Figura 49 - Resultados dos ensaios de flexão dos provetes obtidos por FFF .....	52
Figura 50 - Gráfico tensão-deformação materiais frágeis e dúcteis [43].....	54
Figura 51 - Ensaio de tração.....	55
Figura 52 - Provetes submetidos ao ensaio de tração: a) Provetes injetados; b) Provetes de CorkFill obtidos por FFF; c) Provetes de PLA obtidos por FFF .....	55
Figura 53 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes obtidos por injeção .....	56
Figura 54 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes obtidos por FFF .....	56
Figura 55 -Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA reforçados com cortiça obtidos por injeção .....	57

Figura 56 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão dos provetes obtidos injeção .....	58
Figura 57 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CF.1.1. e CF.1.2) e de PLA (PF.1.1. e PF.1.2.), na orientação horizontal .....	59
Figura 58 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CF.2.1. e CF.2.2) e de PLA (PF.2.1. e PF.2.2.), na vertical .....	59
Figura 59 - Gráfico Tensão Deformação provetes de flexão obtidos por FFF em PLA .....	60
Figura 60 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes PLA reforçado com cortiça, obtidos por FFF e moldação por injeção .....	61
Figura 61 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA reforçados com cortiça obtidos por injeção .....	61
Figura 62 - Comparação de resultados dos ensaios de tração aos provetes obtidos injeção .....	62
Figura 63 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CT.1.1. e CT.1.2) e de PLA (PT.1.1. e PT.1.2.), na horizontal .....	64
Figura 64 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CT.2.1. e CT.2.2) e de PLA (PT.2.1. e PT.2.2.), na vertical.....	64
Figura 65 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes PLA reforçado com cortiça, obtidos por FFF e moldação por injeção .....	66

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Tecnologias da Fusão a laser de camada de pó [21] [22].....	16
Tabela 2 - Parâmetros de trabalho impressão [26] .....	20
Tabela 3 - Comparação entre o processo de moldação por injeção e impressão 3D .....	21
Tabela 4 - Parâmetros usados na injeção .....	34
Tabela 5 - Dimensões provete tração .....	36
Tabela 6 - Parâmetros utilizados FFF .....	39
Tabela 7 - Matriz de designação dos provetes FFF .....	39
Tabela 8 - Propriedades mecânicas provetes injetados .....	63
Tabela 9 - Propriedades mecânicas provetes impressos em 3D .....	65
Tabela 10 - Massa dos provetes injetados .....	66
Tabela 11 - Massa dos provetes impressos em 3D .....	67

## Lista de siglas e acrónimos

BJT	Binder Jetting
CAE	Computer Aided Engineering
CPC	Cork Polymer Composites
DLP	Digital Light Processing
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EBM	Electron Beam Melting
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fabricação por fusão de filamento
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
ISO	International Organization for Standardization
MEX	Material Extrusion
Micro - CT	Micro-computed tomography
MJT	Material Jetting
PLA	Ácido polilático
SHL	Sheet Lamination
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TGA	Thermal gravimetric analysis
VPP	Vat Photopolymerization



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A crescente procura por soluções sustentáveis na indústria tem incentivado o desenvolvimento de novos materiais e processos de fabrico mais ecológicos. A moldação por injeção e a impressão 3D destacam-se como tecnologias utilizadas na produção de peças poliméricas, mas cada uma apresenta desafios específicos. A moldação por injeção, apesar de bastante eficiente para produção em massa, depende maioritariamente de polímeros derivados do petróleo, cuja sustentabilidade é questionável. Por outro lado, a impressão 3D tem a vantagem de reduzir o desperdício de material e permitir a produção de geometrias complexas, mas enfrenta desafios em termos de propriedades mecânicas.

Neste contexto, a introdução de materiais biodegradáveis, como o PLA (ácido polilático), e a incorporação de recursos naturais, como a cortiça, surgem como alternativas para minimizar o impacto ambiental dos polímeros convencionais. No entanto, ainda há um conhecimento limitado sobre o impacto da cortiça nas propriedades termomecânicas dos compósitos de PLA. Assim, este estudo procura avaliar o desempenho destes compósitos e compreender de que forma a escolha do processo de fabrico influencia as suas propriedades, contribuindo para a otimização de materiais sustentáveis para aplicações industriais.

## 1.2. Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal analisar as propriedades de compósitos de base orgânica, com foco na combinação de uma matriz de ácido polilático (PLA) com um reforço de cortiça. A pesquisa explora como os diferentes processos de fabricação, moldação por injeção e fabrico aditivo (FFF), afetam as propriedades desses compósitos. Os objetivos específicos incluem:

- Investigar as propriedades termomecânicas do PLA e da cortiça, tanto individualmente quanto enquanto compósito, com foco na sua resistência, rigidez e comportamento térmico.

- Analisar como a cortiça atua como reforço em compósitos de PLA, observando o impacto nas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.
- Avaliar as diferenças no desempenho dos compósitos fabricados por moldação por injeção e fabrico aditivo, comparando as suas resistência, flexibilidade e estabilidade térmica.
- Comparar os compósitos de PLA com cortiça produzidos pelos dois processos com o material virgem, PLA, avaliando as vantagens e limitações de cada abordagem em termos de propriedades mecânicas.

### **1.3.Estrutura**

O presente documento encontra-se estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2: Estado da Arte, é apresentado o contexto histórico e técnico detalhado sobre a moldação por injeção e impressão 3D. Inclui uma análise do processo convencional de moldação por injeção, incluído o ciclo típico de moldação, e uma introdução à impressão 3D, suas categorias e tecnologias. A tecnologia de fabricação de fusão de filamento (FFF) é abordada em detalhe, e é efetuada uma comparação entre moldação por injeção e impressão 3D.

Já no Capítulo 3: Materiais e Métodos, são descritos os materiais utilizados no estudo e a abordagem metodológica seguida, incluindo os métodos e técnicas para análise e comparação dos processos e materiais.

O Capítulo 4: Procedimentos Laboratoriais detalha os procedimentos laboratoriais utilizados para avaliar as propriedades físicas e mecânicas, incluindo a morfologia 3D, ensaio de flexão e tração.

No Capítulo 5: Análise e Discussão de Resultados são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios e análises.

Por fim, no Capítulo 6: Conclusão, são resumidas as principais conclusões do projeto e sugerem-se pistas para pesquisas futuras.

## 2. Estado da Arte

Neste capítulo é feita uma análise da literatura com a finalidade de introduzir conceitos essenciais ao caso de estudo do presente projeto. Serão abordadas duas tecnologias de fabricação: moldação por injeção e impressão 3D. A comparação entre estas tecnologias fornece uma visão crítica sobre as suas vantagens e limitações em diferentes contextos de produção.

### 2.1. Moldação por injeção de termoplásticos

A moldação por injeção é atualmente uma das técnicas mais utilizadas no fabrico de produtos plásticos em larga escala. Esta permite a produção de uma vasta gama de produtos plásticos, devido à sua capacidade de produção de peças com formas e geometrias complexas, elevada precisão dimensional e bom acabamento superficial, associadas a curtos ciclos de produção. Por este motivo, a maioria dos produtos que se utilizam frequentemente no dia-a-dia (cerca de 33%), tanto em casa como na indústria e nos meios de transporte, são obtidos através desta técnica [1].

O processo de moldação por injeção foi apresentado em 1872 pelos irmãos Hyatt quando patentearam a primeira máquina de injeção nos Estados Unidos. Inicialmente o processo estava restrito à transformação de resinas termoendurecíveis, contudo, com o advento da Segunda Guerra Mundial, a indústria de moldação por injeção de plástico expandiu devido à necessidade de produtos baratos e em grandes quantidades geradas pela guerra, bem como devido ao surgimento dos materiais termoplásticos [1].

Desde então, a técnica de moldação por injeção de termoplásticos tem sido continuamente aprimorada, com melhorias na tecnologia de máquinas, softwares de simulação e controlo de qualidade, sendo atualmente um processo bastante sofisticado e preciso, utilizado em diversas indústrias em todo o mundo.

#### 2.1.1. Processo convencional de moldação por injeção

O processo de moldação por injeção envolve a introdução de material termoplástico plasticizado num molde, seguido pelo arrefecimento e solidificação do material para obter a forma desejada. A máquina injetora desempenha um papel central no processo de moldação

por injeção uma vez que é esta unidade que é responsável por controlar as variáveis do processo, ou seja, fundir o material termoplástico, injetá-lo no molde e aplicar a pressão necessária para preencher completamente o molde e garantir a qualidade do produto [1].

A máquina injetora é composta por vários componentes e sistemas que trabalham em sintonia, e esta pode ser subdividida em duas unidades: a unidade de injeção e a unidade de fecho, tal como representado na Figura 1.

A unidade de injeção tem a responsabilidade de transformar a matéria-prima, por meio de ação mecânica e térmica, preparando-a para ser injetada no molde. Esta unidade é composta por um parafuso sem-fim, colocado dentro do cilindro com resistências elétricas com a função de aquecer o material termoplástico até que ele atinja um estado plasticizado adequado para a injeção. O parafuso de injeção é acionado por um motor e é responsável por mover o material para a frente, em direção à cavidade do molde, proporcionando pressão e taxa de fluxo controlados. O bico de injeção é a parte final da unidade de injeção e permite a passagem do material fundido para o molde, de modo a preencher as cavidades. Esta unidade possui ainda uma tremonha que alimenta a máquina com a matéria-prima [1].

A unidade de fecho da máquina é responsável pela abertura e fecho do molde, bem como pela aplicação da força de fecho necessária para manter o molde fechado durante o processo de injeção. É composta por uma placa estacionária e um cilindro de fixação que sustentam o molde, juntamente com 4 barras de fixação e ainda uma placa móvel e um cilindro hidráulico ou elétrico responsáveis pelo mecanismo de abertura [2].

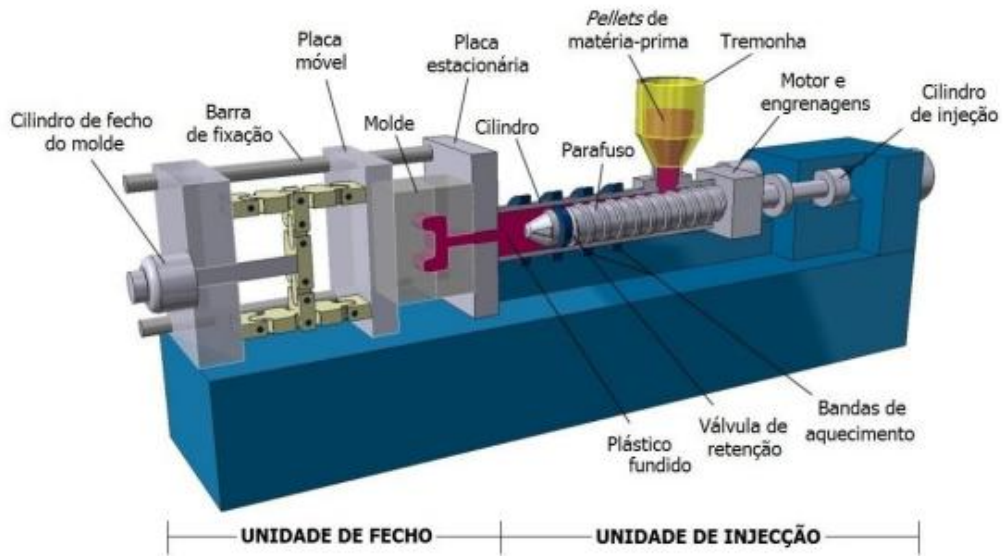


Figura 1 - Ilustração de uma injetora de parafuso sem-fim utilizada atualmente [3]

### 2.1.2. Ciclo de moldação por injeção

O ciclo de moldação refere-se à sequência de etapas que ocorrem durante o processo de injeção, entre a produção de duas peças (ou mais) consecutivas. Na figura 2, representam-se as diferentes fases do ciclo de moldação:

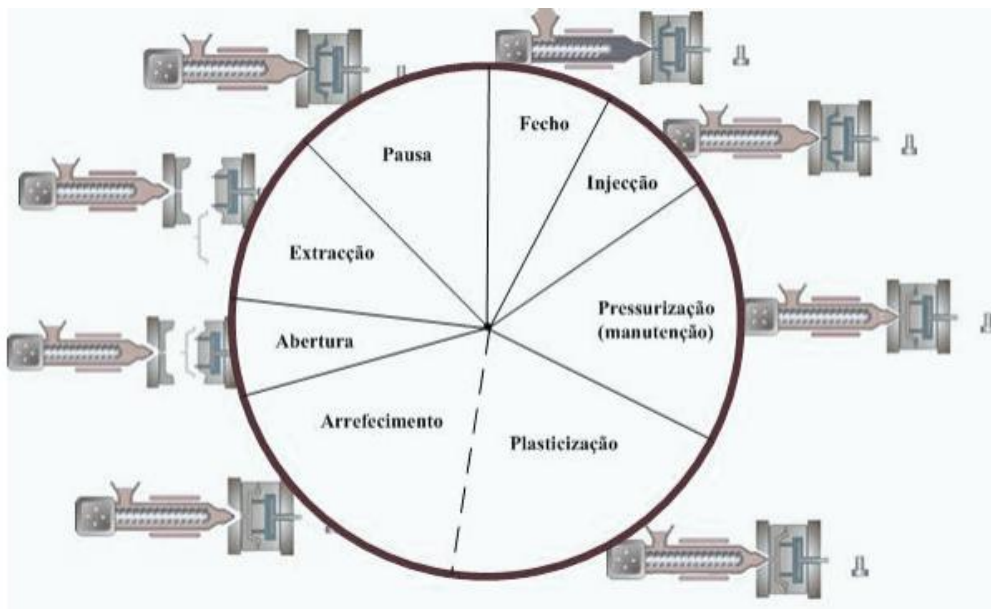


Figura 2 - Ciclo de moldação [4]

- a) A primeira fase refere-se ao fecho do molde, que deve ser o mais rápido possível para minimizar o tempo de ciclo. O intervalo de tempo em que o molde é fechado

está dependente da capacidade da máquina, das características do molde e do curso que tem de percorrer [5].

- b) Na fase de injeção, o material que se encontra no parafuso é empurrado pelo seu movimento linear, forçando-o a entrar no molde pelos canais de alimentação e escoar pelo interior da cavidade. Nesta etapa deve ser controlada a pressão de injeção exercida pelo parafuso no material, uma vez que altas pressões podem originar deformações nas peças obtidas.
- c) Quando a cavidade é totalmente preenchida, o parafuso continua a empurrar para aplicar pressão de modo a compensar a retração do material com o rápido arrefecimento. Esta pressão denomina-se segunda pressão ou pressão de compactação e é iniciada no ponto de comutação. Este ponto é a passagem do controlo de velocidade para pressão, ou seja, é quando a etapa de injeção comandada por velocidade passa a ser comandada em pressão, garantindo com maior repetibilidade o enchimento da cavidade.
- d) O arrefecimento inicia logo que ocorre a entrada de material nas cavidades moldantes, ou a própria peça estejam suficientemente arrefecidas para inibir o fluxo de material e conseqüentemente, o fuso recua num movimento combinado, linear e rotativo, plasticizando o material para o ciclo seguinte [5]. Esta etapa é continuada pelo tempo necessário ao arrefecimento e solidificação do material, garantindo que este possua a resistência mecânica necessária à sua extração do molde, evitando danos nas peças.
- e) Por fim, o molde abre por intermédio dos extratores e a peça é extraída do seu interior. O molde é então fechado e todo o ciclo é repetido.

O processo de moldação por injeção termina com o pós-processamento. Após a moldação, as peças são removidas do molde e passam pela remoção de rebarbas e eventuais processos de acabamento, incluindo polimento e aplicação de revestimentos, quando necessário. Alguns tratamentos térmicos e químicos podem ser realizados posteriormente sobre as peças obtidas. A inspeção e o controlo de qualidade são essenciais para verificar a conformidade

com as dimensões e características desejadas. Com um pós-processamento adequado e um controlo rigoroso durante todas as fases, o processo de moldação por injeção pode produzir peças precisas e de elevada qualidade, prontas para cumprir com exigências do mercado e garantir o desempenho esperado.

## **2.2.Fabricação Aditiva**

A fabricação aditiva ou também vulgarmente designada nos media como por impressão 3D, é o método de construção de objetos tridimensionais pela deposição sequencial de material, em que, camadas individuais são sobrepostas para formar o objeto final. Este processo contrasta com os métodos tradicionais de fabricação, que envolvem a remoção de material (fabricação subtrativa) ou a moldagem de material (fabricação formativa) [6].

A tecnologia de impressão 3D teve origem em 1981, quando Hideo Kodama desenvolveu uma das primeiras máquinas de prototipagem rápida. Essa máquina utilizava uma resina que podia ser polimerizada por luz UV para criar peças camada por camada [7].

Chuck Hull, um físico dos Estados Unidos, marcou outro avanço significativo em 1986 ao obter a primeira patente para a estereolitografia (SLA), uma técnica pioneira no fabrico aditivo. A SLA utiliza um reservatório de resina fotopolimérica líquida sensível aos raios UV e um laser UV para construir peças, camada a camada. Utilizando luz UV para curar polímeros fotosensíveis, as peças são produzidas a partir do reservatório de resina [8].

Hull é reconhecido como o inventor da estereolitografia, devido ao seu papel na criação e popularização desta tecnologia, além de ter contribuído para a criação e comercialização do formato STL (*Standar Tessellation Language*), fundamental para o desenvolvimento da tecnologia [7].

Na mesma época, Carl Deckard licenciou a tecnologia de sinterização seletiva a laser (SLS), que utiliza um laser para sintetizar material em pó em estruturas sólidas.

Em 1989, Scott Crump fundou a Stratasys, uma das principais empresas do setor de fabricação aditiva, e patenteou a modelação por deposição fundida (FDM). Esta abordagem inovadora de Crump envolveu a extrusão de material termoplástico, camada por camada, para criar um modelo físico com base num design digital. Este método marcou uma mudança em relação às técnicas tradicionais de fabrico subtrativo [9].

A década de 1990 assistiu a um grande crescimento da indústria emergente da fabricação aditiva, com novas empresas sendo fundadas e novas tecnologias de fabricação aditiva a serem exploradas [10]. No entanto, foi apenas em 2006 que a primeira impressora SLS (*Selective Laser Sintering*) se tornou comercialmente disponível [11].

O ano de 2005 representou um avanço significativo para a tecnologia de impressão 3D, graças ao surgimento do Projeto RepRap (Replicating Rapid Prototyper), uma iniciativa de código aberto fundada pelo Dr. Adrian Bowyer. O objetivo inicial do projeto era desenvolver uma impressora 3D que fosse capaz de se auto-replicar, ou seja, imprimir a maioria de suas próprias peças. Isto resultou no desenvolvimento da impressora 3D RepRap, que se tornou uma fonte de inspiração para praticamente todas as impressoras 3D de baixo custo bem-sucedidas desde então [11].

O êxito do Projeto RepRap desempenhou um papel crucial no surgimento das impressoras 3D comerciais e conseqüentemente a necessidade de um termo que descrevesse a mesma tecnologia sem infringir a marca registada da Stratasys, assim, a comunidade adotou o termo FFF (*Fused Filament Fabrication*) como uma alternativa genérica e livre de restrições legais. Com a expiração de muitas das patentes relacionadas com o FDM na década de 1980 e, conseqüentemente, a sua entrada no domínio público em 2006, houve um impulso ainda maior na fabricação de impressoras 3D [12]. Um exemplo notável desse crescimento foi a fundação da *Makerbot* em 2009 que teve um impacto significativo ao popularizar a impressão 3D, abrindo as portas tanto para utilizadores profissionais quanto para entusiastas, conhecidos como "*makers*". A empresa oferecia *kits* de montagem de código aberto que permitiam aos clientes construir suas próprias impressoras 3D [13].

Todas as técnicas de impressão 3D iniciam com quatro fases comuns, tal como apresentado na figura 3: modelação CAD, conversão em STL, pré-processamento no software de prototipagem rápida e construção da peça (processo de impressão). O pós processamento é também uma etapa em comum dentro das diferentes técnicas, contudo o mesmo diferencia dependendo da técnica usada.

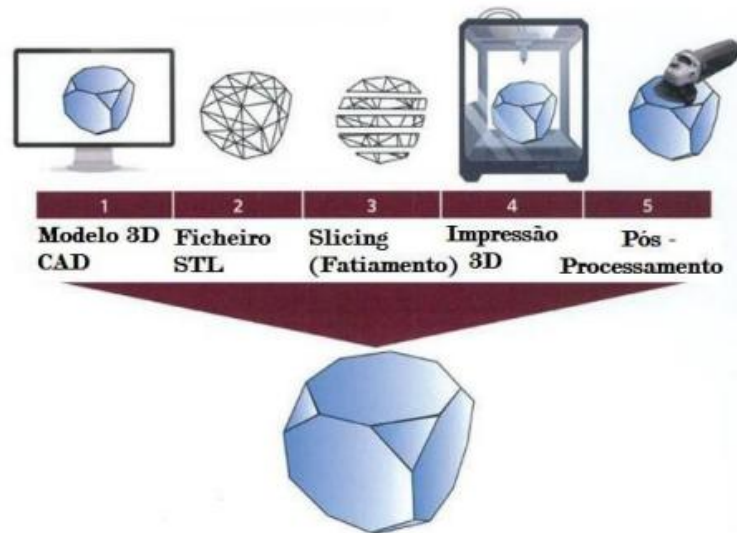


Figura 3 - Fases impressão 3D [14]

### **Etapa 1: *Computer Aided Design* (CAD)**

O processo de fabricação aditiva começa com a obtenção de um modelo 3D. Este modelo pode ser gerado de diversas formas, incluindo o uso de *softwares* de modelação como o *Solidworks*, a aquisição de modelos 3D *online*, ou através de engenharia inversa, que envolve a digitalização de um objeto físico existente, sendo possível também combinar essas técnicas. Em suma, qualquer ferramenta que permita criar uma representação tridimensional digital do objeto ou superfície pode ser utilizada.

### **Etapa 2: Conversão para Standard Triangle Language (STL)**

A maioria dos *softwares* de laminação, ou *slicer*, utiliza o formato de ficheiro STL, que se tornou o padrão atual. Atualmente, muitos *softwares* CAD já conseguem converter diretamente os modelos para este formato. O ficheiro STL descreve as superfícies do objeto através de uma malha de triângulos, obtendo informações de construção e histórico do modelo, e serve como base para o cálculo das secções da peça.

O ficheiro STL criado a partir da malha, contém dados sobre a posição dos vértices de cada triângulo, assim como o vetor normal à sua superfície. O tamanho dos triângulos pode ser ajustado no software, e quanto menores forem os triângulos, maior será a precisão e definição do objeto resultante, oferecendo uma representação mais fiel à realidade [15].

### **Etapa 3: Software de Laminação (*Slicer*)**

Depois de converter o ficheiro para o formato STL, ele deve ser processado por um software de laminação, denominado de *slicer*. Nesse *software*, são configurados os parâmetros de impressão, como a espessura das camadas, a velocidade de impressão, a temperatura da cabeça de extrusão e o padrão de preenchimento (*infill*). O *infill* refere-se ao padrão de preenchimento interno da peça, determinante para a densidade e resistência, o que influencia o comportamento do material durante a impressão. Estes parâmetros afetam diretamente o comportamento do material durante a impressão.

### **Etapa 4: Geração do Código G**

Após o *slicing*, é gerado um ficheiro em código G, que contém as instruções detalhadas sobre o processo de impressão. Código G é uma linguagem de programação que controla os movimentos da máquina durante a impressão e garante que a impressão seja executada de forma precisa e eficiente, transformando o modelo digital num objeto físico [16].

### **Etapa 5: Impressão e remoção**

A impressão da peça é uma etapa autónoma em que a impressora executa todo o processo de forma automática, sem a necessidade de intervenção humana direta. Logo que o ficheiro de código G é gerado e transferido para a máquina, a impressora segue as instruções programadas para construir a peça, camada por camada, de acordo com os parâmetros definidos previamente no *software* de laminação. Durante esta fase, a impressora opera de forma independente, garantindo a fabricação do objeto sem supervisão contínua.

