



JOSÉ CARLOS SARAMAGO CANDEIAS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

# ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE MOLDES POR MANUFATURA ADITIVA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023





# ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE MOLDES POR MANUFATURA ADITIVA

**JOSÉ CARLOS SARAMAGO CANDEIAS**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Orientador:** Professor Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

## **Júri:**

**Presidente:** Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,  
Professor Associado, FCT-NOVA

**Arguentes:** Valdemar Rebelo Duarte,  
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA

**Orientador:** Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA



### **Análise de Produção de Moldes por Manufatura Aditiva**

Copyright © José Carlos Saramago Candeias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



À minha família.





## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Bruno Soares, por toda a paciência e motivação, bem como toda a disponibilidade e ajuda na estruturação do processo e contributo científico para a realização desta tese de mestrado.

Queria também expressar o meu agradecimento à empresa Jodrax, nomeadamente ao Diretor de Manufatura Aditiva Délio Vicente e à sua equipa, que se mostrou sempre disponível e me deu a oportunidade de poder entrar em contacto com o meio industrial.

Agradeço à minha família, por todo o apoio que me deram ao longo de todo o período académico desde o primeiro momento até ao momento de completar este último passo académico, que sem eles não teria sido possível.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores da Faculdade de Ciências e Tecnologias que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, pois também foram eles que me ajudaram durante este percurso a desenvolver-me como pessoa e a preparar-me para o meu futuro profissional.



“Learning never exhausts the mind.” (Leonardo da Vinci).



## RESUMO

Atualmente, o fabrico aditivo é uma área com grande interesse industrial, com aplicações em diversas indústrias, como por exemplo a indústria aeroespacial, médica e ramo automóvel. Esta tecnologia, caracterizada pela produção de peças camada a camada, engloba uma diversidade de processos que permite a utilização de uma variedade de materiais, assim como algumas vantagens, tais como diminuir o tempo de fabrico, custos de armazém e melhorar a qualidade da peça fabricada comparativamente ao fabrico convencional (fabrico subtrativo).

O trabalho desenvolvido tem como objetivo o estudo de um molde sujeito a um processo de fabrico de compósitos, especialmente no que diz respeito à produção e teste de um molde por manufatura aditiva, algo que se encontra em desenvolvimento na indústria. Sendo assim, a manufatura aditiva pode então desempenhar neste caso um papel preponderante, dado a rapidez com que os moldes podem ser produzidos e de o custo dos mesmos ser potencialmente mais baixo se for considerada a tecnologia *Fused Deposition Modeling*, com um material de enchimento.

Utilizou-se como caso de estudo um projeto baseado num molde fornecido no qual se pretendia normalmente usar o material Al 5083, isto é, como moldagem em alumínio. Um dos principais objetivos deste trabalho é encontrar uma solução mais viável e económica, como usar um polímero de baixo custo e compatível como o PLA N, visto que o polímero terá de ser maquinável, de modo a eliminar o efeito de escada em *Fused Deposition Modeling*. Posteriormente, recorreu-se à impressora Blackbelt para proporcionar uma impressão a 45° usando a tecnologia de modelação por deposição de material fundido. No entanto, durante o decorrer da dissertação a impressora Blackbelt demonstrou problemas de funcionalidade, sendo necessário recorrer a outra impressora da empresa Jodrax, usando de igual forma a impressão a 45°.

Este trabalho é finalizado com uma proposta para um procedimento específico, com base na experiência deste caso de estudo, que engloba as abordagens utilizadas para cada fase e permite a sua utilização noutros casos que eventualmente possam aparecer, no contexto de produção de moldes por manufatura aditiva e o respetivo fabrico de compósitos.

Face aos resultados obtidos, tanto nos ensaios de maquinagem como nos ensaios de pressão e temperatura, concluiu-se que o uso do molde com o material de enchimento é uma alternativa viável. O molde com gesso conseguiu suportar as temperaturas e pressões esperadas num processo de fabrico de compósitos e comportou-se melhor do que um molde sem gesso.

A alternativa usando o PLA N acaba por ser mais económica, pois quando se fez a análise de custos, constatou-se que apresenta um custo total de 1075.74 €, que é inferior ao orçamento de um molde fabricado com o material AI 5083.

**Palavas chave:** Fabrico aditivo, Fabrico de compósitos, *Fused Deposition Modeling*, PLA N, Material de enchimento, Moldagem

## ABSTRACT

Nowadays, additive manufacturing is an area of great industrial interest, with applications in several industries, such as the aerospace, medical, and automotive industries. This technology, characterized by the production of parts layer by layer, encompasses a diversity of processes that allows the use of a variety of materials, as well as some advantages, such as reducing manufacturing time and warehouse costs and improving the quality of the manufactured part when compared to conventional manufacturing (subtractive manufacturing).

The work carried out aims to study a mold subject to a composite manufacturing process, especially concerning the production and testing of a mold by additive manufacturing, something that is being developed in the industry. Therefore, additive manufacturing can play a leading role in this case, given the speed with which molds can be produced and the fact that their cost is potentially lower if Fused Deposition Modeling technology is considered, with a material of filling.

A project based on a supplied mold was used as a case study, in which it was normally intended to use the material Al 5083, that is, as an aluminum molding. One of the main objectives of this work is to find a more viable and economical solution, such as using a low-cost and compatible polymer like PLA N, since the polymer will have to be machinable, to eliminate the ladder effect in Fused Deposition Modeling. Subsequently, the Blackbelt printer was used to provide a 45° print using Fused Deposition Modeling. However, during the dissertation, the Blackbelt printer showed functionality problems, making it necessary to use another printer from the company Jodrax, also using 45° printing.

This work ends with a proposal for a specific procedure, based on the experience of this case study, which encompasses the approaches used for each phase and allows its use in other cases that may eventually arise, in the context of mold production by additive manufacturing and the respective manufacture of composites.

Given the results obtained, both in the machining tests and in the pressure and temperature tests, it was concluded that the use of the mold with the filling material is a viable alternative. The plaster cast was able to withstand the temperatures and pressures expected in a composite manufacturing process and performed better than a cast without plaster.

The alternative using PLA N turns out to be less expensive, since when the cost analysis was carried out, it was found that it has a total cost of 1075.74 €, which is lower than the budget for a mold manufactured with the material AI 5083.

**Keywords:** Additive manufacturing, Composite manufacturing, Fused Deposition Modeling, PLA N, Material of filling, Molding



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto e Motivação .....	2
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução da Manufatura Aditiva .....	5
2.2	O Processo.....	6
2.3	Tecnologias .....	7
2.3.1	Extrusão de Material .....	8
2.3.2	Jato de Aglomerantes.....	10
2.3.3	Jato de Material.....	11
2.3.4	Fusão em Cama de Pó .....	12
2.3.5	Deposição Direta de Energia.....	12
2.3.6	Impressão por Fotopolimerização .....	14
2.3.7	Laminação de Placas.....	14
2.4	Software de Slicing .....	16
2.5	Infill .....	17
2.6	Aplicações do Fabrico Aditivo .....	18
2.7	Materiais.....	21
2.8	Principais Métodos de Fabrico de Compósitos .....	23

2.9	Vantagens de Produção de um molde a partir de Manufatura Aditiva .....	26
2.10	Utilização de um Processo Híbrido .....	28
2.10.1	Utilização de Manufatura Aditiva Híbrida para a Produção de Moldes Multimateriais de Longa Duração.....	30
<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
3.1	Contexto do Problema.....	33
3.2	Abordagem de Resolução do Problema .....	34
3.3	Seleção do Caso de Estudo.....	36
3.4	A Empresa.....	37
3.5	Orientação da Impressão a 45° .....	38
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
4.1	Seleção da Impressora .....	41
4.2	Seleção e Especificação dos Ensaios .....	42
4.3	Ensaio de Tração Uniaxial .....	43
4.3.1	Comportamento Elástico .....	44
4.3.2	Comportamento Plástico .....	45
4.3.3	Máquina Utilizada.....	46
4.3.4	Geometria dos Provetes.....	47
4.3.5	Proвете para Ensaio de Tração Uniaxial .....	47
4.4	Maquinagem de Polímeros.....	49
4.4.1	Seleção do Material.....	50
4.4.2	Design of Experiments .....	50
4.4.3	Dados sobre a Ferramenta e Máquina Utilizada .....	56
4.4.4	Impressão e Maquinagem dos Corpos de Prova .....	58
4.5	Procedimento e Escolha do Gesso para Enchimento .....	63
4.6	Ensaio de Pressão e Temperatura Esperados num Processo de Fabrico de Compósitos.....	65
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>67</b>

5.1	Respostas do Ensaio de Tração Uniaxial.....	67
5.2	Resultados dos Ensaios de Maquinagem para Efeitos de Rugosidade .....	75
5.3	Resultados dos Ensaios de Maquinagem dos Corpos de Prova (Moldes Modelo)..	77
5.4	Resultados dos Ensaios de Pressão e Temperatura Esperados num Processo de Fabrico de Compósitos .....	78
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
6.1	Custos .....	85
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
7.1	Perspetivas Futuras.....	92



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Impressão 3D.....	7
Figura 2 – Extrusão de Material.....	9
Figura 3 – Jato de Aglomerantes.....	10
Figura 4 – Jato de Material.....	11
Figura 5 – Fusão em Cama de Pó.....	12
Figura 6 – Deposição Direta de Energia.....	13
Figura 7 – Impressão por Fotopolimerização.....	14
Figura 8 – Laminação de Placas.....	15
Figura 9 - Slicing.....	16
Figura 10 - Tipos de Infill.....	18
Figura 11 - Comparação entre as diversas aplicações do Fabrico Aditivo.....	19
Figura 12 - Percentagem dos setores de Impressão 3D.....	20
Figura 13 - Hand Lay-up.....	23
Figura 14 - Open Molding.....	24
Figura 15 - Método RTM.....	26
Figura 16 - Fluxograma da metodologia aplicada.....	35
Figura 17 - Perspetivas do molde do Caso de Estudo. (a) Perspetiva 1 do molde; (b) Perspetiva do contra-molde; (c) Perspetiva 2 do molde.....	36
Figura 18 - A Empresa.....	37
Figura 19 - Impressora com orientação de impressão a 45°.....	38
Figura 20 - Impressoras utilizadas. (a) Blackbelt; (b) BCN.....	41
Figura 21 - Provetes e peças retangulares usados para efeitos de teste de maquinagem. (a) Provetes com infill 100% e 20%; (b) Peças retangulares com infill 100% e 20%.....	42

Figura 22 - Gráfico de Tensão vs Extensão que mostra o comportamento do material frágil e dúctil .....	46
Figura 23 - Máquina MTS .....	47
Figura 24 – Provete para ensaio de tração uniaxial. (a) Geometria do provete de seção transversal da norma D638-14; (b) Medidas características da norma D638-14 .....	48
Figura 25 - Exemplificação de <i>Taguchi L4 Array Experiment</i> .....	53
Figura 26 - Matriz com os fatores atribuídos .....	54
Figura 27 - Abordagem Taguchi DOE do Caso de Estudo.....	55
Figura 28 - Super Mini Mill 2.....	56
Figura 29 - Fresa utilizada de classe C193.0 HSS-E-PM .....	57
Figura 30 - Dados da fresa de classe C193.0 HSS-E-PM .....	57
Figura 31 - Moldes tipo impressos na impressora BCN.....	58
Figura 32 - Perfuração do molde tipo para possibilitar o enchimento do gesso .....	59
Figura 33 - Imagem CAD do molde original modificado .....	61
Figura 34 - Passos da incrementação de 2 mm de sobre espessura. (a) Molde original com as dimensões originais com paredes de 2 mm de espessura; (b) Maquinagem de 2 mm das paredes; (c) Sem parede e com o Infill à mostra; (d) Aumento do molde com uma <i>Wall Thickness</i> de 4 mm; (e) Maquinagem de 2 mm das paredes para as dimensões ficarem exatas .....	62
Figura 35 - Dados para a escolha do gesso para enchimento.....	63
Figura 36 - Gesso Cerâmico Extra e as suas especificações técnicas .....	64
Figura 37 - Primeiro molde modelo para teste do gesso.....	64
Figura 38 - Molde tipo sem material de enchimento (à esquerda) e molde tipo contendo o gesso de enchimento (à direita).....	65
Figura 39 - Autoclave .....	66
Figura 40 - Gráfico de Tensão vs Extensão do primeiro ensaio.....	68
Figura 41 - Provete tracionado do primeiro ensaio .....	68
Figura 42 - Gráfico de Tensão vs Extensão do terceiro ensaio .....	69
Figura 43 - Provete tracionado do terceiro ensaio .....	69
Figura 44 - Gráfico de Tensão vs Extensão do quarto ensaio .....	70
Figura 45 - Provete tracionado do quarto ensaio.....	70
Figura 46 - Gráfico de Tensão vs Extensão do segundo ensaio.....	71
Figura 47 - Provete tracionado do segundo ensaio .....	71
Figura 48 - Gráfico de Tensão vs Extensão do quinto ensaio.....	72
Figura 49 - Provete tracionado do quinto ensaio .....	72

Figura 50 - Gráfico que ilustra o comportamento de fratura frágil e fratura dúctil.....	73
Figura 51 - Obtenção dos valores de Módulo de Young e Tensão de Cedência do quarto ensaio a partir do gráfico Tensão vs Extensão.....	74
Figura 52 - Abordagem <i>Taguchi L4 Array Experiment</i> realizada para os ensaios de maquinagem .....	75
Figura 53 - Ensaios que revelam condições de maquinagem não adequadas e valores de rugosidade obtidos .....	76
Figura 54 - Maquinagem da peça retangular. (a) Ordem dos ensaios e direção de corte da peça maquinada; (b) Imagem da peça retangular maquinada e observação das condições de maquinagem não adequadas e rebarbas agarradas .....	77
Figura 55 - Molde com material de enchimento maquinado (mostra a parte do infill exposta) .....	77
Figura 56 - Molde sem gesso maquinado.....	78
Figura 57 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para <i>annealing</i> .....	79
Figura 58 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 45°C.....	79
Figura 59 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 60°C.....	80
Figura 60 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 90°C.....	81
Figura 61 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para <i>annealing</i> .....	81
Figura 62 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 45°C.....	82
Figura 63 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 60°C.....	83
Figura 64 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 90°C.....	83





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias de Fabrico Aditivo .....	8
Tabela 2 - Aplicações típicas dos processos de Impressão 3D .....	15
Tabela 3 - Propriedades do Al 5083.....	23
Tabela 4 - Especificações dos provetes impressos na BCN com infill 20%.....	43
Tabela 5 - Especificações dos provetes e peças retangulares impressas na BCN com infill 100% .....	43
Tabela 6 - Especificações das peças retangulares impressas na BCN com infill 20%.....	43
Tabela 7 - Especificações das peças retangulares impressas na Blackbelt com infill 100%.43	
Tabela 8 - Propriedades Mecânicas do PLA .....	50
Tabela 9 - Especificações dos dois moldes tipo impressos na BCN.....	59
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração uniaxial realizados.....	75
Tabela 11 - Tabela referente aos processos, temperatura e pressão utilizada .....	78
Tabela 12 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para <i>annealing</i> .....	79
Tabela 13 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 45°C .....	80
Tabela 14 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 60°C .....	80
Tabela 15 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 90°C .....	81
Tabela 16 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para <i>annealing</i> .....	82
Tabela 17 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 45°C .....	82
Tabela 18 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 60°C.....	83
Tabela 19 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 90°C .....	84
Tabela 20 - Análise de custos de impressão.....	89



## SIGLAS

<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling
<b>FFF</b>	Fused Filament Fabrication
<b>CAD</b>	Computer Aided Design ou Desenho Assistido por Computador
<b>STL</b>	Standard Triangle Language
<b>LOM</b>	Laminated Object Manufacturing
<b>SLA</b>	Stereolithography
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering
<b>DMLS</b>	Direct Metal Laser Sintering
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting
<b>EBM</b>	Electron Beam Melting
<b>LENS</b>	Laser Engineered Net Shaping
<b>EBW</b>	Electronic Beam Welding
<b>RTM</b>	Resin Transfer Molding
<b>VARTM</b>	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>DOE</b>	Design of Experiments

## INTRODUÇÃO

Atualmente, uma procura incessante pela criação de valor nos processos de produção e consequente diferenciação pode levar a uma nova adaptação e adoção de novas tecnologias e paradigmas de pensamento, considerando as necessidades atuais de agilizar as cadeias de fornecimento das empresas assim como o nível de produção [1]. Estas formas de pensamento no que diz respeito aos processos de desenvolvimento resultam em geometrias inéditas, produtos inovadores e uma complexidade de forma até agora inalcançável. Trata-se de uma era de incrível progresso e cada vez mais surge o termo de indústria 4.0, intitulada de nova revolução industrial [1].

O fabrico aditivo não está no centro, mas é uma parte importante dessa revolução e serve de base à criação da maioria das possibilidades produtivas enquadradas neste contexto. O fabrico aditivo, baseado na premissa de adição sucessiva de material para a criação de peças, permite a execução dos componentes que se desejam obter de maneira gradual, camada a camada, onde várias tecnologias estão disponíveis para serem utilizadas dependendo do que se pretende alcançar. Vários fatores são decisivos para determinar qual a tecnologia que deve ser usada, como por exemplo o material, precisão, complexidade, necessidade de acabamento e custos. Formas que até hoje se apresentam como extremamente complexas ou impossíveis de alcançar, podem ser executadas sem dificuldade ou custo acrescido [2].

A impressão 3D ou manufatura aditiva começou a ser desenvolvida nos anos 80, inicialmente focada no processo de prototipagem rápida, contudo, atualmente, começa a desempenhar um papel bastante importante na indústria, com especial importância na produção de pequenas séries e colmatando falhas nas cadeias de fornecimento.

## 1.1 Contexto e Motivação

Com uma procura cada vez mais acentuada no que diz respeito ao avanço tecnológico da manufatura aditiva, torna-se interessante testar as tecnologias, neste caso a tecnologia FDM/FFF, associada ao fabrico de moldes por manufatura aditiva. É possível que, com a produção e teste do molde em questão, pode vir-se a descobrir uma nova via na indústria que pode contribuir para baixar os custos e independência de processos subtrativos, que muitas vezes podem atingir custos muito elevados além de serem mais demorados [1].

Existe a necessidade de ver como efetivamente se comporta um molde compósito fabricado por manufatura aditiva e se realmente é uma opção viável para ser aplicada na indústria. Ao longo deste trabalho também é necessário verificar o comportamento do material de enchimento, o gesso, e se suporta as temperaturas comuns do processo de fabrico de compósitos que deverá ser utilizado. Decidiu-se utilizar um gesso como material de enchimento em vez de um metal, por exemplo, porque seria extremamente difícil a introdução de metal no molde. Logo, se for utilizado um gesso, é introduzido em forma líquida que depois irá solidificar e conferirá uma resistência mecânica considerável.

## 1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se analisar e estudar o comportamento da produção de um molde por manufatura aditiva, produzido para o fabrico de compósitos. O molde terá toda a zona exterior feita por FDM/FFF e o interior será preenchido por um material compatível, com o objetivo de diminuir o tempo de produção e principalmente o custo. Pretende-se substituir o material inicialmente proposto pelo fornecedor, o Al 5083, por um polímero maquinável, de modo a eliminar o efeito de escada presente na tecnologia FDM.

Para manter o custo destes moldes baixo, o polímero selecionado terá de ser de baixo custo, o que deixa imediatamente de fora os polímeros de elevada performance, tais como os polímeros da família dos PAEK (PEKK e PEEK). Para uma abordagem inicial, é utilizado o polímero PLA N como material e um dos principais objetivos é estudar a maquinabilidade de peças e provetes produzidos através da tecnologia FDM numa das impressoras da empresa Jodrax, verificando-se se realmente é o material mais adequado para o estudo que se pretende realizar, isto é, se suporta as cargas e vibrações. Isto pode ser concretizado submetendo um molde às temperaturas e pressões esperadas no processo de fabrico de compósitos escolhido [3]. Outra possibilidade seria utilizar os materiais ABS, ASA e PETG, que também são de baixo custo embora o PLA N seja o mais económico e eficaz para o que se pretende obter neste projeto.

Por fim, um dos objetivos é também determinar os custos associados e comparar com um molde semelhante realizado por maquinagem de alumínio e assim determinar as vantagens e desvantagens do material PLA N ou se devia ter sido utilizado o Al 5083 proposto pelo fornecedor vinculado à Jodrax.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo, é realizada uma introdução à dissertação, que inclui a motivação e os objetivos que se pretende atingir com este trabalho. No segundo capítulo, é elaborada uma revisão bibliográfica sobre a manufatura aditiva que se divide em vários subcapítulos, como o processo, as tecnologias que são usadas, o conceito de software de slicing e Infill, as várias aplicações do fabrico aditivo, os materiais e para concluir os principais métodos de fabrico de compósitos e as suas vantagens. O capítulo 3 apresenta um estudo sobre o contexto do problema, assim como uma abordagem de resolução do mesmo. De seguida, é apresentada a empresa Jodrax e definida a orientação da impressão a 45° subjacente ao caso de estudo. No quarto capítulo é apresentada a metodologia experimental, onde são apresentados e discutidos os ensaios experimentais que foram efetuados assim como todos os casos que estejam vinculados à metodologia experimental. No quinto capítulo, são apresentados os resultados experimentais, onde através de cálculos, análise de gráficos e outras observações necessárias, consegue-se alcançar o que é pretendido. No sexto capítulo, retiram-se as conclusões com base nos testes realizados e resultados obtidos, bem como se procede à realização de uma avaliação económica para comparar custos. Finalmente, no sétimo capítulo faz-se uma conclusão geral do que foi feito e obtido e enuncia-se as perspetivas futuras de trabalho da tese de mestrado.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são revistos e enunciados todos os conteúdos que são essenciais para compreender o que é realizado e descrito nos capítulos seguintes. Trata-se de uma abordagem bastante teórica, porém crucial para melhor entendimento do que é proposto na dissertação.

### 2.1 Introdução da Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva há algum tempo podia entender-se somente por impressão 3D ou prototipagem rápida, contudo, após a evolução desta tecnologia cada vez mais recorrente, formalizou-se o termo manufatura aditiva. O termo prototipagem rápida costuma ser usado numa variedade de indústrias para caracterizar um processo no qual se cria rapidamente uma representação do sistema ou peça antes da comercialização final [4]. Um protótipo é algo que é criado rapidamente e serve como um modelo de base a partir do qual outros modelos e o produto final será derivado. Deve-se enunciar que engenheiros de software e consultores também usam o termo prototipagem rápida para descrever um processo de desenvolvimento de negócios ou soluções de software que permite que os clientes e outras partes interessadas testem ideias e forneçam feedback durante o processo de desenvolvimento. Todavia, é importante realçar que o conceito de manufatura aditiva é o mais utilizado atualmente, no qual já é subentendido o processo de prototipagem rápida [3].

A manufatura aditiva tem desempenhado um papel fundamental na prática de medicina e, consequentemente, está transformando-a de uma maneira bastante positiva.

No entanto, ainda existe muito trabalho e pesquisa a serem realizados antes que as tecnologias de manufatura aditiva se tornem pilares na indústria, porque nem todos os materiais de manufatura normalmente usados podem ser facilmente utilizados. É preciso considerar vários fatores antes de avançar para uma etapa seguinte. A precisão precisa de ser melhorada para eliminar a necessidade de processos de acabamento, o que acontece diversas vezes no que diz respeito ao fabrico de peças. O crescimento contínuo e crescente experimentado desde os primórdios e os resultados de sucesso até ao



presente permitem o otimismo de que a manufatura aditiva tem um lugar significativo no futuro da manufatura.

O fabrico aditivo é um método de manufatura radicalmente diferente com base em tecnologia avançada levando à construção de peças, aditivamente, em camadas na escala de mm. Isso é fundamentalmente diferente de qualquer outra técnica de manufatura tradicional [2].

Os processos tradicionais de projeto e produção muitas vezes impõem uma série de restrições inaceitáveis, como por exemplo ferramentas dispendiosas e que não são necessárias, acessórios e a necessidade de montagem de peças complexas. Em contrapartida, o fabrico aditivo destaca-se por ser um conjunto de processos para criar peças de forma direta e eficaz, adicionando material camada por camada de muitas maneiras dependendo da tecnologia que é usada.

A manufatura aditiva disponibiliza liberdade de design, consolidação de peças, integração de funções ou economia de tempo e custo. Essas funcionalidades tornam o fabrico aditivo interessante para o ramo da indústria [1].

Além disso, apresenta o potencial de mudar o atual cenário de manufatura substancialmente e consequentemente atraiu muita atenção da indústria e da investigação ao longo das últimas décadas.

No entanto, esses desenvolvimentos exigem melhorias no que diz respeito à própria tecnologia e a possível implementação bem-sucedida na cadeia de criação de valor.

Outros aspetos que os designers industriais devem ter em conta são: discretização física e digital das peças que são produzidas; impacto da manufatura aditiva no processamento das propriedades do material e requisitos para o processamento usando as várias tecnologias de fabrico aditivo; características dos processos de manufatura aditiva e as capacidades das máquinas que estão associadas ao fabrico aditivo; novos requisitos e desafios ligados à metrologia e controlo de qualidade; manutenção, reparação e reciclagem que são essenciais ao longo da vida de um produto; fatores externos que incluem o ambiente regulatório. Devido ao *bottom up* associado à natureza da manufatura aditiva, pode haver implicações muito distintas para os projetos, artefactos intermediários que são criados para auxiliar a produção assim como o processo do projeto em si [1].

## 2.2 O Processo

Basicamente, os processos de fabrico aditivo adquirem as informações de um arquivo de projeto auxiliado por computador (CAD) que é posteriormente convertido num arquivo de STL. De seguida ocorre o fatiamento contendo as informações de cada camada que será impressa e existe a aproximação por

triângulos. Posteriormente, estabelece-se uma conexão com a impressora e usa-se o slicer adequado a cada impressora para concretizar a impressão. Este assunto é abordado de seguida [5].

