

# **Parametrização do Fabrico Aditivo em Grande Escala por FDM**

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

Eduardo José Custódio Branquinho Crespo

Leiria, Setembro de 2019.



# **Parametrização do Fabrico Aditivo em Grande Escala por FDM**

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Eduardo José Custódio Branquinho Crespo

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto realizada sob a orientação do Doutor Fábio Simões, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2019



# Originalidade e Direitos de Autor

A presente Dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar. Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que sempre me apoiaram ao longo da minha jornada acadêmica.

"A educação é a ferramenta mais poderosa que podemos usar para mudar o mundo."

Nelson Mandela

# Agradecimentos

Antes de mais quero agradecer do fundo do coração a minha família que sempre me apoiou nos estudos, e quando tive mais dificuldades eles tiveram lá para me aconselharem e darem toda a ajuda possível para que não desistisse dos meus objectivos académicos.

Também quero agradecer os meus amigos e colegas, que sempre se interessaram em saber como decorria o desenvolvimento da dissertação, e me suportaram nos bons e nos maus momentos.

O professor Fábio Simões que merece da minha parte um grande agradecimento pela sua orientação incansável, por ter sido sempre prestável e por todos os conhecimentos que me transmitiu.

Agradeço ao João Vitorino por me ter ensinado a manusear a impressora de FDM que precisei para realizar os testes destes relatório, a sua supervisão durante os mesmos, e também os seus conselhos.

Um muito obrigado ao CDRSP por me ter disponibilizado o equipamento que precisei para realizar os testes, e obviamente também a toda à equipa do centro de investigação. Muitos foram os que de uma maneira ou de outra, me ajudaram quando precisei.

Por último quero agradecer a todos os colegas, amigos, corpo docente e não docente que conheci ao longo do meu percurso académico pelos conhecimentos que me transmitiram, as experiências que partilhei com eles, e os bons momentos.

Muito obrigado a todos vós!



# Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo relativo ao impacto de 2 variáveis de impressão: a ventilação e a temperatura da plataforma de aquecimento, na impressão por FDM em grande escala com ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), utilizando uma mão robô munida de um sistema de extrusão, e uma plataforma de aquecimento para o efeito.

Foi selecionada uma geometria simples com um tamanho considerável para uma grande escala, por isso optou-se pela extrusão de um cubo sem "chão" nem "teto" de 390x390x390[mm]. Para testar a influência da ventilação foram testadas 2 morfologias de ventilador, e ainda a experiência de imprimir sem ventilação. A partir da observação dos resultados foi possível concluir que a impressão sem ventilação é a melhor opção para a extrusão de ABS.

Foi testada a influência da plataforma de aquecimento e para tal realizaram-se testes a temperaturas diferentes da mesma, e inclusivamente realizada a impressão sem aquecimento. Este estudo concluiu que a impressão de ABS resulta melhor com a plataforma de aquecimento aquecida a 100°C, o que verifica haver relação direta entre esta temperatura e a temperatura de transição vítrea do material, que são da mesma ordem.

Realizaram-se medições nos cubos impressos com recurso a um digitalizador tridimensional, e cruzando os dados obtidos a partir do mesmo com o objeto tridimensional modelado num programa de CAD 3D verificou-se que o cubo que mais se aproxima do modelo pretendido foi impresso sem ventilação e com a plataforma de aquecimento aquecida a 100°C.

Por último foram realizados testes para descobrir qual o ângulo de sustentação máximo do material. Para tal, foram impressos 4 cubos com as faces inclinadas a ângulos diferentes e concluiu-se que o ângulo sustentação máximo situa-se entre os 20° e 30°.

**Palavras-chave:** FDM, grande escala, ABS, parametrização.



# Abstract

In the report it is revealed a study about the influence of 2 printing variables: the ventilation and the temperature of the hot bed, while printing in large-scale by FDM with ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), using a robot-arm with an extrusion system applied to it, and a hot bed in order to achieve this study.

It has been chosen a simple geometry with a considerable size to be nominated as a large-scale geometry, so it was elected the extrusion of a cube without “floor” and “ceiling” and with the following dimensions: 390x390x390[mm].

In order to test the influence of the ventilation, it has been tested 2 different morphologies of the ventilator, and yet the test of printing without any ventilation. Through the observation of the results it was concluded that printing with any ventilation is the best option when extruding ABS material.

The influence of the hot bed was also tested, and to do so tests using different temperatures were done. It was also tested printing without any heating.

This study concluded that printing with ABS show up better results if the hot bed is set at the temperature of 100°C, and that reveals that there might be a direct relationship between the this temperature and the glass transition temperature of the material, they are the same value.

Some measurements were made to the printed cubes with the help of a digital 3D scanner, and by crossing the results obtained by this one and the tridimensional object modeled by a 3D CAD software it was verified that the cube that most approaches to the model intended was the one printed without any ventilation and with the hot bed set at the temperature of 100°C.

In the end some tests were done to find out the material maximum support angle. In order to do that 4 cubes were printed with different face slopes, and it was concluded that the maximum support angle is located between 20° and 30°.

**Keywords:** FDM, large scale, ABS, parametrization.



# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Classificação dos processos de fabrico aditivo [7] . . . . .                                  | 6  |
| 2.2  | Processo de Estereolitografia [10] . . . . .  | 7  |
| 2.3  | Processo de FDM [11] . . . . .  | 8  |
| 2.4  | Processo de LOM [13] . . . . .  | 9  |
| 2.5  | Processo de SLS [14] . . . . .  | 10 |
| 2.6  | Processo de SLM [15] . . . . .  | 10 |
| 2.7  | Fusão do Pó Metálico no Processo de SLM [15] . . . . .  | 11 |
| 2.8  | Processo de 3D Printing [16] . . . . .  | 12 |
| 2.9  | Geometria 3D obtida por Geração de Malha Tetraédrica [26] . . . . .                           | 15 |
| 2.10 | Impressora de SPJ da Desktop Metal, Inc. [28] . . . . .                                       | 16 |
| 2.11 | Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo D-Shape [35] . . . .                     | 19 |
| 2.12 | Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo de Contour Crafting<br>[35] . . . . .    | 20 |
| 2.13 | Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo de Concrete Prin-<br>ting [34] . . . . . | 20 |
| 2.14 | Modelos impressos através do processo de WAAM [38] . . . . .                                  | 20 |
| 2.15 | Processo de DED [43] . . . . .  | 21 |
| 2.16 | Configuração da Unidade de Extrusão [49] . . . . .  | 24 |

|   |    |
|---|----|
| 2.17 Esquema do Sistema de Extrusão [51] . . . . .  | 25 |
| 2.18 Braço Robô com Plataforma de Impressão e Unidade de Extrusão [51] . . . . .  | 25 |
| 2.19 Impressora de FDM suspensa por cabos e alimentada com espuma [52] . . . . .  | 26 |
| 2.20 Configurações possíveis da impressora de FDM suspensa por cabos e ali-<br>mentada com espuma [52] . . . . .  | 27 |
| 2.21 Estátua de Laurier durante a construção (a) Scan 3D (b) Primeira camada da<br>3ª parte da estátua; (c) 3ª parte da estátua semi-acabada; (d) As três partes<br>que compõem a estátua [52]. . . . . | 29 |
| 2.22 Medições efetuadas no modelo virtual e impresso da estátua de Laurier Wil-<br>fried [52]. . . . .  | 31 |
| 2.23 Diâmetro Interno e Externo de uma Ponteira de Extrusão [54] . . . . .  | 33 |
| 2.24 Molde da bucha imprimido (a) e o seu modelo 3D (b,d) bem como a mesma<br>após tratamento superficial (c) [54] . . . . .  | 33 |
| 2.25 Exemplo de Empeno (assinalado a vermelho) [58] . . . . .   | 34 |
| 3.1 YASKAWA FS100 (esquerda) e FS100 (direita) [61] . . . . .   | 36 |
| 3.2 Braço-robô e plataforma de aquecimento utilizada nos testes (esquerda), e<br>caixa de acrílico improvisada utilizada nos testes (direita) . . . . .   | 36 |
| 3.3 Estufa utilizada para o acondicionamento do ABS . . . . .   | 37 |
| 3.4 Digitalizador . . . . .   | 37 |
| 3.5 Desenho 3D da geometria escolhida para os testes com as respetivas dimen-<br>sões . . . . .   | 38 |
| 3.6 Bico da extrusora utilizado nos testes . . . . .  | 40 |
| 3.7 Aspeto da fita cola após a preparação . . . . .   | 40 |
| 3.8 Adaptador Quadrangular utilizado nos testes (esquerda); o mesmo montado<br>no bloco da extrusora (meio); a impressora que o imprimiu, a U-Print 3D Prin-<br>ter (direita) . . . . .                 | 41 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.9  | Ventilação Original utilizada nos testes . . . . .   | 42 |
| 3.10 | Ventoinha de 12V com respetivo suporte montado no braço-robô . . . . .   | 42 |
| 4.1  | Cubo Impresso com a ventilação uniforme a 135°C e a plataforma à temperatura ambiente (esquerda); uma vista de topo do mesmo cubo para melhor visualização do fenómeno de arrasto (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . . | 46 |
| 4.2  | Camadas dos cubos impressos com a ventilação uniforme a 45°C; com a plataforma à temperatura ambiente e temperaturas de extrusão de 240°C e 250°C (esquerda); detalhe da união das camadas (direita) . . . . .                                   | 46 |
| 4.3  | Defeito de impressão numa das faces do cubo impresso com ventilação uniforme a 135°C e a plataforma à temperatura ambiente . . . . .   | 47 |
| 4.4  | Cubos impressos com a ventilação original: a 45°C (esquerda), a 90°C (meio) e a 135°C (direita) com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente (20°C) . . . . .  | 47 |
| 4.5  | Detalhe da aresta do canto inicial do cubo impresso com a ventilação original: a 45°C (esquerda), a 90°C (meio) e a 135°C (direito) com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente (20°C) . . . . .                                      | 48 |
| 4.6  | Cubo impresso sem ventilação e com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente (20°C) (esquerda); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .  | 48 |
| 4.7  | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 60°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .   | 49 |
| 4.8  | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 60°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .   | 49 |
| 4.9  | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 100°C e sem ventilação (esquerda); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .  | 50 |
| 4.10 | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 100°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .  | 50 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.11 | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a $80^{\circ}C$ com ventilação lateral a partir de uma ventoinha de $12V$ e de $12cm$ de diâmetro (esquerda); detalhe do fenómeno de arrasto (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . .            | 51 |
| 4.12 | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a $80^{\circ}C$ e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita) . . . . .  | 52 |
| 4.13 | Cubos impressos após serem pintados com spray para posterior digitalização   | 52 |
| 4.14 | Cubos no ambiente de trabalho do SolidWorks . . . . .  | 53 |
| 4.15 | Esquerda: Bico da extrusora afastado da impressão. Centro: Cubo impresso com com a plataforma aquecida a $100^{\circ}C$ , sem ventilação e com as faces inclinadas a $45^{\circ}$ . Direita: vista de topo do mesmo cubo. . . . .                            | 55 |
| 4.16 | Esquerda: Bico da extrusora afastado da impressão. Centro: Cubo impresso com com a plataforma aquecida a $100^{\circ}C$ , <i>sem ventilação e com as faces inclinadas a <math>30^{\circ}</math></i> . Direita : <i>vista de topo do mesmo cubo</i> . . . . . | 55 |
| 4.17 | Cubo impresso com com a plataforma aquecida a $100^{\circ}C$ , sem ventilação e com as faces inclinadas a $15^{\circ}$ (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (direita)   | 56 |
| 4.18 | 2 vistas do vaso de plantas criado a partir do cubo impresso com as faces inclinadas a $15^{\circ}$ . . . . .  | 58 |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.1 | Propriedades Principais do ABS utilizado nos testes . . . . .  | 35 |
| 3.2 | Combinações de temperaturas da mesa e ventilações aplicadas nos testes.<br>Legenda: T.A. - Temperatura Ambiente, V.L. - Ventilação Lateral. . . . .  | 43 |
| 3.3 | Temperaturas de Extrusão e de Ventilação utilizadas nos testes com a plataforma á temperatura ambiente. Legenda: V.U. - Ventilação Uniforme, V.O. - Ventilação Original, S.V. - Sem Ventilação . . . . . | 43 |
| 4.1 | Resultados das medições dos lados das digitalizações dos cubos . . . . .   | 53 |
| 4.2 | Resultados das medições das alturas das digitalizações dos cubos . . . . .   | 54 |