Após a impressão, a peça deve ser removida do equipamento. No caso de impressoras com câmara fechada, é necessário aguardar até que a temperatura dentro da câmara desça para valores seguros, garantindo que os componentes internos e a peça arrefeçam o suficiente para evitar deformações ou risco de queimaduras ao manuseá-la. Além disso, deve-se assegurar que a impressora tenha concluído qualquer movimento ativo antes de abrir a câmara e remover a peça.

### **Etapa 6: Pós processamento**

O pós-processamento refere-se às etapas finais de acabamento das peças produzidas, antes de serem utilizadas. Este processo pode incluir diversos procedimentos, como acabamento abrasivo ou químico, que envolve técnicas de polimento para suavizar e melhorar a aparência

e a qualidade da superfície da peça. Além disso, pode ser necessário aplicar revestimentos específicos para proteger ou melhorar a funcionalidade da peça.

Em alguns casos, o pós-processamento também pode exigir tratamentos químicos ou térmicos para melhorar as propriedades mecânicas e funcionais das peças, atingindo as especificações desejadas para o uso final. Esses tratamentos adicionais são fundamentais para garantir que o produto final tenha as características necessárias para seu desempenho adequado e durabilidade.

### 2.2.1. Fabricação aditiva: Categorias e tecnologias

Durante o desenvolvimento da tecnologia de fabricação aditiva, foram utilizados inúmeros termos e definições diferentes, muitas vezes fazendo referência a áreas de aplicação específicas e marcas registradas. Em resposta a isso, foi desenvolvida uma norma conjunta entre a ASTM e a *International Organization for Standardization* (ISO), estabelecendo os termos utilizados no Fabrico Aditivo, conhecida como ISO/ASTM 52900 [6].

O objetivo desse documento é fornecer uma compreensão básica dos princípios fundamentais dos processos de fabricação aditiva e, com base nisso, fornecer definições claras para termos e nomenclatura associados à tecnologia de fabricação aditiva.

A norma ISO/ASTM 52900:2021 veio estabelecer sete categorias, ilustradas na figura 4, para diferenciar todas as tecnologias de fabricação aditiva.

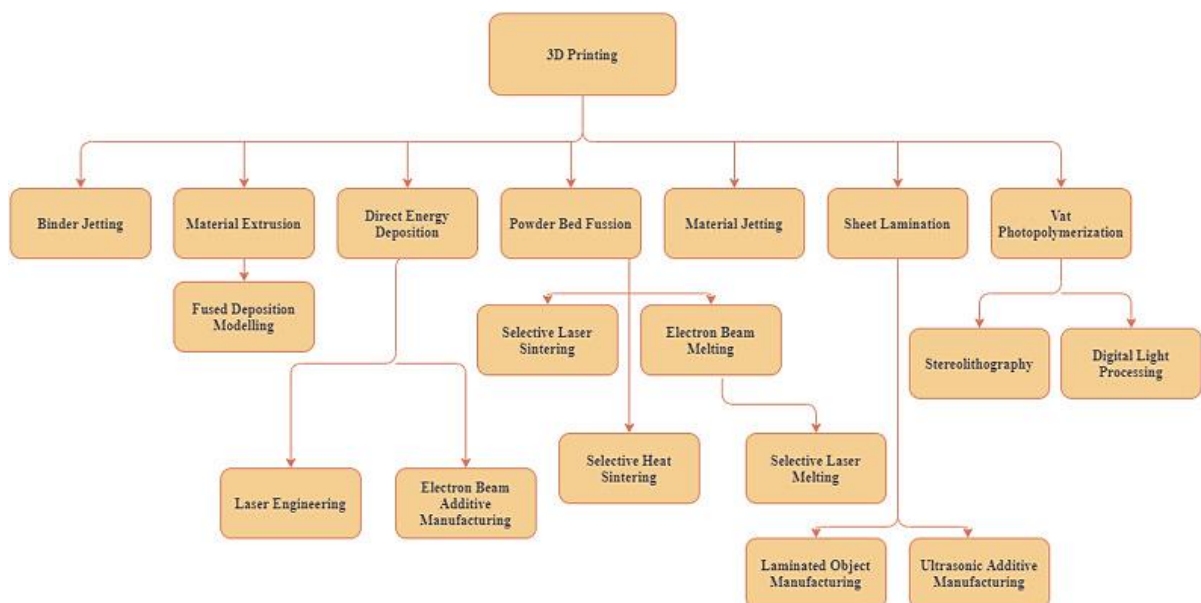


Figura 4 - Tecnologias de fabricação 3D

### Fotopolimerização em Cuba - *Vat Photopolymerisation (VPP)*

A fotopolimerização em cuba é uma das tecnologias de fabrico aditivo mais populares tendo atraído a atenção da área académica e também da indústria devido à sua elevada velocidade, alta precisão e ampla aplicação [17]. VPP é uma tecnologia de impressão 3D em que uma resina líquida fotossensível que está numa cuba é seletivamente curada por polimerização ativada por luz, camada por camada [6].

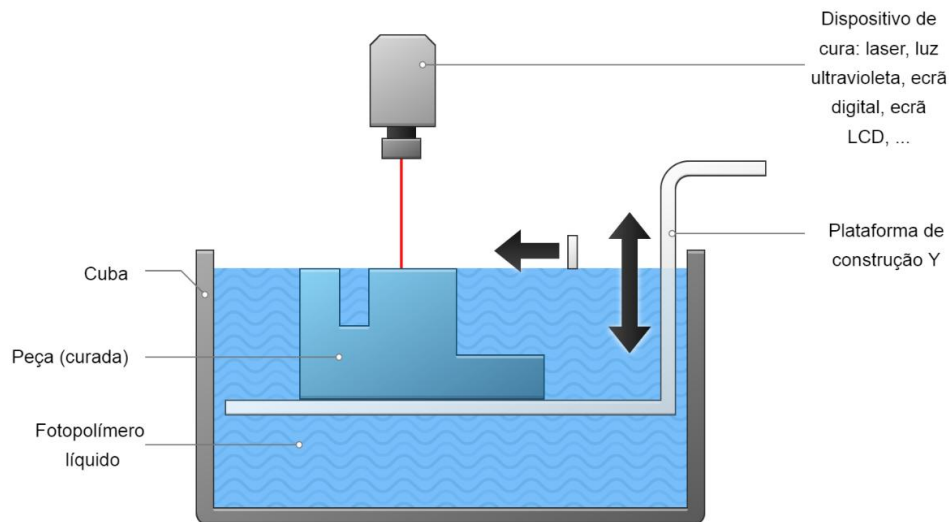


Figura 5 -Processo de Fotopolimerização em Cuba (Adaptado de [18])

Nesse processo, a plataforma de construção desce a partir do topo da cuba de resina não valor da espessura de cada camada. Uma luz UV solidifica (cura) a resina, camada por camada, enquanto a plataforma continua a descer e novas camadas são formadas sobre as anteriores. No fim, a cuba é esvaziada e o objeto é removido. A Figura 5 ilustra o processo de fotopolimerização em cuba.

Dependendo da luz de cura e do método de cura, a fotopolimerização em cuba é classificada em três processos diferentes: Estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP) e produção contínua de interface líquida (CLIP).

Estas tecnologias possuem uma excelente aplicabilidade na área médica, permitindo a criação de modelos 3D precisos de várias regiões anatómicas de um paciente com base em dados digitais de exames médicos. A alta resolução desta técnica também a torna ideal para todos os tipos de prototipagem. Os processos de fotopolimerização em cuba são adequados para produzir peças com detalhes minuciosos e acabamento superficial suave, o que os torna ideais para joalheria, fundição por cera perdida e diversas aplicações odontológicas e

médicas. As principais limitações da fotopolimerização em cuba são o tamanho da construção e a resistência das peças [19].

### Jato de material – *Material Jetting* (MJT)

A técnica de impressão 3D por jato de material é frequentemente comparada ao processo padrão de jato de tinta 2D. Utiliza fotopolímeros ou ceras que se solidificam quando expostos à luz (semelhante à estereolitografia), para peças construídas camada por camada. O processo de fabrico por jato de material permite a impressão de uma peça em múltiplas cores e com diversos materiais numa única impressão [18].

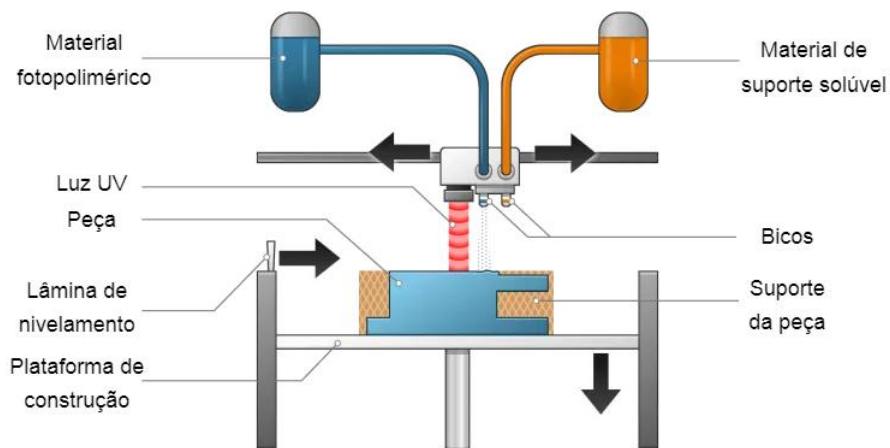


Figura 6 - Jato de material (adaptado de [18])

O jato de material liberta um fotopolímero a partir de centenas de pequenos bicos na cabeça de impressão para construir uma peça camada por camada. Isso permite que as operações de jato de material depositem o material de construção e de suporte de forma rápida, em linhas, o que pode ser comparado a outras tecnologias. À medida que as gotas são depositadas na plataforma de construção, elas são diretamente curadas e solidificadas usando luz UV. Os processos de jato de material exigem suportes, que muitas vezes são impressos em 3D, simultaneamente durante a construção, a partir de um material solúvel. O material de suporte é removido posteriormente durante a etapa de pós-processamento [20]. Este processo é demonstrado na Figura 6

Esta tecnologia divide-se em três variantes: MJT: Jacto de Material (MJ), Jacto de nanopartículas (NJP) e *Drop On Demand* (DOD)

As principais desvantagens da impressão utilizando tecnologias MJT incluem o custo elevado e o enfraquecimento gradual das propriedades mecânicas dos fotopolímeros ativados por UV com o passar do tempo, o que pode resultar em fragilidade.

### Jacto de aglutinante - *Binder jetting* (BJT)

A técnica de impressão 3D por jacto de aglutinante (Figura 7) consiste na deposição de um agente adesivo de ligação sobre camadas finas de material em pó. Os materiais em pó são geralmente à base de cerâmica (como vidro ou gesso), metal (como aço inoxidável, por exemplo) ou polímeros [19].

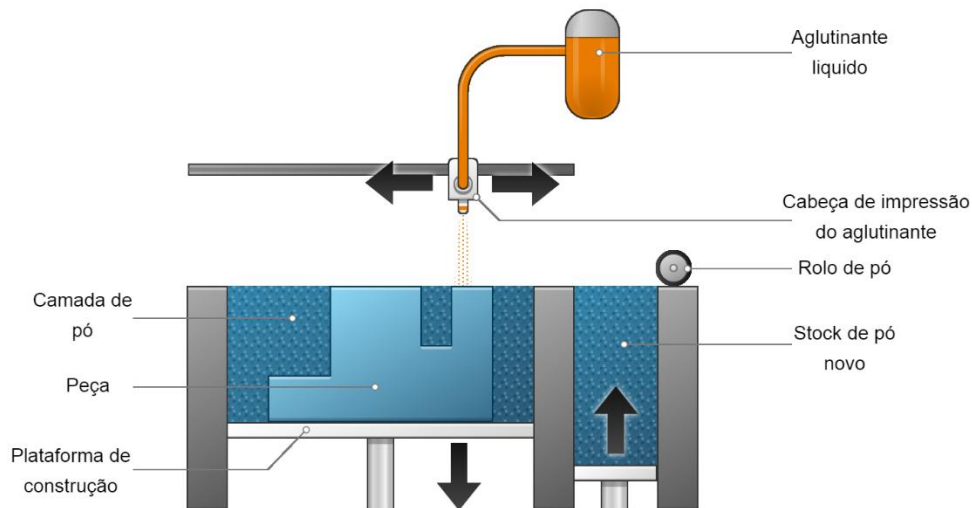


Figura 7 - Jacto de aglutinante (adaptado de [19])

Durante o processo de impressão, a cabeça de impressão desloca-se sobre a plataforma de construção, depositando pequenas gotas de aglutinante para formar cada camada, de forma semelhante às impressoras 2D que imprimem tinta em papel. Após a conclusão de uma camada, a plataforma de pó desce e uma nova camada de pó é espalhada sobre a área de construção. Esse ciclo repete-se, camada por camada, até que todas as partes estejam completas.

O processo de fabrico aditivo por jato de aglutinante pode trabalhar com uma variedade de materiais, incluindo metais, areias e cerâmicas. Após a impressão, as peças estão inacabadas e podem exigir processamento adicional antes de estarem prontas para uso. Para materiais

metálicos, é comum aplicar um agente infiltrante para melhorar as propriedades mecânicas. Uma outra alternativa é a sinterização das peças no forno, consolidando as partículas do material. No caso de materiais cerâmicos ou poliméricos, o processo de acabamento pode incluir etapas como cura ou sinterização, dependendo das especificações do material utilizado. [19].

O jacto de aglutinante é adequado para aplicações que requerem boa qualidade estética e de forma, como modelos arquitetônicos, embalagens, brinquedos e estátuas [19].

### Fusão de camada de pó – *Powder Bed Fusion (PBF)*

A fusão em leito de pó é um processo de fabricação aditiva onde regiões específicas de uma camada de pó são fundidas seletivamente usando energia térmica. Esta tecnologia de impressão 3D possibilita a criação de uma ampla variedade de produtos com geometrias complexas, utilizando uma fonte de calor, como feixes de laser ou feixes de elétrons, para fundir partículas de pó, camada por camada, e formar peças sólidas [19].

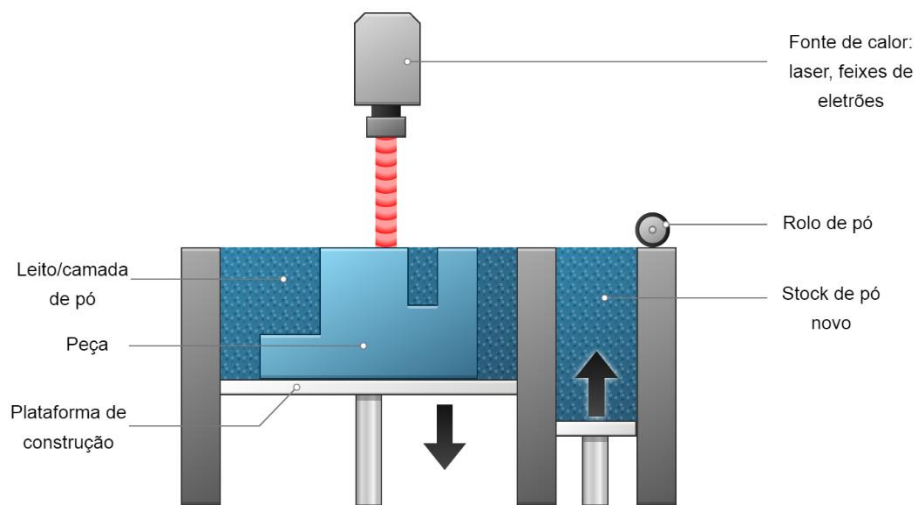


Figura 8 - Fusão a laser de camada de pó (Adaptado de [19])

O processo começa com a aplicação de uma fina camada de pó sobre a plataforma de construção (Figura 8). Um laser de elevada potência sinteriza o pó polimérico em pontos específicos conforme o modelo 3D, formando uma camada sólida. Este ciclo repete-se até que o objeto completo seja formado. Após a impressão, o objeto é arrefecido e pode necessitar de pós-processamento para remover pó não sinterizado ou realizar tratamentos adicionais.

Uma das vantagens deste processo é possuir várias tecnologias e materiais viáveis. Os diferentes métodos de fusão em leito de pó estão representados na tabela 1

Tabela 1 - Tecnologias da Fusão a laser de camada de pó [21] [22]

Tecnologia	Tipologia de materiais
Fusão a Laser Seletiva (SLM)	Metais (aço inoxidável, titânio, alumínio, entre outros)
Sinterização a Laser Seletiva (SLS)	Polímeros (Nylon PA 11, Nylon PA 12, Polipropileno (PP), TPU (Poliuretano Termoplástico), Nylon com Fibra de Vidro, Nylon com Fibra de Carbono)
Fusão por Feixe de Eletrões (EBM)	Metais (titânio, cobalto-cromo, entre outros)

### Laminação de folhas - *Sheet lamination* (SHL)

A técnica de impressão 3D por laminação de folhas (Figura 9), também conhecida como fabricação de objetos laminados (LOM), consiste na sobreposição de várias camadas de material em forma de folha para fabricar um objeto. Cada folha é cortada com um laser para se ajustar à seção transversal do objeto.

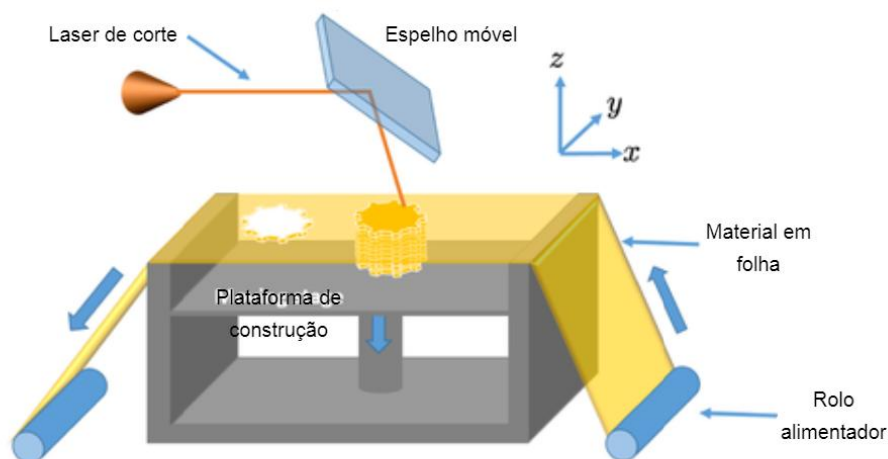


Figura 9 – Laminação de folhas (adaptado de [23])

Neste tipo de fabricação, SHL, camadas de material, como papel, metal ou plástico, são depositadas sobre a plataforma de construção e unidas uma a uma através de adesivo ou calor. Após cada camada ser aplicada, esta é cortada conforme a geometria desejada, utilizando uma lâmina ou laser. Este processo é repetido até que a peça completa seja formada [24].

Peças obtidas segundo este processo são utilizadas para estudos ergonômicos, visualização topográfica e modelos arquitetônicos. O uso de termoplásticos e fibras permitem a fabricação direta de componentes técnicos funcionais e leves para as indústrias aeroespacial e automotiva a um custo muito competitivo.

As desvantagens do processo de laminação de folhas incluem a resolução limitada devido à espessura das folhas, resistência mecânica inferior em comparação com outros métodos de impressão 3D, necessidade de pós-processamento para remover material excedente e melhorar o acabamento final, restrições quanto à variedade de materiais utilizáveis, fraca adesão entre camadas, custo elevado de materiais especializados e limitações de *design* para peças complexas.

### **Deposição direta de energia - *Directed Energy Deposition (DED)***

A tecnologia DED (Figura 10) cria componentes fundindo diretamente materiais e aplicando-os na peça de trabalho, camada por camada. Esta técnica avançada é comumente utilizada com pós metálicos ou materiais em fio. A deposição direta de energia não permite apenas a fabricação de peças novas, produzidas de raiz, muitas vezes combinando o processo com ferramentas CNC de fresagem/torneamento, mas também é eficaz na reparação de componentes danificados complexos, como pás de turbinas e hélices [19].

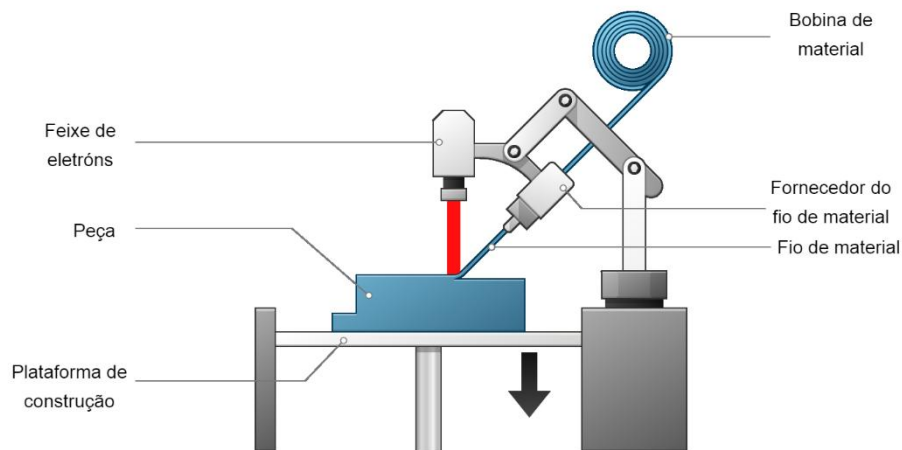


Figura 10 - Deposição direta de energia (adaptado de [19])

### Extrusão de material – *Material Extrusion* (MEX)

A tecnologia de extrusão de material é um processo de fabricação aditiva no qual o material é dispensado através de um bico. Neste processo, o filamento é alimentado por uma bobina através de uma cabeça de extrusão aquecida em movimento. O material fundido é forçado para fora do bico da extrusora e depositado na plataforma de construção. Em seguida, as camadas seguintes são adicionadas sobre as anteriores, acabando por se fundirem [25].

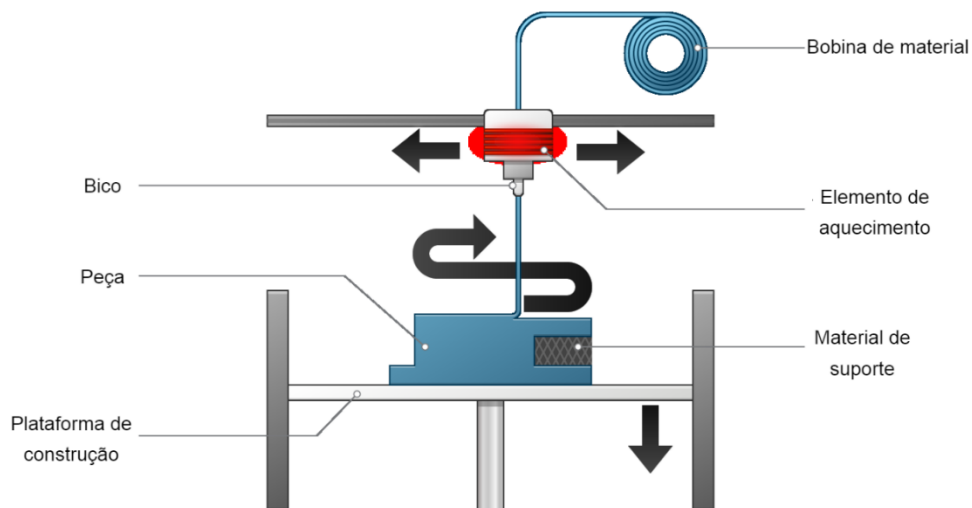


Figura 11 – Extrusão material (Adaptado de [19])

A tecnologia FFF é a técnica mais utilizada dentro da categoria MEX e a única oficialmente reconhecida na norma ISO/ASTM 52900, contudo já existem outras variações, como a

extrusão de pellets e o *Direct Ink Writing* (DIW), as quais ainda não foram formalmente incorporadas na norma.

### **2.3. Fabricação por fusão de filamento - *Fused Filament Fabrication* (FFF)**

No presente trabalho será abordada a técnica de fabricação por fusão de filamento (FFF) de forma detalhada, pois permite avaliar a viabilidade do uso de filamentos produzidos a partir de materiais termoplásticos e pelo facto de ser um equipamento existente na ESTG e que foi usado na realização de parte do trabalho experimental.

