



Universidade de Aveiro  
2022

**João Carlos  
Pinho Pais**

**MANUFATURA ADITIVA NUMA EMPRESA DE  
FABRICO DE COMPONENTES PARA A INDÚSTRIA  
AUTOMÓVEL**



Universidade de Aveiro  
2022

**João Carlos  
Pinho Pais**

## **MANUFATURA ADITIVA NUMA EMPRESA DE FABRICO DE COMPONENTES PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Manufatura Aditiva, realizada sob a orientação científica do Doutor José Martinho Marques de Oliveira, Professor Coordenador da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologia De Produção Aveiro-Norte (ESAN) da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Paulo Agostinho Silva de Lima, Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologia De Produção Aveiro-Norte (ESAN) da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutora Paula Maria Lousada Silveirinha Vilarinho**  
professora associada do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

vogais

**Prof. Doutor João Manuel Matias**  
professor adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

**Prof. Doutor José Martinho Marques de Oliveira**  
professor coordenador da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologia De Produção Aveiro-Norte (ESAN) da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Os meus agradecimentos,

Em primeiro lugar, a todos os funcionários da fábrica da Renault Cacia com quem tive contacto, que me acolheram desde o primeiro dia e se prontificaram sempre a ajudar-me em tudo o que era necessário. Um especial agradecimento aos funcionários do departamento de manutenção, no qual estava inserido.

Ao Eng. Carlos Lopes pela partilha de conhecimentos adquiridos ao longo de vários anos de experiência no meio industrial e pelas oportunidades que me proporcionou, não apenas diretamente ligadas à Manufatura Aditiva, como noutras áreas do meu interesse.

Ao professor Paulo Agostinho Silva de Lima e ao professor José Martinho de Oliveira pelo acompanhamento, orientação e disponibilidade para correções e propostas de melhoria.

À Escola Superior Aveiro-Norte pela disponibilização dos equipamentos laboratoriais necessários e aos docentes que me foram ajudando no esclarecimento de certas dúvidas mais técnicas.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, em especial ao professor Filipe J. Oliveira, pela disponibilização de um dos equipamentos laboratoriais.

À minha família e amigos que sempre me motivaram e apoiaram incondicionalmente, principalmente nos momentos mais difíceis que vivi durante este período.

Obrigado.

## palavras-chave

Manufatura Aditiva; Fabricação por Filamento Fundido; Gabaris; Materiais Poliméricos; Materiais Compósitos; Propriedades Mecânicas; Parâmetros de Impressão.

## resumo

A Manufatura Aditiva tem tido um crescimento sustentado do ponto de vista industrial ao longo dos últimos anos. Pelas vantagens que estas técnicas apresentam as empresas estão a demonstrar interesse na sua implementação para melhoria da sua cadeia de valor.

A fábrica da Renault em Cacia, Aveiro, pretende incrementar o recurso à Manufatura Aditiva para produzir internamente peças de desgaste e de substituição para as suas linhas de produção. Isto permite a redução de custos, stock, e dependência de fornecedores externos.

O presente trabalho foca-se num caso de estudo em que se pretende substituir uma peça, até então produzida por um processo subtrativo (maquinação), por uma peça produzida aditivamente.

Neste contexto procedeu-se à caracterização mecânica de vários materiais comercialmente disponíveis para fabricação por filamento fundido (FFF), ao estudo dos parâmetros e estratégias de impressão e ao *redesign* da peça utilizando *guidelines de Design for Additive Manufacturing*.

No final do trabalho fez-se uma análise de custos relativos à produção da peça em função dos diferentes materiais e seleccionou-se aquele que apresentou melhor relação custo/benefício.

A FFF revelou-se uma técnica com potencial crescente para o setor industrial da Renault Cacia.

**keywords**

Additive Manufacturing; Fused Filament Fabrication; Jigs and Fixtures; Polymeric Materials; Composite Materials; Mechanical Properties; Print Parameters.

**abstract**

Additive Manufacturing as seen a sustainable growth over the past few years in the industry. Currently, companies are beginning to show interest in implementing these techniques to improve their supply chain.

The Renault factory at Cacia, Aveiro, intends to use Additive Manufacturing to manufacture wear and spare parts internally, for the reduction of costs, stock, and dependence on external suppliers.

The present work focuses on a case study where it is intended to replace a part previously produced by a subtractive process (machining) by an additive manufactured part.

The study proceeded with the mechanical characterization of several materials, the study of printing parameters and strategies along with the part redesign using Design for Additive Manufacturing guidelines.

In the end, the costs related to the parts production in the different materials were analyzed and, ultimately, the material considered the most suitable was selected.

The FFF technique presents an increasing potential in order to be used in companies like Renault Cacia.

# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	A Renault Cacia .....	1
1.3	Objetivos do trabalho .....	2
1.4	Organização.....	2
2	A Manufatura Aditiva .....	4
2.1	Tecnologias de MA .....	5
2.1.1	Fotopolimerização em Cuba.....	7
2.1.2	Laminação de Folha .....	8
2.1.3	Fusão em Cama de Pó (PBF) .....	9
2.1.4	Extrusão de Material .....	11
2.1.5	Jato de Ligante .....	12
2.1.6	Deposição Direta de Energia (DED).....	13
2.1.7	Jato de Material .....	14
2.2	Fabricação por Filamento Fundido (FFF) .....	19
2.2.1	Parâmetros de impressão .....	19
2.2.2	Materiais.....	21
2.2.3	Propriedades mecânicas das peças .....	25
3	Manufatura Aditiva num contexto industrial .....	29
3.1	Manufatura Aditiva e casos de estudos .....	29
3.2	O presente caso de estudo: Renault Cacia – “ <i>Jigs and Fixtures</i> ” .....	36
4	Trabalho Experimental.....	40
4.1	Materiais e métodos .....	41
4.1.1	Materiais.....	41
4.1.2	Método para produção de provetes: ciclos de lavagem.....	42
4.1.3	Método para produção de provetes: parâmetros de impressão.....	43
4.1.4	Método para produção da peça caso de estudo .....	43
4.2	Equipamentos e métodos.....	44
4.2.1	Equipamentos e métodos para FFF .....	44
4.2.2	Equipamentos e métodos para caracterização dimensional e mecânica.....	45

4.3	Resultados e discussão .....	51
4.3.1	Efeito dos ciclos de lavagem .....	51
4.3.2	Efeito dos parâmetros de impressão .....	68
4.3.3	Impressão e teste da peça caso de estudo .....	76
4.3.3.1	Análise dos desvios dimensionais.....	80
4.3.3.2	Análise do desgaste em contexto de uso real .....	83
4.3.3.3	<i>Redesign</i> da peça.....	87
4.3.3.4	Análise de custos e durabilidade das peças.....	89
4.4	Alternativas à tecnologia FFF .....	91
4.5	Contributos para outros casos de MA na Renault Cacia .....	93
5	Conclusões e sugestões .....	96
	Referências Bibliográficas .....	100
	ANEXOS .....	104
A.	Ficha técnica do Ertalon® 66 GF30.....	105
B.	Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após impressão.....	107
C.	Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após um ciclo de lavagem e secagem .....	110
D.	Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após trinta ciclos de lavagem e secagem .....	113



# Lista de figuras

<b>Figura 1-</b> Representação de três processos de fabrico diferentes, retirado de [1].....	4
<b>Figura 2-</b> Tecnologia SLA <sup>®</sup> – a) Baixo para cima; b) Cima para baixo, retirado de [7].....	7
<b>Figura 3-</b> Esquematização da tecnologia DLP, retirado de [8].....	8
<b>Figura 4-</b> Esquematização das tecnologias de Laminação em Folha, retirado de [10].....	9
<b>Figura 5-</b> Esquematização das tecnologias de Fusão em Cama de Pó, retirado de [12].....	10
<b>Figura 6-</b> Esquematização da tecnologia FFF, retirado de [16].....	12
<b>Figura 7-</b> Esquematização da tecnologia a) LENS; b) EBAM; c) Arc; retirado de [22].....	14
<b>Figura 8-</b> Esquematização das tecnologias de Jato de Material, retirado de [11].....	14
<b>Figura 9-</b> Árvore de decisão de tecnologias, adaptado de [7].....	18
<b>Figura 10-</b> Parâmetros de impressão a) Orientação da peça; b) Altura da Camada; c) Preenchimento; d) N° de perimetros; e) N° de camadas superiores e inferiores; f) Estruturas de Suporte, adaptado de [40].....	20
<b>Figura 11-</b> Materiais usados na tecnologia FFF, retirado de [30].....	21
<b>Figura 12-</b> Materiais termoplásticos para FFF, retirado de [29].....	22
<b>Figura 13-</b> Descrição esquemática de parâmetros ( $\theta$ = Orientação; $\alpha$ = Raster Angle; adaptado de [61].....	28
<b>Figura 14-</b> Manufatura Aditiva na indústria, adaptado de [67].....	30
<b>Figura 15-</b> Esquematização da diferença entre: (a) um <i>jig</i> ; e (b) uma <i>fixture</i> , adaptado de [64].....	31
<b>Figura 16-</b> Exemplos de: (a) <i>jigs</i> ; e (b) <i>fixtures</i> . .....	31
<b>Figura 17-</b> Jig produzido internamente na AutoEuropa, retirado de [69].....	33
<b>Figura 18-</b> Ferramenta de aperto produzida pela Heineken, retirado de [70].....	33
<b>Figura 19-</b> Protetor para guia linear, retirado de [71].....	34
<b>Figura 20-</b> <i>Jig</i> para soldadura do sistema de escape do carro da Renault Sport Formula 1, retirado de [72].....	34

<b>Figura 21-</b> Palete com o cárter intermédio posicionado .....	37
<b>Figura 22-</b> Peças poliméricas de posicionamento .....	37
<b>Figura 23-</b> Zona de maquinação .....	38
<b>Figura 24-</b> Cárgeres carregados nas paletes depois de maquinados .....	38
<b>Figura 25-</b> Saída dos cárgeres da lavagem e secagem .....	38
<b>Figura 26-</b> Conjunto pronto para expedição .....	38
<b>Figura 27-</b> Peças em Ertalon® 66 GF30 desgastadas .....	39
<b>Figura 28-</b> Prusa MK3S+ .....	45
<b>Figura 29-</b> Impressora BCN3D Epsilon W27 .....	45
<b>Figura 30-</b> Equipamento de ensaios universal AUTOGRAPH AG-IS 10kN .....	46
<b>Figura 31-</b> Equipamento de ensaios de impacto RAY-RAN .....	46
<b>Figura 32-</b> Equipamento para medição de dureza na escala D .....	46
<b>Figura 33-</b> Tribometro Anton Paar TRB3 .....	46
<b>Figura 34-</b> Dimensões dos provetes de dureza .....	47
<b>Figura 35-</b> Ensaios de dureza .....	47
<b>Figura 36-</b> Dimensões dos provetes de flexão .....	47
<b>Figura 37-</b> Ensaios de flexão em 3 pontos .....	48
<b>Figura 38-</b> Dimensões dos provetes de impacto .....	48
<b>Figura 39-</b> Ensaio de impacto Charpy .....	49
<b>Figura 40-</b> Dimensões do par tribológico para ensaios de desgaste <i>Pin-on-Disk</i> .....	50
<b>Figura 41-</b> Ensaio de desgaste <i>Pin-on-Disk</i> .....	50
<b>Figura 42-</b> Scanner 3D Zeiss COMET .....	51
<b>Figura 43-</b> Malha resultante da digitalização do provete .....	51
<b>Figura 44-</b> Análise microscópica da seção transversal de estruturas fabricadas em FDM com espessura total de 1,2 mm: <b>(a)</b> alturas de camada de 0,1 mm, <b>(b)</b> 0,2 mm e <b>(c)</b> 0,3 mm, adaptada de [86] .....	71
<b>Figura 45-</b> Exemplificação do movimento de inserção da peça de alumínio na paleta de transporte .....	76

<b>Figura 46-</b> Modelo 3D da peça em estudo .....	76
<b>Figura 47-</b> Diferença entre tipos de preenchimento <b>a)</b> Cubic normal; <b>b)</b> Cubic Sub-Division. .....	78
<b>Figura 48-</b> Zonas críticas de impacto, assinaladas a vermelho .....	79
<b>Figura 49-</b> Representação das camadas de impressão <b>a)</b> segundo a orientação original da peça; <b>b)</b> numa orientação considerada ideal.....	79
<b>Figura 50-</b> Sequência de operações para medição de desgaste <b>a)</b> modelo CAD; <b>b)</b> malha da peça impressa em comparação com o modelo CAD; <b>c)</b> malha da peça após utilização em comparação com a malha da peça original .....	80
<b>Figura 51-</b> Controlo dimensional da peça em PETG .....	81
<b>Figura 52-</b> Controlo dimensional da peça em ASA .....	81
<b>Figura 53-</b> Controlo dimensional da peça em PAHT CF15.....	82
<b>Figura 54-</b> Controlo dimensional da peça em PA6 GF30.....	82
<b>Figura 55-</b> Peças fabricadas nos diferentes materiais e devidamente identificadas .....	83
<b>Figura 56-</b> Peça em PETG após um mês de utilização .....	83
<b>Figura 57-</b> Peça em ASA após um mês de utilização .....	83
<b>Figura 58-</b> Peça em PAHT CF15 após um mês de utilização.....	84
<b>Figura 59-</b> Peça em PA6 GF30 após um mês de utilização .....	84
<b>Figura 60-</b> Análise de desgaste na peça em PETG .....	85
<b>Figura 61-</b> Análise de desgaste na peça em ASA .....	85
<b>Figura 62-</b> Análise de desgaste na peça em PAHT CF15 .....	86
<b>Figura 63-</b> Análise de desgaste na peça em PA6 GF30 .....	86
<b>Figura 64-</b> Zonas críticas de desgaste, assinaladas a vermelho .....	88
<b>Figura 65-</b> <i>Design</i> da peça otimizado .....	88
<b>Figura 66-</b> Representação da interação da peça metálica com a peça polimérica.....	89
<b>Figura 67-</b> Exemplo do posicionamento de várias peças no volume de trabalho de um equipamento SLS, retirado de [7] .....	92
<b>Figura 68-</b> Diferentes referências de placas de contacto feitas em PAHT CF15 .....	93

<b>Figura 69-</b> Protetor de LCD para AGV's feito em PETG.....	94
<b>Figura 70-</b> Suporte para etiquetas RFID feito em ASA .....	94
<b>Figura 71-</b> Apoio de motor feito em PLA.....	95
<b>Figura 72-</b> Batentes para paletes feitos em TPU.....	95

# Lista de tabelas

<b>Tabela 1-</b> Classes de processos, técnicas e materiais em MA, norma ASTM F2792-12 <sup>a</sup> , retirado de [6].....	6
<b>Tabela 2-</b> Vantagens e desvantagens das tecnologias de MA, adaptado de [7] e [28].....	17
<b>Tabela 3-</b> Alguns compósitos usados em FFF, adaptado de [30, 48-51] .....	26
<b>Tabela 4-</b> Resumo dos materiais utilizados.....	41
<b>Tabela 5-</b> Parâmetros de impressão dos provetes.....	42
<b>Tabela 6-</b> Parâmetros de impressão fixos e variáveis .....	43
<b>Tabela 7-</b> Parâmetros de impressão para a peça em estudo .....	44
<b>Tabela 8-</b> Propriedades mecânicas do Ertalon® 66 GF30 .....	51
<b>Tabela 9-</b> Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão.....	58
<b>Tabela 10-</b> Resumo dos resultados obtidos em todos os ensaios mecânicos nos diferentes materiais.....	59
<b>Tabela 11-</b> Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão após um ciclo de lavagem e secagem.....	64
<b>Tabela 12-</b> Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão após trinta ciclo de lavagem e secagem.....	65
<b>Tabela 13-</b> Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PETG .....	69
<b>Tabela 14-</b> Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do ASA .....	70
<b>Tabela 15-</b> Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PAHT CF15 .....	70
<b>Tabela 16-</b> Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PA6 GF30 .....	71
<b>Tabela 17-</b> Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PETG.....	73
<b>Tabela 18-</b> Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do ASA.....	74
<b>Tabela 19-</b> Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PAHT CF15 .....	75
<b>Tabela 20-</b> Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PA6 GF30 .....	75
<b>Tabela 21-</b> Custos associados à produção da peça em estudo em vários materiais .....	89

**Tabela 22-** Ganhos associados à produção da peça em estudo em vários materiais ..... 90

# Lista de gráficos

<b>Gráfico 1-</b> Resultados dos ensaios de dureza.....	52
<b>Gráfico 2-</b> Resultados dos ensaios de impacto.....	54
<b>Gráfico 3-</b> Curva média dos ensaios de flexão do PETG.....	55
<b>Gráfico 4-</b> Curva média dos ensaios de flexão do ASA.....	56
<b>Gráfico 5-</b> Curva média dos ensaios de flexão do PAHT CF15 .....	56
<b>Gráfico 6-</b> Curva média dos ensaios de flexão do PA6 GF30 .....	57
<b>Gráfico 7-</b> Resultados dos ensaios de desgaste .....	59
<b>Gráfico 8-</b> Resultados dos ensaios de dureza após os ciclos de lavagem e secagem.....	61
<b>Gráfico 9-</b> Resultados dos ensaios de impacto após os ciclos de lavagem e secagem.....	62
<b>Gráfico 10-</b> Curvas médias dos ensaios de flexão do PETG após os ciclos de lavagem e secagem.....	65
<b>Gráfico 11-</b> Curvas médias dos ensaios de flexão do ASA após os ciclos de lavagem e secagem .....	66
<b>Gráfico 12-</b> Curvas médias dos ensaios de flexão do PAHT CF15 após os ciclos de lavagem e secagem.....	66
<b>Gráfico 13-</b> Curvas médias dos ensaios de flexão do PA6 GF30 após os ciclos de lavagem e secagem.....	67
<b>Gráfico 14-</b> Resultados dos ensaios de desgaste após os ciclos de lavagem e secagem .....	68

# Lista de símbolos

## Abreviaturas e acrónimos

**3D** – Tridimensional

**MA** – Manufatura Aditiva

**FFF** – Fabricação por Filamento Fundido

**DfAM** – Projeto para Manufatura Aditiva  
*/ Design for Additive Manufacturing*

**SLA** – Estereolitografia

**DLP** – Processamento de Luz Digital

**SLS** – Sinterização Seletiva a Laser

**PBF** – *Powder Bed Fusion* / Fusão em  
Cama de Pó

**DMLS** – Sinterização Direta a Laser de  
Metal

**SLM** – Fusão Seletiva a Laser

**SHS** – Sinterização Seletiva por Calor

**DED** – Deposição Direta de Energia

**PLA** – Ácido Polilático

**PETG** – Polietileno Tereftalato Glicol

**ABS** – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

**ASA** – Acrilonitrilo Estireno Acrilato

**PC** – Policarbonato

**PEEK** – Poliéter éter cetona

**TPU** – Poliuretano Termoplástico

**PAHT CF15** – Poliamida de Alta  
Temperatura com 15% de fibra de  
Carbono

**PA6 GF30** – Poliamida 6 com 30% de  
fibra de vidro

**CAD** – Desenho Assistido por  
Computador

**STL** – *Standard Triangle Language*

**CNC** – Controlo Numérico  
Computorizado

**CMM** – Máquina de Medição por  
Coordenadas

**AGV** – Veículo Guiado Autonomamente

**RFID** – Identificação por  
Radiofrequência

**TCT** - *Time-Compression Technologies*



---

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Motivação

Fascinado pela área de conceção de produto, tecnologias e processos de fabrico, foi no seu primeiro ano de licenciatura que o autor descobriu e teve contacto com algumas tecnologias de Manufatura Aditiva, vulgarmente designadas por “impressão 3D”. Terminada a licenciatura, o ingresso no mestrado em Manufatura Aditiva (MA) da Universidade de Aveiro representou uma oportunidade de especialização numa área com elevado potencial a nível industrial. A verdade é que estas tecnologias são relativamente novas do ponto de vista de aplicação industrial, mas cada vez mais empresas estão interessadas em conhecer as suas vantagens e até mesmo em implementá-las na sua cadeia de valor, pois reconhecem as enormes potencialidades das mesmas.

A Renault Cacia é uma fábrica do grupo Renault que produz órgãos e componentes para a indústria automóvel desde 1981. Depois de algumas análises de custos internos a Renault Cacia percebeu que conseguiria reduzir drasticamente os custos associados à produção de peças de elevado desgaste para as linhas de produção se, em vez de subcontratar um serviço de produção de peças convencional, as produzisse internamente numa “Impressora 3D”. Embora exista claramente um potencial de ganhos para a empresa existem, por outro lado, desafios associados a esta mudança que têm de ser resolvidos, nomeadamente, a escolha correta dos materiais disponíveis para MA e a otimização da geometria tendo em conta a tecnologia usada. Foi então neste ponto que surgiu a oportunidade de fazer um projeto em parceria com esta empresa com o objetivo de contribuir para a mudança da tecnologia utilizada para fabricar os componentes de elevado desgaste.

## 1.2 A Renault Cacia

O grupo Renault foi fundado em 1898 sendo atualmente um grande fabricante da indústria automóvel, tendo representação em 134 países espalhados pelo globo. A fábrica da Renault em Cacia, Aveiro, foi fundada em 1981 e atualmente é uma das muitas fábricas do grupo espalhadas pelo mundo inteiro. As instalações desta unidade fabril ocupam uma superfície total de 300 000 m<sup>2</sup> e uma área coberta de 70 000 m<sup>2</sup>. Nesta unidade são fabricadas caixas de velocidades e componentes para motores como por exemplo bombas de óleo, árvores de equilibragem e outros componentes em ferro fundido e alumínio. Para complementar o processo produtivo, a Renault Cacia dispõe de meios de controlo de qualidade e ensaios sofisticados para garantir a qualidade final dos componentes.

Tudo o que é produzido é depois exportado para fábricas de carroçaria/montagem e de mecânica distribuídas por diferentes continentes onde se encontre uma fábrica da aliança Renault, Nissan e Mitsubishi. Espanha, França, Roménia, Turquia, Eslovénia, Brasil, Chile, Marrocos, África do Sul, Irão e Índia são exemplos de países para onde é feita esta exportação.

A título de curiosidade, em 2019 e 2020 a unidade portuguesa foi considerada a melhor a nível mundial na produção de caixas de velocidades entre todas as fábricas de componentes mecânicos do Grupo Renault e da Aliança com as outras marcas. Em 2017, atingiu um número de 10 000 000 de caixas de velocidade produzidas e em 2018, 40 000 000 bombas de óleo. São apenas alguns dados que comprovam a capacidade de produção, qualidade, prestígio e dimensão desta unidade situada em Portugal.

### 1.3 Objetivos do trabalho

No início do projeto de dissertação foi realizada uma visita à empresa onde foram apresentados os potenciais ganhos ao usar a MA e os desafios associados à utilização destas tecnologias. Na visita ao chão de fábrica foi possível visualizar as peças em contexto real, a que tipo de esforços ou ambientes estão sujeitas e o seu modo de falha. Neste contexto, verificou-se que em praticamente todas as linhas de produção dentro da empresa existem peças de elevado desgaste que têm de ser substituídas regularmente, como por exemplo, *grippers* para robôs, sistemas de posicionamento de peças bem como outras pequenas peças. A aplicação da MA na produção desta tipologia de peças pode ter um impacto significativo ao nível dos custos e tempo de produção, pelo que será este o enquadramento do trabalho.

O principal objetivo deste projeto é recorrer à MA para produção de componentes até então produzidos por tecnologias convencionais, reduzindo os tempos e custos de produção. Os objetivos específicos são: explorar a tecnologia de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) na Renault Cacia; analisar o desempenho mecânico de diferentes materiais; analisar a influência dos parâmetros de impressão no desempenho mecânico dos materiais; fazer um *redesign* à peça selecionada para o caso de estudo, tirando partido da liberdade de *design* que os processos aditivos permitem.

### 1.4 Organização

O presente documento divide-se em quatro capítulos principais.

O capítulo 1 diz respeito à introdução geral. No capítulo 2 irá ser realizada uma introdução à MA apresentando-se as diferentes tecnologias com foco particular no processo FFF. É feita uma revisão bibliográfica sobre os parâmetros de impressão do processo, os materiais existentes e as propriedades mecânicas das peças fabricadas por esta tecnologia.

No capítulo 3 aborda-se a utilização de técnicas aditivas na indústria e apresenta-se o caso de estudo que se vai desenvolver.

O capítulo 4 é referente ao trabalho experimental. Apresentam-se os materiais, os equipamentos utilizados e o respetivo método experimental utilizado neste trabalho. Numa primeira

fase estudam-se as propriedades mecânicas de diferentes materiais, assim como a influência dos parâmetros de impressão nessas mesmas propriedades. Os resultados são apresentados e discutidos.

O estudo da influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas dos materiais serve depois como base para imprimir a peça final do caso de estudo nos diferentes materiais. Estas foram sujeitas a condições reais de trabalho na linha de produção, nomeadamente a sua utilização como *jig and fixture*. Discute-se também a alteração da geometria da peça para otimizar a sua performance mecânica e o seu fabrico. É ainda feita uma análise de custos de produção em todos os materiais e respetiva estimativa de vida útil.

Analisa-se também a utilização de outra tecnologia de MA para o fabrico da tipologia de peças que se pretende.

Uma vez que o trabalho foi desenvolvido em contexto industrial houve a oportunidade de trabalhar e ter conhecimento de outros casos práticos onde as técnicas aditivas se tornaram uma mais-valia para a empresa. Esses casos são também apresentados.

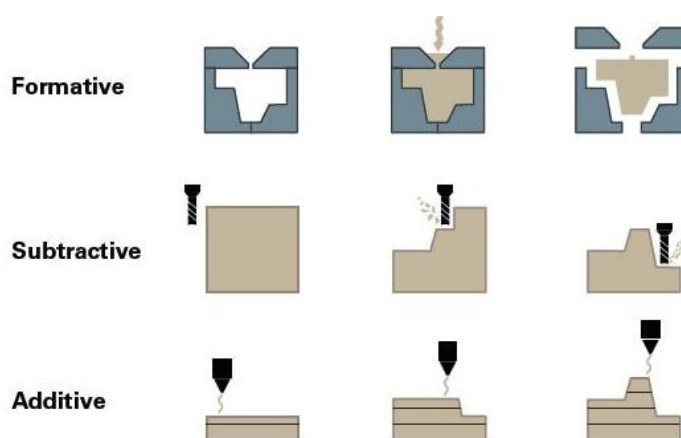
O capítulo 5 diz respeito às conclusões finais do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

---

## 2 A MANUFATURA ADITIVA

---

A Manufatura Aditiva (MA) caracteriza-se pelo fabrico de peças através da sobreposição sucessiva de material, camada a camada, partindo sempre de um modelo digital, ao contrário das técnicas convencionais em que se parte de um bloco maciço de material que é desbastado até se obter a forma pretendida. As técnicas de MA caracterizam-se também pela produção de peças sem que para isso seja necessário o fabrico de ferramentas adicionais, como por exemplo moldes, matrizes etc. (Figura 1).



**Figura 1-** Representação de três processos de fabrico diferentes, retirado de [1]

Quando surgiu, na década de 80, a tecnologia (Estereolitografia) servia para produzir protótipos numa perspectiva de validação da geometria, começando-se a adotar o termo “Prototipagem rápida”. Atualmente as tecnologias de MA não se destinam apenas a prototipagem, existindo uma gama maior de tecnologias e materiais que permitem o fabrico de produtos finais de elevada qualidade superficial, rigor dimensional e resistência mecânica [2].

Ao longo dos tempos foram surgindo termos como “Estereolitografia”, “Impressão 3D”, “Prototipagem Rápida” e “Fabrico Aditivo”. À medida que as tecnologias aditivas se foram desenvolvendo começaram a existir múltiplas definições e formas de as explicar [3]. Por este motivo houve a necessidade de uniformizar a nomenclatura criando-se uma norma específica para este efeito, a ISO/ASTM 52900:2015 [4]. “Manufatura Aditiva é o termo geral para as tecnologias que, com base numa representação geométrica, criam objetos físicos por adição sucessiva de material. Essas tecnologias são atualmente utilizadas para várias aplicações na indústria de engenharia, bem como em outras áreas da sociedade, como medicina, educação, arquitetura, cartografia, brinquedos e entretenimento.”

## 2.1 Tecnologias de MA

No início dos anos 80, Hideo Kodama fez uma publicação sobre o primeiro sistema de prototipagem rápida em que demonstrava a possibilidade de criação de peças 3D com recurso a polímeros fotoendurecíveis quando expostos a radiação UV.

Em 1984 foi registada a patente da primeira técnica de MA, a Estereolitografia, desenvolvida no Texas por Chuck Hull. Dois anos mais tarde, em 1986, é fundada a *3D Systems*, a primeira empresa a desenvolver e a comercializar um equipamento de Manufatura Aditiva. A par destes desenvolvimentos surgiram novos tipos de equipamentos usando métodos diferentes e novos materiais, mas sempre com a filosofia de fabricar aditivamente [5].

Até este ponto, a maioria das tecnologias tinham sido desenvolvidas para processar apenas materiais poliméricos, sendo um grande entrave pois representavam uma limitação relativamente ao tipo de peças que as empresas queriam produzir. Estes equipamentos destinavam-se a produzir peças protótipo, sendo uma limitação para uma aplicação onde se pretendesse uma peça técnica final. Existindo esta necessidade a tecnologia evoluiu, passando da prototipagem para um nível considerado de fabrico. Começaram a surgir os primeiros equipamentos que processavam material metálico, e, a partir daí, o aparecimento de novas tecnologias e materiais nunca mais parou. Os princípios base eram os mesmos, ou seja, fabricar camada a camada, mas a forma de funcionamento e as características dos processos mudavam significativamente. Surgiu então a necessidade de organizar e agrupar as tecnologias de MA segundo a sua tipologia, vincando as diferenças notórias entre cada uma e algumas características também únicas, tais como o material usado e características das peças fabricadas. Na tabela 1 estão agrupadas as tecnologias de MA segundo a norma **ASTM F2792-12**.

**Tabela 1-** Classes de processos, técnicas e materiais em MA, norma ASTM F2792-12, retirado de [6]

Classes de processos de MA	Descrição	Tecnologias *	Forma material	Materiais	Observações	Referências
<b>Fotopolimerização em cuba (Vat Photopolymerization)</b>	Líquido fotossensível é seletivamente curado através de uma fonte de luz UV, ativadora da polimerização	SLA® Micro- SLA® DLP CLIP	Líquido Suspensão	Polímeros Compósitos Cerâmicos	Acabamento superficial - excelente Resolução de impressão - elevada Propriedades mecânicas dos produtos finais - boas	SLA® Patent US 4575330 CLIP Patent WO 2014126837A2
<b>Laminação de folha (Sheet Lamination)</b>	Folhas de material são cortadas e ligadas para formar o objeto	UC/UAM LOM	Folha Chapa Laminado	Metais Polímeros Papel	Custo de equipamento e materiais - baixo	LOM Patent US 4752352
<b>Fusão em cama de pó (Powder Bed Fusion)</b>	Energia térmica funde seletivamente e localmente o material na cama de pó	SLS SLM DMLS EBM	Pó	Polímeros Metais Cerâmicos Compósitos	Propriedades mecânicas dos produtos finais - boas Acabamento superficial - bom Resolução de impressão - boa	SLS Patent US 5155324 DMLS Patent US 20160288207
<b>Extrusão de material (Material Extrusion)</b>	Material é dispensado e seletivamente depositado através de um orifício	FFF/ FDM® Robocasting Bioplotting Contour crafting	Filamento Pasta Suspensão	Metais Polímeros Cerâmicos Compósitos	Densidade dos produtos finais - elevada Instalação e uso dos equipamentos – fácil Oferta e variedade de equipamentos no mercado - elevada	FDM Patent US 5121329 Robocasting Patent US 6027326 Bioplotting Patent US 8639484
<b>Jato de ligante (Binder Jetting)</b>	Agente ligante líquido é seletivamente depositado para aglutinar material em pó	3DP MJP	Pó	Metais Cerâmicos Compósitos Polímeros	Consumo de energia - baixo Variedade de materiais disponíveis - elevada Capacidade de reutilização de material - boa Resolução de impressão - boa Consumo de energia - baixo	3D Printing Patent US 5204055
<b>Deposição direta de energia (Direct Energy Deposition)</b>	Energia térmica é focada num ponto para fundir o material enquanto é depositado	LENS EBAM LMD	Pó	Metais	Desperdício de material - baixo Propriedades mecânicas de produtos finais – boas Velocidade de impressão - elevada Consumo de energia - elevado	LENS Patent US 6046426 LMD Patent WO 2006133034A1
<b>Jato de material (Material Jetting)</b>	Gotas do material são seletivamente depositadas	Polyjet	Líquido Suspensão	Polímeros Compósitos Metais	Objetos com gradação de propriedades Resolução de impressão - elevada	

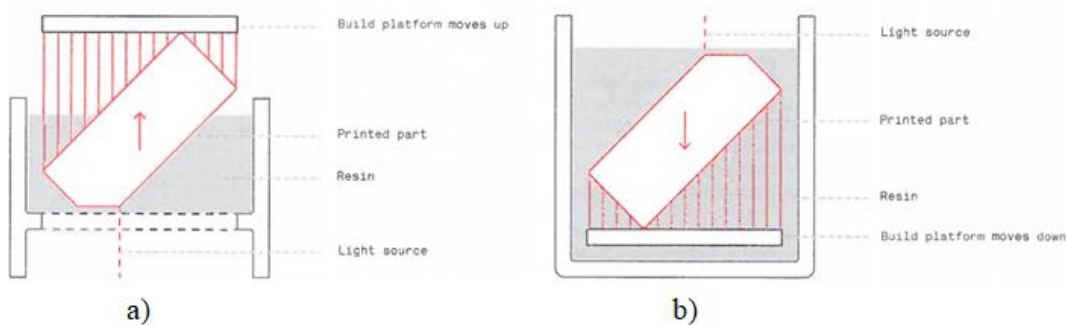
### 2.1.1 Fotopolimerização em Cuba

A primeira categoria apresentada engloba diversas tecnologias e processos diferentes, mas baseados sempre no mesmo princípio. As tecnologias de fotopolimerização em cuba utilizam resinas fotossensíveis num “tanque” que são curadas seletivamente quando sujeitas a uma fonte de luz. Repetindo esta processo de “cura” camada a camada é possível obter um objeto físico 3D. As tecnologias mais conhecidas dentro da categoria são o SLA<sup>®</sup> e o DLP [7].

#### a) Estereolitografia (SLA<sup>®</sup>)

Como já foi referido, a Estereolitografia foi a primeira técnica de MA desenvolvida. O equipamento usava um conjunto de espelhos, conhecidos como galvanómetros, para direcionar o laser para as zonas onde era necessário existir uma polimerização da resina (processo químico). Assim que o laser fotopolimeriza uma camada 2D, a plataforma associada à área de impressão move-se um determinado incremento correspondente à altura da próxima camada e o processo repete-se até se obter um objeto final.

Os equipamentos de fotopolimerização podem funcionar de duas formas distintas, “de baixo para cima” ou “de cima para baixo”. Esta designação está associada ao sentido com que a peça é construída na base de impressão. Se for “de baixo para cima” o processo de impressão começa com a plataforma em baixo e a fonte de luz está posicionada na parte de baixo do equipamento. Se for “de cima para baixo” o procedimento é o contrário, a plataforma situa-se na posição mais alta no início do processo de impressão e a fonte de luz encontra-se no topo do equipamento. Na figura 2 é possível ver uma representação gráfica destas configurações.

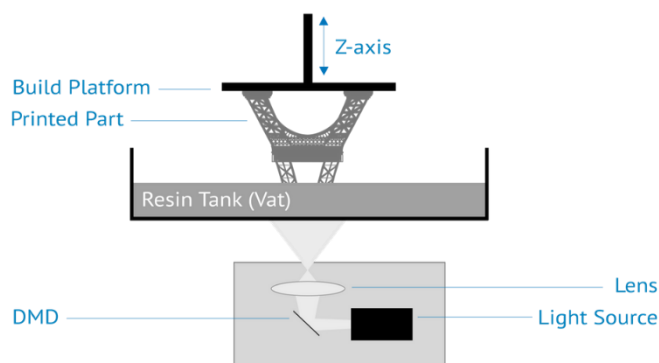


**Figura 2-** Tecnologia SLA<sup>®</sup> – a) Baixo para cima; b) Cima para baixo, retirado de [7]

## b) Processamento de Luz Digital (DLP)

O processo DLP é muito semelhante ao SLA<sup>®</sup> existindo diferenças apenas no sistema de luz utilizado para curar a resina. Enquanto o SLA<sup>®</sup> utiliza um laser e um conjunto de espelhos para o direcionar para as zonas pretendidas, a tecnologia DLP usa um projetor de luz digital para projetar a luz de uma só vez a cada camada (figura 3). A luz é direcionada para um dispositivo chamado micro espelho digital que tem como função controlar as zonas onde é permitida a passagem de luz, ou seja, onde é necessário polimerizar a resina. É com esta variação dos espelhos que se consegue definir a secção pretendida e assim, ao projetar a luz, é possível fazer uma camada instantaneamente. A imagem de cada camada é composta por pixels quadrados que dá origem a uma camada formada por pequenos retângulos chamados de “voxels”.

Existem soluções no mercado de equipamentos DLP com LCD's entre os 2 e os 8K de resolução. Equipamentos de SLA<sup>®</sup> usam um laser entre 130 e 150  $\mu\text{m}$ . A precisão dos equipamentos de DLP dependem do tamanho do voxels que se consegue, por exemplo, a resolução de alguns equipamentos 4K em XY rondam os 35 e os 50  $\mu\text{m}$ . Uma das desvantagens do SLA<sup>®</sup> em comparação com o DLP é que, como usa um laser demora mais tempo a curar a resina em cada camada, traduzindo se num tempo de impressão mais elevado. Como o DLP projeta camada a camada instantaneamente o tempo de impressão por peça é muito menor. Por outro lado, o SLA<sup>®</sup> garante a precisão em todo o volume de impressão, o que não se verifica na tecnologia DLP.



**Figura 3-** Esquemática da tecnologia DLP, retirado de [8]

### 2.1.2 Laminação de Folha

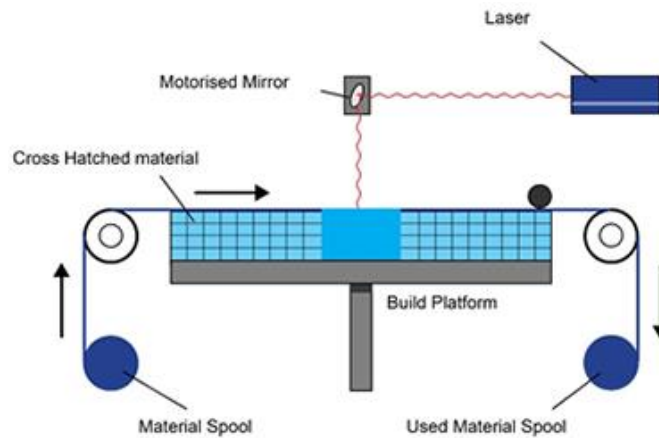
A laminação em folha consiste no corte e sobreposição de várias folhas de material até chegar ao objeto desejado, de acordo com um modelo 3D. A tecnologia que mais se destacou foi a Fabricação de Objetos Laminados (LOM), mas atualmente caiu em desuso uma vez que as



tecnologias inseridas na categoria “Laminação de Folha” são usadas quase exclusivamente para prototipagem, e não para produção de peças finais.

O material é depositado na área de impressão através de rolos que fazem essa distribuição do material em folha. O material utilizado é revestido por uma camada adesiva que promove a união entre as diferentes folhas de material depositadas umas sobre as outras. O rolo que faz a alimentação do material na área de trabalho aquece para derreter o adesivo. Uma vez unidas duas camadas, procede-se ao corte do material em excesso, consoante a geometria da secção, para isso pode-se utilizar um laser ou um método mais tradicional, como uma por exemplo uma lâmina de corte. A plataforma de trabalho desce e o procedimento repete-se (figura 4).

Relativamente aos materiais, pode-se utilizar qualquer material que possa ser colado como por exemplo, papel revestido com adesivo, plástico ou laminados metálicos. O papel é o material mais utilizado devido à facilidade com que este é cortado e, por oposição, as folhas metálicas são as menos comuns devido a exigir uma etapa de corte mais complexa [9].



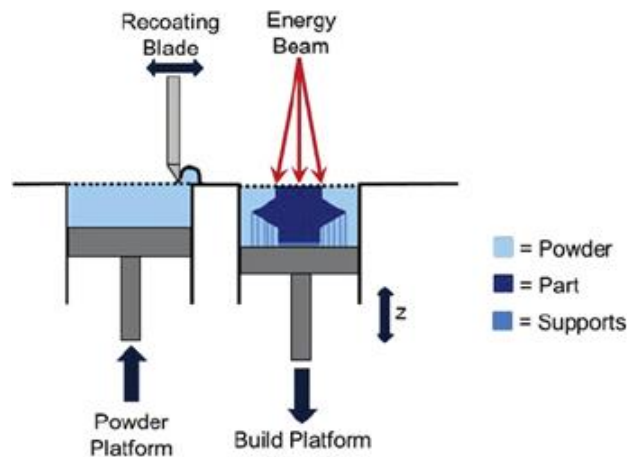
**Figura 4-** Esquematisação das tecnologias de Laminação em Folha, retirado de [10]

### 2.1.3 Fusão em Cama de Pó (PBF)

Como o nome indica, esta categoria inclui tecnologias que usam materiais na forma de pó e que são fundidos localmente por meio de energia térmica. O feixe de energia (normalmente laser ou feixe de elétrons) incide na cama de pó (área de impressão) fundindo total ou parcialmente as partículas constituintes dessa cama, aglutinando-as e formando assim uma camada. Estes equipamentos têm normalmente duas ou três plataformas. Uma delas é a área útil de impressão e as restantes servem para fazer a alimentação do pó a cada camada. Assim que a primeira camada é feita o pistão conectado à plataforma da área de impressão desce e o pistão conectado à plataforma de alimentação de pó sobe um determinado incremento. O rolo volta a fazer uma passagem distribuindo

o pó novamente na área de impressão. O feixe de energia volta a incidir na cama de pó, unindo as partículas pulverulentas entre si e à camada anterior. O procedimento repete-se até se obter o produto final (figura 5) [11].

Dependendo da tecnologia, podem-se processar materiais poliméricos, metálicos, cerâmicos e compósitos. Algumas das tecnologias incluídas nesta categoria são as seguintes: Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Fusão Seletiva a Laser (SLM), Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS), Sinterização Seletiva por Calor (SHS) e Fusão por Feixe de Eletrões (EBM) [7, 11, 13, 14].