# Lista de Siglas

|       |   |
|-------|---|
| 3DP   | <i>3D Printing</i>  |
| ABS   | Acrilonitrilo Butadieno Estireno                              |
| CAD   | <i>Computer-Aided Design</i>                                  |
| CAM   | <i>Computer-Aided Manufacturing</i>                           |
| CC    | <i>Countour Crafting</i>                                      |
| CDRSP | Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto |
| CLI   | <i>Common Layer Interface</i>                                 |
| CNC   | Comando Numérico Computadorizado                              |
| DED   | <i>Direct Energy Deposition</i>                               |
| EBM   | <i>Electron Beam Melting</i>                                  |
| ESTG  | Escola Superior de Tecnologia e Gestão                        |
| FA    | Fabrico Aditivo   |
| FDD   | Fabrico Digital Direto  |
| FDM   | <i>Fused Deposition Modeling</i>                              |
| SEC   | Consumo Específico de Energia                                 |
| SLA   | <i>Stereolithography</i>                                      |
| SLS   | <i>Selective Laser Sintering</i>                              |
| SLM   | <i>Selective Laser Melting</i>                                |
| LOM   | <i>Laminated Object Manufacturing</i>                         |
| LBM   | <i>Laser Beam Machining</i>                                   |
| FC    | <i>Freeform Construction</i>                                  |
| GF    | Fibra de Vidro  |
| HDPE  | Polietileno de alta-densidade                                 |
| LEAF  | <i>Layer Exchange SCI Format</i>                              |
| LMI   | <i>Layer Manufacturing Interface</i>                          |
| MFI   | Índice de Fluidiez  |
| PA    | Poliamida   |
| PC    | Policarbonato   |
| PEI   | Polieterimida   |
| PETG  | Polietileno Tereftalado Modificado com Glicol                 |
| PLA   | Ácido Polilático  |
| SPJ   | <i>Single Pass Jetting</i>                                    |
| STL   | <i>Standard Triangle Language</i>                             |
| $T_g$ | Temperatura de transição vítrea                               |
| UAM   | <i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>                      |

UFP's Partículas Ultra-Finas  
UV Ultra-Violeta  
WAAM *Wire and Arc Additive Manufacturing*

# Índice

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Originalidade e Direitos de Autor</b>                       | <b>III</b>  |
| <b>Dedicatória</b>   | <b>IV</b>   |
| <b>Agradecimentos</b>  | <b>V</b>    |
| <b>Resumo</b>  | <b>VII</b>  |
| <b>Abstract</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>XIV</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>  | <b>XV</b>   |
| <b>Lista de Siglas</b>   | <b>XVII</b> |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Objetivos  | 1           |
| 1.2 Motivação do Trabalho                                      | 2           |
| 1.3 Estrutura do relatório                                     | 2           |
| <b>2 Estado da Arte</b>  | <b>4</b>    |
| 2.1 Introdução ao Fabrico Aditivo                              | 4           |
| 2.1.1 Génese do Fabrico Aditivo                                | 4           |
| 2.1.2 Tecnologias de Fabrico Aditivo                           | 6           |
| 2.1.3 Fabrico Aditivo e Prototipagem Rápida                    | 11          |
| 2.1.4 Fabrico Aditivo e Produção Industrial                    | 14          |
| 2.1.5 Fabrico Digital Direto (FDD) e Fabrico Híbrido           | 16          |
| 2.2 Fabrico Aditivo em Grande Escala                           | 18          |
| 2.2.1 Tipo de tecnologia                                       | 18          |
| 2.2.2 Precisão Dimensional                                     | 22          |
| 2.3 FDM em Grande Escala                                       | 23          |
| 2.3.1 Formato da Tecnologia                                    | 23          |
| 2.3.2 Material   | 27          |
| 2.3.3 Precisão dimensional                                     | 29          |
| 2.3.4 Parâmetros   | 30          |
| <b>3 Materiais, Equipamentos e Procedimentos Experimentais</b> | <b>35</b>   |
| 3.1 Material   | 35          |
| 3.2 Equipamentos   | 35          |
| 3.3 Geometria  | 37          |
| 3.4 Parâmetros   | 38          |
| 3.4.1 Parâmetros do Material                                   | 38          |
| 3.4.2 Parâmetros do Equipamento                                | 39          |
| 3.5 Preparação e Cuidados com a Plataforma de Aquecimento      | 39          |
| 3.6 Ventilação   | 41          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.6.1    | Ventilação Uniforme . . . . .  | 41        |
| 3.6.2    | Ventilação Original . . . . .  | 41        |
| 3.6.3    | Ventilação Lateral . . . . .   | 41        |
| 3.6.4    | Sem Ventilação . . . . .   | 42        |
| 3.7      | Temperatura da Mesa de Trabalho . . . . .                                  | 42        |
| 3.7.1    | Testes com a Plataforma à Temperatura Ambiente . . . . .                   | 43        |
| 3.7.2    | Teste com a Plataforma Aquecida a $60^{\circ}C$ e $100^{\circ}C$ . . . . . | 43        |
| 3.7.3    | Teste com a Plataforma Aquecida a $80^{\circ}C$ . . . . .                  | 44        |
| <b>4</b> | <b>Resultados Experimentais e Discussão</b>                                | <b>45</b> |
| 4.1      | Testes com a Plataforma à Temperatura Ambiente . . . . .                   | 45        |
| 4.1.1    | Ventilação Uniforme . . . . .  | 45        |
| 4.1.2    | Ventilação Original . . . . .  | 46        |
| 4.1.3    | Sem Ventilação . . . . .   | 47        |
| 4.2      | Testes com a Plataforma Aquecida . . . . .                                 | 48        |
| 4.2.1    | Teste com a Plataforma a $60^{\circ}C$ . . . . .                           | 49        |
| 4.2.2    | Teste com a Plataforma a $100^{\circ}C$ . . . . .                          | 50        |
| 4.3      | Controlo de Geometria . . . . .  | 51        |
| 4.4      | Teste da Sustentação do Material . . . . .                                 | 54        |
| 4.4.1    | Faces Inclínadas a $45^{\circ}$ . . . . .                                  | 54        |
| 4.4.2    | Faces Inclínadas a $30^{\circ}$ . . . . .                                  | 55        |
| 4.4.3    | Faces Inclínadas a $15^{\circ}$ . . . . .                                  | 55        |
| 4.4.4    | Faces Inclínadas a $20^{\circ}$ . . . . .                                  | 56        |
| 4.5      | Utilidade Prática para as Impressões . . . . .                             | 57        |
| <b>5</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                                      | <b>59</b> |
| 5.1      | Conclusões . . . . .   | 59        |
| 5.2      | Trabalhos Futuros . . . . .  | 60        |
|          | <b>Bibliografia</b>  | <b>61</b> |
|          | <b>Anexos</b>  | <b>67</b> |

# 1 Introdução

A enorme demanda do mercado por produtos singulares e personalizados, que possam ser fabricados com algum rigor dimensional sem precisar de esperar o longo tempo que leva a produzir um molde ou a conceber o produto por um processo moroso e dispendioso economicamente, faz com que a impressão 3D seja uma opção viável. Mais do que nunca as pessoas têm acesso a um computador e à Internet o que faz com que a pesquisa por informação e a auto-aprendizagem seja facilitada. Deste modo, modelar e imprimir em 3D são tarefas que qualquer um, de uma maneira geral, pode aprender se estiver ao seu dispor os instrumentos necessários. Assim sendo, com as evoluções das tecnologias de impressão 3D que ocorreram ao longo das últimas décadas e com a expiração de algumas patentes foi possível estudar e compreender melhor como decorre a fabricação de um modelo em todos os seus aspetos. Progressos têm sido realizados no sentido de imprimir em grande escala utilizando uma tecnologia de impressão 3D bastante difundida, o FDM ou *fused deposition modeling*. Neste trabalho foi testada a impressão em grande escala utilizando o ABS como material. Para tal, foram impressos vários cubos com valores de temperatura de ventilação e de plataforma de aquecimento diferentes. Dentro dos vários cubos impressos foi escolhido um para ditar os valores corretos para impressão do ABS em grande escala para o equipamento em questão.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho prevê a realização de diversas experiências com uma impressora 3D de FDM em grande escala disponível no CDRSP utilizando ABS como material de extrusão. As experiências realizadas prendem-se com a morfologia de ventilação e a temperatura da plataforma de aquecimento. A partir das impressões obtidas, serão realizadas medições com um digitalizador 3D, medidas essas que serão comparadas às medidas do CAD original.