#### **2.3.1. Princípios de funcionamento**

O processo básico dessa tecnologia envolve a extrusão controlada de filamento termoplástico pré-aquecido no plano x-y.

O material polimérico usado nas impressoras FFF é fornecido na forma de filamento enrolado em bobinas. Esse filamento pode ter diferentes diâmetros e é alimentado por uma extrusora equipada com dois rolos giratórios em direções opostas, permitindo que o filamento seja guiado até a cabeça de extrusão. Nessa cabeça, o material é parcialmente fundido por um sistema de aquecimento elétrico. O bico de extrusão, localizado na ponta da cabeça de extrusão, é a ferramenta que permite à impressora depositar camadas de material de forma precisa e controlada sobre a plataforma, seguindo instruções computadorizadas. Geralmente, os filamentos têm diâmetros entre 1,75 mm e 2,85 mm, enquanto o diâmetro do bico de extrusão pode variar consideravelmente, de 0,1 mm a 0,8 mm.

No final de cada camada, em algumas impressoras, a cabeça de extrusão move-se verticalmente para a altura correspondente à próxima camada, enquanto em outras, é a plataforma que se move verticalmente para baixo, permitindo que a cabeça imprima a próxima camada. O aquecimento ocasional da câmara de fabricação, que abriga a cabeça de extrusão e a plataforma, pode garantir uma refrigeração mais uniforme do material.

A geometria da peça e o método de impressão podem requerer a criação de estruturas de suporte adicionais para sustentar a peça durante o processo. Essas estruturas podem ser feitas do mesmo material da peça ou de um material diferente. Nas estruturas de suporte solúveis, o excesso de material é removido mergulhando a peça numa solução de água e agente de

limpeza após a impressão. Por outro lado, as estruturas de suporte *breakaway*, devem ser removidas manualmente no final da impressão, utilizando ferramentas apropriadas para facilitar o processo de remoção.

### 2.3.2. Parâmetros de trabalho impressão

Após a explicação do processo de impressão 3D, é importante destacar os parâmetros que influenciam diretamente a qualidade e o desempenho da impressão. Estes parâmetros são cruciais, pois determinam a precisão, a resistência mecânica e o acabamento das peças. A tabela seguinte apresenta os principais parâmetros da impressão 3D, evidenciando a sua importância no controle do processo e nos resultados obtidos.

Tabela 2 - Parâmetros de trabalho impressão [26]

Parâmetro	Definição
Espessura da camada	Altura (ou espessura) das camadas depositadas após a extrusão da ponta do bico
Orientação da construção	Forma como a peça é posicionada (orientada) dentro da plataforma de construção em relação às direções X, Y ou Z da máquina, e também o ângulo no qual a peça será impressa (Figura 13)
Temperatura de extrusão	Temperatura à qual os materiais termoplásticos do filamento são aquecidos dentro do bico antes da extrusão
Velocidade de impressão	Velocidade do bico enquanto se desloca no plano XY da plataforma de construção para depositar material
Padrão de preenchimento	Padrão no qual o material é depositado para formar a estrutura interna da peça, em cada camada
Orientação das linhas de preenchimento	Ângulo em que o material é depositado no interior da peça em cada camada (Figura 12)
Densidade de preenchimento/Percentagem de preenchimento interno	Quantidade de material depositado no interior da peça impressa, normalmente expressa em percentagem (%), sendo que 0% de preenchimento a peça fica praticamente oca por dentro e 100% de preenchimento a peça fica totalmente sólida
Número de contornos	É o número de camadas externas sólidas que rodeiam o padrão de preenchimento interno da peça impressa
Largura do contorno	A espessura das camadas externas (camadas de contorno) que rodeiam a estrutura interna

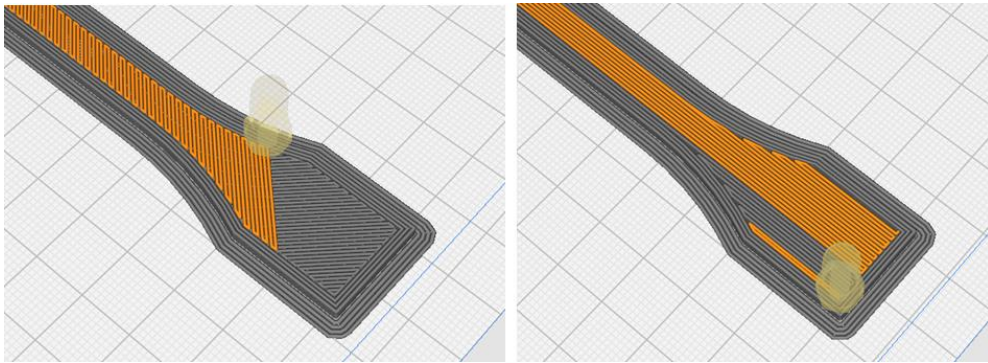


Figura 12 - Orientação das linhas de preenchimento: a) cruzado (-45°/+45°); b) linear (0°)

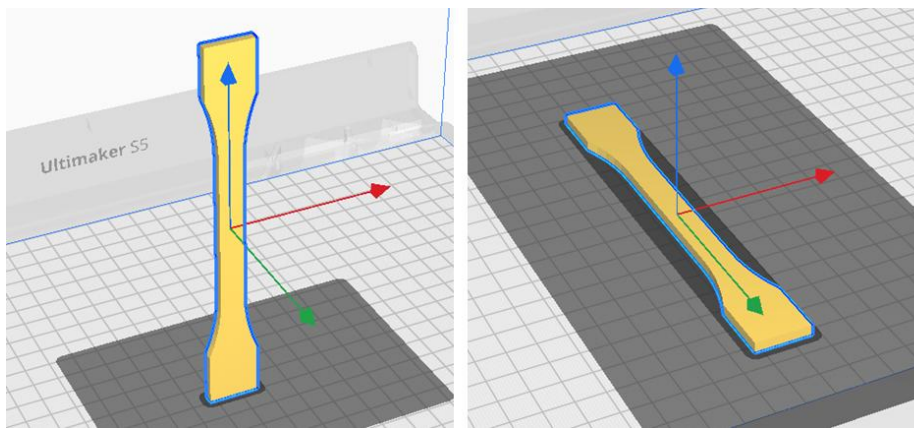


Figura 13 - Orientação de construção: a) Vertical; b) Horizontal

### 2.3.3. Comparação entre o processo de moldação por injeção e impressão 3D

A moldação por injeção e a impressão 3D são dois métodos distintos de fabricação que oferecem soluções variadas para a produção de peças e protótipos. Cada processo possui características específicas que o tornam mais adequado para diferentes aplicações. A tabela seguinte compara esses dois métodos, destacando aspectos como material, custo, precisão e flexibilidade de design.

Tabela 3 - Comparação entre o processo de moldação por injeção e impressão 3D

Características	Moldação por Injeção	Impressão 3D
Tipo de Processo	Fabricação por intermédio de moldes metálicos	Fabricação aditiva camada por camada
Material	Plásticos e metais	Plásticos, resinas, metais, cerâmicos

<b>Precisão Dimensional</b>	Elevada precisão e consistência	Pode variar, elevada precisão em impressoras de alta qualidade
<b>Volume de Produção</b>	Ideal para produção em massa	Ideal para protótipos e produção de baixo volume
<b>Tempo de Configuração</b>	Tempo significativo para o fabrico de moldes	Tempo mínimo para iniciar, configuração relativamente rápida
<b>Custo Inicial</b>	Alto, devido ao custo dos moldes e ferramentas	Relativamente baixo: custo do equipamento e material
<b>Custo por Peça</b>	Baixo com produção em massa	Geralmente muito alto para grandes volumes
<b>Flexibilidade de Design</b>	Pouco flexível; mudanças no design requerem novos moldes	Alta flexibilidade; mudanças podem ser feitas facilmente no modelo 3D
<b>Complexidade Geométrica</b>	Limitado pela complexidade do molde e escoamento do material	Alta; pode criar geometrias complexas
<b>Acabamento Superficial</b>	Geralmente muito bom, pode precisar de acabamento adicional	Pode exigir pós-processamento para acabamento
<b>Tempo de Produção</b>	Rápido para grandes quantidades após configuração inicial	Mais lento, especialmente para peças grandes ou complexas
<b>Capacidade de Personalização</b>	Limitada; difícil de alterar após a produção	Alta; fácil de modificar e personalizar os designs
<b>Tipo de Defeitos</b>	Rebarbas, linhas de soldadura e variações dimensionais	Falhas de preenchimento e problemas de adesão entre camadas

A comparação entre moldação por injeção e impressão 3D demonstra que cada método tem as suas vantagens e desvantagens, dependendo das necessidades do projeto. A moldação por injeção é ideal para produção em massa e oferece elevada precisão e baixo custo por peça, mas requer investimentos iniciais significativos em moldes. Por outro lado, a impressão 3D é altamente flexível e adequada para protótipos e produções de baixo volume, permitindo alterações rápidas e produção de geometria complexa, embora possa ter custos mais elevados por peça e um tempo de produção mais longo.

## 2.4. Materiais

A escolha dos materiais desempenha um papel fundamental no resultado das peças fabricadas. Neste estudo, serão analisados o PLA (ácido polilático) e a cortiça, utilizados tanto na impressão 3D por FFF, quanto na moldação por injeção.

A escolha do PLA para este estudo é motivada pelo seu caráter de material orgânico, ou seja, composto principalmente por carbono e originário de fontes renováveis. A sua capacidade de se decompor naturalmente no meio ambiente e a sua facilidade de reciclagem tornam-no uma opção eficiente para reduzir o desperdício e promover um ciclo de vida mais sustentável.

A cortiça foi escolhida devido às suas propriedades naturais e à sua sustentabilidade, sendo um material renovável e biodegradável, cuja extração não requer o corte da árvore, tornando-o uma opção altamente ecológica. Além disso, Portugal é o maior produtor mundial de cortiça, o que torna este material bastante atrativo [27].

A seguir, serão apresentadas as principais características de cada um desses materiais e sua relevância para o trabalho.

#### **2.4.1. Ácido Polilactico (PLA)**

O PLA é um polímero termoplásticos, tal como o polietileno (PE) e polipropileno (PP), materiais amplamente utilizados na fabricação de diversos objetos do dia a dia, devido à sua facilidade de processamento e versatilidade. Os polímeros são materiais compostos por várias moléculas que resultam em longas cadeias responsáveis pelas propriedades únicas dos polímeros e pela versatilidade de métodos de conformação a que podem ser sujeitos.

O PLA (ácido poliláctico) é considerado um material orgânico devido à sua origem renovável e sustentável. Este material é obtido através de fontes naturais, como amido de milho ou cana-de-açúcar e sintetizado por meio de processos químicos controlados para formar macromoléculas poliméricas, sendo assim considerado um polímero termoplástico sintético, e não um material natural na sua forma pura [28]. No entanto, devido à sua origem e à sua biodegradabilidade, o PLA é frequentemente considerado uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais derivados de petróleo, destacando-se pelas suas características únicas que combinam propriedades de materiais poliméricos com características naturais e biodegradáveis.

O PLA (ácido poliláctico) é também considerado orgânico devido ao facto de ser um polímero derivado do ácido láctico, que é um composto orgânico contendo carbono, hidrogênio e oxigênio [28], como representado na Figura 14.

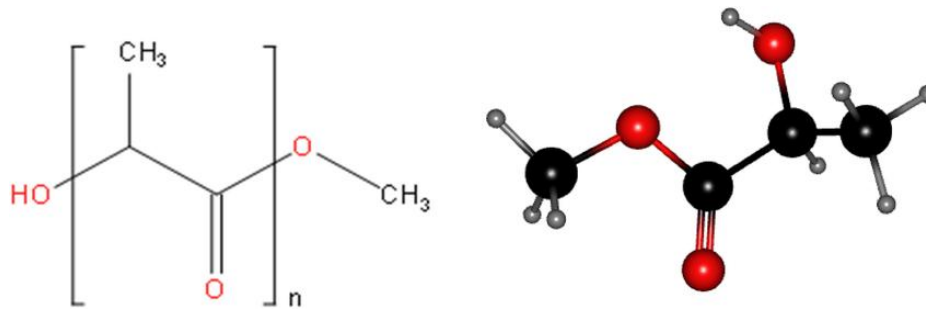


Figura 14 - Estrutura Química PLA [29]

A capacidade de se decompor naturalmente na natureza e a sua facilidade de reciclagem, tornam este material uma opção eficiente para reduzir o desperdício e promover um ciclo de vida mais sustentável.

Este polímero destaca-se pelas suas boas propriedades mecânicas, facilidade de processamento através de técnicas convencionais e pelo baixo impacto ambiental.

Uma propriedade muito importante deste polímero é a sua taxa de cristalinidade. A cristalinidade é a indicação da quantidade da região cristalina no polímero em relação ao seu conteúdo amorfo. A cristalinidade influencia muitas propriedades do polímero, incluindo dureza, módulo de elasticidade, resistência à tração, rigidez, vinco e ponto de fusão [30].

Características físicas como a densidade, capacidade calorífica e propriedades mecânicas e reológicas, são dependentes da sua temperatura de transição [30].

O reforço do PLA com fibras naturais é um fator chave para aumentar a aplicações de biocompósitos na área da engenharia mecânica.

#### 2.4.2. Cortiça

A cortiça desempenha um papel significativo no crescimento económico de Portugal em várias áreas, uma vez que o país é o principal produtor desse material. A cortiça é a casca do sobreiro, uma árvore milenar cujo *habitat* natural é a bacia Ocidental do Mediterrâneo. É colhida a cada 9-12 anos, tendo em conta a região de cultura, num processo sustentável que não danifica a árvore. Dada a capacidade natural de regenerar após cada extração e o tempo de vida do sobreiro rondar 170 a 200 anos, é possível este ser descortiçado cerca de 15 a 18 vezes [31].

Na sua composição apresenta 45% de suberina, 27% de lenhina, 12% de celulose, ceras, outros polissacáridos, 6% de taninos e 6% de ceroides [32].

A cortiça é um material renovável, biodegradável, leve, abundante e barato. Possui propriedades muito interessantes para a indústria, tais como a baixa densidade, elasticidade, elevada compressibilidade, impermeabilidade, bom isolamento acústico e isolamento térmico e vibratório, boa estabilidade química e longevidade [33]. Por se tratar de uma matéria-prima e, ao mesmo tempo ser biodegradável, é cada vez mais procurado para o design de novos produtos sustentáveis. A figura 15 ilustra o ciclo de aproveitamento da cortiça, destacando os seus produtos, subprodutos e a contribuição para a economia circular.

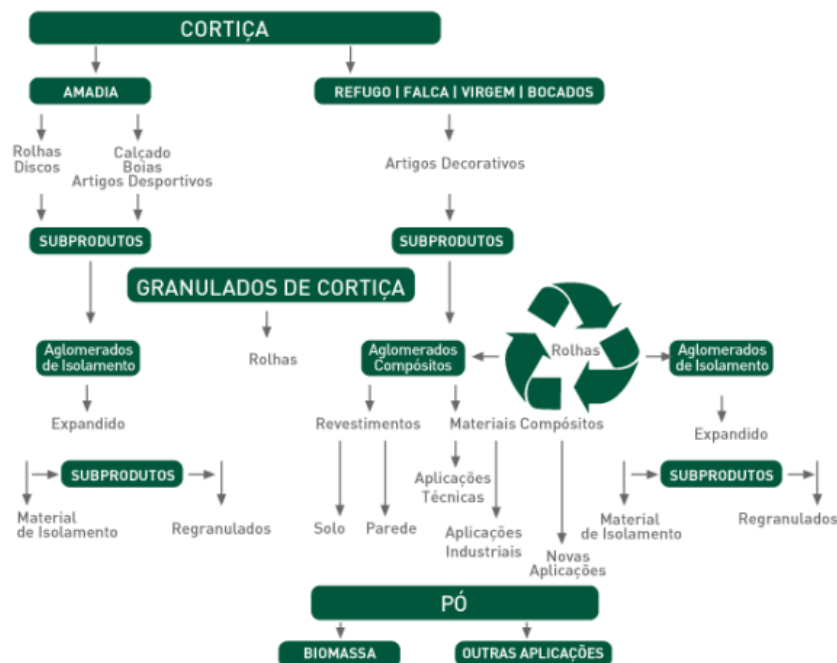


Figura 15 - Processamento da cortiça [34]

Na indústria corticeira, tem vindo a crescer a preocupação em adotar e preservar um crescimento sustentável, priorizando a valorização dos subprodutos e resíduos gerados no processo de transformação da cortiça, como o pó e o granulado [32]. A possibilidade de integração destes elementos em materiais poliméricos, originou compostos materiais denominados CPC (*Cork Polymer Composites*) que unem as propriedades dos polímeros termoplásticos com os benefícios da cortiça [31].

Vários estudos foram realizados com as mais diversas finalidades para melhor entender a cortiça e as suas propriedades. O primeiro estudo foi a análise da estrutura celular da cortiça,

observada através de microscopia eletrônica por varrimento (SEM) pela primeira vez em 1987 pelo cientista inglês *Robert Hooke* [35].

Os estudos mais recentes focam-se principalmente em novas e inovadoras aplicações para a cortiça, como é o caso do estudo desenvolvido por *L. Gil e N. Marreiros*, que investiga a incorporação de pó de cortiça numa tinta com o objetivo de otimizar o seu desempenho acústico. Estes investigadores desenvolveram novas tintas incorporando partículas de cortiça para melhorar o isolamento e a absorção acústica. Constatou-se que as tintas com cortiça apresentam uma menor condutividade térmica e uma maior capacidade de absorção acústica em comparação com as tintas convencionais [36].

### 2.4.3. Compósitos

Os compósitos são materiais criteriosamente projetados que combinam dois ou mais componentes distintos para formar um novo material com propriedades superiores ou específicas, que não podem ser alcançadas com os materiais individuais.

A estrutura de um compósito é composta pela matriz e pelo reforço, como representado na figura 16. A matriz é o material que envolve e sustenta o reforço, enquanto o reforço proporciona a resistência mecânica e a rigidez ao compósito. Esta combinação permite que os compósitos apresentem características geralmente melhoradas, como boa resistência à tração, leveza, resistência à corrosão e durabilidade, em comparação com os materiais individuais. Os compósitos podem ser classificados de várias formas, com base na natureza da matriz e do reforço. As matrizes podem ser constituídas por polímeros, metais ou cerâmicas, e os reforços podem variar de fibras sintéticas, como carbono e vidro, a materiais naturais, como madeira e cortiça, entre outros. Cada combinação oferece um conjunto único de propriedades que pode ser adaptado para atender às necessidades específicas de uma aplicação.

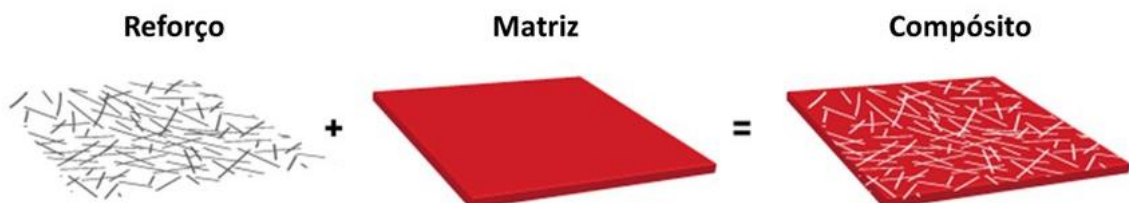


Figura 16 - Ilustração material compósito [37]

A evolução dos compósitos tem permitido a criação de materiais com desempenhos excepcionais em condições extremas, contribuindo para avanços tecnológicos e económicos significativos e ainda oferecendo soluções inovadoras para desafios modernos e sustentáveis.

Observa-se um aumento significativo de estudos que investigam a utilização da cortiça e seus derivados em combinação com materiais termoplásticos, termoendurecíveis e, mais recentemente, com matrizes de origem biológica.

Emanuel M. Fernandes, Vitor M. Correlo, João F. Mano e Rui L. Reis [38] em 2015 procederam à injeção de um compósito de matriz polimérica, com cortiça granulada com o objetivo de identificar um método de processamento adequado para evitar a degradação do componente natural e aglomeração de partículas e conseguir a máxima incorporação de cortiça no compósito sem comprometer o produto final. Além disso estudaram o efeito da granulometria da cortiça e a adição de um agente de ligação no desempenho mecânico e nas propriedades térmicas do compósito e o efeito de adicionar cortiça [39]. Utilizaram grânulos de cortiça com 0.5 - 1 mm de diâmetro médio que foram colocados numa estufa a 70°C durante 24 horas e em seguidas reduzidos a grânulos de tamanho inferior a 0.5 mm. O material criado foi então injetado numa máquina de injeção a 175°C. As peças resultantes foram submetidas a ensaios de tração e análises termogravimétricas.

Concluíram que a adição de partículas de cortiça aumenta a absorção de água quando comparado com o polímero puro, bem como o tamanho das partículas é um fator importante que contribui para o mesmo resultado. Outro resultado inesperado foi o aumento da densidade e diminuição da contração do material compósito quando comparado com o polipropileno em estado puro.

Jacek Andrzejewski, Marek Szostak, Mateusz Barczewski, Patrycja Łuczak realizaram os primeiros estudos com PLA e cortiça. Neste estudo, criaram dois compósitos, reforçados com diferentes percentagens de cortiça, e com duas matrizes diferentes: um com matriz de PP e o outro com matriz de PLA. Para preparar o processo de injeção, e de modo a uniformizar os compósitos, criaram, através de extrusão, diferentes grânulos com as matrizes indicadas e reforçadas com 10% de cortiça, 20% e 30% [29]. Antes da extrusão, os materiais virgens, PLA e PP, foram secos durante 24 horas numa estufa a 80°C, sendo aplicadas as mesmas condições de secagem à cortiça.

O processo de extrusão foi realizado com um extrusor de duplo fuso ZAMAK EH-16.2D (Skawina, Polónia), operando a uma temperatura máxima de 190°C (perfil de temperatura: 190 (matriz)-190-185-185-180-180-175-175-170°C) e a uma velocidade rotação do fuso de 150 rpm. O material extrudido foi pelletizado e novamente seco sob as mesmas condições (80°C, 24h).

As amostras de teste foram moldadas numa máquina de injeção Engel ES80/20HLS (Dietach, Áustria). O processo de moldação por injeção foi realizado a uma temperatura de processamento de 200°C, temperatura do molde de 40°C, velocidade de injeção de 90 mm/s, pressão de injeção/manutenção de 1200/700 bar e tempos de arrefecimento de 50s para amostras de PLA e 30s para PP [29].

O desenvolvimento de materiais reforçados com fibras, compatíveis com impressoras FFF tem atraído considerável atenção devido ao potencial destes materiais em oferecer propriedades mecânicas e desempenho superiores em comparação com polímeros puros [40]. Diversos avanços já foram alcançados na criação de novos compósitos imprimíveis reforçados com partículas, fibras ou nanomateriais. Esses compósitos são formados pela mistura de plaquetas, fibras cortadas e fibrilas de polímero com a matriz polimérica, seguida pela extrusão conjunta durante a impressão. Contudo, o desempenho desses compósitos depende significativamente da orientação das fibras no plástico e da fração volumétrica de fibras (FVF) [40].

Várias fibras têm sido usadas para reforço, incluindo fibras de carbono cortadas, nanotubos de carbono, fibras de vidro, fibras naturais etc.

As fibras naturais são utilizadas como reforço para reduzir o conteúdo inorgânico em compósitos termoplásticos sem comprometer a resistência mecânica, melhorando assim a biodegradabilidade e reduzindo os custos e impactos ambientais.

Portanto, compósitos de polímeros produzidos por polímeros de base biológica, como PLA e reforçados com fibras naturais têm grande potencial, pois são biodegradáveis e amigos do ambiente.

### 3. Materiais e métodos

Este capítulo apresenta os materiais utilizados no estudo, com destaque para o PLA e a cortiça, e descreve as metodologias adotadas na produção das amostras que foram ensaiadas laboratorialmente. São detalhados os processos de preparação dos materiais para a moldação por injeção, bem como a preparação dos ficheiros necessários para a impressão 3D.