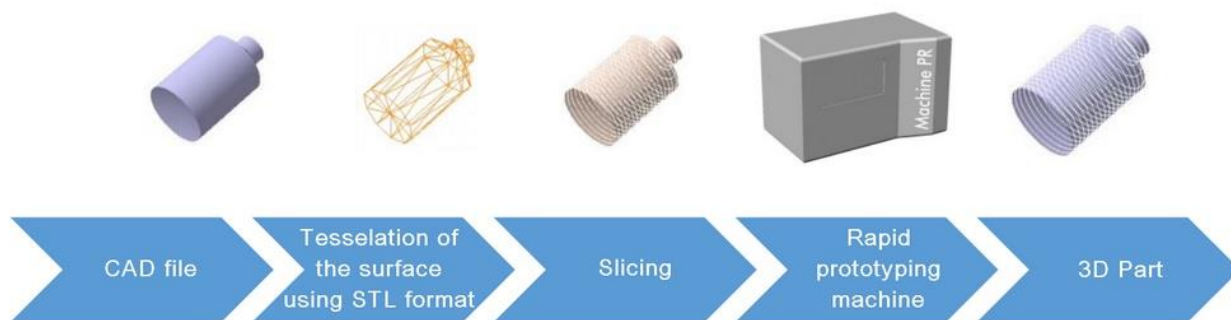


Figura 1 - Processo de Impressão 3D

## 2.3 Tecnologias

Os processos de manufatura aditiva podem ser classificados em diversas categorias, que são apresentadas na tabela seguinte (Tabela 1) [4].

Tabela 1 - Tecnologias de Fabrico Aditivo

Categorias	Tecnologias
Extrusão de Material	Modelação por Deposição de Material Fundido Fabricação por Filamento Fundido Criação de Contorno
Laminação de Placas	LOM (Laminated Object Manufacturing)
Impressão por Fotopolimerização	SLA (Stereolithography)
Fusão em Cama de pó	SLS (Selective Laser Sintering) DMLS (Direct Metal Laser Sintering) SLM (Selective Laser Melting) EBM (Electron Beam Melting)
Jato de Aglomerantes	Impressão Indireta de Jato de Tinta
Deposição Direta de Energia	LENS (Laser Engineered Net Shaping), EBW (Electronic Beam Welding)
Jato de Material	Impressão de Jato de Tinta

### 2.3.1 Extrusão de Material

Mais conhecido por *Fused Filament Fabrication* (FFF) ou FDM. É a tecnologia mais utilizada na impressão 3D, pois o custo não é tão elevado e apresenta a capacidade de produzir geometrias muito complexas, assim como criar furos internos que seriam inalcançáveis com outras tecnologias [6]. Filamentos de um material de plástico são aquecidos, geralmente PLA ou ABS, até chegar a um estado viscoplástico e ocorrer a deposição pelo bico de extrusão, permitindo o endurecimento dos filamentos à medida que vão arrefecendo. Pela movimentação do mesmo nos eixos X, Y, Z, forma-se, camada por camada, o objeto que se deseja obter.

A principal vantagem desse tipo de fabrico em relação aos demais tipos é o preço do material ser mais económico, além de ser mais fácil de armazenar e usar [7]. O PLN Filkemp, por exemplo, é muito fácil de adquirir e usar numa impressora.

Outro ponto importante é o facto da tecnologia FFF não necessitar de muito tratamento pós-impressão, sendo necessário normalmente retirar os suportes, quando existentes, o qual pode ser feita de forma mecânica ou de maneira química, menos usual [4].

As desvantagens são a necessidade de suportes dependendo da geometria da peça e qualidade menor no acabamento das impressões em comparação com a de outros métodos.

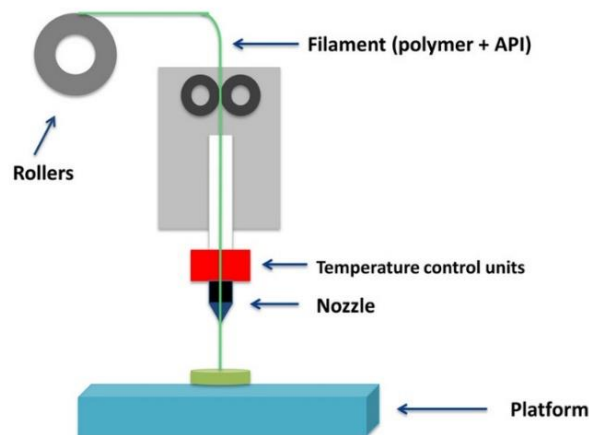


Figura 2 – Extrusão de Material

Aplicações de impressão 3D FFF:

- **Manufatura:** Com prazos de entrega mais rápidos do que os restantes e uma ampla gama de materiais de engenharia, a impressão 3D FFF ou FDM é amplamente utilizada nas indústrias de manufatura. As impressoras 3D fornecem ferramentas e peças de reposição rápidas para manter o máximo de tempo de atividade e produtividade na linha de produção. E são usadas para criar peças de uso final de forma flexível, como medidores de qualidade, para acelerar o tempo de lançamento de um produto no mercado [7].
- **Prototipagem:** Materiais de custo mais baixo e tempos de impressão curtos tornam a impressão 3D FDM ideal para um processo de design iterativo [7]. Protótipos impressos em 3D podem ser usados para visualizar conceitos ou testar funcionalmente peças técnicas.
- **Educação:** O hardware FFF é acessível e fácil de usar além de permitir uma variedade de aplicações educacionais - envolver os alunos mais jovens com os princípios básicos até fornecer laboratórios de produção para estudantes universitários trabalharem em projetos de engenharia e desenvolverem habilidades para o local de trabalho moderno [7].

### 2.3.2 Jato de Aglomerantes

Este processo necessita da utilização de dois materiais: um material ligante e outro material que se pretende utilizar na forma de pó. O agente ligante desempenha uma função adesiva das camadas de pó, sendo que essas vão sendo depositadas sucessivamente. Deve-se realçar que o adesivo é utilizado na forma líquida [1].

Esta tecnologia de manufatura aditiva foi desenvolvida no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) com o objetivo de imprimir peças de grande complexidade em materiais de nível industrial.

É um método de impressão de baixo consumo de energia e também económico. Ao contrário do processo de sinterização seletiva a laser, o agente de ligação líquido é usado para ligar as peças em vez de ser usado um laser. As peças ao serem formadas, necessitam de ser curadas, se forem de plástico. Possui a vantagem de usar materiais acessíveis e produz peças rapidamente, o que faz com que o custo operacional seja menor por peça do que o habitual. A sua produção é escalável, tornando-se ideal para grandes produções de peças sejam de grande tamanho ou mais pequenas e precisas. O Jato de Aglomerantes pode ser aplicado numa variedade de aplicações, como por exemplo: fabrico de protótipos coloridos, peças pequenas e funcionais metálicas e moldes de fundição em areia na vertente plástica/cerâmica [8].

Em relação às suas vantagens e desvantagens, como foi referido anteriormente, este processo é mais rápido e económico do que muitas tecnologias de impressão 3D. No entanto, peças metálicas produzidas por este processo têm propriedades mecânicas inferiores às peças que são produzidas por DMLS/SLM. As peças que são mais delicadas e pequenas podem eventualmente quebrar e serem danificadas na fase do pós-processamento [8]. Sendo assim, ocorre uma escolha muito seletiva em relação aos materiais que devem ser usados utilizando esta técnica.

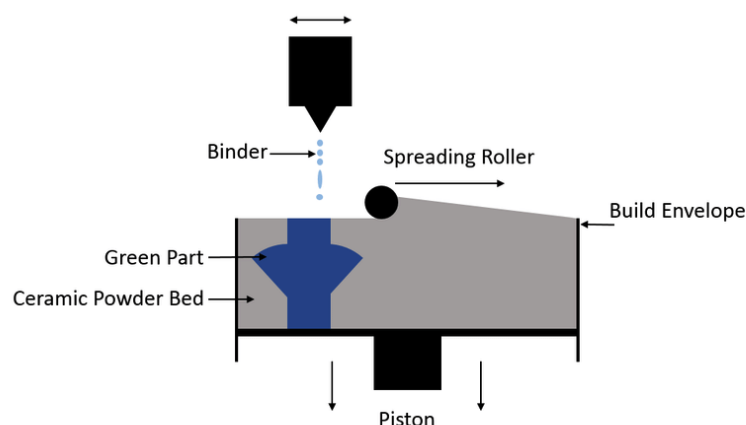


Figura 3 – Jato de Aglomerantes

### 2.3.3 Jato de Material

Esta tecnologia pode ser comparada a um processo padrão de jato de tinta 2D. A utilização de metais, fotopolímeros ou ceras que solidificam quando são expostos ao calor e à luz, mais especificamente a ultravioleta, garante que as peças sejam constituídas camada por camada. Este processo permite que materiais distintos sejam impressos dentro da mesma peça [9].

A deposição de material ocorre na formação de gotas, por métodos térmicos ou piezoelétricos, que, posteriormente, serão polimerizadas por uma luz ultravioleta, formando camada a camada. À medida que as gotas vão sendo depositadas na plataforma de impressão, são curadas e solidificadas através da luz ultravioleta [10].

Esta tecnologia é uma forte opção para protótipos realistas. Além disso, permite que um designer imprima um trabalho em diversas cores e com vários materiais numa única impressão [9]. O modelo que se pretende alcançar deve ser exportado através de arquivos STL separados de forma a designar um material ou cor diferente para partes específicas da peça em questão.

No que diz respeito às desvantagens desta tecnologia, uma delas é o custo alto e o facto de que os fotopolímeros associados à luz ultravioleta perderem propriedades mecânicas ao longo do tempo e por isso podem eventualmente ficar danificados.

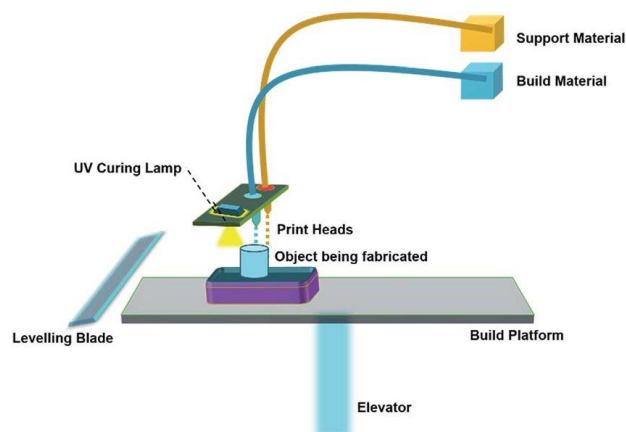


Figura 4 – Jato de Material

### 2.3.4 Fusão em Cama de Pó

A tecnologia Fusão em Cama de Pó forma produtos com precisão. Trata-se de uma técnica que permite o fabrico de uma vasta gama de produtos que são complexos relativamente à sua geometria através de uma fonte de calor, principalmente laser ou feixe de eletrões, para ocorrer a fusão de partículas de pó camada por camada, constituindo dessa forma a peça. Os utilizadores beneficiam-se de uma liberdade a nível de design, uma vez que Fusão em Cama de Pó possui um leque de tecnologias subsequentes e materiais viáveis [11].

Basicamente, o material é espalhado pela mesa de trabalho através de um mecanismo composto por rolos. O pó disperso e não utilizado é posteriormente removido numa fase de pós-processamento [4].

As suas vantagens são: possui um custo baixo, não necessita de suportes ou, se suportar, são mínimos, tem uma ampla escolha de materiais e garante a reciclagem do pó. Entretanto as suas desvantagens são: tempo relativamente demorado e lento de impressão, necessidade de um pós-processamento, algumas vezes as peças têm propriedades estruturais mais fracas, qualidade mais baixa na textura da superfície, distorção de temperatura e grande utilização de energia [12].

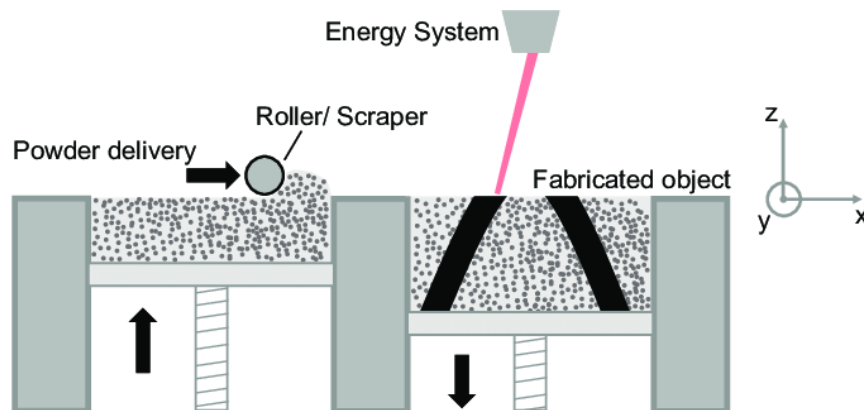


Figura 5 – Fusão em Cama de Pó

### 2.3.5 Deposição Direta de Energia

Esta tecnologia de impressão 3D é conhecida por usar uma fonte de energia focada, como um laser, feixe de eletrões ou arco de plasma com o objetivo de fundir o material que é depositado ao mesmo tempo pelo bico de extrusão. Assim como acontece em outros processos de manufatura aditiva,

Deposição Direta de Energia pode ser aplicada para adicionar material a componentes existentes e serve também para reparações ou também para produzir novas peças.

O processo abrange outras tecnologias como LENS (*Laser Engineered Net Shaping*), DMD (*Direct Metal Deposition*), EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*), *Directed Light Fabrication* e *Laser Cladding*, dependendo das aplicações exatas [4].

Este processo funciona através da deposição de material que foi derretido numa determinada superfície onde se solidifica, fundindo os materiais para formar a estrutura que se pretende alcançar. As máquinas usam um bocal que é constituído por um braço de vários eixos, permitindo a sua movimentação em várias direções e conseqüentemente permite uma deposição variável [10]. Realiza-se dentro de uma câmara com níveis controlados de oxigénio. Usando os feixes de eletrões, este processo é realizado em vácuo, enquanto se for usado o laser usa-se uma câmara inerte ao trabalhar com metais reativos.

As vantagens desta tecnologia são: A capacidade de produção e permitir a produção de peças de grande tamanho com o mínimo de ferramentas. Este processo também tem a vantagem de criação de componentes com gradientes de composição usando vários materiais com diferentes composições.

Quanto às desvantagens, o acabamento varia de acordo com o material usado e é necessário pós-processamento para garantir o efeito desejado. O uso de material para este processo ainda se encontra muito limitado e tecnologias baseadas em fusão ainda requerem mais pesquisa para haver um enquadramento no uso convencional [13].

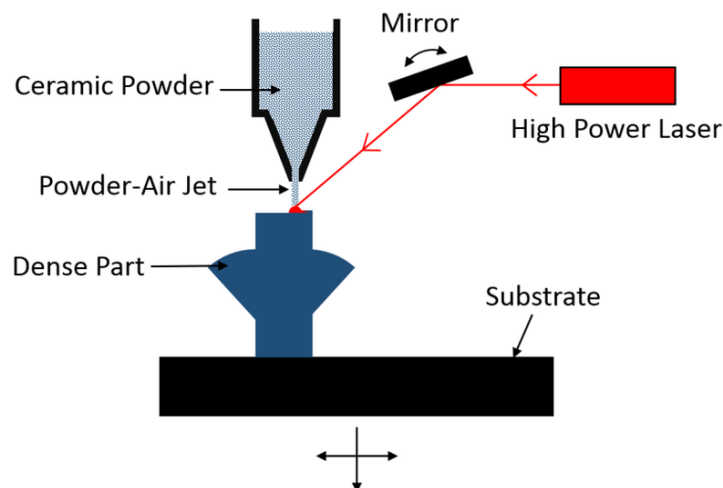


Figura 6 – Deposição Direta de Energia



### 2.3.6 Impressão por Fotopolimerização

Impressão por Fotopolimerização utiliza uma cuba de resina fotopolimérica líquida, onde o modelo é formado camada por camada. A resina é curada ou endurecida através da aplicação de uma luz ultravioleta, enquanto a plataforma move o objeto em questão para baixo após uma nova camada ser curada [10]. Uma vez que o processo usa líquido para construir objetos, não existe necessidade de suportes nessa fase de construção, diferenciando-se dos métodos que utilizam o pó.

As resinas são curadas ao usar luz ultravioleta ou ao usar um processo de fotopolimerização, sendo que a luz ultravioleta é direcionada através da superfície da resina com o auxílio de espelhos controlados por um motor [14]. Quando a resina entra em contacto com a luz ultravioleta, cura ou endurece como já foi referido anteriormente.

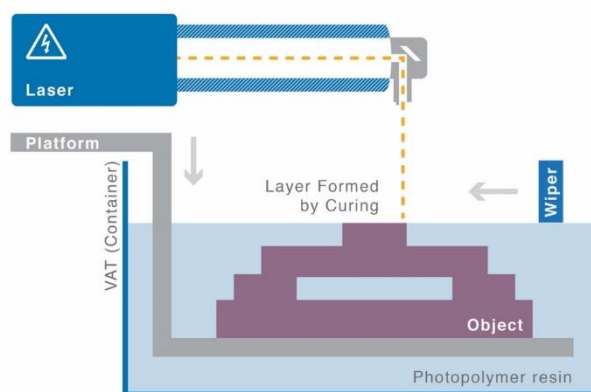


Figura 7 – Impressão por Fotopolimerização

### 2.3.7 Laminação de Placas

Esta tecnologia também conhecida como *Laminated Object Manufacturing (LOM)*, consiste num rolo de material que vai passando por uma mesa e é cortado para obter uma determinada geometria. Existe uma sobreposição de várias camadas de material composto de folhas de metal para o fabrico de uma peça. Cada folha é cortada com um laser ou espelhos para haver um ajuste em relação à seção transversal da peça. Seguidamente, agrega-se a camada em questão à anterior [15]. Esse processo é repetido sucessivamente até chegar a uma altura em que se obtém o objeto desejado.

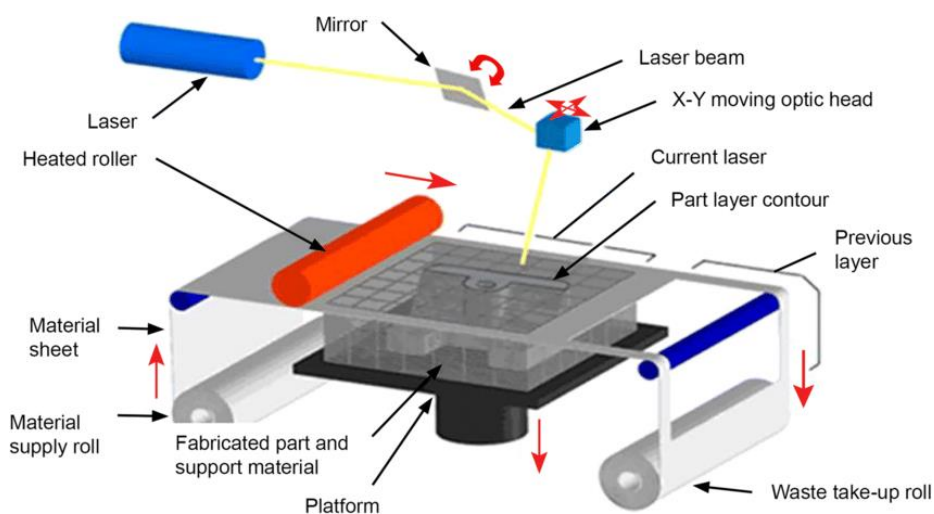


Figura 8 – Laminação de Placas

As tecnologias enunciadas acima podem diferir em diversos fatores, como o estado (filamento, pó e líquido), o tipo de material utilizado e a forma como o material se liga. Na Tabela 2, são referidas as aplicações típicas dos processos mais conhecidos e que foram referidos anteriormente.

Tabela 2 - Aplicações típicas dos processos de Impressão 3D

Processo	Aplicação típica
Extrusão de Material	Moldes, testes de forma e ajuste e jigs e acessórios
Jato de Aglomerantes	Moldes, peças metálicas funcionais e modelos de cores completos
Laminação de Placas	Manufatura híbrida e peças cerâmicas
Deposição Direta de Energia	Soldadura e corte industrial, proteção de infraestruturas e energia
Jato de Material	Protótipos tipo moldes de injeção, protótipos de produtos a cores e medicina
Impressão por Fotopolimerização	Protótipos de polímero tipo injeção, joalheria e medicina dentária
Fusão em Cama de Pó	Peças metálicas funcionais (aerospacial e ramo automóvel), medicina e medicina dentária

## 2.4 Software de Slicing

O ato de converter um modelo 3D num conjunto de instruções para as impressoras é chamado de Slicing. O modelo 3D é fatiado em camadas finas e determina ainda mais como cada camada deve ser impressa para obter melhor resistência, tempo mínimo e outros. Estão disponíveis vários parâmetros que podem ser alterados de acordo com o que se pretende na impressão, como por exemplo o padrão e percentagem de preenchimento [16].

Um software slicer adota um modelo CAD 3D que geralmente é um arquivo de formato STL e converte-o num g-code que fornece comandos para a impressora. A seguir estão os três principais tipos de configurações que podem ser controladas num software slicer:

1. Configurações de impressão: alturas de camada, cascas, percentagem de preenchimento e velocidade;
2. Configurações do filamento: diâmetro do filamento, multiplicador de extrusão, temperatura da extrusora e cama de impressão;
3. Configurações da impressora: diâmetro do bico, formato da cama de impressão (L x W) e deslocamento Z.

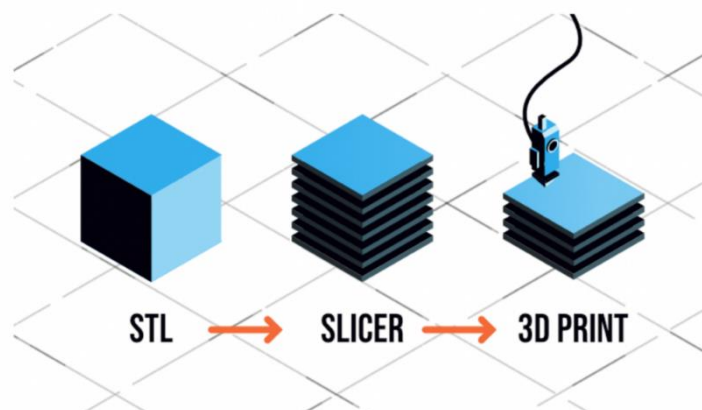


Figura 9 - Slicing

## 2.5 Infill

Há que ter em conta que as peças impressas em 3D possuem duas zonas diferentes, a casca e o preenchimento (infill). A parametrização desses valores influencia na resistência mecânica, no acabamento, no tempo de impressão e no custo de operação, por isso é extremamente importante que um usuário perceba essas influências. A casca é a parede externa da peça no qual estão incluídas tanto as camadas em contato com a base de impressão como as camadas superiores que atribuem o acabamento superficial final [16].

Neste contexto, concentra-se no preenchimento, ou seja, a parte interna da peça. Os programas de slicing, como Cura3D e Simplify3D, permite-nos escolher a forma e a percentagem de preenchimento que se pretende.

Basicamente, o preenchimento é a quantidade de material que ocupa a parte interna da peça. Essa pode ser modificada de 0% (peça oca) a 100% (parte totalmente sólida) a partir dos programas de slicing. O valor ideal da percentagem de preenchimento depende da aplicação final da peça em questão. A percentagem mais usada, segundo estatísticas, que muitos programas de slicing usam como dado padrão é de 20%. Com esta percentagem consegue-se peças com resistência média/alta, baixo peso e um tempo de impressão muito eficiente, que se caracteriza em peças com uma boa relação resistência/custo [17].

Para protótipos não funcionais, modelos e outros objetos de simples exposição o preenchimento recomendado é de 10%. Com uma percentagem tão baixa, os tempos de impressão de figuras ou objetos complexos que não precisam de resistência a nenhum tipo de tensão são reduzidos [17]. Pelo contrário, para atingir a máxima resistência devem fazer as suas peças com 100% de enchimento, mas isso implica custos mais elevados, tanto em termos de tempo como de material e que as peças são mais pesadas. Fora dos valores já mencionados, recomenda-se estudar cada caso detalhadamente de acordo com a resistência/tempo de impressão tendo em conta que de 25% a 50% de enchimento a resistência é aumentada em 25% e de 50% a 70% de resistência de preenchimento é aumentada em apenas 10%.

No que diz respeito a figuras e objetos que não são propícios a suportar cargas, recomenda-se utilizar 10% de preenchimento, 20% para peças de uso normal com cargas médias/baixas, 60% caso seja necessário fazer peças finais com resistência média e válidas para eventualmente serem perfuradas ou aparafusadas e, finalmente, 100% para as peças atingirem a máxima resistência do material [18]. A orientação de fabrico das peças afeta a resistência final, ou seja, a orientação importa tanto como a percentagem de preenchimento.

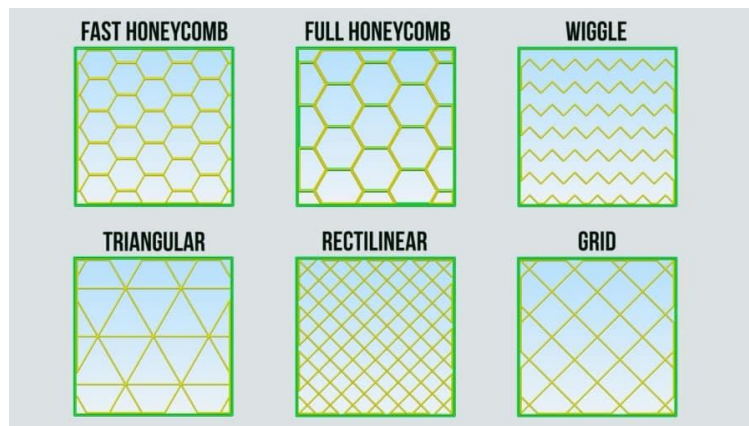


Figura 10 - Tipos de Infill

## 2.6 Aplicações do Fabrico Aditivo

A manufatura aditiva foi inicialmente utilizada para prototipagem rápida [4]. Consequentemente, aceleraram o desenvolvimento de produtos e a entrada no mercado. Com a evolução dos processos e avanço tecnológico, a manufatura aditiva tem encontrado cada vez mais espaço na produção em série.

Assim, abre novas oportunidades em variados setores como saúde, ramo automóvel, transporte e aeroespacial, bem como mercados banais, mas em grande massa, como estilo de vida, bens de consumo, produção e indústria. O foco é aproveitar sempre a impressão 3D industrial para se diferenciar da concorrência e estabelecer bases sustentáveis para o futuro [19].

1. Ramo automóvel;
2. Indústria aeroespacial;
3. Indústria de plástico;
4. Indústria de fundição;
5. Indústria de calçados;
6. Construção civil;
7. Joalheria;
8. Medicina;
9. Odontologia;
10. Educação básica;
11. Educação superior;
12. Artes plásticas;
13. Outros.