A realização destas impressões permitirá encontrar o valores adequados para os parâmetros de impressão exigidos pela impressora quando utilizado ABS como material de extrusão, e assim para quem no futuro necessitar de imprimir com aquela máquina poderá ter uma previsão de sucesso se usar os valores encontrados neste relatório.

## 1.2 Motivação do Trabalho

Apesar de haverem várias experiências e estudos no sentido de encontrar um mecanismo fiável, barato e flexível de impressão em grande escala por FDM, até agora todos têm apresentado algumas falhas na construção das geometrias. Um dos problemas encontrado nos estudos apresentados, por exemplo, é o controlo da viscosidade, dado que nas impressões em grande escala por FDM são usadas ponteiros de grande dimensão, a ação da força da gravidade é bem expressiva nestes casos e por isso o fluxo não é regular nem equilibrado. Em casos de transferência dos materiais essa instabilidade no caudal é ainda mais evidente, e conclusões foram retiradas: é necessário escolher uma extrusora que mantenha o caudal estável controlando eficazmente e ao mesmo tempo a pressão. Quer por isto dizer que a tecnologia não está de todo otimizada ainda para o fabrico em grande escala.

No sentido de comprovar a aplicabilidade deste tipo de fabricação, este estudo pretende otimizar os parâmetros de uma impressora de FDM em grande escala para o Butadieno Estireno (ABS) no centro de investigação onde se realiza o estudo - CDRSP, utilizando para o efeito uma mão robô munida de um sistema de extrusão próprio alimentado por material em *pellets*, e de uma plataforma de aquecimento. Ainda, com a intenção de demonstrar que é possível obter resultados com a impressão em grande escala semelhantes aos modelos impressos numa escala muito mais reduzida por impressoras *desktop* este estudo surgiu. Também houve o interesse de comprovar a importância da temperatura da ventilação junto ao bico da extrusora, e também a temperatura da plataforma de aquecimento. A avaliação dos modelos obtidos foi realizada tendo em conta as distorções em relação ao plano horizontal e vertical, bem como a contração e o empeno. Foi ainda realizado uma aferição do ângulo máximo, em relação à vertical, que permite a sustentação de material sem suportes.

## 1.3 Estrutura do relatório

Este relatório está organizado com a seguinte estrutura:

**Capítulo 1 – Introdução** O primeiro capítulo apresenta uma abordagem geral do relatório onde são descritos os objetivos e a motivação do mesmo.

**Capítulo 2 – Estado da Arte** Neste capítulo são explicados os conceitos teóricos que irão servir de suporte para as técnicas e processos experimentais utilizados, bem como para a discussão dos resultados. Também é feito um enquadramento histórico das tecnologias de impressão 3D existentes, uma análise da posição do fabrico aditivo no "mundo industrial" e a comparação com os processos convencionais de fabrico. As impressoras de fabrico adi-

tivo em grande escala também são analisadas em várias vertentes: o tipo de tecnologia, a precisão dimensional, os materiais que operam e os parâmetros.

**Capítulo 3 – Materiais, Equipamentos e Procedimentos Experimentais** Ao longo deste capítulo será descrito o material e os equipamentos utilizados para as impressões, bem como a geometria escolhida, os parâmetros do material e do equipamento relevantes, as morfologias das ventilações usadas nos testes, e ainda os procedimentos experimentais relativos à utilização da plataforma de aquecimento e os testes com a mesma.

**Capítulo 4 – Resultados Experimentais e Discussão** Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos nos testes com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente para as várias morfologias de aquecimento consideradas; com a plataforma aquecida, e ainda é feito um resumo das experiências.

**Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos futuros** No capítulo 5 estão expostas as conclusões relativas aos testes realizados, e apresentadas propostas relativas a trabalhos futuros.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Introdução ao Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo (FA) pressupõe um conjunto de tecnologias que, a partir de um desenho 3D gerado por computador e através de um software de STL (uma abreviação para *Stereolithography*), permitem fabricar modelos físicos em material cerâmico, polimérico, metálico e até compósito por um princípio de sobreposição de camadas [1].

#### 2.1.1 Génese do Fabrico Aditivo

A origem deste processo remonta aos anos 60 e 70 quando surgiram as primeiras tecnologias e patentes. Assim, com o propósito de criar mapas topográficos tridimensionais e foto-esculturas nasce no final dos anos 60, juntamente com a sua patente, o primeiro processo de fabrico aditivo conhecido até à data, a foto-polimerização (SLA) [2]. Já o processo de sinterização a laser de pó metálico (SLS) foi inventado um pouco mais tarde em 1972, e o processo de construção por camadas consecutivas de papel (LOM) só em 1979 [3].

Registou-se um grande crescimento ao nível das patentes e de publicações académicas sobre o FA entre os anos 80 e 90; a universidade do MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 1989 surge com uma nova tecnologia, o 3D Printing e no início dos anos 90 com o LBM (*Laser Beam Melting*) [3]. De notar também a enorme comercialização de impressoras que incorporam as tecnologias de estereolitografia (SLA) em 1988, a modelação por deposição de material fundido (FDM) é inventada por Scott Cump, fundador da empresa Stratasys, há mais de 20 anos, em 1992, bem como o LOM, e o SLS. [3, 4].

Foi nos anos 90 que se registou um elevado crescimento nos processos de fabrico aditivo. O processo de fusão por feixe de eletrões (EBM) é inventado, e desenvolveram-se inúmeros esforços na criação de software para fabrico aditivo. São criadas novas extensões de ficheiros como: STL (uma abreviação para *Stereolithography*), CLI (*Common Layer Interface*), LEAF (*Layer Exchange SCI Format*), e LMI (*Layer Manufacturing Interface*) [5].

Devido à enorme comercialização de tecnologias de FA, melhoramentos surgiram ao nível da introdução de equipamentos cada vez mais fiáveis, permitindo que estas tecnologias,

em determinados casos, produzissem inclusivamente modelos com uma ótima resolução e detalhe. Todos estes avanços ao nível das tecnologias de fabrico rápido só foram possíveis devido ao progresso dos softwares de CAD/CAM (*Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing*).

Também foi esse progresso que permitiu que os mesmos se tornassem cada vez mais acessíveis e intuitivos, levando a estudantes e profissionais a os adotarem para criarem os seus próprios modelos físicos [3].

Também, o custo reduzido na generalidade dos materiais e dos controladores para a utilização no fabrico aditivo, ajudou a democratizar este tipo de tecnologias captando o interesse de um público cada vez maior. Assim, startups aproveitaram-se deste fato e criaram impressoras 3D a um preço cada vez mais acessível, de menores dimensões, de fácil instalação e intuitivas [2].

Com a ajuda da Internet para a partilha de conhecimentos, de hardware e de software *Open-Source*, tornou-se possível a replicação fácil de impressoras 3D em ambiente caseiro ao qual se deu o nome de *RepRap* - fenómeno de replicação de impressoras 3D que nasce em 2005 [3].

Nos finais dos anos 2000 várias patentes expiraram o seu período legal levando a que um número crescente de processos "antigos" de FA fossem amplamente introduzidos no mercado.

A comunidade de *RepRap* e de indivíduos interessados na impressão 3D foi crescendo, aliado à forte investigação e inovação, abrindo deste modo caminho a uma nova categoria de mercado que entra para a competição com outras tecnologias de fabricação existentes até à época.

Atualmente serviços e produtos associados ao fabrico aditivo encontram um elevado leque de aplicações tanto no campo do fabrico, da energia, dos transportes, da arte, da arquitetura, educação, no uso livre e desportivo, na indústria aero-espacial e militar como por exemplo. Outra área de grande aplicação tem sido a medicina e a indústria dentária [3].

Um exemplo prático da utilização do fabrico aditivo no domínio da indústria farmacêutica e médica é o caso da replicação de tecidos ósseos. Num estudo de sucesso efetuado por S. Tarafder e S. Bose foi impresso um modelo que de aspeto físico se assemelha a uma parte do tecido ósseo com a finalidade de, através de um revestimento específico, permitir um controlo da libertação de um fármaco de modo a ser possível obter uma maior eficácia na administração do mesmo pelo paciente e até reduzir a sua toxicidade, bem como a promover a regeneração óssea neste caso [1, 6].

## 2.1.2 Tecnologias de Fabrico Aditivo

Existem muitas maneiras de classificar os processos de fabrico aditivo, e uma muito popular é a que se baseia no tipo de tecnologia usada: laser, extrusão, jato ligante, etc. Contudo uma ótima maneira de classificar as tecnologias de fabrico aditivo, e introduzida por Pham baseia-se no estado físico em que o material se encontra imediatamente antes da deposição ou da reação que promove a união do material, dependendo do tipo de tecnologia utilizada. Este método prevê quatro tipos de classificação bem distintos: polímero líquido, partículas discretas, material fundido, e folhas laminadas [7].

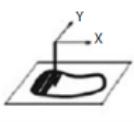
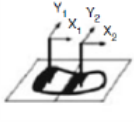
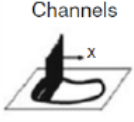
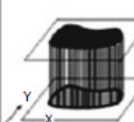
|                    | 1D Channel  | 2x1D Channels   | Array of 1D Channels   | 2D Channel  |
|--------------------|---|---|--|---|
| Liquid Polymer     | <br>SLA (3D Sys) | <br>Dual beam SLA (3D Sys) | <br>Objet | <br>Envisiontech MicroTEC |
| Discrete Particles | SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM   | LST (EOS)   | 3D Printing  | DPS   |
| Molten Mat.        | FDM, Solidscape   |   | ThermoJet  |   |
| Solid Sheets       | Solido PLT (KIRA)   |   |  |   |

Figura 2.1: Classificação dos processos de fabrico aditivo [7]

Como se pode verificar na figura 2.1, a mesma classificação também prevê o número de dimensões, sendo que a primeira é relativa à maneira como as camadas são construídas. Tecnologias mais antigas a partir de um ponto, de uma coordenada inicial, vão "desenhando" a camada ponto-a-ponto. Felizmente mais tarde surgiram melhoramentos. Foi possível a introdução de mais cabeças de impressão numa mesma impressora, e inventou-se a impressão por jato de aglomerante que permitiu que a construção das camadas ocorresse de uma maneira mais rápida. Com o uso de tecnologias que detetam toda uma área e nela imprimem uma camada de uma só vez foi introduzida uma nova dimensão como é o caso de tecnologias como "EnvisionTech MicroTEC"[7].