#### 3.1. Materiais e métodos para a moldação por injeção

A moldação por injeção constituiu uma etapa fundamental na obtenção das amostras estudadas, sendo essencial a definição precisa dos materiais a utilizar e das condições de processamento. Este subcapítulo foca-se na descrição detalhada dos procedimentos aplicados durante a moldação por injeção, incluindo a preparação e a formulação dos compósitos, os parâmetros operacionais definidos e as características do equipamento utilizado. Na figura 17, é demonstrada a sequência de processos desde o material virgem até à obtenção dos provetes para estudo.

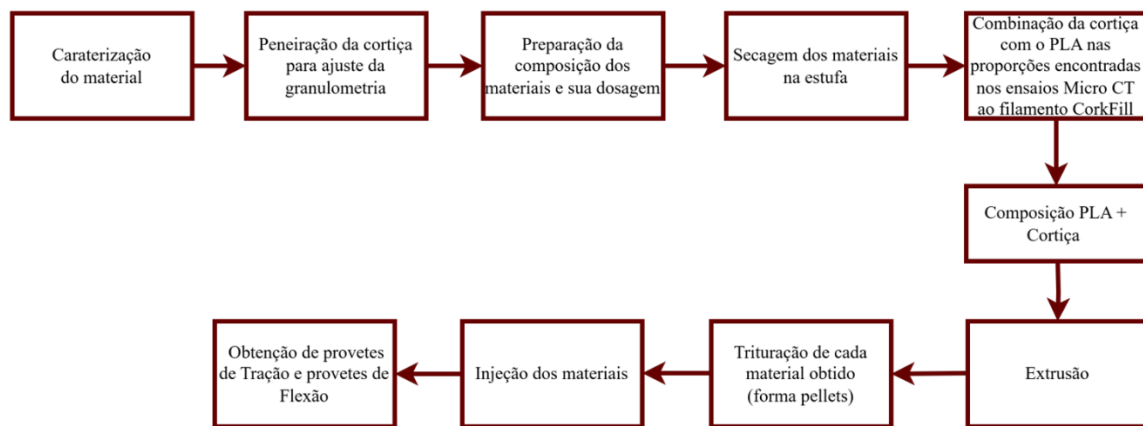


Figura 17 - Fluxograma processo de obtenção de provetes através da moldação por injeção

Inicialmente foi adquirido o PLA virgem, material da matriz, utilizado na produção de provetes através da moldação por injeção. O PLA utilizado foi o PLA ErcrosBio LL600 do fabricante Ercros, S.A. (Anexo B – Fichas técnicas)

Como material de reforço, foi utilizada a cortiça, fornecida pela empresa Amorim Cork Composites (Mozelos, Portugal). Esta cortiça apresentava uma granulometria inicial de cerca de 0,5-1 mm. De modo a garantir a uniformidade na composição do compósito, a

cortiça foi peneirada até obter uma granulometria final de aproximadamente 0,45-0,85 mm (Figura 18).



Figura 18 – Processo de peneiração da cortiça

Depois desta uniformização da granulometria, foram preparados dois materiais reforçados para o processo de moldação por injeção, combinando ácido polilático (PLA) com cortiça natural:

**Material 1 (PLA + 30% Cortiça):** 30% de cortiça em volume e 70% de PLA.

**Material 2 (PLA + 40% Cortiça):** 39,8% de cortiça em volume e 60,2% de PLA.

Os materiais foram preparados nas proporções de 30% e 39,8% de cortiça para permitir uma comparação direta entre o filamento fornecido, que contém 30% de cortiça (valor teórico indicado pelo fornecedor), e o valor obtido por observação Micro CT, que indicou 39,8% de cortiça, representando assim as variações nas duas técnicas de fabricação. Este procedimento de observação Micro CT encontra-se descrito no capítulo 4 - Procedimentos laboratoriais.

Para a preparação destes materiais, foi calculada a quantidade total de materiais necessária para produzir cerca de 750 gramas de cada tipo de compósito, além de 750 gramas de PLA virgem para controlo e comparação.

Os materiais foram acondicionados numa estufa a 70°C durante 24 horas para garantir a sua adequada secagem e homogeneização, conforme mostra a figura 19.



**Figura 19 - Secagem dos materiais na estufa**

Após a secagem, os materiais foram pesados e misturados conforme as proporções especificadas (Figura 20 e 21). Foi adicionado aproximadamente 5% de glicerol a cada mistura para promover a adesão da cortiça e do PLA.

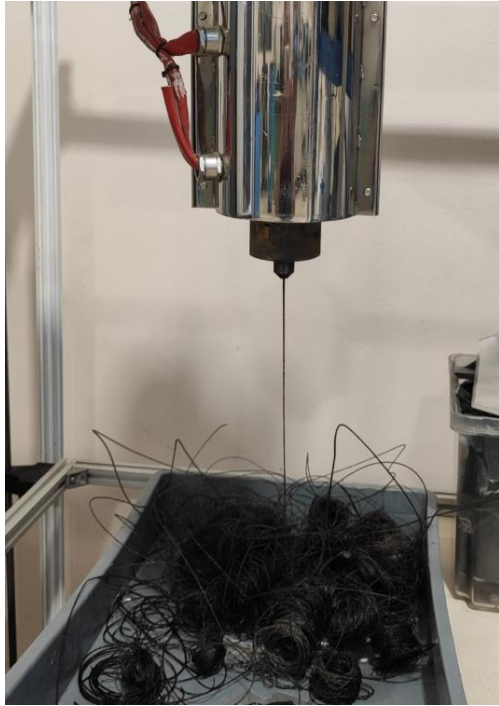


**Figura 20 – Combinação do Material  
Compósito 1 (PLA + 30% Cortiça)**



**Figura 21 – Combinação do Material  
Compósito 2 (PLA + 40% Cortiça)**

Após a preparação das misturas, os materiais foram processados numa extrusora vertical para garantir uma homogeneização completa e evitar a separação dos componentes na tremonha da injetora (Figura 22). A extrusora vertical produziu novelos contínuos do material (Figura 23), que foram posteriormente convertidos em grânulos.



**Figura 22 - Extrusora vertical**



**Figura 23 - Novelos do material obtido na extrusora**

A etapa de granulação foi essencial para transformar os novelos numa forma adequada para a injeção, assegurando que o material pudesse ser alimentado de maneira consistente e uniforme na máquina de injeção. A granulação facilitou o manuseio e o processamento dos compósitos, contribuindo para a qualidade e a precisão dos produtos finais. Na figura 24, é demonstrado o material já granulado.



**Figura 24 – Compósito 1 granulado obtido no processo de extrusão**

A fase seguinte consiste na injeção dos materiais criados e do PLA virgem. Nesta fase utilizou-se a máquina de injeção Lien YU D80, representada na figura 25, com o molde já existente representado na figura 26.



Figura 25 - Máquina injeção Lien YU D80

Este molde tem 4 cavidades onde é possível obter quatro peças, dois provetes de tração e dois provetes de flexão.



Figura 26 - Cavidade do molde

O molde é constituído apenas por um sistema de refrigeração e por um canal de alimentação frio, tendo cada peça um único ponto de injeção. Dada esta composição, foram feitas algumas iterações de injeção até encontrar os parâmetros satisfatórios de injeção descritos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros usados na injeção

Parâmetros	Valor
Pressão injeção [bar]	110
Temperatura no bico [°C]	180
Velocidade [%]	98
Pressão 2º injeção [bar]	100

Após a injeção das peças, as amostras foram inspecionadas visualmente para verificar possíveis defeitos, removeram-se as rebarbas e foram selecionadas 6 amostras de cada material, representadas na figura 27.

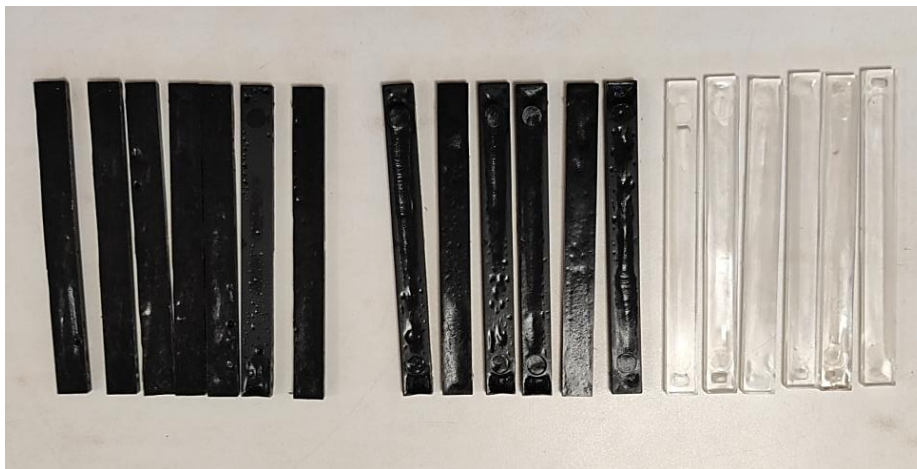


Figura 27 - Provetes injetados (30% cortiça, 39,8% cortiça, PLA virgem)

### 3.2. Materiais e métodos para o fabrico aditivo

Este subcapítulo apresenta os materiais utilizados e os procedimentos adotados na produção dos provetes por impressão 3D bem como a configuração do equipamento e os parâmetros de impressão definidos para garantir a qualidade e uniformidade das peças produzidas.

O fluxograma abaixo (Figura 28) apresenta as etapas seguidas no fabrico aditivo dos provetes, desde a modelação até a fase final.



**Figura 28 - Fluxograma processo de obtenção de provetes através da impressão 3D**

Os materiais utilizados neste estudo pelo processo de FFF foram o "CorkFill" da ColorFabb e o "Ultimaker PLA".

O filamento CorkFill (Figura 29) é composto por 30% de cortiça e 70% de PLA (valores fornecidos pelo fabricante), tem 2,85 mm de diâmetro e foi desenvolvido para impressoras FFF.

O filamento PLA da Ultimaker (Figura 30) tem também 2,85 mm de diâmetro e apresenta-se como versátil e fácil de imprimir, sendo o mais adequado para utilizar na impressora 3D da mesma marca.



**Figura 29 - Filamento CorkFill**



**Figura 30 - Filamento PLA Ultimaker**

A impressora utilizada neste estudo para obter os provetes por impressão 3D foi a Ultimaker S5 (Figura 31), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica do Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Esta impressora tem duas cabeças de impressão, sendo uma para o material principal e outra para o material de suporte.

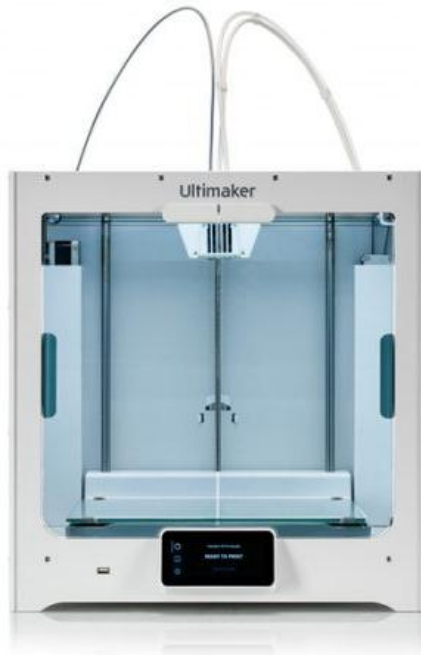


Figura 31 – Impressora Ultimaker S5

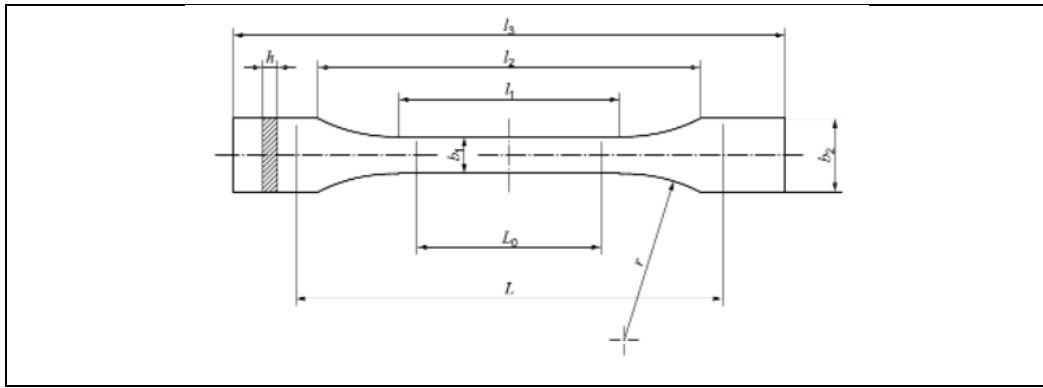
### Modelação

Antes iniciar a impressão, as geometrias foram desenhadas no software de CAD (*Computer aided design*) *SolidWorks*. O *Solidworks* é um *software* de CAD que permite a criação de modelos tridimensionais a partir de formas geométricas elementares.

A modelação dos provetes teve por referência a norma ISO 527-2:2012, Plásticos - Determinação das propriedades de tração - Parte 2: Condições de teste para plásticos de moldagem e extrusão (Anexo A) e seguiu-se as dimensões apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões provete tração

Dimensão conforme a norma ISO 527-2:2012– Tipo 1B					
$l_3$ (mm)	$l_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$L_0$ (mm)
$\geq 150$	$60 \pm 0,5$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$



A utilização desta norma para a modelação dos provetes para impressão 3D deve-se à necessidade de comparação das amostras obtidas com o processo de moldação por injeção, sendo que as geometrias na injeção já estavam previamente definidas dado a utilização de um molde existente e respeitavam a norma citada. Os modelos criados encontram-se representados na figura 32 e 33.

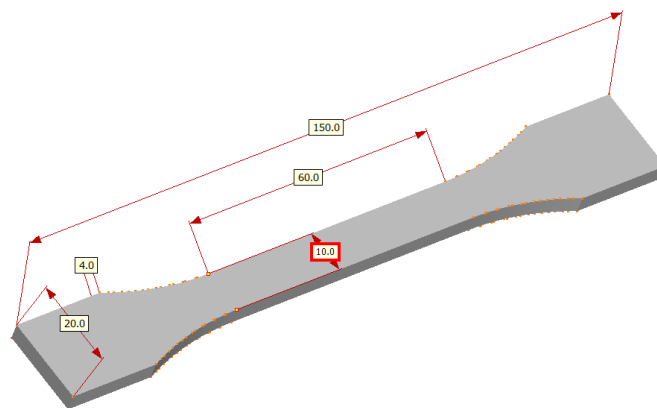


Figura 32 - Modelação dos provetes para ensaios de tração

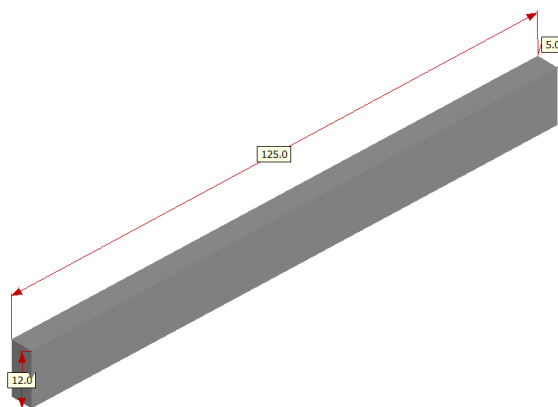


Figura 33 – Modelação dos provetes para ensaios de flexão

Depois de finalizada a modelação, o modelo é guardado num ficheiro STL.

### Slicing

O passo seguinte foi a importação o modelo para o *software* Ultimaker Cura, *software* de *slicing*, que converteu os modelos 3D em camadas finas e gerou estruturas de suporte, quando necessárias (Figura 34).

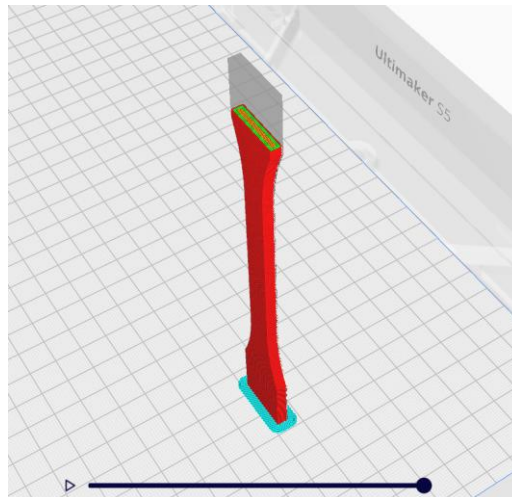


Figura 34 - *Slicing* provete de tração

Neste passo foram ainda configurados os parâmetros da tabela 6. Os parâmetros de impressão 3D adotados neste estudo foram definidos com base nas recomendações dos fabricantes do filamento, contudo, fatores como o padrão de enchimento e a orientação de impressão foram selecionados como variáveis de estudo, com o objetivo de avaliar a sua influência nas propriedades mecânicas das peças produzidas.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados FFF

Parâmetros	Material	
	CorkFill	PLA
Temperatura de extrusão [°C]	220	205
Temperatura da mesa [°C]	60	60
Velocidade de impressão [mm/s]	45	100
Preenchimento [%]	100	100
Espessura da camada [mm]	0.2	0.2
Altura da camada [mm]	0.8	0.4
Número de contornos	3	3
Tipo de estrutura de adesão à mesa	Brim	Brim
Orientação de construção	Horizontal/Vertical	Horizontal/Vertical
Padrão de enchimento	Linhas	Linhas
Orientação das linhas de preenchimento	Linear (0°) / Cruzado (+45°/-45°)	Linear (0°) / Cruzado (+45°/-45°)

Desta fase, resultaram 16 ficheiros com os códigos de impressão representados na matriz abaixo (Tabela 7):

Tabela 7 - Matriz de designação dos provetes FFF

Material	Tipo de provete	Orientação linhas preenchimento	Orientação de construção	
			Horizontal (1.)	Vertical (2.)
CorkFill (C)	Tração (T)	Linear (.1)	CT.1.1	CT.2.1
		Cruzado (.2)	CT.1.2	CT.2.2
	Flexão (F)	Linear (.1)	CF.1.1	CF.2.1
		Cruzado (.2)	CF.1.2	CF.2.2
PLA (P)	Tração (T)	Linear (.1)	PT.1.1	PT.2.1
		Cruzado (.2)	PT.1.2	PT.2.2
	Flexão (F)	Linear (.1)	PF.1.1	PF.2.1
		Cruzado (.2)	PF.1.2	PF.2.2

Por fim, os provetes foram impressos, como ilustrado na figura 35, identificados e posteriormente passaram por uma fase de remoção de brim e de suporte, nos provetes em que foi necessário criar os mesmos.



Figura 35 - Impressão CT.2.1

Tendo em conta as duas metodologias seguidas para a obtenção dos provetes descritas acima, a figura 36 resume as diferentes variáveis em estudo dos processos. Após todas as amostras estarem criadas, foram executados os ensaios mecânicos de tração e flexão.

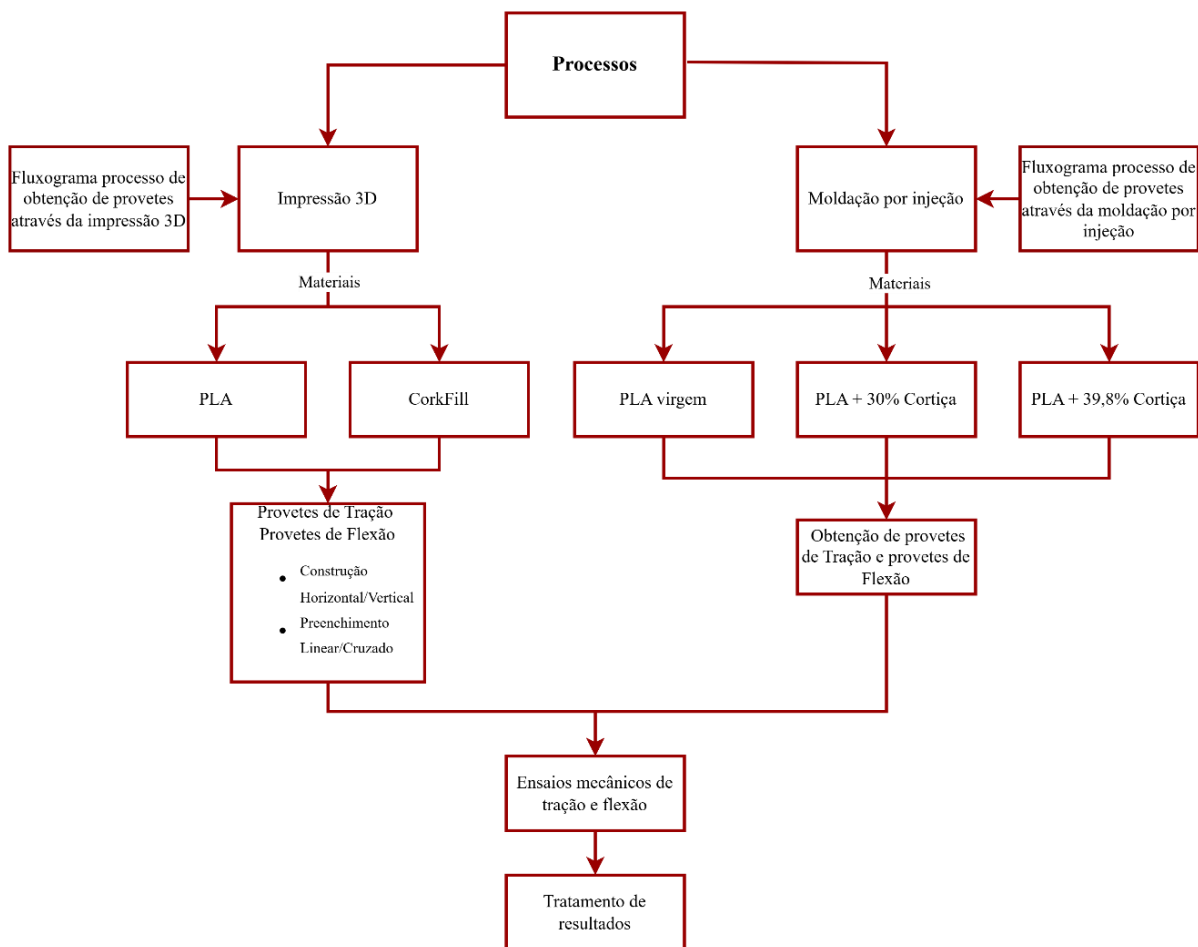


Figura 36 - Fluxograma resumo

## 4. Procedimentos laboratoriais

Como anteriormente referido, o objetivo deste trabalho é estudar as propriedades térmicas e mecânicas de várias provetes variáveis ensaiar laboratorialmente através de ensaios de tração, flexão e outras técnicas, permitindo a comparação dos resultados obtidos. Essa comparação possibilitará concluir qual tecnologia é mais vantajosa para a produção de peças de compósitos com cortiça. Este capítulo apresentará os procedimentos laboratoriais adotados para a análise dessas amostras. Está ainda descrita a análise morfológica utilizada para identificar a quantidade de cortiça presente no filamento que foi essencial para a formulação dos materiais para injeção.

### 4.1. Propriedades físicas

#### 4.1.1. Morfologia 3D / Distribuição de Materiais

A Micro-CT, também chamada de microtomografia computadorizada, é uma técnica avançada de imagem tridimensional que utiliza raios X para visualizar a estrutura interna de um objeto de forma não destrutiva e com alta resolução. Essa tecnologia permite obter imagens detalhadas do interior de amostras pequenas, revelando características físicas internas que seriam inacessíveis por métodos tradicionais de análise. Durante o processo de Micro-CT, o objeto a ser analisado é exposto a um feixe de raios X que atravessa a amostra.