**Figura 5-** Esquemática das tecnologias de Fusão em Cama de Pó, retirado de [12]

As tecnologias de Fusão em Cama de Pó têm todas o mesmo princípio de funcionamento. A principal diferença está no tipo de feixe de energia utilizado e na sua potência.

A tecnologia SLS usa lasers para sinterizar o pó polimérico. Materiais com baixa condutividade térmica são os mais adequados uma vez que apresentam um comportamento mais estável durante o processo de sinterização [7]. Existem dois métodos distintos: método direto e método indireto. O método direto é quando após a impressão se obtém uma peça pronta a ser utilizada e que não necessita de outras operações de pós processamento. Já o método indireto está muitas vezes associado ao processamento de pós poliméricos com determinadas percentagens de outros materiais (ex.: materiais metálicos e cerâmicos). O pó polimérico permite a agregação das partículas pela tecnologia SLS, mas após a impressão as peças são sujeitas a etapas de *debinding* (queima do ligante polimérico) e sinterização das restantes partículas.

A tecnologia SHS (*Selective Heat Sintering*) processa também material polimérico, mas em vez de usar um sistema de laser para fazer a sinterização das partículas usa uma cabeça de impressão térmica. A cabeça de impressão faz um varrimento transversal sob a área da secção que se pretende sinterizar a uma temperatura ideal para o efeito, e assim ocorre a agregação das partículas

poliméricas. Existem vantagens consideráveis em ter uma cabeça de impressão térmica em vez de um sistema de laser, tais como, a redução do tamanho do equipamento, possibilitando o desenvolvimento de equipamentos *desktop* e um equipamento muito mais acessível e de fácil manutenção [13].

As tecnologias DMLS e SLM estão direcionadas para o processamento de metais. As principais diferenças face ao SLS estão na potência do laser e na forma como este vai operar. No DMLS, um feixe de laser mais potente do que aquele utilizado no SLS é direcionado o pó metálico, sinterizando-o. Já no SLM, o laser incide nas partículas de pó até que estas atinjam a temperatura de fusão, formando uma junção muito mais homogênea [11].

Em oposição às restantes tecnologias de PBF, a tecnologia EBM não utiliza um laser, mas sim um feixe de eletrões como fonte de energia para fundir as partículas de pó.

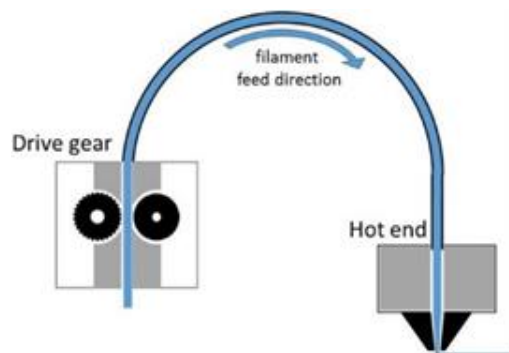
#### 2.1.4 Extrusão de Material

O princípio e funcionamento das tecnologias de extrusão de material consiste na deposição seletiva de material através de um bico extrusor, mais conhecido como *nozzle*. O material, que pode estar na forma de filamento, pasta ou suspensão, é empurrado até ao orifício de saída, que pode ou não estar aquecido, dependendo da técnica, e depois é depositado estrategicamente para fazer as diferentes camadas do objeto.

É na categoria de Extrusão de Material que se encontra a tecnologia de MA mais conhecida pela maioria das pessoas, a técnica Fabricação por Filamento Fundido (FFF), muitas vezes designada por “Impressão 3D”. Um filamento polimérico é empurrado até ao *nozzle* que está aquecido a uma determinada temperatura, promovendo uma extrusão de material fundido. Através da movimentação dos diferentes eixos do equipamento de impressão o polímero é depositado sob finas camadas, secção a secção, camada a camada, até se obter o objeto pretendido (figura 6) [15].

A técnica FFF está também muitas vezes associado o termo FDM<sup>®</sup>, em inglês, *Fused Deposition Modeling*<sup>®</sup>. Isto acontece porque a tecnologia FDM<sup>®</sup> é muito semelhante ao FFF, mas foi uma tecnologia patenteada pela *Stratasys* em 1991. Ambos os termos, FFF e FDM<sup>®</sup>, são utilizados frequentemente quando se pretende falar nesta tecnologia de extrusão de material, ainda que o mais correto seja realmente o termo FFF.

A técnica FFF é a que conta até agora com uma maior gama de materiais disponíveis para impressão devido ao facto de ser a uma tecnologia acessível, de simples utilização e com um elevado potencial. Além de filamentos meramente poliméricos surgiram no mercado filamentos compósitos, em que à matriz polimérica se adiciona outro tipo de materiais como fibras trituradas, partículas de pó, cerâmicas, metálicas e outros materiais naturais ou reciclados.



**Figura 6-** Esquemática da tecnologia FFF, retirado de [16]

A Markforged desenvolveu uma variante do FFF chamada *Continuous Filament Fabrication*<sup>®</sup>, incorporando uma segunda cabeça para extrusão de uma fibra contínua de carbono, vidro ou kevlar que reforça a peça internamente. A adição de fibras contínuas numa peça polimérica eleva drasticamente o seu desempenho mecânico. O próprio fabricante garante propriedades iguais a peças fabricadas em alumínio [17].

O “*Robocasting*” ou “*Direct Ink Writing*” é uma tecnologia de extrusão que utiliza pastas e suspensões desde que estas apresentem as propriedades reológicas adequadas [18]. O material é pressionado por um pistão ou por um fuso até ao orifício de saída. Esta técnica tem vindo a ser explorada para o fabrico de peças cerâmicas com relevantes aplicações em engenharia biomédica.

### 2.1.5 Jato de Ligante

O princípio de funcionamento da tecnologia de Jato de Ligante é semelhante aos processos de PBF, mudando apenas a forma como as partículas de pó são unidas. Enquanto na categoria de PBF a união das partículas de pó em cada camada era feita através de uma fonte de energia térmica, nesta recorre-se à deposição seletiva de um agente ligante líquido nas partículas pulverulentas espalhadas na área de impressão para que estas se agreguem. De seguida a plataforma da área de impressão desce, a plataforma de alimentação de material sobe e o rolo espalha uma nova camada de pó.

Após o fabrico da peça é normalmente necessário proceder a etapas de pós processamento, mas isso depende também do tipo de material a ser processado e qual a aplicação da peça produzida. Pode-se utilizar pó polimérico, metálico, cerâmico e compósitos [20]. O pós processamento de polímeros está associado a processos de cura, enquanto nos metais, cerâmicos e compósitos procede-se à sinterização da peça produzida para atingir níveis de densidades consideráveis, muitas vezes superior a 97% [19].

Em comparação com as tecnologias de PBF, estas tecnologias têm a vantagem de ser mais rápidas e econômicas, mas na produção de peças metálicas continuam a ter propriedades mecânicas inferiores às aquelas produzidas por DMLS ou SLM [20].

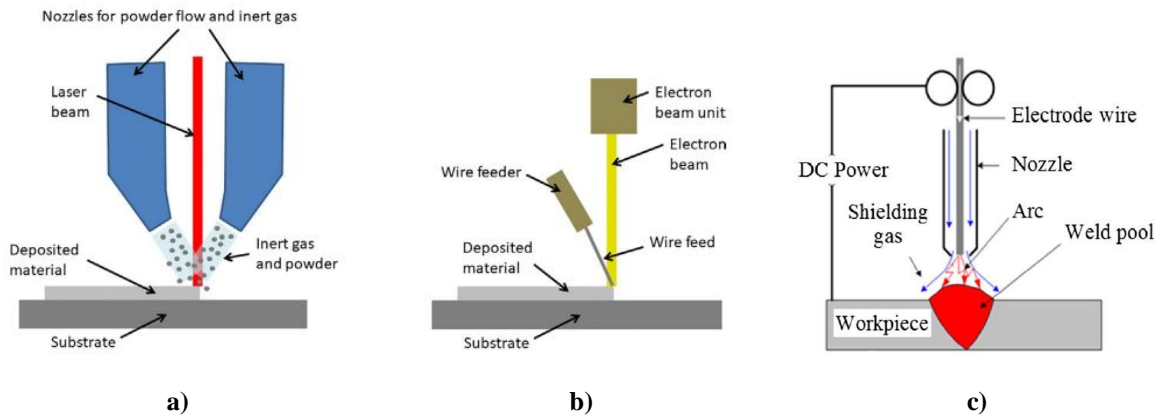
### 2.1.6 Deposição Direta de Energia (DED)

Enquanto as tecnologias de PBF recorrem a uma fonte de energia térmica para sinterizar ou fundir as partículas de pó que estão distribuídas pela área útil de impressão, as tecnologias de Deposição Direta de Energia consistem num equipamento multi-eixo com um bocal que faz incidir energia térmica num ponto para fundir o material, mas este, em vez de estar numa “cama”, está a ser depositado à saída do *nozzle* onde é imediatamente interceptado pela fonte de energia, sendo fundido e de seguida solidificado na peça ou no substrato [21]. O material pode estar na forma de fio ou de pó, sendo muito mais vantajoso o uso da matéria em fio uma vez que apenas parte do pó é derretida e fundida ao substrato. A fonte energia pode ser um laser, um feixe de eletrões ou um arco de plasma.

Dentro desta categoria de MA existem várias tecnologias que se distinguem pela forma do material que utiliza e pelas características da fonte de energia, destacando-se três principais, a *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Arc* e a *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) (figura 7).

A tecnologia LENS usa um laser como fonte de energia e o material está na forma pulverulenta, podendo ser metálico, cerâmico ou compósito. O fabrico das peças tem de ser feito num ambiente supercontrolado, hermeticamente selado e preenchido com argon para baixar o nível de oxigénio, humidade e evitar oxidação. No caso da tecnologia *Arc* é utilizado um arco elétrico como fonte de energia [23].

Na técnica EBAM a fonte de energia é um feixe de eletrões e o material utilizado está na forma de fio. Dependendo do material é possível taxas de deposição entre os 3 e os 11 kg por hora, fazendo este processo aditivo extremamente competitivo para o fabrico de peças metálicas de elevada dimensão. Além disso existe a possibilidade de ter um sistema de alimentação de arame duplo para combinar duas ligas metálicas diferentes no mesmo banho de fusão. Essa combinação é personalizável a nível de percentagem de cada material, diâmetro do arame utilizado, entre outros parâmetros, que diferenciam este processo de qualquer outro processo de MA de metais do mercado [24]. Tal como no EBM, os sistemas de feixe de eletrões no DED também requerem vácuo.

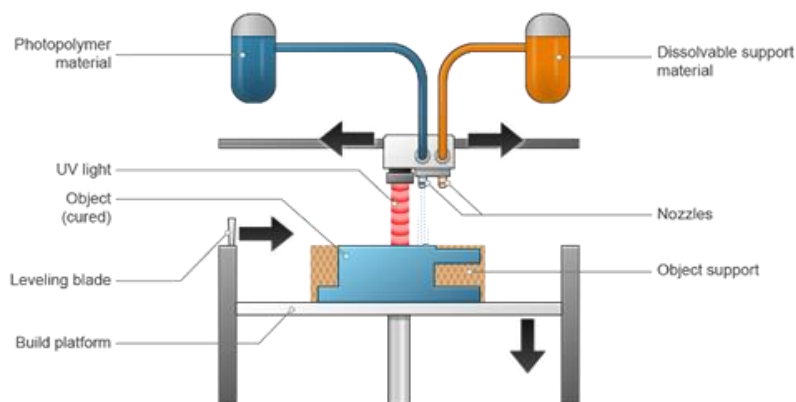


**Figura 7-** Esquematização da tecnologia **a)** LENS; **b)** EBAM; **c)** Arc; retirado de [22]

### 2.1.7 Jato de Material

As tecnologias de Jato de Material assemelham-se à tecnologia de impressão convencional de tinta (2D). Em vez de uma cabeça tradicional que deposita uma única camada de tinta numa folha de papel, nestes equipamentos existe uma cabeça que deposita gotículas de material fotossensível camada sobre camada. A cabeça de impressão move-se horizontalmente e a cada passagem deposita as gotículas de material ao mesmo tempo que este é curado e endurecido através de luz ultravioleta (UV) (figura 8) [25].

Esta tecnologia precisa sempre de duas resinas distintas, uma para fabricar a peça em si, e outra para fazer as estruturas de suporte. Em alguns casos é possível juntar dois tipos de resinas diferente em percentagens estipuladas pelo fabricante para criar novos materiais com diferentes propriedades mecânicas consoante a percentagem de cada material [7]. Polímeros e ceras são os materiais mais utilizados devido à sua viscosidade e capacidade de formar gotas e são normalmente desenvolvidos pelos próprios fabricantes dos equipamentos.



**Figura 8-** Esquematização das tecnologias de Jato de Material, retirado de [11]

A MA veio revolucionar a forma de pensar novos produtos, mas, como qualquer tecnologia de fabrico, existem também limitações associadas. Existem vantagens e desvantagens que se podem considerar globais para todas as tecnologias de MA, quando em comparação com as tecnologias de fabrico convencionais, mas quando comparadas duas técnicas de MA entre si existem vantagens e desvantagens mais específicas inerentes a cada técnica.

Começando pelas vantagens globais face às tecnologias convencionais, salientam-se as mais impactantes [26]:

- **Velocidade** (prototipagem/pequenas séries) – Uma vez criado o modelo 3D, a passagem do modelo digital para um protótipo físico muitas das vezes funcional é uma das grandes vantagens da MA, não só pela rapidez, mas pela drástica redução de custos que isso representa. Com a evolução das técnicas aditivas estas começaram também a ser utilizadas para o fabrico de pequenas séries quando assim se justificasse.
- **Ausência de ferramentas** – Não é necessário qualquer tipo de ferramenta para fabricar as peças (ex.: moldes, matrizes etc.), apenas o modelo digital que é carregado no equipamento. Mais uma vez isto representa um ganho de tempo e redução dos custos associados.
- **Liberdade de Design** – A MA permite um maior grau de liberdade geométrica no fabrico. Isto é claramente uma vantagem, principalmente para as áreas em que o *design* e a inovação são fundamentais. Na área da engenharia esta característica também trouxe vantagens ao nível do desenvolvimento de produto. Com a possibilidade de fabrico de produtos complexos é possível projetar estruturas otimizadas usando material apenas onde este é necessário, reduzindo o material utilizado, a massa da peça, mantendo ou aumentando assim a performance desejável.
- **Redução de Stocks** – Stocks representam dinheiro “parado” e é ideal evitá-lo sempre que possível. Guardando apenas o ficheiro digital das peças é possível fabricar um determinado componente apenas quando este é necessário, ou seja, sob a filosofia *just in time*. Assim elimina-se custos associado ao stock de componentes, ferramentas e ocupação do espaço.
- **Peças únicas** – Devido às restrições dos processos de fabrico, muitos produtos são compostos por inúmeras peças fabricadas separadamente que depois têm de ser ensambladas. Com a MA consegue-se fabricar todo o conjunto numa peça só, reduzindo tempos de fabrico e ensamblagem.

Mais uma vez, de uma forma generalizada, apontam-se algumas desvantagens [27]:

- **Taxas de construção lentas** – A velocidade de fabrico é muitas vezes apontada como uma desvantagem, mas é necessário ter em conta que a MA é uma área de nicho e não serve simplesmente para substituir outras tecnologias já existentes. Em certas

aplicações consegue ser muito competitiva reduzindo tempos de projeto e produção de ferramentas, principalmente para pequenas quantidades.

- **Limitações de volume de construção** – Muitas tecnologias ainda estão limitadas no que toca ao volume de construção dos equipamentos. Noutras, já se usa a designação *Big Print* devido ao desenvolvimento nessa área.
- **Custo dos materiais e equipamentos** – A gama de materiais para MA ainda é muito reduzida e são normalmente desenvolvidas pelos próprios fabricantes de equipamentos. Dependendo da tecnologia, podem assumir valores bastante altos.
- **Pós-Processamento** – Por vezes, após a etapa de impressão as peças necessitam de passar por processos de pós-processamento, aumentando o tempo de produção e o preço da peça final.
- **Erro cordal** – Em equipamentos de MA utilizam-se ficheiros no formato STL. Esta tipologia de ficheiro consiste na conversão da geometria da casca de um corpo sólido em triângulos. Esta aproximação resulta num erro, chamado erro cordal.
- **Efeito escada** – Sendo as peças produzidas camada a camada, é possível ocorrer o efeito escada, principalmente em zonas onde a geometria seja mais arredondada. Este efeito pode ser minimizado com a diminuição da altura de camada.
- **Anisotropia** – Peças produzidas aditivamente normalmente têm características anisotrópicas. No sentido de construção das peças (normalmente no eixo Z) as propriedades mecânicas tendem a ser inferiores.

Questões como o acabamento superficial, porosidade e precisão dimensional também podem ser apontadas como desvantagens, mas estas também diferem de tecnologias para tecnologia.

A escolha da tecnologia mais indicada depende do tipo de peça que se quer fabricar, qual a sua aplicação e quais os seus requisitos principais. A tabela 2 contém um resumo dos pontos fortes e pontos fracos das técnicas mais relevantes de MA [7]. Com base nessas informações, na figura 9 está um diagrama de tomada de decisão sobre qual a tecnologia de MA a usar tendo em conta os requisitos necessários.



**Tabela 2-** Vantagens e desvantagens das tecnologias de MA, adaptado de [7] e [28]

	Extrusão de Material	Estereolitografia	Fusão em Cama de Pó		Jato de Material	Jato de Ligante	Deposição Direta de Energia
	FFF		SLS	DMLS/SLM			
<b>Precisão Dimensional</b>	± 0,5% (Limite mais baixo ± 0,5mm)	± 0,5% (Limite mais baixo ±0,15mm)	± 0,3% (Limite mais baixo ±0,3mm)	± 0,1mm	± 0,1mm	± 0,2mm (metal) ± 0,3mm (areia)	Baixo rigor dimensional
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baixo custo</li> <li>▪ Peças funcionais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bom acabamento superficial</li> <li>▪ Muito detalhe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças funcionais</li> <li>▪ Boas propriedades mecânicas</li> <li>▪ Geometrias complexas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças funcionais</li> <li>▪ Boas propriedades mecânicas</li> <li>▪ Geometrias complexas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ O melhor acabamento superficial</li> <li>▪ Impressão a cores e multi material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custo mais baixo</li> <li>▪ Áreas de impressão maiores</li> <li>▪ Peças metálicas funcionais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Processo mais rápido</li> <li>▪ Possibilidade de construir sob uma peça já existente</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pouca precisão dimensional</li> <li>▪ Camadas visíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças frágeis não aconselhável para peças mecânicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Longos tempos de impressão</li> <li>▪ Custos elevados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Área de impressão reduzida</li> <li>▪ Tecnologia com o preço mais elevado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças frágeis não aconselhável para peças mecânicas</li> <li>▪ Mais caro que o SL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propriedades mecânicas inferiores às tecnologias de Fusão em Cama de Pó</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baixo acabamento superficial e rigor dimensional</li> <li>▪ Peças menos complexas</li> </ul>

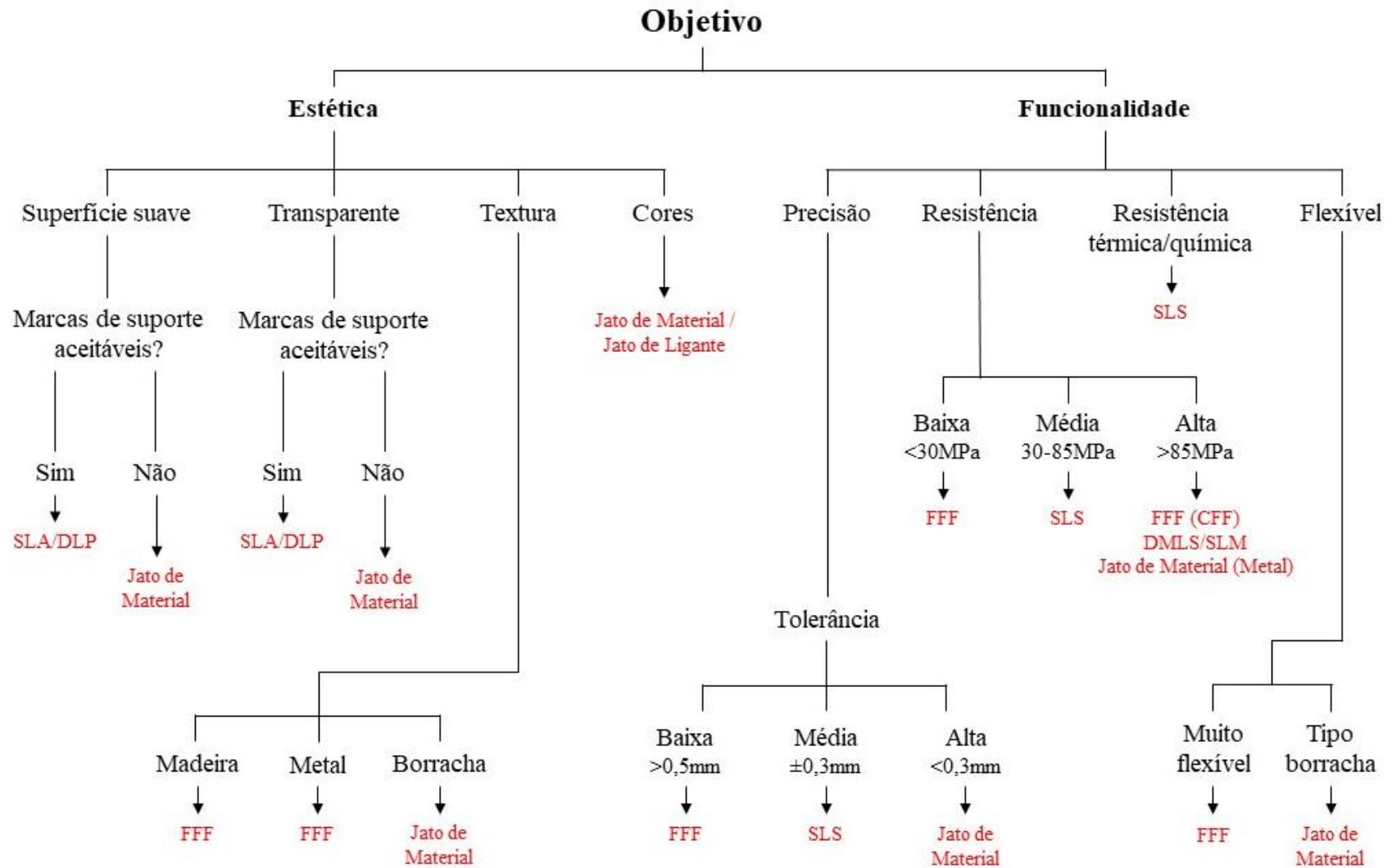


Figura 9- Árvore de decisão de tecnologias, adaptado de [7]

## 2.2 Fabricação por Filamento Fundido (FFF)

Depois de apresentadas todas as categorias de tecnologias de MA existentes e de fazer um breve resumo sobre as potencialidades e limitações de cada uma delas, percebe-se que o FFF é uma tecnologia bastante competitiva devido ao preço dos equipamentos, dos materiais, da qualidade das peças que consegue produzir, das imensas aplicações para que pode servir e da vasta gama de materiais já existente no mercado. Por estas razões, esta técnica deixou de ser utilizada apenas para prototipagem ou para fabricar peças personalizadas de pouco valor, como por exemplo brindes, brinquedos e peças de decoração, para ser valorizada e utilizada a nível industrial para as mais diversas aplicações. É precisamente na tecnologia FFF em que se vai focar este subcapítulo.

### 2.2.1 Parâmetros de impressão

A FFF é uma das tecnologias com maior possibilidade de parametrização do processo com influência na qualidade das peças produzidas. A preparação de um ficheiro para impressão começa sempre com um modelo CAD digital. Esse mesmo modelo é gravado num formato específico muito usado na área da Manufatura Aditiva, STL, que é alusivo à primeira técnica de MA, a Estereolitografia. Atualmente serve também de sigla para *Standard Triangle Language*. O ficheiro STL resume-se a uma série de triângulos que recriam a geometria das superfícies do modelo. Modelos mais básicos conseguem-se representar com poucos triângulos, mas quanto mais precisão se pretende maior o número de triângulos gerados. Cada face dos triângulos apresenta um vetor normal que serve para indicar qual das faces pertence à parte interna e externa do modelo.

O ficheiro STL é importado para um *software* específico muitas das vezes desenvolvido pelos fabricantes do equipamento de MA que permite definir os corretos parâmetros de impressão. Estes *softwares* são chamados de *slicers* devido à filosofia de fabrico camada a camada. É nesta etapa onde é necessário ter mais conhecimentos sobre o funcionamento do processo FFF. Definidos os corretos parâmetros de impressão é gerado um novo ficheiro *gcode* que será importado no equipamento de MA, reconhecido pela maior parte dos equipamentos de controlo numérico computadorizado (CNC).

Existem vários parâmetros de impressão que são possíveis de alterar (figura 10) mas destacam-se os seguintes:

**Orientação da peça** – Ao importar o STL para o *slicer* o primeiro procedimento a fazer é achar a correta orientação da peça. Esta orientação pode facilmente alterar as propriedades mecânicas da peça, o tempo de impressão ou o material gasto, daí a importância desta etapa.

**Altura da camada** – Espessura de cada camada. Quanto maior o incremento em Z mais rápida será a impressão, mas a peça será menos detalhada e precisa. Por oposição, incrementos menores permitem níveis de detalhe superior, mas o tempo de impressão aumenta consideravelmente.

**Preenchimento** – Este tipo de técnicas permite fazer peças ocas ou com apenas alguma percentagem de preenchimento. Se não existe a necessidade de ter peças maciças, reduzir o material

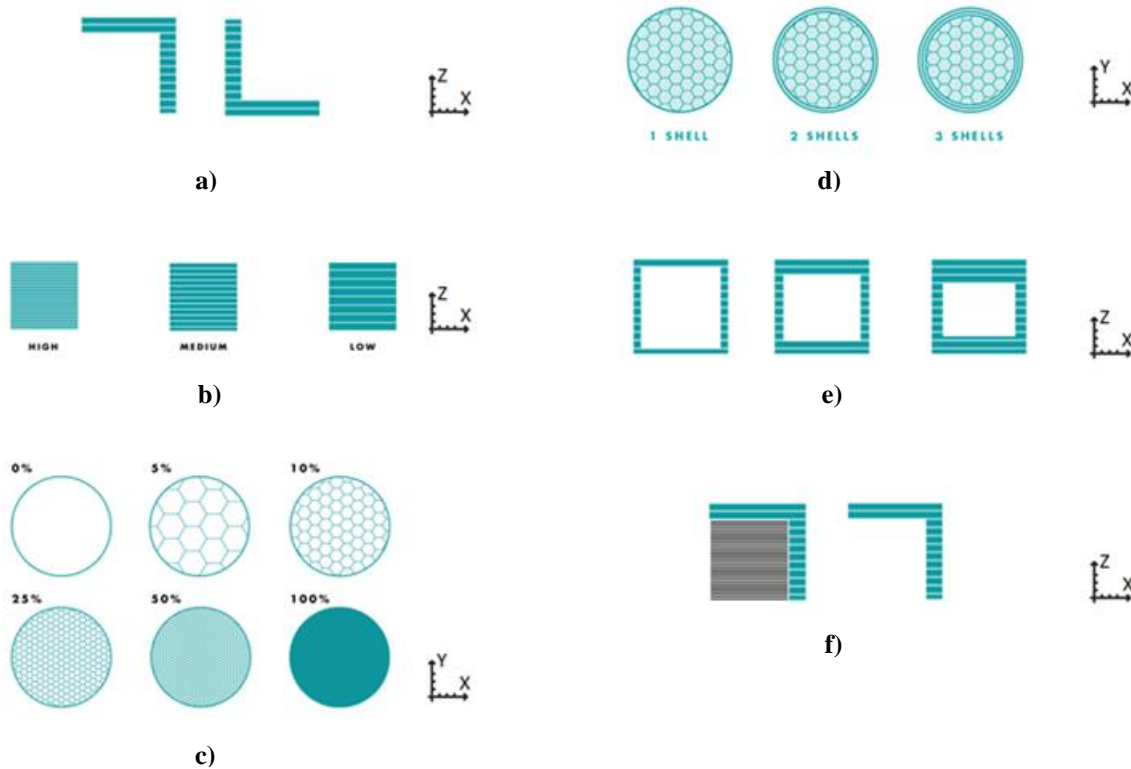
interno é uma enorme vantagem. Assim sendo é possível definir a geometria interna de preenchimento, criando por exemplo estruturas alveolares, triangulares, entre outras geometrias, e controlar a percentagem desse mesmo preenchimento.

**Números de perímetros/paredes** – As paredes externas da peça são reforçadas internamente pelas estruturas de preenchimento referidas anteriormente, mas é possível controlar quantas paredes ou perímetros se pretende fazer. Na imagem 10-d) é possível perceber essa alteração.

**Número de camadas superiores e inferiores** – Este parâmetro é exatamente igual ao número de perímetros, mas em vez de ser lateralmente, refere-se às camadas superiores e inferiores.

**Estruturas de suporte** – Por vezes são necessárias estruturas de suporte para suportar a construção de uma peça quando existem zonas em que não existe o suporte da própria peça já construída ou quando os ângulos de construção são muito acentuados.

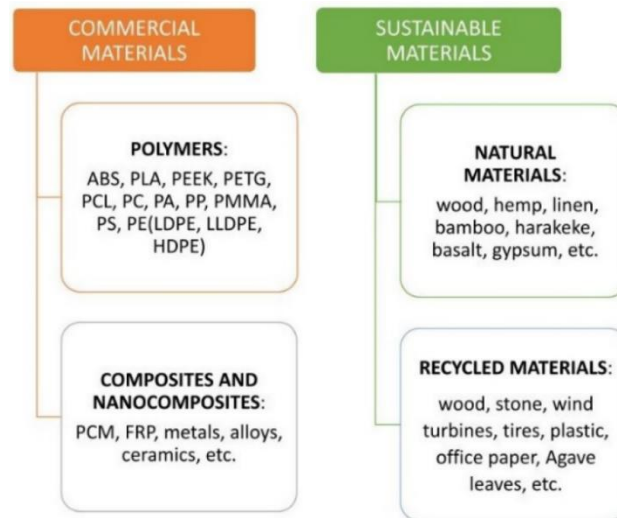
**Temperatura e Velocidade** – Estes parâmetros também são importantes, mas dependem principalmente do tipo de material a imprimir. Uma gama de valores ideais costumam ser fornecidos pelos fabricantes dos materiais. Relativamente à temperatura existem impressoras que também têm a mesa de impressão aquecida para promover uma melhor aderência à peça ou até mesmo um ambiente de construção com temperatura controlada. Todos esses valores são normalmente manipuláveis e afetam a qualidade das impressões.



**Figura 10-** Parâmetros de impressão a) Orientação da peça; b) Altura da Camada; c) Preenchimento; d) N° de perímetros; e) N° de camadas superiores e inferiores; f) Estruturas de Suporte, adaptado de [40]

## 2.2.2 Materiais

Embora as impressoras FFF estejam muito associadas apenas aos materiais poliméricos, estas não processam apenas este tipo de material. Atualmente, através desta tecnologia é possível fabricar peças poliméricas, metálicas e compósitas. Na figura 11 está uma classificação dos materiais já existentes, mas neste documento apenas serão aprofundados os polímeros e os compósitos tendo em conta a relevância dos mesmos para o trabalho prático a desenvolver.

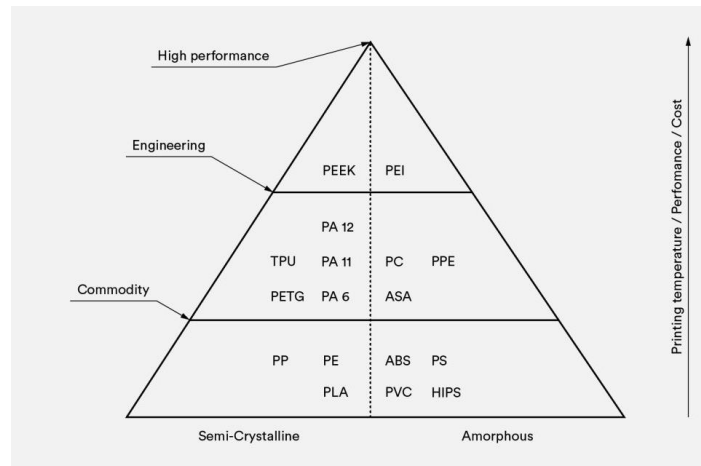


**Figura 11-** Materiais usados na tecnologia FFF, retirado de [30]

### a) Polímeros

A classe dos polímeros termoplásticos é a classe de materiais mais desenvolvida e que apresenta uma gama maior de materiais que se pode dividir em materiais “*commodities*”, de engenharia e de alto desempenho. Os materiais “*commodities*” mais vulgares acabam por ser o PLA e o ABS devido à sua facilidade de impressão e propriedades mecânicas já bastante razoáveis para muito tipo de aplicações [29].

Quanto mais exigente é o contexto de uso da peça, melhor tem de ser a performance mecânica do material que será utilizado. Isso impulsionou o desenvolvimento de novos materiais para esta tecnologia. Na figura 12 estão representados sob a forma de pirâmide as diferentes categorias de materiais poliméricos (*commodities*, engenharia e de alta performance), divididas ainda em materiais semi-cristalinos e amorfos. É importante referir que quanto mais alta é a posição do material na pirâmide, melhores propriedades mecânicas este possui, mas mais difícil é de processar sendo necessárias temperaturas de extrusão muito superiores.



**Figura 12-** Materiais termoplásticos para FFF, retirado de [29]

## PLA

O PLA, ou ácido polilático, é um polímero feito de materiais biológicos, como amido de milho ou cana-de-açúcar e, muitas das vezes é biodegradável. É muito usado principalmente nas impressoras de baixo custo porque derrete entre os 180 e os 200°C e não necessita de uma cama aquecida. Contudo, este material não é muito indicado para aplicações industriais. É frágil, deforma a uma temperatura muito baixa (60°C) e não resiste à água ou produtos químicos [31]. Alguns fabricantes aproveitaram a facilidade de impressão do material e tentaram melhorar as suas propriedades mecânicas através da adição de químicos à composição base do material, criando um material normalmente designado por *Tough PLA*.

## ABS

O ABS, ou Acrilonitrilo Butadieno Estireno, é um material muito comum mesmo sem ser na área da MA. Nas impressoras FFF também é muito usado pois, embora seja um pouco mais complicado de o processar, continua a ser considerado de fácil impressão assim como o PLA. Destaca-se a boa resistência ao impacto e à abrasão e uma resistência ao calor mais elevada que o PLA [32]. Tem baixa resistência a radiação UV e é necessária uma temperatura de impressão controlada para evitar deformações nas peças (*warping*). As temperaturas de processamento são também mais elevadas.

## TPU

Mesmo que não conste na pirâmide da figura 12, o poliuretano termoplástico (TPU) é um material também já bastante conhecido e utilizado na tecnologia FFF. Pertence à família dos elastómeros termoplásticos e combina as propriedades dos termoplásticos com as propriedades das borrachas. É um material elástico e macio, apresenta um elevado alongamento na rotura, boa resistência ao impacto e é resistente a químicos [33]. Existem alguns problemas associados à impressão deste tipo de material devido à elasticidade que

o próprio filamento apresenta, como por exemplo, entupimentos e dificuldade em cumprir a taxa de deposição de material correta.

### **PETG**

O PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) é uma variante de PET, mas com glicol, que permite temperaturas de impressão mais baixas e um fluxo de deposição de material maior sem comprometer a adesão entre camadas. É um material com características muito semelhantes às do PLA, mas um pouco superiores. Destacam-se vantagens como a dureza, resistência ao impacto e química, ductilidade, transparência e compatibilidade alimentar [34]. Tal como o ABS, pode haver a possibilidade de empenos caso a temperatura durante a impressão não esteja controlada.

### **NYLON**

O Nylon é conhecido por ser um polímero de engenharia devido às suas excelentes propriedades mecânicas. No mundo da MA, mais concretamente na tecnologia FFF, começou a ser usado pois é possível obter peças altamente resistentes que mantêm as suas propriedades mecânicas mesmo a temperaturas mais elevadas, resistência a tração, impacto e abrasão, resistência térmica, resistência a óleos e alcalinos e baixo coeficiente de atrito. É muito usado para peças expostas em ambientes hostis que exijam alta resistência à fadiga. Este material é conhecido também por ser altamente higroscópico [35]. O maior desafio ao imprimir este material é conseguir manter a sua adesão à mesa durante todo o tempo de impressão.

### **ASA**

Muito semelhante ao ABS, o ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato) destaca-se pela sua alta resistência ao impacto, mas a propriedade que o distingue do ABS é a capacidade de resistir a radiação UV [36], permitindo o fabrico de peças que necessitem de estar neste tipo de condições.

### **PC**

O Policarbonato é conhecido pela sua resistência e durabilidade. As principais vantagens deste material é que tem uma alta resistência ao impacto e ao calor, conseguindo manter as suas propriedades mecânicas mesmo em ambientes cuja temperatura seja mais elevada. Tem também a vantagem de oferecer alguma flexibilidade sem partir [37].

### **PEEK**

O PEEK (Poliéter éter cetona) é considerado um dos termoplásticos com melhores resultados mecânicos entre todos os termoplásticos [38], daí ser classificado como um termoplástico de alta performance. Em alguns casos (por processos convencionais e não por MA) consegue-se produzir peças mais resistentes que peças fabricadas em aço inoxidável ou alumínio.

Nos processos aditivos começou-se também a usar este tipo de termoplástico. Além da excelente resistência mecânica, a grande vantagem deste material é a gama de temperaturas em que as peças podem operar, até cerca de 260°C. É também resistente a fluidos corrosivos, gases e elevadas pressões. Como desvantagem aponta-se a dificuldade de impressão e o seu preço. Sendo um termoplástico de alta performance o preço por quilo de filamento pode chegar facilmente aos 800 €, enquanto os restantes filamentos podem variar entre os 20 e os 100 € (valores aproximados).

## **b) Compósitos**

Para além dos termoplásticos começaram a surgir novos tipos de filamentos compósitos, ou seja, filamentos compostos por mais que um material. Até uma certa altura, com tecnologia FFF, apenas era possível fabricar peças totalmente poliméricas, mas com o crescente foco nas tecnologias aditivas e no desenvolvimento de novos materiais foi possível processar diferentes materiais.

Embora outros materiais sejam adicionados ao filamento é sempre necessário existir uma matriz polimérica para garantir as propriedades características dos termoplásticos e assim ser possível processar o material compósito pela tecnologia FFF. Normalmente o rácio do volume entre a matriz polimérica e material sólido adicionado situa-se entre os 60% a 70% e os 30% a 40%, respetivamente [39].

Não considerando os materiais naturais e os materiais reciclados (que são utilizados mais na área do *design* e decoração), o tipo de material sólido mais adicionado ao material polimérico são normalmente fibras de carbono e de vidro. Pequenos pedaços de fibras trituradas com menos de 1 mm são adicionadas aos termoplásticos tradicionais. Estas fibras vão contribuir para o aumento das propriedades mecânicas do termoplástico base. A vantagem destes filamentos é que é possível de fabricar peças poliméricas reforçadas com fibras numa impressora convencional, o que não acontece se se quiser fazer uma deposição de fibras contínuas.

A adição de outros materiais aos filamentos poliméricos não serve apenas para melhorar as propriedades dos próprios polímeros. Em alguns casos o polímero serve apenas para possibilitar a impressão de um determinado material pelo processo FFF, mas que depois é desejável que não faça parte da peça final, como é o caso de filamentos carregados com pó metálico ou cerâmico. Após a impressão de uma peça com este tipo de filamento esta passa por etapas de pós processamento, nomeadamente etapas de *debinding* e sinterização, para eliminar todo o material polimérico que apenas serviu para a etapa de impressão e unificar as partículas pulverulentas de metal ou cerâmica, podendo ser classificado como um processo de MA indireto deste tipo de materiais.



### 2.2.3 Propriedades mecânicas das peças

Nos subcapítulos anteriores (2.2.1 e 2.2.2) foram apresentados os materiais disponíveis para FFF bem como os parâmetros de impressão mais relevantes. Fez-se uma pesquisa mais profunda na literatura sobre as propriedades mecânicas dos materiais e sobre como os parâmetros de impressão podem alterar essas propriedades.

#### a) Materiais

Começando pelo polímero mais comum, o PLA é um polímero de base biológica, biodegradável e biocompatível. As temperaturas de extrusão são relativamente baixas (entre 180 e 230°C) o que torna este material processável por uma gama ampla de equipamentos de FFF. Segundo vários estudos, apresenta valores resistência à tração entre 35 e 65 MPa, módulo de Young de 2,3 GPa e uma resistência à flexão de aproximadamente 100 MPa [41-44].

O ABS é um termoplástico amorfo derivado do petróleo, não é biodegradável e necessita de um pouco mais de temperatura para ser processado (face ao PLA), entre 220 e 280°C. É um material muito usado na indústria devido à sua dureza e resistência ao impacto. Relativamente à resistência à tração, esta pode variar entre os 13 e os 66 MPa, a resistência à flexão aproximadamente 65 MPa e o módulo de Young registado oscila entre os 1 e os 2,65 GPa [41-44].

O PETG é um polímero que deriva do PET onde houve adição de glicol para melhorar as propriedades mecânicas do material e torná-lo um polímero de fácil processamento na tecnologia FFF. Pode ser uma alternativa para muitas aplicações para o PLA uma vez que apresenta propriedades superiores sem perder a facilidade de processamento, necessitando de uma gama de temperaturas entre os 220 e os 250°C [45]. Testes realizados registaram uma resistência à tração de aproximadamente 50 MPa, uma resistência à flexão de 70 MPa e um módulo de Young entre 0,42 e 0,88 GPa.

Para usos industriais e para outras aplicações mais exigentes os materiais mais comuns por vezes não são os mais indicados. Materiais como as poliamidas ou nylon (PA), policarbonato (PC) e o Poliéter éter cetona (PEEK) são materiais de elevado desempenho que têm vindo a ser estudados e utilizados em aplicações concretas. Dependendo do tipo de poliamida os valores das propriedades mecânicas podem variar. No caso, por exemplo, de uma PA6 virgem os valores de resistência à tração podem variar entre os 35 e os 186 MPa e o módulo de Young entre os 0,45 e os 3,5 GPa [42, 46].

O PEEK é um material de alto desempenho excelentes propriedades mecânicas. É um termoplástico biocompatível com excelente estabilidade e resistência térmica. Devido a esta resistência térmica, o grande problema deste material são as temperaturas de processamento que variam entre os 340 e os 440°C. Apresenta uma resistência a tração que ronda os 100 MPa e uma resistência à flexão de 170 MPa [41, 47].