Uma descrição sumária mas com algum pormenor será de seguida apresentada para dois processos de FA à base de polímero líquido, um de material fundido, um de folhas laminadas, três à base de partículas discretas, sendo os mesmos, e respetivamente: SLA, FDM, LOM, SLS, SLM e 3DP .

**Esteriolitografia(SLA)** A esteriolitografia(SLA ou SL) foi desenvolvida pela empresa *3D Systems*, como já foi anteriormente referido, e foi a primeira técnica de prototipagem rápida a ser inventada bem como a mais utilizada até aos dias de hoje. O princípio básico deste processo é a foto-polimerização, fenómeno que designa a solidificação de um monómero

líquido ou de um polímero através da aplicação de um feixe de luz ultra-violeta(UV) que atua como catalisador da reação. Assim, esta técnica de FA inicia-se com um ficheiro CAD gerado por um computador, que de seguida é convertido para um ficheiro STL que o "corta às fatias"contendo assim toda a informação sobre cada uma das camadas do modelo a ser produzido. A espessura de cada camada bem como a resolução do modelo dependem do equipamento que se está utilizar. O SLA recorre a um feixe de laser de raios ultravioleta (UV) de alta precisão que incide, direcionado por um conjunto de espelhos, sobre um banho de resina líquida fotossensível que acaba foto-polimerizando a mesma em zonas previamente definidas [8]. O modelo físico é construído sobre uma plataforma que se encontra submersa no banho de resina fotossensível. O processo ocorre pela seguinte ordem: um computador envia a informação para a construção da primeira camada, e nesse momento um feixe de laser é emitido, que juntamente com os espelhos galvanométricos o direcionam para o banho de resina construindo com elevada precisão a primeira camada. Quando o feixe do laser incide sobre a resina fotossensível desencadeia-se uma reação química que promove a ligação entres os monómeros solidificando as áreas de resina onde o laser atua, e deixando as restantes líquidas. Concluída a primeira camada, a plataforma mergulha no banho até à espessura de uma camada e o processo repete-se, formando-se deste modo a segunda camada acima da primeira. As etapas anteriormente descritas repetem-se sucessivamente até o protótipo estar concluído. Terminada a construção do protótipo, o mesmo é retirado do banho de resina líquida e lavado. A estrutura de suporte também é removida e o modelo é então colocado num forno onde lhe é aplicada radiação ultravioleta de forma a realizar uma cura ao protótipo [9]. A figura 2.2 ilustra através de um esquema simplista o processo de estereolitografia.

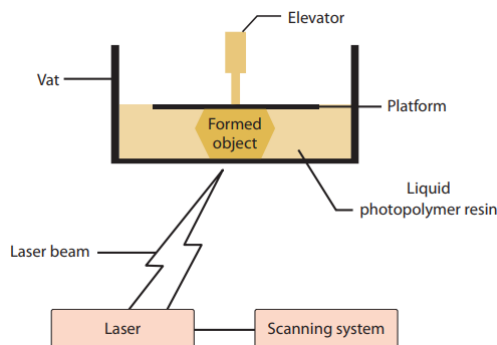


Figura 2.2: Processo de Estereolitografia [10]

**Fused Deposition Modeling (FDM)** Esta tecnologia de fabrico aditivo utiliza material termoplástico (ABS, PLA, PC, PETG), normalmente armazenado numa bobine, para a construção dos modelos. As impressoras de FDM são compostas por uma cabeça de extrusão que se desloca no plano xy, e por vezes até por mais do que uma, e uma base ou plataforma sobre onde será construído o protótipo. Esta base encontra-se normalmente a uma temperatura inferior à do material extrudido de maneira a arrefecer e conseqüentemente endurecer o mesmo rapidamente, bem como promover uma boa adesão entre a peça e a plataforma. O início do processo dá-se quando a cabeça de extrusão se desloca para o pri-

meio ponto da fase de construção do modelo. Nesse momento, o material é “empurrado” para o bico da extrusora que o derrete e expõe em forma de filamento, enquanto a cabeça de extrusão se vai deslocando a poucas décimas ou mesmo a apenas uma décima de milímetro da base, percorrendo todo o percurso definido pelo ficheiro STL para aquela camada, que neste caso é a primeira. A plataforma desce no sentido vertical (eixo z) e o processo é repetido até o modelo estar concluído. Quanto menor for a altura da camada maior é a resolução do modelo, significa que por isso a peça deverá apresentar mais detalhes. Pode ser necessário criar estruturas de suporte para auxiliar a construção do modelo oferecendo-lhe sustentação. Normalmente estas estruturas são de um material mais fraco [9].

É de salientar o fato de que nem todas as impressoras que suportam esta tecnologia apresentam os mesmos movimentos para a plataforma e cabeças de impressão, elas podem variar como por exemplo, a plataforma poderá deslocar-se no eixo y e a cabeça de extrusão para o caso deslocar-se-ia nos eixos x, y e z.

A figura 2.3 ilustra uma possibilidade para este tipo de processo.

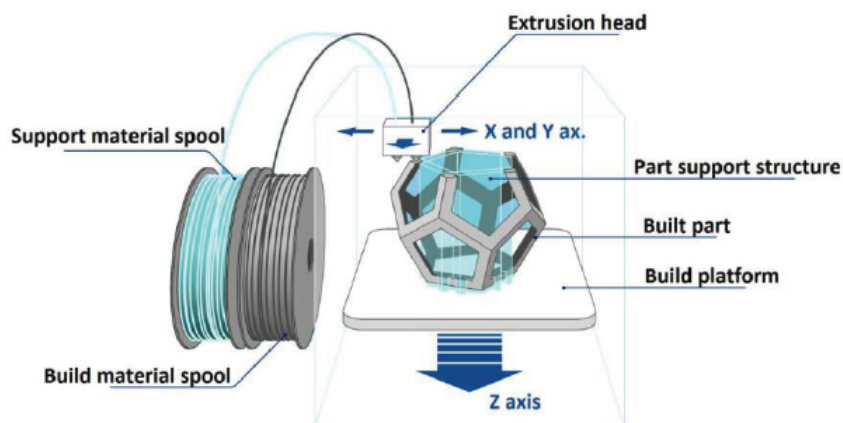


Figura 2.3: Processo de FDM [11]

**Laminated Object Manufacturing (LOM)** O processo de LOM foi um dos primeiros processos de FA a serem comercializados [12], e o mesmo combina o fabrico aditivo e subtrativo durante a construção do modelo camada a camada. Pode por isso ser considerado uma tecnologia de fabrico híbrido. A matéria prima, que pode ser: papel, compósitos, metais e termoplásticos, vem em forma de folhas. Cada camada é ligada uma à outra através de aquecimento e da aplicação de pressão, também é usada uma película adesiva térmica para o efeito. Um laser à base de dióxido de carbono é responsável por cortar o material e assim criar a forma para cada camada consoante a informação do modelo 3D proveniente do ficheiro CAD e STL [8]. O excesso de material depois do corte não é removido de maneira a promover suporte ao modelo. Após o mesmo estar concluído, aí sim o excesso de material é removido e pode até ser reciclado [12]. A figura 2.4 ilustra este tipo de processo.

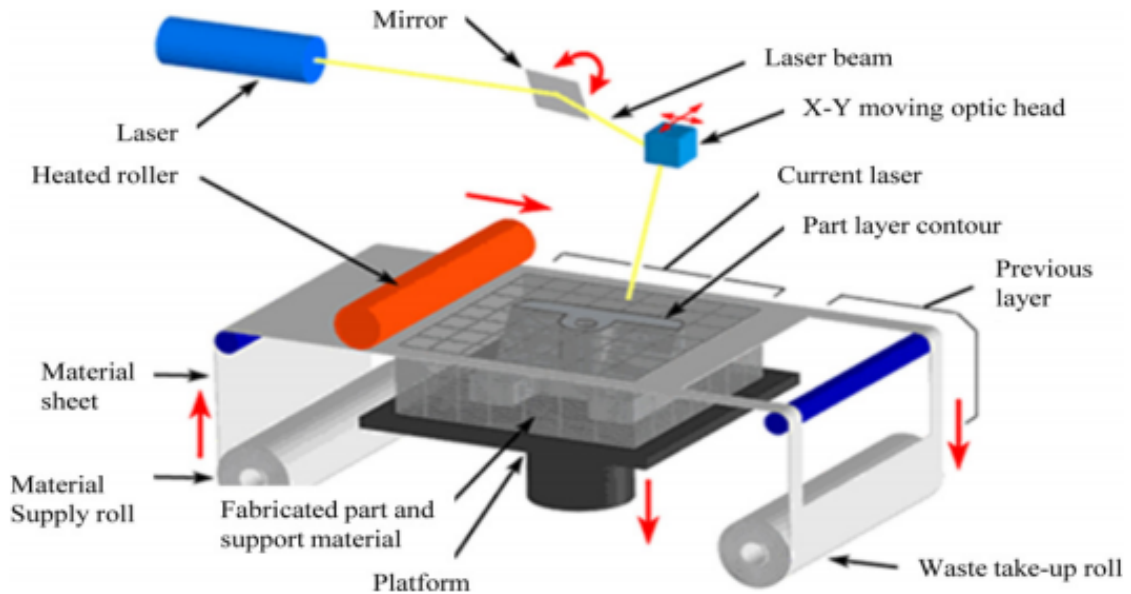
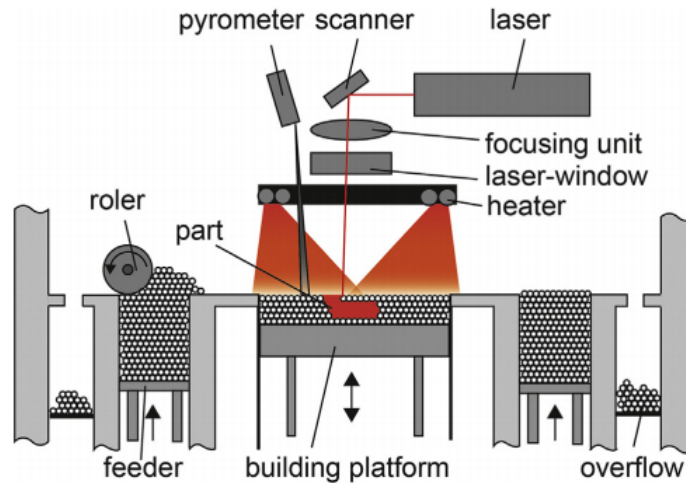