O equipamento utilizado para esta análise foi o SkyScan 1174 Compact Desk-Top Micro-CT com uma resolução de 6.60  $\mu\text{m}$  por pixel, localizado no CDRSP - Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria (Figura 37)



**Figura 37 - SkyScan 1174 Compact Desk-Top Micro-CT**

Foi feita a análise de duas amostras, sendo que uma das amostras era o filamento de cortiça com PLA (CorkFill) e a outra amostra, um pedaço de uma peça impressa em 3D com esse mesmo filamento (figura 38).

A fonte de raios-X operou com 50 kV de voltagem e 800  $\mu$ A de intensidade de corrente. A aquisição das imagens foi realizada com um total de 203 arquivos, com uma resolução de 1024 x 1304 pixels e um tempo de exposição de 7000 ms. O processo de reconstrução foi realizado com o programa NRecon (versão 1.7.0.4), utilizando um intervalo angular de 0.90° e uma gama angular de 182.70°.



**Figura 38 – Amostra peça impressa em 3D na máquina de Micro-CT**

Para processar e analisar as imagens obtidas, utilizou-se o software CTAn (CT-Analyzer), que possibilitou a reconstrução tridimensional do material e a visualização detalhada da sua estrutura interna. O software também permitiu a quantificação da porosidade e a distribuição de densidade, além da segmentação binarizada da amostra, o que facilitou a identificação de defeitos ou variações na composição do filamento. A binarização é o processo de converter uma imagem em duas regiões distintas, atribuindo valores binários (0 ou 1), representando áreas de baixa e alta intensidade, geralmente associadas a poros e material sólido, respectivamente. Esse processo é crucial na segmentação de imagens de Micro-CT, permitindo a análise quantitativa dos materiais. O limiar de binarização é determinado com base na densidade dos materiais, separando as regiões de alta densidade (sólidas) das de baixa densidade (porosas).

Os resultados revelaram informações importantes sobre a uniformidade estrutural do material, a distribuição da porosidade e a presença de microfissuras, que podem comprometer o desempenho da impressão. O principal objetivo desta análise foi determinar as percentagens volumétricas de cortiça e PLA presentes no filamento, com base nos resultados da binarização.

Na primeira iteração, a análise foi focada na quantificação da porosidade, onde foi aplicado um limiar de densidade para distinguir as regiões porosas. O cálculo de porosidade é feito dividindo o volume total dos poros pelo volume total da amostra, com o resultado expresso em percentagem:

$$\text{Porosidade (\%)} = \frac{\text{Volume Total de Poros}}{\text{Volume Total}} * 100 \quad (1)$$

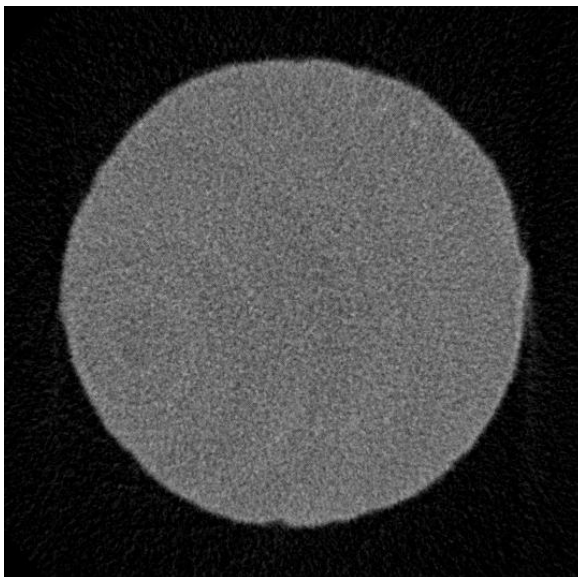
Sendo que o volume Total de Poros obtido foi de  $5.2360 * 10^7 \mu\text{m}^3$  e o volume Total da Amostra é  $2.55 * 10^{10} \mu\text{m}^3$ .

A amostra apresentou uma porosidade de 0,2%, com o restante da estrutura composto por PLA e cortiça.

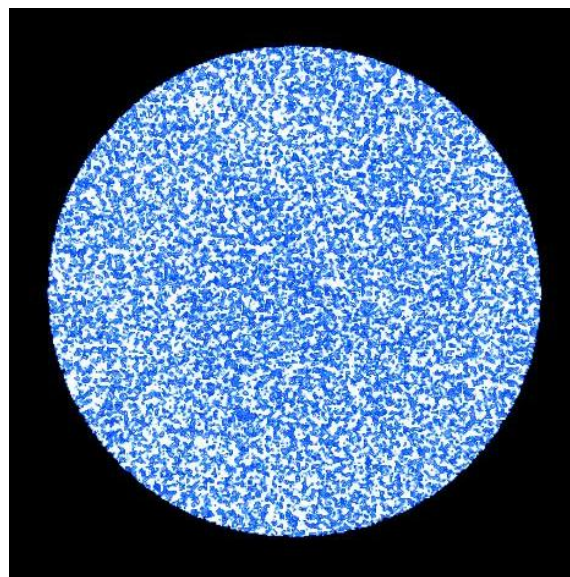
Após esta binarização, a porosidade foi removida da análise, isolando-se as zonas sólidas do filamento. Numa segunda iteração, foi possível aplicar um novo limiar de densidade para segmentar os dois materiais. A cortiça, sendo menos densa que o PLA, exibiu tonalidades de cinza distintos nas imagens, permitindo a quantificação volumétrica precisa de cada componente.

Obteve-se um novo volume Total de Poros de  $1.0238 * 10^{10} \mu m^3$  e o volume Total da amostra manteve-se,  $2.55 * 10^{10} \mu m^3$ .

Através desta binarização, foi possível calcular que o volume de cortiça mais poros é de aproximadamente 40%, concluindo assim que a percentagem de cortiça existente no filamento é de 39,8%.



**Figura 39 - Imagem obtida através de MicroCT do filamento CorkFill, imagem não tratada**



**Figura 40 - Imagem obtida através de MicroCT do filamento CorkFill, imagem tratada CTan**

Nas figuras 39 e 40, a imagem tratada realça os componentes do filamento, com a cortiça e a porosidade representadas em azul, enquanto o PLA é visualizado como o restante da estrutura.

As mesmas análises foram efetuadas para a amostra de filamento já processado, ou seja, após passar pelo processo de impressão 3D. As imagens recolhidas demonstram um elevado número de poros de grandes dimensões como é visível na figura 41, quando comparado com o filamento (figura 40).

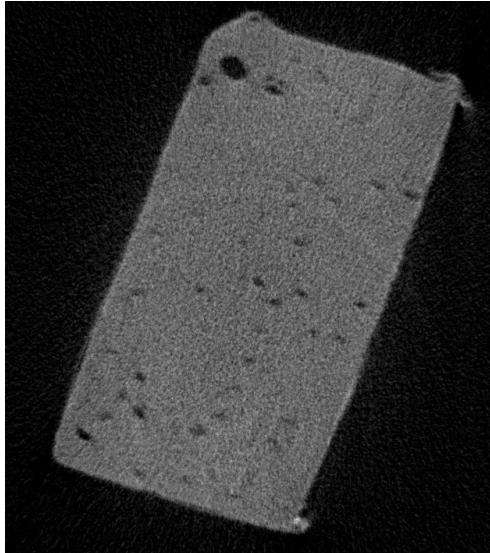


Figura 41 - Morfologia material PLA/Cortiça depois de impresso

## 4.2. Propriedades térmicas

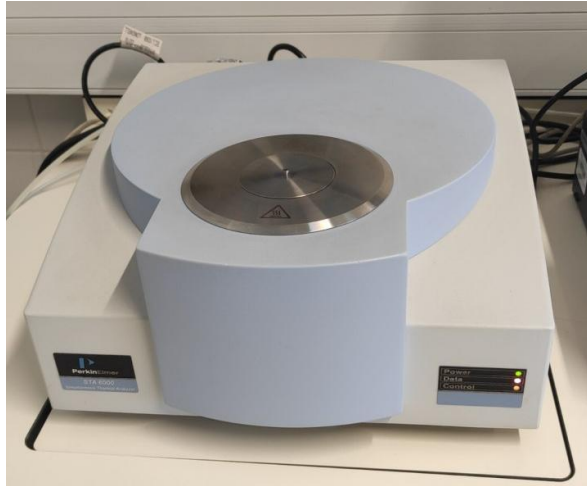
### 4.2.1. Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (do inglês, *thermogravimetric analysis* – TGA) é uma técnica que avalia a perda de massa de uma amostra, em função da temperatura, o que permite estudar a estabilidade térmica do material sob uma atmosfera controlada. As principais utilizações desta análise incluem a medição da estabilidade térmica de um material, o (*filler content*) teor de carga em polímeros, o teor de humidade e solvente, e a composição percentual dos componentes de um composto [41].

A análise TGA (Análise Termogravimétrica) consiste em aquecer gradualmente uma amostra enquanto se mede a massa numa balança analítica de elevada precisão. Durante este processo, observa-se uma perda de massa sempre que ocorre a libertação de um componente volátil. Por exemplo, reações químicas como a combustão provocam perda de massa, enquanto que, mudanças físicas como a fusão não implicam alteração do peso.

O resultado da TGA é geralmente apresentado num gráfico que mostra a variação de massa em função da temperatura ou do tempo, permitindo identificar diferentes transições térmicas no material. Entre os fenómenos mais comuns estão a evaporação de solventes e plastificantes em polímeros, a libertação de água de hidratação em materiais inorgânicos e, por fim, a decomposição térmica da amostra.

Este método permite identificar a temperatura a que se inicia a degradação térmica do material e o ponto em que esta se torna mais significativa. Além disso, permite quantificar o resíduo final obtido a uma determinada temperatura, sendo por isso uma ferramenta muito útil em estudos relacionados com o comportamento térmico e energético dos materiais. No presente trabalho foi utilizado o equipamento Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 6000 – PerkinElmer (Figura 42).



**Figura 42 - Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 6000 – PerkinElmer**

Separaram-se quatro amostras com cerca de 8mg cada, duas com o filamento CorkFill não processado e duas com o material processado (já impresso em 3D), (figura 43), amostras essas que se utilizaram para fazer 4 ensaios.



**Figura 43 - Amostra de uma peça**

As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 15°C/min, começando nos 30 °C até chegar ao 500 °C, sob uma atmosfera nitrogénio a 19,8ml/min. Os resultados foram analisados com recurso ao software TA Instruments Universal Analysis 2000 (versão 4.5A) (Figuras 44 e 45).

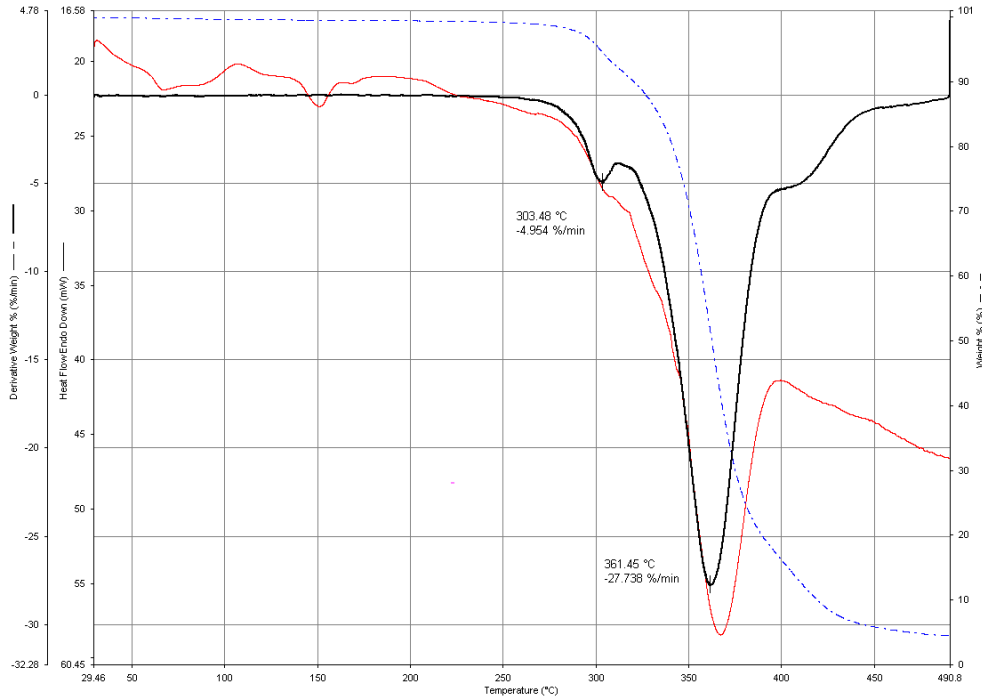


Figura 44 - TGA e DSC do filamento CorkFill

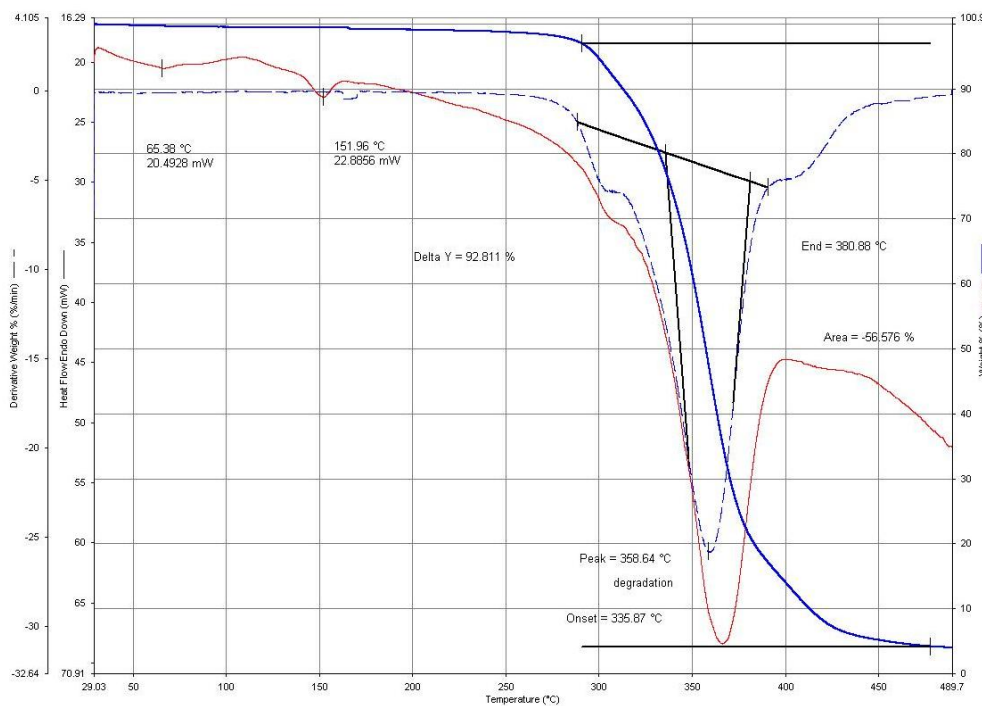


Figura 45 - TGA e DSC do material processado CorkFill

As curvas de TGA devem ser analisadas com o auxílio da curva de DTG (representada a preto), primeira derivada da curva TGA (representada a azul), que representa as etapas de reação durante a degradação térmica [42].

O Figura 45 permite concluir que a 1ª etapa da decomposição da cortiça acontece aos 300°C e a segunda etapa a 400°C. A partir de cerca de 250°C, o PLA começa a sofrer degradação térmica. Esta etapa é caracterizada por uma rápida perda de massa, que se intensifica até cerca de 360°C. O pico observado aos 303.48°C indica a temperatura a que a cortiça começa a degradar.

A cortiça começa a degradar aos 300°C, mas é após a degradação do PLA, que começará a degradar significativamente até aproximadamente aos 450°C.

Observa-se nos termogramas derivativos que, ao contrário do PLA puro, a cortiça tem dois picos distintos, com o primeiro pico atribuído à degradação das frações de lignina e suberina, e o segundo pico à suberina, mais resistente termicamente [42].

Após cerca de 450°C, tanto a cortiça quanto o PLA já terão passado pela maior parte da degradação térmica. A taxa de perda de massa diminuirá, e a curva TGA começará a estabilizar. O resíduo remanescente contém carbono e cinzas inorgânicas provenientes da cortiça.

#### **4.2.2. Calorimetria diferencial de varrimento (DSC)**

A Calorimetria diferencial de varrimento (do inglês, *differential scanning calorimetry* – DSC) é uma técnica que utiliza um equipamento capaz de quantificar a energia envolvida nas alterações estruturais que ocorrem devido ao aquecimento de um material. É uma técnica termoanalítica na qual as variações da entalpia da amostra são estudadas com o uso de material de referência termicamente inerte, enquanto ambos são submetidos a um programa de temperatura controlada.

Segundo o ensaio de Calorimetria diferencial de varrimento (DSC) realizado num estudo similar ao desenvolvido no âmbito do presente projeto, de Emanuel M. Fernandes, Vitor M. Correlo, João F. Mano, Rui L. Reis, foi utilizado o equipamento TA instrument DSC Q100 model (USA) e usadas amostras de 8–12 mg. O material foi aquecido a uma taxa de 10°C min<sup>-1</sup>, sobre uma atmosfera de nitrogénio. Com este ensaio, viram que a presença de cortiça em % pequenas (<50%), aumenta o processo de cristalização, o que indica que o

processamento do compósito no molde leva menos tempo que o polímero puro, contudo, exige temperaturas mais elevadas [38].

Para o teste DSC das amostras do presente trabalho foram utilizados os mesmos parâmetros que no ensaio TG uma vez que foram realizados no mesmo equipamento.

Concluiu-se que aproximadamente entre 100°C e 120°C, ainda durante o aquecimento, o PLA pode cristalizar a partir do estado amorfo, o que é demonstrado pelo pico exotérmico na curva DSC. Aproximadamente aos 150°C acontece a fusão do PLA representada pelo pico endotérmico na curva DSC. Esta transição representa a mudança do PLA cristalino para o estado líquido. A presença de cortiça pode afetar a entalpia de fusão indicando alterações no grau de cristalinidade do PLA no compósito.

Acima de 200°C começa a decomposição, embora esta seja mais claramente observada numa análise TGA, onde alguns sinais de decomposição podem aparecer na curva DSC como reações exotérmicas. Aos 400° o pico exotérmico indica uma transição onde o compósito liberta calor, como a decomposição térmica ou combustão dos resíduos.

### **4.3. Propriedades mecânicas**

Apesar de numa primeira abordagem a cortiça pareça ser um excelente material sustentável, os seus impactos ambientais não são tão relevantes se os compósitos de cortiça não apresentarem um desempenho mecânico adequado. Para avaliar essas propriedades mecânicas, optou-se por realizar testes que determinassem o comportamento mecânico e térmico dos compósitos de cortiça.

#### **4.3.1. Ensaio de Flexão em Três Pontos**

No ensaio de flexão em três pontos, uma força é aplicada ao corpo de prova na direção paralela à sua seção transversal, gerando uma deflexão, como demonstrado na figura 46.

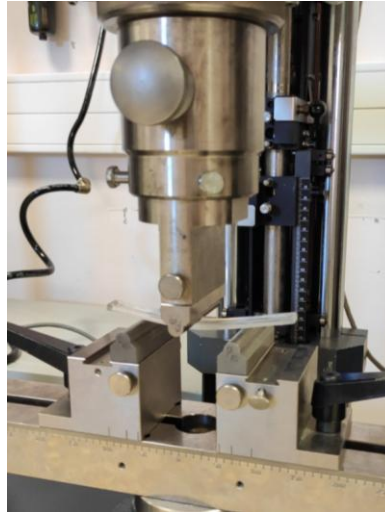


Figura 46 - Ensaio de flexão num provete de PLA virgem

O corpo de prova fica apoiado nas extremidades, com a distância entre os apoios definida pela norma aplicável ao ensaio, neste caso, segundo a norma ISO 178. A aplicação da carga é feita por um punção, que exerce o deslocamento necessário para fletir o corpo de prova até que o provete quebre ou atinja um valor de deformação predeterminado pela norma. Tanto os raios dos apoios quanto o raio do punção são especificados conforme as normas do ensaio. Os valores obtidos do ensaio são registados em termos de força e alongamento e posteriormente convertidos para valores de tensão e deformação através das equações 2 e 3.

$$\sigma_{f[MPa]} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 \times S \times h}{l^2} \quad (3)$$

Sendo que  $b$  é a largura do provete [mm],  $h$  a espessura do provete [mm],  $l$  é a distância entre apoios [mm] e  $S$  é o alongamento [mm].

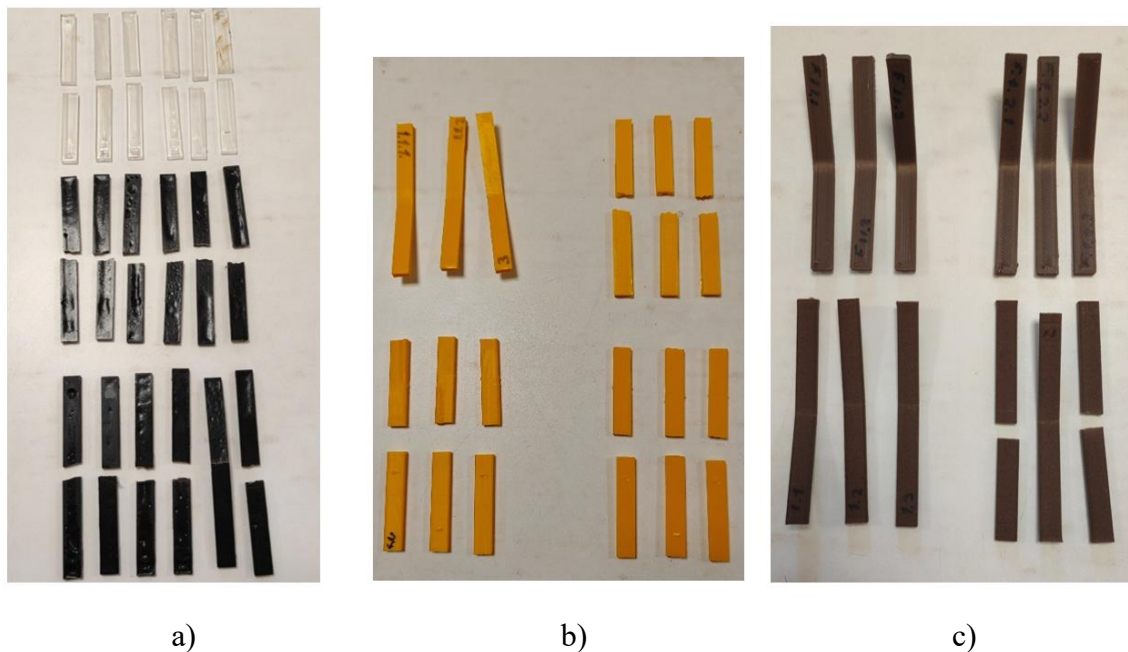
Através de um ensaio de flexão, também é possível obter o módulo de elasticidade à flexão ( $E_f$ ) do material, através da equação 4.

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

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

No ensaio de flexão em três pontos, utilizou-se uma máquina de ensaios Zwick/Roell Z100 universal (Ulm, Germany), equipada com uma célula de carga de 100 kN. Segundo a norma ASTM D790-10, aplicou-se uma velocidade de ensaio de 5 mm/min, distância entre apoios de 70,4 mm e raios de apoios e punção de 5 mm.

Na figura 47 é apresentado o resultado visual de todos os provetes depois de submetidos ao ensaio de flexão.



**Figura 47 - Provetes submetidos ao ensaio de flexão: a) Provetes injetados; b) Provetes de PLA obtidos por FFF; c) Provetes CorkFill obtidos por FFF**

Após a realização dos ensaios de flexão aos provetes produzidos por moldação por injeção e fabrico aditivo, e depois de todos os dados tratados, foram elaborados os gráficos resumo apresentados abaixo (Figura 48 e 49).