A necessidade e procura de materiais cada vez mais avançados do ponto de vista das propriedades mecânicas levou ao desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica e nanocompósitos para a técnica de FFF. O carregamento de uma matriz polimérica faz com que propriedades como flexibilidade, condutividade, facilidade de processamento, dureza e resistência

mecânica sejam afetadas, sendo estas propriedades definidas consoante a matriz e o reforço a serem utilizados. Na tabela 3 estão algumas combinações de matriz polimérica e reforços possíveis que se encontrou na literatura.

**Tabela 3-** Alguns compósitos usados em FFF, adaptado de [30, 48-51]

	<b>Polimero</b>	<b>Carga</b>	<b>%</b>
<b>Micro e nano partículas</b>	PLA	Cu, Al, Grafeno	1,6-4 Volume
	LDPE	Vidro	30 Volume
	ABS	TiO <sub>2</sub>	5 Peso
	PP	Vidro	30 Peso
	ABS	BaTiO <sub>3</sub>	10-35 Volume
	Nylon	Fe	30-40 Volume
	PEG-PVB e Gel silicone	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20-60 Peso
	ABS	Grafeno	20 Peso
	ABS	Cu	10-50 Peso
	PLA	Hidroxiapatite	3,4 - 30 Peso
	PP	Carbono	15,5-32,3 Peso
	<b>Fibras</b>	Nylon	Fibra de vidro continua
Nylon		Fibra de carbono continua	-
Nylon		Fibra de kevlar continua	-
PP		Fibra de vidro	30 Peso
PETG		CNT	-
PEEK		CNT	1-5 Peso
PLA		AgNW	1-4 Peso
ABS		Fibra de carbono	3-15 Peso
ABS		Fibra de vidro	15-25 Volume
Nylon		Fibra de carbono	2-20 Peso
Nylon	Fibra de vidro	30 Peso	

Pós de alumínio e de ferro são vulgarmente usados em matrizes poliméricas de ABS, PP e PA. Este reforço traduziu-se numa melhoria das propriedades mecânicas, mas contribuiu para uma diminuição da viscosidade devido à presença de pó metálico. Reforços de materiais cerâmicos são outro tipo de reforço possível, muito usado para aplicações biomédicas e aplicações onde a biocompatibilidade é um fator crucial. Materiais como TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são usados como reforço em matrizes poliméricas como PLA, PA, PP PCL, PEEK e PMMA [30]. Outra forma de reforçar um polímero com metais e cerâmicos é usá-los sob a forma de nanopartículas que também melhoram as propriedades mecânicas e térmicas dos polímeros. Muitos outros nanocompósitos têm vindo a ser estudados como é o caso da sílica e a argila. Polímeros com nanopartículas de argila apresentam melhor resistência, módulo e deflexão ao calor quando comparados com os polímeros puros [52].

Os compósitos poliméricos reforçados por fibras são talvez aqueles que os utilizadores da tecnologia FFF mais conhecem, sendo usados na maior parte das vezes fibras de vidro e de carbono. Quando se fala na tecnologia FFF e em materiais reforçados com fibras existem dois procedimentos

possíveis distintos. Um deles é a utilização de um polímero de matriz polimérica reforçado com fibras que foi feito para ser extrudido num equipamento FFF pela forma tradicional. A segunda possibilidade é fazer a deposição de fibras contínuas no interior de uma peça polimérica através da tecnologia *Continuous Filament Fabrication* [30].

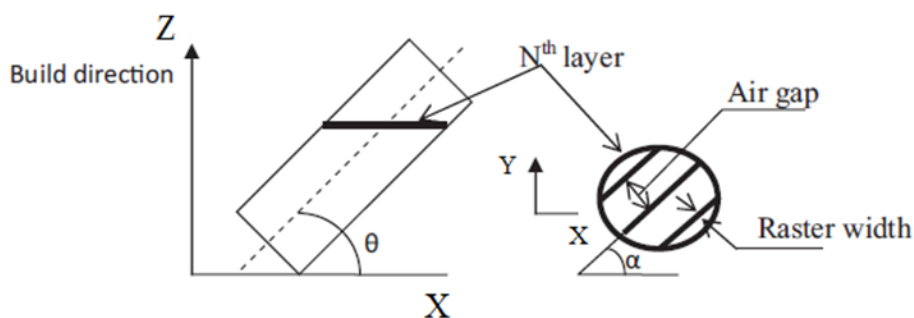
Na literatura estão disponíveis vários estudos sobre o reforço de polímeros com diferentes fibras. Ning et al. [49] estudou o comportamento mecânico do termoplástico ABS reforçado com diferentes percentagens de fibras de carbono bem como diferentes comprimentos (100 e 150  $\mu\text{m}$ ). Conclui-se que, face ao termoplástico puro, é possível aumentar a resistência à tração e o módulo de Young, embora possa reduzir a tenacidade, a tensão de cedência e a ductilidade. Com o valor de 5% de reforço foi também registado um aumento da tensão máxima à flexão, módulo de flexão e resistência à flexão. Karsli and Aytac [51] estudou o reforço de uma poliamida 6 com fibras de carbono verificando que as fibras contribuíram para um aumento da resistência, módulo e dureza. Contudo, aumentando a percentagem de reforço utilizado, menor é a tensão registada no ponto de rotura. Zhong et al. [55] estudou o reforço do ABS com fibras de vidro. A resistência mecânica do ABS foi melhorada significativamente face ao termoplástico puro.

Um artigo publicado no livro “*Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*” [53] reúne vários estudos sobre a otimização do desgaste das peças através do reforço de materiais poliméricos. Um estudo indica que a adição de grafeno no PLA melhorou o desgaste em 14% e reduziu o coeficiente de atrito em 65% comparado com o PLA puro. Outro mostra que com a adição de 30% de carbono foi possível reduzir significativamente o volume de desgaste registado [54].

## **b) Parâmetros de impressão**

As propriedades mecânicas das peças fabricadas pela tecnologia FFF não dependem apenas dos materiais utilizados. Existem inúmeros parâmetros que se podem alterar e controlar quando se prepara um ficheiro para impressão que podem influenciar diretamente na resistência mecânica das peças. Além dos estudos de diferentes materiais existem também na literatura estudos sobre a influência de vários parâmetros de impressão na performance mecânica das peças.

Sood [56] realizou um estudo intensivo sobre a otimização paramétrica do processo FDM analisando o impacto dos parâmetros espessura de camada, orientação, ângulo de varredura (*raster angle*), espaçamento deixado entre cada passagem (*air gap*) e espessura da varredura (*raster width*) na resistência das peças, nomeadamente na resistência à tração, flexão, impacto e compressão. Na figura 13 estão representados graficamente estes parâmetros para uma melhor compreensão. Um gradiente de temperatura não uniforme causa tensões que levam à distorção, fissuras e laminação das camadas internas, reduzindo por estes motivos a resistência mecânica. À medida que a espessura da camada aumenta, será necessário um menor número de camadas e o efeito de distorção é minimizado e, conseqüentemente, a resistência aumenta, ou seja, aumentando a altura da camada consegue-se melhores resultados no que diz respeito à resistência mecânica das peças. Outro parâmetro que afeta a resistência está relacionado com o ângulo de varredura, a sua espessura, e o espaçamento deixado entre cada passagem. Ângulos menores são de evitar uma vez que aumentam o comprimento das deposições resultando em maiores distorções. Espessuras de deposição mais espessas (diretamente ligada ao diâmetro do *nozzle*) resultam em acumulação de tensões.



**Figura 13-** Descrição esquemática de parâmetros ( $\theta$ = Orientação;  $\alpha$ = Raster Angle; adaptado de [61])

Acredita-se que o espaçamento entre as deposições (*air gap*) também pode influenciar nas propriedades mecânicas. Um pequeno espaçamento ajuda a criar uma melhor adesão entre as deposições, mas restringe a dissipação de calor e, conseqüentemente, pode gerar acumulação de tensões.

Noutros estudos, os mesmos parâmetros são também mencionados como parâmetros críticos que influenciam as propriedades mecânicas das peças produzidas, mas outros parâmetros são também considerados. Algarni et al. [41] realizou um estudo comparativo sobre a influência dos parâmetros de impressão entre diferentes materiais (PLA, ABS, PETG e PEEK). No PLA concluiu que a percentagem de preenchimento da peça tem um grande impacto nas propriedades mecânicas e que o *raster angle* influencia o valor do módulo de Young medido. No caso do ABS o parâmetro que se mostrou mais relevante foi também a percentagem de preenchimento. No PETG conclui que a percentagem de preenchimento aumenta o valor do módulo de Young, que a velocidade de impressão aumenta a resistência à flexão e que o *raster angle* aumenta o alongamento na rotura. No PEEK o módulo de Young e a resistência à tração são influenciados também pela percentagem de preenchimento, enquanto a resistência à flexão e o alongamento na rotura foram significativamente afetados pela velocidade de impressão e pela percentagem de preenchimento, respetivamente.

Wenzheng et al. [57] também realizou um estudo comparativo entre o PEEK e o ABS, e um dos pontos abordados foram os parâmetros de impressão. Concluiu-se também que o *raster angle* e a altura de camada afetam diretamente as propriedades mecânicas quando feitos testes à tração, compressão e flexão em três pontos. Huang et al. [58] estudou também o material ABS afirmando que a orientação da peça e a altura de camada são os fatores mais significativos.

Além das propriedades mecânicas mais estudadas como resistência a tração, compressão e flexão, por exemplo, outros estudos focam-se na influência dos parâmetros de impressão no desgaste das peças fabricadas. Pant et al. [54] estudou alguns parâmetros de impressão no PLA, analisando temperaturas de extrusão, espessura de camadas e orientação da peça, concluindo que o parâmetro que mais influenciava o desgaste seria a própria orientação da peça. Anoop Kumar Sood [56] estudou também a questão do desgaste e os fatores que têm vindo a ser referidos até agora repetem-se. A distorção também afeta o desgaste da peça, ou seja, com o aumento da espessura de camada o nível de desgaste diminui. Diminui também com o aumento do *raster angle* e com um *air gap* reduzido.

---

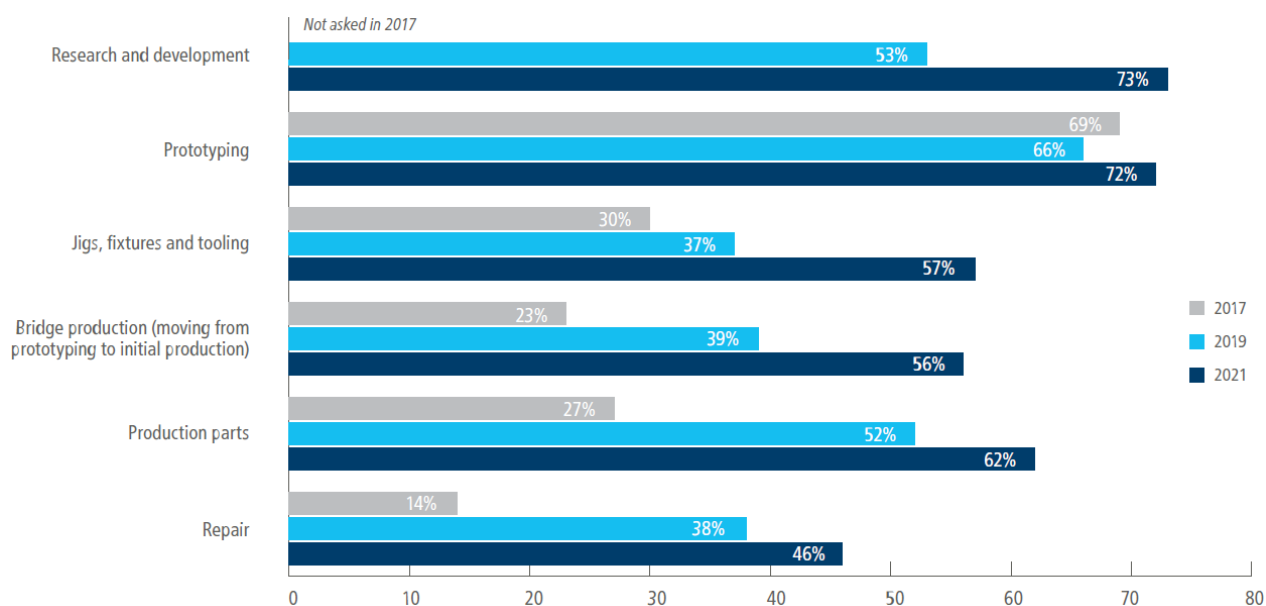
## 3 MANUFATURA ADITIVA NUM CONTEXTO INDUSTRIAL

---

### 3.1 Manufatura Aditiva e casos de estudos

A MA representa uma oportunidade para melhorar determinadas áreas e processos de desenvolvimento e fabrico de produto. É importante referir que a MA não vai substituir as tecnologias convencionais, podendo sim revolucionar áreas de nicho. No contexto industrial as técnicas de MA podem ser extremamente úteis para o fabrico de peças de apoio à produção. Um dos exemplos são os *jigs* e *fixtures*, mas muitas outras peças podem ser consideradas como por exemplo garras para robôs, peças de substituição para linhas de produção, pequenas proteções para equipamentos industriais, entre outras. Este serviço de fabricação de peças teria de ser subcontratado a outras empresas que possivelmente usariam tecnologias como maquinação, soldadura ou até moldação por injeção para fabricar os componentes encomendados [65]. Tudo isto representa custos e tempos de espera. Com a introdução da MA na indústria as empresas tornaram-se “mini” fabricantes dos próprios componentes que consomem [66], reduzindo os custos de produção, o tempo de espera e a dependência de outras entidades. A produção interna por tecnologias aditivas é também vantajosa principalmente se for em pequenas quantidades e exista uma diversa gama de referências que possam ser fabricadas, sendo assim exigido uma elevada flexibilidade.

Um estudo realizado com o objetivo de analisar a tendência das técnicas de MA e os respetivos materiais nas empresas [67] permitiu perceber o âmbito de aplicação. Neste estudo destaca-se a produção de *jigs*, *fixtures* e ferramentas. Em 2017 apenas 30% selecionou esta opção, mas em 2021 já 57% dos inquiridos responderam que produziam este tipo de peças (figura 14). Em 4 anos verificou-se um crescimento considerável o que evidencia uma grande potencialidade no fabrico destas peças por MA. Quanto ao número de impressoras, 70% dos inquiridos têm entre 50 e 100 equipamentos destinados à produção deste tipo de componentes. Quando questionados sobre “qual a etapa do ciclo de vida do produto em que a MA tem mais impacto” 33% dos inquiridos responderam que era a produção de ferramentas. É interessante referir também que 24% de todos os inquiridos pertenciam ao ramo automóvel, não sendo referido com exatidão o tipo de funções (ex.: fabrico de componentes, montagem ou restauro automóvel). Os materiais mais utilizados continuam a ser os polímeros, seguindo-se os compósitos, metais, cerâmicos e vidro. Em todos eles registou-se um crescimento entre 2019 e 2021.



**Figura 14-** Manufatura Aditiva na indústria, adaptado de [67]

Relativamente ao tipo de tecnologias de MA utilizadas, o FFF é aquela que se evidencia devido ao baixo investimento, elevada gama de materiais a preços acessíveis e principalmente a facilidade de utilização sem que para isso seja necessário elevados níveis de conhecimento ou formação. Ainda assim, para o fabrico destes componentes outras tecnologias são aplicáveis. A escolha da tecnologia é normalmente feita tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada técnica e a gama de materiais disponíveis. Por exemplo, as tecnologias de resina (SL e Jato de Ligante) têm vindo a ser usadas neste tipo de aplicações quando são necessárias peças pequenas e complexas e onde a resistência e a durabilidade não são pontos críticos [68]. Em algumas aplicações as técnicas de pó, principalmente o SLS, também são utilizadas devido à possibilidade de produção de peças de maior volume em materiais mais avançados e de uma forma mais precisa. Para produção de pequenas séries esta técnica torna-se a mais rentável devido à maior rentabilização do volume de construção do equipamento. O DMLS também pode ser usado para fabrico de peças metálicas, mas isso apenas se justifica quando são geometrias muito complexas e difíceis de maquinar, caso contrário é preferível recorrer a processos de maquinação.

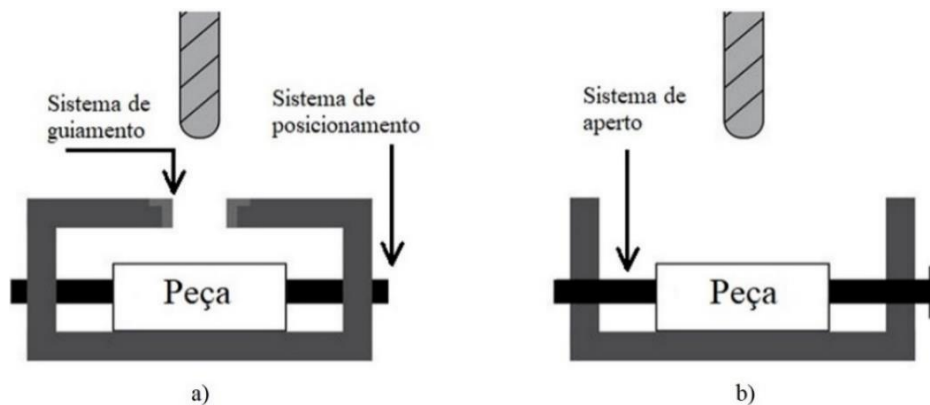
### ***Jigs and Fixtures***

As palavras inglesas *jigs* e *fixtures* são muito conhecidas no ambiente industrial. Em português estes termos são vulgarmente substituídos pelo termo “gabari” ou “ninho”.

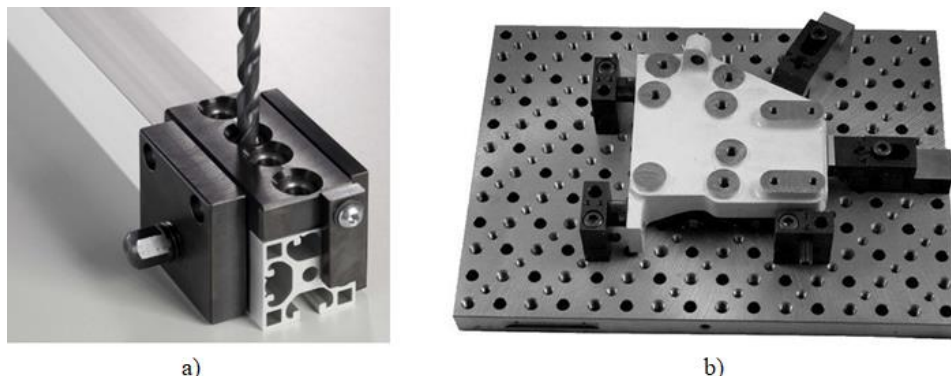
Os *jigs* e *fixtures* têm como finalidade simplificar os processos de fabrico e montagem. São acessórios que garantem um correto posicionamento e fixação de um determinado componente entre operações de fabrico permitindo aumentar a velocidade de produção, repetibilidade do processo sem ocorrência de erros de montagem e reduzir custos [61]. Isto traduz-se em ganhos significativos sem comprometer a qualidade final do produto. Pelo contrário, ao tornar *standard* o processo contribui-

se para um produto mais confiável. Filosofias de fabrico que têm como objetivo aumentar a produtividade, como é o exemplo do pensamento “*LEAN Manufacturing*”, vieram impulsionar o uso deste tipo de mecanismos [62].

A diferença entre um *jig* e uma *fixture* é mínima, mas é fundamental perceber o que os diferencia. Um *jig* é uma ferramenta que, para além de posicionar uma peça numa posição pretendida, tem também um mecanismo integrado para guiar uma operação de fabrico [63]. Por exemplo, para operações de furação é importante garantir que o furo é feito sempre na mesma posição sem que exista um desvio considerável que afetará a conformidade da peça. Na figura 15-a) está representado um exemplo disso mesmo, o *jig* tem uma zona de fixação e uma zona por onde a ferramenta será guiada para executar a etapa de furação. Ao contrário dos *jigs*, as *fixtures* são ferramentas que não só garantem o posicionamento como permitem mesmo um aperto da peça à ferramenta. Além desta diferença, as *fixtures* não têm qualquer tipo de mecanismo guia para operações de fabrico, servindo apenas como base de fixação para a peça (figura 15-b). É muito utilizado, por exemplo, em equipamentos de maquinaria CNC. Na figura 16 podem-se ver alguns exemplos de aplicações em contexto real deste tipo de mecanismos. Na figura 16-a) está um caso concreto do exemplo dado acima. Trata-se de um *jig* de furação para realizar furos a determinadas medidas em perfil de alumínio. A figura 16-b) é um exemplo de uma *fixture* para uma peça que será sujeita ao processo de maquinaria.



**Figura 15-** Esquematização da diferença entre: (a) um *jig*; e (b) uma *fixture*, adaptado de [64]



**Figura 16-** Exemplos de: (a) *jigs*; e (b) *fixtures*.

São várias as vantagens do uso destas ferramentas, mas a mais relevante é o facto de deixar de ser necessário ou de se reduzir significativamente a necessidade de medição, posicionamento, alinhamentos entre outros procedimentos de *setup* entre cada peça. Isto possibilita a redução de tempos não produtivos, estandardizar procedimentos, aumentar a precisão, reduzir a probabilidade de falhas e, conseqüentemente, redução de custos e aumento da produção.

A revista TCT ou “TCT Magazine” apresenta um significativo portefólio de comunicação na área do 3D: Manufatura Aditiva, digitalização 3D, metrologia, serviços 3D, *design*, entre outros. O conteúdo desta revista é focado na indústria e pretende divulgar, através de casos concretos, as potencialidades desta área. A temática do fabrico de *jigs*, *fixtures* e outras ferramentas é muitas vezes abordada. Casos de estudo de grandes empresas já foram apresentados, demonstrando e comprovando o interesse do fabrico destes componentes por técnicas aditivas. Nos parágrafos seguintes serão apresentados alguns desses casos.

### **Caso AutoEuropa [69]**

A AutoEuropa é uma fábrica do grupo Volkswagen que é responsável pela montagem de alguns modelos da marca. Verificou-se que, com o uso de impressoras FFF para fabrico de componentes de auxílio à montagem, nomeadamente *jigs* ou gabaris, era possível economizar dinheiro e tempo na linha de montagem. Anteriormente este tipo de serviço era subcontratado a fornecedores externos. Num caso em concreto (figura 17), a utilização da MA representou uma redução de custos na ordem dos 97% e uma redução do prazo de entrega em 88%, além dos componentes serem tão ou mais confiáveis que as anteriores. Este é um exemplo de um *jig* para colocação do emblema do modelo do carro na parte traseira de forma consistente e precisa. Outra vantagem da produção interna é poder adaptar o *design* das ferramentas para que quando um elemento se danifica não seja necessário substituir toda a ferramenta, mas sim apenas a parte frágil ou danificada. A AutoEuropa estima uma poupança de 250 000 € anuais com a adoção destas técnicas.

### **Caso Heineken [70]**

Uma fábrica da Heineken em Sevilha procurou otimizar a sua eficiência através do uso de impressoras FFF. Percebeu-se que em certas aplicações era possível substituir componentes metálicos das linhas de produção por peças poliméricas impressas, não sendo os *jigs* ou *fixtures* o foco neste caso em concreto (figura 18). Utilizar materiais poliméricos era suficiente para o tipo de aplicação desejada uma vez que se conseguiam peças relativamente fortes. É usado essencialmente o *Tough PLA* para separadores de garrafas e sistemas de triagem, o nylon para aplicações em que existe contacto com peças metálicas e o TPU para peças de proteção e peças onde é necessária alguma absorção de impacto. Sempre que é vantajoso o *design* das peças é também otimizado para o tipo de processo utilizado. A Heineken afirma uma redução de custos e de tempo entre 70 e 90% e uma maior eficiência das linhas.





**Figura 17-** Jig produzido internamente na AutoEuropa, retirado de [69]



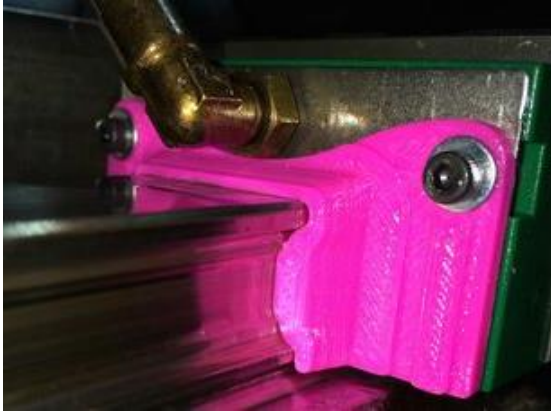
**Figura 18-** Ferramenta de aperto produzida pela Heineken, retirado de [70]

### **Caso PBC Linear [71]**

A empresa PBC Linear é mais um exemplo de como é possível utilizar a MA para otimização de processos produtivos. Um exemplo concreto foi o desenvolvimento de um pequeno acessório (figura 19) para um equipamento industrial para substituição do componente original que não era eficiente na sua função. Esta peça tem como finalidade proteger uma guia linear das limalhas de aço resultantes de processos operações de fabrico. O *redesign* da peça permitiu que existisse uma melhor proteção contra as limalhas mais pequenas que, com a peça original, não acontecia, levando a encravamentos da guia. Um engenheiro desta empresa afirma ter reduzido milhares de dólares em ferramentas e serviços especializados.

### **Caso Renault Sport F1 [72]**

Em 2017, a equipa de Fórmula 1 da Renault tirou vantagem das tecnologias aditivas para fabricação de *jigs* para auxiliar e facilitar o processo de soldadura do sistema de escape dos seus carros. Estas ferramentas facilitaram imenso o processo uma vez que a geometria do escape é bastante complexa e é essencial que a soldadura das diferentes partes seja feita nas posições corretas para garantir a correta montagem do sistema no motor e no carro. Na figura 20 está o exemplo do sistema de escape posicionado no *jig*. As peças transparentes que suportam os tubos de escape foram fabricadas na tecnologia SLA<sup>®</sup> e as peças metálicas que suportam a as extremidades do conjunto foram fabricadas pela tecnologia DMLS. Mais uma vez são apontadas como principais vantagens a redução de custos e de tempos de fabrico quando comparado, por exemplo, com a fabricação destes componentes por maquinaria CNC.



**Figura 19-** Protetor para guia linear, retirado de [71]



**Figura 20-** Jig para soldadura do sistema de escape do carro da Renault Sport Formula 1, retirado de [72]

Além destes casos de estudo específicos divulgados maioritariamente pelas empresas é importante perceber que tipos de estudos e desenvolvimentos se andam a fazer nesta área. A utilização de *jigs*, *fixtures* e outros tipos de ferramentas obtidos através de Manufatura Aditiva é mais comum de se ver na indústria, mas existem outros tipos de aplicações em áreas distintas. Nesta parte do documento serão apresentados alguns estudos desenvolvidos nas mais diversas áreas.

Começando por uma área diferente, Ishida et al. [73] realizou um estudo sobre a produção de *jigs* para ensaios de flexão de três pontos na tecnologia FFF, para resinas compostas odontológicas. O objetivo do estudo era verificar a possibilidade de fabricar estes componentes através desta técnica de fabrico. Depois de vários testes de flexão num equipamento de ensaios universal utilizando várias resinas dentárias e estabelecendo o material do *jig* como sendo PLA concluiu-se que é possível o fabrico destes componentes para este tipo de ensaios uma vez que não existem diferenças significativas entre os *jigs* produzidos em PLA e aqueles produzidos em aço inoxidável.

Kampker et al. [74] estudou a viabilidade e a eficiência de *jigs* de soldadura impressos quando comparados com os *jigs* tradicionais. Neste caso em concreto o sistema é composto por mais que um elemento. Começou-se por classificar cada elemento consoante a viabilidade de ser fabricado aditivamente. Esta avaliação foi feita segundo critérios definidos pelo autor, desde o mais crítico para o menos crítico, nomeadamente, possibilidade de normalização, complexidade de fabrico da peça, precisão, rigidez, outras influências externas, influências do calor gerado no processo de soldadura, durabilidade, capacidade de integração no sistema e tamanho da peça. Segundo um determinado método obtiveram-se três categorias de caracterização das peças, sendo a primeira “Recomendada para impressão”, a segunda “gama intermédia” e a terceira “não recomendada para impressão”. Alguns componentes integrantes do conjunto não se justificavam fabricar aditivamente, enquanto, com o aumento da complexidade, os componentes passavam a ser caracterizados como “recomendados para impressão”. Com este estudo concluiu-se que nem sempre se justifica o fabrico de *jigs* totalmente fabricados aditivamente, mas sim, adotar estas tecnologias para fabricar apenas alguns componentes onde já se observa uma complexidade considerável, ou seja, uma solução de *jig* híbrido juntando peças poliméricas impressas com peças de aço obtidas por processos convencionais.

Paliwal et al. [75] desenvolveu um estudo sobre a implementação de *jigs* e *fixtures* impressos em FFF no fabrico de braços de suspensão para ATV's. Servem para posicionar os diferentes componentes metálicos que constituem o braço de suspensão do veículo na posição correta para efetuar o processo de soldadura. O material usado foi o PLA devido à facilidade de impressão. Os resultados obtidos foram positivos uma vez que as peças soldadas neste sistema de posicionamento foram ensambladas e testadas no veículo e este passou em todos os testes a que foi sujeito.

Krznar et al. [76] estudou o desenvolvimento de uma ferramenta para suportar uma peça que se pretendia digitalizar num sistema de *scanning* rotativo. Peças plásticas de paredes finas acabam por sofrer deformações quando apertadas na ferramenta de fixação ou até mesmo quando estão sobre o seu próprio peso. O objetivo do estudo era tirar partido das tecnologias aditivas e fabricar uma espécie de *jig* ou *fixture* com uma geometria complexa e um custo baixo, uma vez que cada peça que se pretende digitalizar é diferente e é necessário o fabrico de diferentes ferramentas para diferentes peças a digitalizar. Neste caso a tecnologia utilizada foi a *PolyJet* uma vez que se pretendia um elevado nível de precisão, qualidade superficial e tempos de produção reduzidos. Como resultados do estudo chegou-se a uma geometria onde a peça assenta sem necessidade de apertar (não provocando deformações). Reconhece-se que o tratamento do modelo CAD da peça é fundamental para o *design* correto do *jig* ou *fixture* e, mesmo que a geometria obtida seja algo complexa, isso não se revela um entrave à sua produção devido à utilização de uma técnica aditiva que praticamente não apresenta restrições de *design*, o que não acontece em tecnologias convencionais.

Violante et al. [77] trabalhou num caso semelhante ao anterior. Tratou-se do desenvolvimento de uma *fixture* para suportar uma chapa metálica com formas complexas durante o processo de controlo dimensional num equipamento CMM. A abordagem do problema passou pelo desenvolvimento de uma *hybrid fixture* em que a peça impressa foi obtida pela técnica de SLS no material PA-Al (Alumina). As tolerâncias necessárias para o controlo dimensional da chapa são maiores do que as das peças produzidas no SLS, tornando este processo viável para a produção deste tipo de componentes. No entanto, as peças em alumina apresentam um nível de desgaste elevado causando pelas repetidas operações de posicionamento da chapa metálica. Registou-se uma vida estimada dos elementos de 1 000 medições, a partir deste número as folgas geradas pelo desgaste compromete a medição. Os autores sugerem para trabalhos futuros o uso de uma outra técnica aditiva, o DMLS, utilizando um pó metálico à base de bronze.

Minetola et al. [78] analisou o desgaste de *fixtures* produzidas por FFF em ABS. Para este teste foi desenvolvido um equipamento específico para a *fixture* a testar uma vez que os ensaios de desgaste *standard* não são representativos das condições reais de desgaste da peça.

Como já foi dito, além dos *jigs* e *fixtures* existem outras ferramentas e peças que se justificam fabricar aditivamente devido principalmente à questão dos custos. Um exemplo em concreto desse tipo de peças são *grippers* para robôs. Chitariu et al. [79] estudou a impressão através da técnica FFF de *grippers* para substituir as mesmas peças feitas em aço. Foi estudado a resistência à flexão das peças simulando o contexto de uso real através de um equipamento experimental que media a força e o deslocamento de uma das partes da garra. Além disso usou-se o método de simulação por elementos finitos para comparar os dados das experiências com os resultados das simulações. Para o estudo utilizou-se o material ABS com um preenchimento de 100%. Após vários ciclos de carga e descarga verificou-se que o material apresenta um comportamento não linear. As simulações por elementos finitos foram feitas alterando o valor do módulo de Young do material. Os valores de

deslocamento mais próximos dos valores experimentais correspondem a um valor de 1,8 GPa para o módulo Young, valor esse que é 18% inferior ao módulo Young para uma peça obtida por moldação por injeção. Quando se utiliza o método de elementos finitos para simular peças complexas com condições de trabalho também elas complexas e fabricadas na técnica FFF é aconselhável usar um módulo de Young 20 a 25% inferior ao módulo de Young de uma peça injetada.

Gomez-de-Gabriel et al. [80] abordou também a temática dos *grippers*, mas de uma perspectiva diferente. Desta vez trata-se de uma *gripper* pneumático e estudou-se a viabilidade de produzir uma única peça por FFF que substituísse todos os componentes tradicionais com ejetores de vácuo, conectores pneumáticos, canais de ar e ventosas flexíveis. A ferramenta usada inicialmente era já impressa, mas servia apenas para suporte dos componentes. O fabrico de uma peça como um todo implica um conceito de “*hybrid print*”, ou seja, combinar diferentes materiais para a técnica FFF, na mesma peça. Neste caso a combinação de materiais rígidos com flexíveis é o ideal, então usou-se o PETG para as zonas onde a rigidez tem de ser maior, e o TPU para as ventosas. Finalizado o estudo e analisando o poder de sucção, demonstrou-se ser possível agarrar até 6N, valor muito abaixo das soluções comerciais, mas ainda assim vantajoso para aplicações não muito exigentes. As ventosas impressas em TPU também revelaram um poder de retenção do ar inferior às ventosas *standard* em cerca de 20%. As vantagens apontadas para a utilização destes componentes é a redução de inventário de várias peças de substituição, o facto de não ser necessário montagem e a possibilidade de prever o tempo de vida útil da garra para saber quando será necessário proceder à sua substituição.

De uma forma geral, os estudos presentes na literatura sobre a produção de *jigs*, *fixtures* e outro tipo de ferramentas não são muito focados nos materiais utilizados. Para a tecnologia FFF os materiais que mais se utilizam continuam a ser o PLA, PETG e o ABS. Outras tecnologias começam também a ser utilizadas, dependendo da peça que se quer produzir, da quantidade e do material.

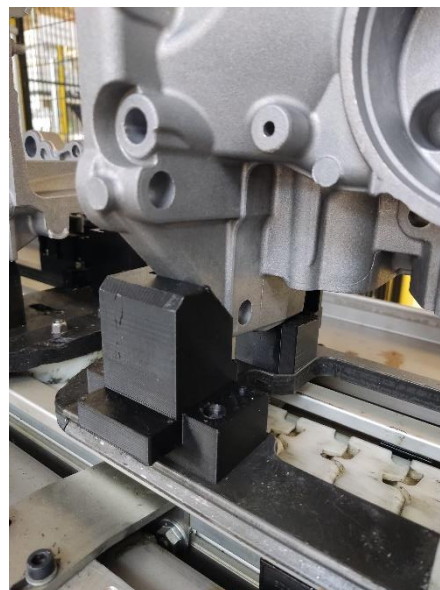
### **3.2 O presente caso de estudo: Renault Cacia – “*Jigs and Fixtures*”**

Em praticamente todos os setores da fábrica da Renault em Cacia existem componentes das linhas de produção com potencial para serem substituídos por peças fabricadas aditivamente, componentes esse que são maquinados, quer em materiais poliméricos, quer em materiais metálicos. Para implementar estas novas tecnologias na empresa e começar a fabricar internamente componentes para as linhas de produção é necessário estudar o desempenho das peças obtidas por técnicas aditivas quando comparadas com as tecnologias convencionais.

Este estudo desenvolvido centraliza-se numa das várias peças/conjunto de peças que já estão a ser produzidas internamente. Trata-se de um conjunto de peças poliméricas semelhantes entre si que são utilizadas diariamente numa linha de produção. Este conjunto tem como função posicionar e sustentar um cárter intermédio de um automóvel Renault sob uma plataforma movimentada, chamada de “palete” (figura 21), que transporta a peça entre as diferentes etapas de fabrico.



**Figura 21-** Palete com o cárter intermédio posicionado



**Figura 22-** Peças poliméricas de posicionamento

O cárter em bruto entra na linha e é direcionado para uma zona onde irá ser sujeito a várias etapas de maquinação. Por uma questão de cadência de fabricação existem duas zonas de maquinação, uma delas totalmente automatizada onde a introdução das peças nas CNC's é feita por um robô, e a outra onde a introdução das peças é feita por operadores. Em todas as etapas executadas (figuras 23 a 26) por robôs garante-se um melhor posicionamento, repetibilidade e força controlada, contribuindo para o menor desgaste das peças e, conseqüentemente, para o aumento da sua vida útil. Isto não se verifica quando é um operador a colocar as peças nas paletes uma vez que o movimento é menos preciso, mais brusco e as peças estão sujeitas a forças de impacto, contribuindo assim para um desgaste muito mais acentuado dos componentes poliméricos.

Após as etapas de maquinação, as peças são sujeitas a uma lavagem e secagem para retirar quaisquer vestígios de fluidos de corte e outros resíduos provenientes do processo de maquinação. No processo de lavagem e secagem as temperaturas máximas atingidas são os 45°C. Depois deste procedimento de limpeza, alguns componentes são assemblados no cárter intermédio e o conjunto é então armazenado para posterior exportação para uma outra fábrica de montagem do grupo.



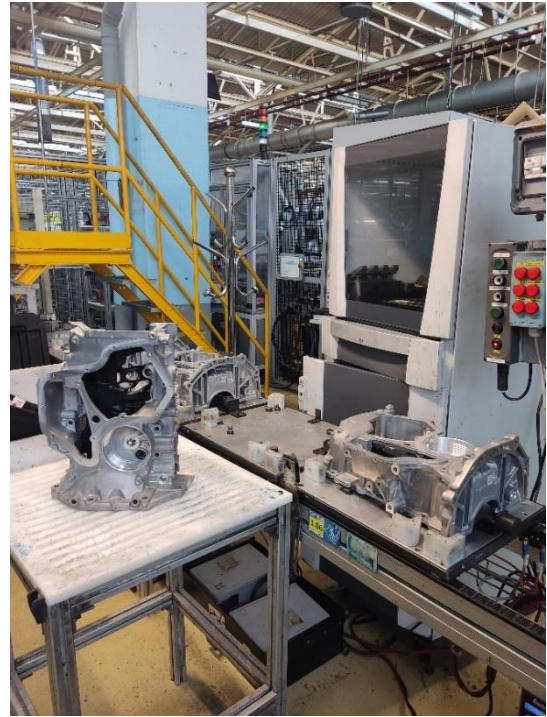
**Figura 23-** Zona de maquinação



**Figura 24-** Cárteres carregados nas paletes depois de maquinados



**Figura 25-** Saída dos cárteres da lavagem e secagem



**Figura 26-** Conjunto pronto para expedição

As peças originais são maquinadas num polímero de engenharia, o Ertalon® 66 GF30. Trata-se de um plástico de engenharia semi-cristalino, mais concretamente, uma poliamida reforçada com 30% fibra de vidro. O uso deste material deve-se à sua resistência mecânica, rigidez, estabilidade dimensional, alta capacidade de amortecimento mecânico e, acima de tudo, devido à sua excelente resistência ao desgaste. Relativamente à amplitude de temperaturas de operação o fabricante anuncia entre os -20 e os 110°C.

Devido à repetibilidade do ato de colocação e extração dos cárteres intermédios nestes gabarits de transporte durante três turnos diários, sete dias por semana, faz com que as peças se desgastem rapidamente (figura 27). Estima-se que, por dia, cada palete passe entre dez a quinze vezes por esta etapa. As peças atingem um desgaste tal que deixam de cumprir a sua função corretamente, ou seja, transportar o cárter intermédio entre operações de fabrico numa determinada posição. Isto traduz-se depois em paragens e problemas nas linhas.



**Figura 27-** Peças em Ertalon® 66 GF30 desgastadas

A transição entre o processo convencional de maquinação e o processo de adição FFF implica o estudo de novos materiais e as suas respetivas propriedades mecânicas. Dentro dos materiais para FFF já foram colocados na linha de produção peças fabricadas em PLA, mas estas partiam e a sua degradação era demasiada prematura. À data de início do estudo estavam a ser testadas as primeiras peças feitas em PETG uma vez que, teoricamente, as propriedades deste material seriam superiores face às do PLA.

---

## 4 TRABALHO EXPERIMENTAL

---

O presente trabalho é apresentado em duas vertentes.

Numa primeira vertente estudou-se o efeito dos ciclos de lavagem e secagem assim como de parâmetros de impressão no desempenho mecânico de provetes produzidos por FFF. Com vista à melhoria do comportamento mecânico procedeu-se primeiro à seleção dos materiais: materiais já utilizados pela Renault Cacia e outros materiais identificados na revisão bibliográfica. Posteriormente foi definido um conjunto de parâmetros de impressão por FFF. Uma vez obtidos os provetes, fez-se o estudo do desempenho mecânico.

A segunda vertente do trabalho incidiu no desenvolvimento de um caso de estudo proposto pela Renault Cacia. Este estudo de caso refere-se a uma peça que integra um sistema de posicionamento e transporte de componentes metálicos de uma linha de produção. Os resultados obtidos na primeira vertente do trabalho serviram de auxílio à tomada de decisão relativamente à escolha de materiais e parâmetros de impressão.

Em relação à primeira vertente, uma vez que as peças passam por etapas de lavagem e secagem é fundamental perceber a influência do contacto com a água e com temperaturas mais elevadas no seu desempenho mecânico. Desta forma, para cada material imprimiram-se três conjuntos de provetes, sendo cada conjunto composto por cinco provetes para ensaios de impacto, cinco para ensaios de flexão, dois para ensaios de dureza e um para ensaios de desgaste. O primeiro conjunto foi ensaiado sem submissão a ciclos de lavagem. O segundo conjunto foi ensaiado após submissão dos provetes a um ciclo de lavagem e secagem. O terceiro conjunto de provetes foi testado após trinta ciclos de lavagem e secagem. O conjunto de provetes que se pretendia submeter a esta etapa foram colocados num transportador próprio para o efeito e foram passados na linha o número de vezes pretendidas. De seguida procedeu-se à impressão de novos provetes, mas desta vez alterando parâmetros do processo para perceber de que forma estes influenciavam as propriedades mecânicas dos diferentes materiais. Os ensaios mecânicos realizados nesta fase foram de impacto e de flexão, apenas nos provetes sem operações de lavagem e secagem. Testaram-se todos os materiais com todas as combinações de parâmetros possíveis. Para cada combinação fez-se uma amostra de cinco provetes para flexão e cinco provetes de impacto.