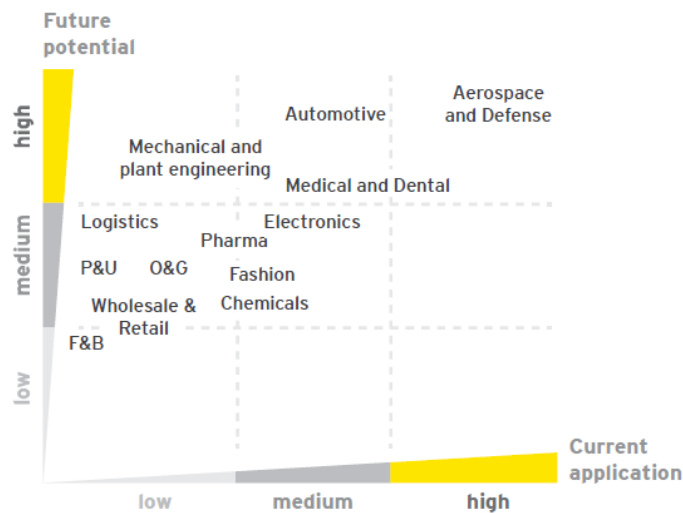


Figura 11 - Comparação entre as diversas aplicações do Fabrico Aditivo

No entanto, deve-se identificar os principais setores onde o fabrico aditivo se tem manifestado com maior frequência e eficácia, que são: ramo automóvel, indústria aeroespacial e médica.

A indústria aeroespacial demonstrou interesse nessas tecnologias devido à capacidade de fabricar peças metálicas diretamente usando materiais como o titânio, que é adequado para aeronaves, e a capacidade de fabricar produtos complexos e de alto desempenho facilmente sem quaisquer ferramentas adjacentes [20].

Com a manufatura aditiva, peças complexas podem ser fabricadas diretamente a partir de dados obtidos através de scan que proporcionam melhor visualização de anatomias específicas. Também auxilia no planeamento pré-cirúrgico, auxilia cirurgiões e estudantes de medicina a praticamente reencenar vários procedimentos cirúrgicos e atua como uma ferramenta de comunicação entre cirurgiões e pacientes [20].

Desde 1990, a bioimpressão na área médica tem tido um papel importante na manufatura aditiva. Desde a primeira inovação em 1999 com um fígado humano impresso em 3D, existem muitas empresas que se tornaram as pioneiras dessa tecnologia, como a Organovo, criadora da primeira bioimpressora comercial, a NovoGen MMX, além de diferentes universidades e empresas que possuem modelos de máquinas para atender a essa nova tendência. Hoje, a tecnologia continua a crescer e inovar numa parte forte e vibrante do mundo da impressão 3D. Resumindo, também tem um papel bastante significativo na parte da investigação, quer em faculdades ou empresas.

Além da bioimpressão, outro grande setor da manufatura aditiva na saúde é o protético. Graças à personalização que a impressão 3D oferece, o impacto que essa teve na indústria foi significativa. A

capacidade de transportar facilmente impressoras 3D tornou-a numa ferramenta crucial em zonas de conflito para ajudar pessoas que perderam membros, sendo a MakerBot uma das líderes nesta área da saúde. Além disso, uma tendência crescente está a ser observada em hospitais por todo o mundo que agora estão incorporando impressoras 3D em suas instalações para atender às necessidades de seus pacientes, como por meio de próteses de fabrico aditivo, bem como recorrer à impressão 3D para a criação de órgãos impressos em 3D [21]. A manufatura aditiva está em vias de transformar a maneira como as pessoas se movem, pois rapidamente começou a revolucionar os diferentes setores que envolvem o transporte. Do ramo automóvel a espacial e marítimo; esses setores estão procurando gastar menos tempo e dinheiro e se depararam esta tecnologia. Em setores como o aeroespacial, essa tecnologia tem vindo a proporcionar uma nova solução: oferecer uma alternativa mais económica e melhor do que as tecnologias de fabrico típicas.

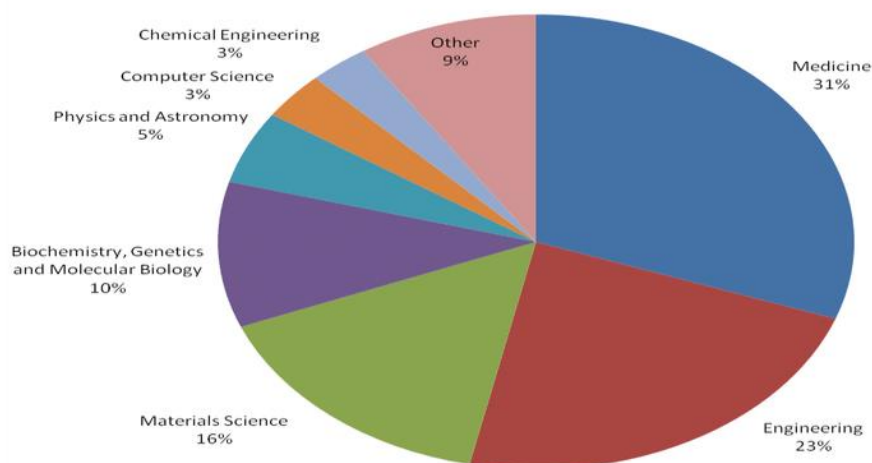


Figura 12 - Percentagem dos setores de Impressão 3D

Justamente por isso, a manufatura aditiva tornou-se a tecnologia chave para as indústrias de transporte a nível global que buscam criar equipamentos mais leves e resistentes que possam atender às necessidades das empresas. O facto de diferentes peças na manufatura aditiva estarem mais acessíveis a todos tem vindo a trazer enormes avanços tecnológicos nos setores automóvel e de transporte. Exemplos disso já podem ser vistos em grandes empresas, como a Porsche, bem como em projetos de maior importância ou equiparada [21].

## 2.7 Materiais

Os processos de manufatura aditiva dependem do material. O material desempenha um papel bastante importante porque a forma, tipo e estado estão ligados a tecnologias específicas. A participação do mercado atual de material polimérico é de cerca de 80%.

No entanto, há um número e variedade de materiais de impressão 3D em rápido crescimento no mercado: polímeros, metais, resinas, borrachas, cerâmicas, vidro, entre outros [3]. Existem também várias formas, como pó, pasta e arame.

Em dezembro de 2020, o *Senvol Material Database* listou 3.248 materiais em comparação para pouco mais de 1700 materiais no ano anterior. Dependendo da fonte, existem diferentes classificações para materiais de impressão 3D disponíveis no mercado. Basicamente, os materiais podem ser divididos em quatro grupos principais: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos [3].

O cenário de pesquisa relacionado à manufatura aditiva foi estruturado em grupos para facilitar a pesquisa. Os respectivos grupos de materiais foram caracterizados pelas seguintes palavras-chave: polímero, metal e liga, cerâmica, compósito e biomaterial [2].

No que diz respeito a tecnologias de manufatura aditiva, o material deve apresentar propriedades de serviço aceitáveis para ser executado com sucesso nas aplicações necessárias. Para aplicações de serviço rigorosas, as peças de manufatura aditiva normalmente são pós-processadas de alguma forma para melhorar a microestrutura, reduzir a porosidade, proporcionar acabamento às superfícies, reduzir a rugosidade e atender as tolerâncias.

Em relação ao projeto vinculado à empresa Jodrax, o filamento PLA N é um biopolímero de última geração. É resistente a altas temperaturas até 160° C, depois de passar pelo processo de recozimento. O recozimento é um tratamento térmico que altera a microestrutura de um material, causando alterações nas suas propriedades, aumentando a sua resistência, rigidez, durabilidade e resistência térmica. Esta característica do filamento PLA N permite obter peças de alta resistência que podem depois ser maquinadas.

Vantagens:

- Material ideal para substituir o ABS;
- Elevada resistência mecânica e ao impacto;
- Resistência a altas temperaturas (ponto de fusão de 160°C após recozimento);
- Moldável;
- Baixo efeito de empenamento;
- Não requer uma mesa de impressão aquecida.



Aplicações:

- Ferramentas;
- Protótipos;
- Aplicações industriais.

Em relação a moldes e matrizes, enfatizando a importância dos moldes neste estudo, ainda existe uma procura incessante no mercado do material mais adequado. Procura-se um que seja fácil de moldar durante o fabrico de moldes, mas que funcione como aço de ferramenta endurecido para peças de moldagem, à medida que o calor é extraído rapidamente para minimizar o tempo de ciclo. Todavia, mesmo havendo grandes avanços em aços-ferramenta tratados termicamente e no uso de pastilhas, ainda existe uma controvérsia relacionada com as características do material desejado para o fabrico de moldes e aquelas que são necessárias para o desempenho de moldagem. Entretanto, essas procuras contraditórias obrigam a gastar muito mais no fabrico de moldes do que o necessário para que possam lidar com a contração imprevista de peças com modificações quase inexistentes e para possam ter a certeza de que garantem durabilidade [22].

No âmbito da abordagem dos materiais compósitos, esses são uma combinação de componentes. Trata-se de uma combinação de dois ou mais elementos artificiais, ou seja, com propriedades químicas ou físicas diferentes, ou naturais. Ao serem combinados não perdem totalmente as suas propriedades individuais. Com as suas características, combinam e contribuem para melhorar o produto final [23]. Os compósitos são confeccionados com as especificações de terem maior resistência, durabilidade e eficiência.

O material que é pedido pelo fornecedor vinculado à Jodrax, mas que deve ser substituído pelo PLA para obter uma solução mais viável e económica, é o Al 5083. A liga de alumínio 5083 é bem conhecida por seu desempenho excepcional nos ambientes mais extremos [24]. A liga apresenta alta resistência à água do mar e a ambientes químicos industriais.

O produto oferece a maior resistência de todas as ligas não tratáveis termicamente, mas não deve ser usado em temperaturas acima de 65°C [25].

- Propriedades

Tabela 3 - Propriedades do Al 5083

Propriedades Físicas	Valor
Densidade	265 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de Fusão	570 °C
Expansão Térmica	25x10 <sup>-6</sup> /K
Módulo de Elasticidade	72 GPa
Condutividade Térmica	121 W/m. K
Resistividade Elétrica	0.058x10 <sup>-6</sup> Ω.m

## 2.8 Principais Métodos de Fabrico de Compósitos

Muitas indústrias estão recorrendo aos materiais compósitos de modo a encontrar reforços de projetos específicos, uma vez que existe uma procura crescente por materiais robustos, duráveis e leves. Determinadas empresas pretendem resolver os desafios que os polímeros reforçados com fibra enfrentam. De tal forma, existem vários métodos de fabrico de compósitos na indústria. A decisão de usar determinado método depende do material, projeto e aplicação do compósito [20].

### 1. Hand Lay-up

Consiste em colocar camadas pré-impregnadas manualmente numa ferramenta para constituir uma pilha de laminados. É considerado o processo mais básico de fabrico usado em compósitos termoendurecíveis.

Uma resina deve ser colocada no conjunto de camadas assim que o *lay-up* estiver completo. Em *wet lay-up*, uma variação diferente deste processo, é necessário revestir cada camada com resina antes de ocorrer a colocação em camadas [26].

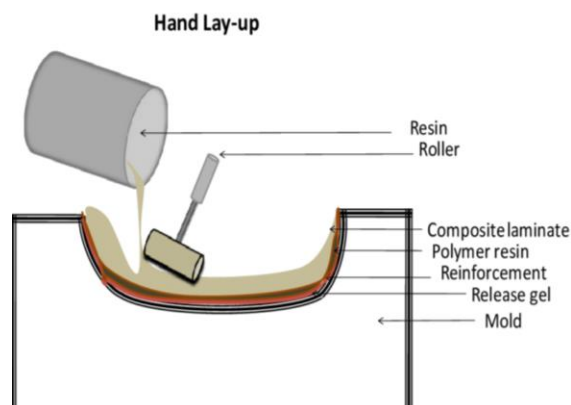


Figura 13 - Hand Lay-up

## 2. Open Molding

É um processo que envolve custos baixos e é utilizado na criação de materiais compósitos com fibra de vidro. Primeiramente, um agente desmoldante é aplicado no molde para desmoldar antes do início do fabrico. Ao usar o processo de colocação manual ou de pulverização, coloca-se os materiais de moldagem em cima do molde. No que diz respeito ao processo de pulverização, é necessário pulverizar a resina e os fios simultaneamente na superfície de moldagem.

Seguidamente, compacta-se o conjunto manualmente ao usar rolos e é adicionado um material de núcleo nesse ponto [26]. A camada final de pulverização ajuda a colocar os materiais do núcleo entre o conjunto. Depois disso, é permitida a cura da moldagem.

Por vezes, usa-se em conjunto o processo de colocação manual e o de pulverização com o objetivo de reduzir a carga de trabalho.

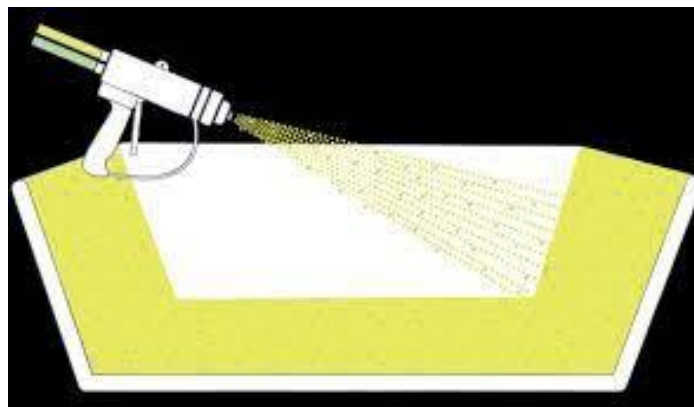


Figura 14 - Open Molding

## 3. Métodos de Infusão de Resina

Por haver uma procura mais elevada por materiais compósitos, existe igualmente uma necessidade de taxa de produção mais rápida. Além disso, muitos utilizadores estão a procurar outras alternativas, como os métodos de infusão de resina, para substituir o processo de *lay-up*, incentivando assim a automação do fabrico [26].

Esses métodos de fabrico relativamente à infusão de resina são:

- VARTM

VARTM não necessita de pressão ou uso de calor para a concretização do processo e por isso destaca-se dos outros processos de moldagem por transferência de resina. O VARTM puxa a resina para a pré-forma usando vácuo, em vez de bombear a resina através da pressão [26].

Utiliza ferramentas de baixo custo, o que facilita a produção de uma grande quantidade de peças complexas e de baixo custo.

- Filament Winding

Este método de fabrico de enrolamento de filamento tem a grande vantagem de os custos de material serem baixos, enquanto o processo é contínuo e pode ser facilmente automatizado [26].

A sua principal área de aplicação é no fabrico de hastes de tacos de golfe. Também permite o fabrico de outras peças, como varas de pesca, vasos de pressão e peças cilíndricas.

- Compression Molding

Usando este processo, a sua utilização é mais viável e faz sentido quando é necessário produzir mais de 10.000 peças. É bastante útil no processamento de termoendurecíveis de grande volume.

As camadas de compósitos são produzidas usando um composto de fabrico de camada. Coloca-se primeiro uma pasta de resina e injeta-se a fibra de vidro por cima. Assim, pode-se cobrir a fibra de vidro usando uma camada final de pasta de resina [26].

A indústria automóvel está a utilizar muito esta tecnologia, explorando o uso de compósitos para moldagem de chapas com reforço de carbono. Isto é realizado com o objetivo de aproveitar a relação rigidez/peso do carbono assim como aproveitar a resistência.

- RTM

Consiste na colocação de um reforço seco no molde e posteriormente bombeia-se um conjunto de resina e catalisador sob baixa pressão. Essa resina utilizada é de baixa viscosidade para que seja possível a permeação da pré-forma antes da cura. Através deste processo, são produzidas peças de grande qualidade e detalhe sem a necessidade de autoclave [26].

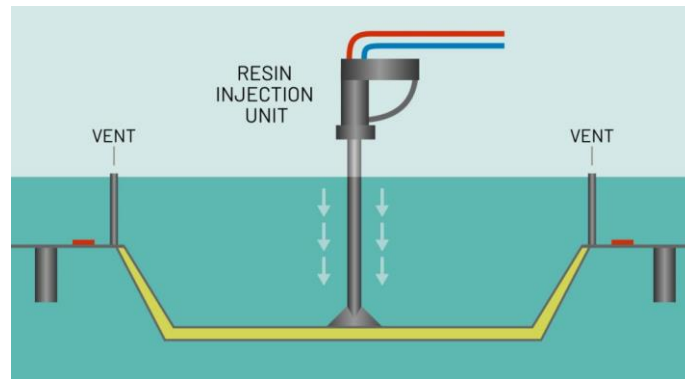


Figura 15 - Método RTM

- Reaction Injection Molding

Difere do RTM (Resin Transfer Molding) pela razão de injetar a resina e o catalisador separados, enquanto no RTM esses dois são inseridos como uma mistura.

A reação química do processo ocorre no molde em vez de ocorrer na cabeça de distribuição.

## 2.9 Vantagens de Produção de um molde a partir de Manufatura Aditiva

1. Tornar o ciclo de fabrico do molde mais curto

O molde de impressão 3D torna-se a fonte de inovação ao tornar todo o ciclo de desenvolvimento do produto mais curto. Antigamente, as empresas optavam por abandonar as atualizações de design de produtos devido ao grande investimento que é necessário. Reduzindo os tempos de configuração de cada molde e permitindo que todas as ferramentas de projeto ao dispor sejam atualizadas, a manufatura aditiva permite que as empresas concretizem mudanças e melhorias dos moldes mais frequentemente. Desta forma, o ciclo de design do molde acompanha o ritmo de ciclo de design do produto. Além disso, as empresas podem adquirir equipamentos de impressão 3D para fazer os seus próprios moldes, aumentando a flexibilidade e adaptação à indústria, assim como acelera o desenvolvimento de produtos [27].

## 2. Custos de manufatura mais baixos

Em relação à impressão 3D de metais, se o custo de impressão desse tipo for superior ao custo dos processos tradicionais de fabricação de metais, isto é, processos subtrativos, a economia de custos será facilitada na área dos plásticos. Os moldes metálicos impressos em 3D trazem mais vantagens no que diz respeito à produção de pequenas séries descontínuas e produtos, uma vez que os custos fixos desses produtos são difíceis de amortizar ou para determinadas geometrias garante mais vantagens econômicas [27]. Particularmente, pode acontecer que a impressão 3D seja econômica quando os materiais usados são dispendiosos e o fabrico tradicional de moldes resulta em taxas altas de desperdício de material. A capacidade da impressão 3D de produzir moldes precisos em muito pouco tempo pode resultar num impacto positivo nos processos de fabrico. Além disso, existem momentos em que o molde deve ser alterado após o início da produção. Os engenheiros podem reduzir os custos iniciais associados às modificações do projeto fazendo várias iterações, resultantes de uma certa flexibilidade na impressão 3D.

## 3. Melhoria do design do molde adiciona mais funcionalidades ao produto final

A microestrutura da peça metálica pode ser melhorada através de uma abordagem metalúrgica especial, produzindo peças impressas completamente densas com propriedades físicas e mecânicas provavelmente melhores do que peças forjadas ou fundidas, contudo dependendo do tratamento térmico e orientação). Os engenheiros têm nas suas mãos opções ilimitadas para melhorar o projeto de um molde [22].

A manufatura aditiva tem a capacidade de reduzir o número de peças para fabrico quando a peça que precisa de ser finalizada consiste em vários subcomponentes. Assim, simplifica o processo de montagem e reduz as tolerâncias. Permite uma produção mais rápida de produtos finais bastante funcionais e com menos defeitos de produto. Um exemplo viável para esta situação é o caso de canais de uma peça moldada por injeção que direcionam o fluido de arrefecimento são habitualmente retos se forem fabricados por manufatura subtrativa, resultando conseqüentemente num arrefecimento mais lento e não uniforme na peça moldada. Em contrapartida, a manufatura aditiva garante canais de arrefecimento de qualquer formato, o que traz bastantes benefícios. Assim resultam peças de maior qualidade e uma menor taxa de rejeição de peças [27].

## 4. Ferramentas de otimização são mais ergonómicas

As empresas utilizando a manufatura aditiva são capazes de substituir qualquer ferramenta em qualquer momento, caso haja falhas na cadeia de fornecimento. E isso não é exclusivo àquelas que já são consideradas como desperdício e não atendem aos requisitos. Felizmente, não é muito dispendioso e não se perde muito tempo em concluir esse processo, sendo econômico otimizar as ferramentas para

um melhor desempenho marginal. Os técnicos podem pensar muito mais na ergonomia ao concluir projetos tendo em conta a melhoria do conforto operacional, redução do tempo de processamento e facilidade de armazenagem. A otimização de ferramentas de projeto pode reduzir significativamente a taxa de rejeição de peças [27].

#### 5. Molde personalizado para ajudar na customização do produto final

A capacidade de reduzir os custos finais de fabrico, ciclos de produção curtos e criação de geometrias complexas permitem que as empresas tenham um leque de ferramentas personalizadas para ajudar o fabrico de peças personalizadas. O molde proporcionado pela manufatura aditiva é muito propício para produção personalizada, adequado para a indústria médica.

## 2.10 Utilização de um Processo Híbrido

A manufatura aditiva híbrida é quando dois ou mais processos de fabrico (geralmente processos aditivos e subtrativos) são usados juntamente para alcançar o projeto final desejado, propriedades mecânicas e acabamento superficial. A manufatura aditiva híbrida tem o potencial para economizar custos de produção e tempo de fabrico no processo geral. Usando um caso de estudo, para o tratamento de água por membrana, é interessante notar que há vários trabalhos que adotaram o conceito de manufatura aditiva híbrida para fabricar membranas cerâmicas e poliméricas [28].

Basicamente, manufatura aditiva híbrida usa manufatura aditiva em conjunto com outros processos de fabrico estabelecidos para fazer protótipos com recursos. Essa tem sido usada em conjunto com processos como inversão de fase, revestimento por imersão, cura e sinterização térmica para fazer os protótipos. Segundo esta perspectiva, deve-se usar a manufatura aditiva híbrida em vez da direta/indireta devido à resolução de impressão limitada das impressoras [28].

Com a necessidade de agilizar as cadeias de fornecimento, surgiu a manufatura aditiva como solução por meio de aplicações centralizadas e descentralizadas. A manufatura aditiva é o processo de adição de material camada por camada com base em dados de modelo 3D. Aplica-se a uma ampla gama de materiais poliméricos e cerâmicos aos metais. Na indústria aeroespacial, médica e transporte, existe um interesse crescente no processamento de superligas metálicas. Deve-se à liberdade de design complexa, maior grau de customização e melhor aproveitamento do material quando comparado à manufatura subtrativa [29].

A manufatura aditiva ainda se encontra perante diversos desafios, embora existam muitos benefícios, como a ampla gama de materiais, fabrico de forma livre e a não necessidade de acessórios e ferramentas. Os principais desafios para promover a adoção de manufatura aditiva nas empresas são:

- Acabamento de superfície inadequado (ou seja, perfil de superfície irregular e áspero);
- Tolerâncias dimensionais imprecisas em peças de metal;
- Custos de investimento muito altos para máquinas de manufatura aditiva;
- Custos operacionais e materiais.

Deve-se considerar que a necessidade de acabamento e pós-processamento não tradicional de peças metálicas é bastante importante e deve ser relatado [29]. Ou seja, na manufatura aditiva híbrida, uma peça é produzida primeiramente por manufatura aditiva e, posteriormente, pós-processada por meio de processos tradicionais de fabrico, como por exemplo maquinagem e até retificação, entre outros, para garantir o acabamento superficial desejado, propriedades do material e tolerâncias dimensionais. Concluindo, a manufatura aditiva híbrida refere-se a dois ou mais processos sequenciais (por exemplo, manufatura aditiva mais maquinagem) empregados para alcançar as especificações desejadas [30].

Considerando a figura abaixo e analisando-a, uma das principais diferenças entre manufatura aditiva e subtrativa é o acabamento superficial e também as tolerâncias que podem ser alcançadas com cada método. Uma abordagem híbrida da manufatura deve ser considerada tendo em conta esta análise porque realmente é uma mais-valia [30].

A máquina CNC é capaz de alcançar o acabamento superficial desejado e concluir peças impressas em 3D até às tolerâncias rígidas. Quando as peças saem da impressora, são deslocadas rapidamente para a máquina CNC com um programa projetado para conclusão de peças. Ferramentas específicas de acabamento podem facilmente maquinar geometrias que são mais difíceis de alcançar de peças impressas em 3D.

Ao utilizar os processos de manufatura aditiva híbrida numa oficina, por exemplo, gasta-se menos tempos com preocupações desnecessárias como a precisão das peças impressas e, por isso, adiciona-se operações subtrativas de forma a manter os custos de material baixos, criar menos desperdício, como se abordasse uma metodologia Lean e manter as peças em tolerâncias apertadas para a excelência da maquinagem de precisão.

As empresas que estão habituadas a utilizar unicamente os processos subtrativos podem eventualmente pensar que não é necessária uma abordagem de manufatura aditiva. Contudo, mais uma vez é crucial dar ênfase ao processo de manufatura híbrida, ou seja, usando os dois métodos juntamente e assim poder-se-á reduzir custos de fabrico e de material ou armazém.



Um exemplo é maquinar a maior parte de uma peça usando a manufatura subtrativa, porque levaria mais tempo do que uma abordagem de manufatura aditiva. Em seguida, pode utilizar-se uma impressora 3D para adicionar recursos complexos e mais detalhados àquelas partes que podem exigir programação complexa e várias horas de planeamento numa máquina subtrativa. Um rotor é um bom exemplo, visto que a maior parte da peça pode ser maquinada, mas as lâminas complexas podem ser impressas e posteriormente finalizadas na máquina CNC [29].

### **2.10.1 Utilização de Manufatura Aditiva Híbrida para a Produção de Moldes Multimateriais de Longa Duração**

A indústria de moldes apresenta um grande alcance e tem relação com a maioria das áreas da indústria de transformação. Atualmente, vários componentes de um determinado produto são fabricados por moldagem ou fundição, sendo que o fabrico e o molde são muito dependentes. O molde pode melhorar a eficiência e o lucro, garantindo a qualidade.

Dentro da indústria, a maquinagem CNC é o processo mais comum para o fabrico de moldes, contudo, não se deve descartar a ideia de produção a partir de manufatura aditiva. Embora a maquinagem CNC forneça resultados bastante confiáveis, é um processo muito caro e demorado. Logo, visto que isto tem acontecido muito, muitos fabricantes de moldes começam a procurar e encontrar soluções mais eficazes, que lhes permita economizar tempo e custos. Fazer moldes a partir de manufatura aditiva camada por camada acaba por ser um método mais atraente, nomeadamente porque os moldes são produzidos em pequenos lotes e são formas, mais complexas, tornando-os adequados para serem concluídos por impressão 3D [31].