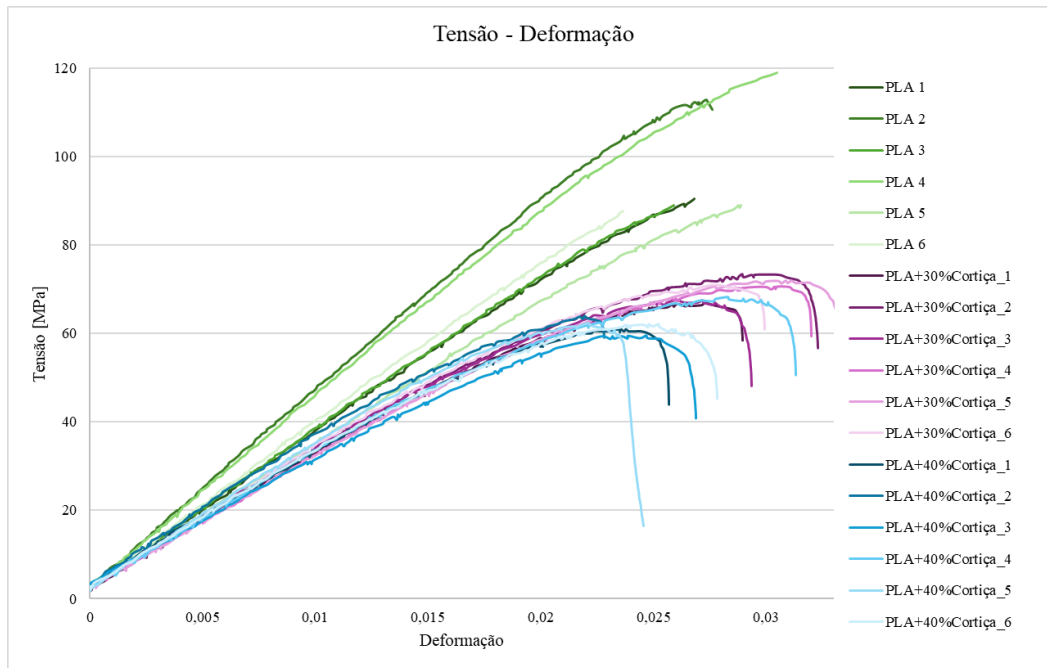


Figura 48 - Gráfico Tensão - Deformação à flexão dos provetes injetados

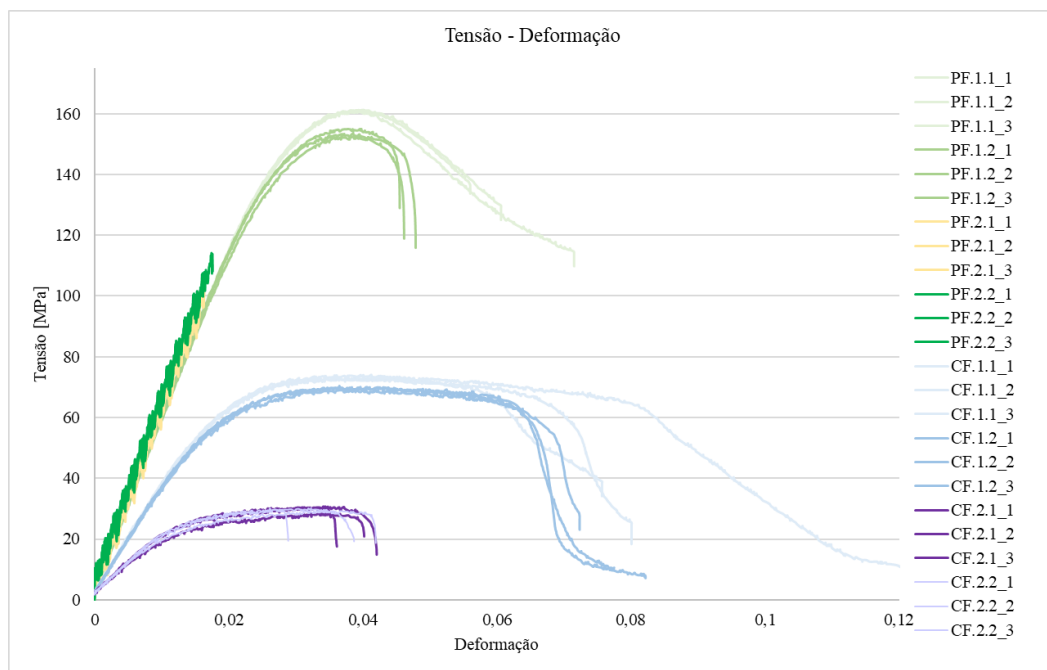


Figura 49 - Resultados dos ensaios de flexão dos provetes obtidos por FFF

### 4.3.2. Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força de tração uniaxial crescente a um corpo de prova fixo nas extremidades, alongando-o até à rutura. O ensaio é executado a uma velocidade constante, enquanto uma célula de carga mede a força aplicada. Os resultados obtidos são a força e o deslocamento, que são posteriormente usados para calcular a tensão e a deformação, permitindo obter propriedades mecânicas importantes, como o limite de elasticidade, resistência máxima e deformação do material.

Os ensaios de tração, assim como os ensaios de flexão, foram repetidos 6 vezes (no caso dos provetes obtidos por injeção) e 3 vezes (nos provetes obtidos por FFF) por cada variedade de material de forma validar os resultados obtidos.

Com os valores da força exercida e do alongamento, ao longo do tempo, foi possível obter os valores de força vs deformação, que foram posteriormente transformados na forma de um gráfico tensão vs deformação através das equações 5 e 6.

$$\sigma[MPa] = \frac{F[N]}{A_0[mm^2]} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l [mm]}{l_0 [mm]} \quad (6)$$

Sendo  $A_0$  a seção transversal do provete,  $l_0$  a distância inicial entre amarras e  $\Delta l$  o alongamento do corpo de prova.

A classificação entre materiais dúcteis e frágeis é feita analisando-se a sua curva tensão-deformação. Materiais dúcteis possuem uma área maior sob a curva, o que indica sua capacidade de deformação antes da rutura. Já os materiais frágeis exibem principalmente a parte inicial da curva, figura 50, que é linear e corresponde ao comportamento elástico, com pouco ou nenhum alongamento plástico antes da rotura.

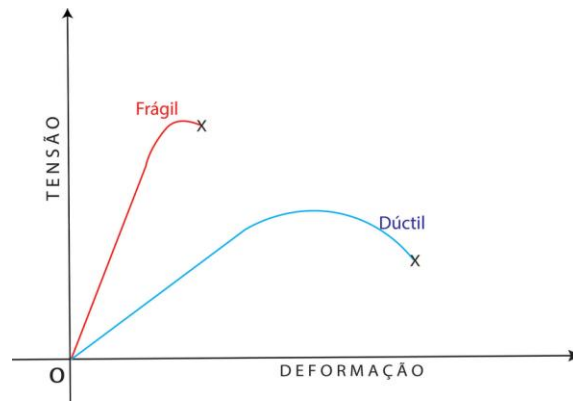


Figura 50 - Gráfico tensão-deformação materiais frágeis e dúcteis [43]

O módulo de elasticidade (Módulo de Young ( $E$ )), obtido através da lei de Hooke (equação 7), 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. O módulo de elasticidade representa a rigidez do material no regime elástico.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (7)$$

No regime plástico a deformação deixa de ser proporcional à tensão, ou seja, a equação de Hooke deixa de ser válida.

Podem ser ainda obtidos os seguintes resultados num ensaio de tração: tensão máxima à tração ( $\sigma_{\max}$ ), maior valor de tensão atingida no ensaio; tensão de rotura ou tensão última ( $\sigma_r$ ), tensão registada na rotura do provete.

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força de tração uniaxial crescente a um corpo de prova fixo nas extremidades, alongando-o até à rutura, como ilustrado na figura 51. Os ensaios foram realizados seguindo os requisitos da norma ISO 527 para ensaios de tração em materiais plásticos.

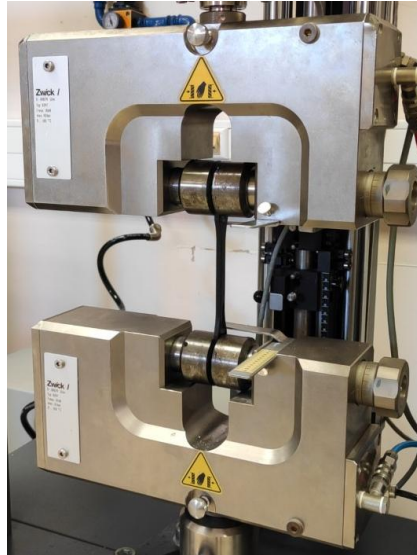


Figura 51 - Ensaio de tração

Para a realização destes ensaios foi utilizada na máquina, uma célula de carga de 10 kN. O ensaio foi realizado a uma velocidade de ensaio de 10 mm/min com a distância inicial entre amarras de 110,5mm.

Na figura 52, são apresentados todos os provetes resultantes do ensaio de tração, bem como os resultados dos ensaios (Figura 53 e 54).

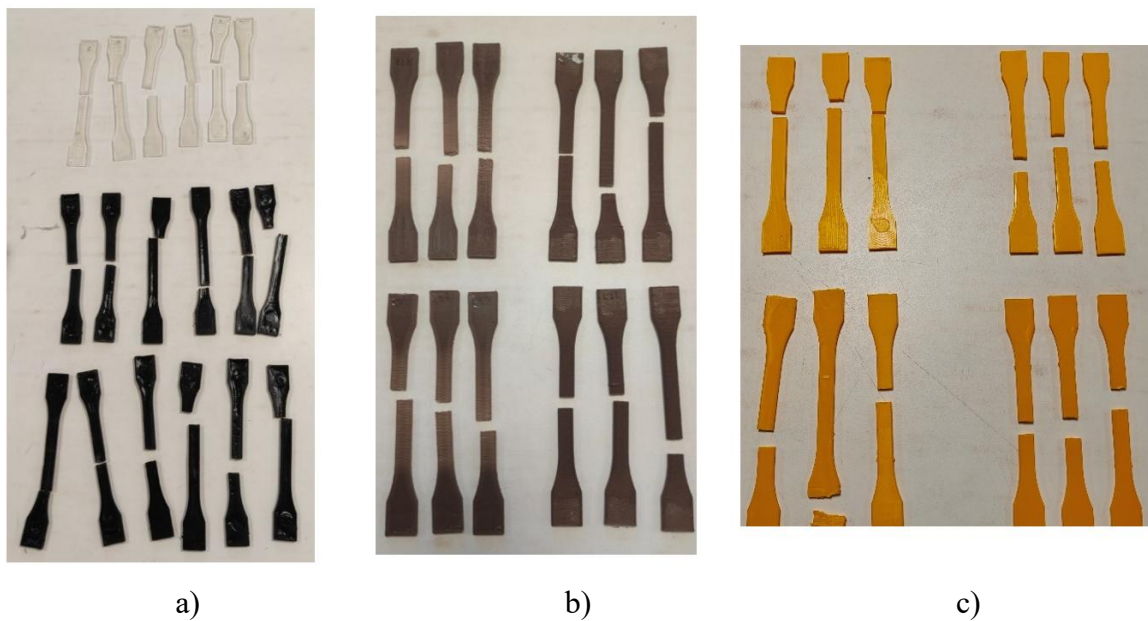


Figura 52 - Provetes submetidos ao ensaio de tração: a) Provetes injetados; b) Provetes de CorkFill obtidos por FFF; c) Provetes de PLA obtidos por FFF

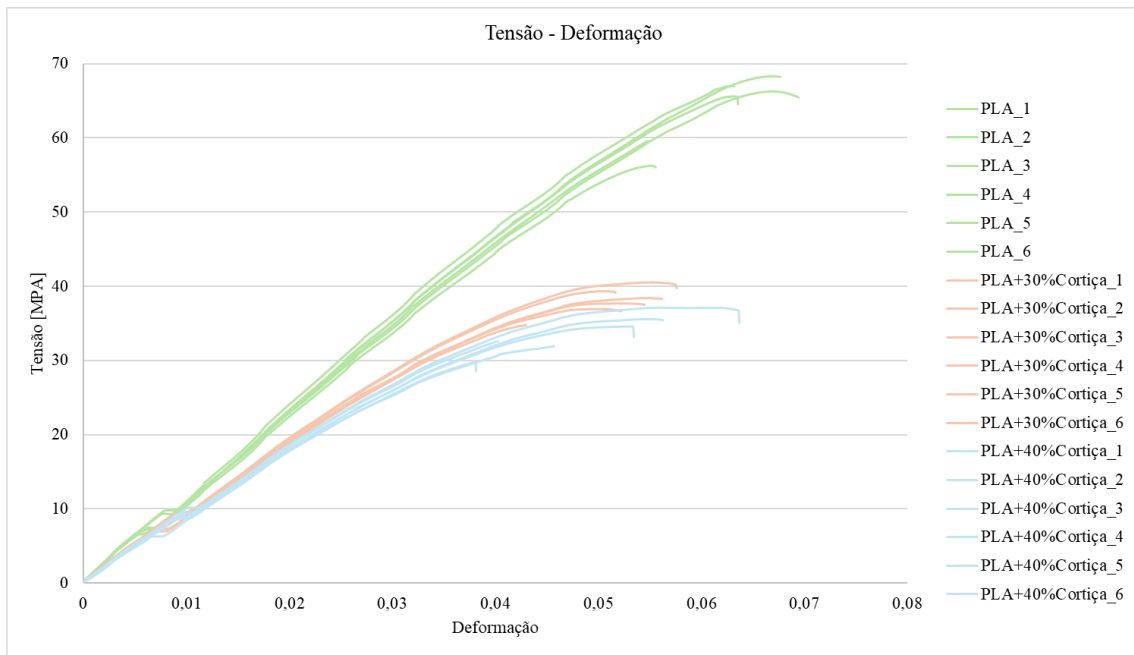


Figura 53 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes obtidos por injeção

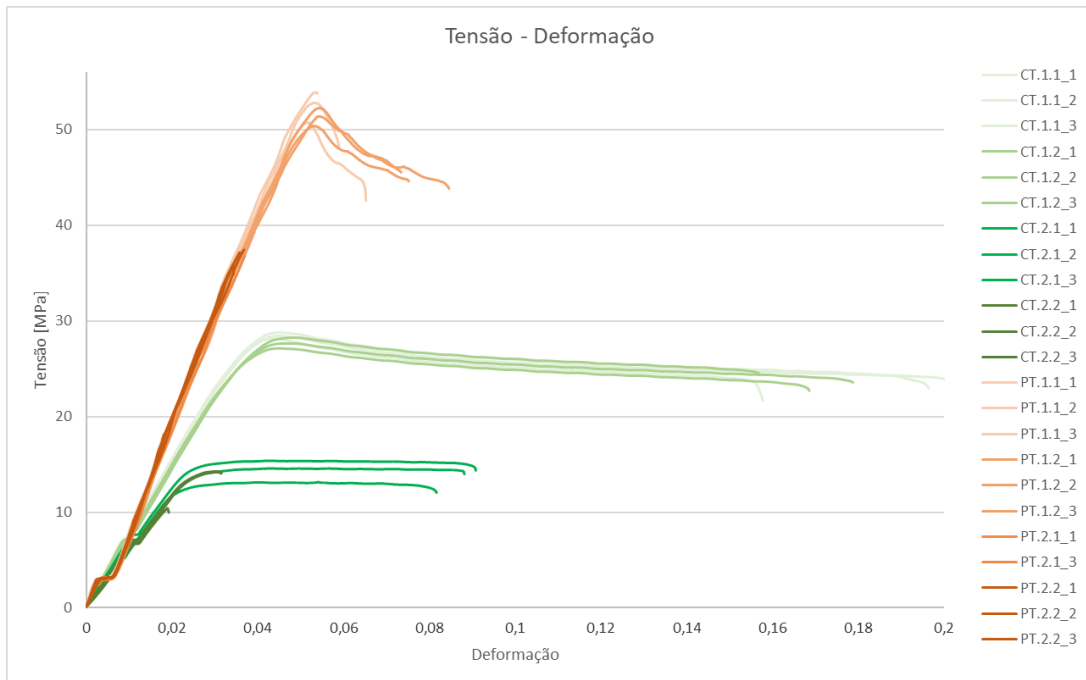


Figura 54 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes obtidos por FFF

## 5. Análise e Discussão de Resultados

A análise à morfologia do filamento CorkFill revelou a presença de poros que podem afetar negativamente a aderência entre as camadas, o que compromete a integridade estrutural da peça.

A mesma análise à amostra desse filamento já processado, ou seja, depois da impressão, demonstrou a presença de poros mais evidentes e de grandes dimensões, os quais podem ter um impacto significativo na qualidade da geometria final. A presença desses poros compromete as propriedades mecânicas e térmicas das peças, tornando-as mais suscetíveis a falhas sob condições de uso.

A análise do gráfico da figura 55 mostra que os provetes de PLA+30% Cortiça atingem uma tensão máxima em perto de 70 MPa, enquanto os de PLA+40% Cortiça alcançam aproximadamente 60 MPa, evidenciando uma redução na resistência à flexão com o aumento do teor de cortiça. No entanto, os provetes com 30% de cortiça apresentam uma maior capacidade de deformação, atingindo cerca de 0,028 de deformação antes da fratura, enquanto os de 40% fraturam em torno de 0,025, indicando um comportamento mais frágil à medida que a quantidade de cortiça aumenta.

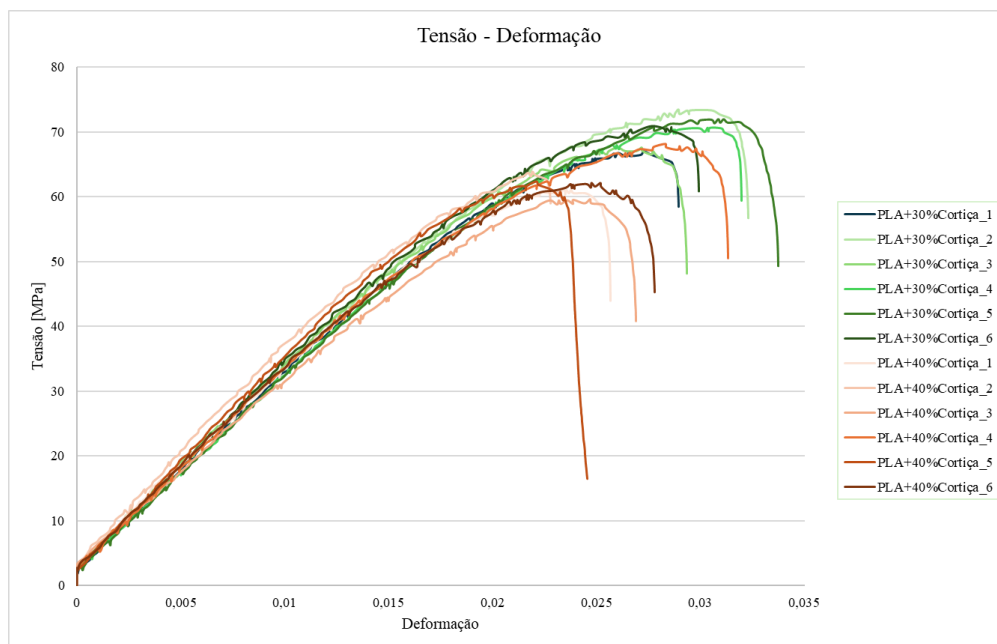
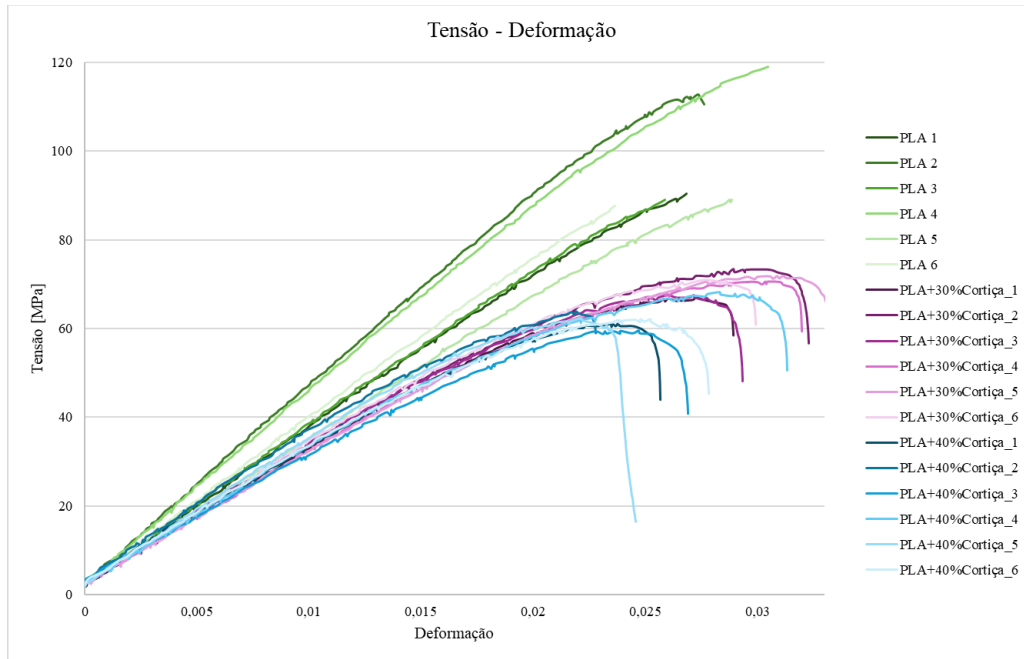


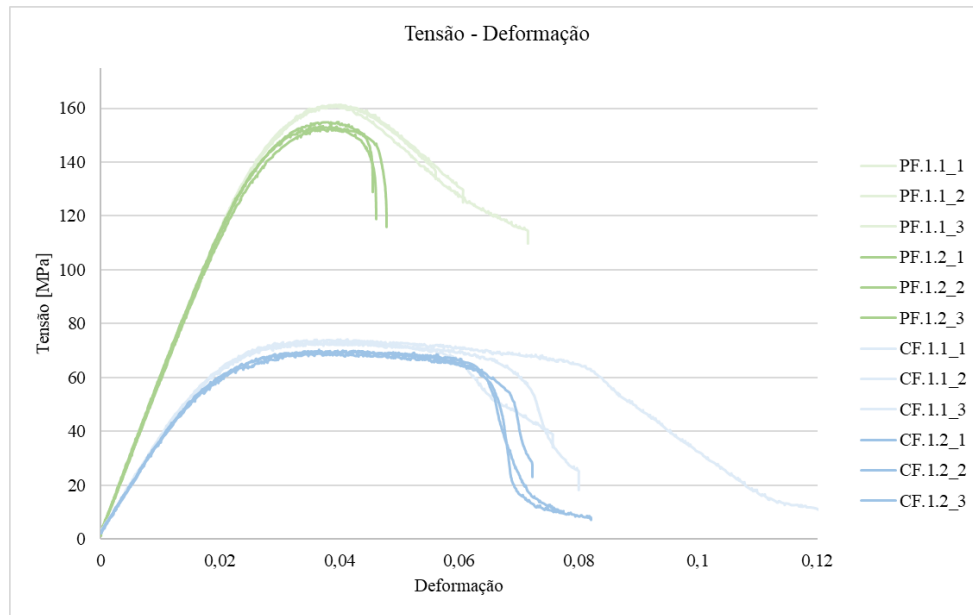
Figura 55 -Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes de PLA reforçados com cortiça obtidos por injeção

Analisando o gráfico da figura 56, podemos afirmar que o PLA puro apresenta alta resistência à flexão, com tensão máxima a variar entre 100 MPa e 120 MPa, com uma deformação próxima de 0,032 antes da fratura, caracterizando um comportamento rígido e frágil. Já os provetes com cortiça (30% e 40%) mostram uma resistência menor, com tensão entre 60-70 MPa.