Na segunda vertente, a peça eleita para caso de estudo foi impressa nos materiais testados na primeira fase do trabalho. Os parâmetros de impressão foram também selecionados com base nos resultados dos ensaios mecânicos realizados posteriormente. Nesta fase definiu-se uma estratégia de impressão relacionada com o posicionamento e orientação da peça na mesa de impressão com o objetivo de melhorar o seu desempenho mecânico no contexto de uso real.

De seguida optou-se por aferir o desgaste sofrido pelas peças em contexto de uso na linha de produção. O estudo de desgaste foi feito através de controlo dimensional, recorrendo a um sistema de digitalização. A estratégia definida para medir o desgaste consistiu em estabelecer como referência a peça obtida por FFF. Tal opção é justificada pelos desvios dimensionais e geométricos existentes entre a peça real e o modelo virtual, decorrentes do processo de fabrico.



As peças foram colocadas na linha de produção durante um mês e retiradas ao fim desse tempo. Após análise dos resultados obtidos procedeu-se ao *redesign* da geometria com o objetivo de minimizar o desgaste nas zonas críticas da peça, adotando-se *guidelines* de *Design for Additive Manufacturing* (DfAM).

O estudo termina com uma análise de custos e durabilidade da peça nos diferentes materiais tendo como base o seu preço, os resultados dos ensaios mecânicos e a informação sobre a duração média das peças fabricadas em certos materiais que já se conhece.

## 4.1 Materiais e métodos

### 4.1.1 Materiais

A Renault Cacia utiliza uma PA66 reforçada com fibra de vidro (Ertalon® 66 GF30) na maquinação de peças para *jigs and fixtures* (processo subtrativo). Quando introduziu a MA, a Renault Cacia escolheu o PETG para a manufatura por FFF de peças para *jigs and fixtures*, substituindo gradualmente o Ertalon® 66 GF30, reduzindo assim custos de produção e agilizando o processo. Neste trabalho o Ertalon® 66 GF30 não será estudado do ponto de vista mecânico uma vez que existe uma vasta informação disponibilizada pelo fabricante (ficha técnica no Anexo A).

Com base na literatura selecionaram-se três materiais com potencial para a aplicação em *jigs and fixtures*: o ASA, uma poliamida de alta temperatura reforçada com 15% de fibra de carbono (PAHT CF15) e uma poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro (PA6 GF30) (tabela 4). Para a escolha do ASA teve-se em consideração as suas propriedades, processabilidade, disponibilidade e custo. Relativamente às poliamidas reforçadas, a escolha deve-se principalmente ao facto de ser um material que tem uma elevada capacidade de resistência ao desgaste. De forma a se poder comparar o desempenho de uma poliamida com 30% de fibra de vidro processada por FFF com o Ertalon® 66 GF30, selecionaram-se filamentos compósitos de um fornecedor já certificado pela Renault Cacia. No caso do PA6 GF30, trata-se de uma poliamida 6 e não de uma poliamida 66 (Ertalon® 66 GF30), não havendo indicação da parte do fornecedor do tipo de poliamida do material PAHT CF15.

**Tabela 4-** Resumo dos materiais utilizados

Material	Fabricante	Gama de temperaturas de processamento	
		Extrusor	Mesa
PETG	3D Kordo®	230°C – 250°C	90°C
ASA	Ultrafuse® (BASF)	260°C – 280°C	100°C – 120°C
PAHT CF15	Ultrafuse® (BASF)	260°C – 280°C	100°C – 120°C
PA6 GF30	Ultrafuse® (BASF)	240°C – 280°C	80°C – 110°C

#### 4.1.2 Método para produção de provetes: ciclos de lavagem

Uma vez que a tecnologia FFF permite a alteração de múltiplos parâmetros de impressão, com influência nas propriedades mecânicas, optou-se por fabricar todos os provetes com os mesmos parâmetros. Esta normalização faz com que os diferentes resultados obtidos nos diferentes ensaios sejam resultado unicamente da troca de material e não da alteração de outros fatores. Desta forma é possível perceber qual o material que tem um melhor desempenho mecânico para posteriormente abordar os parâmetros de impressão. Existem, no entanto, certos parâmetros que têm de ser adequados ao tipo de material utilizado. A temperatura de extrusão e a temperatura da mesa de impressão são dois desses parâmetros. Normalmente o fabricante dos materiais disponibiliza uma gama de valores admissíveis que podem ser utilizados. Ainda assim fez-se alguns testes preliminares para validar os valores definidos.

A impressão dos provetes em PETG e em ASA com os parâmetros pré-definidos decorreu com sucesso. Apesar do ASA ser um material com tendência de fissurar e descolar da base de impressão, a utilização de uma impressora aberta, sem controlo de temperatura ambiente, não condicionou a impressão.

A impressão dos provetes nos materiais carregados com fibras já teve outra complexidade, principalmente com a adesão das peças à mesa de impressão. Por outro lado, na impressão do PA6 GF30 houve vários problemas relacionados com a extração das partes impressas da mesa de impressão. A adesão era de tal forma que partes do vidro onde as peças eram impressas ficavam agarradas à mesma, danificando a base de impressão. Após várias iterações acabou-se por chegar a um valor de temperatura na mesa de 50°C. Esta temperatura promovia a adesão suficiente entre a peça e o vidro, sem o danificar aquando da sua extração.

Na tabela 5 estão representados os parâmetros de impressão utilizados para os diferentes materiais.

**Tabela 5-** Parâmetros de impressão dos provetes

	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,4 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,6 mm
Altura de camada	0,2 mm			
Nº de paredes	5			
Nº de camadas de base/topo	100% (maciço)			
Ângulo de varredura	45°			
Temperatura ( <i>nozzle/bed</i> )	240°C / 90°C	260°C / 100°C	280°C / 95°C	260°C / 50°C
Velocidade de impressão	40 mm/s			

### 4.1.3 Método para produção de provetes: parâmetros de impressão

Os provetes para caracterização mecânica dos materiais foram impressos com um preenchimento interno de 100%, ou seja, maciços, com o objetivo de efetuar a comparação com provetes *standard*, obtidos por processos de moldação ou maquinação. Quando se fabrica uma peça pela tecnologia FFF esta raramente é maciça devido à possibilidade que a tecnologia oferece de produzir peças ocas ou com apenas uma determinada percentagem de preenchimento. Isto possibilita a redução de tempo de impressão, o material gasto e, conseqüentemente, o custo de produção das peças. Além deste parâmetro existem outros característicos desta tecnologia de MA que podem ser alterados.

Com este estudo, pretende-se estudar a influência de determinados parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas das peças, percebendo de que forma se pode otimizar as peças produzidas. As variáveis a alterar foram: o número de paredes (3 ou 6); a percentagem de preenchimento ou *Infill* (50% ou 90%); e a altura de camada (0,2 mm ou 0,3 mm). Os outros parâmetros mantiveram-se constantes em todos os provetes produzidos (tabela 6).

**Tabela 6-** Parâmetros de impressão fixos e variáveis

<b>Parâmetros variáveis</b>	
Materiais	PETG / ASA / PAHT CF15 / PA6 GF30
Altura de camada	0,2 mm / 0,3 mm
Nº de paredes	3 / 6
<i>Infill</i>	<i>Cubic</i> (50% e 90%)
<b>Parâmetros fixos</b>	
Nº de camadas de base/topo	3
Ângulo de varredura	45°
Velocidade de impressão	40 mm/s

### 4.1.4 Método para produção da peça caso de estudo

Os parâmetros para produção da peça em estudo foram estabelecidos com base nos resultados obtidos na primeira vertente do trabalho (tabela 7).

**Tabela 7-** Parâmetros de impressão para a peça em estudo

	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,4 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,6 mm
Altura de camada	0,2 mm			
Nº de paredes	8			
Nº de camadas de base/topo	7			
<i>Infill</i>	<i>Cubic Sub-Division (90%)</i>			
Ângulo de varredura	45°			
Temperatura ( <i>nozzle/bed</i> )	240°C / 90°C	260°C / 100°C	280°C / 95°C	260°C / 50°C
Velocidade de impressão	60 mm/s	60 mm/s	40 mm/s	40 mm/s

## 4.2 Equipamentos e métodos

### 4.2.1 Equipamentos e métodos para FFF

Utilizaram-se dois equipamentos FFF distintos, existentes na Renault, para a impressão dos vários provetes e das peças finais, uma Prusa MK3S+ (figura 28) e uma BCN3D Epsilon W27 (figura 29). O uso de dois equipamentos distintos deve-se ao facto de cada um deles se adequar melhor e estar configurado e calibrado para uma determinada tipologia de materiais. O equipamento da Prusa foi utilizado para a impressão do PETG e do ASA e o equipamento da BCN3D foi utilizado para a impressão do PAHT CF15 e do PA6 GF30.

A Prusa MK3S+ é um equipamento compacto, de fácil utilização e manutenção e com uma elevada qualidade de construção, quer a nível mecânico, quer a nível do próprio desenvolvimento de *software*. O que mais se destaca neste equipamento é o seu sistema de extrusão direta, com o sistema de puxo acoplado ao *nozzle*, o que garante um fluxo de material mais controlado e reduz a probabilidade de entupimentos. O extrusor atinge uma temperatura máxima de 300°C e a mesa os 120°C, permitindo a impressão de uma vasta gama de materiais. Este equipamento conta com um volume de impressão de 250 mm x 210 mm x 210 mm. A principal desvantagem deste equipamento é não ser fechado, dificultando a impressão de certos filamentos que requeiram temperaturas controladas.

A BCN3D Epsilon W27 é um equipamento mais adequado para a impressão de peças de maior volume e para a produção de pequenas séries. Isto porque, para além de ter um volume de trabalho maior (420 mm x 300 mm x 220 mm), está equipada com dois extrusores permitindo que ambos trabalhem em simultâneo, produzindo uma duplicação da peça que se está a imprimir. Esta duplicação permite, por exemplo, obter duas peças no tempo de fabrico de apenas uma. Sendo este equipamento fechado é possível manter uma temperatura constante durante o processo de impressão, o que se torna vantajoso para a impressão de materiais mais exigentes. Por esse motivo, numa das cabeças de impressão está montado um *kit* extrusor próprio para processar materiais compósitos. Normalmente utiliza-se um *nozzle* de aço endurecido para evitar o desgaste prematuro gerado pela abrasão das fibras presentes nos filamentos compósitos. Existem também restrições no que toca ao

diâmetro do *nozzle*. Para estes filamentos recomenda-se um diâmetro igual ou superior a 0,6 mm, diferente da medida *standard* que é 0,4 mm. Isto deve-se ao facto de ser necessário uma secção maior para a passagem das fibras sem que exista casos de entupimento durante e impressão.

Devido à sua estrutura mais complexa este equipamento não é tão prático de se utilizar nem de fazer manutenções. Quando se pretender usar os dois extrusores em simultâneo é fundamental fazer uma nova calibração do equipamento para garantir o correto *offset* na construção das peças. Dada a dimensão da mesa de impressão, o seu nivelamento, embora que seja parcialmente automatizado, é mais complicado. O facto de ter um sistema de extrusão distante do *nozzle*, ao contrário do que se verifica na Prusa (extrusão direta), aumenta a probabilidade de falhas de impressão. Os extrusores atingem uma temperatura máxima de 300°C e a mesa os 120°C.



Figura 28- Prusa MK3S+



Figura 29- Impressora BCN3D Epsilon W27

#### 4.2.2 Equipamentos e métodos para caracterização dimensional e mecânica

Tendo como base o que foi apresentado no ponto 3.2 em que se descreveu a aplicação das peças a produzir e as condições a que estas estão sujeitas decidiu-se estudar quatro propriedades mecânicas que se consideram relevantes: resistência ao impacto, a resistência à flexão e a resistência ao desgaste e dureza. Os ensaios foram realizados seguindo as normas ISO 179-1, ISO 178, ASTM G99 e ISO 868, e, respetivamente.

Para os ensaios de flexão, impacto e dureza utilizaram-se equipamentos específicos existentes nos laboratórios da Escola Superior Aveiro-Norte (figura 30 a 32) e para os ensaios de desgaste

utilizou-se um tribômetro presente no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica (figura 33).



**Figura 30-** Equipamento de ensaios universal AUTOGRAPH AG-IS 10kN



**Figura 31-** Equipamento de ensaios de impacto RAY-RAN



**Figura 32-** Equipamento para medição de dureza na escala D

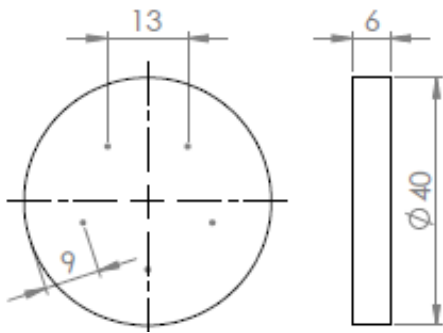


**Figura 33-** Tribômetro Anton Paar TRB3

### Ensaio de dureza

Seguindo a respectiva norma, as dimensões dos provetes para ensaios de dureza devem permitir a medição a uma distância mínima de 9 mm da aresta correspondente à extremidade do provete e o registo de 5 pontos a uma distância de pelo menos 6 mm entre si (figura 34). Os provetes têm de ter pelo menos 4 mm de espessura.

Depois de calibrado o equipamento de medição iniciaram-se os testes nas condições ambiente (figura 35). Após 15 segundos da inserção do indentador no provete registou-se o valor de dureza. Este procedimento foi repetido por 5 vezes, em ambas as faces, e em 2 provetes distintos.



**Figura 34-** Dimensões dos provetes de dureza

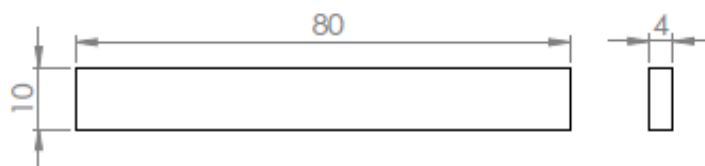


**Figura 35-** Ensaio de dureza

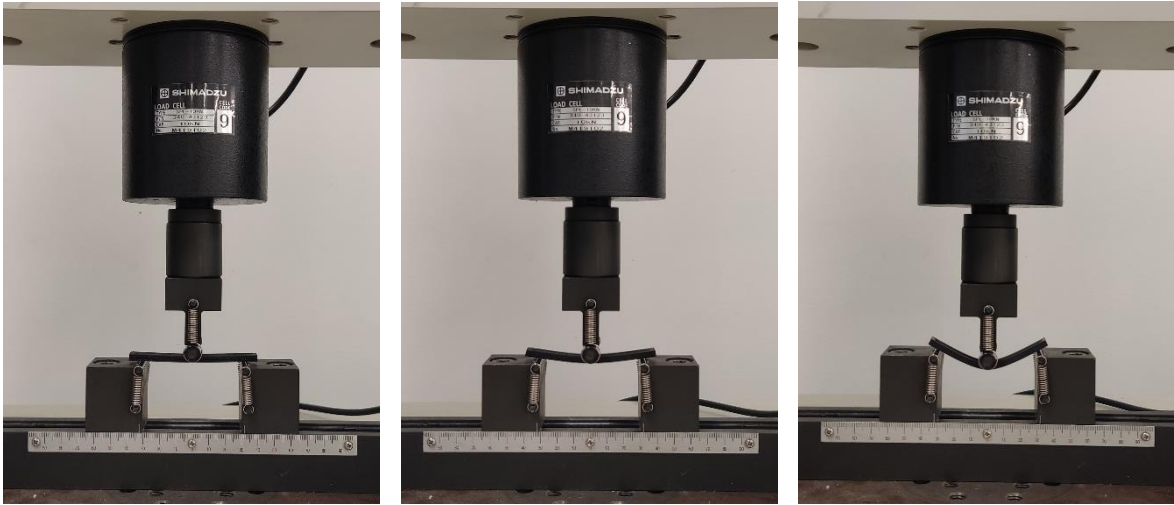
### Ensaio de flexão

Foram realizados ensaios de flexão em 3 pontos às condições ambiente. Os provetes têm uma forma retangular de 80 mm x 10 mm x 4 mm (figura 36), os pontos de contacto externos estão a uma distância de 64 mm entre si e o teste foi realizado a uma velocidade de 10 mm/min (figura 37). Relativamente ao número de ensaios, a norma recomenda no mínimo de 5, sendo necessário mais testes apenas que se pretender otimizar a precisão dos valores.

Sempre que possível, pretende-se extrair para todos os materiais testados os valores relativos ao módulo de flexão, resistência à flexão, deformação na tensão de flexão, tensão de rotura e deformação na tensão de rotura.



**Figura 36-** Dimensões dos provetes de flexão

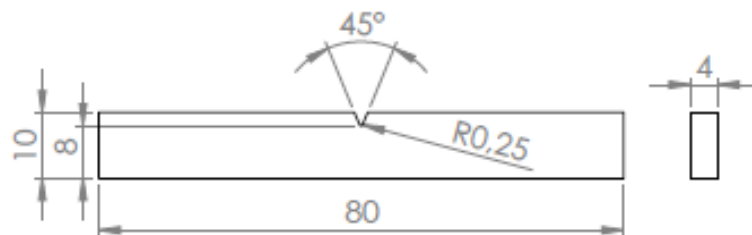


**Figura 37-** Ensaio de flexão em 3 pontos

### Ensaio de impacto

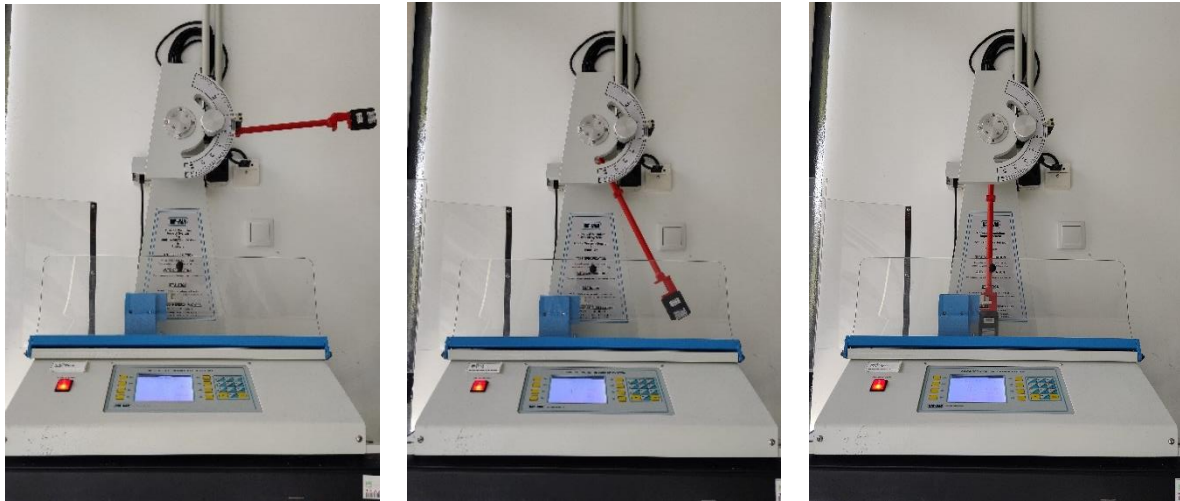
O tipo de ensaio de impacto realizado foi o ensaio *Charpy* com entalhe do tipo A. Dos ensaios com entalhe este é o método recomendado (ISO 179-1/1eA). Os provetes têm uma forma retangular de 80 mm x 10 mm x 4 mm com um entalhe ao centro num dos lados com um ângulo de 45° e um raio de 0,25 mm (figura 38). Os pontos de apoio do provete no equipamento de ensaios estão a uma distância entre si de 62 mm.

O provete é sujeito a um impacto provocado por um pêndulo que choca no provete entre os dois pontos de apoio (figura 39). Este pêndulo é largado de uma determinada altura que está diretamente relacionada com a massa do pêndulo. Tendo em conta os materiais a serem testados e depois de alguns testes preliminares selecionou-se um peso para o pêndulo de 0,476 g e, consequência dessa escolha, a velocidade de impacto é de 2,9 m/s. Com base nestes dados e na geometria do provete o equipamento automaticamente calcula a resistência ao impacto em  $\text{kJ/m}^2$  para cada amostra.



**Figura 38-** Dimensões dos provetes de impacto





**Figura 39-** Ensaio de impacto Charpy

### **Ensaios de desgaste**

Os ensaios de desgaste realizados foram do tipo *Pin-on-Disk* respeitando a norma ASTM G99. Além da impressão dos provetes foi também necessário proceder à maquinação dos pinos metálicos para a realização do par tribológico para esta tipologia de ensaios. As amostras nos diferentes materiais eram os discos que tinham 30 mm de diâmetro e 5 mm de altura e o pino tinha 6 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento (figura 40). O material dos pinos era alumínio uma vez que as peças poliméricas estudadas no contexto real estarão em contacto com esse mesmo material.

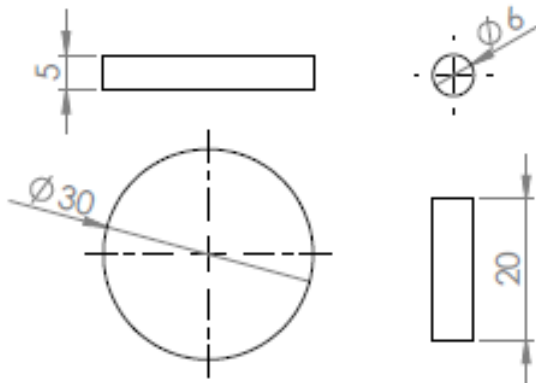
Nestes ensaios pretendia-se que fosse notório o desgaste do provete para ser possível calcular a taxa de desgaste de cada material, uma vez que para este cálculo é necessário saber o volume de material perdido. Foram feitos vários testes preliminares para chegar a valores de velocidade de rotação, carga aplicada e distância percorrida que resultassem numa remoção de material significativa num período aceitável, de forma a não tornar os ensaios demasiado longos.

Foram feitos ensaios rotativos numa só direção, à temperatura e atmosfera ambiente e com um raio de rotação de 8 mm (figura 41). Nos provetes de PETG e ASA foi utilizada uma velocidade de rotação de 200 rpm, uma carga de 20 N e uma distância percorrida de 50 m. Nos materiais compósitos utilizou-se uma velocidade de rotação de 350 rpm, uma carga de 30 N e uma distância percorrida de 200 m.

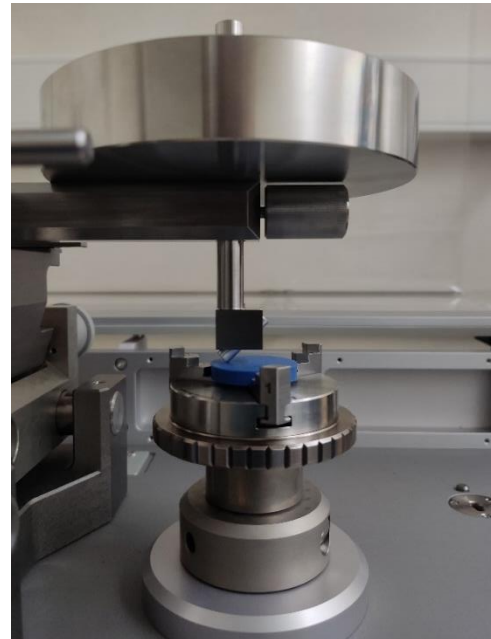
Para uma posterior comparação das propriedades mecânicas dos materiais em forma de filamento com o material original serão utilizados os dados disponibilizados pelo fabricante, mas no caso da taxa de desgaste não é correto fazê-lo: primeiro porque na ficha técnica as unidades eram expressas em  $\mu\text{m}/\text{km}$  e nos ensaios realizados eram de  $\text{mm}^3/\text{N.m}$ ; segundo porque o pino utilizado é de alumínio; e terceiro porque não se sabe que parâmetros de ensaios foram utilizados. Diferentes parâmetros de ensaios influenciam o cálculo da taxa de desgaste, então, maquinou-se um provete no material original e realizou-se um ensaio para ter um valor referência correto.

O desgaste do pino não foi levado em conta uma vez que os parâmetros dos ensaios (carga e velocidade de rotação) não correspondem ao caso de estudo real.

A fórmula para calcular a taxa de desgaste é a seguinte:  $K = \frac{V}{F_n \times L} \left( \frac{mm^3}{N.m} \right)$ , onde  $K$  é a taxa de desgaste,  $V$  o volume desgastado,  $F_n$  a carga aplicada e  $L$  a distância percorrida.



**Figura 40-** Dimensões do par tribológico para ensaios de desgaste *Pin-on-Disk*

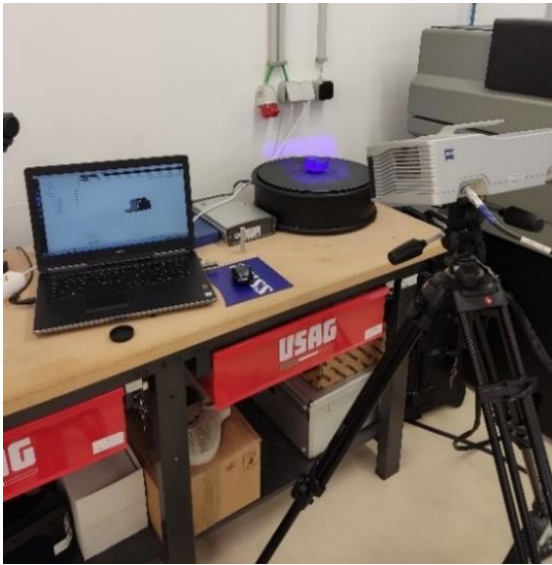


**Figura 41-** Ensaio de desgaste *Pin-on-Disk*

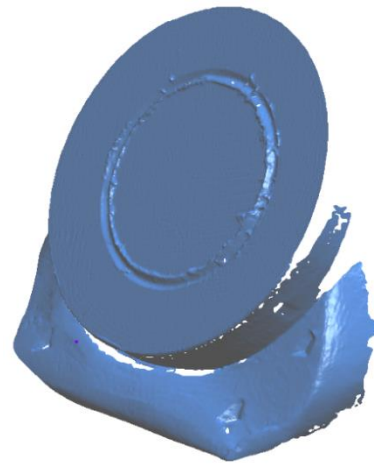
Como para calcular a taxa de desgaste é necessário saber o volume de material desgastado do provete, optou-se por utilizar um sistema de aquisição de forma (digitalização) para realizar essa medição. Através do modelo digital gerado foi possível determinar esse valor.

Utilizou-se um *Scanner 3D* de luz estruturada com mesa rotativa da *Zeiss* (figura 42 e 43). Este tipo de equipamentos é muito utilizado para procedimentos de engenharia inversa, mas devido à sua precisão pode ser utilizado como instrumento de controlo dimensional. A lente instalada é de 100 mm, garantindo um volume de medição de 118 mm x 98 mm x 60 mm e uma precisão de 48 µm.

Este equipamento encontra-se num dos laboratórios da ESAN.



**Figura 42-** Scanner 3D Zeiss COMET



**Figura 43-** Malha resultante da digitalização do provete

## 4.3 Resultados e discussão

### 4.3.1 Efeito dos ciclos de lavagem

Neste subcapítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos realizados. Começou-se por testar os materiais logo após a sua impressão. Posteriormente ensaiaram-se os provetes sujeitos a um e a trinta ciclo de lavagem e secagem.

Na discussão dos resultados será levado em consideração os valores das respetivas propriedades mecânicas do material original que foram obtidos através da consulta da ficha técnica. Na tabela 8 estão apresentados os valores que foram tidos como referência.

**Tabela 8-** Propriedades mecânicas do Ertalon® 66 GF30

Propriedades	Ertalon® 66 GF30	Unidades
Módulo de Flexão	4,48	GPa
Resistência à Flexão	144,78	MPa
Resistência ao Impacto (Charpy com entalhe)	6	kJ/m <sup>2</sup>
Dureza (Shore D)	80	-
Taxa de Desgaste	11	µm/km
Coefficiente de Atrito Dinâmico	0,25 - 0,4	-

### Ensaio de dureza

A dureza foi medida em ambas as faces dos provetes. Este procedimento teve como objetivo perceber se existe uma diferença significativa no valor da dureza entre a face que está em contacto com a mesa de impressão, ou seja, nas camadas iniciais, e a face superior, que diz respeito às últimas camadas de impressão. O gráfico 1 mostra a média e o desvio padrão da dureza de cada material, nas diferentes superfícies.

Começando pelas diferenças entre os valores de dureza registados na face do provete que está em contacto com a mesa de impressão e na face superior verifica-se que, independentemente do material, este valor é sempre superior na face inferior. O facto das primeiras camadas serem feitas sob uma base em vidro aquecida faz com que à medida que o material é depositado seja compactado contra a superfície dura promovendo uma maior homogeneidade do material e uma melhor adesão entre camadas.

Para fins de comparação serão tidos em conta apenas os valores de dureza registados na base inferior do provete uma vez que foram os melhores.

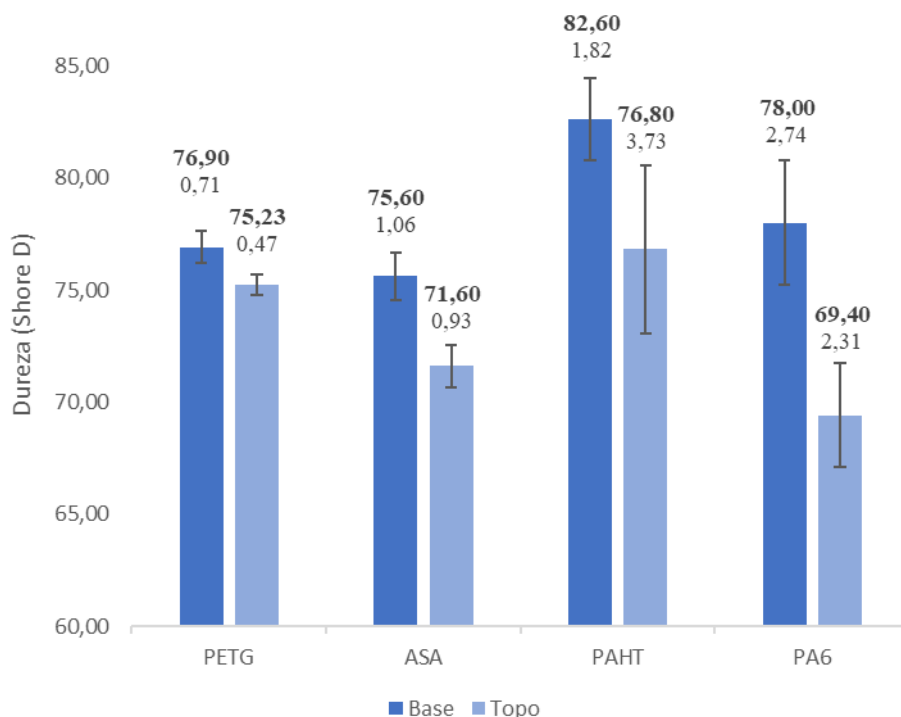


Gráfico 1- Resultados dos ensaios de dureza

O PETG foi o primeiro material testado e foi registado uma dureza de 76,90. O valor registado no ASA foi de 75,60, um pouco inferior ao PETG, no entanto com desvios um pouco maiores. Foi nos filamentos carregados com fibras que se registaram os valores de dureza mais elevados, no entanto, também com maiores desvios. O PAHT CF15 foi o material em que se registou um valor de dureza mais elevado. No PA6 GF30 registou-se um valor de 78, valor acima do PETG e do ASA, mas abaixo do PAHT CF15.

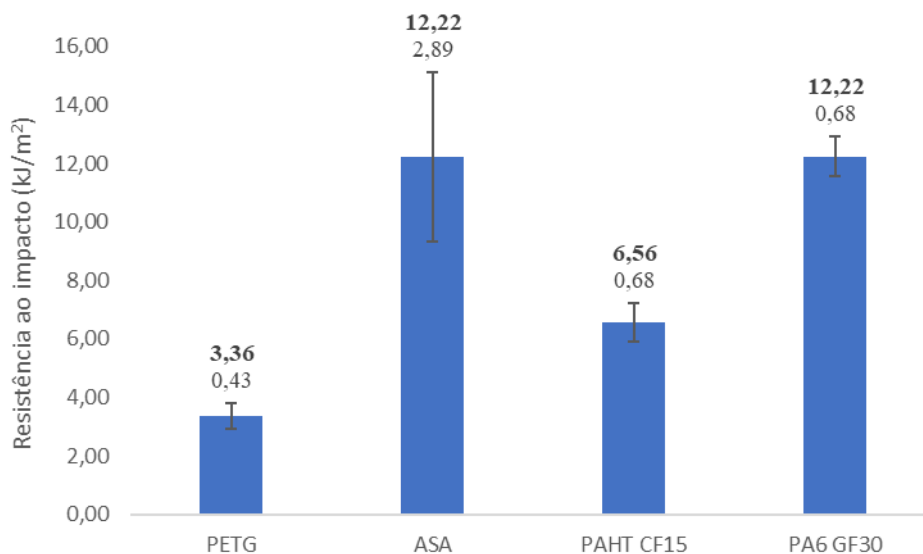
Fazendo uma comparação entre os materiais testados com o material original, o Ertalon® 66 GF30 cuja dureza é de 80 na escala Shore D, consegue-se tirar algumas conclusões. Foi registado no PAHT CF15 um valor de dureza superior ao material original, ainda que o valor relativo à medição da face superior do provete seja apenas de 76,80. Relativamente aos restantes materiais, estes ficaram abaixo do material original.

O PA6 GF30 registou um valor de dureza abaixo do Ertalon® 66 GF30, mas mesmo assim muito próximo.

### **Ensaio de impacto**

Os ensaios de impacto são relativamente simples de se fazerem e de fácil interpretação de resultados uma vez que apenas é necessário analisar a energia necessária para fraturar o provete. Esta é medida em J/m, normalizada pela largura do corpo de prova, ou  $\text{kJ/m}^2$ , normalizada pela área transversal do corpo de prova.

Dos quatro materiais testados, o PETG é aquele que tem um pior comportamento quando sujeito a ensaios de impacto registando um valor de  $3,36 \text{ kJ/m}^2$ . Segue-se o PAHT CF15 com  $6,56 \text{ kJ/m}^2$ , valor semelhante ao do Ertalon® 66 GF30 cujo fabricante anuncia uma resistência ao impacto de  $6 \text{ kJ/m}^2$ . O ASA e o PA6 GF30 foram os materiais que registaram uma maior resistência ao impacto, ambos com  $12,22 \text{ kJ/m}^2$ , sensivelmente o dobro da resistência ao impacto do material original, embora os desvios dos ensaios no ASA tenham sido elevados (gráfico 2).

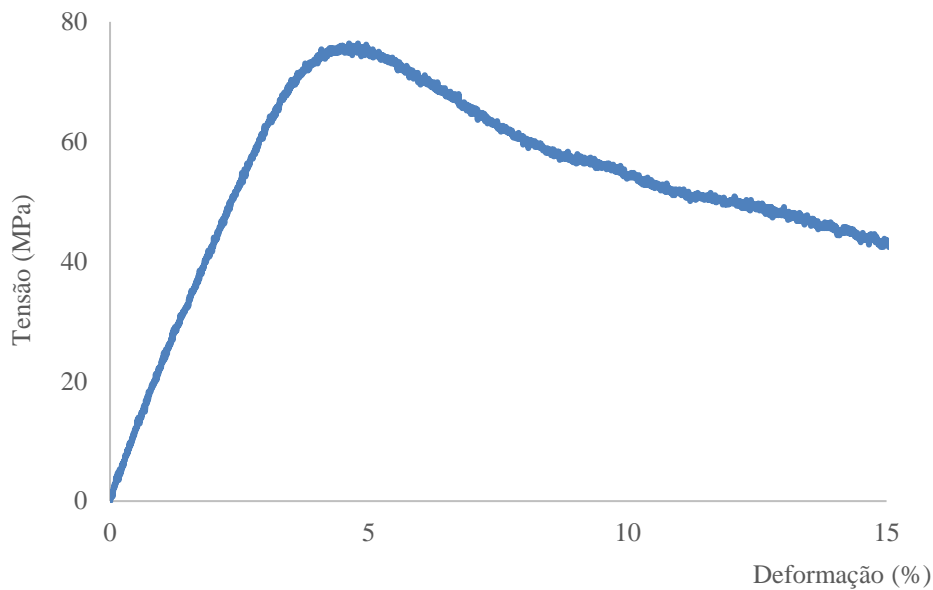


**Gráfico 2-** Resultados dos ensaios de impacto

### Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão são aqueles que exigem mais trabalho uma vez que o equipamento gera um conjunto de valores de força e deslocamento e posteriormente é necessário tratar esses valores para gerar gráficos de tensão/deformação e encontrar e/ou calcular sempre que possível, e segundo as curvas típicas da norma, valores como o módulo de flexão, tensão máxima de flexão, deformação na tensão máxima de flexão, tensão de rotura e deformação na rotura.

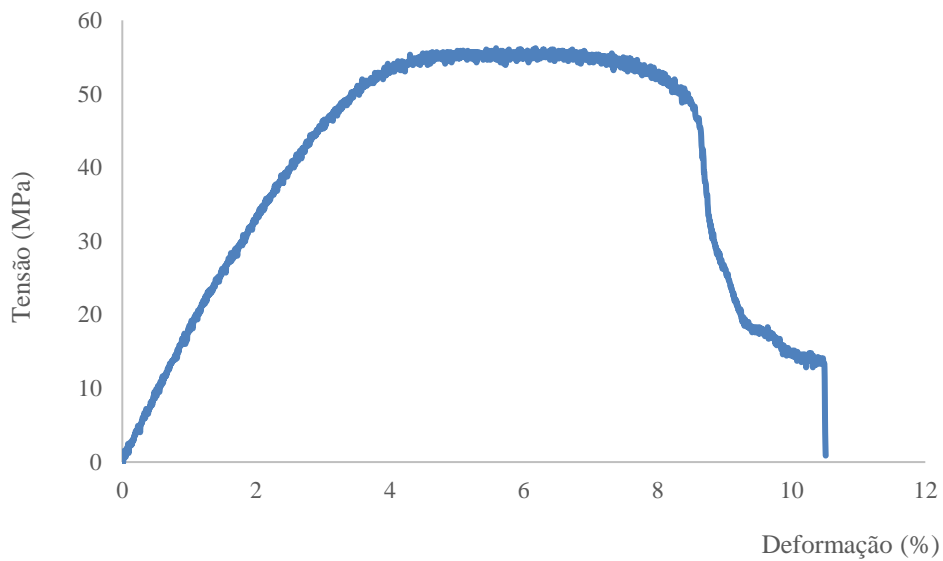
Começando pelos provetes de PETG, todos os provetes tiveram o mesmo comportamento. O gráfico 3 diz respeito à curva média dos ensaios que foram feitos em PETG. Depois da reta inicial existe um ponto máximo de tensão que é onde o material passa do regime elástico para o plástico. Obteve-se um valor médio relativo ao módulo de flexão de 1,93 GPa e um valor médio de tensão máxima de flexão de 76 MPa. A deformação média na tensão máxima de flexão é de 4,6%. Na fase final dos ensaios ocorreram oscilações (que foram cortadas no gráfico) que não são normais, isto deve-se ao facto de os provetes escorregarem da zona de apoio sem que chegassem a um ponto de rotura. Neste caso apenas se conseguiu retirar os valores de tensão máxima de flexão e a respetiva deformação nesse instante.



**Gráfico 3-** Curva média dos ensaios de flexão do PETG

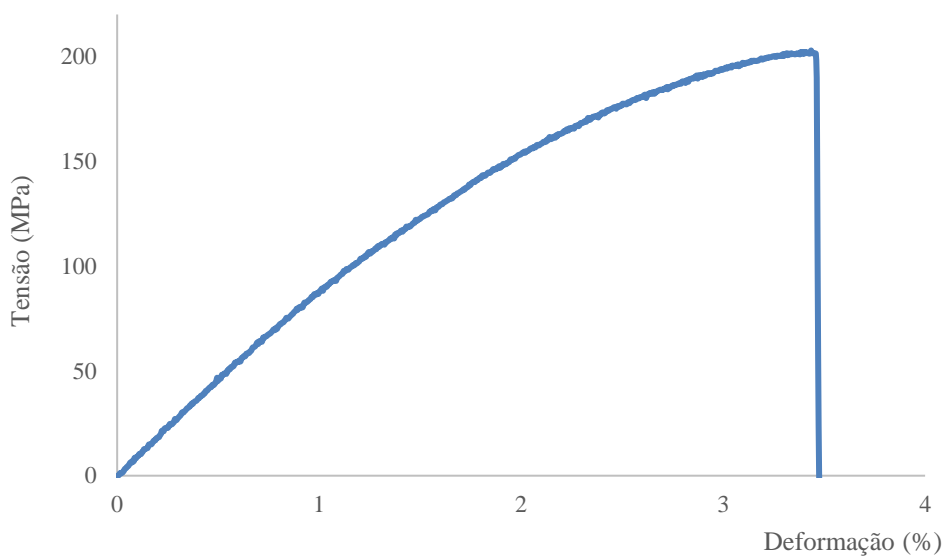
Repetiu-se o mesmo procedimento para os restantes materiais. A curva média obtida nos provetes de ASA foi um pouco diferente da do PETG (gráfico 4). Depois da reta inicial verificou-se um aumento da deformação sem que a tensão aumentasse, criando uma espécie de “planalto” no gráfico. Depois disso inicia-se a rotura até que o provete parte por completo. Neste caso, para além da tensão máxima de flexão conseguiu-se retirar também o valor de tensão na rotura uma vez que o material atingiu este estado.

Obteve-se um valor médio de módulo de flexão de 1,46 GPa, uma tensão máxima de flexão de 56 MPa com uma deformação de 6,2% e uma tensão de rotura de 47 MPa com uma deformação média de 8,6%.