Muitas indústrias como ramo automóvel, aeroespacial, de saúde e muitas empresas que integram a impressão 3D nas suas cadeias de fornecimento, incluindo o fabrico de moldes, devem sentir-se gratas pela grande conveniência que a impressão 3D e uma variedade de materiais de impressão trouxeram, como plásticos, borracha, compósitos e metais [31].

As empresas ou fabricantes de moldes podem aproveitar as características de dois ou mais metais juntos, considerando as máquinas CNC aditivas híbridas que abrem um caminho novo e mais prático para os fabricantes. Isto com o objetivo de reduzir a controvérsia entre o fabrico de moldes e as constantes procuras de desempenho da moldagem.

Moldes podem ser produzidos mais rapidamente e com maior qualidade se for utilizado um processo híbrido, que possui muitos benefícios. Quando a questão é gerir peças, essa abordagem proporciona

um baixo rendimento no trabalho em andamento. Também reduz o investimento de capital porque pode ocorrer um fluxo de trabalho simplificado no qual o balanceamento de linha desaparece, após a unificação de máquinas CNC, permitindo que uma oficina se concentre apenas na produção. A economia de energia durante a criação do molde pode ser preponderante. Concluindo, com apenas um acabamento de CAD/CAM, uma pessoa pode preparar e agilizar caminhos através de um único pós-processador, simplificando as etapas de acabamento aditivo e subtrativo.

A manufatura híbrida reúne maquinagem CNC e manufatura aditiva em apenas uma configuração. As máquinas CNC híbridas oferecem novos recursos técnicos, considerando inspeção em processo e acabamento, que não podem ser fornecidos por nenhuma das tecnologias de forma independente. É extremamente benéfico para adicionar recursos a peças existentes e para reparar componentes metálicos de alto valor. Esta abordagem permite um *retrofit* para máquinas CNC existentes ou integradas diretamente em novas máquinas com funcionalidade avançada. As máquinas multifuncionais híbridas reduzem os custos de capital e permitem um caminho intuitivo de adoção de manufatura aditiva de peças metálicas para operadores de CNC [32].



## CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é contextualizado o problema e de seguida é apresentada a metodologia para a resolução do mesmo. O terceiro subcapítulo apresenta a empresa Jodrax, no seguinte é selecionado o caso de estudo e por último é apresentada a envolvente funcional e económica.

### 3.1 Contexto do Problema

Com o recente investimento em manufatura aditiva por parte da empresa Jodrax, essa tem vindo a procurar soluções alternativas que sejam compatíveis, mas com um custo menos elevado, ou seja, abordando uma perspetiva mais económica. Isto tudo face ao que os clientes pedem para que seja concretizado um determinado projeto. Neste caso, o objetivo fundamental é garantir a produção de um molde por via de manufatura aditiva, usando um polímero de baixo custo e usando a tecnologia FDM com o interior num material compatível, de modo a diminuir o tempo de produção.

Os moldes convencionais para a criação de peças em materiais compósitos dividem-se grosso modo em 2 grupos: os moldes metálicos, maquinados a partir de um bruto, e os moldes compósitos, em que a face de contacto é feita por materiais compósitos (geralmente fibras curtas de fibra de vidro ou carbono em matriz epoxídica), e o enchimento é feito em argamassa, ou cimento. Para além dos custos de fabrico destes moldes, o *time-to-market* destes é relativamente longo. Neste caso focar-se-á nos moldes compósitos.

A manufatura Aditiva pode então desempenhar aqui um papel preponderante, dado a rapidez com que os moldes podem ser produzidos e de o custo dos mesmos ser potencialmente mais baixo, se considerarmos a tecnologia FDM, com um material de enchimento.

Como tal este molde será indicado para processos de fabrico de compósitos fora de autoclave, onde as pressões e temperaturas são demasiado altas para os polímeros a considerar. Por isso, deve haver um tratamento fora do autoclave.

Assim, considerando o problema em questão, será apresentado um caso de estudo da Jodrax em que foi definida uma metodologia para resolver o mesmo e foram aplicados testes, como ensaio à tração, maquinagem e de pressão e temperatura.

## 3.2 Abordagem de Resolução do Problema

Nesta secção será apresentada a metodologia e todos os procedimentos seguidos, bem como detalhada a razão da sua aplicação. Na figura abaixo (Figura 16) apresenta-se um fluxograma, representando de forma resumida a metodologia aplicada.

O molde que inicialmente, de acordo com as especificações do fornecedor, deveria ser constituído com o material Al 5083 será modificado para apresentar uma solução mais viável e económica e assim abrir novas portas no mercado de manufatura aditiva. Com isto, pretende-se atingir um novo patamar na produção de moldes e testar esta abordagem adequadamente de acordo com um conjunto de processos que podem levar à solução ótima.

O procedimento inicia-se com a recolha de dados existentes sobre a peça, ou seja, a informação técnica, como a função, desenho técnico e o material que é proposto pelo fornecedor para utilizar. De seguida, procede-se a análise e abordagem que se deve utilizar para concretizar os objetivos primordiais, como imprimir provetes para testar à tração, isto é, fazer ensaios de tração uniaxial, e imprimir peças retangulares de PLA N para determinar os melhores parâmetros de maquinagem através do teste de maquinagem de PLA N [33].

A impressora definida também deve ser testada para verificar se está apta para produzir o molde através da tecnologia FDM. Através do teste de maquinagem do PLA N também é importante determinar qual a sobre espessura necessária. Posteriormente, segue-se a escolha e análise do gesso que deve ser utilizado para o enchimento do molde e esse tem de resistir a temperaturas na ordem dos 100° C. Depois disso, realiza-se vários corpos de prova já com o enchimento escolhido para saber quais as cargas e pressões que suporta e submeter o molde às temperaturas esperadas no processo de fabrico de compósitos que for escolhido. Há que ter em conta o destaque da utilização de um processo híbrido, onde se usa manufatura aditiva e depois maquinagem. Por fim, faz-se uma avaliação económica e

compara-se com proposta inicial do fornecedor em usar o Al 5083, verificando se é realmente mais viável e económico usar o filamento PLA N na tecnologia de manufatura aditiva FDM.

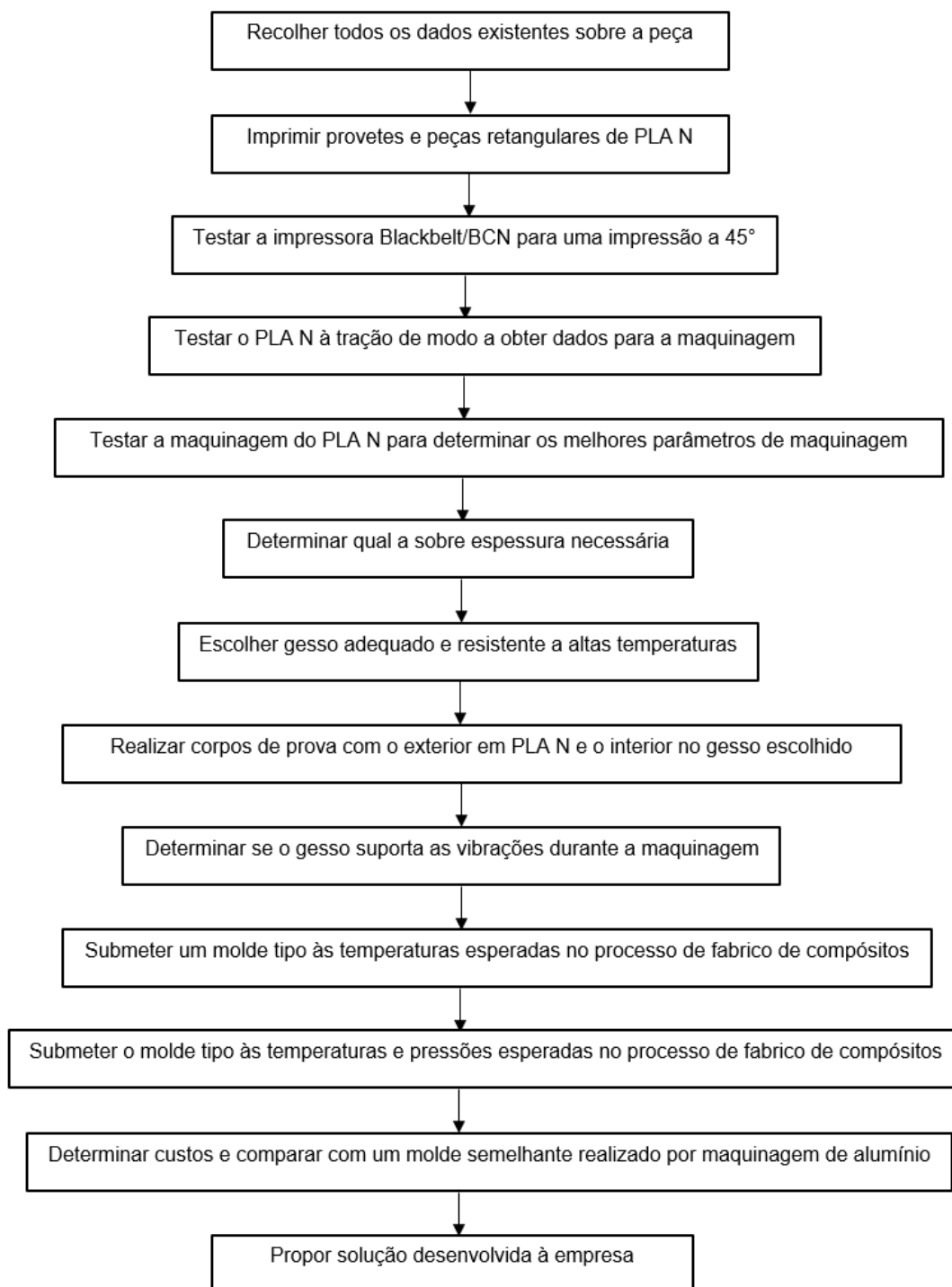


Figura 16 - Fluxograma da metodologia aplicada

### 3.3 Seleção do Caso de Estudo

Para a seleção do caso de estudo, foi realizada uma reunião entre as duas partes envolvidas: Jodrax e Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. Nessa reunião foi apresentado o projeto da Jodrax. Esse consiste na produção e teste de um molde por manufatura aditiva, sem limite de tempo definido. O molde está representado na Figura 17 (a) visto de uma perspectiva e na Figura 17 (c) visto de outra perspectiva, assim como o contra-molde que se encontra representado na Figura 17 (b). Nos dias de hoje, a manufatura aditiva ainda não explorou de forma minuciosa a concepção de moldes por manufatura aditiva. Assim surge o interesse quer por via económica e empresarial por parte da Jodrax e académica por parte da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em produzir o molde dessa forma. As informações técnicas foram entregues pelo fornecedor à empresa Jodrax, incluindo os desenhos técnicos, para que se cumpra todos os requisitos que são propostos.

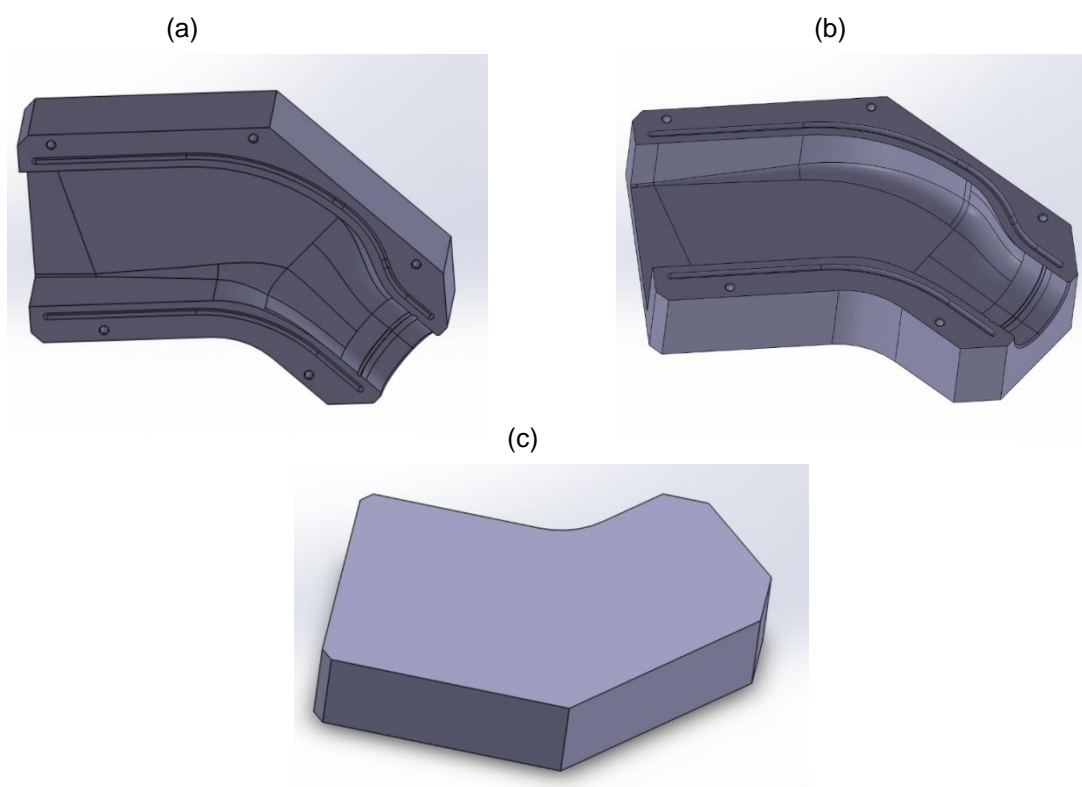


Figura 17 - Perspetivas do molde do Caso de Estudo. (a) Perspetiva 1 do molde; (b) Perspetiva do contra-molde; (c) Perspetiva 2 do molde

## 3.4 A Empresa

A Jodrax é uma empresa em atividade desde 1996, desde então foca-se na comercialização de materiais e equipamento de impressão e escritório. Atualmente, também tem vindo a abordar o setor de manufatura aditiva, criando ligações na indústria para alcançar um crescimento empresarial relativamente a esta tecnologia [34].

Conta com trabalho desenvolvido em várias áreas para mais de 4200 clientes, maioritariamente empresariais. Procura criar uma relação próxima e simples com todos os seus clientes, tendo como objetivo crucial ajudar a libertar o potencial produtivo de cada um. A Jodrax está comprometida em servir da melhor forma e apresentar serviços de qualidade superior.

Conta com princípios e métodos de trabalho bem estabelecidos, que privilegiam a eficiência e solidez. A empresa tem ainda uma motivação constante em evoluir e testar novos produtos ou serviços, além de uma atenção permanente às oportunidades de negócio, tendências do mundo atual e necessidades dos clientes [34].

No que diz respeito à impressão 3D, esta revolução na arte de criar objetos e produtos começou em França, na década de 80, e promete continuar a reinventar-se de ano para ano. Num mundo em constante renovação, a impressão 3D não vai parar de abrir portas a uma produção cada vez mais rápida, mais otimizada e com cada vez menos custos para o produtor.

- Especializações

*Managed Print Services*, Gestão Informática, Assistência Técnica, Equipamentos de impressão, *Outsourcing* de Impressão e *Renting* Informático, Xerox, *Connect Key*, Concessionária Xerox, Equipamento Escritório, Soluções Digitais, Impressora, Toner e Impressão.



Figura 18 - A Empresa



### 3.5 Orientação da Impressão a 45°

A impressora 3D Blackbelt é um tipo de impressora 3D que usa fabricação de filamentos fundidos (FFF) em combinação com a inovadora tecnologia de cinto [35].



Figura 19 - Impressora com orientação de impressão a 45°

Existe a regra de 45° [36] na impressão 3D que afirma que se pode imprimir camadas em 3D com sucesso, desde que o ângulo do modelo não exceda esse ângulo pré-definido. Como a impressão 3D é uma atividade camada por camada, requer uma boa base para a próxima camada de cerca de 50% de contato, que é de 45°. Deve-se ter em conta que é normalmente possível imprimir em 3D sem ser com o ângulo de 45° usando uma série de calibrações e otimizações para a impressora 3D.

As saliências na impressão 3D são simplesmente partes do modelo que excedem a regra de 45°, de modo que ultrapassa o que normalmente se pode imprimir em 3D facilmente. Ainda é possível imprimir em 3D ângulos salientes, mas geralmente até um certo ponto. Um exemplo de uma saliência pode ser uma figura com uma espada ou uma lança apontada horizontalmente. É sempre preciso algum tipo de suporte para suportar as saliências, mas existem maneiras de melhorar o ângulo através de manipulação da impressora 3D que está a ser utilizada. Às vezes, isso pode resultar em imperfeições de impressão devido à flacidez ou material e pode acabar por falhar completamente [36].

Como exemplo, uma determinada empresa desenvolveu impressão a 45° e iniciaram com sistemas baseados em robótica e integraram-nos a sistemas de pórtico. Nesse sistema, gira-se o bocal para inclinar a extrusora para os sistemas de pórtico e ajuda a resolver problemas com suportes de

impressão. Com a impressão 3D em larga escala, evita-se o uso de suportes porque utiliza muito material. O mesmo acontece com a impressora Blackbelt [35], em que permite a impressão a 45° e evita o uso desnecessário de suportes. Basicamente, imprimir a 45° é uma forma de imprimir saliências sem suportes. Assim, o comprimento da camada é muito menor, o que evita deixar passar muito tempo para que o cordão de impressão arrefeça, o que possivelmente causaria problemas na adesão camada a camada [37].

Na impressora BCN da empresa, que também foi utilizada para impressões, essencialmente dos moldes tipo (corpos de prova), conseguiu-se imprimir a 45°, contudo foi necessário um procedimento mais complexo, contrariamente à impressora Blackbelt [35] que já imprime a 45°. Para fazer o efeito ou inclinação de 45° na impressora BCN é crucial colocar suportes, garantindo assim uma impressão a 45° sem quaisquer problemas [38].



## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta seção são apresentados e discutidos os ensaios experimentais que foram efetuados assim como todos os casos que estejam vinculados à metodologia experimental. São demonstradas também figuras assim como gráficos que servem para fortalecer a justificação e ter uma melhor compreensão dos casos em questão.

### 4.1 Seleção da Impressora

A impressora selecionada para os ensaios e realização do projeto foi a impressora Blackbelt (Figura 20 (a)) [35], contudo, como essa demonstrou problemas de funcionamento numa fase inicial, foi mais utilizada a impressora BCN [38] (Figura 20 (b)) situada nas instalações da Jodrax. Logo, algumas peças foram impressas na impressora BCN e outras na Blackbelt para garantir a orientação de 45° [36]. Após essa fase inicial, a impressora BCN foi a mais utilizada tanto para ensaios como para conclusão do projeto.



(a)



(b)

Figura 20 - Impressoras utilizadas. (a) Blackbelt; (b) BCN

## 4.2 Seleção e Especificação dos Ensaio

Como referido anteriormente, uma primeira fase deste projeto passa por testar o material que será utilizado, o PLA N, a ensaios para obter dados para a maquinagem.

Logo, o ensaio de tração uniaxial é de grande utilidade para obter os dados para a maquinagem, como a tensão máxima. Posteriormente, testar-se-á a maquinagem do PLA N para determinar os melhores parâmetros de maquinagem, e desse modo determinar qual a sobre espessura necessária.

Para os ensaios, além dos provetes indispensáveis para o ensaio de tração uniaxial, foram impressas peças retangulares com dimensões específicas para testar a maquinagem do PLA N, como já foi referido, tanto na impressora BCN como na impressora Blackbelt, com o objetivo de simular a orientação de 45°, que será fundamental uma vez que o objetivo é garantir uma maior eficiência usando uma inclinação de 45°.

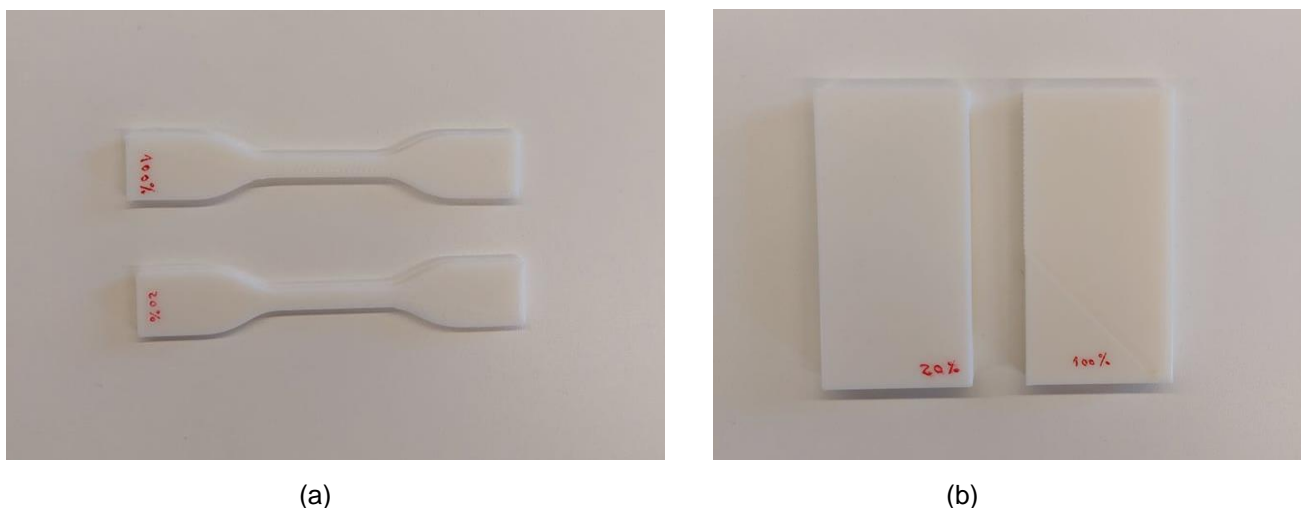


Figura 21 - Provetes e peças retangulares usados para efeitos de teste de maquinagem. (a) Provetes com infill 100% e 20%; (b) Peças retangulares com infill 100% e 20%

Na impressora BCN foram impressos 6 provetes e 6 peças retangulares para serem submetidos a ensaios mecânicos, sendo 4 provetes distintos de 2 e 2 peças retangulares diferentes das 4. Isto porque foram usadas percentagens de infill diferentes durante os ensaios, 100% e 20%.

Tabela 4 - Especificações dos provetes impressos na BCN com infill 20%

<b>4 provetes</b>	<b>Valor ou Especificação</b>
Layer height	0.25
Wall line count	4
Infill	20%
Padrão	Gyroid

Tabela 5 - Especificações dos provetes e peças retangulares impressas na BCN com infill 100%

<b>2 provetes e 2 peças retangulares</b>	<b>Valor ou Especificação</b>
Layer height	0.3
Wall line count	4
Infill	100%
Nozzle	0.6

Tabela 6 - Especificações das peças retangulares impressas na BCN com infill 20%

<b>4 peças retangulares</b>	<b>Valor ou Especificação</b>
Layer height	0.3
Wall line count	4
Infill	20%
Nozzle	0.6
Padrão	Gyroid

Na impressora Blackbelt foram impressas 3 peças retangulares, com o objetivo de testar a maquinagem do PLA N considerando a orientação de impressão de 45°.

Tabela 7 - Especificações das peças retangulares impressas na Blackbelt com infill 100%

<b>3 peças retangulares</b>	<b>Valor ou Especificação</b>
Layer height	0.3
Wall line count	10
Infill	100%
Nozzle	0.8

### 4.3 Ensaio de Tração Uniaxial

Neste tipo de ensaio a amostra de teste, neste caso provete, é submetida a um estado de tração uniaxial até ocorrer a fratura da mesma. Este ensaio realiza-se para obter a caracterização mecânica de um material, como o PLA N, e obter dados para a maquinagem que serão necessários.

É imprescindível seguir a norma ASTM D638-14 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*) quando se realiza o ensaio, ou seja, a geometria e dimensionamento dos provetes do ensaio têm de seguir essa norma. A seção transversal dos provetes pode ser circular ou retangular. Os procedimentos são igualmente regidos por normas. Neste ensaio, como seria de esperar, verificam-se dois tipos de deformações: deformação elástica e deformação plástica [39].

Para a realização dos ensaios é utilizada uma máquina de testes universal, mais especificamente uma máquina MTS que será abordada num subcapítulo seguinte. Esta possui uma estrutura em pórtico, apresentando uma amarra (componente da máquina onde é preso o provete) em cada extremidade da mesma. Por norma, uma das amarras é móvel e outra é fixa. É necessário possuir dados como a capacidade de carga e velocidade da máquina quando se pretende realizar os ensaios. Baseando-se na força máxima do material estudado, é necessário garantir que a respetiva máquina é capaz de aplicar a força suficiente para fraturar o provete.

Geralmente, o parâmetro que se retira facilmente de um ensaio de tração é a força aplicada no provete ao longo do tempo. O  $L_0$  acaba por ser sempre o mesmo para cada ensaio se for realizado corretamente e de acordo com a norma [39]. É possível também determinar propriedades mecânicas como a tensão de cedência, extensão de fratura, o módulo de elasticidade e a tenacidade. A tensão ( $\sigma$ ) pode ser facilmente calculada a partir da seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A_{nom}} \quad (1)$$

F é a força registada,  $A_{nom}$  é a área nominal da seção do provete. No que diz respeito à tensão de cedência, ao módulo de elasticidade e à tenacidade, é comum calcular graficamente essas propriedades mecânicas, utilizando o gráfico Tensão vs. Extensão [39].

### 4.3.1 Comportamento Elástico

Trata-se de uma deformação que não é permanente, isto é, após a libertação da carga, a peça em questão volta à sua forma original. A deformação elástica resulta de contrações das células cristalina ou de pequenos alongamentos que compõem o provete.

Nesta deformação é importante salientar a Lei de Hooke [40], em que a deformação e tensão são proporcionais.

Desta deformação surge o cálculo do Módulo de Young ou módulo de elasticidade, que dá a relação entre a tensão e deformação que é dada pela seguinte equação:

$$\tan\theta = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = E \quad (2)$$

Considera-se que o módulo de elasticidade é uma medida de rigidez do material, que se aplica somente à região linear da curva de tensão vs. extensão [40].

### 4.3.2 Comportamento Plástico

O regime elástico ao ser ultrapassado, verifica-se que deixa de haver uma proporcionalidade entre a tensão e deformação e ocorre uma deformação permanente no material. Isto é chamado de deformação plástica. Essa deformação deve-se à quebra de ligações interatómicas e à formação de novas ligações em posições diferentes. Este fenómeno chama-se escorregamento [41].

Quando isso acontece, surge a tensão de cedência do material, que é a tensão de fronteira entre o regime elástico e plástico.

Se um material fraturar no final do regime elástico diz-se que se trata de um material frágil, sem entrar no regime plástico.