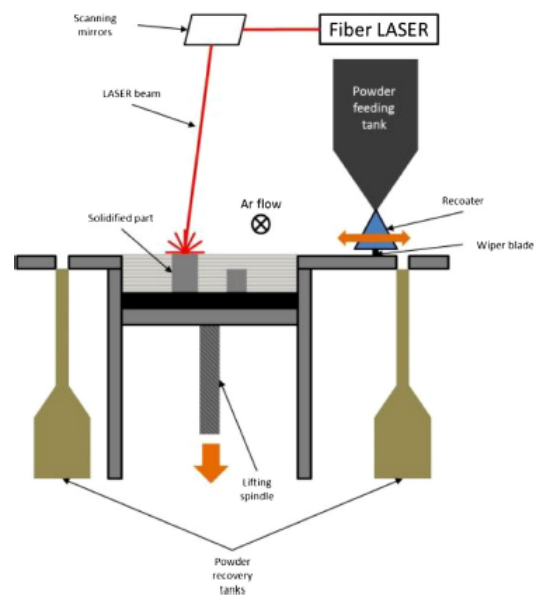
Figura 2.4: Processo de LOM [13]

**Selective Laser Sintering (SLS)** O processo de SLS ou de sinterização seletiva a laser é um dos processos de fabrico aditivo com maior resolução [12]. Ele constrói modelos tridimensionais físicos a partir da sinterização ou fusão de pó com a aplicação de um feixe de laser de dióxido de carbono. A câmara que contém o pó é aquecida até praticamente à temperatura de fusão do material. O laser é responsável por fundir o pó em coordenadas específicas que são especificadas no design do modelo 3D virtual, no ficheiro STL. As partículas de pó estão dispersas em cima de uma plataforma que é controlada por um pistão, que por sua vez desce à medida da espessura de uma camada cada vez que uma é concluída. O material à base de pó utilizado neste tipo de processo pode ser metálico, polimérico, cerâmico, proveniente de combinações de metal e polímeros, ou de metal e cerâmicos. Existe uma grande variedade de materiais disponíveis para utilizar com o SLS, essa é uma grande vantagem. Também neste processo de FA o material que não integrou nenhuma camada do modelo pode ser reciclado [8]. A figura 2.5 ilustra o processo de SLS.

**Selective Laser Melting (SLM)** É normal na literatura existir uma associação entre o processo de SLM e SLS, contudo estes dois processos de fabrico aditivo são consideravelmente distintos, apesar do seu princípio básico ser o mesmo. A figura 2.6 ilustra um sistema de SLM em que o pó metálico é alimentado por um tanque que por sua vez está localizado acima da zona de construção. A distribuição do pó pelo "recoater" ocorre por ação da força da gravidade. As reservas laterais são elevadas quando necessárias de modo a garantirem a quantidade de pó necessária, camada após camada [15]. Tanto no SLM como no SLS o pó é espalhado até formar uma camada muito fina ao longo da superfície de construção através do mecanismo de "recoater" que lembra uma vassoura, ou então um rolo. A camada de pó depositada mede entre aproximadamente 10 e 100 micrómetros de espessura [15].



**Figura 2.5:** Processo de SLS [14]



**Figura 2.6:** Processo de SLM [15]

A energia necessária para mudar o estado do material, que neste caso é em forma de pó, é promovido pelo laser [15]. A grande diferença entre a sinterização e a fusão através de laser é a potência do mesmo. Para provocar a sinterização do pó metálico as temperaturas do laser variam entre os 595°C e 625°C, enquanto que para que fundir o pó são necessárias temperaturas superiores a 660°C, que é a temperatura de fusão do alumínio. Como resultado desta diferença, os fenómenos físicos que ocorrem à passagem do laser são diferentes. A figura 2.7 ilustra o fenómeno de derretimento do pó metálico por ação do laser [15].

No caso do SLM, o facto de haver uma fusão do material, e logo após uma união com a camada que lhe segue a qualidade da peça final será substancialmente diferente do que a mesma se obtida por SLS [15].

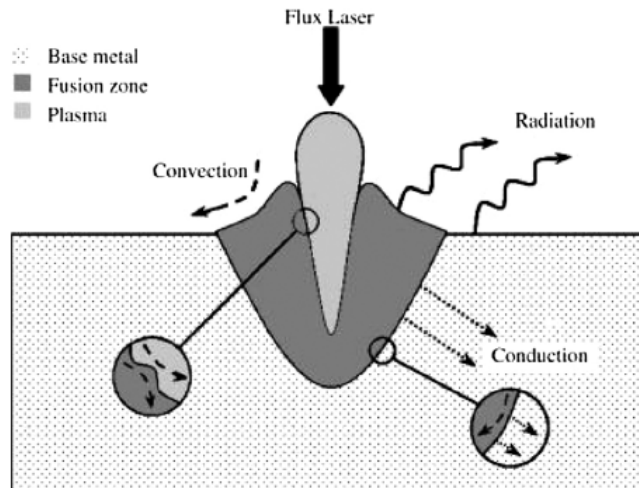
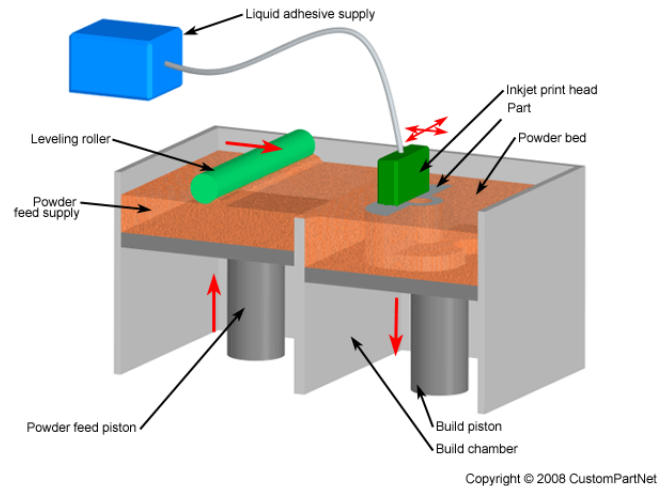


Figura 2.7: Fusão do Pó Metálico no Processo de SLM [15]

**3D Printing (3DP)** Neste processo de fabricação aditiva os modelos são construídos a partir de pó cerâmico ou polimérico, sendo que a consistência é obtida através de um aglomerante formado por uma solução aquosa e cola, que é expelido em jato pelas cabeças de impressão. A máquina de 3DP compõe uma câmara para o acondicionamento do pó, uma plataforma que se desloca em altura (eixo z), um rolo para “varrer” e regularizar as camadas de pó a serem posteriormente aglutinadas, e por fim a cabeça de impressão com um princípio de funcionamento semelhante às existentes nas impressoras de jato de tinta, mas que, neste caso, é alimentada com o material aglomerante. O processo de construção do modelo começa com a deposição de uma camada de pó sobre a plataforma de impressão. A cabeça de impressão expelle um jato de aglomerante líquido em zonas definidas que correspondem ao perfil de corte da peça a imprimir para a camada em questão. A plataforma desce e outra camada de pó é depositada. O jato ligante volta a incidir, mas agora nesta nova camada de pó, e o processo repete-se até concluídas todas as camadas do modelo. O protótipo é então retirado da impressora, aspirado ou então soprado com ar comprimido para separar o pó não aglutinado agarrado à superfície da peça. Como os modelos obtidos por este método de impressão apresentam alguma fragilidade convém aplicar um pós-processamento através da injeção de resinas que aumenta consideravelmente a resistência mecânica e a rigidez do protótipo [9]. A figura 2.8 procura ilustrar o processo de 3DP.

### 2.1.3 Fabrico Aditivo e Prototipagem Rápida

Prototipagem rápida é um termo que surgiu para nomear o conjunto de processos de fabricação rápida de protótipos usando dados tridimensionais de CAD. Processos esses que são por sua vez aditivos, quer por isto dizer que a construção de um modelo físico ocorre por sobreposição de camadas de material. Processos estes que contrastam com os tradicionais, como: de corte, onde a partir de um bloco sólido lhe é constantemente removido material até ser criado o modelo físico desejado e onde se incluem processos como o torneamento ou



**Figura 2.8:** Processo de 3D Printing [16]

a fresagem; a conformação plástica em que um corpo metálico muda de geometria através da aplicação de tensões externas ou devido a altas temperaturas; a fundição em que metal líquido é colocado num molde com uma cavidade com a forma desejada e depois arrefecido até solidificar; e a injeção na qual material plástico fundido é injetado também num molde com uma cavidade com a forma desejada e depois resfriado até solidificar [17, 1].

Dentro das várias vantagens do fabrico aditivo comparativamente com os tradicionais mencionados anteriormente, apesar de não serem sempre as mesmas independentemente do processo com o qual se compara, destacam-se a reduzida taxa de material desperdiçado, o tempo e o custo de produção para uma pequena série ou no caso de um modelo apenas. Também modelos que se revelam impossíveis de fabricar pelos métodos tradicionais com o FA é possível e sem grandes dificuldades. A cadeia de fornecedores também é drasticamente reduzida quando o FA é a opção prioritária para uma produção [18, 17].

Um aspeto eventualmente relevante e vantajoso dos processos de fabrico aditivo comparativamente aos tradicionais é o facto dos produtos resultantes da aplicação dos mesmos apresentarem determinadas características mecânicas e físicas exclusivas que resultam do estado físico do material de construção, e conseqüentemente da união das várias camadas que formam o modelo [19], contudo a necessidade de união entre camadas é um ponto fraco e não um ponto forte da tecnologia.

Uma característica negativa dos processos de fabrico aditivo reside no facto da resolução do produto ser limitado pela configuração das ferramentas disponíveis. Lembrando que a origem do fabrico aditivo resulta de um ficheiro digital tridimensional (3D) onde o produto desenhado é nos mostrado com uma boa definição geométrica, em que mesmo se durante a visualização das camadas internas numa simulação da fabricação estas parecem estar corretas, no modelo físico podem aparecer defeitos, como por exemplo: descontinuidades internas ou porosidades, material em locais não desejados, que resultam numa densidade

local não pretendida e de difícil visualização pois são defeitos na estrutura interna do modelo que não são fáceis de captar [19]. Geralmente nos processos convencionais não é imposta tanta confiança num modelo digital tridimensional durante a fabricação como é no fabrico aditivo.

É de notar também o impacto ambiental e energético que os processos de fabrico aditivo produzem. Para a maioria dos processos de FA, as impressoras 3D consomem relativamente mais energia do que os processos tradicionais, sobretudo tecnologias de FA que incluam pó metálico para a construção das camadas e incorporem feixes de laser de alto-consumo [18].