**Gráfico 4-** Curva média dos ensaios de flexão do ASA

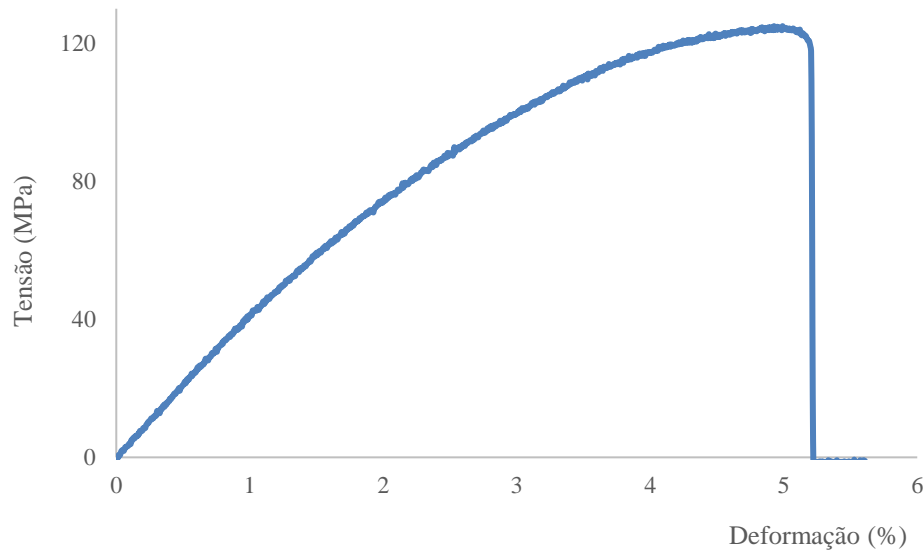
Os materiais compósitos apresentaram um comportamento diferente no que toca à resistência à flexão. Começando pela poliamida reforçada com 15% de fibra de carbono, verifica-se uma diferença notória face aos restantes materiais. Enquanto o PETG e o ASA apresentavam um comportamento dúctil, este é frágil. Por esta razão o material não chega a atingir uma zona plástica, passando logo para a rotura. No gráfico 5 está representada a curva média obtida nos ensaios de flexão deste material. Obteve-se um módulo de flexão de 7,64 GPa e uma tensão máxima de flexão de 201 MPa numa deformação de 3,3%. É um material que consegue suportar tensões mais elevadas sem que exista uma deformação considerável.



**Gráfico 5-** Curva média dos ensaios de flexão do PAHT CF15



Os últimos ensaios dizem respeito à poliamida carregada com 30% de fibra de vidro (gráfico 6). O seu comportamento é similar ao PAHT CF15 embora os ensaios revelem que o seu desempenho mecânico é menor. Registou-se um módulo de flexão médio de 3,63 GPa e uma tensão máxima de flexão de 122 MPa. A rotura dá-se precisamente neste ponto onde a deformação média é de 5,2%.



**Gráfico 6-** Curva média dos ensaios de flexão do PA6 GF30

Na tabela 9 estão representados os valores médios e os respetivos desvios padrão obtidos em todos os ensaios de flexão para que seja possível uma melhor comparação entre eles. O PETG e o ASA são materiais que apresentam um comportamento ductil, ao contrário dos materiais compostos que têm um comportamento frágil. O módulo de flexão mais elevado foi de 7,64 GPa, no PAHT CF15, superando o próprio material original cujo valor é de 4,48 GPa. O PETG e o ASA registaram os valores mais baixos, 1,93 GPa e 1,46 GPa respetivamente. O PA6 GF30 tem um módulo de flexão de 3,63 GPa. Mesmo sendo abaixo do valor do Ertalon® 66 GF30, é bastante próximo.

A tensão máxima de flexão do PETG é de 76 MPa, superior à do ASA que é de 56 MPa. A deformação na tensão máxima de flexão é de 4,5% e 6,2% respetivamente, o que significa que o PETG aguenta mais tensão com menor deformação. Passando a zona elástica o ASA acabou por atingir a rotura com uma tensão de 47 MPa a uma deformação de 8,6%. O PETG não atingiu a rotura durante o período de ensaios, sendo impossível calcular tensões de rotura e respetiva deformação. Dos materiais compósitos o PAHT CF15 registou uma tensão máxima de flexão de 201 MPa e o PA6 GF30 de 122 MPa.

O Ertalon® 66 GF30 tem uma resistência à flexão de 145 MPa, pelo que se pode concluir que, mais uma vez o PAHT CF15 é superior. O PA6 GF30 está abaixo do material original, ainda que relativamente próximo. Destaca-se também a deformação na rotura entre os dois materiais compósitos uma vez que o PAHT CF15 aguenta mais tensão e menor deformação do que o PA6 GF30.

**Tabela 9-** Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão

	<b>Ertalon® 66 GF30</b>	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
<b>Módulo de Flexão (GPa)</b>	<b>4,48</b>	<b>1,93</b> 0,06	<b>1,43</b> 0,05	<b>7,64</b> 0,27	<b>3,63</b> 0,30
<b>Tensão máxima de Flexão (MPa)</b>	<b>145</b>	<b>76</b> 1,69	<b>56</b> 1,75	<b>201</b> 5,50	<b>122</b> 7,77
<b>Deformação na Tensão máxima de Flexão (%)</b>	-	<b>4,6</b> 0,07	<b>6,2</b> 0,56	<b>3,3</b> 0,07	<b>5,2</b> 0,16
<b>Tensão de Rotura (MPa)</b>	<b>145</b>	-	<b>47</b> 3,75	<b>201</b> 5,50	<b>122</b> 7,77
<b>Deformação na Rotura (%)</b>	-	-	<b>8,6</b> 0,95	<b>3,3</b> 0,07	<b>5,2</b> 0,16

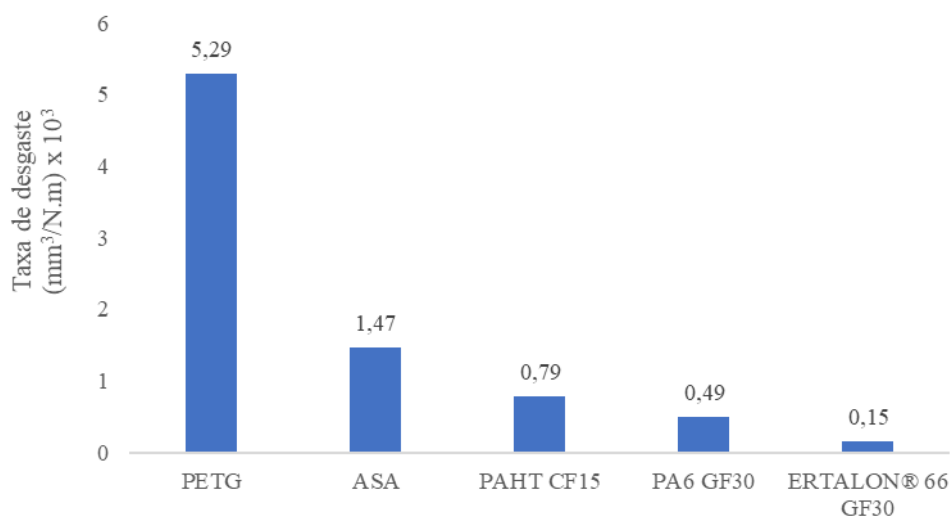
### **Ensaio de desgaste**

Ao realizar testes preliminares para determinar as condições dos ensaios de desgaste (velocidade de rotação, carga aplicada e distância percorrida) surgiram as primeiras evidências sobre a resistência ao desgaste dos diferentes materiais. No PETG e no ASA definiu-se como condições favoráveis para o ensaio uma velocidade de rotação de 200 rpm, uma distância de 50 m e uma carga de 20 N, uma vez que com este arranjo era possível criar um trilho de material desgastado considerável que fosse mensurável. Quando se aplicou as mesmas condições nos materiais compósitos a marca do pino deixada no provete era praticamente inexistente, o que impossibilitaria o cálculo do volume desgastado e, conseqüente, a taxa de desgaste. Mesmo sem um cálculo concreto percebeu-se que a taxa de desgaste nos materiais compósitos seria menor do que naqueles testados primeiramente. Para se conseguir um desgaste considerável aumentou-se a carga para 30 N, a velocidade de rotação para 350 rpm e a distância percorrida para 200 m.

No caso do provete feito no material original maquinado manteve-se 30 N de carga, uma velocidade de rotação para 350 rpm e a distância percorrida para 200 m.

No gráfico 7 estão representados os valores de taxa de desgaste calculados nos diferentes materiais. O PETG é o material que menos resistência tem ao desgaste, registrando o valor máximo de 5,29 ((mm<sup>3</sup>/(N.m)) x 10<sup>3</sup>). No ASA, que foi testado exatamente com as mesmas condições de ensaio, verificou-se uma redução da taxa de desgaste de 72%.

Tal como já se previa, os materiais compósitos registaram valores ainda menores, mesmo tendo sido alteradas as condições de ensaios para uma condição mais severa. Face ao PETG por exemplo, no PAHT e no PA6 GF30 registou-se um decréscimo da taxa de desgaste de 85% e de 90%, respetivamente. O PA6 GF30 foi o material com melhores resultados a nível de resistência ao desgaste. Comparando este material como material original, o Ertalon® 66 GF30, percebe-se que a taxa de desgaste é muito semelhante, embora o material original consiga, ainda assim, apresentar um melhor desempenho.



**Gráfico 7-** Resultados dos ensaios de desgaste

A tabela 10 contém os valores dos diferentes ensaios realizados de todos os materiais. Relativamente à tensão máxima de flexão destacam-se os materiais compósitos, sendo aqueles com valores de tensão máxima de flexão maiores, bem como o módulo de flexão.

**Tabela 10-** Resumo dos resultados obtidos em todos os ensaios mecânicos nos diferentes materiais

	<b>Ertalon® 66 GF30</b>	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
<b>Módulo de Flexão (GPa)</b>	4,48	1,93	1,43	7,64	3,63
<b>Tensão Máxima de Flexão (MPa)</b>	145	76	56	201	122
<b>Deformação na Tensão Máxima de Flexão (%)</b>	-	4,6	6,2	3,3	5,2
<b>Tensão de Rotura (MPa)</b>	-	-	47	201	122
<b>Deformação na Tensão de Rotura (%)</b>	-	-	8,6	3,3	5,2
<b>Resistência ao Impacto (kJ/m²) Charpy com entalhe</b>	6	3,36	12,22	6,56	12,22
<b>Dureza (Shore D)</b>	80	76,90	75,60	82,60	78,00
<b>Taxa de Desgaste ((mm³/N.m) x 10³)</b>	0,15	5,29	1,47	0,79	0,49

---

## Estudo dos materiais após ciclos de lavagem e secagem

---

Depois de realizados ensaios mecânicos aos materiais logo após a sua impressão optou-se por submeter provetes a ciclos de lavagem e secagem para perceber de que forma esta etapa afetava o desempenho mecânico dos materiais.

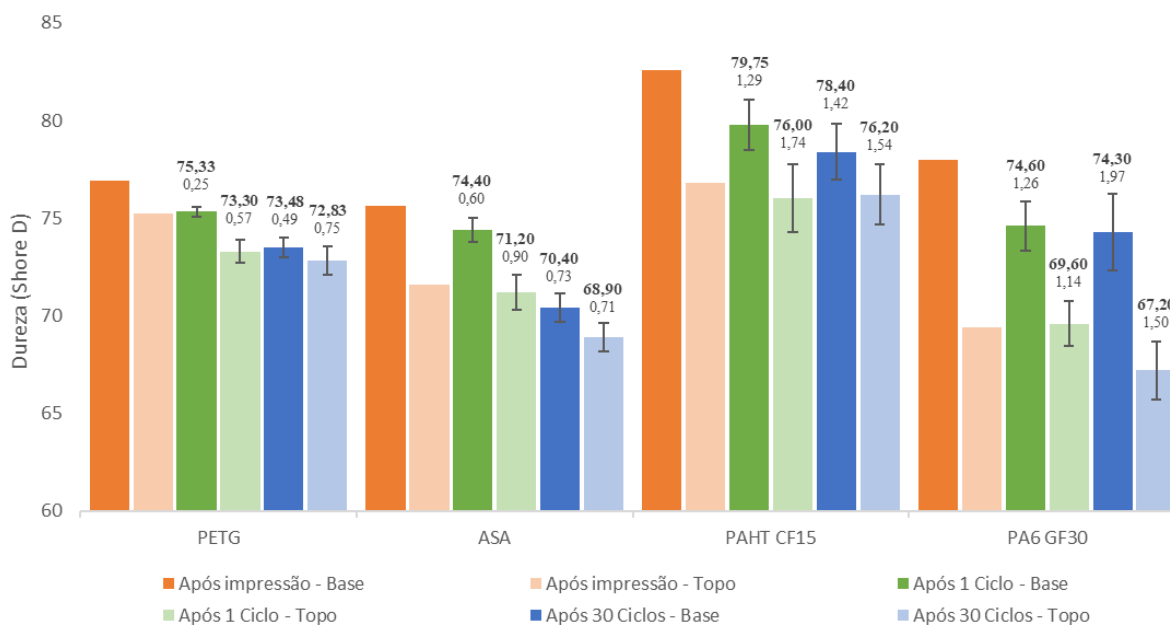
Primeiro os provetes foram submetidos um ciclo de lavagem e secagem para perceber se com apenas esse ciclo já era possível verificar alguma alteração nas propriedades mecânicas dos materiais. Depois aumentou-se o número de ciclos para trinta e voltou-se a realizar ensaios mecânicos.

### Ensaio de dureza

O procedimento para a medição da dureza foi o mesmo. O processo de lavagem e secagem revelou ter influência na dureza de todos os materiais. No gráfico 8 estão representados os valores de dureza medidos na base e no topo dos provetes após um e trinta ciclos de lavagem e secagem.

Analisando-se os resultados ao fim de um ciclo, o ASA foi o material onde se registou um decréscimo menor, na base do provete registou-se um decréscimo de 1,6% e no topo de 0,6%. O PETG teve um decréscimo semelhante, na base diminuiu 2% e no topo 2,6%. Nos materiais compósitos foi onde o impacto foi maior, possivelmente devido ao facto da matriz polimérica ser um nylon, material altamente higroscópico. No PAHT CF15 registou-se uma descida do valor de dureza na base de 3,5% e no topo o valor praticamente não se alterou. No PA6 GF30 a dureza na base reduziu 4,4% e no topo o valor também se manteve próximo do original.

Analisando o efeito de trinta ciclos de lavagem e secagem, comparativamente a um ciclo, verifica-se que a dureza no PETG continuou a baixar. Na base do provete baixou 2,5%, enquanto no topo a diferença foi menos de 1%. O ASA, que tinha sido o material menos afetado a nível de decréscimo da dureza quando submetido apenas a um ciclo, teve agora um decréscimo de 5,4% na base e 3,2% no topo do provete. Este é um dos casos em que se percebe que o aumento do número de ciclos pode influenciar as propriedades mecânicas dos materiais. No PAHT CF15 existe novamente uma diminuição na dureza medida na base de quase 2%. O PA6 GF30 após os 30 ciclos praticamente não alterou a dureza na base do provete, mas no topo voltou a descer 3,4%.



**Gráfico 8-** Resultados dos ensaios de dureza após os ciclos de lavagem e secagem

### Ensaio de impacto

Começando pela análise dos resultados dos ensaios de impacto após um ciclo de lavagem e secagem (gráfico 9), verificou-se no PETG um decréscimo no valor obtido em cerca de 10%. Uma vez que a diferença percentual é equivalente ao valor do desvio padrão não se deve concluir que existiu de facto uma diminuição na resistência ao impacto. O mesmo acontece com o ASA, onde o valor registado depois do ciclo de lavagem e secagem é até superior, mas tendo em conta o desvio, padrão pode-se afirmar que esta operação pouca influência teve nas propriedades do material.

Quando se avaliou a influência da operação de lavagem e secagem nas poliamidas reforçadas com fibras observou-se um fenómeno que não era esperado. Tanto na poliamida reforçada com fibras de carbono como naquela reforçada com fibras de vidro registou-se um aumento percentual considerável no que toca à resistência ao impacto. O PAHT CF15 aumentou o valor de resistência ao impacto em 89% e o PA6 GF30 em 67%.

Perante um comportamento do material, que não era esperado, equacionou-se voltar a repetir os ensaios e a aumentar o número de amostras testadas, mas olhando para o valor do desvio padrão relativo à resistência ao impacto, este era insignificante, não sendo, à partida, os ensaios ou o número de amostras uma possível fonte de erro. Procedeu-se então a uma pesquisa para perceber se existiam estudos neste âmbito.

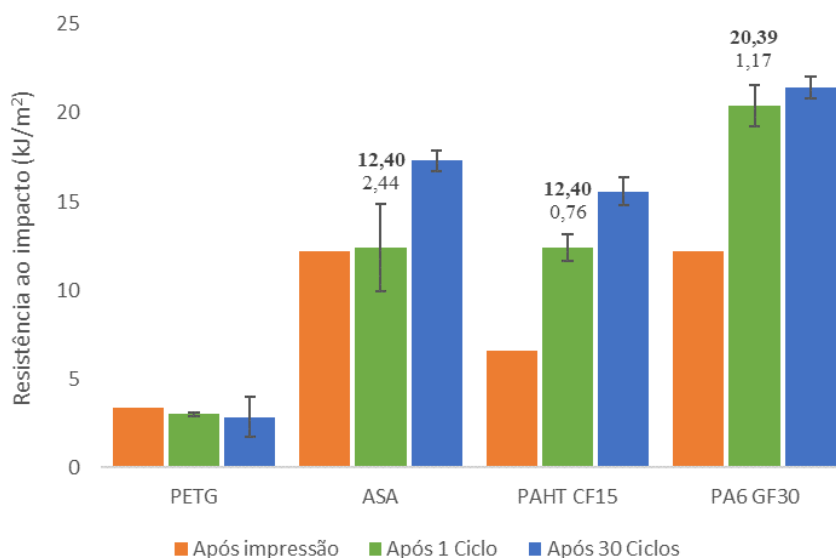
O nylon é um material altamente higroscópico e o fenómeno ocorrido pode ser explicado por esse motivo. A empresa G&M Gud Mould publicou um artigo [81] sobre a influência da absorção de água nas propriedades mecânicas da poliamida, sendo a PA6 e a PA66 aquelas onde a absorção

de água é significativamente maior face aos restantes materiais, como por exemplo PA612, PA11, PA12 e PA1212. Neste artigo afirma-se que a absorção de água afeta as propriedades mecânicas do material de forma diferente. Enquanto a dureza, o módulo de Young e a tensão de cedência à tração diminuem, a resistência ao impacto aumenta. Verificou-se também que a temperatura de transição vítrea diminui à medida que a absorção de água aumenta.

Noutro artigo publicado [82] por uma empresa da área dos materiais poliméricos o mesmo é referido sobre as alterações das propriedades mecânicas das poliamidas quando absorvem água. A temperatura de transição vítrea diminui 20°C ou até mais, a resistência e a rigidez diminuem, mas a resistência ao impacto e a tenacidade aumentam. A alteração nas propriedades depende da quantidade de água absorvida.

A.Pye [83] estudou as diferenças de propriedades da PA6 seco e com 50% de humidade relativa. Os valores publicados foram a resistência à tração, o módulo de flexão e a resistência ao impacto (Izod). Relativamente à resistência à flexão e ao módulo de flexão houve um decréscimo considerável, de 12 000 psi para 8000 psi (82 MPa para 55 MPa) e de 42 0000 psi para 180 000 psi (2,90 GPa para 1,24 GPa), respetivamente. Já a resistência ao impacto aumentou, passando de 1,0ft-lb/in para 3,0 (0,0534 kJ/m para 0,16 kJ/m).

Outros artigos [84, 85] foram lidos para fundamentar os resultados obtidos no procedimento experimental.



**Gráfico 9-** Resultados dos ensaios de impacto após os ciclos de lavagem e secagem

Com o aumento para trinta ciclos de lavagem a resistência ao impacto do PETG voltou a descer 6%. No ASA verificou-se um aumento de 40%. Ao contrário dos materiais compósitos que alteraram a sua resistência ao impacto quando sujeitos a apenas um ciclo, verificou-se que no ASA é preciso

um maior tempo de exposição à água para este fenómeno acontecer. Embora se tenha feita uma pesquisa na literatura sobre o aumento da resistência ao impacto do ASA após absorção de humidade, tal como se fez para as poliamidas, nenhum artigo foi encontrado sobre este material em específico. Nos materiais compósitos voltou a registar-se uma subida no valor de resistência ao impacto, embora menos acentuada. No PAHT CF15 houve um aumento de 26% e no PA6 GF30 de 5%.

### **Ensaio de flexão**

Após submissão dos provetes a um ciclo de lavagem e secagem registou-se um aumento do módulo de flexão e da tensão máxima de flexão em cerca de 10% e 7%, respetivamente. A deformação na tensão máxima de flexão foi praticamente a mesma, de 5,4%. Mais uma vez o provete escorregou dos apoios antes de se chegar a um episódio de rotura, não sendo possível obter valores nesse ponto. Embora se tenha verificado um aumento nas propriedades mecânicas do material, seriam necessários mais testes para retirar conclusões.

Nos provetes de ASA também houve um ligeiro aumento do módulo de flexão e da resistência à flexão. Até ao ponto de cedência todos os provetes tiveram um comportamento similar, mas o ponto de rotura foi diferente em todos os testes. O módulo de flexão aumentou 15% e a tensão máxima de flexão 10%. Mais uma vez, embora exista um aumento nos valores, seriam necessários mais ensaios para se poder retirar conclusões, não sendo correto assumir desde já que os ciclos de lavagem e secagem melhoram as propriedades de flexão do material. A rotura ocorreu, em média, com uma deformação de 12,5%, 30% superior aos provetes que não passaram por nenhum ciclo de lavagem e secagem.

Nas poliamidas foi onde se notou o impacto maior de apenas um ciclo de lavagem e secagem. Começando pelo PAHT CF15, a tensão máxima de flexão baixou 18%. A deformação na tensão de rotura manteve-se praticamente igual (3,6%). Houve também alterações no módulo de flexão que baixou 15%. A redução da tensão máxima de flexão no PA6 GF30 também foi notória. Sujeito a um ciclo de lavagem e secagem esta baixou 22,5% e a deformação manteve-se praticamente igual (6,7%). De todos os materiais este foi aquele cujo impacto de apenas um ciclo de lavagem e secagem foi maior no que toca à degradação das propriedades associadas à flexão.

Na tabela 11 estão representados os valores médios e os respetivos desvios padrão obtidos em todos os ensaios de flexão para que seja possível uma melhor comparação entre eles.

**Tabela 11-** Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão após um ciclo de lavagem e secagem

	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
<b>Módulo de Flexão</b> (GPa)	<b>2,16</b> 0,04	<b>1,71</b> 0,06	<b>6,48</b> 0,19	<b>2,57</b> 0,13
<b>Tensão máxima de Flexão</b> (MPa)	<b>82</b> 1,82	<b>64</b> 0,84	<b>171</b> 5,25	<b>95</b> 2,72
<b>Deformação na Tensão máxima de Flexão</b> (%)	<b>4,3</b> 0,13	<b>5,2</b> 0,71	<b>3,6</b> 0,17	<b>6,7</b> 0,24
<b>Tensão de Rotura</b> (MPa)	-	<b>38</b> 6,59	<b>171</b> 5,25	<b>95</b> 2,72
<b>Deformação na Rotura</b> (%)	-	<b>12,4</b> 1,93	<b>3,6</b> 0,17	<b>6,7</b> 0,24

Nos materiais PETG e ASA, quando sujeitos a apenas um ciclo de lavagem e secagem, destacou-se o aumento do módulo de flexão e da tensão máxima de flexão. O aumento do número de ciclos irá permitir perceber se o fenómeno se mantém, à semelhança da resistência ao impacto.

Após trinta ciclos o módulo de flexão do PETG desceu 26% face aos provetes submetidos a um ciclo, e 13% face aos provetes após impressão. O mesmo aconteceu com a tensão máxima de flexão que baixou 18% face aos provetes submetidos a um ciclo e 10% face aos provetes após impressão. A deformação na tensão de flexão subiu ligeiramente (gráfico 10).

O que aconteceu com o PETG repetiu-se com o ASA. Após um ciclo o módulo e a resistência à flexão aumentaram, mas com o aumento do número de ciclos o valor tendia a baixar. No caso do PETG apresenta valores inferiores ao valor original, o que não aconteceu no ASA. Após trinta ciclos estes valores baixaram, mas ainda assim ficaram acima dos valores originais. O módulo de flexão baixou 5% face aos provetes sujeitos a um ciclo, ainda assim 11% acima do valor registado nos provetes testados logo após impressão. O mesmo aconteceu com a tensão máxima de flexão que baixou 8,6% face aos provetes sujeitos a um ciclo, mas mesmo assim o valor ficou 4% acima do valor medido nos provetes testados logo após impressão. A deformação na tensão máxima de flexão e a tensão de rutura baixaram e a deformação na tensão de rutura foi próxima da registada anteriormente (gráfico 11).

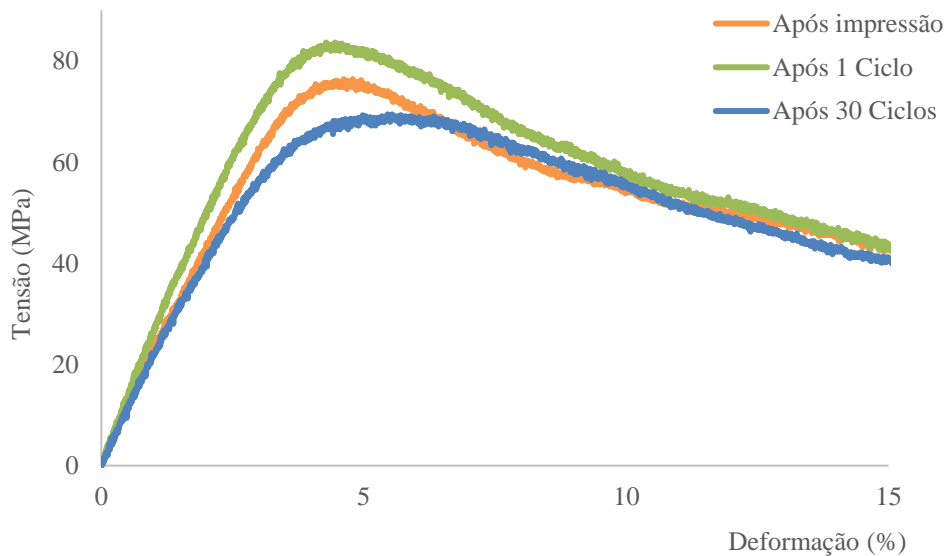
Passando para a análise dos materiais compósitos, o aumento de ciclos é claramente um fator crítico no que toca à flexão. No PAHT CF15 o módulo de flexão voltou a baixar 24% e a tensão máxima de flexão 16%. A deformação manteve-se semelhante aos valores registados anteriormente (gráfico 12). No PA6 GF30 observou-se de novo a diminuição do módulo de flexão e da tensão máxima de flexão. Para além disso, o material passou de um comportamento frágil para um comportamento mais dúctil, continuando a existir deformação após o ponto de tensão máxima, até à rotura (gráfico 13). O módulo de flexão voltou a baixar 24%, a resistência à flexão 20% e a deformação na tensão de flexão manteve-se igual. Como já foi dito, a rotura (56 MPa) aconteceu a



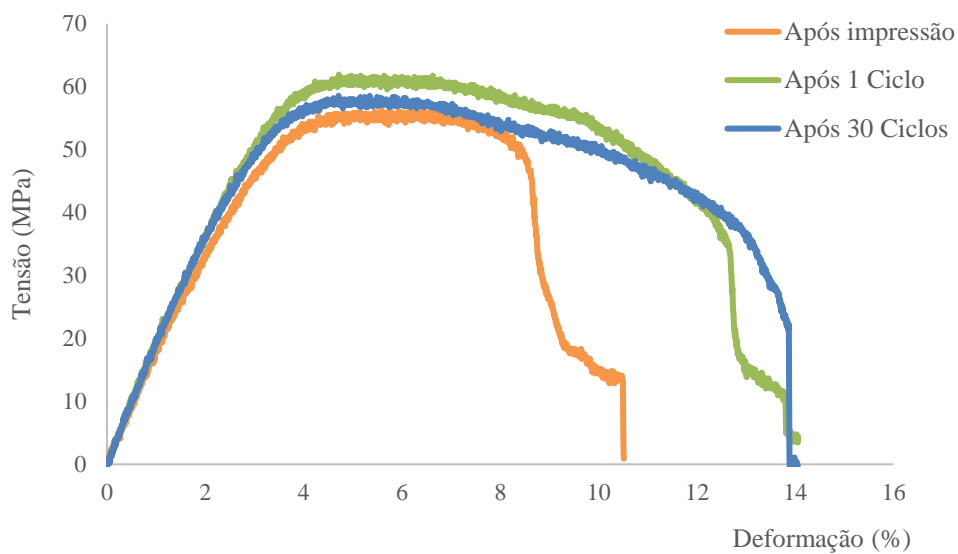
uma deformação superior (12,5%), o dobro da deformação registada nos provetes submetidos só a um ciclo (gráfico 13).

**Tabela 12-** Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de flexão após trinta ciclo de lavagem e secagem

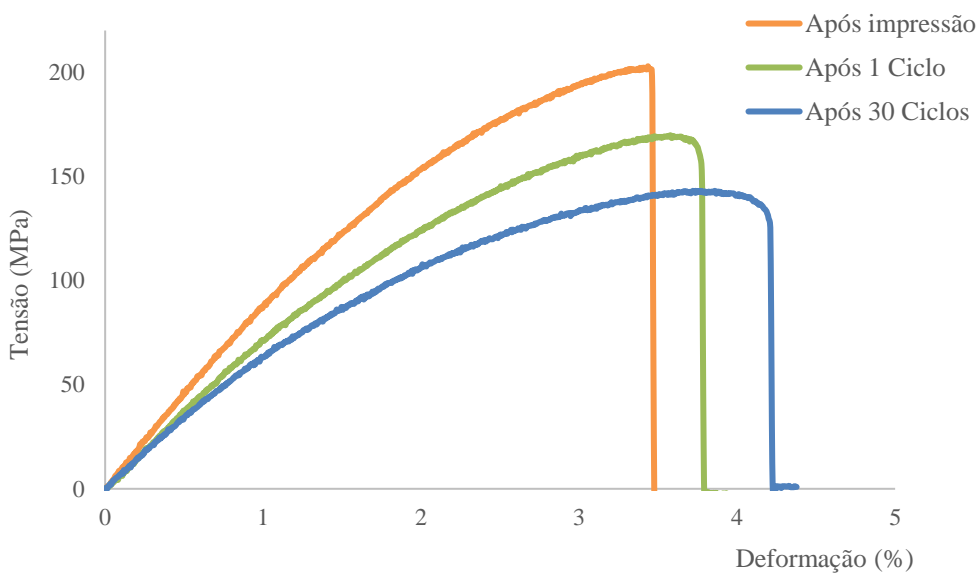
	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>	<b>PAHT CF15</b>	<b>PA6 GF30</b>
<b>Módulo de Flexão</b> (GPa)	<b>1,71</b> 0,03	<b>1,63</b> 0,07	<b>5,24</b> 0,51	<b>2,07</b> 0,66
<b>Tensão máxima de Flexão</b> (MPa)	<b>69</b> 0,59	<b>59</b> 1,56	<b>147</b> 6,74	<b>79</b> 2,24
<b>Deformação na Tensão máxima de Flexão</b> (%)	<b>5,4</b> 0,33	<b>4,7</b> 0,26	<b>3,8</b> 0,16	<b>6,9</b> 0,23
<b>Tensão de Rotura</b> (MPa)	-	<b>34</b> 4,30	<b>147</b> 6,74	<b>56</b> 3,46
<b>Deformação na Rotura</b> (%)	-	<b>12,0</b> 1,84	<b>3,8</b> 0,16	<b>12,5</b> 0,58



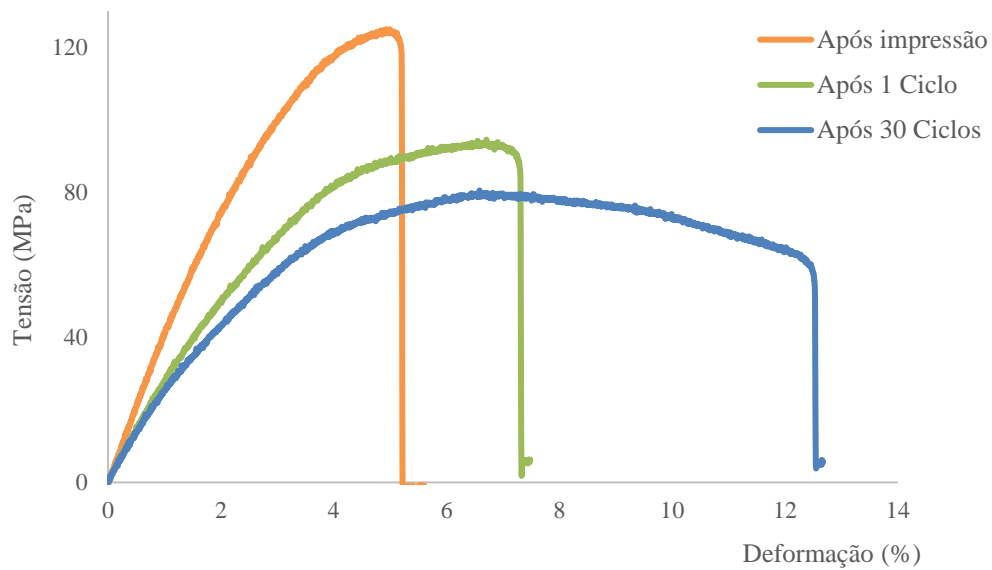
**Gráfico 10-** Curvas médias dos ensaios de flexão do PETG após os ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico 11-** Curvas médias dos ensaios de flexão do ASA após os ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico 12-** Curvas médias dos ensaios de flexão do PAHT CF15 após os ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico 13-** Curvas médias dos ensaios de flexão do PA6 GF30 após os ciclos de lavagem e secagem

### Ensaio de desgaste

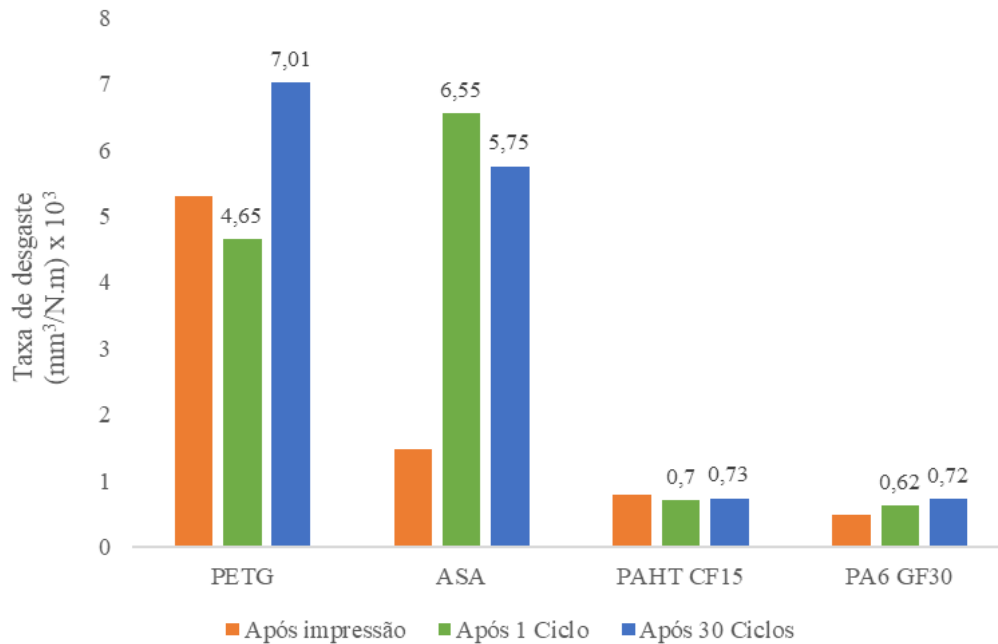
Depois de submetidos a um ciclo de lavagem e secagem voltou-se a analisar o desgaste nos respetivos provetes (gráfico 14). O único material onde se notou uma maior variação da taxa de desgaste foi no ASA, que passou de 1,47 ((mm<sup>3</sup>/(N.m)) x 10<sup>3</sup>) para 6,55, representando um aumento de 345%. Nos restantes materiais os resultados acabaram por ser inconclusivos. No PETG houve um ligeiro decréscimo da taxa de desgaste, embora nada se possa concluir relativamente a esse acontecimento uma vez que são diferenças muito reduzidas em termos percentuais. Nos filamentos compósitos os valores também foram bastante próximos, no PAHT CF15 passou de 0,79 para 0,70 e no PA6 de 0,49 para 0,62.

Após trinta ciclos de lavagem e secagem os resultados obtidos já permitiram retirar algumas conclusões relativamente esta operação. No PETG, mesmo tendo a taxa de desgaste diminuído quando foi feita a medição no provete submetido apenas a um ciclo, após trinta ciclos houve um aumento de 33% face à taxa de desgaste calculada nos provetes que não foram sujeitos a nenhum ciclo

No ASA o valor desceu comparativamente aos provetes sujeitos apenas a um ciclo, mas mesmo assim é notório o aumento da taxa de desgaste face aos provetes que não foram sujeitos a nenhum ciclo (290%). Nestes dois materiais pode-se concluir que o número de ciclos de lavagem e secagem influencia o aumento da taxa de desgaste.

Nos filamentos reforçados o impacto que os ciclos de lavagem e secagem representam na taxa de desgaste é reduzido. No caso do PAHT CF15 os valores mantêm-se praticamente constantes

podendo-se afirmar que, pelo menos para esta quantidade de ciclos, não existe um impacto na taxa de desgaste do material. No caso do PA6 GF30 os valores também se mantiveram bastante constantes, mas percebe-se que existe uma tendência para o aumento da taxa de desgaste com o aumento de número de ciclos.



**Gráfico 14-** Resultados dos ensaios de desgaste após os ciclos de lavagem e secagem

### 4.3.2 Efeito dos parâmetros de impressão

Caraterizados os diferentes materiais repetiram-se os ensaios, mas desta vez analisando a influência dos parâmetros de impressão apenas nas propriedades de flexão e de resistência ao impacto de cada material, logo após a sua impressão.

#### Ensaio de impacto

Realizaram-se os ensaios de impacto seguindo o mesmo método e procedimento dos ensaios realizado anteriormente. Nas tabelas 13, 14, 15 e 16 são apresentados os valores médios de resistência ao impacto para os quatro materiais.

Começando pelo PETG, o valor mais baixo de resistência ao impacto registado foi de 2,19 kJ/m² cujos provetes foram feitos com uma altura de camada de 0,3 mm, 3 paredes e 50% de

preenchimento. Mantendo o número de paredes e percentagem de enchimento, mas baixando a altura de camada para 0,2 mm o valor de resistência ao impacto aumentou para 2,44 kJ/m<sup>2</sup>. Depois de percebido o efeito da altura da camada nesta propriedade mecânica tentou-se compreender a influência dos outros dois parâmetros. Mantendo uma altura de camada de 0,2 mm, as 3 paredes e aumentando a percentagem de enchimento para 90% traduziu-se num aumento da resistência ao impacto para 2,90 kJ/m<sup>2</sup>, enquanto, se se mantiver as camadas a 0,2 mm, o preenchimento a 50% e mudar o número de paredes para 6, a resistência ao impacto registada é de 2,69 kJ/m<sup>2</sup>. Percebe-se então que, pelo menos no caso do PETG, o aumento do preenchimento é preferível face ao aumento do número de paredes no que toca à otimização da resistência ao impacto. A melhor combinação de parâmetros traduziu-se numa resistência ao impacto de 3,05 kJ/m<sup>2</sup> e corresponde ao ensaio onde foi usada uma altura de camada era de 0,2 mm e o máximo de paredes e preenchimento, neste caso, 3 e 90%, respetivamente.

**Tabela 13-** Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PETG

				Resistência ao impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	
				Média	D. Padrão
	Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill		
PETG	0,3	3	50	2,19	0,43
	0,3	6	50	2,26	0,56
	0,3	3	90	2,83	0,00
	0,3	6	90	2,61	0,54
	0,2	3	50	2,44	0,13
	0,2	6	50	2,69	0,07
	0,2	3	90	2,90	0,24
	0,2	6	90	3,05	0,12

À semelhança do que aconteceu no PETG, no ASA voltou a verificar-se que é preferível uma altura de camada de 0,2 mm. O resultado mais baixo registado foi de 6,66 kJ/m<sup>2</sup> e corresponde também aos provetes com menor número de paredes, menor percentagem de preenchimento e altura de camada de 0,3 mm. Mantendo esses parâmetros, mas alterando a altura de camada para 0,2 mm o valor de resistência ao impacto aumenta para 6,99 kJ/m<sup>2</sup>. Mantendo esta altura entre camadas e fazendo variar os restantes parâmetros verificou-se que, no caso deste material e em oposição ao que aconteceu com o PETG, é mais vantajoso apostar no aumento de número de paredes do que no aumento do preenchimento da peça. Aumentando o número de paredes o valor de resistência ao impacto chegou aos 21 kJ/m<sup>2</sup>, enquanto com o aumento do preenchimento da peça atingiu os 8,08 kJ/m<sup>2</sup>. Mais uma vez, o maior valor registado de resistência ao impacto (22,32 kJ/m<sup>2</sup>) corresponde aos provetes com altura de camada de 0,2 mm e o máximo de paredes e preenchimento (3 e 90%). É importante salientar que, em todos os ensaios onde se alterava apenas a altura de camada de 0,2 mm para 0,3 mm, existe uma diminuição da resistência ao impacto.

**Tabela 14-** Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do ASA

				<b>Resistência ao impacto</b> (kJ/m <sup>2</sup> )	
				Média	D. Padrão
	Altura da Camada	Nº Paredes	% <i>Infill</i>		
<b>ASA</b>	0,3	3	50	6,66	0,97
	0,3	6	50	20,11	0,97
	0,3	3	90	7,73	0,41
	0,3	6	90	19,75	0,43
	0,2	3	50	6,99	1,45
	0,2	6	50	21,00	0,78
	0,2	3	90	8,08	1,36
	0,2	6	90	22,32	0,72

Passando para a análise dos provetes feitos nos materiais compósitos, tanto o PAHT CF15 como o PA6 GF30 seguiram o mesmo padrão do ASA, ou seja, com o aumento da altura de camada para 0,3 mm a resistência ao impacto diminui e o aumento do número de paredes é o parâmetro que mais contribuía para o aumento desta propriedade. A combinação cuja resistência ao impacto foi maior foi aquela onde se combinou o maior número de paredes (3) com a maior percentagem de preenchimento (90%) e uma altura de camada de 0,2 mm.