Há que ter em conta que nem todos os materiais demonstram comportamentos de deformação plástica. É difícil perceber a transição entre região plástica e elástica para alguns materiais, logo é de grande utilidade utilizar o método de offset. Este método consiste em traçar uma reta paralela à reta de domínio elástico com um determinado offset de 0.2 % em plásticos sobre o deslocamento. Assim obtém-se a tensão de cedência no ponto de interceção entre a curva de ensaio e a reta deslocada [41].



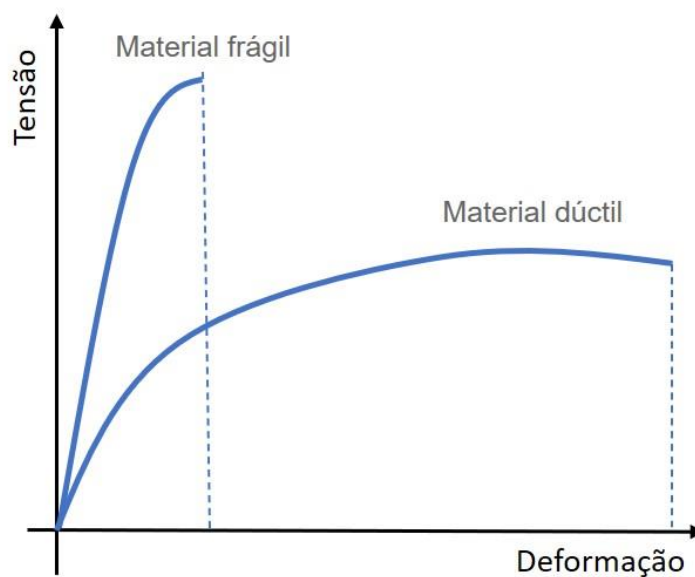


Figura 22 - Gráfico de Tensão vs Extensão que mostra o comportamento do material frágil e dúctil

### 4.3.3 Máquina Utilizada

A máquina utilizada para a realização dos ensaios de tração foi uma máquina MTS, situada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. A máquina também serve para ensaios de fadiga e compressão, contudo o principal foco foi nos ensaios de tração.

A célula de carga máxima utilizada foi 100 kN e a velocidade de tração foi 0.02 mm/s. Nos cinco ensaios de tração foi usado sempre o mesmo extensómetro, utilizando-se um  $L_0$  de 22 mm para todos os ensaios para não ocorrer uma variação elevada do que é pretendido para este tipo de ensaios.

Ao testar os provetes, foi-se chegando a valores de força de rotura admissíveis, embora alguns dos provetes, nomeadamente os de 20% de infill, não fraturassem por completo e essa fratura não acontecer exatamente na zona central de teste do provete, sendo essa retangular.

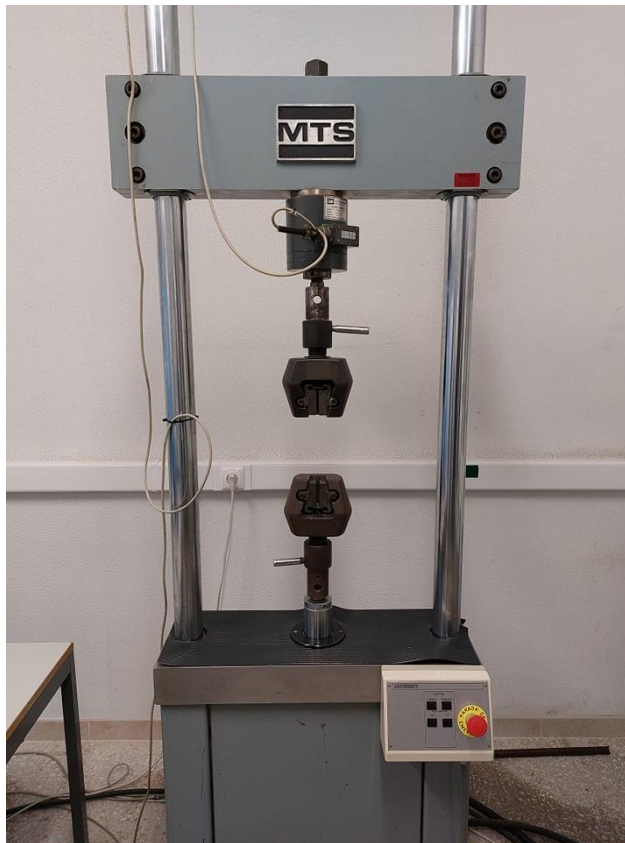


Figura 23 - Máquina MTS

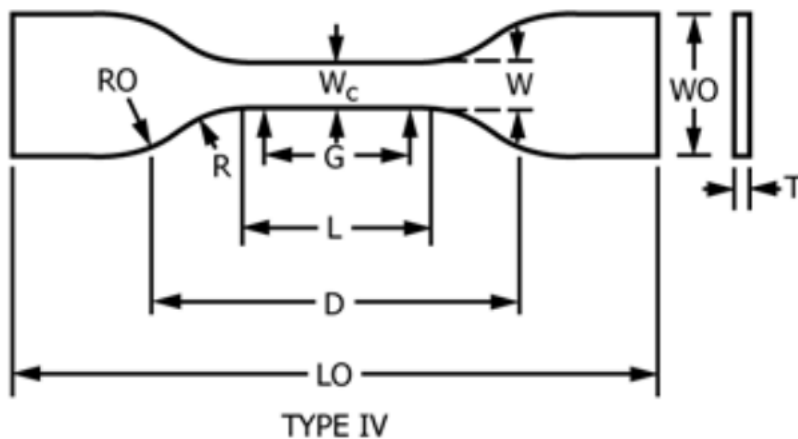
#### **4.3.4 Geometria dos Provete**

Tem de ser seguida uma determinada norma quando se pretende escolher um provete para os ensaios a que são submetidos serem considerados válidos. Sendo assim, foram seguidas as normas ASTM para provetes. Nestas normas existem dois tipos de provetes: com seção transversal circular e retangular. Para evitar processos mais prolongados e complexos foram escolhidos os provetes com seção transversal retangular.

#### **4.3.5 Provete para Ensaio de Tração Uniaxial**

No que diz respeito à norma ASTM D638-14 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*), a que foi utilizada e correspondente a ensaios de tração uniaxial, tem a geometria apresentada na figura seguinte (Figura 24 (a)). Observam-se também as medidas características que são usadas na

Figura 24 (b). A partir desses dados, é possível determinar a área nominal da seção do provete, que será uma mais-valia para o cálculo da tensão máxima numa fase posterior.



(a)

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, $T$ , mm (in.) <sup>A</sup>						Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>		
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>B,C</sup>	
$L$ —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>C</sup>	
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 ( + 0.25)	
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 ( + 0.125)	
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25$ ( $\pm 0.010$ ) <sup>C</sup>	
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13$ ( $\pm 0.005$ )	
$D$ —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	$\pm 5$ ( $\pm 0.2$ )	
$R$ —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ ) <sup>C</sup>	
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ )	

(b)

Figura 24 – Provete para ensaio de tração uniaxial. (a) Geometria do provete de seção transversal da norma D638-14; (b) Medidas caraterísticas da norma D638-14

Os dados utilizados para a produção do provete foram retirados da tabela no Tipo IV, uma vez que se considera esse tipo de provete. Segundo a norma, W deve ser 6 mm e o L deve ser 33 mm, sendo que a espessura é  $3.20 \pm 0.4$  mm. Estes dados foram utilizados para a representação do provete em CAD, assim como o WO é importante para o design, sendo este de valor 19 mm. Para calcular a área nominal da seção do provete foi usada a seguinte fórmula:

$$A_{nom} = W \times T \quad (3)$$

Sendo  $T = 3.20$  mm e  $W = 6$  mm, logo:

$$A_{nom} = 0.006 \times 0.032 = 0.000192 \text{ m}$$

## 4.4 Maquinagem de Polímeros

Uma das principais vantagens dos polímeros é a capacidade de serem moldados num componente terminado sem a necessidade de haver acabamentos ou trabalhos posteriores. Formas complexas e furos podem ser moldados no componente através de técnicas de moldagem e ferramentas. Contudo, tudo isso tem um custo associado devido ao uso das diversas ferramentas [42].

Quando um componente polímero é especificado e os números que são usados não são muito grandes, a maquinagem do componente acaba por ser mais económica. Há que ter em conta que nem todos os polímeros podem ser maquinados. Se um material for mais rígido obviamente é mais fácil de ser maquinado. Se um polímero for mais flexível e macio não é tão adequado para a maquinagem.

A rigidez da peça que é maquinada influencia na escolha das ferramentas de corte que são utilizadas para a maquinagem de diversos materiais. Quando se trata de corte de metais, a rigidez dos materiais é boa. Logo, o componente resiste à distorção quando a fresa corta o metal. Em relação aos polímeros, dividem-se em polímeros termoendurecíveis reforçados com fibra e polímeros que são menos rígidos. A maquinagem apresenta um melhor desempenho nos materiais rígidos, como os polímeros termoendurecíveis, enquanto os polímeros que não são tão rígidos podem deformar quando a fresa corta a peça, o que dificulta a obtenção de tolerâncias dimensionais curtas [42].

Quanto às vantagens de polímeros maquinados, essas são: polímeros são normalmente secos com máquina; aparas podem ser recicladas de volta; as forças necessárias para maquinar polímeros são baixas; não são necessários custos para moldes; capacidade de fabricar volumes baixos economicamente; capacidade de fabricar componentes polímeros com prazos de entrega mais curtos; capacidade

de testar um projeto antes de haver um comprometimento com a produção; componentes muito grandes para serem moldados podem ser maquinados a partir de plástico já formado.

Em relação às desvantagens de polímeros maquinados, essas são: custo alto de material de plástico em bloco; pode ocorrer um grande desperdício; capacidade de maquinagem limitada a materiais plásticos mais rígidos; os polímeros não conduzem nenhum calor gerado no processo de maquinagem; custos bastante altos de tempo na máquina CNC; a remoção de alto volume de cavacos pode eventualmente apresentar dificuldades [42].

#### 4.4.1 Seleção do Material

Como já foi mencionado anteriormente, o material que será utilizado é o PLA N apesar de haver uma gama vasta de materiais para serem usados em FDM, como o ABS, que apresenta muitos estudos da influência dos parâmetros de impressão [43].

A cor escolhida do PLA foi sempre o branco, de forma a manter uma coerência nos resultados.

Tabela 8 - Propriedades Mecânicas do PLA

Propriedades Mecânicas	Valor	Unidades	Método Teste
Módulo de Young	2400 ± 40	MPa	ISO 527-1
Tensão de Cedência	35.2 ± 0.8	MPa	ISO 527-1
Tensão de Rotura	30.0 ± 3.0	MPa	ISO 527-1
Alongamento no Ponto de Cedência	2.0 ± 0.0	%	ISO 527-1
Alongamento no Ponto de Rotura	6.0 ± 2.0	%	ISO 527-1
Resistência a Flexão	68 ± 5	MPa	ISO 178
Módulo de Elasticidade a Flexão	2120 ± 480	MPa	ISO 178
Resistência ao Impacto	10 ± 3	KJ/m <sup>2</sup>	ISO 178

#### 4.4.2 Design of Experiments

##### 4.4.2.1 Introdução ao Design of Experiments

Quando se analisa um dado processo, normalmente é necessário realizar experiências com o objetivo de determinar o impacto que os diversos inputs da experiência têm nos outputs da mesma. O *Design of Experiments* (DOE) é uma abordagem rigorosa e também sistemática para a resolução de problemas

de engenharia que aplicam princípios e técnicas no momento da recolha de dados para garantir a implementação de conclusões de engenharia válidas e fundamentadas.

Além disso, este processo é realizado sob a restrição de um gasto mínimo de execuções de engenharia, dinheiro e tempo. Basicamente, é um ramo da estatística aplicada, que lida com o planeamento, realização, interpretação e análise de experiências controladas.

Existem quatro áreas de problemas gerais de engenharia nas quais o DOE pode ser aplicado:

- Comparação;
- Caracterização;
- Modelagem;
- Otimização.

Há que ter em conta que existem fatores que não são controláveis porque são naturalmente inerentes à experiência, e que podem induzir variações nos resultados. Pode verificar-se igualmente que muitos fatores não têm quaisquer interesses científicos para os investigadores. São denominados de fatores de ruído. Porém, devem ser de alguma forma contabilizados de modo a não influenciarem demasiado a experiência, para não se obterem resultados inesperados [44].

Usando o *Design of Experiments* (DOE), há a possibilidade de realização de experiências com variação de múltiplos fatores em simultâneo, conseguindo-se identificar as interações entre todos eles. Basicamente, só é justificável a utilização do DOE quando se prevê que existe mais do que um fator a influenciar a resposta. Muitas das interações entre fatores poderiam escapar aos investigadores se a experiência fosse efetuada com a variação de um fator de cada vez [44].

#### 4.4.2.2 Importância do DOE na modelagem do processo

O output da modelagem do processo é uma função matemática ajustada com determinados coeficientes estimados. Um dos exemplos é: modelar a resistência,  $y$ , em função da densidade,  $x$ , enquanto um analista pode sugerir a função:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_{11}x^2 + \varepsilon \quad (4)$$

Os coeficientes a serem estimados são  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_{11}$ . Mesmo para uma determinada forma funcional, existe um número infinito de valores de coeficientes que podem ser usados. Cada um desses valores de coeficiente produzirá valores previstos.

Os valores menos bons dos coeficientes são aqueles em que os valores previstos resultantes são consideravelmente diferentes dos dados observados y. Os bons valores dos coeficientes são aqueles em que os valores previstos resultantes estão próximos dos dados observados y. Entretanto, os melhores valores dos coeficientes são aqueles em que os valores previstos resultantes estão próximos dos dados verificados y e a incerteza estatística associada a cada coeficiente é mínima.

Há duas considerações que são úteis para o concebimento dos melhores coeficientes:

- Critério dos quadrados mínimos;
- Princípios do *Design of Experiments* (DOE).

#### 4.4.2.3 Princípios do DOE

Existem três princípios a ter em consideração quando se usam as técnicas do DOE, sendo esses os seguintes:

- Princípio da aleatoriedade;
- Princípio da repetição;
- Princípio dos blocos.

O princípio da aleatoriedade garante a redução da possibilidade de uma dada experiência depender da anterior e de influenciar a seguinte. Isto é, as experiências das várias combinações devem ser realizadas aleatoriamente. Também ajuda a eliminar os efeitos de variáveis desconhecidas.

No que diz respeito ao princípio da repetição, deve-se realizar a mesma experiência múltiplas vezes, mantendo o nível de cada fator constante, com o objetivo de despistar algum acontecimento inesperado durante a experiência. A resposta desta é a média de todas as repetições efetuadas.

O princípio dos blocos trata de agrupar todas as experiências, com características similares em vários blocos ou grupos. É necessário selecionar um fator de bloco ou fator de perturbação. Normalmente este tipo de fatores tem influência sobre a resposta, contudo não é de interesse principal ou não se prevê ser o mais importante. Na maioria dos casos ou o que mais se observa é que, em cada bloco de experiências, o fator de perturbação é mantido constante e todos os outros fatores são variados.

#### 4.4.2.4 Taguchi L4 Array Experiment

Uma das formas mais fáceis de entender o *Design of Experiments* (DOE) é simplesmente implementá-lo num determinado projeto. A abordagem Taguchi DOE utiliza matrizes ortogonais [45].

Um problema que serve como exemplo pode ser a otimização de conversão de uma página Web, que acaba por ser uma mistura de layout, texto e estilo. Para uma página ter sucesso em convidar um visitante a se tornar um membro efetivo depende se corresponder às expectativas do visitante, se haverá a criação de confiança e se realmente incentiva o leitor a clicar no botão “inscrever-se agora”. Basicamente, a intenção é converter o visitante num membro dessa página Web.

Obviamente, como a grande maioria dos problemas de engenharia, há muitas variáveis envolvidas e nenhuma solução que realmente seja ideal. Há que ter em conta que algumas variáveis influenciam mais os resultados do que outras, e nem sempre fica esclarecido qual é a variável que influencia mais o leitor, por exemplo. Existem diretrizes e princípios de engenharia que se aplicam, porém, a otimização para uma situação particular é uma aplicação adequada do *Design of Experiments* [45].

As variáveis em consideração são denominadas fatores. Neste exemplo, os fatores são o tamanho do título da página, o texto do título da página e o texto do botão de chamada de atenção para o leitor.

<b>L<sub>4</sub> (2<sup>3</sup>)</b>			
<b>Run no.</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

Figura 25 - Exemplificação de *Taguchi L4 Array Experiment*

Existem mais variáveis ou fatores que se poderia considerar, contudo mantém-se o limite de três fatores para ser mais simples de compreender. Cada fator tem níveis. Um nível é uma configuração para o fator. Por exemplo, para o tamanho do título da página experimenta-se a fonte pequena e maior, particularmente alturas de fonte de 24 e 48 [45]. Novamente, para haver uma forma mais simplificada de visionar o problema, considera-se apenas dois níveis por fator. Para o texto do título da página, tem-se duas frases para explorar e também há dois níveis para o texto do botão de chamada de atenção para o leitor.



O conjunto DOE de execução usará combinações dos níveis dos fatores, portanto cada combinação deve ser fisicamente possível de ser implementada e operada. Embora seja tentador explorar os extremos de cada fator, a principal intenção é explorar a gama de soluções viáveis.

Na abordagem Taguchi existe uma coleção de *arrays*. Essas são as combinações selecionadas de fatores e níveis que constituem uma matriz ortogonal.

O design da matriz inclui uma representação equilibrada de cada nível para todos os fatores, permitindo que a análise isole cada fator para determinar o efeito dos níveis desse fator nos resultados. Para o problema exemplificado anteriormente, existem 3 fatores, cada um com 2 níveis. Resumindo, normalmente é representado usando a notação  $2^3$  [45].

O *Taguchi L4 Array* inclui 3 fatores neste caso com 2 níveis cada um, e a matriz exemplo é representada na figura abaixo. Considera-se que cada execução é um protótipo único ou arranjo de níveis de fatores. As colunas A, B e C representam os 3 fatores, enquanto os 1 e 2 inseridos nas colunas de fatores representam os respectivos níveis de fator. Resumindo, a matriz tem 4 execuções que são metade dos 8 arranjos possíveis de fatores e níveis. Aprende-se todos os 8 arranjos fazendo apenas 4 experiências [45].

De forma a haver melhor compreensão, atribui-se os fatores da seguinte forma:

<b>L<sub>4</sub> (2<sup>3</sup>)</b>			
<b>Run no.</b>	<b>A – Title Font Size</b>	<b>B Title Phrase</b>	<b>C CTA Phrase</b>
<b>1</b>	<b>24 px</b>	<b>Phrase 1</b>	<b>CTA 1</b>
<b>2</b>	<b>24 px</b>	<b>Phrase 2</b>	<b>CTA 2</b>
<b>3</b>	<b>48 px</b>	<b>Phrase 1</b>	<b>CTA 2</b>
<b>4</b>	<b>48 px</b>	<b>Phrase 2</b>	<b>CTA 1</b>

Figura 26 - Matriz com os fatores atribuídos

A matriz agora fornece dados concretos para criar quatro páginas de Web para o projeto exemplo. Existe também a possibilidade de criar réplicas para cada execução caso seja necessário. O uso de

várias cópias de cada execução permite avaliar a variabilidade dos resultados para cada execução. Mesmo assim, a experiência ainda funcionará com apenas um protótipo por execução, mas, como acontece nas estatísticas em geral, mais amostras são desejáveis [45].

Para o caso em estudo de maquinagem de polímeros (PLA N) foi realizada uma abordagem Taguchi DOE, usando matriz ortogonal, de acordo com o que foi enumerado até agora no que diz respeito ao *Taguchi L4 Array Experiment*. Optou-se por realizar 12 testes para avaliar a variabilidade dos resultados para cada execução, assim obtendo amostras mais desejáveis. Assim utilizou-se  $L_4 (2^3)$ .

Replicate	Cutting Speed (v)	Feed per tooth (fz)	Depth of Cut (p)
1	1	1	1
1	1	2	2
1	2	1	2
1	2	2	1
2	1	1	1
2	1	2	2
2	2	1	2
2	2	2	1
3	1	1	1
3	1	2	2
3	2	1	2
3	2	2	1
Number of tests:		12	

Factors	Low value (1)	High value (2)
v [m/min]	65,9	94,2
fz [mm/tooth]	0,1	0,2
p [mm]	2,0	4,0

Figura 27 - Abordagem Taguchi DOE do Caso de Estudo

Verifica-se que para a maquinagem do PLA N, usando a abordagem Taguchi DOE, tem-se 3 fatores que são: *Cutting Speed (v)*, *Feed per Tooth (fz)* e *Depth of Cut (p)*. Demonstra-se igualmente que cada fator apresenta dois níveis, como por exemplo no fator *Cutting Speed (v)*, existe o nível de 65.9, considerado como valor baixo e existe o nível 94.2, considerado como valor alto. Os restantes fatores também apresentam os dois níveis de forma semelhante, usando um valor baixo e alto. Sendo *Design of*

*Experiments* (DOE), na apresentação de resultados irá demonstrar-se a aleatoriedade de repetições que é necessária para cumprir com os princípios do DOE [45].

### 4.4.3 Dados sobre a Ferramenta e Máquina Utilizada

Os ensaios de maquinagem do polímero foram realizados num centro de maquinagem HAAS, mais especificamente numa Super Mini Mill 2.



Figura 28 - Super Mini Mill 2

Os Mini Mills do centro de maquinagem HAAS são considerados o padrão da indústria para centros de maquinagem compactos. Fornecem uma solução mais económica para maquinagem de peças pequenas num pacote compacto que é carregado com recursos de tamanho habitual [46].

A Super Mini Mill 2 possui um trocador de ferramentas mais rápido, um spindle mais rápido e corredeiras mais altas para melhorar o acabamento e produção da peça em questão [46]. Oferece a mesma combinação de dimensões reduzidas, recursos completos de CNC preço adequado do que a Mini Mill 2 [46] padrão. O seu uso é bastante adequado para universidades, lojas iniciantes ou como um primeiro passo na maquinagem CNC.

Verificam-se as seguintes vantagens:

- Velocidades aumentadas;
- Solução económica para peças pequenas;
- Máquina ideal para produção de alto volume;
- Fabricada nos EUA.

Relativamente à fresa, foi utilizada uma fresa de classe C193.0 HSS-E-PM, possuindo um comprimento de corte curto, um design que fornece uma rigidez alta e é adequada para fresagem de canais rasos e rampas. O diâmetro preciso significa que esse tipo de ferramentas é projetado para fresagem de rasgos de chaveta padrão para uma tolerância P9. Além disso, o revestimento TiCN aumenta a vida útil da fresa e melhora significativamente o desempenho da fresagem de materiais duros e abrasivos.

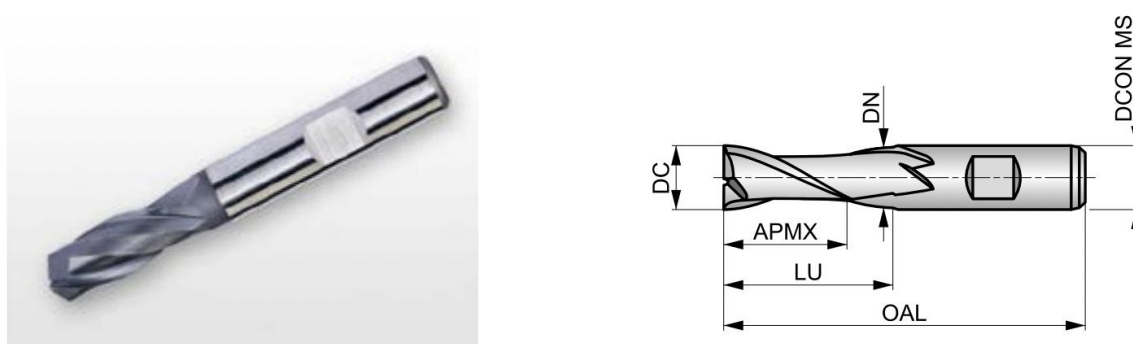


Figura 29 - Fresa utilizada de classe C193.0 HSS-E-PM

Product	DC	DCON MS	APMX	OAL	NOF	LU	DN
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]
C1392.0	2.00	6.00	7.00	51.0	2	-	-
C1393.0	3.00	6.00	8.00	52.0	2	-	-
C1394.0	4.00	6.00	11.00	55.0	2	-	-
C1395.0	5.00	6.00	13.00	57.0	2	-	-
C1395.5	5.50	6.00	13.00	57.0	2	-	-
C1396.0	6.00	6.00	13.00	57.0	2	-	-
C1396.5	6.50	10.00	16.00	66.0	2	-	-
C1397.0	7.00	10.00	16.00	66.0	2	-	-
C1397.5	7.50	10.00	16.00	66.0	2	-	-
C1398.0	8.00	10.00	19.00	69.0	2	-	-
C1398.5	8.50	10.00	19.00	69.0	2	-	-
C1399.0	9.00	10.00	19.00	69.0	2	-	-
C1399.5	9.50	10.00	19.00	69.0	2	-	-
C13910.0	10.00	10.00	22.00	72.0	2	31.50	9.50
C13911.0	11.00	12.00	22.00	79.0	2	-	-

Figura 30 - Dados da fresa de classe C193.0 HSS-E-PM

#### 4.4.4 Impressão e Maquinagem dos Corpos de Prova

A maquinagem serve para tornar a peça o mais lisa possível para efeitos de produção. Neste caso, foi escolhida uma sobre espessura de 2 mm. Assim devem ser incrementados 2 mm nas superfícies de contacto do molde original e ser maquinado posteriormente.

Os corpos de prova são moldes tipo impressos na impressora BCN com uma escala de metade face ao tamanho original, uma vez que nesta fase não há necessidade de imprimir os moldes com o tamanho original, o que seria um grande desperdício de material. Os moldes tipo impressos têm a sobre espessura considerada, isto é, de 2 mm e serão maquinados posteriormente.