Um estudo efetuado por Karel Kellens et al. que avaliou o consumo específico de energia (SEC) de vários processos de fabrico aditivo com os convencionais de maquinação e outros de injeção, revelou que os processos de FA consomem mais energia, até aproximadamente 2 vezes mais nalguns casos. Contudo é de lembrar que enquanto para os processo de FA o valor de SEC é obtido pela quantidade de material depositado ( $MJ/kg$ ), mas no caso dos processos subtrativo é expresso pelo número de kg's de material removido. De tal maneira, que a taxa de material removido contribui bastante para o cálculo quando é necessária uma comparação com diferentes processo de fabrico [20].

Contudo, os processos convencionais de fabrico geralmente consomem menos energia por unidade de saída que os de fabrico aditivo. Para pequenas séries de produção as tecnologias de fabrico aditivo revelam-se eficazes pois não necessitam de sistemas complexos de fixação, nem de operações de maquinagem na maior parte das vezes, e as operações de pós-processamento se se revelarem necessárias são reduzidas.

Apesar das emissões com FA serem similares às encontradas em processos tradicionais, devido aos dois tipos de fabrico apresentarem mecanismos e condições de processamento semelhantes, alguns estudos têm vindo a comprovar a emissão de gases e de partículas nocivas durante o uso de tecnologias de FA que não se verificam nos processos tradicionais. Uma explicação para este fato reside no uso de material não convencional [18].

Um estudo conduzido por Brent Stephens et al. revelou que as impressoras 3D de uso "caseiro", ou as chamadas "*Desktop 3D Printers*" podem ser consideradas grandes emisso-  
ras de partículas ultra-finas (UFP's), o que sugere que o manuseamento destas impressoras obriga a algum cuidado, e até no momento da escolha e aquisição de uma impressora 3D, se alguma vez a alguém surgir essa necessidade ou interesse, pois nem todas as impressoras abertas à comercialização para o uso-livre estão devidamente adaptadas a ambientes fechados, ou não possuem bons sistemas de filtração [21].

Outra característica do FA que o valoriza relativamente aos processos convencionais prende-se na quantidade de "lixo" produzido. Muito pouco ou quase nenhum material é des-

perdiçado quando se utiliza uma tecnologia de fabrico aditivo, e não obstante a isso vários esforços têm sido aplicados no sentido de reutilizar e reciclar o material proveniente do FA. Por exemplo o desperdício com os pós de poliamida(PA) na sinterização têm sido estudados para futura aplicação em filamentos para FDM [22].

É de lembrar também a característica de biodegradabilidade do PLA, ou ácido polilático, tipo de material presente em filamentos para FDM. Característica que vem reforçar a ideia de que o fabrico aditivo pode ser "amigo do ambiente". Também o estudo realizado por Brent Stephens et al. demonstrou que as taxas de emissão de UFP's foram superiores em aproximadamente uma ordem de grandeza quando utilizados filamentos de ABS relativamente aos de PLA nalgumas "*Desktop 3D Printers*" disponíveis à venda no mercado.

#### **2.1.4 Fabrico Aditivo e Produção Industrial**

O cenário atual da indústria apresenta-nos uma adesão crescente às tecnologias de fabrico aditivo e, como tal, uma consciência cada vez maior das vantagens das mesmas. Contudo, vários desafios ainda se interpõem entre as quais, e um dos mais relevantes para a indústria, a produção em massa.

Produção em massa envolve a fabricação de grandes quantidades de produtos aumentando deste modo a disponibilidade do produto em causa, reduzindo o preço do mesmo para os consumidores. Por norma, este processo ocorre nas linhas de produção das fábricas, onde máquinas e empregados contribuem cada um com sua função para o produto final [23].

Numa situação em que uma grande produção seja exigida e o processo adotado seja a injeção, o custo no desenvolvimento dos moldes será provavelmente elevado, no entanto apresenta-se a longo prazo como mais económico do que se a mesma produção fosse realizada por impressoras 3D [24]. Neste contexto, tem-se procurado introduzir e otimizar o fabrico aditivo no seio industrial, contudo para tal é necessário uma otimização ao nível das velocidades de impressão, mantendo a ótima qualidade do produto final. Numa situação destas poderíamos afirmar que as tecnologias de FA competem com os processos tradicionais de fabrico.

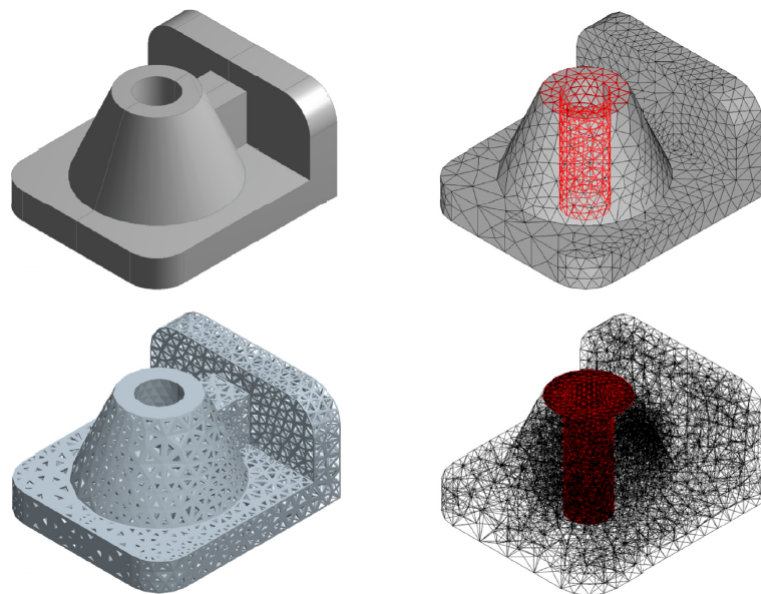
Muitos estudos têm sido realizados no sentido de otimizar as máquinas de impressão 3D mas ainda mais são necessários para criar estratégias de produção que introduzam o FA como meio de produção industrial [25].

O fabrico aditivo revela um enorme potencial no fabrico de geometrias complexas como estruturas internas de alguma complexidade geométrica onde a aplicação dos métodos tradicionais de fabrico se revelam ineficazes, muito morosos, dispendiosos, que necessitam de

passar por várias etapas de fabricação, desde por exemplo a fundição, até a operações posteriores de maquinagem e outras de pós-processamento, e eventualmente pode até mesmo ser impossível [19].

Um estudo efetuado por Patrick Terriault e Vladimir Brailovsk numa universidade do Quebec no Canada consistia em desenvolver uma técnica de modelação apoiada nas ferramentas de geração de malha que permitisse desenhar uma estrutura celular com o grau de porosidade desejado, sem no entanto comprometer a sua rigidez e robustez, para que depois possa ser imprimida por algum método de fabrico aditivo sem grandes dificuldades, e esse objetivo foi cumprido [26]. Se fosse exigida a fabricação de um estrutura similar pelos métodos convencionais de fabrico, ela era certamente muito mais complicada e eventualmente até impossível. As estruturas celulares são de elevada complexidade geométrica devido à quantidade de poros, no entanto apresentam uma ótima relação entre a sua resistência e massa. A aplicação destes género de geometrias tem sido bastante útil para a indústria médica.

A figura 2.9 ilustra uma estrutura obtida por modelação apoiada na geração de malha tetraédrica por aplicação da teoria dos elementos finitos.



**Figura 2.9:** Geometria 3D obtida por Geração de Malha Tetraédrica [26]

Atualmente, e de um ponto de vista realista, o benefício do uso das tecnologias de FA resume-se praticamente à produção de modelos de pequena e média dimensão numa escala reduzida de produção devido, e não apenas, ao facto dos custos das várias unidades de produção e as tradicionais economias de escala não serem consideradas para este género de tecnologias. Os custos do material, ou por exemplo o investimento numa tecnologia de FA para fabricar um objeto pequeno e simples como um copo ainda é bastante elevado quando comparado com o custo do mesmo objeto obtido com o processos convencionais de fabrico quando uma produção em grande escala é necessária [19].

Contudo a *Desktop Metal Company, Inc.* anunciou ter desenvolvido recentemente uma tecnologia de fabrico aditivo metálico à qual deu o nome de *Single Pass jetting (SPJ)* que diz ser capaz de produzir grandes quantidades num curto espaço de tempo. O processo compõe um jato aglomerante que se segue a uma deposição e compactação de pó metálico. O movimento bi-direcional da cabeça de impressão faz com que este processo seja aproximadamente cem vezes mais rápido que os processos convencionais de fabrico aditivo metálico que utilizam um feixe de laser de alta-potência [27]. A figura 2.10 ilustra uma impressora da Desktop Metal, Inc. de *Single Pass Jetting*



**Figura 2.10:** Impressora de SPJ da Desktop Metal, Inc. [28]

Ainda sobre a mesma tecnologia, é afirmado que ela é capaz de produzir geometrias de grande complexidade e volumosas. No fundo, os utilizadores têm o benefício de poderem produzir no momento a um custo reduzido, quando comparado com os métodos tradicionais de fabrico [29].

### 2.1.5 Fabrico Digital Direto (FDD) e Fabrico Híbrido

Com a evolução dos computadores, das tecnologias de comunicação e informação, sobretudo a Internet, e também o progresso das tecnologias de fabrico aditivo têm permitido que um novo processo de produção, o fabrico digital direto ou DDM (*Digital Direct Manufacturing*), ganhe aplicação no setor industrial. O conceito determina a maneira como a produção é realizada, sendo que a mesma ocorre perto ou diretamente no local do consumidor utilizando nesse espaço as tecnologias de fabrico aditivo ou subtrativo, impressoras 3D ou tecnologias de maquinação controladas por computador, que produzem o modelo desejado através de um ficheiro digital. As tecnologias de comunicação como a Internet e os servidores servem para que toda a produção seja ordenada e gerida à distância, e permitindo assim também que haja uma relação permanente e constante com o consumidor, atendendo às suas exigências e promovendo um fornecimento em tempo-real. Assim, o DDM prevê a fabricação direta do produto final, sem necessidade de um extenso planeamento dos processos, nem de uma prévia produção de protótipos de ensaio, normalmente [30, 19]. Contudo, e nesse mesmo contexto, por norma é exigido a um operador de uma tecnologia de FA uma elevada habilidade para numa fase de construção e design do modelo conseguir tomar a

melhor decisão. Isso simplesmente iria requerer muita experiência e sensibilidade por parte do mesmo, o que significa que a decisão final não pode ser assim tão facilmente substituída por uma decisão automatizada via-digital no sentido de haver um fabrico digital direto, pelo menos por enquanto [19].