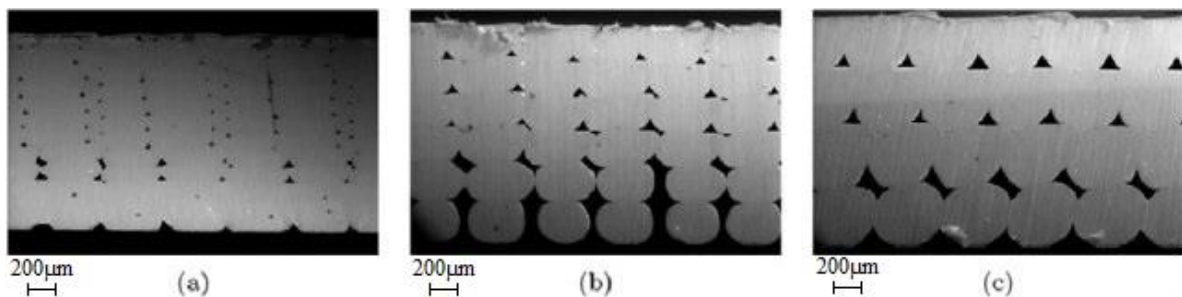
**Tabela 15-** Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PAHT CF15

				<b>Resistência ao impacto</b> (kJ/m <sup>2</sup> )	
				Média	D. Padrão
	Altura da Camada	Nº Paredes	% <i>Infill</i>		
<b>PAHT CF15</b>	0,3	3	50	9,04	0,51
	0,3	6	50	10,74	0,90
	0,3	3	90	9,64	0,72
	0,3	6	90	10,01	0,66
	0,2	3	50	10,42	0,77
	0,2	6	50	12,33	2,18
	0,2	3	90	11,69	0,84
	0,2	6	90	11,06	0,52

**Tabela 16-** Parâmetros de impressão e resistência ao impacto do PA6 GF30

	Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill	Resistência ao impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	
				Média	D. Padrão
<b>PA6 GF30</b>	0,3	3	50	17,30	0,79
	0,3	6	50	19,97	0,50
	0,3	3	90	17,80	1,29
	0,3	6	90	21,85	0,69
	0,2	3	50	17,34	0,69
	0,2	6	50	21,75	0,68
	0,2	3	90	19,44	0,39
	0,2	6	90	23,05	1,48

Fazendo uma síntese sobre a influência dos parâmetros de impressão na resistência ao impacto dos diferentes materiais, a altura de camada de 0,2 mm mostrou gerar melhores resultados em todos os materiais no que toca à resistência ao impacto. A diminuição da altura de camada resulta num aumento do número de camadas que são necessárias para fazer uma peça com a mesma altura em Z. Mais camadas com menos espessura contribui para uma melhor ligação entre camadas, promovendo uma secção mais homogénea [86], como é possível ver na figura 44 adaptada de um artigo científico. Além da altura de camada, o número de paredes foi o parâmetro que mais contribuiu para o aumento da resistência ao impacto. No caso do PETG verificou-se o oposto, o aumento da percentagem de preenchimento era preferível face ao aumento de número de paredes. Em todos os casos, aumentando ambas as variáveis melhora as propriedades de resistência ao impacto. O ensaio mede a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material. Sendo a secção mais densa, existe um aumento da área efetiva de secção, conseguindo-se resultados de resistência ao impacto mais favoráveis.



**Figura 44-** Análise microscópica da secção transversal de estruturas fabricadas em FDM com espessura total de 1,2 mm: (a) alturas de camada de 0,1 mm, (b) 0,2 mm e (c) 0,3 mm, adaptada de [86]

## **Ensaio de flexão**

Realizaram-se os ensaios de flexão seguindo o mesmo método e procedimento dos ensaios realizado anteriormente. Nas tabelas 17, 18, 19 e 20 são apresentados os valores médios de tensão máxima de flexão, módulo de flexão, deformação na tensão máxima de flexão, tensão de rutura e deformação na rutura, bem como os respectivos desvios padrões medidos em cada amostra, para os quatro materiais. Para efeitos de comparação começou-se por priorizar o módulo de flexão e a tensão máxima de flexão.

Analisando o primeiro material, o PETG, os maiores valores de módulo de flexão e tensão máxima de flexão foram registados nos provetes que tinham uma altura de camada de 0,2 mm, 3 paredes e 50% de preenchimento.

Mantendo os parâmetros e fazendo variar apenas a altura de camada para 0,3 mm verificou-se um aumento de ambas as propriedades medidas. O módulo de flexão subiu de 1,45 GPa para 1,68 GPa e a tensão máxima de flexão de flexão de 51,38 MPa para 59,89 MPa. Com esta variação da altura de camada e mantendo outros parâmetros percebe-se que, no caso dos ensaios de flexão, é preferível aumentar a altura de camada para 0,3 mm contrariamente ao que se concluiu nos ensaios de impacto. Fazendo variar agora o número de paredes e a percentagem de preenchimento para se perceber qual destes parâmetros tem mais influência nas propriedades de flexão do material, verificou-se que, no caso deste material, a diferença é pouco significativa, mas com aumento da percentagem de preenchimento existe um ligeiro aumento quando comparado ao aumento de número de paredes.

Os melhores resultados foram obtidos nos provetes com altura de camada de 0,3 mm, com 6 paredes e 90% de preenchimento. Relativamente a outros dados retirados dos ensaios, a deformação na tensão máxima de flexão e a deformação na tensão de rutura praticamente não se alteraram, e a tensão de rutura foi variando consoante os parâmetros utilizados. Esta variação aconteceu da mesma forma que variou a tensão máxima de flexão.



**Tabela 17-** Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PETG

PETG			Módulo de Flexão	Tensão máx. de Flexão	Deformação na Tensão Máx. de Flexão	Tensão de Rutura	Deformação na Rutura
Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill	GPa	MPa	%	MPa	%
0,3	3	50	<b>1,68</b> 0,03	<b>59,89</b> 0,30	<b>4,21</b> 0,24	<b>50,87</b> 5,00	<b>6,56</b> 1,40
0,3	6	50	<b>1,80</b> 0,06	<b>66,75</b> 1,21	<b>4,47</b> 0,14	<b>59,67</b> 1,50	<b>6,94</b> 0,41
0,3	3	90	<b>1,85</b> 0,03	<b>68,03</b> 1,02	<b>4,39</b> 0,18	<b>62,29</b> 0,54	<b>6,64</b> 0,25
0,3	6	90	<b>1,94</b> 0,05	<b>71,18</b> 0,81	<b>4,49</b> 0,17	<b>61,83</b> 1,14	<b>6,82</b> 0,19
0,2	3	50	<b>1,45</b> 0,02	<b>51,38</b> 0,71	<b>4,19</b> 0,29	<b>42,70</b> 2,82	<b>7,28</b> 0,09
0,2	6	50	<b>1,63</b> 0,03	<b>61,28</b> 0,63	<b>4,41</b> 0,33	<b>47,93</b> 1,54	<b>7,70</b> 0,87
0,2	3	90	<b>1,93</b> 0,04	<b>61,16</b> 1,23	<b>4,18</b> 0,19	<b>45,45</b> 5,40	<b>6,70</b> 0,71
0,2	6	90	<b>1,81</b> 0,03	<b>67,01</b> 1,17	<b>4,38</b> 0,12	<b>56,31</b> 0,84	<b>6,46</b> 0,14

O ASA teve um comportamento semelhante ao que se verificou no PETG. Ensaios onde a altura de camada era de 0,2 mm resultavam em valores menores de módulo de flexão e de tensão máxima de flexão quando comparado com uma altura de camada de 0,3 mm.

Entre aumentar o número de paredes e a percentagem de preenchimento verifica-se que é preferível aumentar o primeiro parâmetro, uma vez que a tensão máxima de flexão é superior em todos os casos, quando comparado apenas com o aumento de preenchimento. O valor de módulo de flexão também aumenta, embora que de uma forma pouco significativa. O aumento da percentagem de preenchimento está, no entanto, diretamente ligado ao aumento do módulo de flexão.

Os melhores resultados obtidos foram nos provetes com altura de camada de 0,3 mm, com 6 paredes e 90% de preenchimento. A influência dos parâmetros de impressão na tensão de rutura seguiu o mesmo princípio daquele que foi explicado para a tensão máxima de flexão, a deformação na tensão máxima de flexão manteve-se praticamente igual em todos os ensaios, bem como a deformação na tensão de rutura.

**Tabela 18-** Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do ASA

ASA			Módulo de Flexão GPa	Tensão máx. de Flexão MPa	Deformação na Tensão Máx. de Flexão %	Tensão de Rutura MPa	Deformação na Rutura %
Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill					
0,3	3	50	<b>1,41</b> 0,11	<b>41,81</b> 1,25	<b>4,39</b> 0,32	<b>39,32</b> 1,52	<b>4,94</b> 0,37
0,3	6	50	<b>1,66</b> 0,07	<b>48,04</b> 0,90	<b>4,39</b> 0,17	<b>44,58</b> 1,42	<b>5,04</b> 0,27
0,3	3	90	<b>1,70</b> 0,09	<b>46,58</b> 1,52	<b>4,03</b> 0,20	<b>41,96</b> 1,36	<b>4,84</b> 0,40
0,3	6	90	<b>1,80</b> 0,12	<b>53,44</b> 1,17	<b>4,36</b> 0,17	<b>50,02</b> 0,90	<b>5,10</b> 0,63
0,2	3	50	<b>1,42</b> 0,14	<b>38,06</b> 2,03	<b>3,92</b> 0,24	<b>33,55</b> 2,07	<b>4,51</b> 0,38
0,2	6	50	<b>1,56</b> 0,08	<b>46,84</b> 1,67	<b>4,16</b> 0,22	<b>43,80</b> 0,71	<b>5,17</b> 0,45
0,2	3	90	<b>1,63</b> 0,06	<b>42,68</b> 1,62	<b>3,41</b> 0,19	<b>40,39</b> 2,44	<b>3,72</b> 0,23
0,2	6	90	<b>1,75</b> 0,04	<b>50,85</b> 1,36	<b>3,89</b> 0,14	<b>47,07</b> 3,81	<b>4,19</b> 0,27

Passando agora para a análise dos materiais compósitos, estes tiveram o mesmo comportamento entre si, mas obtiveram-se resultados diferentes daqueles que foram obtidos com o PETG e com o ASA. Enquanto nos polímeros foi notório um melhor desempenho à flexão nos provetes que foram fabricados com 0,3 mm de altura de camada, o mesmo não se verificou nos materiais compósitos. Nestes obteve-se melhores resultados de módulo de flexão e tensão máxima de flexão nos provetes com altura de camada mais baixa.

Entre aumentar o número de paredes e a percentagem de preenchimento voltou-se a verificar que o aumento de paredes é preferível, uma vez que o aumento do módulo de flexão e da tensão máxima de flexão é maior quando comparando com os provetes em que se manteve o número de paredes e apenas se aumentou a percentagem de preenchimento.

Os melhores resultados obtidos foram nos provetes com altura de camada de 0,2 mm, 6 paredes e 90% de preenchimento. Mais uma vez, a influência dos parâmetros de impressão na tensão de rutura seguiu o mesmo princípio daquele que foi explicado para a tensão máxima de flexão. A deformação na tensão máxima de flexão manteve-se praticamente igual em todos os ensaios, bem como a deformação na tensão de rutura.

**Tabela 19-** Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PAHT CF15

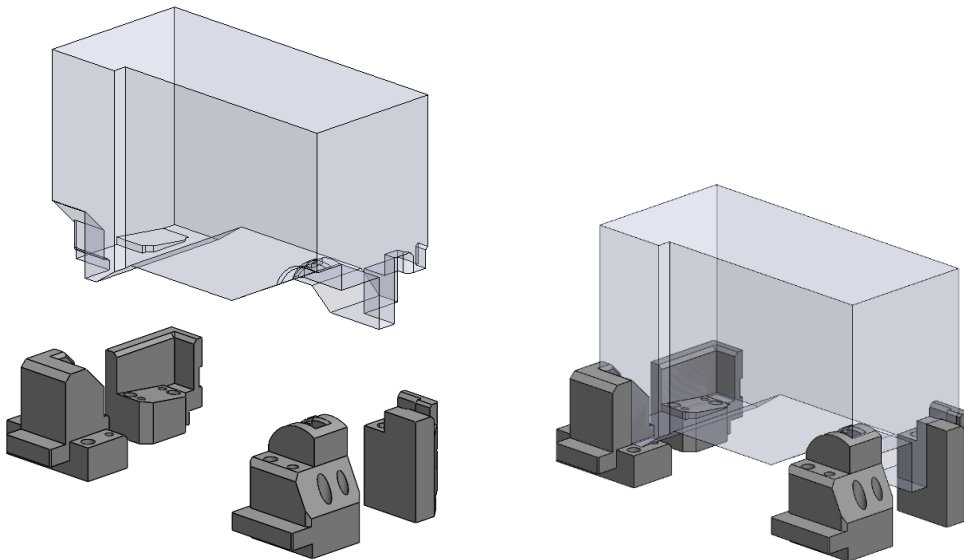
PAHT CF15			Módulo de Flexão GPa	Tensão máx. de Flexão MPa	Deformação na Tensão Máx. de Flexão %	Tensão de Rutura MPa	Deformação na Rutura %
Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill					
0,3	3	50	<b>3,98</b>	<b>97,61</b>	<b>4,61</b>	<b>88,94</b>	<b>6,44</b>
			0,12	1,47	0,32	0,88	0,20
0,3	6	50	<b>4,57</b>	<b>117,38</b>	<b>5,52</b>	<b>109,39</b>	<b>6,66</b>
			0,19	1,16	0,41	2,08	0,36
0,3	3	90	<b>4,48</b>	<b>115,95</b>	<b>5,24</b>	<b>107,29</b>	<b>6,30</b>
			0,22	2,26	0,55	2,22	0,67
0,3	6	90	<b>5,52</b>	<b>131,89</b>	<b>4,29</b>	<b>122,94</b>	<b>5,12</b>
			0,46	9,17	0,26	9,86	0,74
0,2	3	50	<b>4,04</b>	<b>98,36</b>	<b>4,92</b>	<b>85,80</b>	<b>5,99</b>
			0,08	1,28	0,30	5,53	0,24
0,2	6	50	<b>5,38</b>	<b>131,85</b>	<b>4,52</b>	<b>121,29</b>	<b>5,53</b>
			0,15	1,50	0,31	2,12	0,34
0,2	3	90	<b>5,14</b>	<b>129,00</b>	<b>4,39</b>	<b>120,19</b>	<b>5,08</b>
			0,31	4,58	0,28	3,42	0,45
0,2	6	90	<b>6,32</b>	<b>156,75</b>	<b>4,34</b>	<b>142,31</b>	<b>4,99</b>
			0,22	5,67	0,17	6,07	0,23

**Tabela 20-** Parâmetros de impressão e propriedades de flexão do PA6 GF30

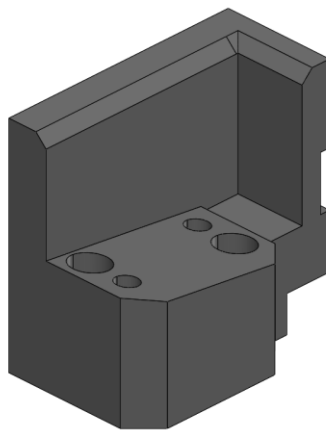
PA6 GF30			Módulo de Flexão GPa	Tensão máx. de Flexão MPa	Deformação na Tensão Máx. de Flexão %	Tensão de Rutura MPa	Deformação na Rutura %
Altura da Camada	Nº Paredes	% Infill					
0,3	3	50	<b>1,90</b>	<b>56,03</b>	<b>6,34</b>	<b>39,92</b>	<b>10,33</b>
			0,09	0,82	0,36	3,60	0,72
0,3	6	50	<b>2,29</b>	<b>65,66</b>	<b>6,50</b>	<b>48,99</b>	<b>11,03</b>
			0,08	1,27	0,08	1,43	0,99
0,3	3	90	<b>1,99</b>	<b>59,36</b>	<b>6,71</b>	<b>50,73</b>	<b>9,77</b>
			0,08	1,41	0,15	3,99	0,52
0,3	6	90	<b>2,27</b>	<b>65,25</b>	<b>6,47</b>	<b>52,07</b>	<b>9,98</b>
			0,09	1,72	0,26	2,11	0,67
0,2	3	50	<b>1,99</b>	<b>57,11</b>	<b>6,37</b>	<b>43,13</b>	<b>10,57</b>
			0,05	0,63	0,24	6,01	0,94
0,2	6	50	<b>2,82</b>	<b>79,91</b>	<b>6,33</b>	<b>65,26</b>	<b>10,05</b>
			0,21	1,80	0,08	5,94	0,87
0,2	3	90	<b>2,23</b>	<b>74,25</b>	<b>6,93</b>	<b>68,41</b>	<b>9,94</b>
			0,19	2,80	0,13	2,42	0,38
0,2	6	90	<b>2,80</b>	<b>86,33</b>	<b>6,58</b>	<b>65,32</b>	<b>10,10</b>
			0,10	1,19	0,27	5,64	1,50

### 4.3.3 Impressão e teste da peça caso de estudo

Os ensaios realizados e apresentados até aqui foram feitos com recurso a provetes e seguindo normas *standard* definidas para cada tipo de ensaios. Este capítulo foca-se na realização de testes nos diferentes materiais, mas desta vez recorrendo à impressão das peças em estudo e submetendo-as às condições reais de uso durante um determinado período de tempo. No ponto 3.2, onde se apresentou o problema a ser estudado, explicou-se que o sistema de transporte da peça em alumínio entre as diferentes operações de fabrico era composto por quatro peças poliméricas com diferentes geometrias (figura 45). Para facilitar o estudo das peças em contexto real, focou-se apenas numa das referências, sendo a peça escolhida aquela que, das quatro peças do conjunto, se desgasta mais precocemente (figura 46).



**Figura 45-** Exemplificação do movimento de inserção da peça de alumínio na paleta de transporte



**Figura 46-** Modelo 3D da peça em estudo

## **a) Seleção dos parâmetros e estratégias de impressão**

Para a impressão das peças reais foram tidos em conta alguns fatores que poderiam influenciar o desempenho final da peça. O estudo dos parâmetros de impressão realizado no ponto 4.4 foi uma ajuda para definir a altura de camada, número de paredes e percentagem de preenchimento com que cada peça iria ser produzida, mas teve-se também em atenção outros parâmetros ou estratégias de impressão que se sabe, através da literatura, serem fundamentais para melhorar o desempenho mecânico de peças produzidas por FFF. Uma dessas estratégias é, por exemplo, o posicionamento e a orientação do modelo na mesa de impressão.

### **Altura de camada**

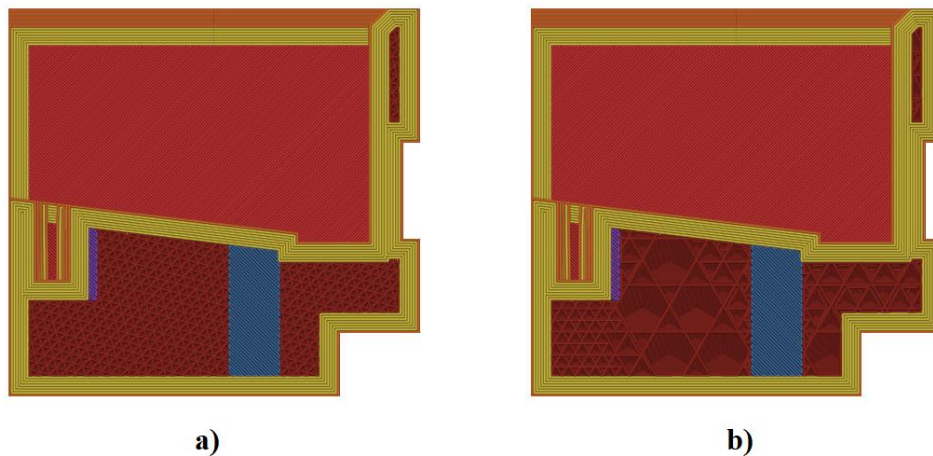
A altura de camada foi um dos parâmetros selecionados através dos resultados dos ensaios realizados. Verificou-se que, em todos os materiais a resistência ao impacto era superior nos provetes feitos com 0,2 mm de altura de camada. Nos testes à flexão, apenas no PETG e no ASA se verificou que os valores de tensão máxima de flexão eram superiores com alturas de camada de 0,3 mm. Uma vez que se acha mais importante a performance dos materiais no que toca à resistência ao impacto face à resistência à flexão, optou-se por produzir todas as peças com altura de camada de 0,2 mm.

### **Percentagem e tipo de preenchimento**

A escolha do preenchimento foi também baseada nos resultados dos ensaios. A geometria do preenchimento é triangular uma vez que, segundo a literatura, é aquela que mais se adequa para alavancagem das propriedades mecânicas das peças produzidas por FFF. Pelos ensaios verificou-se que as propriedades mecânicas melhoram com o aumento da percentagem de preenchimento. Assim sendo optou-se por usar o tipo de preenchimento “*Cubic Sub-Division*” ou “*Adaptive Cubic*”, conforme o *slicer* utilizado, com uma percentagem de 90%. Este tipo de preenchimento mantém a estrutura cubica com uma densidade dependente da distância até à parede mais próxima. Isto permite manter o preenchimento em zonas consideradas críticas e diminuir o mesmo em zonas internas onde não é tão necessário existir uma elevada percentagem de massa. A peça terá um preenchimento mais denso na parte superior, parte inferior e nas paredes laterais, mas terá densidade menor perto do centro do volume (figura 47). Isto permite baixar o tempo de impressão e o material gasto sem comprometer as propriedades mecânicas das peças.

### **Número de paredes**

Os ensaios realizados demonstraram que o aumento do número de paredes afeta significativamente a resistência ao impacto e as propriedades de flexão em todos os materiais. Definiu-se para o fabrico das peças oito paredes.



**Figura 47-** Diferença entre tipos de preenchimento **a)** Cubic normal; **b)** Cubic Sub-Division.

### **Número de camadas de base/topo**

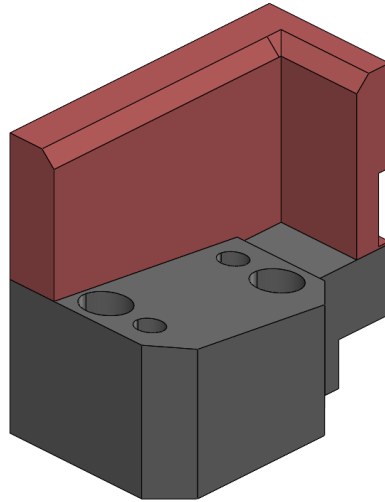
Relativamente ao número de camadas sólidas de base e topo definiram-se sete. Com uma altura de camada de 0,2 mm garante-se uma “casca” inferior e superior de 1,4 mm.

### **Posicionamento e orientação da peça**

O posicionamento da peça na mesa de impressão é um fator que influencia bastante o desempenho das peças impressas. Quando se fala de propriedades mecânicas de peças fabricadas aditivamente, especialmente na tecnologia FFF, é inevitável não falar da anisotropia característica destes processos. No sentido das camadas de construção, ou seja, na direção do eixo Z, existe um decréscimo acentuado das propriedades mecânicas do material. Assim sendo, quando se imprime uma peça para uma determinada aplicação é necessário perceber a que tipo de esforços esta vai estar sujeita e em que direções. Só desta forma se consegue determinar qual a melhor forma de posicionar a peça na área de impressão de maneira a evitar esforços em direções e sentidos críticos.

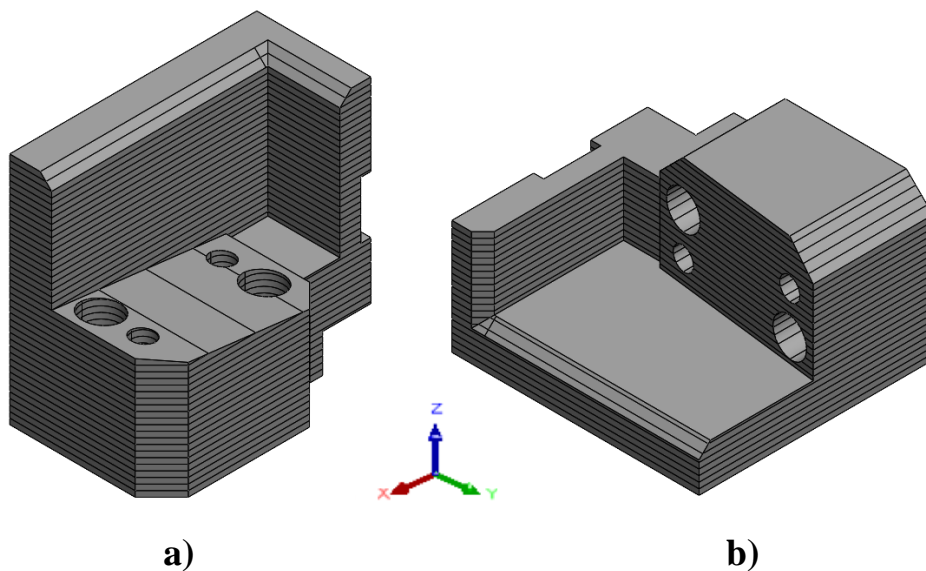
Na figura 45 foi possível perceber o movimento de inserção da peça de alumínio que é transportada entre operações na respetiva palete de transporte.

Sendo o movimento de posicionamento feito por um robô pode não haver problemas em termos de fragilidade das peças uma vez que o movimento é lento e preciso. O mesmo não acontece caso sejam etapas realizados por operadores. Como o ser humano não garante sempre a mesma força e precisão de posicionamento é normal que exista uma criticidade no que toca aos choques entre a peça em alumínio e a peça polimérica, especialmente nas paredes assinaladas a vermelho na figura 48.



**Figura 48-** Zonas críticas de impacto, assinaladas a vermelho

Se a peça fosse impressa com a mesma orientação com a qual vai ser utilizada existiria mais probabilidade de esta partir. Isto porque a força aplicada seria paralela ao sentido das camadas de construção, e por isso, a peça pode partir devido à separação entre camadas. (figura 49-a). Optou-se por imprimir a peça noutra orientação, como está representado na figura 49-b). Nesta configuração acredita-se melhorar a resistência das zonas definidas como críticas uma vez que a força aplicada passa a ser perpendicular ao sentido das camadas pelo menos numa das paredes da peça. Além disso é possível garantir uma melhor definição na face de encosto da peça metálica.



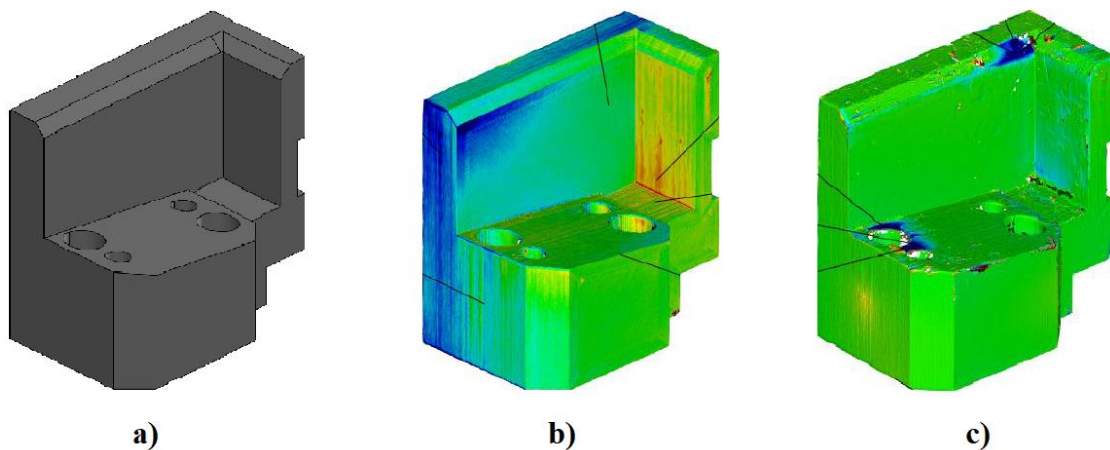
**Figura 49-** Representação das camadas de impressão **a)** segundo a orientação original da peça; **b)** numa orientação considerada ideal.

## b) Medição do desgaste em contexto de uso real

Para aferir o desgaste sofrido pelas peças em contexto de uso real optou-se por montar as peças impressas em diferentes paletes na linha de produção e mantê-las em serviço durante um mês. Este estudo de desgaste foi feito através de controlo dimensional, recorrendo ao mesmo sistema de digitalização que foi utilizado para calcular o volume desgastado nos provetes de desgaste, apresentado no ponto 4.2.2

A estratégia definida para medir o desgaste consistiu em estabelecer como referência a peça obtida por FFF. Tal opção é justificada pelos desvios dimensionais e geométricos existentes entre a peça real e o modelo virtual, decorrentes do processo de fabrico.

Assim sendo, primeiro fez-se a digitalização das peças antes de estas serem colocadas na linha de produção para obter uma malha com as dimensões reais da peça. Quando comparada com o modelo digital nominal é possível calcular os desvios provenientes do processo FFF. Após um mês de utilização as peças foram retiradas da linha, digitalizadas novamente e comparadas com a malha correspondente às dimensões reais da peça. Desta forma, todos os desvios apresentados dizem respeito ao desgaste sofrido durante o período de uso das peças (figura 50).



**Figura 50-** Sequência de operações para medição de desgaste **a)** modelo CAD; **b)** malha da peça impressa em comparação com o modelo CAD; **c)** malha da peça após utilização em comparação com a malha da peça original

### 4.3.3.1 Análise dos desvios dimensionais

Através do gráfico de cores gerado retiraram-se alguns pontos de prova por toda a peça. Nas peças em PETG e ASA os desvios mais elevados andavam na ordem dos 0,2 mm (figura 51 e 52). Já nas peças feitas nos materiais compósitos os desvios são maiores. A presença de fibras nas poliamidas gera um material mais rugoso e, conseqüentemente, diminui a precisão das peças produzidas. No PAHT CF15 o desvio máximo registado ronda os 0,35 mm (figura 53) e no PA6 GF30 o desvio



máximo chegou aos 0,8 mm em algumas zonas (figura 54). Acredita-se que a percentagem de fibras presentes no polímero base possa ter influência no estado da superfície da peça, e, conseqüentemente, no rigor dimensional da mesma.

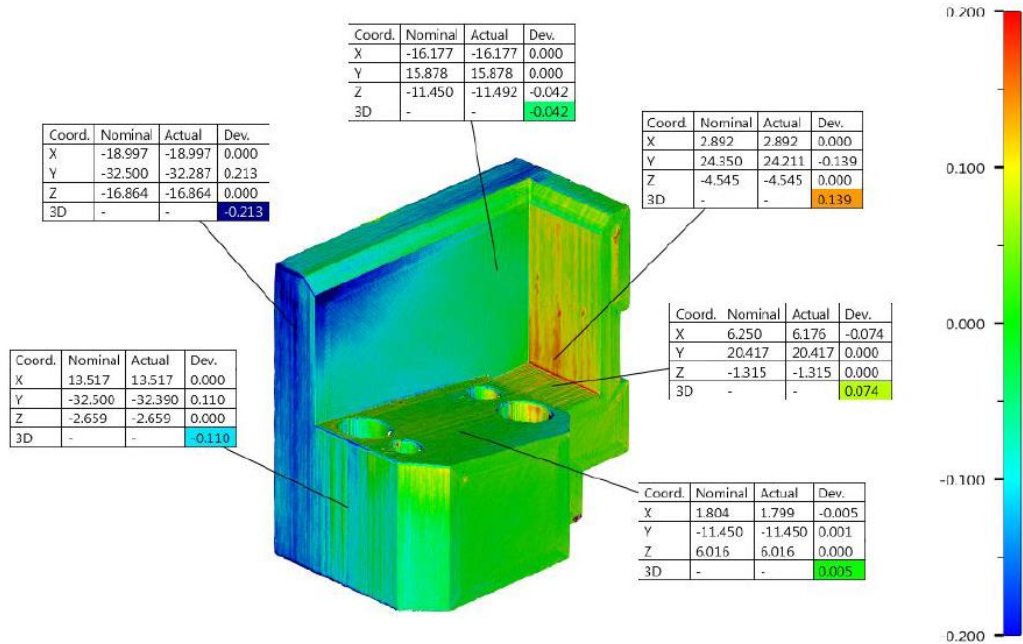


Figura 51- Controlo dimensional da peça em PETG

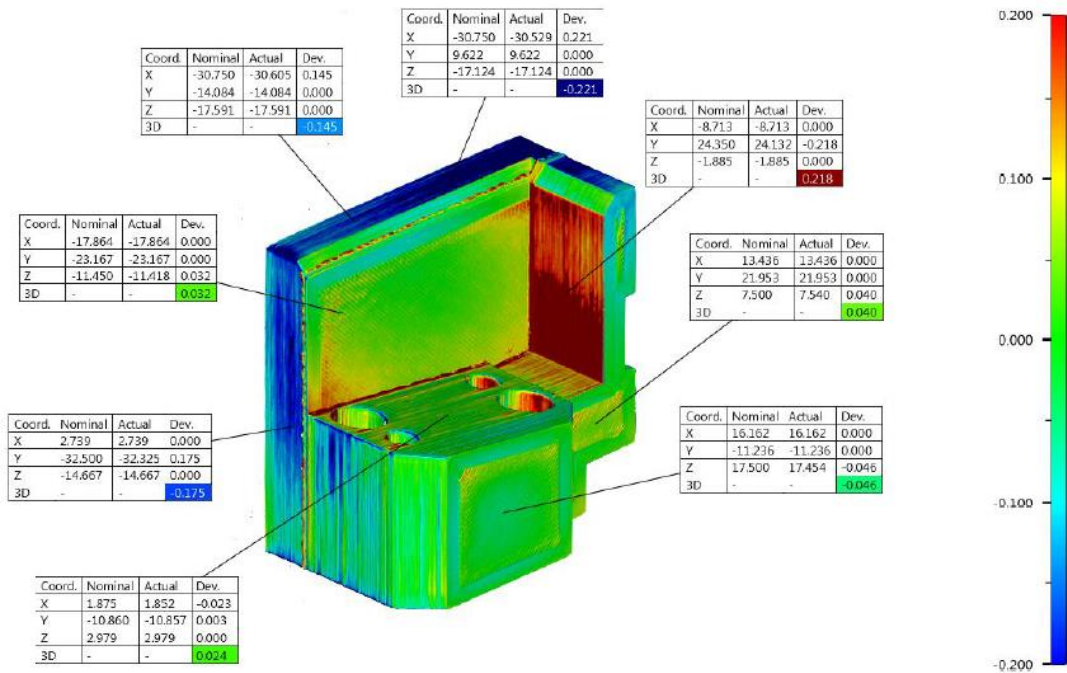


Figura 52- Controlo dimensional da peça em ASA

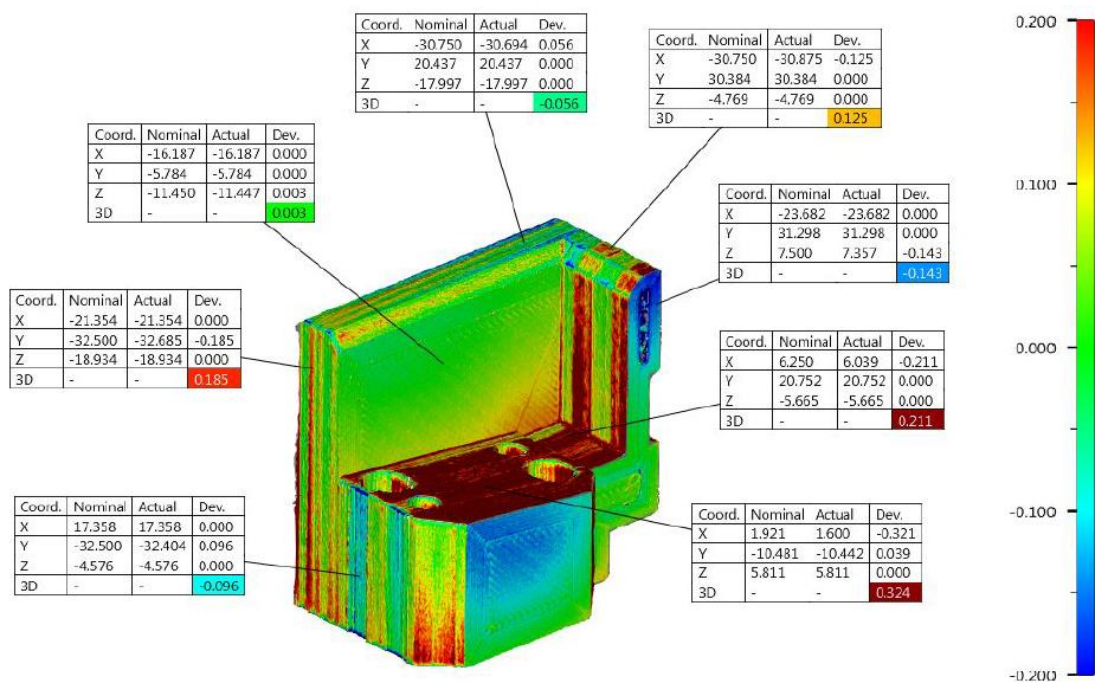


Figura 53- Controlo dimensional da peça em PAHT CF15

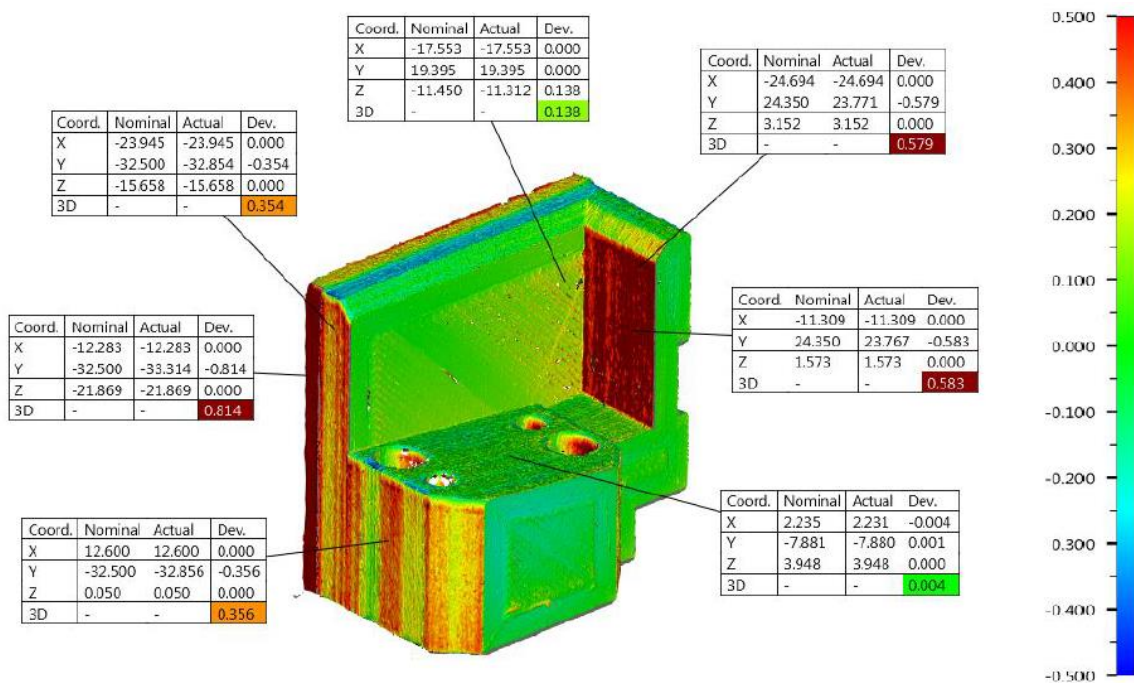


Figura 54- Controlo dimensional da peça em PA6 GF30

Após a digitalização das peças estas foram devidamente identificadas para que fosse possível a sua rastreabilidade (figura 55) e montadas nas paletes.



**Figura 55-** Peças fabricadas nos diferentes materiais e devidamente identificadas

#### 4.3.3.2 Análise do desgaste em contexto de uso real

Após um mês de utilização retiraram-se as peças da linha de produção. Nas figuras 56 a 59 é possível ver o estado de degradação das peças depois desse período.



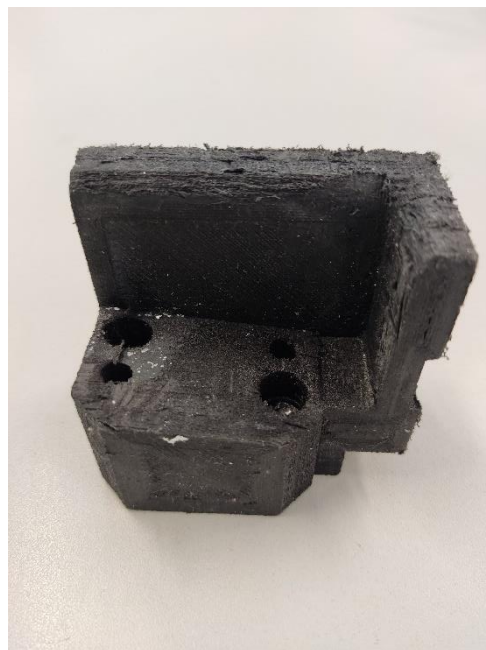
**Figura 56-** Peça em PETG após um mês de utilização



**Figura 57-** Peça em ASA após um mês de utilização



**Figura 58-** Peça em PAHT CF15 após um mês de utilização



**Figura 59-** Peça em PA6 GF30 após um mês de utilização

Nas figuras 60 a 63 estão representados sob a forma de gráficos de cores o desgaste das peças nos diferentes materiais. Segundo a escala de cores percebe-se que as zonas exibidas a azul foi onde houve uma significativa remoção de material resultante do movimento de colocação e extração da peça metálica na paleta de transporte. Nessas zonas foram retirados alguns pontos de prova para se poder quantificar o desgaste.

Na peça em PETG o desgaste registado variou entre os 0,6 mm e os 0,8 mm e as zonas mais críticas foram a zona do chanfro e a zona junto aos furos, onde a peça assenta.

Na peça em ASA registaram-se desvios maiores, entre 0,7 mm e 1,2 mm, e percebe-se que houve um aumento da área desgastada. Mesmo assim a zona crítica continua a ser a área do chanfro e a zona dos furos. As zonas assinaladas a amarelo ou vermelho representam desvios positivos, ou seja, são zonas onde supostamente houve um acréscimo de material. Isto acontece devido ao acumular de pequenos detritos em certas zonas da peça como por exemplo limalhas e outro tipo de sujidade.

Nos materiais compósitos verificou-se que a zona afetada é a mesma (zona do chanfro e dos furos) com desvios entre os 0,5 mm e os 0,9 mm. Especialmente no caso da peça feita em PA6 GF30 houve também desgaste numa das paredes da peça que faz o guiamento da entrada da peça metálica, como é possível ver pela figura 63.