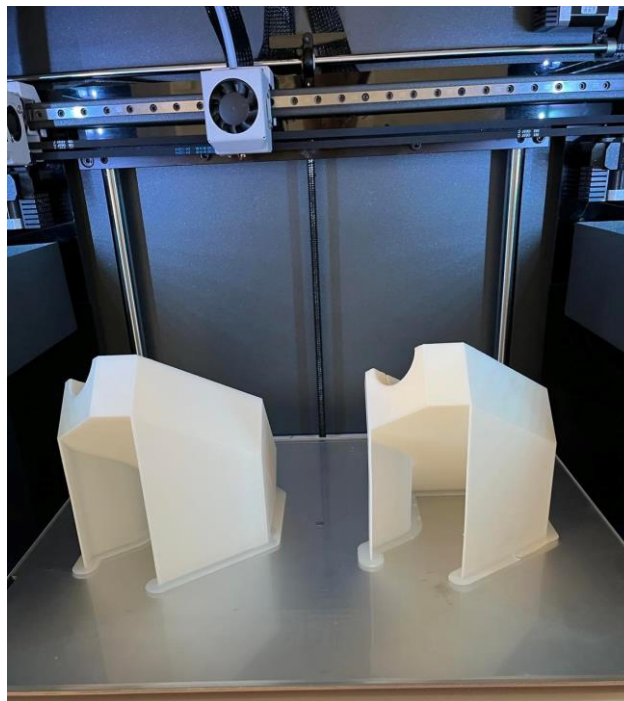


Figura 31 - Moldes tipo impressos na impressora BCN

Uma vez que surgiam problemas na impressão a 45° ao utilizar a impressora BCN como o warping, isto é, normalmente o molde não era impresso de forma plana e, para resolver essa situação, são adicionados suportes até à base do molde como suportes e posteriormente são retiradas facilmente, assegurando um corpo de prova impresso a 45°. Os suportes são adicionados através do software SolidWorks. Na Tabela 9, nota-se as especificações da impressão dos 2 corpos de prova na impressora BCN.

Tabela 9 - Especificações dos dois moldes tipo impressos na BCN

2 corpos de prova	Valor ou especificação
Nozzle	0.6
Layer height	0.3
Infill	6%
Padrão	Gyroid
Top Thickness	4 mm
Wall Thickness	4 mm

O molde tipo deve ser perfurado no topo duas vezes, possibilitando duas aberturas. Neste caso, os furos foram formados através da utilização de um berbequim com uma broca de 10 mm de diâmetro. Essas são responsáveis pela deposição do gesso no interior do molde tipo com infill padrão Gyroid e pela saída de ar, com o objetivo de evitar bolhas de ar e o processo ocorrer da melhor forma possível. Ao realizar um corpo de prova com o exterior em PLA N e o interior no gesso escolhido é possível estudar o comportamento do gesso no interior perante a maquinagem.

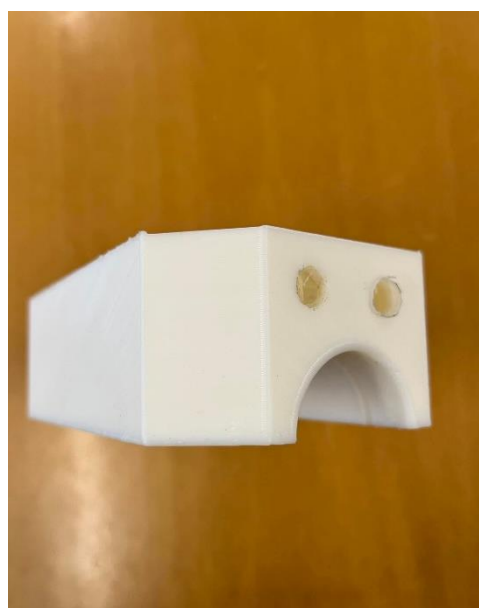


Figura 32 - Perfuração do molde tipo para possibilitar o enchimento do gesso

As vibrações de maquinagem são vibrações fortes que ocorrem quando uma peça de trabalho, neste caso o molde tipo, entra em contato com a ferramenta de corte de uma máquina, como uma fresa. Tanto os tornos como as fresas possuem uma ferramenta de corte. Basicamente uma ou várias lâminas são pressionadas contra uma peça de trabalho [47].

As vibrações de maquinagem ocorrem na área onde a ferramenta de corte de uma máquina entra em contato com uma peça de trabalho. O gesso escolhido, isto é, o Gesso Cerâmico Extra, possui uma determinada resistência à flexão que vem especificada no catálogo e o objetivo é descobrir se essa resistência é suficientemente elevada para resistir às vibrações inevitáveis da fresa. Caso não resistir,

as vibrações de maquinagem podem levar a imperfeições superficiais no molde tipo, mais especificamente nos locais que estão a ser maquinados [47].

#### 4.4.4.1 Importância de Wall Thickness e Top Thickness na Impressão dos Corpos de Prova

Basicamente, uma *Wall Thickness* consistente implica um produto mais resistente e durável. Resume-se a integridade. Uma espessura de parede consistente ajuda a manter a integridade estrutural do produto, uma vez que minimiza o número de “pontos de tensão”. Em outras palavras, são áreas mais vulneráveis a danos causados por batidas casuais ou impactos repentinos [48].

A largura da parede em milímetros, chamada simplesmente de *Wall Thickness* no Cura, determina a largura do conjunto de paredes numa impressão [49].

Se houver inconsistências no próprio produto, é aí que essas podem começar a afetar sua integridade estrutural geral. No caso estudado, quando se pretendia imprimir os dois corpos de prova a 45°, aconteceu exatamente isso e os moldes mostraram claramente evidências de *warping*.

Especificamente, se algumas seções da peça ou produto forem mais finas que outras, isso pode resultar em:

- *Warping* – torções ou dobras na forma que podem dar lugar a grandes defeitos a nível estrutural [49];
- Marcas de abatimento – pequenas “crateras” que podem aparecer quando não arrefece completamente [49];
- Problemas relacionados com a taxa de arrefecimento – se diferentes seções da peça levam tempos diferentes para arrefecer, isso pode acabar por desacelerar toda a execução da produção, consequentemente com efeitos indiretos nos custos e na eficiência. Além disso, também pode tornar algumas partes inutilizáveis [49].

Neste caso em estudo, a *Wall e Top Thickness* são importantes porque os corpos de prova são maquinados 2 mm, isto é, a sobre espessura que foi definida. Como se pode ver na Figura 33 em CAD, o molde original é modificado a nível das superfícies de contacto, onde se acrescenta mais 2 mm.

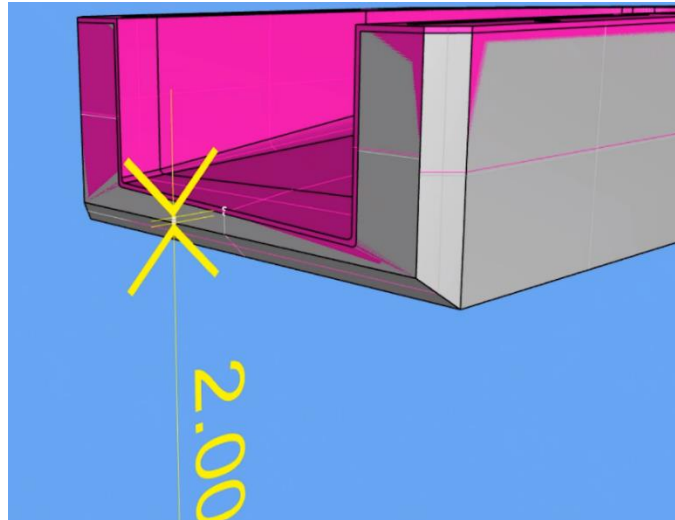
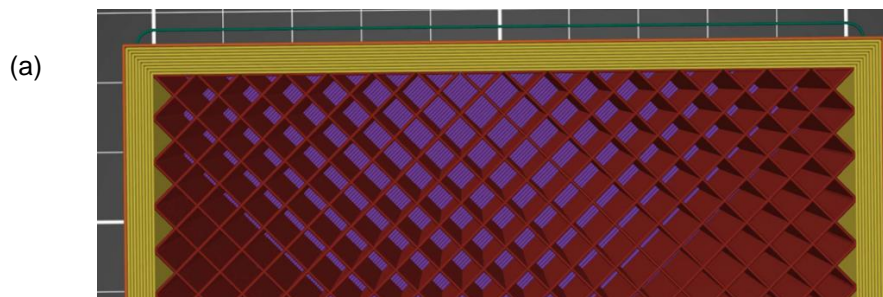


Figura 33 - Imagem CAD do molde original modificado

Exemplificando, o molde original com as dimensões originais com paredes de 2 mm de espessura é representado na Figura 34 (a), ao passo que se maquinarmos as paredes 2 mm, correspondentes à sobre espessura que foi escolhida inicialmente, ficamos com o molde no seguinte aspeto (Figura 34 (b)). Logo, fica sem parede e com o infill à mostra. Para colmatar isso, é necessário aumentar o molde. No entanto se a *Wall Thickness* for na mesma 2 mm fica como na figura (Figura 34 (c)). Logo, a partir desta lógica, escolhe-se uma *Wall Thickness* com valor de 4 mm, como se pode verificar na Figura 34 (d). Com esta espessura pode-se maquinar 2 mm, ficando com 2 mm de parede, e as dimensões do molde ficam consequentemente as exatas (Figura 34 (e)).





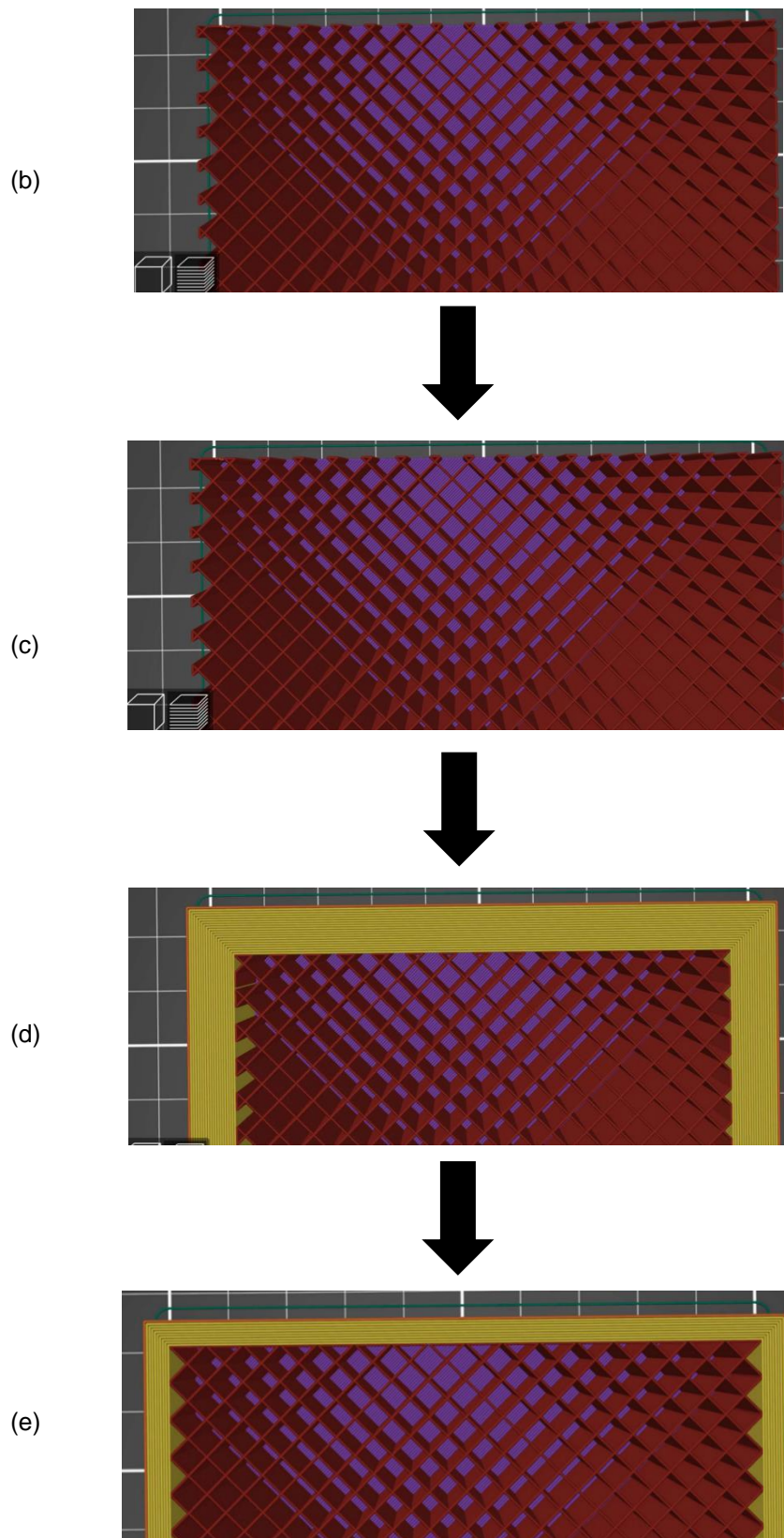


Figura 34 - Passos da incrementação de 2 mm de sobre espessura. (a) Molde original com as dimensões originais com paredes de 2 mm de espessura; (b) Maquinagem de 2 mm das paredes; (c) Sem parede e com o Infill à mostra; (d) Aumento do molde com uma *Wall Thickness* de 4 mm; (e) Maquinagem de 2 mm das paredes para as dimensões ficarem exatas

## 4.5 Procedimento e Escolha do Gesso para Enchimento

Um objetivo crucial deste projeto é baixar os custos do molde usando o gesso para fornecer mais resistência a um custo mais baixo em vez de se fazer a peça sólida por FDM. Para perceber qual o gesso que se deve utilizar e a gama de temperaturas aceitável desse gesso, é necessário efetuar uma pesquisa e contactar determinadas empresas para obter informações acerca da temperatura máxima que os gessos conseguem suportar.

Considerou-se a ideia de o processo de cura ser em autoclave, no qual o gesso teria de suportar aproximadamente 160 °C, no entanto, optando por um processo de fabrico de compósitos como o RTM ou VARTM, em que não há necessidade de cura no autoclave, é aceitável escolher um gesso que aguente temperaturas que rondam os 100 °C, não esquecendo que os processos de fabrico de compósitos como o RTM utilizam uma gama de temperaturas elevada. Devem ser considerados fatores fundamentais como por exemplo a temperatura máxima que o gesso consegue suportar, assim como a sua expansão linear e relação preço-qualidade.

Foi realizada uma reunião com as partes interessadas, incluindo a empresa Jodrax, para ser decidido qual o gesso mais adequado para ser usado como enchimento do molde. Houve vários fatores em causa para haver uma decisão unânime, como por exemplo a temperatura máxima que o gesso consegue suportar, assim como a sua expansão linear e a relação preço-qualidade.

Depois de serem considerados esses fatores, chegou-se à conclusão de que o gesso cerâmico extra da Sival seria o mais adequado para iniciar as experiências, uma vez que apresenta boas características como aquelas mencionadas anteriormente. Como segunda escolha, foi selecionada a espuma PU SIKA BOOM-400 FIRE caso a primeira escolha, ou seja, o gesso cerâmico extra, não seja compatível com as experiências que se pretendem realizar.

Tipo de Gesso ou Espuma	Empresa	Temperatura de funcionamento	Preço	Observações
Gesso Rei (refratário)	ZEX	Até aos 400°C (segundo a funcionária)	35 €/25 kg	
Espuma Soudafoam FR 2K	Construgal	-40 °C até +90 °C (curada)	126,91 €	Quantidade mínima de encomenda - 1 caixa de 12 unidades
Espuma Soudafoam FR Click and Fix	Construgal	-40 °C até +90 °C (curada)	148,70 €	Quantidade mínima de encomenda - 1 caixa de 12 unidades
Espuma Soudafoam FR	Construgal	-40 °C até +90 °C (curada)	143,52 €	Quantidade mínima de encomenda - 1 caixa de 12 unidades
Espuma PU SIKA BOOM-400 FIRE	Leroy Merlin	80°C (Resistência Térmica)	15,49 €	
FIRECEMENT - MASTIQUE REFRACTÁRIO SOUDAL	Brico Butikk	Resistência até aos 1500°C	3,27 €	
Gesso de Acabamento MARUFINO	Brico Butikk		6,27 €	
Argamassa Refratária AXTON	Leroy Merlin	Resistência até aos 1000 °C	14,99 €	
Argamassa de fixação rápida SIKA MINIPACK	Leroy Merlin	80°C	15,99 €	
Gesso Cerâmico Extra	Sival	Até aos 100°C (segundo o funcionário)	4 €/30 kg	
Gesso SIKA Brico Butikk	Brico Butikk			

Figura 35 - Dados para a escolha do gesso para enchimento



### ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Relação Gesso/Água: 1,25 kg/l - 1,40 kg/l  
 Tempo de Início de Presa: 12min ± 3min  
 Tempo de Fim de Presa: 28min ± 5min  
 Fluidez (anel de Vicat): 220 mm ± 20 mm  
 Expansão linear (1 hora): máx. 0,20%  
 Resistência à Flexão (seco): ~ 48 kg/cm<sup>2</sup>  
 Capacidade de Abs. Água: 40 ± 2 %

Resíduo:  
 Peneiro 300 micron: ≤ 0,008%  
 Peneiro 150 micron: ≤ 0,130%  
 Peneiro 45 micron: ≤ 2,300%

Figura 36 - Gesso Cerâmico Extra e as suas especificações técnicas

Apesar da relação gesso/água ser 1.25 kg/l – 1.40 kg/l, é necessária uma relação mais baixa devido aos resultados analisados quando foram realizadas nas primeiras experiências. Nesses ensaios, ao usar uma relação de 1.30 kg/l, verificou-se que a introdução do gesso cerâmico extra no molde dificultava-se bastante porque começa a solidificar mais rápido do que é esperado e existem partes do molde que não são preenchidas completamente. Consequentemente, para a experiência principal, no qual o molde é preenchido completamente pelo gesso cerâmico extra, foi definida uma relação 0.7 kg/l, ou seja, existe uma maior proporção de água comparativamente às outras experiências que acabaram por falhar.

Primeiramente, para saber se o gesso cerâmico extra serviria, esse foi testado num molde modelo de pequenas dimensões para analisar se existiria a formação extrapolada de bolhas nas superfícies e outros defeitos que devem ser considerados. Como se pode analisar na Figura 37, isso acabou por não se verificar.



Figura 37 - Primeiro molde modelo para teste do gesso

É possível notar a diferença entre os moldes modelo representados na figura seguinte (Figura 38). Um desses moldes contém o gesso de enchimento enquanto o outro não. Isto porque, posteriormente, a maquinação do molde modelo será realizada tanto naquele que está preenchido com o gesso cerâmico extra como no que não está preenchido.



Figura 38 - Molde tipo sem material de enchimento (à esquerda) e molde tipo contendo o gesso de enchimento (à direita)

## **4.6 Ensaio de Pressão e Temperatura Esperados num Processo de Fabrico de Compósitos**

O processo fora de autoclave fabrica compósitos aplicando vácuo, calor e pressão fora de autoclave. Usa uma pressão mais baixa do que o autoclave e os compósitos são curados num forno. Um sistema de resina especial é desenvolvido para evacuar vazios de forma eficiente [50].

No entanto, a qualidade dos compósitos fabricados pelo processo fora de autoclave é inferior aos que são processados no autoclave, contudo é mais económico. No que diz respeito ao processo RTM, esse pode funcionar a temperaturas entre os 50 e 90°C. O molde tipo estudado possui no interior um gesso que suporta temperaturas até 100°C, logo espera-se que não haja qualquer problema quando o molde tipo for submetido ao processo de fabrico de compósitos. [51].



Figura 39 - Autoclave

As temperaturas esperadas no processo de fabrico de compósitos são elevadas e pretende-se saber se o molde tipo resiste às temperaturas utilizadas no processo que seja usado [50].

Assim que se testar o molde tipo às temperaturas esperadas no processo de fabrico de compósitos, como por exemplo o RTM, obtém-se o resultado da experiência e, se o molde tipo conseguiu suportar as temperaturas específicas que são utilizadas no processo de fabrico de compósitos, então pode verificar-se se o molde tipo suporta as pressões do processo, que costumam ser igualmente elevadas [50].

## APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Não foi necessário usar o método DOE (*Design of Experiments*) para os ensaios de tração uniaxial, uma vez que se pretende apenas saber as tensões máximas e não estão em causa múltiplos fatores, para posteriormente servirem de dados para a maquinação do PLA N. No entanto o método DOE (*Design of Experiments*) acaba por ser útil para os ensaios de maquinação do PLA N, assim como *Taguchi L4 Array Experiment*. Através de cálculos, análise de gráficos e outras observações necessárias, consegue-se alcançar o que é pretendido, tanto para respostas do ensaio de tração uniaxial como para os ensaios de maquinação. São também analisados os ensaios dos corpos de prova sujeitos a pressões e temperaturas regulares nos processos de fabrico de compósitos.

### 5.1 Respostas do Ensaio de Tração Uniaxial

Através dos ensaios de tração uniaxial, obtêm-se valores de força e deslocamento. São exportados para ficheiros excel e posteriormente, através de cálculos determinados pela equação (1), é possível obter todos os dados de tensões e associá-los às extensões. Feito isso, consegue-se elaborar os gráficos tensão vs extensão e identificar a tensão máxima para cada um dos ensaios. Além disso, também são demonstradas as imagens de como fraturaram os provetes em causa e é realizada uma interpretação da teoria em torno do que aconteceu para cada caso.

Primeiro ensaio, terceiro ensaio e quarto ensaio (infill 20%):

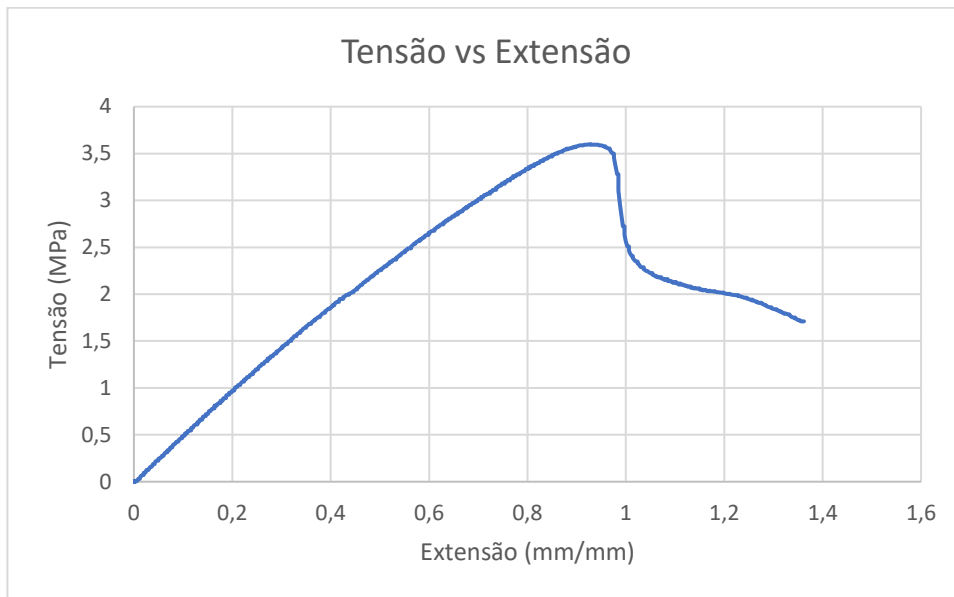


Figura 40 - Gráfico de Tensão vs Extensão do primeiro ensaio

Tensão máxima do primeiro ensaio:  $\sigma_{\max} = 3.60$  MPa



Figura 41 - Provete tracionado do primeiro ensaio

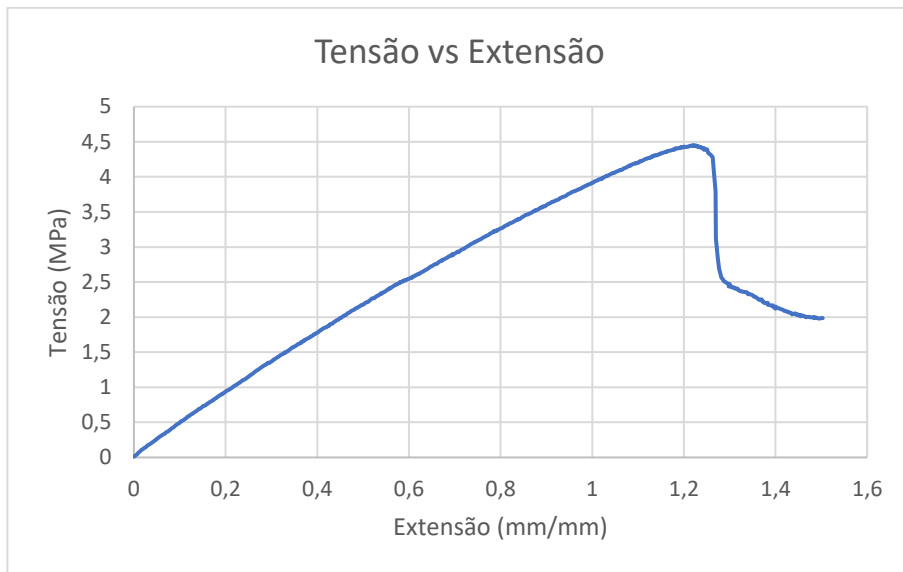


Figura 42 - Gráfico de Tensão vs Extensão do terceiro ensaio

Tensão máxima do terceiro ensaio:  $\sigma_{\max} = 4.45 \text{ MPa}$



Figura 43 - Provete tracionado do terceiro ensaio



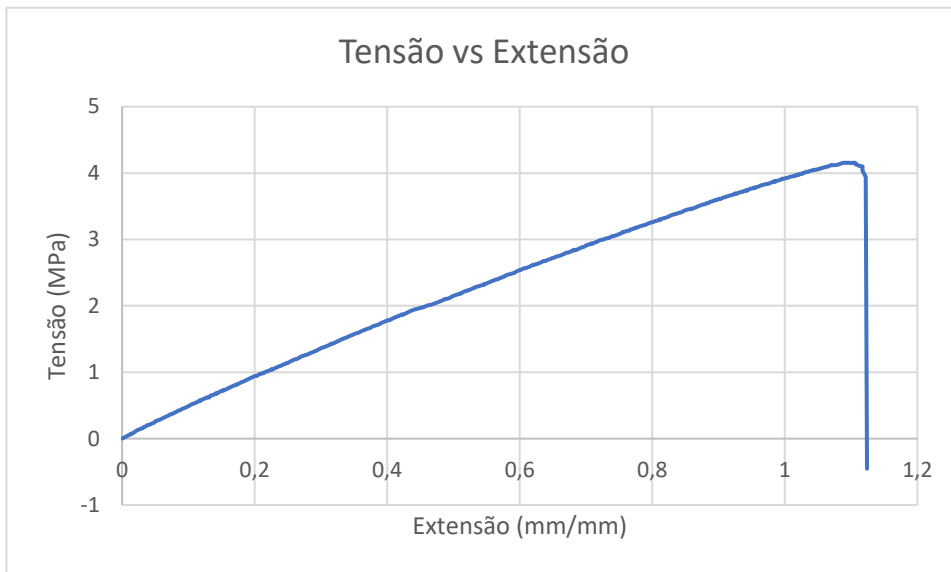


Figura 44 - Gráfico de Tensão vs Extensão do quarto ensaio

Tensão máxima do quarto ensaio:  $\sigma_{\max} = 4.16 \text{ MPa}$



Figura 45 - Provete tracionado do quarto ensaio

Segundo ensaio e quinto ensaio (infill 100%):