O fabrico aditivo encontra-se num "momento de viragem"na medida em que cada vez mais unidades industriais têm encontrado interesse na utilização do mesmo quer para prototipagem rápida, quer para fabricação rápida. Esta última surge com uma tendência evolutiva associado ao conceito de "Indústria 4.0"que muitas empresas atualmente têm procurado aplicar [19]. O objetivo do mesmo é a cooperação perfeita entre os sistemas informáticos e físicos, e deste modo renovar a indústria construindo "fábricas inteligentes"ou *Smart Factories*, alterando e simplificando deste modo o papel do homem nas mesmas [27].

Um exemplo prático da aplicação do conceito de "fábrica inteligente"foi aplicado e testado por Jianing Sun et al. no "Fourth International Center for Turbomachinery Manufacturing"ao combinar "*smart glasses*" e um sistema de localização *indoor* que recorre ao *bluetooth* [31].

O fabrico híbrido é um caso de fabrico digital direto. Este tipo de fabrico surgiu no sentido de tornar a fabricação cada vez mais eficaz, o que conjuga as vantagens do fabrico aditivo e do fabrico subtrativo.

A utilização do fabrico aditivo para a produção de componentes metálicos com tolerâncias "apertadas", em que os mesmos possam estar sujeitos a aplicações muito críticas é limitada pela precisão dimensional, a uniformidade das propriedades dos materiais e também a qualidade superficial.

Assim sendo, a obtenção de modelos metálicos com uma grande resolução para aplicações em que as tolerâncias sejam reduzidas é praticamente impossível unicamente com os processos de fabrico aditivo, como por exemplo o SLS, SLM ou EBM, de tal maneira que estas tecnologias necessitam de um pós-processamento para o melhoramento da qualidade geral do modelo, para aliviar tensões residuais presentes no mesmo e também minimizar os defeitos que se possam verificar entre as camadas de material [32, 19]. Exemplos de fabrico híbrido é a conjugação de sistemas de fresagem controlados por CNC (Comando Numérico Computadorizado) e tecnologias de fabrico aditivo, como: FDM ou EBM, e a mais vulgarmente utilizada em estudos ou investigações académicas, a conjugação com DED (*Direct Energy Deposition*) [27, 32]. Também uma nova subclasse do processo de LOM, o *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM), que implica o processo de soldadura que surgiu recentemente. Tecnologias estas que se podem considerar sem grandes dúvidas como sendo de fabrico híbrido [12].

## 2.2 Fabrico Aditivo em Grande Escala

Enquanto a maior parte das atenções direcionam-se para o fabrico aditivo de pequena e média escala, muito trabalho e investigação tem sido realizado no sentido de desenvolver tecnologias aplicadas a modelos de maior dimensão. Desenvolvimentos estes que têm despertado um grande interesse na indústria da construção, arquitetura, aeroespacial, militar, e que têm inclusivamente mostrado resultados.

Na maior parte das vezes, o fabrico aditivo de grande escala revela-se não ser mais que uma ampliação e emprego das tecnologias já existentes. Inclusivamente um novo conceito surgiu na indústria da construção - *Freeform Construction* (FC) .

Este conceito resume-se a: processos que abrangem a fabricação de componentes de construção, e portanto de grande escala, que demonstrem um valor acrescentado, funcionalidade e capacidades superiores aos processos tradicionais utilizados na indústria da construção. Processos que apliquem o *Freeform Construction* apresentam grandes taxas de deposição material e uma baixa-resolução devido à grande dimensão dos modelos a serem produzidos e ao setor a que se aplica respetivamente. Quando este processo de fabricação é aplicado é necessário considerar: o custo do material, que o processo de FC pode não ser mais rápido que os processos tradicionais, e que uma melhor performance de impressão pode ser atingida quanto melhor for explorada a geometria do modelo para a tecnologia de impressão 3D que se está a usar [33].

No sentido de dar um encadeamento natural e clarificar a informação disposta neste relatório, este capítulo está organizado por diferentes secções tendo em conta: o tipo de tecnologia, o material, a precisão dimensional e os parâmetros.

### 2.2.1 Tipo de tecnologia

Ao longo da última década 5 processos aditivos para grande escala permanecem em desenvolvimento: o *Contour Crafting*, o *D-Shape* e *Concrete Printing* [34], o *Wire and Arc Additive Manufacturing* e o *Direct Energy Deposition* . Todas estas tecnologias têm as suas especificidades de funcionamento. Suportam tipos de materiais diferentes e em estados físicos diferentes também.

**D-Shape** A tecnologia “*D-Shape*” insere-se na categoria de tecnologias de FA por jato ligante, similar à tecnologia *3D Printing*. Cada camada de material é depositada segundo uma espessura definida, compactada e de seguida uma ponteira instalada num braço-robô deposita um material aglomerante sob a forma de jato na zona onde é prevista ser endurecida.

O material envolvente que não sofre o endurecimento serve de suporte à estrutura a ser impressa. Assim que o modelo está concluído ele é separado do pó que não foi aglutinado, e que se encontra solto. Este processo já permitiu criar estruturas com mais de 1.5 metros de altura[35]. A figura 2.11 apresenta um modelo impresso pelo processo de *D-Shape*.



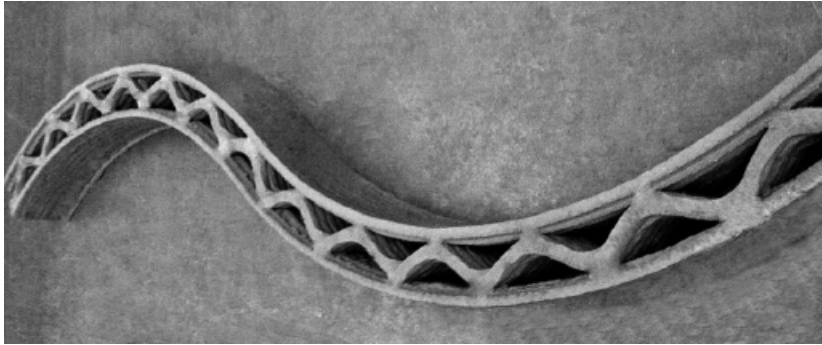
**Figura 2.11:** Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo D-Shape [35]

**Contour Crafting** No processo de “*Contour Crafting (CC)*” , capaz de produzir estruturas maiores que 1 metro, uma pasta à base de cimento é extrudida sobre uma plataforma polida para formar a camada interna e externa de uma parede que é de seguida preenchida com um material similar ao cimento. A tecnologia de CC integra duas fases de processo. A primeira já mencionada e a segunda que envolve um manipulador que vai moldando o material enquanto o mesmo vai sendo extrudido. A combinação destas duas fases de processo e as características dos materiais permitem que grandes quantidades de material possam ser depositadas mantendo um acabamento superficial bastante liso.

A tecnologia de *Contour Crafting* utiliza materiais com um tempo de cura e índices de contração bastante reduzidos, assim várias camadas de material podem ser rapidamente depositadas para formar a parede desejada.

Esta tecnologia tem sido bastante aplicada quando se pretende uma construção automatizada com alguma rapidez, pois este processo tem capacidade para produzir uma parede espessa com uma quantidade mínima de material e sem necessidade de material de suporte para sustentar o modelo durante a impressão [33, 35, 36]. A figura 2.12 apresenta um modelo impresso pelo processo de *Contour Crafting*.

**Concrete Printing** O *Concrete Printing* também é baseado na extrusão de cimento. Esta tecnologia utiliza material de suporte durante a impressão de maneira a sustentar o modelo a ser produzido [35]. A figura 2.13 apresenta um modelo impresso pelo processo de *Concrete Printing*.



**Figura 2.12:** Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo de Contour Crafting [35]



**Figura 2.13:** Modelo Impresso em Grande-Escala através do processo de Concrete Printing [34]

**Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)** Este tipo de fabrico aditivo baseia-se no princípio da soldadura, *Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)*. Ele utiliza o arco elétrico e um sistema de alimentação de fio metálico para a construção de modelos 3D físicos de grande dimensão a partir de materiais metálicos [37].

Este tipo de tecnologia tem gerado um enorme interesse na indústria aeroespacial para a fabricação de grande componentes. Um dos fatores é a possibilidade de construir modelos geometricamente complexos, e a partir de qualquer metal que possa ser soldado [27]. A figura 2.14 apresenta alguns exemplos de geometrias impressas pelo processo de WAAM.



**Figura 2.14:** Modelos impressos através do processo de WAAM [38]

**Direct Energy Deposition (DED)** Também a *Direct Energy Deposition* (DED) apresenta-se como uma tecnologia promissora na produção de modelos de grande escala, tendo sido já produzidas peças com mais do que 1 metro de comprimento, e em alguns casos até mesmo com mais do que 5 metros [39]. A DED apresenta-se como a tecnologia atual capaz de produzir modelos 3D muito grandes e compactos tendo o metal como matéria prima [40]. O processo reside na deposição de pó metálico, que é previamente derretido por um laser ou um feixe de eletrões, sobre uma plataforma. A ponteira por onde é expelido o material fundido está instalada num braço de 5 eixos [41]. Esta tecnologia é muito utilizada na indústria aeroespacial, tendo sido já aplicada para o fabrico de peças para satélites, ou para aeronaves militares. A indústria automóvel e náutica também procuram este tipo de tecnologia para fabricar alguns componentes que necessitam [39].

Esta tecnologia tem tido diversas aplicações, quer na reparação de componentes metálicos que se encontrem danificados, quer na produção de revestimentos metálicos, e até em produções de pequena série [42]. As características finais de um componente mecânico fabricado por este método é dependente de diversos parâmetros que englobam: a potência do laser utilizado, a velocidade de trabalho do laser (*scanning*), a taxa de deposição de material, entre outros [42]. Assim sendo, para obter a geometria pretendida com as dimensões previstas e as propriedades do material também desejadas, é importante que os parâmetros de impressão sejam bem dimensionados [42], e o processo de DED não é um processo simples de fabricação. A figura 2.15 procura ilustrar o processo de DED.