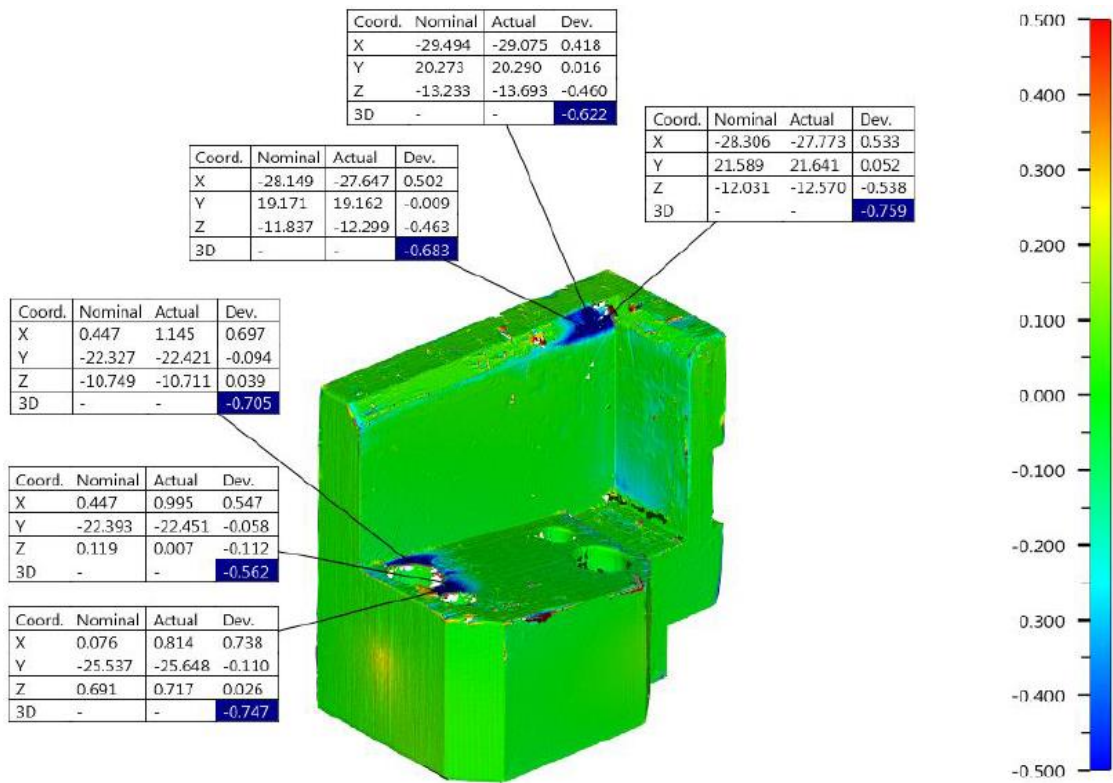


Figura 60- Análise de desgaste na peça em PETG

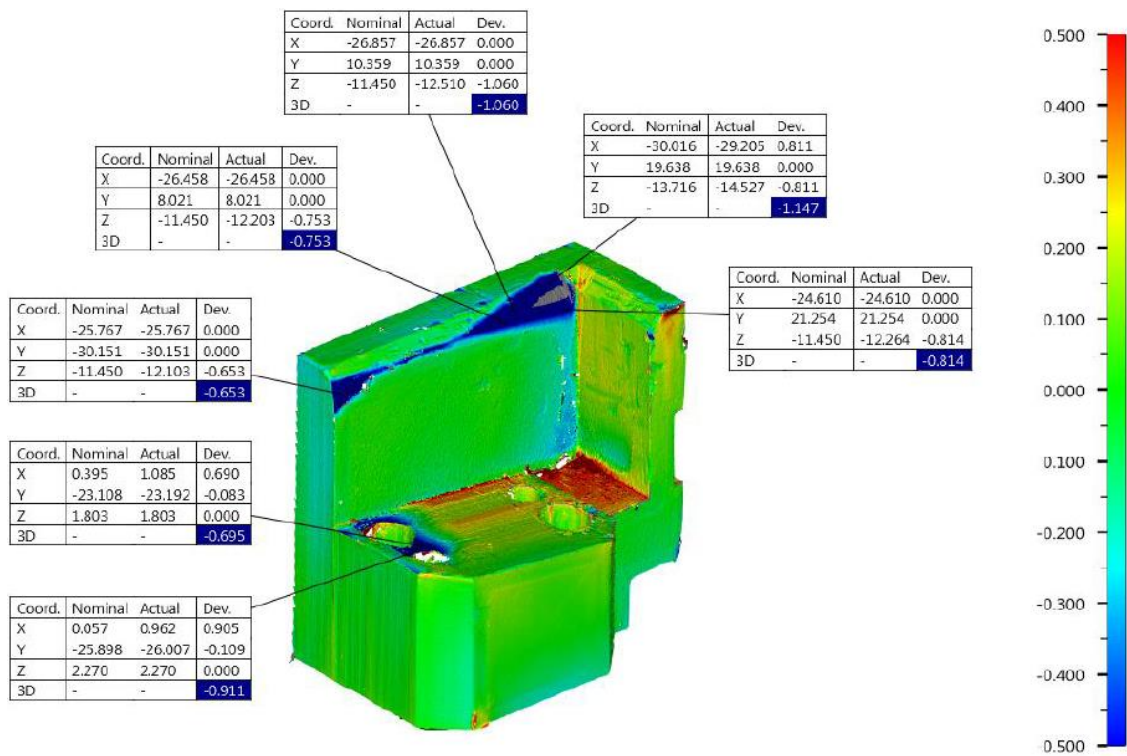


Figura 61- Análise de desgaste na peça em ASA

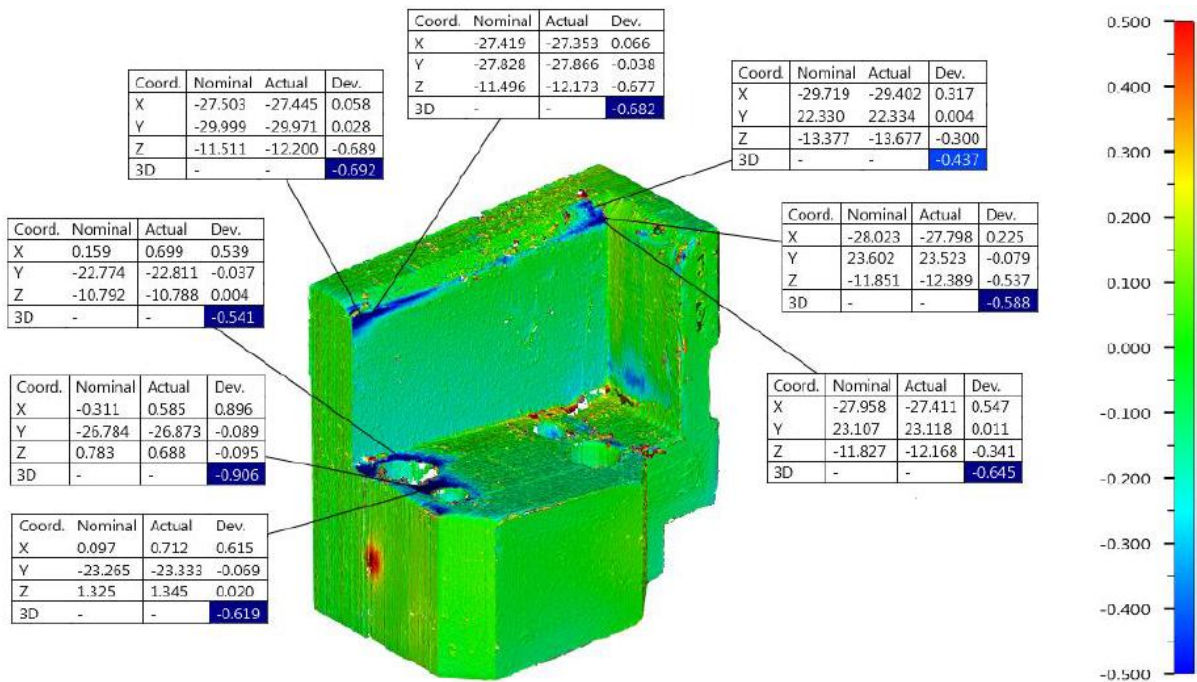


Figura 62- Análise de desgaste na peça em PAHT CF15

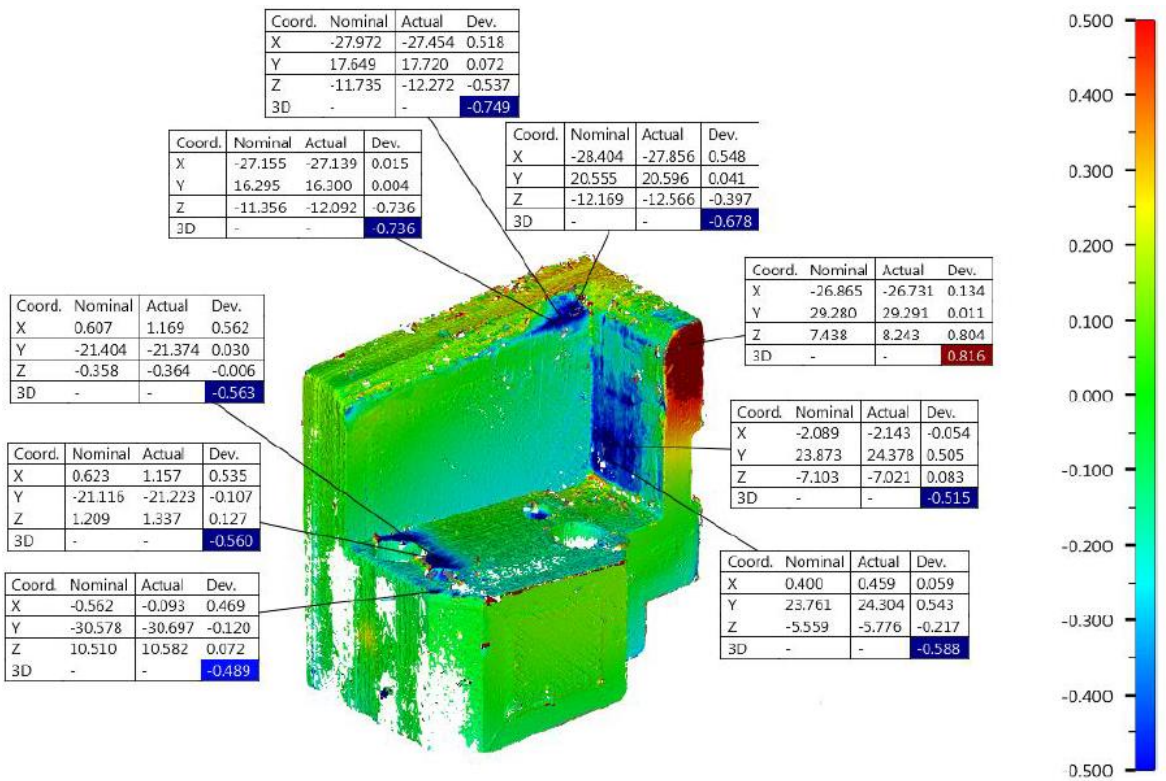


Figura 63- Análise de desgaste na peça em PA6 GF30

Tendo como base os resultados dos ensaios de desgaste realizados inicialmente nos provetes esperava-se verificar uma maior diferença entre, por exemplo, os materiais poliméricos e os materiais compósitos, uma vez que a taxa de desgaste destes dois tipos de materiais era muito díspar. Olhando para o PETG e para o ASA, nos ensaios de desgaste com provetes verificou-se que o ASA apresenta uma taxa de desgaste inferior, o que não vai de encontro com o que foi verificado na prática, em que os desvios medidos foram superiores ao PETG bem como apresentaram uma área desgastada maior. O mesmo acontece se se comparar, por exemplo, o PETG com um dos materiais compósitos. As taxas de desgaste calculadas são imensamente dispare e o desgaste medido na prática foi semelhante.

É difícil retirar conclusões sobre a resistência ao desgaste de cada material baseando-se na análise da peça real uma vez que existem vários fatores que não se conseguiram controlar. Por exemplo, não se consegue garantir que passou exatamente o mesmo número de peças por todas as paletes e a forma como se coloca e posiciona a peça na palete difere de operador para operador. Um posicionamento mais cuidado pode contribuir para o aumento da vida útil da peça, enquanto o contrário pode contribuir para um rápido e prematuro desgaste da peça.

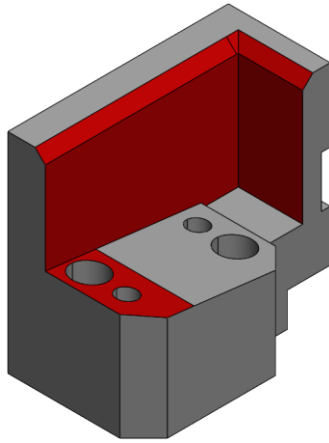
Se as peças fossem deixadas na linha por um período de tempo mais alargado o desgaste seria, em princípio, mais acentuado nas peças produzidas em PETG e ASA do que nas peças feitas nos materiais compósitos.

Mesmo assim esta análise prática foi vantajosa para se perceber quais as zonas da peça mais suscetíveis a se degradarem e, com esta informação, é possível proceder à alteração e *redesign* das peças.

#### **4.3.3.3 *Redesign* da peça**

Os componentes foram inicialmente projetados para serem maquinados, sendo utilizadas estratégias de desenho compatíveis com a tecnologia adotada. É fundamental pensar num *redesign* das peças por duas razões principais. A primeira delas é o facto de se obter uma geometria favorável ao tipo de tecnologia de fabrico utilizada, recorrendo à filosofia DfAM. A segunda é otimizar a geometria da peça de forma a minimizar o desgaste nas zonas identificadas no capítulo anterior, promovendo assim o aumento da vida útil da peça.

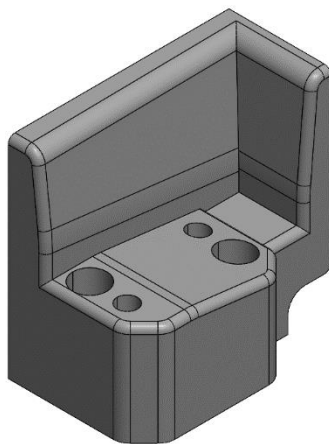
Na figura 64 estão assinaladas as zonas críticas de desgaste que foram identificadas através da digitalização das peças. As paredes da peça assinaladas a vermelho servem de guiamento à entrada da peça metálica no sistema de posicionamento.



**Figura 64-** Zonas críticas de desgaste, assinaladas a vermelho

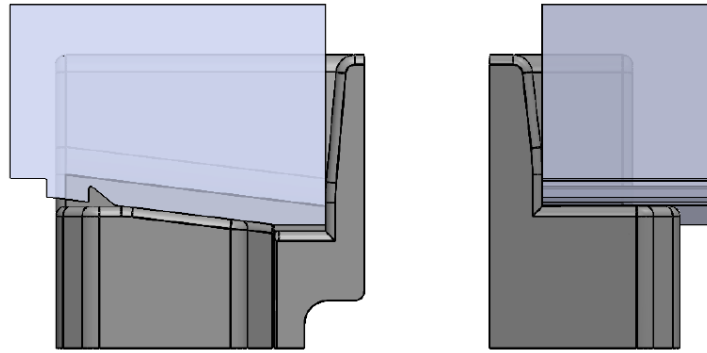
Com a constante colocação e extração das peças estas paredes podem começar a ficar desgastadas. Para evitar que isto aconteça passou-se de uma parede totalmente vertical para uma parede com 2,5° de inclinação. Esta inclinação promove um guiamento com menos atrito devido à menor área de contacto entre as peças e aumenta a precisão do operador na colocação da peça na palete, uma vez que o guiamento deixa de ser tão justo. Facilitando o processo de colocação da peça por parte do operador diminui-se também o desgaste na zona do chanfro do ponto de vista de resistência mecânica. Em vez de um chanfro é preferível usar formas arredondadas para evitar aristas vivas. Esta alteração foi feita nas zonas das peças que se considerou vantajoso.

Por fim, tentou-se perceber a razão de existir uma zona junto aos furos que se desgastava de uma forma mais rápida quando comparado ao resto da superfície de encosto. Percebeu-se então que esse desgaste é gerado por uma zona da peça metálica que tem uma pequena saliência exterior em aresta viva. Foi possível alterar a superfície de contacto da peça polimérica de forma a evitar essa interseção. A figura 65 diz respeito à proposta de novo *design* para peça. Na figura 66 é possível ver as alterações realizadas bem como uma representação da interação da peça metálica com a peça polimérica



**Figura 65-** *Design* da peça otimizado





**Figura 66-** Representação da interação da peça metálica com a peça polimérica

#### 4.3.3.4 Análise de custos e durabilidade das peças

A última análise que precisa de ser feita relativamente aos três materiais é o custo de produção de cada peça e uma estimativa de duração de cada uma. Para esta análise foram considerados os seguintes dados:

- O preço de cada peça maquinada comprada ao exterior (80 € por palete);
- Taxa de desgaste do Ertalon® 66 GF30;
- A duração média das peças compradas ao exterior (1 ano);
- A duração média das peças em PETG (6 meses)

A durabilidade média das peças foi dada pelos operadores das linhas.

Começando pela análise de custos, na tabela 21 são apresentados os valores de cada peça. Para a realização destes cálculos entrou-se com o custo de material e com a amortização dos equipamentos de MA (valores fornecidos peça Renault). A peça em estudo comprada a um fornecedor externo tem um custo total de 16 €. Independente do material utilizado é sempre mais rentável produzir a peça internamente. Claro que quanto mais caro for o material utilizado, menor será o lucro proveniente da produção interna.

**Tabela 21-** Custos associados à produção da peça em estudo em vários materiais

	Custos			
	Material	Amortização do equipamento	Peça final	Paleta completa
<b>Ertalon® 66 GF30</b>	(Não calculável)	(Não calculável)	16,00 €	80,00 €
<b>PETG</b>	2,77 €	0,61 €	3,38 €	19,08 €
<b>ASA</b>	2,70 €	0,61 €	3,30 €	18,65 €
<b>PAHT CF15</b>	11,57 €	0,73 €	12,30 €	71,87 €
<b>PA6 GF30</b>	12,35 €	0,73 €	13,08 €	76,44 €

Sabendo o custo associado aos diferentes materiais é necessário analisar o tempo de vida das diferentes peças. A previsão apontada é meramente especulativa e foi apontada tendo como base as variáveis que se conhece, sendo elas a duração média das peças originais e a duração média das peças em PETG.

Relembrando os valores das taxas de desgaste do PETG e do ASA antes e após os ciclos de lavagem e secagem, embora o ASA tivesse uma taxa de desgaste um pouco inferior, estas era muito próximas. Acredita-se que esta diferença não será significativa para o aumento da vida útil das peças. As vantagens do ASA face ao PETG (neste caso de estudo em concreto) é apenas a resistência ao impacto que é superior. Uma vez que o modo de falha das peças não é causado por forças de impacto não se justifica optar por este material. Mesmo que esta pequena diferença nas taxas de desgaste representasse, por exemplo, um aumento na vida útil das peças de um ou dois meses, continuar-se-ia a preferir utilizar o PETG por questões técnicas devido ao seu fácil processamento que não requer grandes preocupações ou cuidados.

Tendo como base mais uma vez as taxas de desgaste dos materiais percebe-se que a performance do PAHT CF15 e do PA6 GF30 aproxima-se do material original. Para efeitos de comparação assume-se um caso otimista em que as peças nestes materiais terão a mesma duração que as peças originais.

Assim sendo existem duas possibilidades, a primeira é manter a produção de peças em PETG, aumentando os ganhos, mas ter de fazer a sua substituição mais regularmente, e a segunda é produzir as peças no material que aumente a durabilidade das peças, tendo ganhos menores, mas fazendo uma substituição das peças anualmente. Na tabela 22 são apresentados os ganhos associados à produção interna das peças nos diferentes materiais. Fabricar as peças em PETG exige trocar as peças 2 vezes por ano, mas mesmo assim consegue-se um ganho de 41,84 € ao final do ano, por cada paleta, já contabilizando as duas trocas. Ao fim de 50 paletes o ganho é de 2 091,93 €, valores bastante significativos. Fabricar as peças nos materiais compósitos representa custos mais elevados e, conseqüentemente, ganhos menores. Fazendo as peças em PAHT CF15 o ganho anual por paleta é de 8,13 €. Se se fizer uma previsão a 50 paletes o lucro é de 406,42 €. O mesmo acontece com o PA6 GF30, o ganho anual por paleta é de 3,56 € e de 177,82 € ao fim de 50 paletes produzidas.

**Tabela 22-** Ganhos associados à produção da peça em estudo em vários materiais

	Custos		Ganhos			
	Peça final	Paleta completa	Duração	Nº trocas anuais	Ganho anual por paleta	Ganho anual por cada 50 paletes
<b>Ertalon® 66 GF30</b>	16,00 €	80,00 €	12 meses	1	(Não calculável)	(Não calculável)
<b>PETG</b>	3,38 €	19,08 €	6 meses	2	41,84 €	2 091,93 €
<b>ASA</b>	3,30 €	18,65 €	6 meses	2	42,70 €	2 134,83 €
<b>PAHT CF15</b>	12,30 €	71,87 €	12 meses	1	8,13 €	406,42 €
<b>PA6 GF30</b>	13,08 €	76,44 €	12 meses	1	3,56 €	177,82 €

## 4.4 Alternativas à tecnologia FFF

A convergência deste trabalho na tecnologia FFF e nos respectivos materiais deve-se à necessidade de estudar uma tecnologia que já foi adquirida pela empresa onde o autor realizou o seu estágio e é fundamental estudá-la e dominá-la. No entanto, olhando para o tipo de peças que se pretende fabricar, para o tipo de aplicação e para a quantidade de peças a produzir é interessante olhar para o problema de outra forma, não apenas olhando para a tecnologia FFF, mas divergindo para outras tecnologias de MA que possam ser vantajosas.

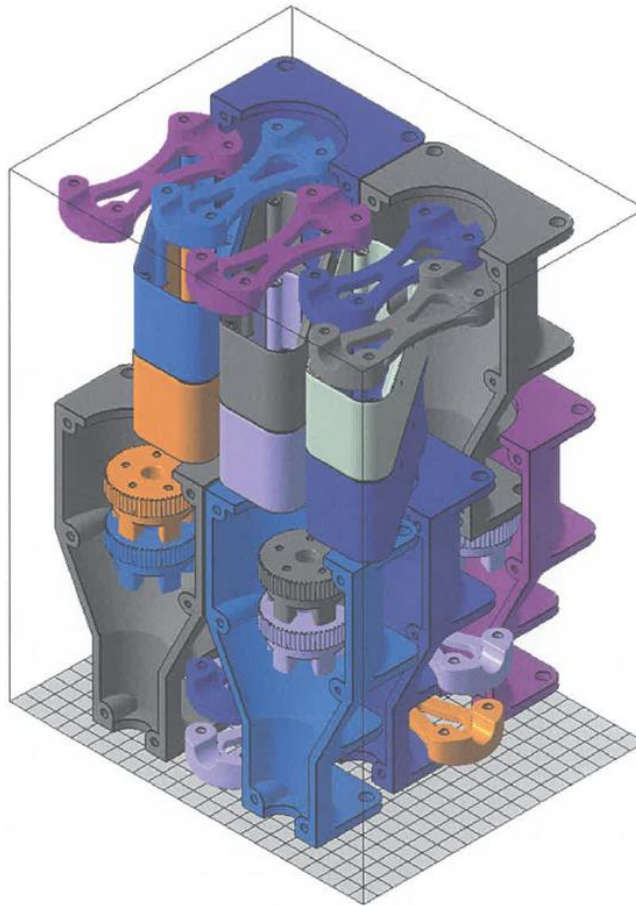
No subcapítulo 2.1.3 fez-se uma breve introdução à tecnologia SLS. Agora pretende-se fazer uma comparação direta entre esta tecnologia e a tecnologia FFF, que tem vindo a ser falada até agora.

A tecnologia SLS, ou *Selective Laser Sintering*, é uma tecnologia com elevado potencial para fabricar o tipo de peças que se pretende por várias razões. Analisando a precisão dimensional, peças produzidas pela tecnologia SLS são mais precisas quando comparadas às mesmas peças fabricadas por FFF.

Tal como outros métodos de MA, a tecnologia SLS também usa a mesma filosofia de construção camada a camada, mas, ao contrário da tecnologia FFF em que apenas há um acréscimo de material camada a camada, no SLS esta junção dá-se por meio de um laser que sinteriza as partículas poliméricas fazendo-as agregar-se umas às outras e assim formar um corpo sólido. A junção de camadas por meio de uma reação térmica e não por um meio meramente “mecânico” garante uma maior homogeneidade das peças e, em muitos dos casos e materiais é possível obter peças com propriedades isotrópicas, com a exceção dos casos onde se usa materiais compósitos em que existe uma redução de cerca de 40% no eixo Z [7].

Relativamente aos materiais, a oferta no mercado para SLS tem vindo a aumentar. Os materiais adequados para esta tecnologia são aqueles que têm baixa condutividade térmica uma vez que apresentam um comportamento mais estável durante a fase de sinterização. O material mais comum são diferentes tipos de poliamidas como PA6, PA11 e PA12. A estes materiais é possível também adicionar partículas compósitas como fibras de carbono, de vidro, ou pó de alumínio (Alumina). Outros materiais menos utilizados, mas que já estão disponíveis no mercado são o PP (*polypropylene*), PEEK (*polyetheretherketone*) e materiais flexíveis, TPU (*Thermoplastic Polyurethane*) e TPE (*Thermoplastic elastomer*).

Outra característica própria das tecnologias de pós é a possibilidade de utilizar todo o volume de impressão para colocar peças, mesmo que estas estejam umas sobre as outras como é possível ver pela figura 67. Para fabrico de pequenas séries isto torna-se uma vantagem, principalmente porque um dos pontos fracos da tecnologia são os longos tempos de *setup* do equipamento destinados ao aquecimento e arrefecimento antes e após a impressão.



**Figura 67-** Exemplo do posicionamento de várias peças no volume de trabalho de um equipamento SLS, retirado de [7]

Para o fabrico das peças em estudo esta tecnologia pode ser uma alternativa ao FFF. Conseguem-se peças com melhor precisão dimensional, mais homogêneas, e existem materiais disponíveis no mercado adequados para o tipo de aplicação.

Nos ensaios realizados aos materiais para FFF verificou-se que as poliamidas carregadas com fibras tiveram um melhor desempenho em todo o tipo de ensaios realizados. Existindo a possibilidade de fabricar peças em poliamidas e poliamidas reforçadas, esta tecnologia pode ser vantajosa para o fabrico deste tipo de componentes.

Outra vantagem é o facto de, no mesmo período, se conseguir fazer um maior número de peças na tecnologia SLS do que na tecnologia FFF, ideal para pequenos lotes e séries.

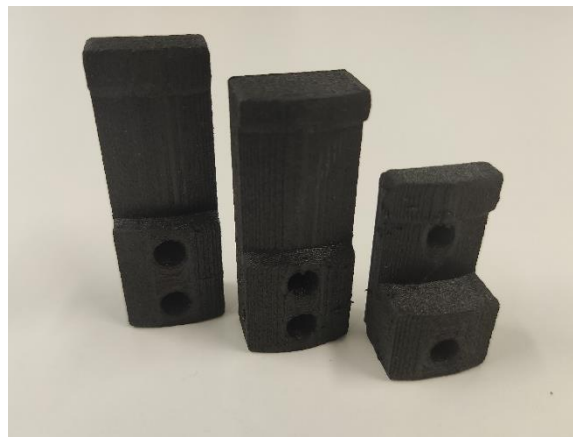
O que há uns anos poderia ser uma desvantagem, atualmente já não o é. Os preços dos equipamentos de fusão em cama de pó para polímeros têm vindo a descer com o passar do tempo e já é possível encontrar soluções interessantes a começar nos 10 000\$, embora sejam equipamentos *desktop*. Máquinas mais industriais com grandes volumes de construção e com potências de laser superiores podem começar nos 100 000\$.

## 4.5 Contributos para outros casos de MA na Renault Cacia

A presença diária no departamento de Manufatura Aditiva Renault Cacia permitiu ter contacto e trabalhar com outros casos práticos onde as tecnologias aditivas se tornaram uma mais-valia em diferentes aspetos, principalmente na redução de custos diretos e indiretos. Entende-se por redução de custos diretos conseguir um produto produzido internamente a um preço inferior ao que é pago a um fornecedor. Entende-se por custos indiretos a ausência ou a redução de stock de peças de desgaste, evitar ou reduzir o tempo de paragem das linhas por falta de componentes, ou então o fabrico de proteções e ferramentas que auxiliem as filosofias de organização e gestão industrial e melhoramento contínuo, como por exemplo a filosofia 5S.

### Pinças para Robot

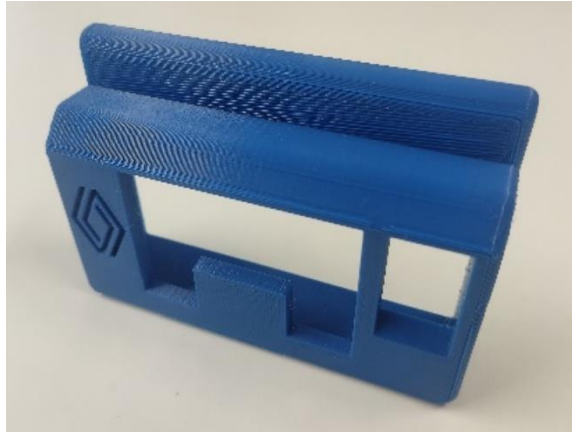
A grande maioria das pinças dos robôs são compostas por duas partes, uma parte metálica para garantir a estabilidade dimensional e a resistência mecânica, e outra parte polimérica que é a parte que está em contacto com peça que o robô vai pegar (chamada de placa de contacto). Essa parte polimérica é regularmente trocada devido ao desgaste que vai sofrendo (figura 68). Dependendo da referência da placa de contacto, os ganhos obtidos ao fabricar internamente podem chegar aos 300 € mensais, apenas num robô. Além disso, as placas fabricadas internamente têm um período de vida útil ainda maior do que as placas originais.



**Figura 68-** Diferentes referências de placas de contacto feitas em PAHT CF15

### Protetor de LCD para AGV's

Estas proteções foram desenvolvidas internamente para resolver com um problema associado ao dano dos LCD's dos AGV's (figura 69). Existindo colisões entre o AVG e outro corpo, esta proteção, que tem um custo interno de 6 €, protege o LCD que ronda os 500 €.



**Figura 69-** Protetor de LCD para AGV's feito em PETG

### **Suportes para etiquetas RFID**

Este é mais um exemplo peças produzidas para otimização do processo de fabrico e evitar possíveis custos indiretos associado à perda ou dano de outros componentes críticos. Certas paletes em determinadas linhas de produção têm etiquetas RFID para monitorizar o processo. Estas etiquetas eram aparafusadas diretamente às paletes, mas partiam ou perdiam-se regularmente (figura 70). O fabrico destes suportes para as etiquetas resolveu o problema, poupando 20 € por cada etiqueta danificada ou perdida e minimizando o tempo de paletes não conformes devido à falta de informação.



**Figura 70-** Suporte para etiquetas RFID feito em ASA

### **Apoio de motor para posto de controlo**

Este exemplo em concreto serve para demonstrar a facilidade e versatilidade de produzir peças internamente. Esta peça é um simples apoio para um motor de um posto de controlo. Esta peça é imprescindível para o funcionamento da linha. Este apoio partiu e rapidamente se conseguiu produzir a peça e voltar a colocar a linha em funcionamento (figura 71).



**Figura 71-** Apoio de motor feito em PLA

### **Batentes para paletes**

As peças em material flexível são casos em que o potencial de ganhos é elevado. Normalmente são peças que são injetadas e tornam-se caras devido ao custo de produção do molde, por exemplo. Realizaram-se alguns testes internos neste tipo de material para produzir batentes para as paletes das linhas de produção. O custo unitário comprado ao fornecedor era de 14 €, produzido internamente tem um custo de 1 € (figura 72).



**Figura 72-** Batentes para paletes feitos em TPU

---

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

A utilização de técnicas aditivas em contextos industriais está sem dúvida a crescer. No caso da fábrica da Renault em Cacia, Aveiro, a tecnologia FFF foi vista como uma mais-valia para a produção de peças que antes teriam de ser compradas ao exterior e que atualmente, com a flexibilidade que as tecnologias aditivas oferecem, podem ser fabricadas internamente. A redução de custos é a primeira razão para produzir estes componentes internamente, mas outras razões como a diminuição de stock, a redução de dependência de fornecedores e a redução de prazos de entrega fundamentam a escolha. A escolha da tecnologia FFF deve-se ao facto de ser uma tecnologia acessível, com equipamentos fáceis de manusear e com uma gama de materiais existentes já alargada.

As peças para as linhas de produção têm de cumprir certos requisitos mecânicos para cumprirem as condições de serviço a que estarão sujeitas. Dentro da gama de materiais para FFF é importante saber escolher o mais indicado para um determinado ambiente e condições mecânicas a que a peça vai estar sujeita. Além da escolha do material é necessário ter conhecimento de como os parâmetros de impressão influenciam o desempenho mecânico e saber também adaptar o design da peça para a tecnologia que se está a utilizar (DfAM).

Escolheram-se quatro materiais para se realizarem ensaios mecânicos consoante o caso prático que se estava a estudar (PETG, ASA, PAHT CF15 e PA6 GF30). Estudaram-se propriedades de dureza, resistência ao impacto, à flexão e ao desgaste. O estudo destas propriedades foi feito antes e depois de submeter os provetes a um ou vários ciclos de lavagem e secagem para perceber qual a influência desta etapa.

Nos ensaios de dureza verificou-se que esta é maior na face que está em contacto com a mesa de impressão, sendo inferior na face superior. Este fenómeno ocorreu em todos os materiais. O material com uma dureza mais elevada foi o PAHT CF15, superando mesmo a dureza do material original.

Nos ensaios de impacto o PETG foi o material com pior desempenho, destacando-se o ASA e o PA6 GF30 por registarem os valores de resistência ao impacto mais elevados.

Os materiais compósitos destacaram-se pelas propriedades de flexão devido ao elevado valor do módulo de flexão e tensão máxima de flexão. Estes apresentam um comportamento mais rígido ao contrário do que se verificou no PETG e no ASA que têm um comportamento dúctil. Dos materiais compósitos o PAHT CF15 foi o material onde se registou um maior módulo de flexão e maior tensão máxima de flexão. No PETG registou-se também um maior valor de módulo de flexão e tensão máxima de flexão face ao ASA. Nos ensaios realizados o PETG nunca chegou a uma situação de rotura, o que se verificou no ASA.

Ao nível do desgaste os materiais compósitos tiveram um melhor desempenho. Tal comportamento pode-se explicar pela presença de fibras no polímero, com maior capacidade para resistir ao desgaste.



Após submeter os provetes a um, e posteriormente a trinta ciclos de lavagem e secagem voltou-se a repetir o mesmo procedimento de ensaios. Esta etapa mostrou-se impactante nas propriedades dos materiais de diferentes formas:

No PETG esta etapa degradou todas as propriedades mencionadas até agora;

No ASA causou um decréscimo na dureza e fez aumentar a taxa de desgaste, mas, em contrapartida, fez aumentar a resistência ao impacto. O módulo de flexão e a tensão máxima de flexão aumentaram quando os provetes foram sujeitos a apenas um ciclo, mas com o aumento dos ciclos estes valores tendiam a baixar. Com o aumento dos ciclos diminuiu a tensão de rotura e a deformação nesse mesmo ponto;

No PAHT CF15 e no PA6 GF30 a dureza diminuiu, o módulo de flexão e a tensão máxima de flexão diminuíram significativamente, a tensão de rotura diminuiu e a deformação na tensão de rotura e na tensão máxima de flexão aumentaram consideravelmente. A taxa de desgaste teve poucas oscilações, mas no PA6 GF30 parece haver uma ligeira tendência de aumento desse valor com o aumento de ciclos.

Depois de feita a caracterização dos materiais e de perceber qual o impacto dos ciclos de lacagem e secagem em cada um deles estudou-se a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de flexão e de impacto.

No que diz respeito à resistência ao impacto, obteve-se melhores resultados utilizando uma altura de camada de 0,2 mm. Além da altura de camada, o número de paredes foi o parâmetro que mais contribuiu para o aumento da resistência ao impacto. No caso do PETG verificou-se o oposto, o aumento da percentagem de preenchimento era preferível face ao aumento de número de paredes. Em todos os casos, o aumento de ambas os parâmetros melhoraram a resistência ao impacto.

No que diz respeito à resistência à flexão do PETG, aumentando a altura de camada de 0,2 mm para 0,3 mm aumenta o módulo de flexão e a tensão máxima de flexão. Concluiu-se também que aumentar a percentagem de preenchimento é preferível face ao aumento do número de paredes.

No ASA obteve-se também melhores resultados utilizando uma altura de camada de 0,3 mm, mas neste caso o aumento do número de paredes é o parâmetro que mais influencia o aumento da tensão máxima de flexão, enquanto a percentagem de preenchimento afetava o módulo de flexão.

Nos filamentos carregados com fibras o aumento do número de paredes também é preferível face ao aumento do preenchimento uma vez que melhora o módulo e a tensão máxima de flexão. Nestes materiais em concreto obteve-se melhores resultados utilizando uma altura de camada de 0,2 mm.

Relativamente ao estudo dimensional realizado às peças verificou-se que a presença de fibras nos polímeros geram peças finais mais rugosas e, conseqüentemente, com mais desvios face às cotas nominais.

Depois de um mês na linha de produção, os valores de desgaste obtidos não foram ao encontro dos resultados obtidos nos ensaios realizados aos materiais, seguindo uma norma específica. Isto pode ser explicado pelo facto de existirem algumas condicionantes diárias na linha de produção, que

não se conseguem controlar, e que inviabilizam a repetibilidade do processo. Como exemplo, a impossibilidade de garantir a montagem do mesmo número de peças metálicas em todas as paletes a circular na linha de produção. Por este motivo, este estudo em contexto real deveria ser realizado num período de tempo mais alargado.

Com base nos resultados de desgaste obtidos, foi feito um *redesign* da peça não só a pensar na otimização das zonas que sofrem mais desgaste, mas também tendo em conta o tipo de processo de fabrico que se está a utilizar, uma vez que a peça foi inicialmente concebida para ser para ser obtida por processos de maquinação e não por processos aditivos.

Este estudo termina com a apresentação do material com melhor desempenho para esta aplicação em específico. Fez-se uma análise de custos e ganhos relativos à produção das peças em cada material, e fez-se também uma previsão de tempo de vida útil para cada material. Ao produzir as peças num material compósito acredita-se conseguir atingir o mesmo tempo de vida útil das peças originais e mesmo assim obter um ganho proveniente da produção interna destes componentes, ainda que um pouco reduzido. Como desvantagem aponta-se a dificuldade de processamento destes materiais. A produção de peças em ASA não será uma mais-valia uma vez que se acredita que o tempo de vida útil das peças será semelhante ao do PETG. Uma vez que que o ASA é mais difícil de processar, não compensa a escolha deste material face ao PETG. Comparando com os materiais compósitos, o tempo de vida útil do PETG é mais reduzido o que implica uma troca mais regular das peças. Tendo como base a análise de custos feita, neste caso em específico, o PETG será o material com melhor relação desempenho/custo para a produção destas peças. Mesmo tendo um período de vida útil mais reduzido e sendo necessário fazer a substituição das peças mais regularmente, continua a compensar tendo em conta os ganhos obtidos anualmente.

Este estudo foi de extrema importância para o desenvolvimento do departamento de MA da Renault, visto que os resultados e conclusões obtidas podem ser extrapoladas para outros casos. O estudo da influência dos ciclos de lavagem e secagem nas propriedades mecânicas das peças foi também importante uma vez que grande parte dos componentes automóveis fabricados na Renault passam por estas etapas, sendo necessário produzir regularmente peças que aguentem essas condições de trabalho.

### **Trabalhos futuros**

Após a apresentação dos resultados e da conclusão do trabalho realizado sugerem-se alguns tópicos de procedimentos que poderão vir a ser feitos futuramente no âmbito das tecnologias de MA, sendo eles:

- *Redesign* das restantes peças da paleta / *jigs and fixtures*;
- Estudo de outros materiais compósitos de menor custo face aos materiais com base em poliamida analisados no presente trabalho, como por exemplo à base de PLA e PETG;
- Estudo de impressão de poliamidas sem a presença de fibras, dadas as suas propriedades tribológicas relevantes para a diminuição do desgaste com custo inferior face aos compósitos;

- Estudo da influência de outros parâmetros de impressão por FFF;
- Estudar o impacto dos filamentos compósitos na degradação superficial das peças metálicas após um determinado ciclo de operações;
- Desenvolvimento de um equipamento de testes para simular o movimento de colocação e extração da peça metálica no sistema de posicionamento durante um determinado número de ciclos. Assim seria possível medir o desgaste na peça real uma vez que se estava a seguir um procedimento com variáveis de ensaios controladas.