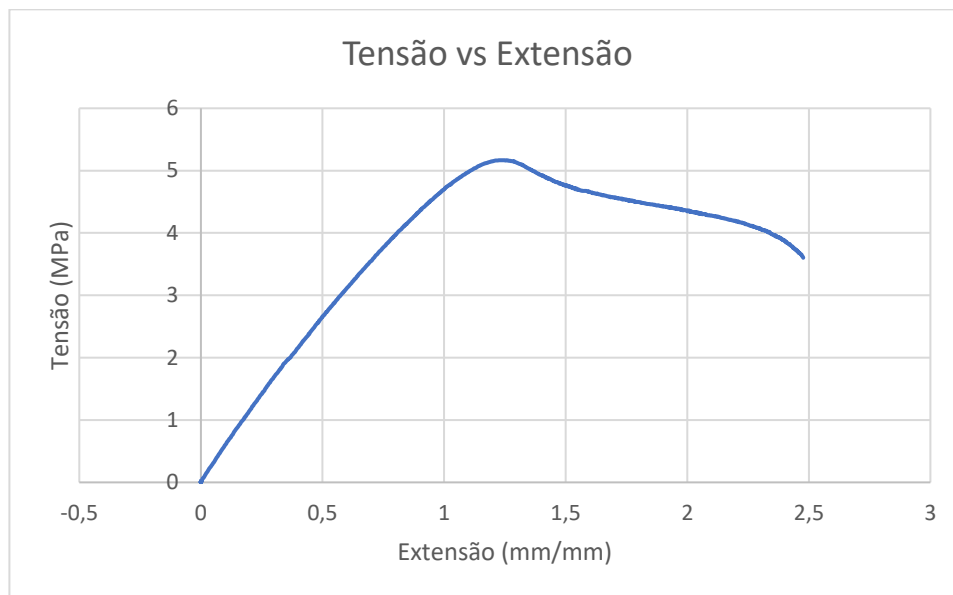


Figura 46 - Gráfico de Tensão vs Extensão do segundo ensaio

Tensão máxima do segundo ensaio:  $\sigma_{\max} = 5.17$  MPa



Figura 47 - Provete tracionado do segundo ensaio

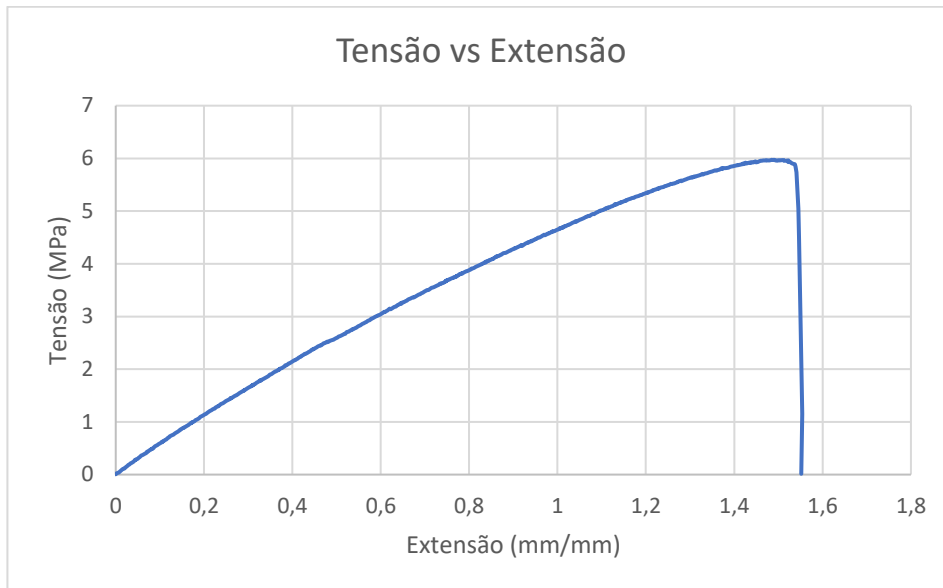


Figura 48 - Gráfico de Tensão vs Extensão do quinto ensaio

Tensão máxima do quinto ensaio:  $\sigma_{\max} = 5.97 \text{ MPa}$



Figura 49 - Provete tracionado do quinto ensaio

A fratura frágil é a falha repentina e rápida do material em questão, na qual esse apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica [52]. É caracterizada por uma fratura rápida sem qualquer aviso. As fendas geradas propagam-se rapidamente e o material colapsa de forma repentina. Fratura frágil é uma condição que ocorre quando um material é submetido a temperaturas que o tornam menos resiliente e, portanto, mais frágil. O potencial do material se tornar frágil depende do tipo de material que é submetido a essas temperaturas.

A fratura dúctil é a falha do material que exibe deformação plástica substancial antes da fratura. Portanto, o processo de fratura dúctil é lento e, contrariamente à fratura frágil, avisa antes da separação final. Normalmente, uma grande quantidade de fluxo plástico é concentrada perto das faces da fratura. A fratura dúctil ocorre durante um período e normalmente ocorre após a tensão admissível, enquanto a fratura frágil é rápida e pode ocorrer em níveis de tensão mais baixos do que uma fratura dúctil [52]. É por isso que a fratura dúctil é considerada melhor do que a fratura frágil.

Tendo em conta os conceitos de fratura frágil e dúctil, vai-se, portanto, proceder à análise dos gráficos Tensão vs Extensão dos ensaios mostrados anteriormente, identificando quais os provetes que sofreram uma fratura frágil e os que sofreram uma fratura dúctil.

Logo, no primeiro ensaio, verifica-se que ocorreu uma fratura dúctil, assim como nos restantes ensaios. Observa-se que ocorre uma fratura dúctil uma vez que não acontece uma falha repentina do material e o processo é evidentemente mais lento [52]. É muito provável que aconteça uma fratura dúctil uma vez que o material se trata de um polímero.

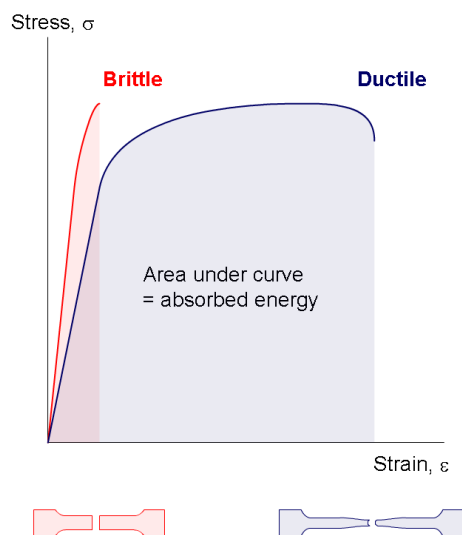


Figura 50 - Gráfico que ilustra o comportamento de fratura frágil e fratura dúctil

De acordo com a norma ASTM D638-02a, o Módulo de Young é determinado a partir de um segmento de zona linear de deformação elástica do material e calcula-se dividindo a diferença de tensões desse segmento pela diferença de extensões. Ou seja, o Módulo de Young é igual ao declive da zona linear inicial que se pode tirar da curva tensão-extensão. Usando os gráficos representados acima, de Tensão vs Extensão, pode calcular-se os valores de Módulo de Young ao fazer a divisão de diferença de tensões pela diferença de extensões. Para todos os casos, foi sempre considerada a diferença da extensão 0.2 mm e 0 mm, visto que se pretende calcular numa zona linear, que se verifica aproximadamente nos gráficos, e onde existe deformação elástica. A partir do valor de extensão 0.2 mm, sabe-se o valor da tensão ao interceitar a curva tensão-extensão.

No que diz respeito à Tensão de Cedência, essa corresponde à tensão a partir da qual o material entra em regime de deformação plástica. Em alguns casos, é possível visualizar a zona de transição da deformação elástica para a deformação plástica na curva tensão-extensão, visto que deixa de ser linear e o seu declive diminui de forma drástica. Contudo, noutros casos como é o caso estudado, essa transição não é tão evidente o que torna a zona de cedência do material pouco clara. Logo, como se pode observar na Figura 51, é necessário traçar uma linha paralela à porção elástica da curva desfasada de 0.002 mm/mm de extensão, isto é, a 0.2% de extensão. Ao fazer a interseção desta linha com a curva tensão-extensão, obtém-se então o valor de Tensão de Cedência do material.

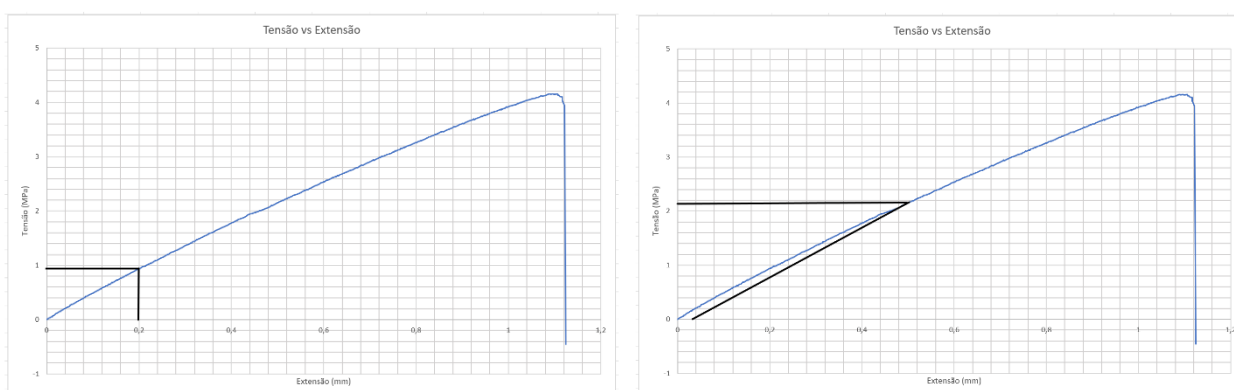


Figura 51 - Obtenção dos valores de Módulo de Young e Tensão de Cedência do quarto ensaio a partir do gráfico Tensão vs Extensão

Os resultados dos ensaios de tração uniaxial podem ser consultados na tabela seguinte. Obtiveram-se os valores de Tensão Máxima que são imprescindíveis para obter os dados para a maquinagem. Verifica-se que se usaram diferentes infill, de 20% e 100%, para efeitos de maior variabilidade. Quando foi realizada a maquinagem, utilizaram-se os valores de tensões máximas correspondentes aos infill que foram usados.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de tração uniaxial realizados

<b>Ensaio</b>	<b>Tensão Máxima [MPa]</b>	<b>Tensão de Cedência [MPa]</b>	<b>Módulo de Young [MPa]</b>
<i>Primeiro Ensaio (infill 20%)</i>	3.60	2	500
<i>Segundo Ensaio (infill 100%)</i>	5.17	2.35	590
<i>Terceiro Ensaio (infill 20%)</i>	4.45	2.4	450
<i>Quarto Ensaio (infill 20%)</i>	4.16	2.18	465
<i>Quinto Ensaio (infill 100%)</i>	5.97	2.2	585

## 5.2 Resultados dos Ensaio de Maquinagem para Efeitos de Rugosidade

Após uma abordagem *Taguchi L4 Array Experiment*, em que existem três fatores e cada fator possui dois níveis, como já foi mencionado anteriormente, realizaram-se os ensaios de maquinagem para efeitos de medição de rugosidade.

<b>Level</b>	<b>v</b>	<b>fz</b>	<b>p</b>
1	65,97	0,1	2
2	94,25	0,2	4

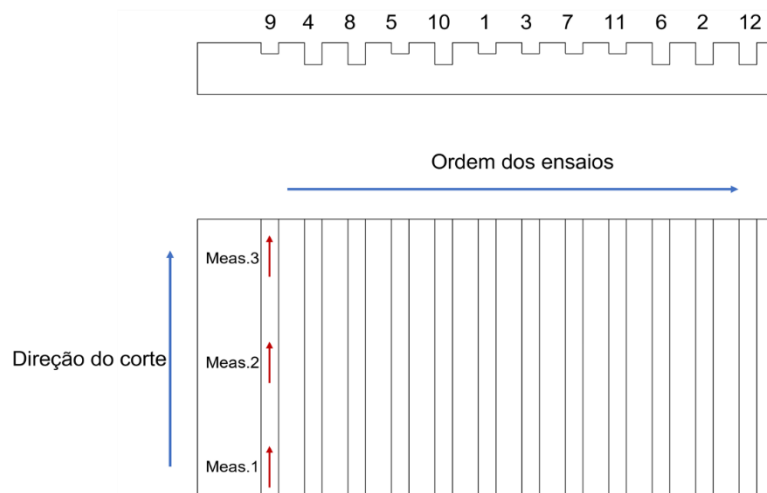
Figura 52 - Abordagem *Taguchi L4 Array Experiment* realizada para os ensaios de maquinagem

Esses ensaios foram realizados de forma aleatória e verificou-se que os ensaios 4,8 e 12 evidenciaram condições de maquinagem não adequadas. Sendo assim, procedeu-se à observação minuciosa destes, porque se pode verificar a existência de “*heat build up*”, ou seja, provavelmente foi ultrapassada a temperatura de transição do material. Estas rebarbas devem ser analisadas com mais detalhe.

12		Coded variables			Real values			Machine values		Meas. 1		Meas. 2		Meas. 3		Average		Standard Deviation	
Standard Run	Replicate	Cutting Speed (v)	Feed per tooth (fz)	Depth of Cut (p)	v [m/min]	fz [mm/tooth]	p [mm]	S [rpm]	F [mm/min]	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> [μm]	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> [μm]	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> [μm]	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> [μm]	DP (R <sub>a</sub> )	DP (R <sub>z</sub> )
9	3	1	1	1	66,0	0,1	2,0	7000	1399,9	1,232	6,234	1,247	6,925	1,248	6,348	1,242	6,502	0,0090	0,3705
4	1	2	1	2	94,3	0,1	4,0	10000	2000,0	1,008	5,048	0,987	5,235	0,981	5,21	0,992	5,164	0,0142	0,1015
8	2	2	1	2	94,3	0,1	4,0	10000	2000,0	1,021	5,327	1,018	5,548	1,101	5,381	1,047	5,419	0,0471	0,1152
5	2	1	1	1	66,0	0,1	2,0	7000	1399,9	1,321	7,023	1,309	7,12	1,347	6,932	1,326	7,025	0,0194	0,0940
10	3	1	2	2	66,0	0,2	4,0	7000	2799,9	1,167	6,196	1,153	6,346	1,171	6,342	1,164	6,295	0,0095	0,0855
1	1	1	1	1	66,0	0,1	2,0	7000	1399,9	1,311	6,635	1,303	6,436	1,308	6,647	1,307	6,573	0,0040	0,1185
3	1	2	2	1	94,3	0,2	2,0	10000	4000,1	1,141	6,035	1,132	6,201	1,138	5,987	1,137	6,074	0,0046	0,1123
7	2	2	2	1	94,3	0,2	2,0	10000	4000,1	1,14	5,982	1,134	6,012	1,116	6,001	1,130	5,998	0,0125	0,0152
11	3	2	2	1	94,3	0,2	2,0	10000	4000,1	1,098	5,671	1,213	5,743	1,076	5,576	1,129	5,663	0,0736	0,0838
6	2	1	2	2	66,0	0,2	4,0	7000	2799,9	1,123	5,981	1,131	6,21	1,116	5,991	1,123	6,061	0,0075	0,1294
2	1	1	2	2	66,0	0,2	4,0	7000	2799,9	1,115	5,621	1,128	5,703	1,142	5,456	1,128	5,593	0,0135	0,1258
12	3	2	1	2	94,3	0,1	4,0	10000	2000,0	1,101	5,864	1,214	5,998	1,014	5,653	1,110	5,838	0,1003	0,1739
condições de maquinagem não adequadas																			

Figura 53 - Ensaios que revelam condições de maquinagem não adequadas e valores de rugosidade obtidos

Conclui-se que o ensaio 4 apresentou o menor valor de rugosidade, apesar de evidenciar condições de maquinagem não adequadas. Tendo em consideração os ensaios que apresentaram condições de maquinagem adequadas, o ensaio 11 foi o melhor executado em termos de rugosidade e de aspeto do corte na peça retangular em PLA N, uma vez que alguns ensaios também apresentavam um valor baixo de rugosidade, porém o aspeto do corte não foi tão bom como o do ensaio 11. Pode considerar-se como exemplo alguns casos em que a rugosidade é baixa, contudo, na região do corte pode haver rebarbas agarradas e a região do corte não estar devidamente apresentável em comparação com o ensaio 11 como referência. Em comparação com os restantes apresenta um valor de R<sub>a</sub> mais baixo e aceitável, assim como o R<sub>z</sub> é baixo.



(a)



(b)

Figura 54 - Maquinagem da peça retangular. (a) Ordem dos ensaios e direção de corte da peça maquinada; (b) Imagem da peça retangular maquinada e observação das condições de maquinagem não adequadas e rebarbas agarradas

### 5.3 Resultados dos Ensaios de Maquinagem dos Corpos de Prova (Moldes Modelo)

Ao realizar os ensaios de maquinagem dos corpos de prova (moldes modelo), constatou-se que a maquinagem utilizando os parâmetros definidos colocou à vista parte do infill numa zona do molde tipo, talvez devido às condições de impressão. As condições de impressão tiveram de ser bastante específicas para permitir a sobre espessura de 2 mm, o qual teve de se mudar os valores de *wall* e *top thickness*. A parte do infill exposta pode ser vista nas figuras abaixo, tanto no molde com gesso como no molde sem gesso.



Figura 55 - Molde com material de enchimento maquinado (mostra a parte do infill exposta)





Figura 56 - Molde sem gesso maquinado

## 5.4 Resultados dos Ensaio de Pressão e Temperatura Esperados num Processo de Fabrico de Composites

Os ensaios foram feitos com as peças a 50% da dimensão real, isto porque para testes não fazia sentido usar as dimensões originais do molde. Foram testadas uma peça com o material de enchimento e outra sem esse material de enchimento, para haver uma comparação e ver como o gesso se comporta face às condições implementadas.

As condições de aquecimento foram basicamente:

- 10°C por min até à temperatura definida;
- 2 horas na temperatura definida;
- Arrefecimento de 10°C por minuto;
- Sempre sob pressão (37.8 kg em 6787mm<sup>2</sup>).

Tabela 11 - Tabela referente aos processos, temperatura e pressão utilizada

Processo	Temperatura	Pressão
<i>Annealing</i>	45°C	Ambiente
Temperatura 1	45°C	0.055 MPa /0.55 Bar
Temperatura 2	60°C	
Temperatura 3	90°C	

Foi realizado um scan às peças num Shining einscan SE, sendo que o scanner apresenta um erro de 0.5 mm e foi efetuada uma comparação em Meshlab, como se pode ver nas representações abaixo.

**Com gesso**  
**Original para *Annealing***

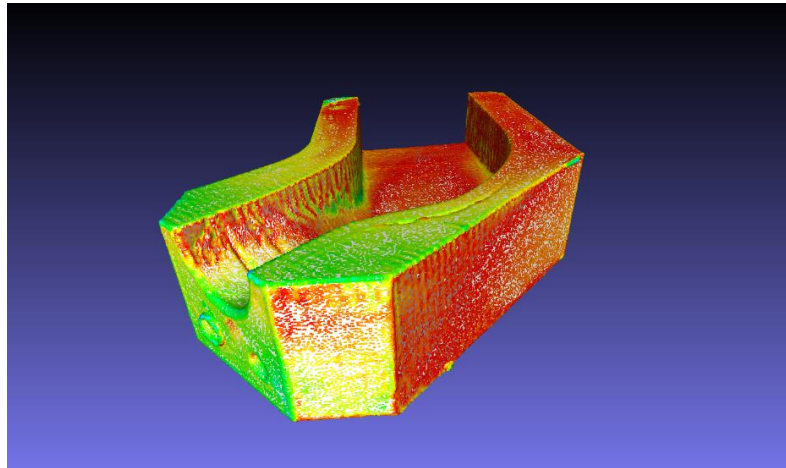


Figura 57 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para *annealing*

Tabela 12 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para *annealing*

Maior Distância	1.34
Menor Distância	0
Média	0.162

Os valores obtidos estão dentro do erro do scanner.

**Original para 45°C**

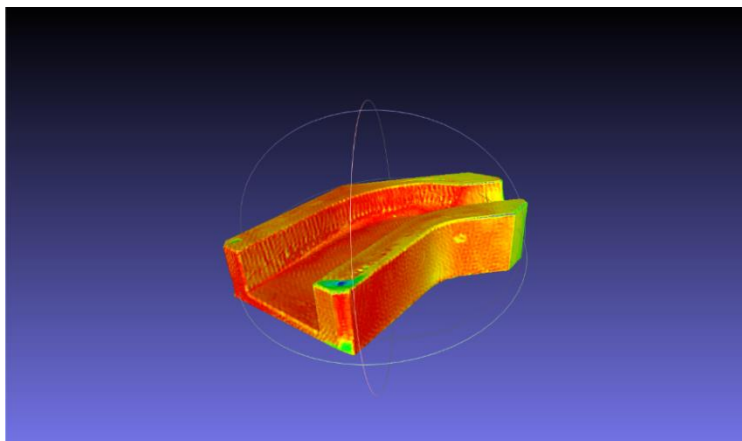


Figura 58 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 45°C

Tabela 13 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 45°C

Maior Distância	1.44
Menor Distância	0
Média	0.169

Corresponde ao primeiro ensaio, com mesma temperatura de *annealing*. De notar que a zona azul que se vê no canto corresponde a um erro de meshing. No entanto houve um ligeiro aumento tanto do valor de maior distância como médio, mas ainda dentro do erro do scanner.

### Original para 60°C

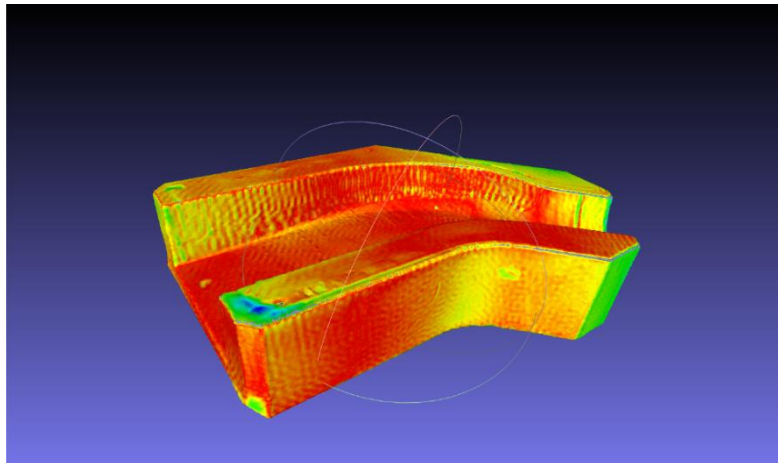


Figura 59 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 60°C

Tabela 14 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 60°C

Maior Distância	1.54
Menor Distância	0
Média	0.199

Com base no que pode ser observado, o aumento tanto do valor maior como do valor médio, aponta para uma redução de altura na peça, embora pequena.

### Original para 90°C

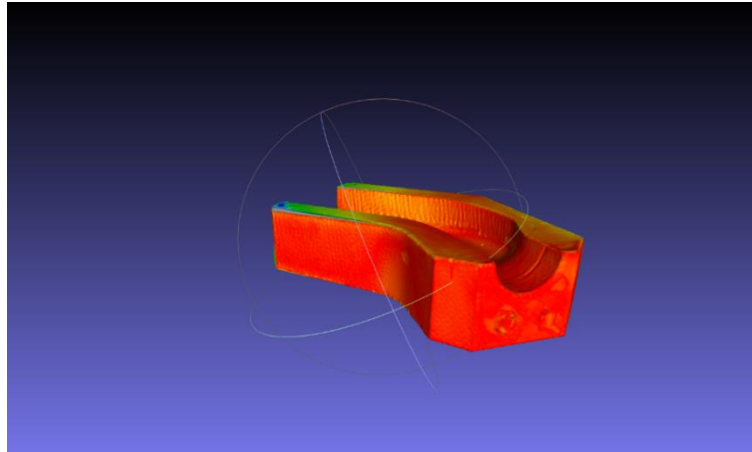


Figura 60 - Molde tipo com gesso representado no meshlab para 90°C

Tabela 15 - Média, maior e menor distância no molde com gesso para 90°C

Maior Distância	1.755
Menor Distância	0
Média	0.25

Com base no que pode ser observado, existe maior distorção a azul. Ocorre ainda uma redução que indica perda de espessura. Acaba por ser expectável dado a temperatura estar mais alta. No entanto o método RTM não experimenta estas temperaturas, logo não é problema.

### Sem gesso

#### Original para *Annealing*

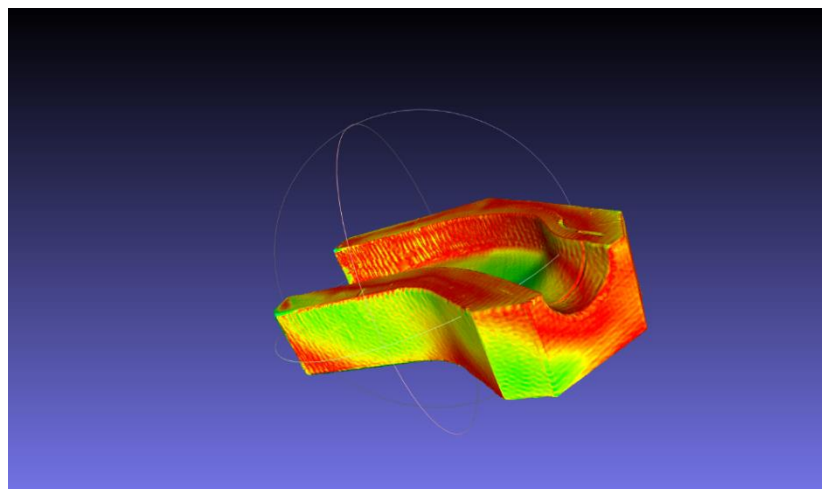


Figura 61 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para *annealing*

Tabela 16 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para *annealing*

Maior Distância	1.153
Menor Distância	0
Média	0.263

Segundo os valores obtidos, verifica-se que o valor médio e maior distância são maiores do que no molde com gesso.