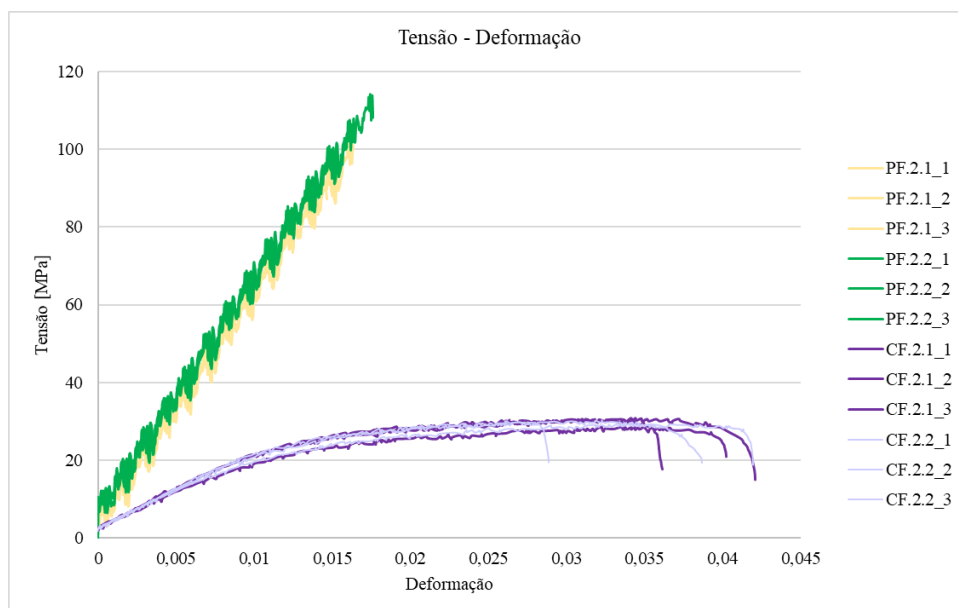
**Figura 56 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão dos provetes obtidos injeção**

Já nos provetes obtidos por FFF (Figura 57), o PLA (PF) com preenchimento linear (1.1) atinge uma tensão máxima de aproximadamente 150 MPa, com uma deformação de 0,04, enquanto o preenchimento cruzado (1.2), apresenta uma ligeira melhoria na resistência, atingindo valores próximos de 160 MPa. Por outro lado, os provetes de CorkFill (CF) com preenchimento linear (1.1) atingem cerca de 70 MPa, com uma deformação de 0,08, mostrando um comportamento mais dúctil. Já o preenchimento cruzado (1.2) melhora ligeiramente a rigidez, atingindo cerca de 75 MPa, mas mantendo uma boa capacidade de deformação, mantendo a coerência.



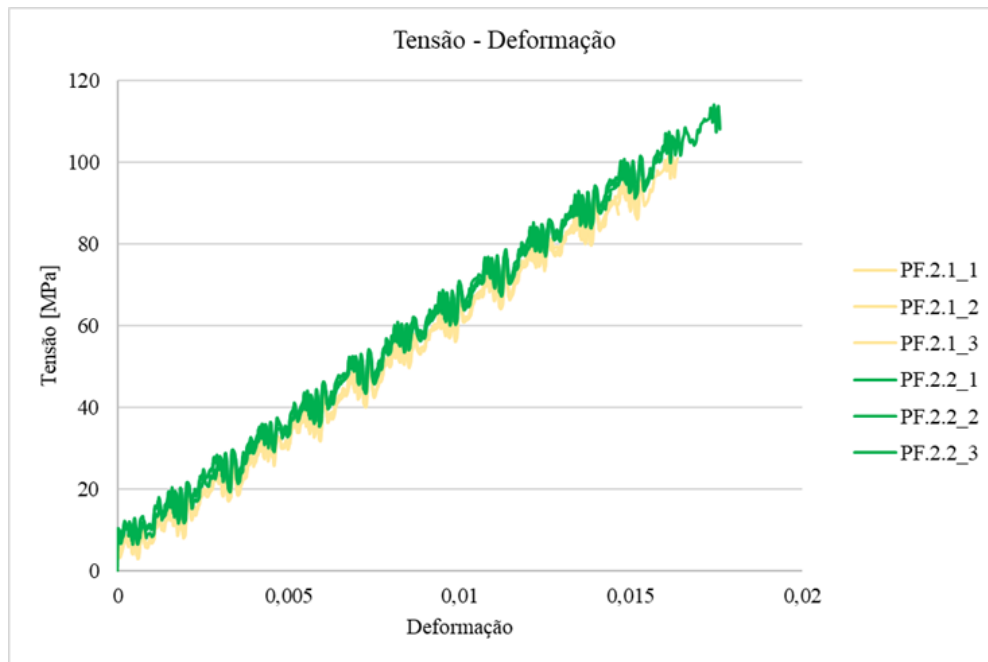
**Figura 57 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CF.1.1. e CF.1.2) e de PLA (PF.1.1. e PF.1.2.), na orientação horizontal**

Na figura 58, a análise das curvas demonstra que o CorkFill apresenta um comportamento coerente e consistente ao longo do ensaio. No entanto, as curvas do PLA apresentam oscilações irregulares e um comportamento atípico, que não é esperado para este material. Este desvio pode indicar um possível erro durante o ensaio ou uma falha no processo de impressão. Assim, a comparação direta entre os dois materiais pode não ser totalmente fiável, sendo esta anomalia analisada mais a fundo no gráfico seguinte.



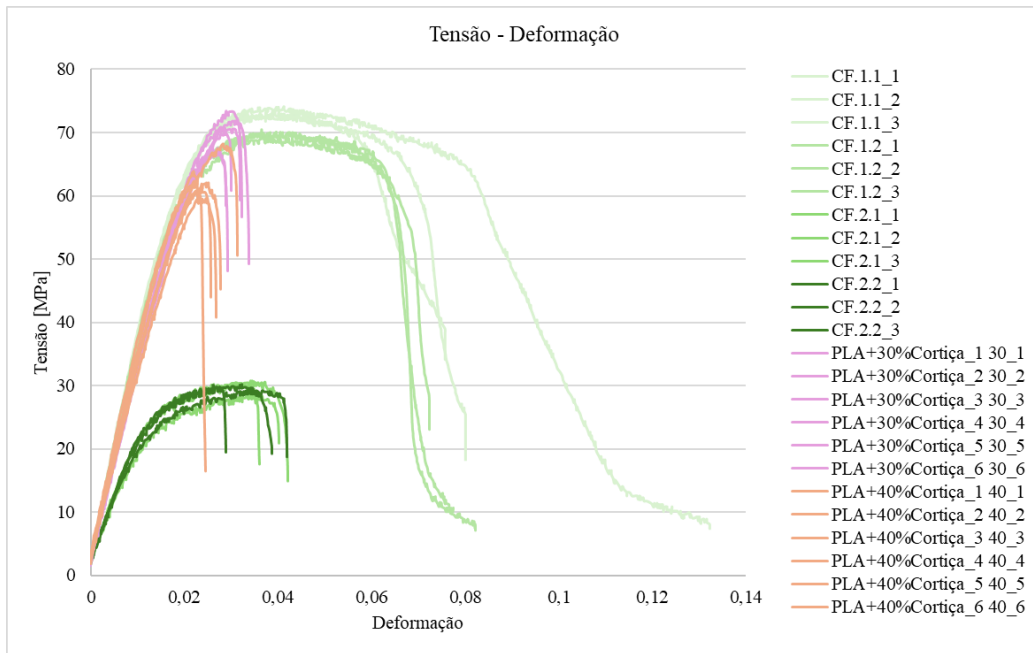
**Figura 58 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CF.2.1. e CF.2.2) e de PLA (PF.2.1. e PF.2.2.), na vertical**

O gráfico abaixo (Figura 59) revela um comportamento não esperado nos resultados obtidos nos ensaios aos provetes de PLA impressos em 3D, na vertical, indicando um possível erro experimental. Este erro pode estar relacionado com a má adesão entre camadas, uma vez que estes provetes foram os mais difíceis de imprimir, devido à oscilação do provete na fase final da impressão. Além disso, pequenas imperfeições nas amostras impressas podem ter influenciado os resultados, justificando a inconsistência nas curvas de tensão-deformação.



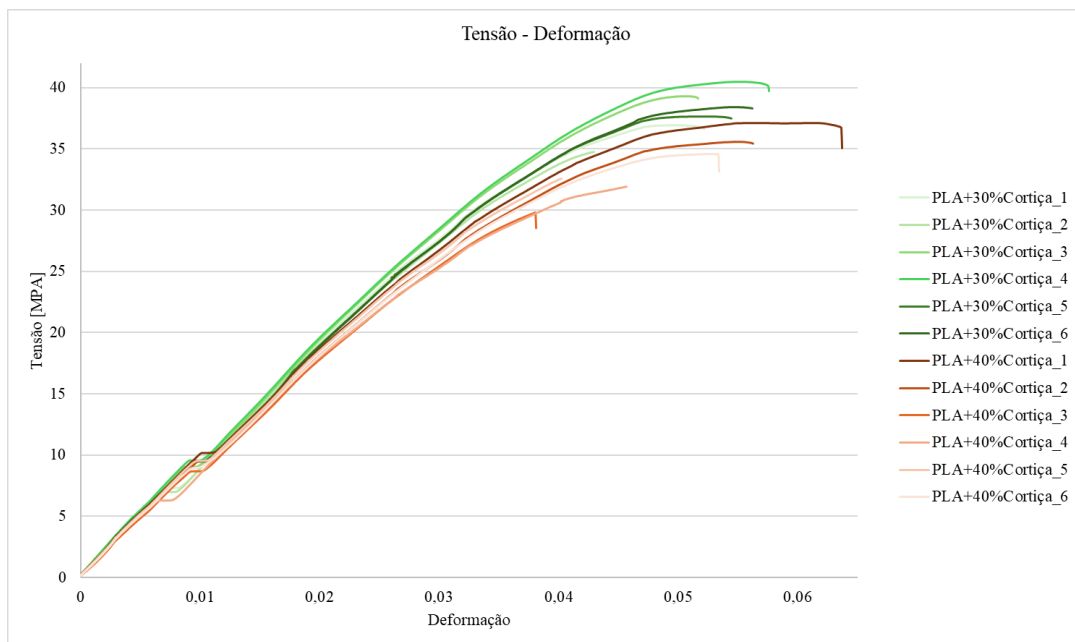
**Figura 59 - Gráfico Tensão Deformação provetes de flexão obtidos por FFF em PLA**

Numa análise comparativa aos gráficos dos provetes obtidos por moldação por injeção e por FFF (Figura 60), verificamos que a adição de cortiça ao PLA resultou numa redução da resistência mecânica, especialmente nas amostras com 40% de cortiça. Observa-se que os provetes moldados por injeção (em tons rosa e laranja – PLA+30% e PLA+40% cortiça) apresentaram maior resistência à flexão em comparação aos obtidos por FFF (linhas verdes). Apesar da presença de reforço com cortiça, os provetes por FFF evidenciam tensões máximas significativamente mais baixas e comportamento mais frágil. Isto evidencia a superioridade da moldação por injeção nas propriedades mecânicas, mesmo com carga de enchimento.



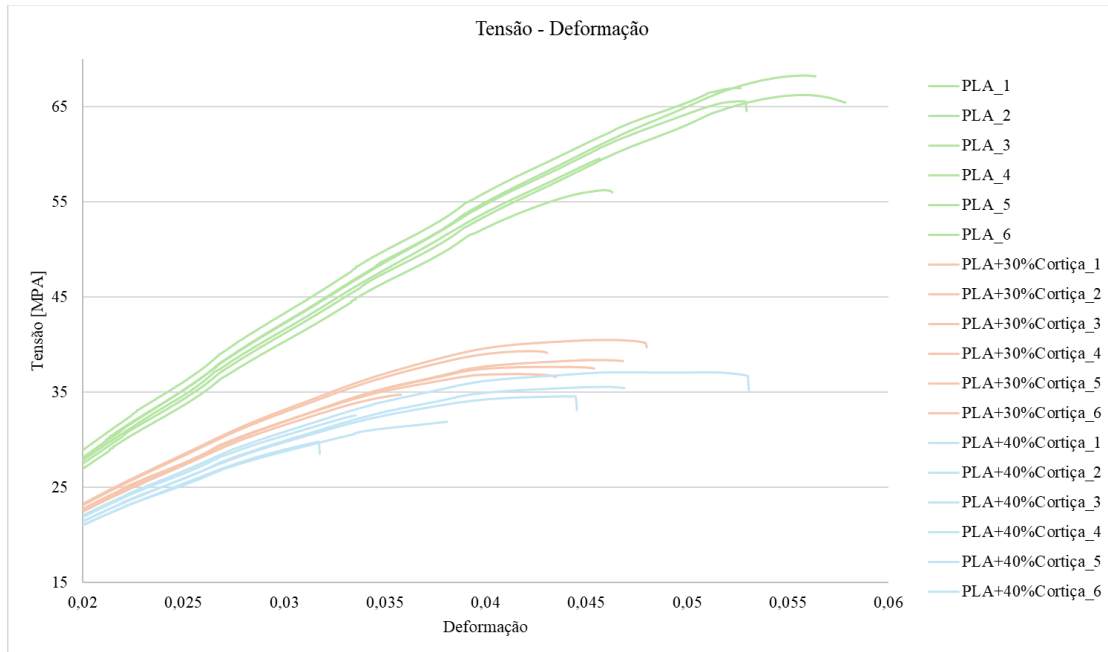
**Figura 60 - Comparação de resultados dos ensaios de flexão a provetes PLA reforçado com cortiça, obtidos por FFF e moldação por injeção**

Já na análise aos ensaios de tração (Figura 61), podemos verificar no gráfico Tensão-Deformação dos provetes de PLA reforçados com cortiça obtidos por injeção (figura 61), que o PLA com 30% de cortiça apresenta maior resistência mecânica (tensão máxima) e rigidez, comparativamente aos com o PLA com 40% de cortiça.



**Figura 61 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes de PLA reforçados com cortiça obtidos por injeção**

Olhando para o gráfico comparativo dos três materiais utilizados na injeção (figura 62), os ensaios de tração demonstram que o PLA puro possui o melhor desempenho mecânico, com maior tensão máxima e rigidez. A adição de cortiça ao PLA reduz progressivamente a resistência do material, sendo os compósitos com 40% de cortiça os que apresentam os valores mais baixos de tensão



**Figura 62 - Comparação de resultados dos ensaios de tração aos provetes obtidos injeção**

O PLA virgem tem a maior resistência à tensão, seguido pelo PLA com 30% de cortiça e depois pelo PLA com 40% de cortiça. O PLA virgem é mais dúctil, capaz de sofrer maior deformação antes da rutura, enquanto os compósitos com cortiça são mais rígidos e menos dúcteis. Estes resultados são ilustrados na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas provetes injetados

Propriedades Mecânicas	Média dos 6 ensaios de cada tipo de material		
	PLA	PLA+30%Cortiça	PLA+40%Cortiça
Módulo de Young [MPa]	1287,779	1069,193	1010,411
Tensão de Resistência à Tração [MPa]	63,823	37,933	33,593
Tensão de Ruptura [MPa]	63,457	37,678	32,779
Alongamento à Força Máxima [%]	6,16	5,07	4,88
Alongamento na Ruptura [%]	6,23	5,25	4,96

Já nos ensaios de tração aos provetes obtidos por FFF, para além do tipo de material utilizado, neste caso PLA e CorkFill, foram também avaliadas as outras variáveis que introduzimos no estudo, nomeadamente a orientação de construção (horizontal e vertical) e o tipo de preenchimento interno (linear e cruzado).

Nos provetes obtidos pela tecnologia FFF, e orientação de construção horizontal, os resultados, figura 63, indicam que os provetes em PLA (PT.1.1. e PT.1.2.), apresentam tensão máxima significativamente superior (50-55 MPa) do que os de CorkFill (CT.1.1 e CT.1.2.) (25-28 MPa). Além disso, os provetes em PLA demonstram um comportamento mais frágil, com uma ruptura abrupta após o pico de tensão, enquanto os provetes em CorkFill exibem um comportamento mais dúctil, com uma deformação mais prolongada após a tensão máxima.

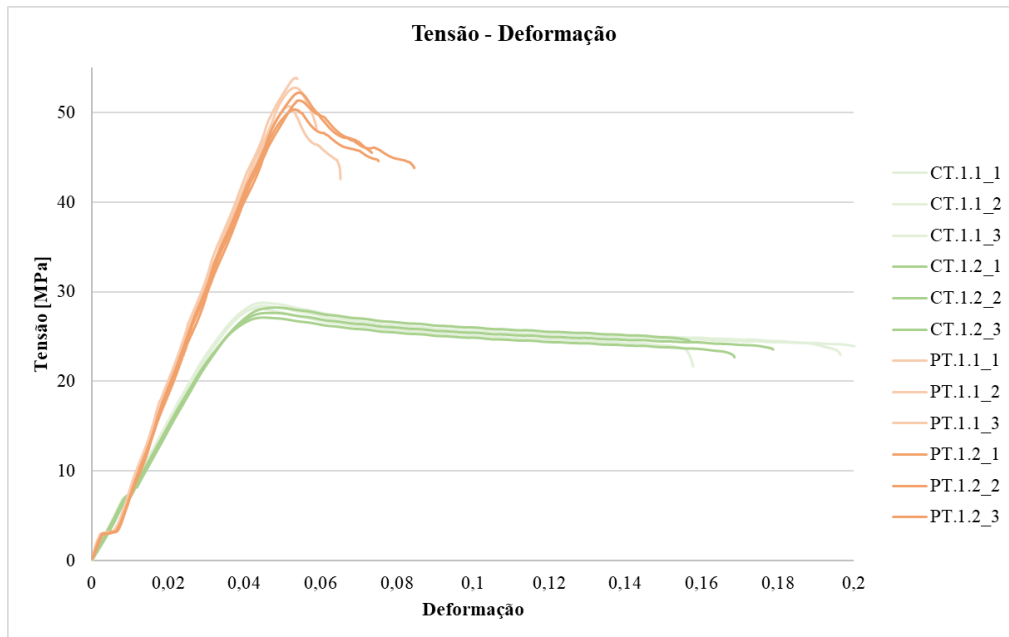


Figura 63 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CT.1.1 e CT.1.2) e de PLA (PT.1.1 e PT.1.2), na horizontal

Tal como na orientação horizontal, os provetes em PLA (PT.2.1 e PT.2.2), construídos na vertical, continuam a apresentar valores de tensão superiores face ao CorkFill (CT.2.1 e CT.2.2). No entanto, nota-se uma redução geral da resistência mecânica em ambos os materiais devido à orientação vertical de impressão, o que indica uma menor adesão entre camadas (Figura 64).

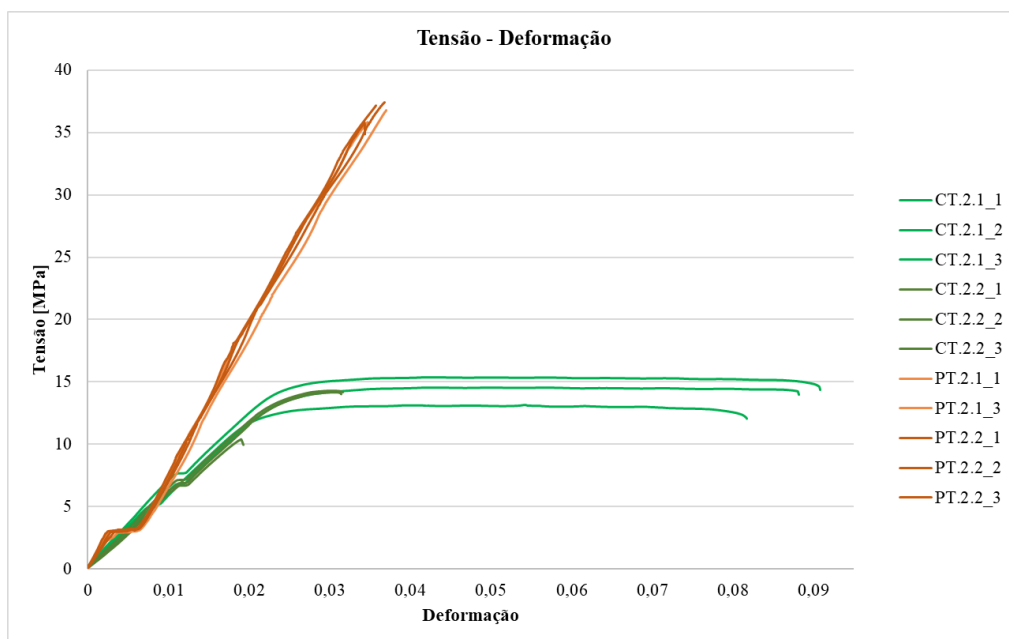


Figura 64 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes obtidos por FFF de CorkFill (CT.2.1 e CT.2.2) e de PLA (PT.2.1 e PT.2.2), na vertical

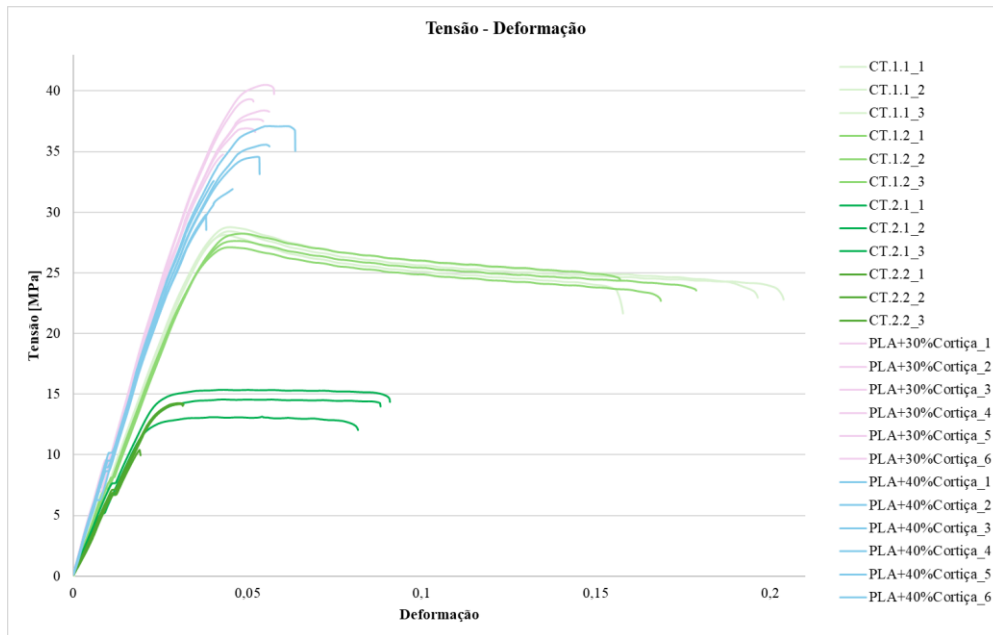
As propriedades mecânicas destes provetes obtidos pela tecnologia FFF, são ilustradas na tabela 9.

Concluimos que o melhor resultado à tração se obtém na construção horizontal e orientação de preenchimento linear. Por outro lado, a construção vertical origina resultados inferiores, ainda mais evidenciados nos provetes de CorkFill.

**Tabela 9 - Propriedades mecânicas provetes impressos em 3D**

Propriedades Mecânicas	Média dos 3 ensaios de cada tipo de provete							
	PT.1.1	PT.1.2	PT.2.1	PT.2.2	CT.1.1	CT.1.2	CT.2.1	CT.2.2
Módulo de Young [MPa]	1105,433	1088,520	1014,000	1071,482	783,743	732,458	636,073	561,413
Tensão Resistência à Tração [MPa]	52,452	51,311	36,318	36,793	28,446	27,667	14,361	14,221
Tensão de Ruptura [MPa]	48,161	44,640	36,304	36,475	22,475	23,549	13,469	14,088
Alongamento à Força Máxima [%]	5,3	5,4	3,6	3,6	4,4	4,7	4,7	3,0
Alongamento na Ruptura [%]	5,9	7,8	3,6	3,6	18,6	16,8	8,7	3,1

Comparando os dois processos de fabricação na figura 65, as amostras de PLA reforçado com cortiça produzidos por injeção (PLA+30%Cortiça e PLA+40%Cortiça), comprovam um comportamento mecânico superior, com valores de tensão máxima mais elevados, entre 30 e 38 MPa, e curvas de tração mais consistentes, quando comparados com os provetes obtidos por FFF, CorkFill.