---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Bruker Nano Surfaces, “How Can 3D Optical Profiling Optimize Additive Manufacturing Processes?,” *AZoM*, pp. 1–17, 2019, Accessed: Apr. 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17901>.
- [2] V. Picanço Rodrigues, E. de Senzi Zancul, C. Gonçalves Mançanares, C. Mezzeti Giordano, and M. Sergio Salerno, “Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework,” *Rev. Gestão da Produção Operações e Sist.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–34, 2017, doi: 10.15675/gepros.v12i3.1657.
- [3] “Manufatura aditiva: impressão 3D em manufatura - Mecalux.com.br,” *Mecalux*, 2021. <https://www.mecalux.com.br/blog/manufatura-aditiva> (accessed Apr. 11, 2022).
- [4] “ISO/ASTM 52900:2021(en), Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary,” 2021. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (accessed Apr. 11, 2022).
- [5] A. Bandyopadhyay and S. Bose, Eds., *Additive Manufacturing, Second Edition*, 2nd ed. CRC Press, 2020.
- [6] P. Vilarinho, P. Duarte, J. Marinheiro, and J. M. Oliveira, “Manufatura Aditiva: uma perspetiva tecnológica, Ciência e Tecnologia de Materiais,” vol. 31, pp. 28-43 (ISSN 0870-8312), 2019.
- [7] B. Redwood, F. Schöffner, and B. Garret, *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Holanda: 3D Hubs, cop. 2017, 2017.
- [8] L. Greguric, “Digital Light Processing 3D printing explained,” *Wevolver*, 2019. <https://www.wevolover.com/article/digital.light.processing.3d.printing.explained> (accessed Apr. 11, 2022).
- [9] “LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper,” *Sculpteo*. <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [10] “Additive Manufacturing Research Group - Sheet Lamination,” *Loughborough University*. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [11] “Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM | Make,” *3D Experience*. <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion> (accessed Apr. 11, 2022).
- [12] S. Moylan, E. Whinton, B. Lane, and J. Slotwinski, “Infrared thermography for laser-based powder bed fusion additive manufacturing processes,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1581 33, no. October 2015, pp. 1191–1196, 2014, doi: 10.1063/1.4864956.
- [13] “What is Selective Heat Sintering (SHS)?,” *AdditiveX*, 2016. <https://www.additive-x.com/blog/selective-heat-sintering-shs-work/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [14] “What is Electron Beam Melting (EBM)?,” *Markforged*. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm> (accessed Apr. 11, 2022).
- [15] H. Weiner, “Fused Filament Fabrication – Simply Explained,” *All3DP*, 2020. <https://all3dp.com/2/fused-filament-fabrication-fff-3d-printing-simply-explained/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [16] M. Mensley, “3D Printer Extruder – The Ultimate Guide,” *All3DP*, 2021. <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/> (accessed Apr. 12, 2022).
- [17] “Continuous Carbon Fiber - High Strength 3D Printing Material,” *Markforged*. <https://markforged.com/materials/continuous-fibers/continuous-carbon-fiber> (accessed Apr. 11, 2022).
- [18] M. Faria, “Fabrico rápido de produtos em porcelana por robocasting,” Universidade de Aveiro, 2016.
- [19] “Binder Jetting Technology,” *ExOne*. <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting> (accessed Apr. 11, 2022).
- [20] “What is Binder Jetting?,” *Markforged*. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-binder-jetting> (accessed Apr. 11, 2022).
- [21] “Directed energy deposition - DED, LENS, EBAM,” *3D Experience*. <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition> (accessed Apr. 11, 2022).
- [22] R. Stress, M. Deposition, T. Dimension-, F. G. Material, and M. Material, “3D printing of metals in rapid proto- typing of biomaterials : Techniques in additive manufacturing 3D and 4D Printing of Functional and Smart Composite Materials Quantification and certification of ad- ditive manufacturing materials and processes Overvie,” pp. 2015–2017, 2021.
- [23] “3D Printed Metals - LENS Metal Additive

- Manufacturing Technology,” *Optomec*.  
<https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>  
 (accessed Apr. 11, 2022).
- [24] “Metal Additive Manufacturing with EBAM® Technology | Sciaky,” *SCI AKY, Inc.*  
<https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> (accessed Apr. 11, 2022).
- [25] “Material Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University,” *Loughborough University*.  
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [26] M. Gayette, “Top 10 Advantages of Additive Manufacturing | PTC,” *PTC Digital Transforms Physical*, 2021. <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/10-additive-manufacturing-advantages> (accessed Apr. 11, 2022).
- [27] M. Chan, “12 Benefits of Additive Manufacturing and 5 Disadvantages - Unleashed Software,” *Unleashed Software*, 2021.  
<https://www.unleashedsoftware.com/blog/12-benefits-of-additive-manufacturing-and-5-disadvantages> (accessed Apr. 11, 2022).
- [28] C. K. Chua and K. F. Leong, *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Estados Unidos: Hackensack (NJ): World Scientific Publishing Company, 2015.
- [29] Matter, “FDM 3D printing materials compared | Hubs,” *Hubs*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [30] D. Fico, D. Rizzo, R. Casciaro, and C. Esposito Corcione, “A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials,” *Polymers*, 2022. .
- [31] “3D Printing Materials | MakerBot,” *MakerBot*.  
<https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [32] “Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with ABS,” *Simplify3D*.  
<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [33] “TPU 3D Printing: A Guide to 3D Printing Flexible Parts - AMFG,” *AMFG*, 2018.  
<https://amfg.ai/2018/07/23/tpu-3d-printing-guide/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [34] C. Valdivieso, “All you need to know about PETG for 3D printing - 3Dnatives,” *3D Natives*, 2019.  
<https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [35] “Everything You Need to Know About Nylon Filament for 3D Printing,” *BCN3D*, 2020.  
<https://www.bcn3d.com/everything-you-need-to-know-about-nylon-filament-for-3d-printing/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [36] “Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Filament Review,” *Juggerbot3D*.  
<https://juggerbot3d.com/materials/asa-filament-review/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [37] “Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Polycarbonate,” *Simplify3D*.  
<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [38] “PEEK material: High-Performance 3D printing material,” *Tractus3D*.  
<https://tractus3d.com/materials/peek/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [39] J. Flynt, “What are Composite Filaments for 3D Printing?,” *3D Insider*, 2020.  
<https://3dinsider.com/composite-filaments/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [40] “Understanding Shells, Layer Height, and Infill,” *Budmen® Industries*. <https://budmen.com/support/user-guides/shells-layer-height-and-infill/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [41] M. Algarni and S. Ghazali, “Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG’s Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters,” *Crystals*, 2021, doi: 10.3390/cryst11080995.
- [42] N. R. Rajendran Royan, J. S. Leong, W. N. Chan, J. R. Tan, and Z. S. B. Shamsuddin, “Current state and challenges of natural fibre-reinforced polymer composites as feeder in fdm-based 3d printing,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 14, 2021, doi: 10.3390/polym13142289.
- [43] J. P. Rett, Y. L. Traore, and E. A. Ho, “Sustainable Materials for Fused Deposition Modeling 3D Printing Applications,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1002/adem.202001472.
- [44] N. Vidakis, M. Petousis, E. Velidakis, M. Liebscher, V. Mechtcherine, and L. Tzounis, “On the strain rate sensitivity of fused filament fabrication (Fff) processed pla, abs, petg, pa6, and pp thermoplastic polymers,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 12, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/polym12122924.
- [45] S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, “Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/polym11071220.
- [46] “Overview of materials for Nylon 6, Extruded,” *MatWeb*.  
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatG UID=726845c457b94b7cafe31d2e65739e1d&ckck=1> (accessed Apr. 12, 2022).
- [47] A. R. Zanjanijam, I. Major, J. G. Lyons, U. Lafont, and D. M. Devine, “Fused filament fabrication of peek: A review of process-structure-property relationships,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.3390/POLYM12081665.
- [48] S. Pervaiz, T. A. Qureshi, G. Kashwani, and S. Kannan,

- “3D printing of fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: A status review,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/ma14164520.
- [49] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369–378, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- [50] H. L. Tekinalp *et al.*, “Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, pp. 144–150, 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009.
- [51] N. G. Karsli and A. Aytac, “Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 51, pp. 270–275, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.03.023.
- [52] S. Dul, L. Fambri, and A. Pegoretti, *Development of New Nanocomposites for 3D Printing Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [53] H. K. Dave and J. P. Davim, *Fused deposition modeling based 3D printing*. Suüça: Springer, 2021.
- [54] M. Pant, R. M. Singari, P. K. Arora, G. Moona, and H. Kumar, “Wear assessment of 3-D printed parts of PLA (polylactic acid) using Taguchi design and Artificial Neural Network (ANN) technique,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 11, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/abc8bd.
- [55] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, and Z. Li, “Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling,” *Mater. Sci. Eng. A*, pp. 125–130, 2001.
- [56] A. K. Sood, “Study on Parametric Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process,” National Institute of Technology Rourkela, 2011.
- [57] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS,” *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- [58] B. Huang, S. Meng, H. He, Y. Jia, Y. Xu, and H. Huang, “Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 120–128, 2019, doi: 10.1002/pen.24875.
- [59] S. Bikash Mishra, M. S. Khan, E. Acharya, and D. Nanda, “Parametric appraisal of wear behavior of coated FDM Build parts using firefly algorithm,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 17968–17973, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.127.
- [60] A. K. Sood, A. Equbal, V. Toppo, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, “An investigation on sliding wear of FDM built parts,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2012, doi: 10.1016/j.cirpj.2011.08.003.
- [61] FormLabs, “Designing 3D Printed Jigs and Fixtures,” p. 20, 2017, [Online]. Available: [https://formlabs.com/media/upload/designing-jigs-and-fixtures-3d-printing.pdf?mkt\\_tok=eyJpJjoiWmpabVltRTNZemRoWkRNMSIsInQiOiJ4aUtCODhDMzFVSXpZRkc1SnhaUE41WEliZ0c3WHF3VnBLTEE2Z0pcLlJMOFV4UVpiY1BISDJLd0FmOVJUdWpJZUdENkNLcVRrRDBmUksyaTBUaitaZW5PUXRoa1b3ZTa](https://formlabs.com/media/upload/designing-jigs-and-fixtures-3d-printing.pdf?mkt_tok=eyJpJjoiWmpabVltRTNZemRoWkRNMSIsInQiOiJ4aUtCODhDMzFVSXpZRkc1SnhaUE41WEliZ0c3WHF3VnBLTEE2Z0pcLlJMOFV4UVpiY1BISDJLd0FmOVJUdWpJZUdENkNLcVRrRDBmUksyaTBUaitaZW5PUXRoa1b3ZTa).
- [62] “Jigs and Fixtures: Advantages & Differences,” *Prescient Technologies*. <https://www.prescient.com/knowledge-center/jigs-and-fixtures/jigs-and-fixtures.html> (accessed Apr. 12, 2022).
- [63] T. Holtz, “The Difference Between Jigs and Fixtures,” *ProtoLabs*, 2017. <https://www.protolabs.com/resources/blog/the-difference-between-jigs-and-fixtures/> (accessed Apr. 12, 2022).
- [64] “What are Jigs and Fixtures,” *Reid Supply*. <https://www.reidsupply.com/en-us/industry-news/what-are-jigs-and-fixtures> (accessed Apr. 12, 2022).
- [65] 3Dsystems, “3D printing jigs and fixtures,” 2015, [Online]. Available: <https://amtil.com.au/3d-printing-jigs-and-fixtures/>.
- [66] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Bus. Horiz.*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [67] Dimensional Research, “3D Printing Technology Trends - A survey of additive manufacturing,” *Jabil*, 2021.
- [68] “Using 3D Printing for Complex Jigs and Fixtures,” *ProtoLabs*. <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/designing-for-jigs-and-fixtures/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [69] D. O’Connor, “Can you jig it? 3D printing inside Volkswagen Autoeuropa,” *TCT Magazine*, 2018. <https://www.tctmagazine.com/can-you-jig-it-volkswagen-ultimaker-3d-printing/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [70] “How Heineken leveraged Ultimaker 3D printing to optimise its manufacturing line,” *TCT Magazine*, 2021. <https://www.tctmagazine.com/spon-con/ultimaker-3d-printing-tooling-optimise-manufacturing/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [71] L. Griffiths, “3D Printing Manufacturing Aids,” *TCT Magazine*, 2016. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/3d-printing-manufacturing-aids/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [72] S. Davies, “Driving AM innovation with 3D Systems and Renault Sport Formula One,” *TCT Magazine*, 2017. <https://www.tctmagazine.com/tct-events/tct-3sixty-uk/driving-am-innovation-3d-systems-renault/> (accessed Apr. 13, 2022).
- [73] Y. Ishida, D. Miura, and A. Shinya, “Application of

- fused deposition modeling technology for fabrication jigs of three-point bending test for dental composite resins,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 130, no. March, p. 105172, 2022, doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105172.
- [74] A. Kampker, G. Bergweiler, A. Hollah, K. Lichtenthäler, and S. Leimbrink, “Design and testing of the different interfaces in a 3D printed welding jig,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 45–50, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.009.
- [75] R. Paliwal, “3D printed jigs and fixtures Application in manufacturing of suspension arm for ATV,” no. March, 2021, doi: 10.17148/IARJSET.2021.8342.
- [76] N. Krznar, A. Pilipović, and M. Šerčer, “Additive manufacturing of fixture for automated 3D scanning- Case study,” *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, pp. 197–202, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.656.
- [77] M. G. Violante, L. Iuliano, and P. Minetola, “Design and production of fixtures for free-form components using selective laser sintering,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 30–37, 2007, doi: 10.1108/13552540710719190.
- [78] P. Minetola and L. Iuliano, “Investigation of wear behaviour of FDM fixtures,” *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp. - Proc. 5th Int. Conf. Adv. Res. Rapid Prototyp.*, no. September, pp. 749–756, 2012, doi: 10.1201/b11341-120.
- [79] D. F. Chitariu *et al.*, “Experimental research on behaviour of 3D printed gripper soft jaws,” *Mater. Plast.*, vol. 57, no. 4, pp. 366–375, 2021, doi: 10.37358/MP.20.4.5437.
- [80] J. M. Gómez-de-Gabriel, A. J. Muñoz-Ramírez, M. Palacios, and L. Parras, “Rapid end-of-arm-tooling manufacturing of vacuum grippers,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 32, no. 12, pp. 1231–1241, 2019, doi: 10.1080/0951192X.2019.1690684.
- [81] “Effect of nylon on properties after absorbing water,” *Gud Mould Industry Limited*, 2021. <https://gudmould.wordpress.com/2021/06/03/effect-of-nylon-on-properties-after-absorbing-water/> (accessed Jul. 12, 2022).
- [82] “Nylon and Moisture Absorption,” *Amco Polymers*, 2017. <https://www.amcopolymers.com/resources/blog/nylon-and-moisture-absorption> (accessed Jul. 12, 2022).
- [83] A. Pye, “Polyamide Nylon: Dry vs. Conditioned,” *PROSPECTOR*, 2021. <https://knowledge.ulprospector.com/1489/pe-dry-vs-conditioned-polyamide-nylon/> (accessed Jul. 12, 2022).
- [84] R. J. Gaymans, R. J. M. Borggreve, and A. B. Spoelstra, “Ductile transition in nylon-rubber blends: Influence of water,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 479–486, 1989, doi: 10.1002/app.1989.070370214.
- [85] N. Jia and V. A. Kagan, “Mechanical Performance of Polyamides with Influence of Moisture and Temperature – Accurate Evaluation and Better Understanding,” *Plast. Fail. Anal. Prev.*, no. May 2019, pp. 95–104, 2001, doi: 10.1016/b978-188420792-1.50014-7.
- [86] S. Garzon-Hernandez, D. Garcia-Gonzalez, A. Jérusalem, and A. Arias, “Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties,” *Mater. Des.*, vol. 188, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108414.

---

## ANEXOS

---



# ANEXO A

Ficha técnica do Ertalon® 66 GF30

Compared with virgin PA 66, this 30 % glass fibre reinforced and heat stabilised nylon grade offers increased strength, stiffness, creep resistance and dimensional stability whilst retaining an excellent wear resistance. It also allows higher max. service temperatures.

### Physical properties (indicative values <sup>1)</sup>)

PROPERTIES			
Colour	-	-	Black
Density	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	1.29
Water absorption:			
- after 24h immersion in water of 23 °C (1)	ISO 62	%	0.39
- at saturation in water of 23 °C	-	%	5.5
<b>Thermal Properties (2)</b>			
Melting temperature (DSC, 10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	260
Glass transition temperature (DSC, 20 °C/min) - (3)	ISO 11357-1/-2	°C	
Thermal conductivity at 23 °C	-	W/(K.m)	0.30
Coefficient of linear thermal expansion:			
- average value between 23 and 60 °C	-	m/(m.K)	50 x 10 <sup>-6</sup>
- average value between 23 and 100 °C	-	m/(m.K)	60 x 10 <sup>-6</sup>
Temperature of deflection under load:			
- method A: 1.8 MPa	ISO 75-1/-2	°C	150
Max. allowable service temperature in air:			
- continuously : for min. 20,000 h (4)	-	°C	110
Min. service temperature (5)	-	°C	-20
Flammability (6):			
- according to UL 94 (3 mm thickness)	-	-	HB
<b>Mechanical Properties at 23 °C (7)</b>			
Tension test (8):			
- tensile strength (9)	ISO 527-1/-2	MPa	85
- tensile strain at yield(9)	ISO 527-1/-2	%	
- tensile strain at break (9)	ISO 527-1/-2	%	5
- tensile modulus of elasticity (10)	ISO 527-1/-2	MPa	5000
Compression test (11):			
- compressive stress at 1 / 2 / 5 % nominal strain (10)	ISO 604	MPa	43 / 77 / 112
Flexural test (12):			
- flexural strength	ISO 178	MPa	
- flexural modulus of elasticity	ISO 178	MPa	
Charpy impact strength - unnotched (13)	ISO 179-1/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	50
Charpy impact strength - notched	ISO 179-1/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	6
Rockwell M-hardness (14)	ISO 2039-2	-	76
Dynamic Coefficient of Friction (-)	ISO 7148-2 (15)	-	0.25-0.4
Wear rate	ISO 7148-2 (15)	µm/km	11
<b>Electrical Properties at 23 °C</b>			
Electric strength (16)	IEC 60243-1	kV/mm	27
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	>10E 14
Surface resistivity	ANSI/ESD STM 11.11	Ohm/sq.	>10E13
Relative permittivity ε <sub>r</sub> : - at 1 MHz	IEC 60250	-	3.60
Dielectric dissipation factor tan δ: - at 1 MHz	IEC 60250	-	0.014

Note: 1 g/cm<sup>3</sup> = 1,000 kg/m<sup>3</sup>; 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>; 1 kV/mm = 1 MV/m.

Ertalon® is a registered trademark of Mitsubishi Chemical Advanced Materials.

#### Legend:

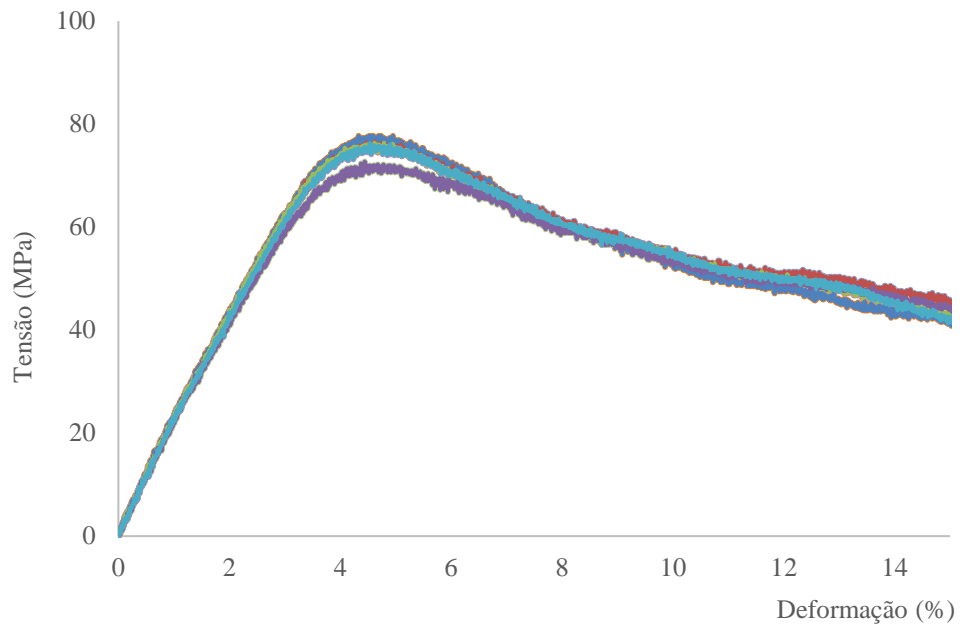
- 1) According to method 1 of ISO 62 and done on discs Ø 50 mm x 3 mm.
- 2) The figures given for these properties are for the most part derived from raw material supplier data and other publications.
- 3) Values for this property are only given here for amorphous materials and for materials that do not show a melting temperature (PBI, PAI, PI).
- 4) Temperature resistance over a period of min. 20,000 hours. After this period of time, there is a decrease in tensile strength – measured at 23 °C – of about 50 % as compared with the original value. The temperature value given here is thus based on the thermal-oxidative degradation which takes place and causes a reduction in properties. Note, however, that the maximum allowable service temperature depends in many cases essentially on the duration and the magnitude of the mechanical stresses to which the material is subjected.
- 5) Impact strength decreasing with decreasing temperature, the minimum allowable service temperature is practically mainly determined by the extent to which the material is subjected to impact. The value given here is based on unfavourable impact conditions and may consequently not be considered as being the absolute practical limit.
- 6) These estimated ratings, derived from raw material supplier data and other publications, are not intended to reflect hazards presented by the material under actual fire conditions. There is no 'UL File Number' available for these stock shapes.
- 7) Most of the figures given for these mechanical properties of the materials are average values of tests run on dry test specimens machined either out of plate 15-20 mm thick or rod diameter 40-50mm, the test specimens were then taken from the stock shape with their length in longitudinal direction (parallel to the extrusion direction).
- 8) Test specimens: Type 1 B
- 9) Test speed: either 5 or 50 mm/min [chosen acc. to ISO 10350-1 as a function of the ductile behaviour of the material (tough or brittle)]
- 10) Test speed: 1 mm/min.
- 11) Test specimens: cylinders Ø 8 mm x 16 mm
- 12) Test specimens: bars 4 mm (thickness) x 10 mm x 80 mm; test speed: 2 mm/min; span: 64 mm.
- 13) Pendulum used: 4 J.
- 14) Measured on 10 mm thick test specimens.
- 15) Test procedure similar to Test Method A: "Pin-on-disk" as described in ISO 7148-2, Load 3MPa, sliding velocity= 0.33 m/s, mating plate steel Ra= 0.7-0.9 µm, tested at 23°C, 50%RH.
- 16) Electrode configuration: Ø 25 mm / Ø 75 mm coaxial cylinders; in transformer oil according to IEC 60296; 1 mm thick test specimens.

This table is a valuable help in the choice of a material. The data listed here fall within the normal range of product properties of dry material. However, they are not guaranteed and they should not be used to establish material specification limits nor used alone as the basis of design.

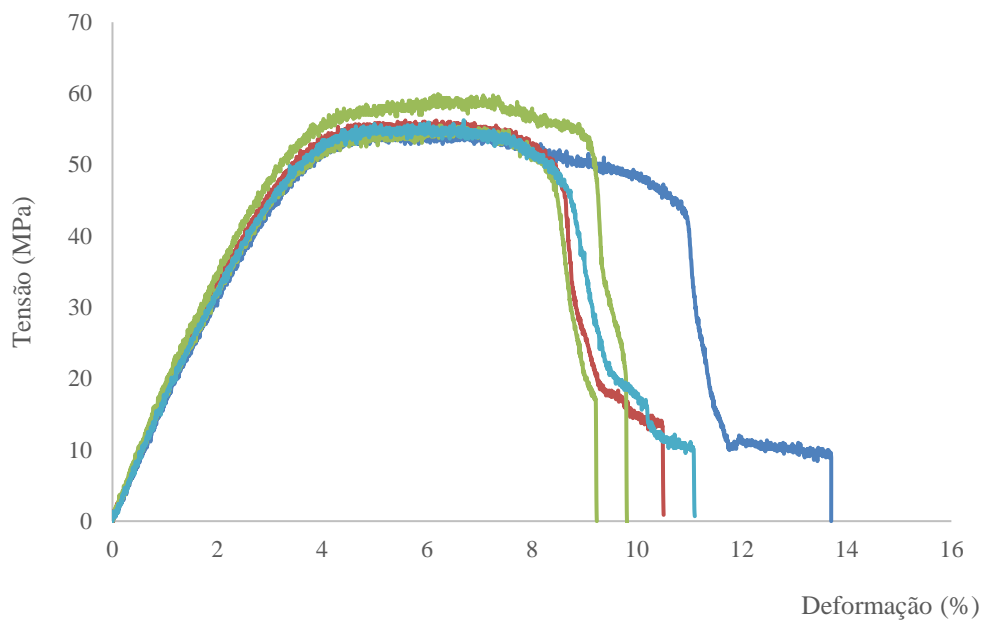
It has to be noted that reinforced and filled material shows an anisotropic behaviour (properties differ when measured parallel and perpendicular to the manufacturing direction).

## ANEXO B

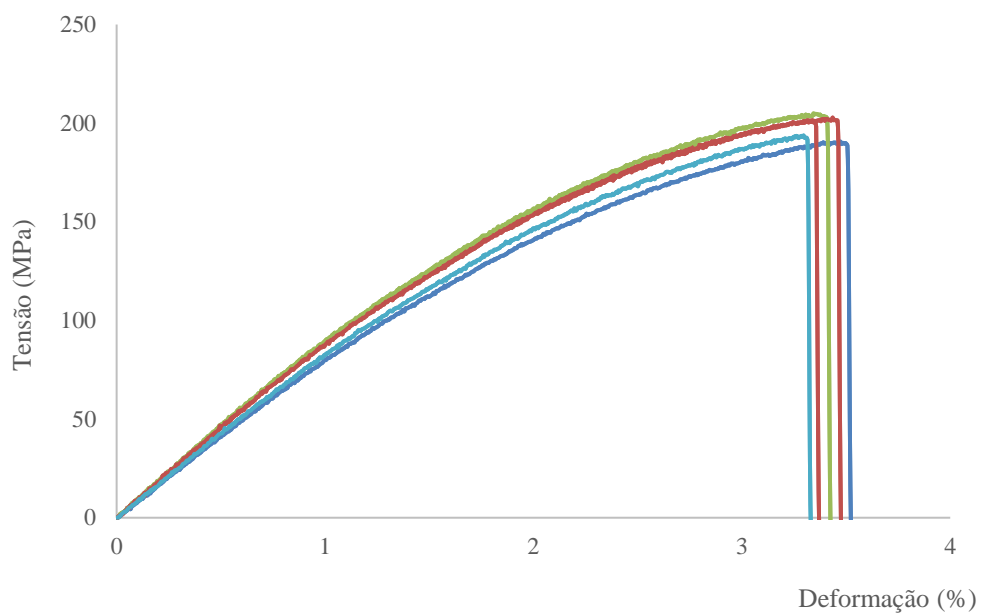
Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após impressão



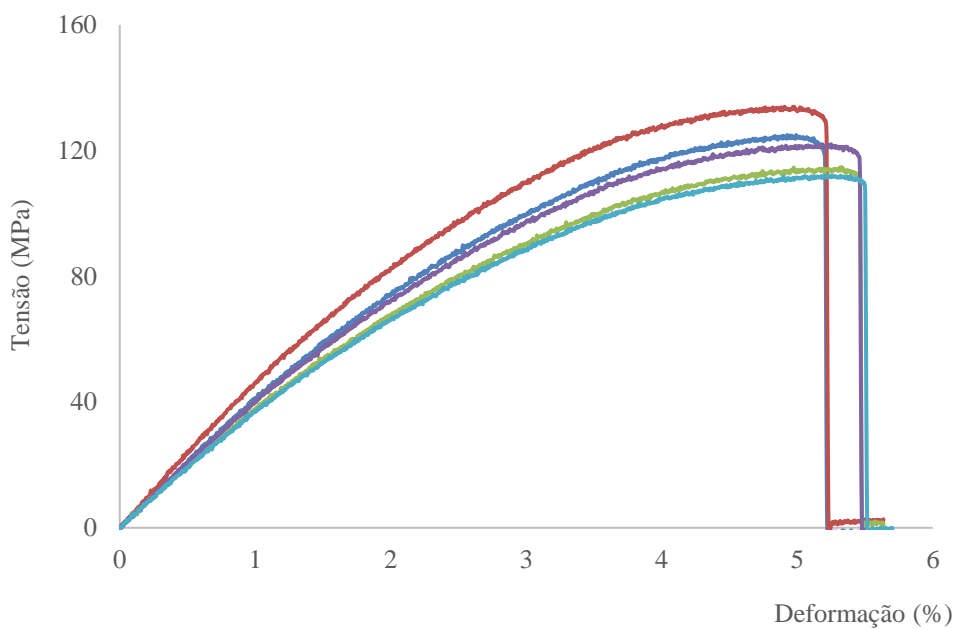
**Gráfico B. 1-** Ensaio de flexão no PETG após impressão



**Gráfico B. 2-** Ensaio de flexão no ASA após impressão



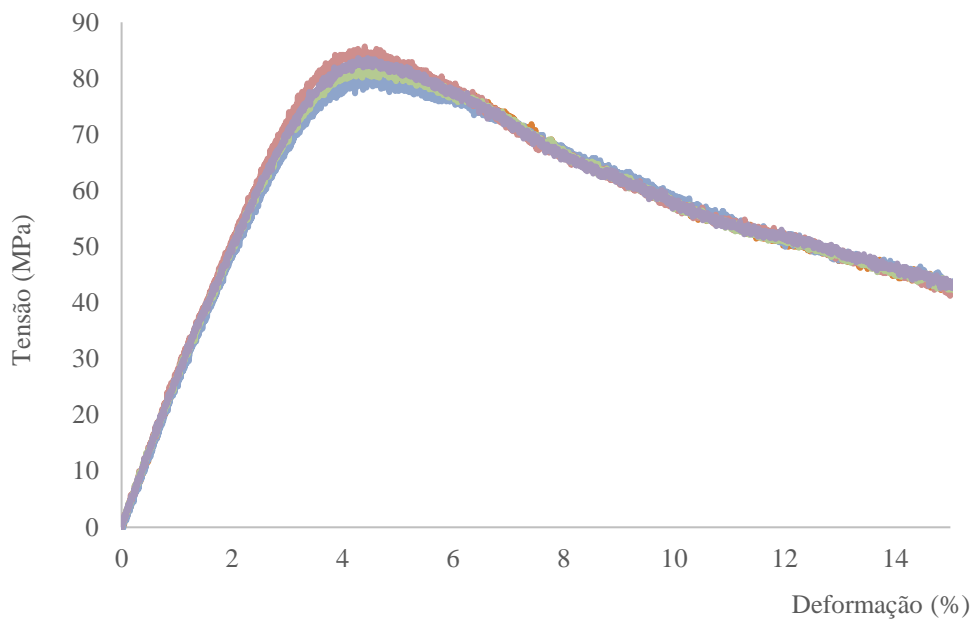
**Gráfico B. 3-** Ensaio de flexão no PAHT CF15 após impressão



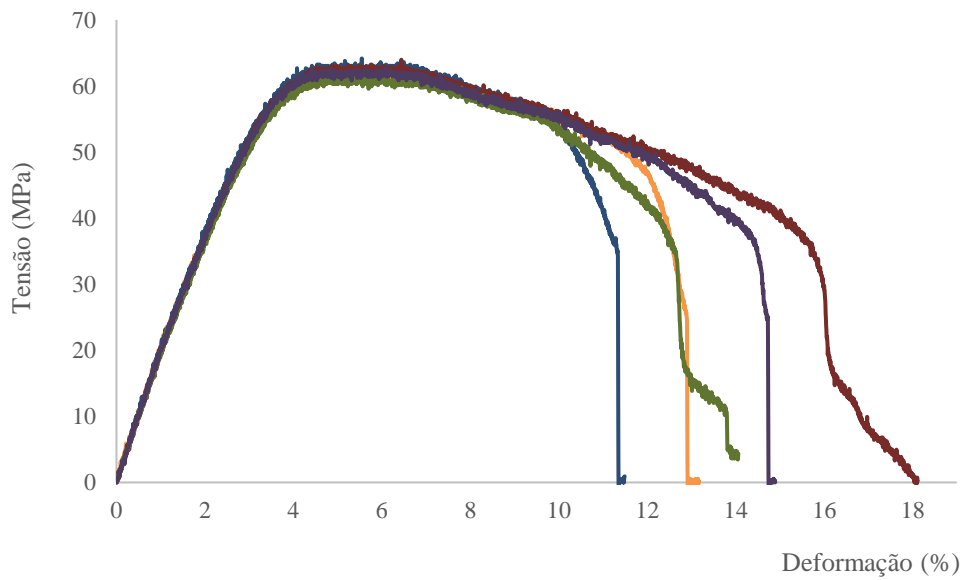
**Gráfico B. 4-** Ensaio de flexão no PA6 GF30 após impressão

## ANEXO C

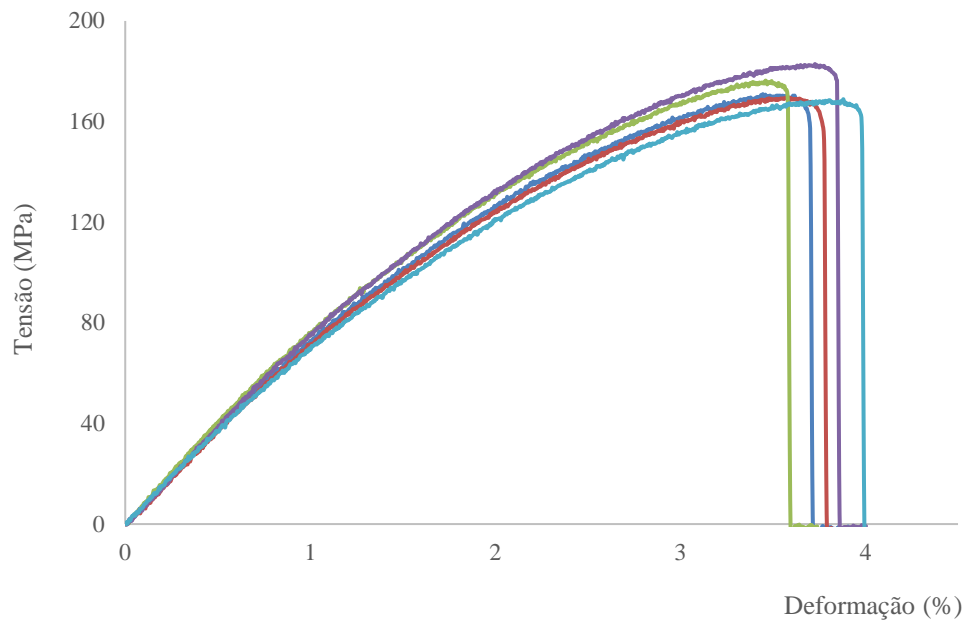
Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após um ciclo de lavagem e secagem



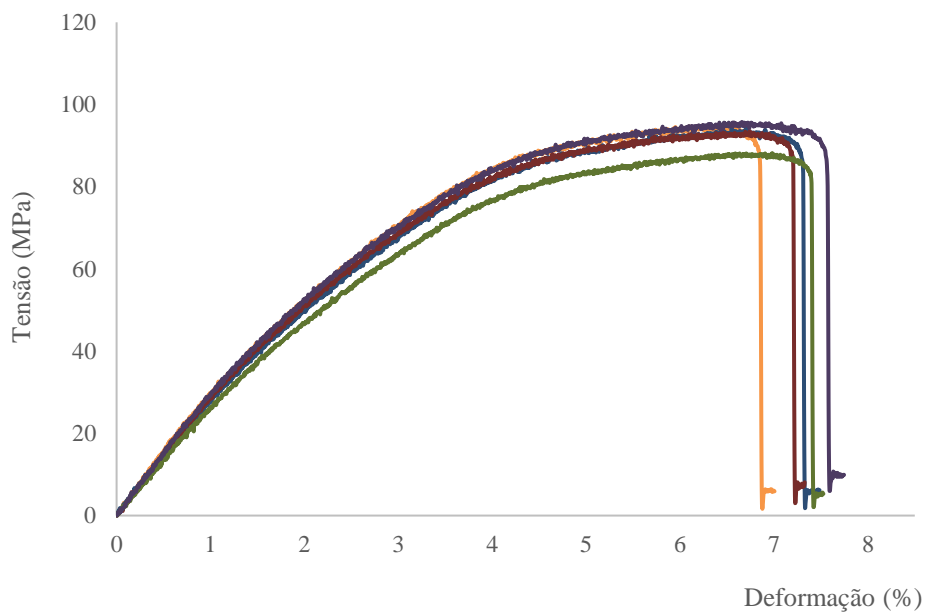
**Gráfico C. 1-** Ensaio de flexão no PETG após um ciclo de lavagem e secagem



**Gráfico C. 2-** Ensaio de flexão no ASA após um ciclo de lavagem e secagem



**Gráfico C. 3-** Ensaios de flexão no PAHT CF15 após um ciclo de lavagem e secagem

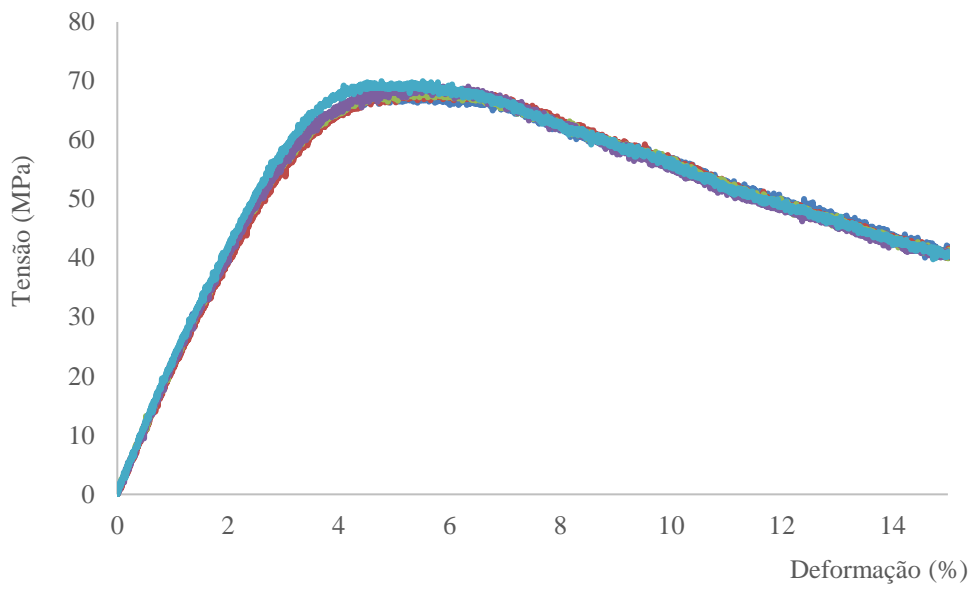


**Gráfico C. 4-** Ensaios de flexão no PA6 GF30 após um ciclo de lavagem e secagem

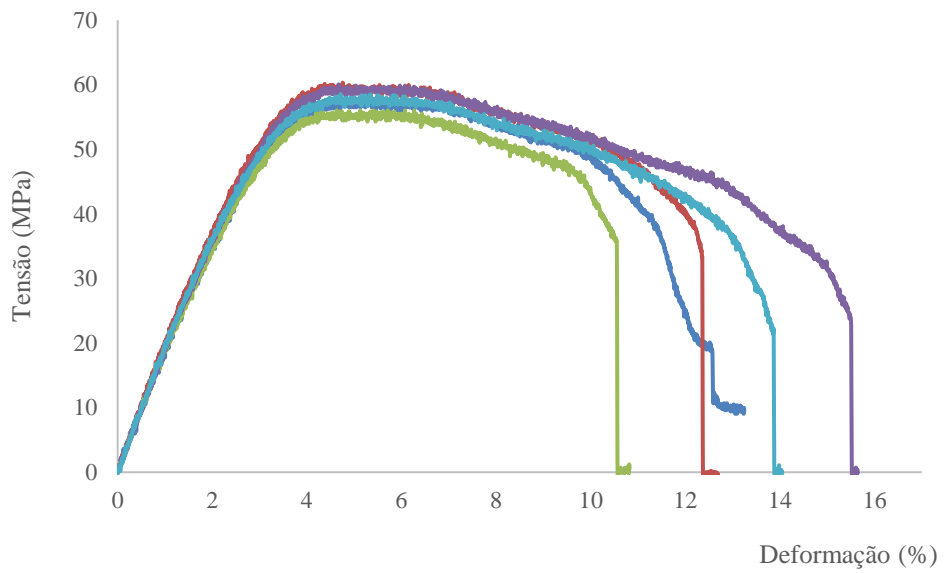


## ANEXO D

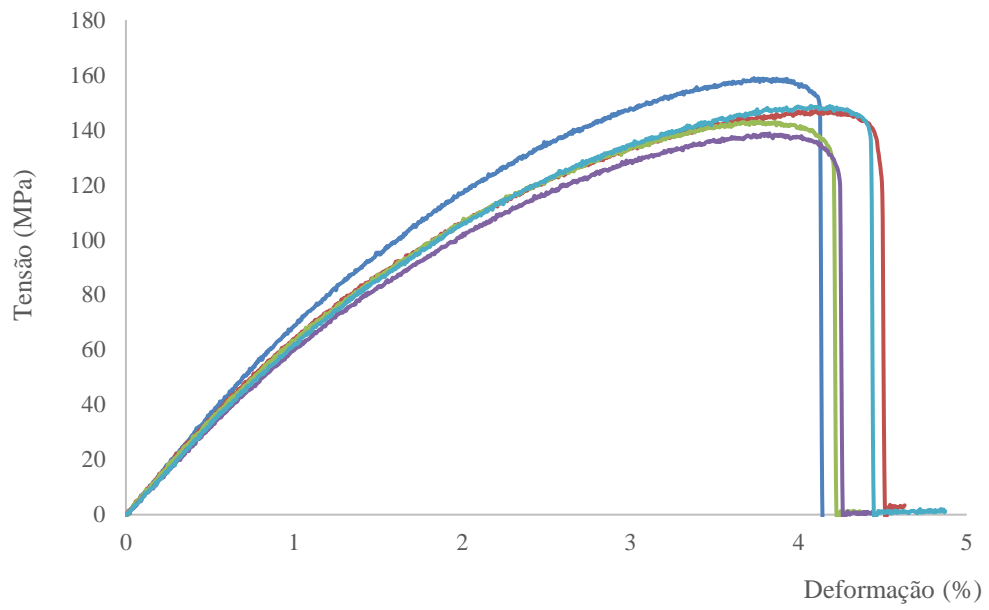
Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de flexão realizados nos provetes após trinta ciclos de lavagem e secagem



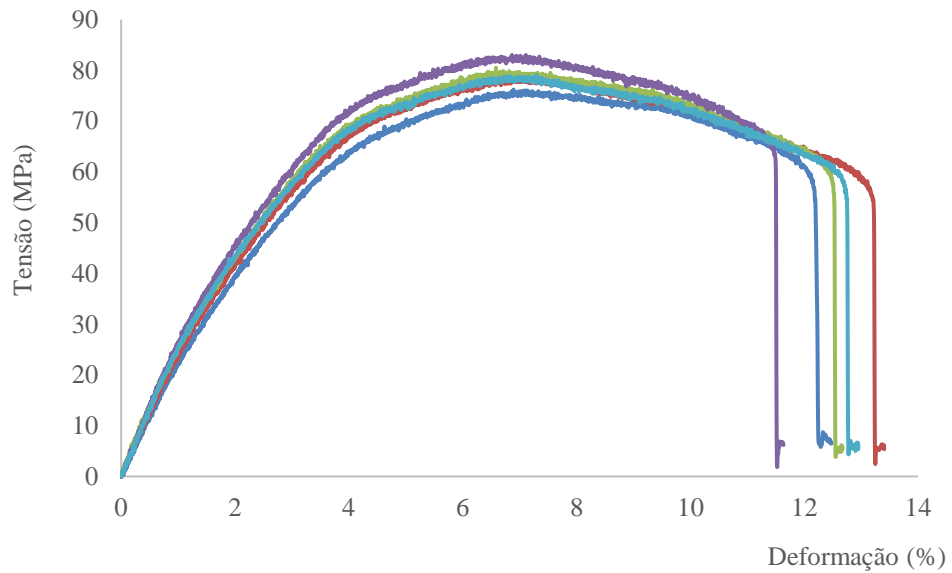
**Gráfico D. 1-** Ensaio de flexão no PETG após trinta ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico D. 2-** Ensaio de flexão no ASA após trinta ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico D. 3-** Ensaio de flexão no PAHT CF15 após trinta ciclos de lavagem e secagem



**Gráfico D. 4-** Ensaio de flexão no PA6 GF30 após trinta ciclos de lavagem e secagem