### Original para 45°C

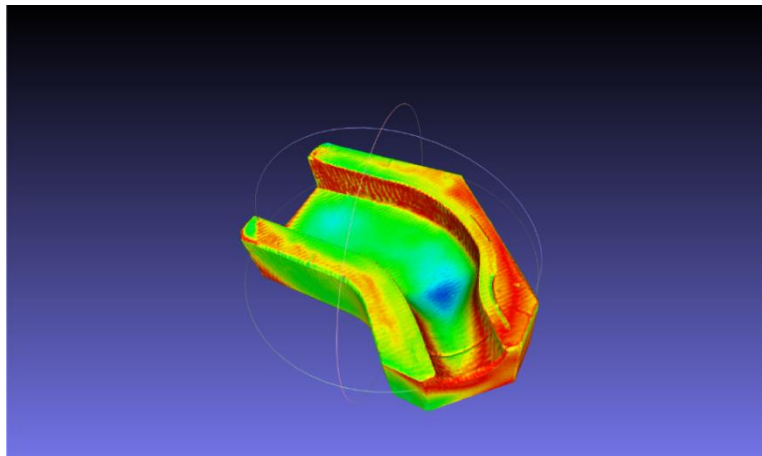


Figura 62 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 45°C

Tabela 17 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 45°C

Maior Distância	1.153
Menor Distância	0
Média	0.320

Corresponde a um maior valor médio de distância em comparação com o molde com gesso, principalmente na zona de contacto do molde com a peça, que corresponde à zona crítica.

### Original para 60°C

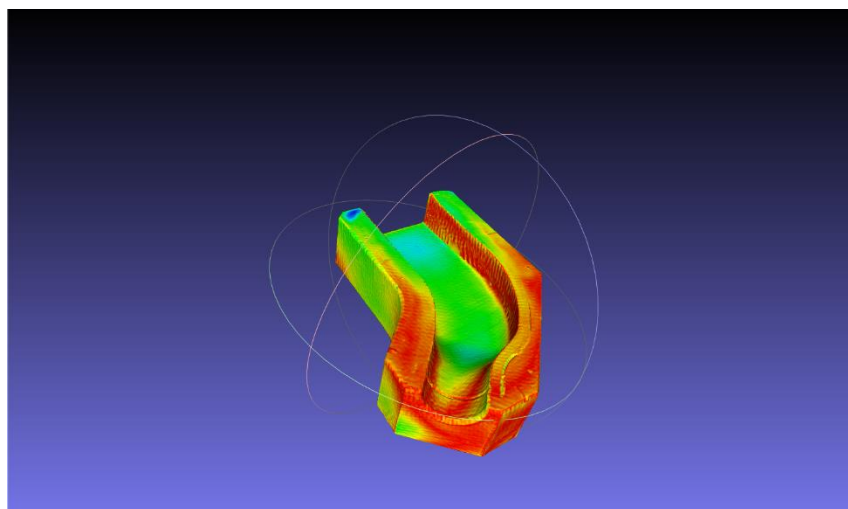


Figura 63 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 60°C

Tabela 18 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 60°C

Maior Distância	1.486
Menor Distância	0
Média	0.335

Segundo os valores observados, verifica-se um ligeiro aumento na maior distância assim como na média em comparação com o molde com gesso.

#### Original para 90°C

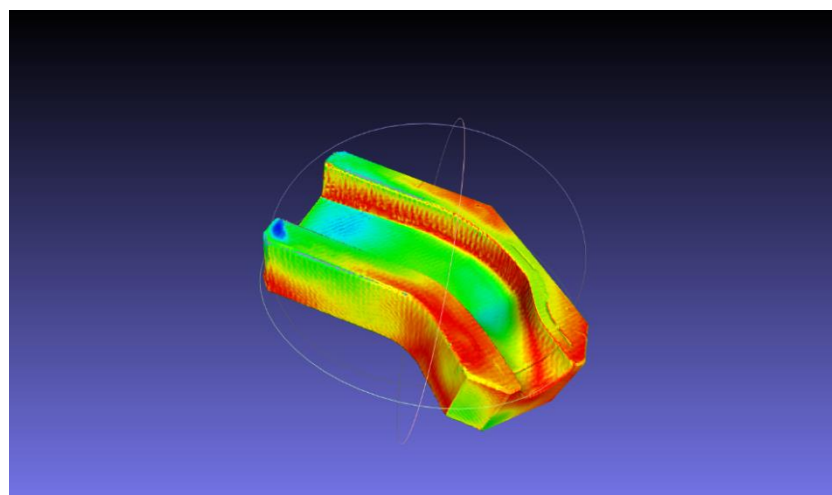


Figura 64 - Molde tipo sem gesso representado no meshlab para 90°C

Tabela 19 - Média, maior e menor distância no molde sem gesso para 90°C

Maior Distância	1.612
Menor Distância	0
Média	0.388

Novamente existe um aumento, especificamente no valor da média, mas salvaguardado uma vez que ocorre fora da temperatura de funcionamento normal do método de RTM.

## DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS

No que diz respeito aos ensaios de maquinagem, como já foi referido concluiu-se que, utilizando os parâmetros de maquinagem, colocou à vista parte do infill numa zona da peça, supostamente devido às condições de impressão. Dá a entender que a colocação de suportes e as alterações que foram feitas na *wall e top thickness* para que fosse adicionada a sobre espessura de 2 mm, poderá ter tido influência relativamente à parte do infill que ficou exposta. Todavia, o objetivo inicial foi cumprido.

Em relação aos ensaios de pressão e temperatura dos moldes corpos de prova, concluiu-se que existe um maior aumento de distância média nos moldes tipo sem gesso, sobretudo na zona de contacto do molde indica que os moldes corpos de prova com gesso tiveram menos deformação na zona mais importante. Logo, foi verificado que os moldes com gesso se comportaram melhor do que os moldes sem o gesso cerâmico extra.

### 6.1 Custos

Relativamente aos custos, vamos contabilizar aqueles que tiveram um impacto mais significativo como os custos do material, custos de operação e custos de maquinagem. Os custos de eletricidade por exemplo são considerados insignificantes. Logo, as peças que foram impressas foram:

1. 4 provetes (*layer height* 0.25; *wall line count* 4; 20% infill; padrão gyroid) na impressora BCN;
2. 2 provetes (*layer height* 0.3; infill 100%; *nozzle* 0.6) na impressora BCN;
3. 2 peças retangulares (*layer height* 0.3; infill 100%; *nozzle* 0.6) na impressora BCN;
4. 4 peças retangulares (*layer height* 0.3; infill 20%; *nozzle* 0.6; padrão gyroid) na impressora BCN;
5. 3 peças retangulares (*layer height* 0.3; *wall line count* 10; infill 100%; *nozzle* 0.8) na impressora Blackbelt;
6. 2 moldes corpos de prova (*nozzle* 0.6; *layer height* 0.3; infill 6%; padrão gyroid; *top e wall thickness* 4 mm) na impressora BCN.

Existem fatores em jogo numa impressão: por exemplo, pode ocorrer um acidente de impressão, causando a perda de filamento. Ou pode haver custos extras de manutenção [53]. Os problemas mais comuns são geralmente problemas de qualidade de impressão (por exemplo, a impressão de grandes objetos baseados em ASA pode levar a distorções, etc.) [53]. Ocorreram falhas na impressão sobretudo nos 2 moldes corpos de prova e, por isso, terá de se considerar 3 impressões de desperdícios na



impressora BCN (uma vez que saíram com *warping* e posteriormente tiveram de ser adicionados suportes).

Para saber o custo do material:

- Saber o preço do filamento PLA N;
- Saber o peso dos modelos impressos.

$$\text{Custo do material} = \frac{\text{Preço do filamento}}{\text{Peso do filamento (kg)}} \times \text{Peso do modelo (kg)} \quad (5)$$

Para saber os custos de operação:

- Saber o preço da impressora Blackbelt e BCN;
- Saber o tempo de retorno do investimento necessário (h);
- Saber o tempo de impressão (h) – horas de trabalho das impressoras utilizadas.

$$\text{Custos de operação} = \frac{\text{Preço da impressora}}{\text{Tempo de ret. investimento necessário (h)}} \times \text{Tempo de impressão (h)} \quad (6)$$

Tempo de ret. Investimento necessário (h): 22 dias por mês, 8h por dia e 11 meses por ano – Amortização (foi amortizado um ano)

Chegou-se à conclusão de que o preço do filamento PLA N é de 21.01 Euros/Kg, o preço da impressora BCN é de 6995 Euros e o preço da impressora Blackbelt é de 9500 Euros.

Logo, podemos iniciar os cálculos para cada impressão realizada, de forma a obter o custo do material e os custos de operação.

4 provetes (*layer height* 0.25; *wall line count* 4; 20% infill; padrão gyroid) – BCN [Impressão Teste 1]

- Tempo de impressão: 52 min
- Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h
- Peso do modelo: 27 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.027$$

$$\text{Custo do material} = 0.57 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 0.87$$

$$\text{Custos de operação} = 3.14 \text{ Euros}$$

2 provetes (*layer height* 0.3; infill 100%; *nozzle* 0.6) – BCN [Impressão Teste 2]

- Tempo de impressão: 28 min
- Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h

→ Peso do modelo: 17 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.017$$

$$\text{Custo do material} = 0.36 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 0.47$$

$$\text{Custos de operação} = 1.70 \text{ Euros}$$

2 peças retangulares (*layer height* 0.3; *infill* 100%; *nozzle* 0.6) – BCN [Impressão Teste 3]

→ Tempo de impressão: 3h e 51 min

→ Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h

→ Peso do modelo: 162 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.162$$

$$\text{Custo do material} = 3,40 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 3.85$$

$$\text{Custos de operação} = 13.91 \text{ Euros}$$

4 peças retangulares (*layer height* 0.3; *infill* 20%; *nozzle* 0.6; padrão gyroid) – BCN [Impressão Teste 4]

→ Tempo de impressão: 4h e 8 min

→ Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h

→ Peso do modelo: 169 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.169$$

$$\text{Custo do material} = 3.56 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 4.13$$

$$\text{Custos de operação} = 14.92 \text{ Euros}$$

3 peças retangulares (*layer height* 0.3; *wall line count* 10; *infill* 100%; *nozzle* 0.8) – Blackbelt [Impressão Teste 5]

→ Tempo de impressão: 5h e 19 min

→ Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h

→ Peso do modelo: 218 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.218$$

$$\text{Custo do material} = 4.58 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{9500}{1936} \times 5.32$$

$$\text{Custos de operação} = 26.11 \text{ Euros}$$

2 moldes corpos de prova (*nozzle 0.6; layer height 0.3; infill 6%; padrão gyroid; top e wall thickness 4 mm*) – BCN [Impressão Teste 6]

- Tempo de impressão: 1 dia e 1h e 24 min
- Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h
- Peso do modelo: 928 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 0.928$$

$$\text{Custo do material} = 20 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 25.4$$

$$\text{Custos de operação} = 91.77 \text{ Euros}$$

De seguida, são apresentados os custos do material e custos de operação para as impressões finais, isto é, a impressão do molde original e do contra-molde. Estas impressões, na prática, não chegaram a ser efetuadas por não ser estritamente necessário, contudo, é importante saber os custos dessas para ter uma perspetiva global de todo o processo e para posteriormente comparar valores com a cotação pedida a uma empresa externa do fabrico do molde e contra-molde com o material AI 5083.

Molde original – BCN [Impressão Final 1]

- Tempo de impressão: 2 dias e 4h e 20 min
- Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h
- Peso do modelo: 2054 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 2.054$$

$$\text{Custo do material} = 43.15 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 52.33$$

$$\text{Custos de operação} = 189.08 \text{ Euros}$$

Contra-molde – BCN [Impressão Final 2]

- Tempo de impressão: 1 dia e 20h e 26 min
- Tempo de retorno do investimento necessário: 1936 h
- Peso do modelo: 1676 g

$$\text{Custo do material} = 21.01 \times 1.676$$

$$\text{Custo do material} = 35.21 \text{ Euros}$$

$$\text{Custos de operação} = \frac{6995}{1936} \times 44.43$$

$$\text{Custos de operação} = 160.53 \text{ Euros}$$

Tabela 20 - Análise de custos de impressão

Custos de impressão	Im- pressão Teste 1	Im- pressão Teste 2	Im- pressão Teste 3	Im- pressão Teste 4	Im- pressão Teste 5	Im- pressão Teste 6	Im- pressão Final 1	Im- pressão Final 2
Custo do material	0.57 €	0.36 €	3.40 €	3.56 €	4.58 €	20 €	43.15 €	35.21 €
Custos de operação	3.14 €	1.70 €	13.91 €	14.92 €	26.11 €	91.77 €	189.08 €	160.53 €
Des- perdícios				18.48 €	61.38 €	335.31 €		
<b>Total</b>	3.71 €	2.06 €	17.31 €	36.96 €	92.07 €	447.08 €	232.23 €	195.74 €

Através da tabela representada acima, conclui-se que a Impressão Teste 6, que corresponde à impressão dos 2 moldes corpos de prova (*nozzle* 0.6; *layer height* 0.3; *infill* 6%; padrão gyroid; *top e wall thickness* 4 mm) na impressora BCN, foi a mais dispendiosa. Apresenta custos muito elevados de desperdícios porque, quando foi iniciada a impressão destes 2 moldes corpos de prova, estes foram impressos de forma incorreta, saíram com *warping* e, para resolver o problema, tiveram de ser adicionados suportes para finalmente efetuar uma impressão sem quaisquer defeitos.

Contabilizando o total de custos do material, custos de operação e desperdícios de cada impressão:

$$\text{Custo Total} = 3.71 + 2.06 + 17.31 + 36.96 + 92.07 + 447.08 + 232.23 + 195.74 = 1027.16 \text{ €}$$

Outro custo que deve ser contabilizado é o custo do gesso que foi comprado para efeitos de enchimento do molde:

→ **Custo do gesso cerâmico extra: 30.58 Euros (Valor do gesso = 4.8600 + 20 PORTES + 5.72 IVA) + 18 Euros de material extra para o trabalho de enchimento do gesso**

Logo,

$$\text{Custo Total 2} = 1027.16 + 30.58 + 18 = 1075.74 \text{ €}$$

## CONCLUSÃO

Esta dissertação foi desenvolvida com a necessidade de ver como se comporta um molde compósito fabricado por manufatura aditiva e se realmente é uma opção viável para ser aplicada na indústria. Ao longo do trabalho foi necessário verificar o comportamento do material de enchimento, o gesso, e se suporta as temperaturas comuns do processo de fabrico de compósitos que deverá ser utilizado. Substituiu-se o material inicialmente proposto pelo fornecedor, o Al 5083, por um polímero maquinável, de modo a eliminar o efeito de escada presente na tecnologia FDM e para verificar se é uma alternativa mais viável e económica.

Relativamente à metodologia, foram realizados ensaios de tração uniaxial para obter as tensões máximas que são fundamentais para obter os dados para a maquinagem. Foram então impressos moldes corpos de prova com determinadas especificações como a *wall e top thickness* com valores de 4 mm, sabendo que teria de ter uma sobre espessura de 2 mm, valor esse obtido através das rugosidades. Posteriormente, foram realizados ensaios de maquinagem aos moldes tipo, um com o material de enchimento e outro sem esse gesso. Por fim, foram efetuados ensaios de pressão e temperatura com o objetivo de saber se o molde com o gesso aguentaria as pressões e temperaturas esperadas num processo de fabrico de compósitos, assim como comparar valores com os mesmos ensaios feitos a um molde sem o gesso.

Face aos resultados obtidos, tanto nos ensaios de maquinagem como nos ensaios de pressão e temperatura, conclui-se que o uso do molde com o material de enchimento é uma alternativa viável. O molde com gesso conseguiu suportar as temperaturas e pressões esperadas num processo de fabrico de compósitos e comportou-se melhor do que um molde sem gesso.

Esta alternativa usando o polímero maquinável PLA N acabou por ser mais económica, pois quando se fez a análise de custos, constatou-se que apresenta um custo total de 1075.74 €, que é inferior ao orçamento de um molde fabricado com o material Al 5083. Após uma cotação solicitada à empresa Toco & Cesar, verificou-se que o valor para fazer o trabalho é de 3600 € já com o polimento incluído, que é um valor superior ao de um molde produzido por manufatura aditiva.

## 7.1 Perspetivas Futuras

Um trabalho futuro que seria de grande interesse académico e científico seria testar os moldes tipo com um processo de fabrico de compósitos diferente do RTM, uma vez que o resultado foi positivo nos ensaios de pressão e temperatura dos moldes corpos de prova. Outro trabalho que poderá ser desenvolvido é fazer o mesmo procedimento, mas com um gesso diferente do que foi escolhido, visto que existe uma variedade de escolhas, desde que suporte as temperaturas elevadas. Poderá ser uma espuma igualmente. Outro trabalho que ficou por desenvolver foi o acréscimo dos custos de maquinagem aos custos de impressão, que acaba por influenciar nos custos totais apesar de não chegar a ultrapassar os custos que estão previstos para o fabrico do molde em AI 5083. Por fim, de forma a obter dados mais concretos, devia medir-se o valor T dos provetes um a um em vez de utilizar o mesmo valor para todos e seria de grande interesse para este estudo realizar ensaios de tração uniaxial com os provetes com o gesso e também ensaios de compressão, a fim de estudar o comportamento e comparar com os provetes sem gesso submetidos à carga.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.CIRP.2016.05.004.
- [2] P. Schmitt, S. Zorn, and K. Gericke, "ADDITIVE MANUFACTURING RESEARCH LANDSCAPE: A LITERATURE REVIEW," *Proceedings of the Design Society*, vol. 1, pp. 333–344, 2021, doi: 10.1017/PDS.2021.34.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, "Materials for Additive Manufacturing," *Additive Manufacturing Technologies*, pp. 379–428, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-56127-7\_14.
- [4] "IannGibsonn· DaviddRosen BrenttStucker Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition".
- [5] K. v. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [6] "O que é o FDM? | Reiman." <https://reiman.pt/pt/blog/fabrico/o-que-e-o-fdm> (accessed Mar. 14, 2023).
- [7] "Como escolher a tecnologia mais apropriada: FDM, SLA e SLS." [https://filament2print.com/pt/blog/92\\_tecnologia-fdm-sla-sls-impressao-3d.html](https://filament2print.com/pt/blog/92_tecnologia-fdm-sla-sls-impressao-3d.html) (accessed Jan. 12, 2023).
- [8] "What is Binder Jetting?" <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-binder-jetting> (accessed Jan. 12, 2023).
- [9] "Material jetting - MJ, NPJ, DOD | Make." <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting> (accessed Jan. 12, 2023).
- [10] W. Gao *et al.*, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65–89, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- [11] "Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM | Make." <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion> (accessed Jan. 12, 2023).
- [12] "What is powder bed fusion and what are the pros and cons?" <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [13] "What is Directed Energy Deposition (DED)? - TWI." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition> (accessed Jan. 12, 2023).



- [14] "VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/vatphotopolymerisation/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [15] "Sheet lamination - LOM, SL | Make." <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/sheet-lamination> (accessed Jan. 12, 2023).
- [16] W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, and M. Revilla-León, "3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review," *J Dent*, vol. 109, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.DENT.2021.103630.
- [17] "The importance of the type of infill in 3D printing." [https://filament2print.com/gb/blog/71\\_importance-infill-3d-printing.html](https://filament2print.com/gb/blog/71_importance-infill-3d-printing.html) (accessed Jan. 12, 2023).
- [18] "Choosing Infill Percentage For 3D Printed Parts — 3DPros." <https://www.3dpros.com/choosing-infill-for-3d-printed-parts> (accessed Jan. 12, 2023).
- [19] "Manufatura Aditiva: Entenda o Que é e Como Ela Funciona." <https://www.wishbox.net.br/blog/o-que-e-manufatura-aditiva/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [20] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1177/1687814018822880/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\_1687814018822880-FIG2.JPEG.
- [21] "Additive Manufacturing: Applications by sector - 3Dnatives." <https://www.3dnatives.com/en/applications-by-sector/#> (accessed Jan. 12, 2023).
- [22] "Use Hybrid AM to Produce Longer-Lasting Multi-Material Molds | MoldMaking Technology." <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/use-hybrid-am-to-produce-longer-lasting-multi-material-molds-> (accessed Jan. 12, 2023).
- [23] "What Are Composites? - Composites 101 | CompositesLab." <https://compositeslab.com/composites-101/what-are-composites/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [24] Maciej Serda *et al.*, "Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza," *Uniwersytet śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2013, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [25] "Aluminium 5083 | Aluminium 5083 Properties." <https://www.smithmetal.com/5083.htm> (accessed Jan. 12, 2023).
- [26] "The Most Popular Composite Fabrication Methods." <https://smicomposites.com/the-most-popular-composite-fabrication-methods/> (accessed Jan. 12, 2023).

- [27] "How 3D Printing Is Used In The Mold Manufacturing Industry | 3ERP." <https://www.3erp.com/blog/3d-printing-used-mold-manufacturing-industry/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [28] J. W. Koo, J. S. Ho, J. An, Y. Zhang, C. K. Chua, and T. H. Chong, "A review on spacers and membranes: Conventional or hybrid additive manufacturing?," *Water Res*, vol. 188, p. 116497, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.WATRES.2020.116497.
- [29] D. Strong, M. Kay, B. Conner, T. Wakefield, and G. Manogharan, "Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain," *Addit Manuf*, vol. 21, pp. 159–173, May 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.03.010.
- [30] "Offshore turbine blades with intelligent architectures of hybrid and nano-enabled multimaterials - INEGI." <http://www.inegi.pt/en/news/offshore-turbine-blades-with-intelligent-architectures-of-hybrid-and-nano-enabled-multimaterials/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [31] "How 3D Printing Is Used In The Mold Manufacturing Industry | 3ERP." <https://www.3erp.com/blog/3d-printing-used-mold-manufacturing-industry/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [32] "Use Hybrid AM to Produce Longer-Lasting Multi-Material Molds | MoldMaking Technology." <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/use-hybrid-am-to-produce-longer-lasting-multi-material-molds-> (accessed Jan. 12, 2023).
- [33] "Business Area - 3d Printing - Filkemp." <https://filkemp.com/impresao-3d-2/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [34] "Home • Jodrax • Comércio de equipamentos de escritório." <https://jodrax.pt/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [35] "Blackbelt 3D - The benchmark in 3D belt printing, why limit yourself." <https://blackbelt-3d.com/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [36] "The 45 Degree Rule in 3D Printing – Optimal Orientations – 3D Printerly." <https://3dprinterly.com/the-45-degree-rule-in-3d-printing-optimal-orientations/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [37] "Adapting composites 3D printing to evolving needs | CompositesWorld." <https://www.compositesworld.com/articles/adapting-composites-3d-printing-to-evolving-needs> (accessed Jan. 12, 2023).
- [38] "BCN3D Technologies: Professional desktop FFF 3D Printers models." <https://www.bcn3d.com/> (accessed Jan. 12, 2023).

- [39] "Tensile Testing, 2nd Edition - Google Livros." [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=5uRIb3emLY8C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Joseph+R.+Davis,+%E2%80%9CTensile+testing+\(2nd+ed.\)%E2%80%9D,+ASM+International,+2004.&ots=Ou032Lak2I&sig=vi1pryexn2FD6cN2So7gxgh1olg&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Joseph%20R.%20Davis%2C%20%E2%80%9CTensile%20testing%20\(2nd%20ed.\)%E2%80%9D%2C%20ASM%20International%2C%202004.&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=5uRIb3emLY8C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Joseph+R.+Davis,+%E2%80%9CTensile+testing+(2nd+ed.)%E2%80%9D,+ASM+International,+2004.&ots=Ou032Lak2I&sig=vi1pryexn2FD6cN2So7gxgh1olg&redir_esc=y#v=onepage&q=Joseph%20R.%20Davis%2C%20%E2%80%9CTensile%20testing%20(2nd%20ed.)%E2%80%9D%2C%20ASM%20International%2C%202004.&f=false) (accessed Jan. 12, 2023).
- [40] J. Rychlewski, "On Hooke's law," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 48, no. 3, pp. 303–314, 1984, doi: 10.1016/0021-8928(84)90137-0.
- [41] "Diferença entre deformação elástica e plástica | Differbetween." [https://pt.differbetween.com/article/difference\\_between\\_elastic\\_and\\_plastic\\_deformation#what\\_is\\_meant\\_by\\_plastic\\_deformation](https://pt.differbetween.com/article/difference_between_elastic_and_plastic_deformation#what_is_meant_by_plastic_deformation) (accessed Jan. 12, 2023).
- [42] "Machining of Plastics." [https://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/Machining\\_of\\_Plastics.aspx](https://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/Machining_of_Plastics.aspx) (accessed Jan. 12, 2023).
- [43] "Technical data sheet PLA - 3DFilkemp." <https://3dfilkemp.com/download/technical-data-sheet-pla/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [44] "Information Technology Laboratory | NIST." Accessed: Jan. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/itl>
- [45] "Planning a Taguchi L4 Array Experiment." <https://accendoreliability.com/planning-a-taguchi-l4-array-experiment/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [46] "Super Mini Mill 2 | 40-Taper Mill | Vertical Mills – Haas CNC Machines." <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/mini-mills/models/sminimill2.html> (accessed Jan. 12, 2023).
- [47] "The Heavy Impact on Machining Vibrations | Blog Posts | OneMonroe." <https://monroengineering.com/blog/the-heavy-impact-on-machining-vibrations/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [48] "Wall Thickness (3D Printing): How to Make It Perfect | All3DP." <https://all3dp.com/2/3d-printing-wall-thickness-tutorial/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [49] "Why is wall thickness important in plastic manufacturing? | Excelsior." <https://www.excelsior-ltd.co.uk/blog/why-is-wall-thickness-important-in-plastic-manufacturing/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [50] O. A. Ekuase, N. Anjum, V. O. Eze, and O. I. Okoli, "A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing," *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 6, Jun. 2022, doi: 10.3390/JCS6060172.

- [51] "Resin Transfer Molding (RTM) 370 Resin for High-Temperature Applications | T2 Portal." <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-115> (accessed Jan. 12, 2023).
- [52] "Brittle Fracture and Ductile Fracture: Definition, Mechanism, Differences (With PDF) – What Is Piping." [https://whatispiping.com/brittle-fracture-ductile-fracture/?utm\\_content=cmp-true](https://whatispiping.com/brittle-fracture-ductile-fracture/?utm_content=cmp-true) (accessed Mar. 07, 2023).
- [53] "How to calculate 3D printing costs? - Original Prusa 3D Printers." [https://blog.prusa3d.com/how-to-calculate-printing-costs\\_38650/](https://blog.prusa3d.com/how-to-calculate-printing-costs_38650/) (accessed Mar. 24, 2023).











2023

José Candeias

ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE MOLDES POR MANUFATURA ADITIVA