**Figura 65 - Comparação de resultados dos ensaios de tração a provetes PLA reforçado com cortiça, obtidos por FFF e moldação por injeção**

Para complementar a análise dos materiais, foi realizada a determinação da massa dos provetes após a sua produção, recorrendo a uma balança de precisão. Na Tabela 10, relativa ao processo moldação por injeção, nos provetes de flexão, verificou-se uma redução da massa média de 0,89% e 1,58%, para as composições de PLA com 30% e de PLA com 40% de cortiça, respetivamente, em comparação com o PLA virgem. De forma semelhante, nos provetes de tração, observou-se uma diminuição de 0,95% e 1,76%, respetivamente. Estes resultados confirmam o efeito esperado da cortiça na diminuição da densidade.

**Tabela 10 - Massa dos provetes injetados**

Provetes	Massa Média [g]	Diferença relativamente ao PLA virgem
F_PLA_	8,5861	-
F_PLA+30%C_	8,5097	-0,89%
F_PLA+40%C_	8,4506	-1,58%
T_PLA_	11,5795	-
T_PLA+30%C_	11,4695	-0,95%
T_PLA+40%C_	11,3756	-1,76%

Foram também determinadas as massas dos provetes obtidos por FFF, permitindo não só avaliar o efeito do teor de cortiça, mas também identificar eventuais influências das diferentes variáveis de impressão. A Tabela 11 apresenta os valores médios de massa e as respectivas variações relativamente ao PLA impresso.

Os resultados obtidos para os provetes fabricados por FFF vão de encontro aos resultados já observados nos provetes obtidos por injeção. Tal como nos provetes injetados, as geometrias de CorkFill apresentam uma massa inferior ao PLA virgem, com diferenças percentuais significativas, como a observada no CF.2.1 (-12%), o que sugere que a adição de CorkFill reduz a densidade do material, tanto no processo de FFF quanto no de injeção. Essas variações de massa e densidade são consistentes, refletindo a natureza dos materiais compostos e os efeitos dos diferentes processos de fabricação.

**Tabela 11 - Massa dos provetes impressos em 3D**

ENSAIOS	Massa Média [g]	Diferença relativamente ao PLA virgem
PF.1.1	9,2544	
CF.1.1	8,9611	-3,17%
PF.1.2	9,40168	
CF.1.2	8,9580	-4,72%
PF.2.1	9,1758	
CF.2.1	8,0638	-12,12%
PF.2.2	9,1596	
CF.2.2	8,0416	-12,21%
PT.1.1	11,3392	
CT.1.1	10,0292	-11,55%
PT.1.2	11,1078	
CT.1.2	10,0008	-9,97%
PT.2.1	10,8377	
CT.2.1	10,2340	-5,57%
PT.2.2	10,8017	
CT.2.2	10,0439	-7,02%

## 6. Conclusões

O presente estudo permitiu avaliar o comportamento termomecânico de compósitos de base orgânica, combinando ácido polilático (PLA) com partículas de cortiça, fabricados através de moldação por injeção e FFF. Os resultados mostraram que o processo de fabrico influencia de forma significativa o desempenho mecânico dos materiais, com os provetes produzidos por injeção a apresentarem melhores propriedades de rigidez e resistência, tanto em ensaios de tração como de flexão, devido a uma estrutura interna mais uniforme. A adição de cortiça levou a uma redução geral nas propriedades mecânicas, especialmente nos ensaios de tração, sendo esse efeito mais pronunciado nos provetes fabricados por FFF. No entanto, os ensaios de flexão indicaram que, em alguns casos, compósitos com teores moderados de cortiça, como 30%, podem apresentar um bom desempenho, evidenciando o potencial dessas misturas para aplicações específicas.

Apesar da redução nas propriedades mecânicas, a incorporação de cortiça trouxe benefícios importantes, como a redução da massa dos provetes, o que pode ser vantajoso em aplicações onde o peso é um fator crucial. Além disso, destaca-se o uso de materiais renováveis e biodegradáveis, como o PLA, e o reaproveitamento de subprodutos naturais, como a cortiça, alinhando-se com os princípios de sustentabilidade e economia circular. Esses compósitos podem ser uma boa opção para setores que buscam soluções ecológicas e leves, mesmo com algum comprometimento na resistência mecânica.

A orientação de construção nos provetes FFF também teve um impacto considerável, sendo a construção horizontal mais vantajosa em termos de desempenho mecânico. O padrão de preenchimento, embora com um efeito menos expressivo, também teve uma influência relevante. A combinação do método FFF com reforço de cortiça apresentou o menor desempenho geral, destacando a necessidade de otimizar os parâmetros de impressão para melhorar a coesão interna e reduzir defeitos estruturais, como porosidades ou fraca adesão entre camadas.

Conclui-se que o reforço do PLA com cortiça representa um equilíbrio entre desempenho mecânico, leveza e sustentabilidade, sendo fundamental avaliar a sua aplicação de acordo com as exigências do produto final. Este estudo mostra a viabilidade técnica e ecológica dos

compósitos de base orgânica, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na engenharia de materiais.

Estudos futuros poderão explorar outras propriedades destes compósitos, nomeadamente a transferência térmica e condutibilidade elétrica, avaliando a sua viabilidade para aplicações em isolamento ou dissipação de carga elétrica. Além disso, poderá ser interessante investigar diferentes tratamentos da cortiça ou o uso de agentes de compatibilização para melhorar a adesão entre a matriz polimérica e as partículas de cortiça, minimizando a perda de propriedades mecânicas observada. Além disso, poderão ser testadas diferentes modificações na composição e nos processos de fabrico, com o objetivo de melhorar a integração da cortiça na matriz polimérica e minimizar a perda de propriedades mecânicas.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] A. S. Pouzada, Manual do Projectista para Moldes de Injecção de Plásticos, vol. 2. Centimfe, 2004.
- [2] L. Industries, Injection Molding Guide. A Guide to Polyolefin Injection Molding.
- [3] M. Â. O. Marujo, “Controlo de defeitos em termoplásticos obtidos por,” p. 6, 2014.
- [4] B. M. C. Ribeiro, “Simulação numérica da dispersão de cargas na moldação por injeção para a cromagem de peças em ABS,” 2024.
- [5] R. Crawford, Plastics Engineering, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [6] ISO/ASTM 52900:2021, 2021.
- [7] R. Robótica, Breve mas impressionante história da impressão 3D, 2024.
- [8] “Stereolithography Technology,” Stratasys. [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/stereolithography-technology/>.
- [9] “The Evolution of FDM 3D Printing,” Tech-Labs, 2024. [Online]. Available: <https://tech-labs.com/blog/evolution-fdm-3d-printing/>.
- [10] “The complete history of 3D printing.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>.
- [11] D. Turney, “History of 3D printing: It's older than you think,” 2021. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-3d-printing>. [Accessed: 2025].
- [12] “FFF vs FDM: Difference and Best Printers,” 2020. [Online]. Available: <https://top3dshop.com/blog/fff-vs-fdm-difference-and-best-printers/>.
- [13] “Makerbot Industries: Company Profile in 11 Facts,” 2016. [Online]. Available: <https://all3dp.com/makerbot-industries/>.
- [14] E. Patil, “3D printing,” 2020. [Online]. Available: <https://legalconsulting.in/news/view/2/>.

- [15] A. L. Pereira, “Estudo do efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência mecânica de peças impressas.”
- [16] “Your Guide to 3D Printing G-Code,” Wevolver, 2024. [Online]. Available: <https://www.wevolver.com/article/your-guide-to-3d-printing-g-code/>.
- [17] F. Zhang, “The recent development of vat photopolymerization: A review,” 2021.
- [18] “Material Jetting.” [Online]. Available: <https://www.3ds.com/make/guide/process/material-jetting/>.
- [19] “3D PRINTING - ADDITIVE.” [Online]. Available: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/introduction-to-additive-processes/>.
- [20] “IMPRESSÃO 3D - ADITIVA.” [Online]. Available: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting/>.
- [21] “Selective Laser Melting (SLM) Materials Guide,” 3DSPRO. [Online]. Available: <https://3dspro.com/resources/blog/selective-laser-melting-materials-guide/>.
- [22] “Selective Laser Sintering,” 3dsystems. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/selective-laser-sintering/>.
- [23] M.-A. d. Pastre, Y. Quinsat and C. Lartigue, “Effects of additive manufacturing processes on part defects and properties: a classification review.”
- [24] “Sheet Lamination,” Engineering Product Design, 2019. [Online]. Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>.
- [25] “Material Extrusion.” [Online]. Available: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion/>.
- [26] A. J. Sheoran and H. Kumar, “Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research,” Materials Today: Proceedings, 2019.
- [27] “Montado,” AMORIM. [Online]. Available: <https://www.amorim.com/pt/cortica/montado/>.

- [28] X. Pang, X. Zhuang, Z. Tang and X. Chen, “Polylactic acid (PLA): research, development and industrialization,” 2010.
- [29] J. Andrzejewski, M. Szostak, M. Barczewski and P. Łuczak, “Cork-wood hybrid filler system for polypropylene and poly(lactic acid) based injection molded composites. Structure evaluation and mechanical performance,” 2019.
- [30] S. Farah, D. G. Anderson and R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,” 2016.
- [31] “Composição química da cortiça.” [Online]. Available: <https://www.quali.pt/blog/1630-composicao-quimica-da-cortica/>. [Accessed: Mar. 2022].
- [32] “Amorim cork,” Mar. 2022. [Online]. Available: <https://www.amorimcork.com/pt/cortica/porque-cortica/>.
- [33] C. Ihamouchen, H. Djidjelli and A. Boukerrou, “Development and characterization of a new cork-based material,” *Materials Today: Proceedings*, p. 7, Apr. 2020.
- [34] F. M. P. Brites, “Compósitos de Cortiça e Plástico para Impressão 3D,” 2017.
- [35] B. Soares, L. Reis and L. Sousa, “Cork composites and their role in sustainable development,” 2011.
- [36] L. Gil and N. Marreiros, “Tintas com incorporação de partículas de cortiça para melhor comportamento térmico e acústico,” 2011.
- [37] “Materiais Compósitos: O Que são e Quais as Suas Propriedades?,” *Fibrenamics*. [Online]. Available: <https://fibrenamics.com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades/>.
- [38] E. M. Fernandes, V. M. Correlo, J. F. Mano and R. L. Reis, “Cork–polymer biocomposites: Mechanical, structural and thermal properties,” 2015.
- [39] E. Fernandes, “Cork–polymer biocomposites: Mechanical, structural and thermal properties,” 2015.
- [40] K. Ismail, K. Izwan, T. C. Ya and R. Ahmed, “3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques,” 2022.

- [41] “Thermogravimetric Analysis (TGA).” [Online]. Available: <https://photometrics.net/thermogravimetric-analysis-tga/>.
- [42] F. Davera, K. P. M. Lee, M. Brandt and R. Shanks, “Cork–PLA composite filaments for fused deposition modelling.”
- [43] A. Cunha, “Modelo pedagógico de resistores elétricos para descrever fraturas em sistemas físicos,” 2018.
- [44] “PT Plastics Technology,” 10 Jan. 2005. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/no-19---injection-molding-simulation/>. [Accessed: Jan. 2023].
- [45] S. P. M. d. Silva and J. M. Oliveira, “CORK-POLYLACTIDE COMPOSITES REINFORCED WITH POLYHYDROXYALKANOATES FOR ADDITIVE MANUFACTURING,” Aveiro, 2018.
- [46] M. J. A. T. J. U. D. E. M. Keydis Martinez Villadiego, “Thermoplastic Starch (TPS)/Polylactic Acid (PLA) Blending,” 2021.
- [47] M. Ruz-Cruz, P. Herrera-Franco and E. Flores-Johnson, “Thermal and mechanical properties of PLA-based,” 2021.
- [48] L. J. Gibson, K. E. Easterling and M. F. Ashby, “The structure and mechanics of cork,” Proc. R. Soc. Lond., 1981.
- [49] A. Dey and N. Yodo, “A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics,” 2019.
- [50] S. C. B. d. Oliveira, “Estudo de novos compósitos termoplásticos para a produção de cápsulas,” Aveiro, 2013.

# Anexos

## Anexo A

### 11 Test report

The test report shall include the following information:

- a) a reference to this part of ISO 527, including the type of specimen and the testing speed according to:

Tensile test ISO 527-2/1A/50  
 Type of specimen (see Figure 1 and Table 1) \_\_\_\_\_  
 Testing speed, in millimetres per minute \_\_\_\_\_

For items b) to q) in the test report, see ISO 527-1:2012, 12 b) to q).

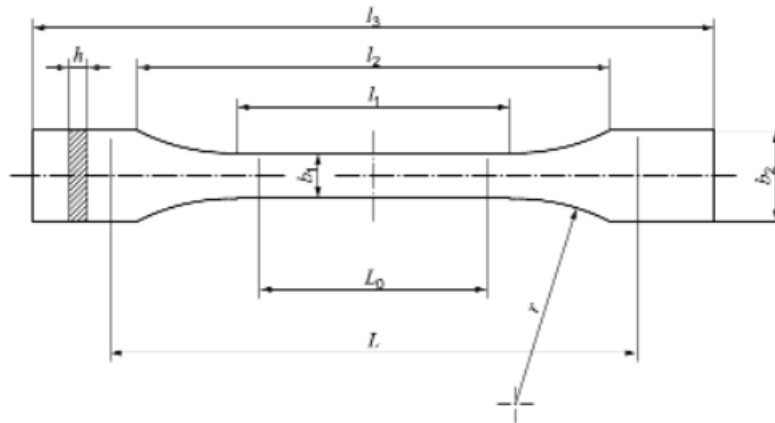


Figure 1 — Type 1A and 1B test specimens

Table 1 — Dimensions of type 1A and 1B test specimens

Dimensions in millimetres

	Specimen type	1A	1B
$l_3$	Overall length <sup>a</sup>	170	$\geq 150$
$l_1$	Length of narrow parallel-sided portion	$80 \pm 2$	$60,0 \pm 0,5$
$r$	Radius	$24 \pm 1$	$60 \pm 0,5$
$l_2$	Distance between broad parallel-sided portions <sup>b</sup>	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
$b_2$	Width at ends	$20,0 \pm 0,2$	
$b_1$	Width at narrow portion	$10,0 \pm 0,2$	
$h$	Preferred thickness	$4,0 \pm 0,2$	
$L_0$	Gauge length (preferred)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	$50,0 \pm 0,5$	
$L$	Initial distance between grips	$115 \pm 1$	$115 \pm 1$

<sup>a</sup> The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g.  $l_3 = 200$  mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.  
<sup>b</sup>  $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$ , resulting from  $l_1$ ,  $r$ ,  $b_1$  and  $b_2$ , but within the indicated tolerances.

## Anexo B – Fichas técnicas



## ErcrosBio® LL 600

### Transparent injection grade

#### DESCRIPTION

ErcrosBio® LL 600 is a PLA (polylactic acid)-based thermoplastic obtained from renewable natural materials. The content of material of biological origin is over 99%.

It is suitable for the production of food packaging in accordance with the criteria of Regulation (EU) No. 10/2011<sup>1</sup>.

It is compostable in accordance with the criteria of standard EN 13432<sup>1</sup>.

#### CHARACTERISTICS

ErcrosBio® LL 600 has a high level of fluidity, making it suitable for the injection of thin-walled parts, where good processability, high level of transparency and short injection cycle times are desired.

It has been designed to obtain parts by injection that do not require high impact properties and that require a high level of rigidity.

The crystallisation speed increases with high mould temperatures (90°C to 110°C).

#### RECOMMENDED APPLICATIONS

ErcrosBio® LL 600 is recommended for injection moulding of thin-walled parts, such as vessels, containers, etc. It can also be used for injection of small parts, protection cases, supports, small containers, etc.

#### PROCESSING CONDITIONS

Prior to processing, the material must be dried in a dehumidifier (see Drying).

It can be processed in conventional equipment such as those used with polyolefins.

It is recommended to use a temperature profile that increases from 180°C to 220°C, keeping the hopper inlet between 30°C and 40°C. It is recommended that the temperature of the molten mass does not exceed 220°C, as this could promote thermal degradation, which will lead to defects in the moulded parts.

The recommended spindle speed is 100-175 rpm.

For optimal performance at high temperatures of use, it is recommended to use mould temperatures between 90°C and 110°C.

The processability and surface finish quality of the parts improve considerably with mirror polished moulds.

#### PROPERTIES

Property	Value	Units	Method
Melt flow index (MFI)	17	g/10 min	ISO 1133-2 (195°C and 2,16 kg)
Density	1,25	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183-1
Melting temperature	181	°C	ISO 11357
Glass transition temperature	63	°C	ISO 11357
Young's modulus	3,0	GPa	EN ISO 527
Elongation at break	3,4	%	EN ISO 527
Tensile strength	68	N/mm <sup>2</sup>	EN ISO 527

<sup>1</sup> In accordance with Regulations (EU) 10/2011 and EN 13432, overall migration and/or compostability tests must be performed in the final packaging.

#### CONTACT TELEPHONE NUMBERS

SALES DEPARTMENT: Domingo Font, Tel. +34 93 444 53 03/ Fax: +34 933 237 927/ E-mail: [dfont@ercros.es](mailto:dfont@ercros.es)

TECHNICAL DEPARTMENT: Belén Pascual, Tel. +34 974 41 71 19/ Fax: +34 974 417 106/ E-mail: [bpascual@ercros.es](mailto:bpascual@ercros.es)

*The information contained in this document is provided by Ercros S.A. in good faith and is correct to the best of its knowledge. The material properties stated are typical values and do not represent a contractual data sheet or specifications. The client is responsible for ensuring that the materials supplied by Ercros S.A. are acceptable for the required purpose. Ercros S.A. accepts no responsibility regarding the use, application, adaptation or utilisation of the data described herein.*

## Technical datasheet colorFabb corkFill

colorFabb

Date of issue: November 28<sup>th</sup>, 2023  
Version: v1.0

### Description

The colorFabb corkFill is a specialized PLA/PHA material with an aesthetically pleasing filament material. The dark brown color complements the woodFill "brother" in a range of specialized 3D printing filaments, to create gorgeous structures and prints.

### Typical Properties

#### Mechanical Properties – 3D Printed

	Method	Value	Unit
Youngs Modulus	Tensile, ISO 527-1A	2200	MPa
Tensile Strength	Tensile, ISO 527-1A	30	MPa
Elongation at break	Tensile, ISO 527-1A	7.5	%
Flexural Modulus	Flexural, ISO 178	N/A	MPa
Flexural Strength	Flexural, ISO 178	N/A	MPa
Impact Strength	Charpy Notch, ISO 179	3	kJ/m <sup>2</sup>

#### Mechanical Properties – Injection Molded\*

	Method	Value	Unit
Youngs Modulus	Tensile, ISO 527-1A	2500	MPa
Tensile Strength	Tensile, ISO 527-1A	30	MPa
Elongation at break	Tensile, ISO 527-1A	5	%
Flexural Modulus	Flexural, ISO 178	2500	MPa
Flexural Strength	Flexural, ISO 178	11	MPa
Impact Strength	Izod Notch, ISO 180	4	kJ/m <sup>2</sup>
Density	ISO 1183	1.18	g/cm <sup>3</sup>

#### Thermal Properties\*

	Method	Value	Unit
Glass Transition Temp.	DSC, ISO 11357	N/A	°C
Melting Temp.	DSC, ISO 11357	N/A	°C
Decomposition Temp.	TGA, ISO 11358	N/A	°C
Vicat Softening Temp.	VST, ISO 306	60	°C
Melt Flow Index	MFI, (210°C/2.16 kg), ISO 1133-A	N/A	g/10min
Melt Flow Index	MFI, (190°C/1.16 kg), ISO 1133-A	N/A	g/10 min

\*These results are obtained from the information provided by the supplier of the raw material

colorFabb B.V.  
Bremweg 7  
5951 DK Belfeld  
The Netherlands

T +31 (0)77 – 4664015  
F +31 (0)77 – 3971414  
E sales@colorfabb.com  
I colorfabb.com

KvK nr: 53498607  
VAT nr: NL850902770B01  
IBAN:  
NL54RABO0151849188  
BIC: RABONL2U

## Technical datasheet colorFabb corkFill

colorFabb

Date of issue: November 28<sup>th</sup>, 2023  
Version: v1.0

### Filament Specifications

	Unit		
Diameter	mm	1.75	2.85
Max. roundness deviation	mm	± 0.05	± 0.1
Net. Filament weight	g	650	650

### Guideline for print settings

	Unit	
Nozzle Temp.	°C	210-230
Bed Temp.	°C	50-60
Bed / surface modification	-	-
Active cooling fan	%	100
Print Speed	mm/s	40-60

### Notes

The reported properties are an average of a batch of 3D specimens.

The specimens have been printed in XY plane, using 0.15 mm layer height, 100% infill, 0,4 mm nozzle, 220 °C nozzle temperature and 55°C bed temperature.

### Disclaimer

The product- and technical information provided in this datasheet is correct to the best of our knowledge. The information given is provided as a guidance for good use, handling and processing, and is not to be considered as a quality specification. The information only relates to the specific product and the material properties.

colorFabb B.V.  
Bremweg 7  
5951 DK Belfeld  
The Netherlands

T +31 (0)77 - 4664015  
F +31 (0)77 - 3971414  
E sales@colorfabb.com  
I colorfabb.com

KvK nr: 53498607  
VAT nr: NL850902770B01  
IBAN:  
NL54RABO0151849188  
BIC: RABONL2U

# Ficha técnica PLA

## Ultimaker

Nome químico

Poliácido láctico

Descrição

O filamento de PLA da Ultimaker proporciona uma experiência de impressão 3D sem complicações graças à sua fiabilidade e acabamento superficial de boa qualidade. O nosso PLA é fabricado a partir de fontes orgânicas e renováveis. É seguro, de fácil impressão e satisfaz uma ampla gama de aplicações para utilizadores tanto principiantes como avançados.

Características principais

Boa resistência à tração e qualidade da superfície, de trabalho fácil a elevadas velocidades de impressão, de fácil utilização em ambiente tanto doméstico, como de escritório; o PLA permite criar peças de elevada resolução. Existe uma ampla gama de opções de cores disponíveis.

Aplicações

Utensílios domésticos, brinquedos, projetos educativos, objetos de exposição, protótipos, modelos arquitetónicos, assim como métodos de moldagem por envolvimento para criar peças de metal.

Não adequado para

Aplicações em contacto com alimentos e aplicações in vivo. Uso ou aplicações de longa duração em espaços exteriores onde a peça impressa está exposta a temperaturas superiores a 50 °C.

### Especificações do filamento

	<u>Valor</u>	<u>Método</u>
Diâmetro	2,85±0,10 mm	-
Desvio máx. de circularidade	0,10 mm	-
Peso líquido do filamento	350 g / 750 g	-
Comprimento do filamento	~44 m / ~95 m	-

### Informação sobre cores

<u>Cor</u>	<u>Código da cor</u>
PLA verde	RAL 6018
PLA preto	RAL 9005
PLA cinza metalizado	RAL 9006
PLA branco	RAL 9010
PLA transparente	n/a
PLA cor de laranja	RAL 2008
PLA azul	RAL 5002
PLA magenta	RAL 4010
PLA vermelho	RAL 3020
PLA amarelo	RAL 1003
PLA branco pérola	RAL 1013

<u>Propriedades mecânicas (*)</u>	<u>Moldagem por injeção</u>		<u>Impressão 3D</u>	
	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Módulo de tração	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min.)
Resistência à tração no limite	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min.)
Resistência à tração na rutura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min.)
Alongamento no limite	-	-	3,3%	ISO 527 (50 mm/min.)
Alongamento na rutura	-	-	5,2%	ISO 527 (50 mm/min.)
Resistência à flexão	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexão	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
Resistência ao impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro

<u>Propriedades térmicas</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Taxa de fluxo de massa fundida (MFR)	6,09 g/10 min.	ISO 1133 (210 °C, 2,16 kg)
Deflexão térmica (HDT) a 0,455 MPa	-	-
Deflexão térmica (HDT) a 1,82 MPa	-	-
Transição vítrea	-60 °C	ISO 11357
Coefficiente de expansão térmica	-	-
Temperatura de fusão	145 – 160 °C	ISO 11357
Retração térmica	-	-

<u>Outras propriedades</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Gravidade específica	1,24	ASTM D1505
Classificação da chama	-	-

(\*) Ver notas.

Anexo C – Gráficos auxiliares