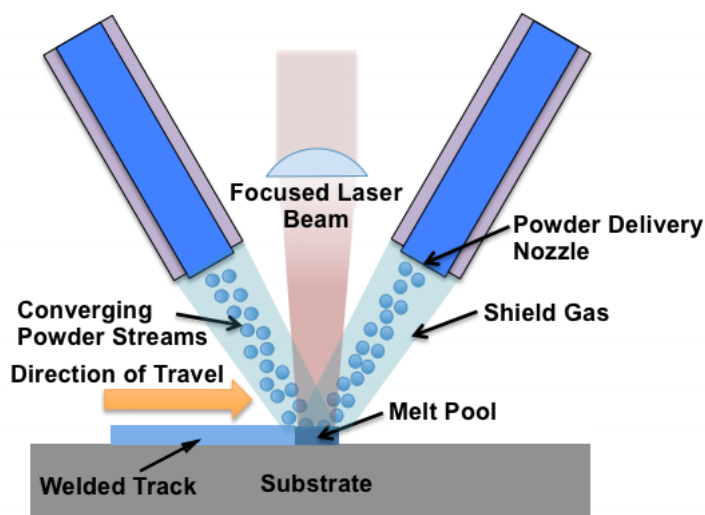


Figura 2.15: Processo de DED [43]

## 2.2.2 Precisão Dimensional

Os processos em FA de grande-escala permanecem com lacunas ao nível da resolução das peças por eles obtidos, e como expectável. O erro dimensional é tanto maior quanto maior for o volume do modelo a imprimir, e a altura da camada pode ser a causa mais provável.

No **Concrete Printing** a unidade de fabrico tem sido desenvolvida para manter-se com 3 graus de liberdade, o que desta maneira permite obter uma ótima qualidade geométrica das peças por ela obtidas, e também um maior controlo dimensional das superfícies internas e externas. Contudo este tipo de tecnologia não apresenta os melhores resultados quando é exigido serem impressos elementos que se afastem de uma disposição vertical [34].

A precisão dimensional das peças obtidas utilizando a WAAM é na ordem de 1 *mm*, e o rácio de deposição de material é bastante superior comparativamente a outro tipo de fabrico aditivo metálico [38].

No caso do processo de *Contour Crafting* a extrusão do cimento ocorre de uma maneira bastante precisa [44]. O mecanismo é composto por robôs que se movimentam através de cabos constrangidos, e este tipo de sistemas são desenvolvidos para aplicações que exijam um ótima precisão dimensional [45].

Já a precisão do processo de *D-Shape* é muito difícil de controlar, porque o resultado do modelo impresso depende muito da maneira como o material aglomerante é espalhado sobre a mistura de pó que é depositada sobre a mesa de construção. A maneira como o material é espalhado depende de vários fatores, entre os quais: o tamanho das partículas contidas no pó, e a quantidade e propriedades do aglomerante que as atravessa [46].

A tecnologia de *Direct Energy Deposition* (DED) é capaz de imprimir com uma precisão superior a todos os processos anteriormente referidos. A vantagem deste processo utilizar lasers permite que a energia seja direcionada a áreas muito reduzidas ou sejam descritas linhas muito finas. Estas capacidades revelam-se muito importantes para aplicações que envolvem a reparação de falhas ou rachas, e outros defeitos. A reparação com esta tecnologia garante ainda um revestimento resistente à água e proteção do objeto à corrosão [47, 48]

A intenção deste relatório era elaborar uma tabela onde seriam comparados quantitativamente todos estes processos de FA em grande escala tendo em conta a área de impressão, o tamanho da camada e a precisão dimensional expectável, mas não foi possível. Todas estas tecnologias de FA em grande escala enunciadas estão numa fase embrionária, a informação disponível em artigos ou dissertações publicadas sobre as mesmas é escassa e não fornece números, e os equipamentos que as constituem são muitas vezes resultado de um improvisado, e por isso para a mesma tecnologia de FA os equipamentos apresentam

características diferentes.

## 2.3 FDM em Grande Escala

A tecnologia de fabrico aditivo por FDM é uma técnica bastante difundida que utiliza material polimérico para a construção das camadas. É um processo que se tem revelado bastante simples e económico. Apesar de ser cada vez mais utilizado para aplicações caseiras de "tempo livre", também tem sido amplamente utilizada para produção de componentes de engenharia, como em áreas de engenharia civil, na indústria militar, naval, aeroespacial ou quando é necessária alguma portabilidade na produção.

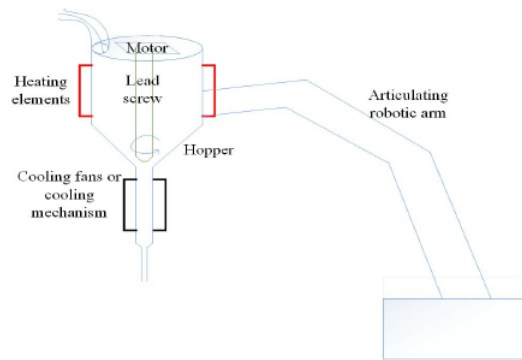
Também neste capítulo várias subdivisões foram criadas com o intuito de clarificar a informação disposta no mesmo. Ele está organizado por diferentes secções tendo em conta: o formato da tecnologia, o material, a precisão dimensional e os parâmetros.

### 2.3.1 Formato da Tecnologia

Um estudo realizado por M. Harris, J. Potgieter, K. Arif na Universidade de *Massey* utilizou o processo de FDM para testar a sua aplicação no fabrico em grande-escala, com o recurso a uma impressora otimizada e destinada para esse efeito. Esta inclui um braço robô articulado com um sistema de extrusão direta que utiliza o material em forma de grânulos ao invés de filamento como nas impressoras de FDM para uma escala normal. Para tal foi utilizada uma ponteira de  $10\text{mm}$  de diâmetro ao invés das convencionais ponteiros de  $0.3$ ,  $0.4$  e  $0.6\text{mm}$  [49].

Também o mesmo estudo afirma que para além de não existirem materiais para a aplicação desejada em grande escala, os sistemas de FDM atuais não apresentam uma configuração que permita obter modelos em grande escala, nem perto sequer. A explicação reside no facto da maior parte dos materiais disponíveis no mercado para FDM serem para a aplicação em pequena escala: filamentos com diâmetros de  $1.75\text{mm}$  e, como tal, as ponteiros de extrusão são de reduzida dimensão, bem como todo o sistema de extrusão é adaptado para os mesmos filamentos. Também a plataforma de aquecimento das impressoras de FDM são de reduzida dimensão, nunca ultrapassado os  $500\text{mm}$  de lado, e mesmo assim o aquecimento das mesmas demora um tempo considerável.

Os robôs de movimentos articulados apresentam-se como sistemas bastante flexíveis. Alguns permitem até 6 graus de liberdade, e assim qualquer ângulo ou movimento é executável. Uma ilustração do mecanismo utilizado é evidenciado na figura 2.16.



**Figura 2.16:** Configuração da Unidade de Extrusão [49]

Objetos impressos por extrusão de grânulos de grande dimensão incluem mobília e componentes para o ramo automóvel. A combinação entre robôs e o sistema de extrusão verificada no fabrico aditivo, e também no estudo descrito anteriormente permitem aumentar o tamanho e a complexidade das peças produzidas [23].

Um estudo realizado no Instituto Politécnico de Leiria concluiu que há muito trabalho a ser realizado até que se consigam obter resultados que validem o processo de FDM como uma opção viável para o fabrico de modelos em grande escala [50].

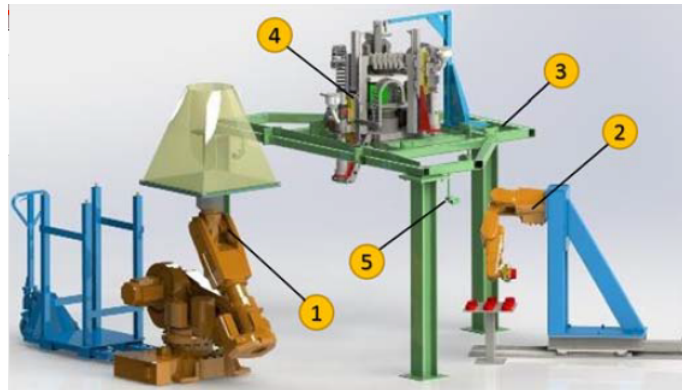
T. Felsch et al. desenvolveu um sistema robótico tridimensional genuíno que é capaz de construir modelos de grandes dimensões utilizando qualquer tipo de material termoplástico até volumes de aproximadamente  $1000 \text{ mm}^3$ . O sistema combina as vantagens existentes do fabrico aditivo e dos sistemas flexíveis robóticos [51].

O mesmo estudo afirma que as tecnologias existentes de FA estão configuradas e adaptadas para a sobreposição de camadas finas de material, o que garante uma qualidade superficial do objeto bastante agradável, mas se a exigência for a construção de modelos de grande dimensão, os tempos de construção do objeto serão substancialmente longos, o que limita imenso a sua aplicabilidade para este efeito [51].

O sistema utilizado por este estudo inclui os seguintes componentes principais (Fig. 2.17):

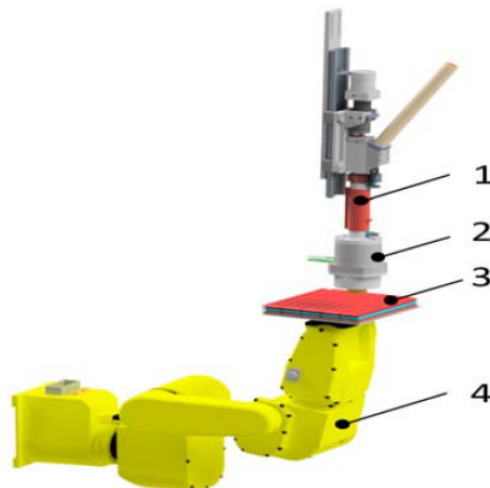
- Mão-robô (1) com plataforma de construção que suporta as peças a serem impressas,
- Uma outra mão-robô (2) que posiciona os insertos,
- Uma armação (3) que fixa as unidades de extrusão,
- 3 unidades de extrusão (4) com ponteiros de extrusão com válvulas de agulha,
- Um scanner (5) que regista as temperaturas à superfície da peça, a temperatura de fusão, e também faz um "scan" à geometria, e

- Uma unidade de controlo para todo o sistema equipado de um detetor de colisões



**Figura 2.17:** Esquema do Sistema de Extrusão [51]

O design característico da unidade de extrusão permite que as modificações que ocorram ao nível do material de construção ou no tempo de montagem de todo o sistema seja reduzido (Fig. 2.18). A "ponteira-agulha" com um design personalizado (2) está instalada na extrusora (1) para assegurar um escoamento contínuo e consistente de material. Este sistema previne a formação descontrolada de filamento durante o processo de construção. A plataforma de construção aquecida (3) está presa ao robô industrial (4), que interage com as extrusoras através de um programa de controlo [51].



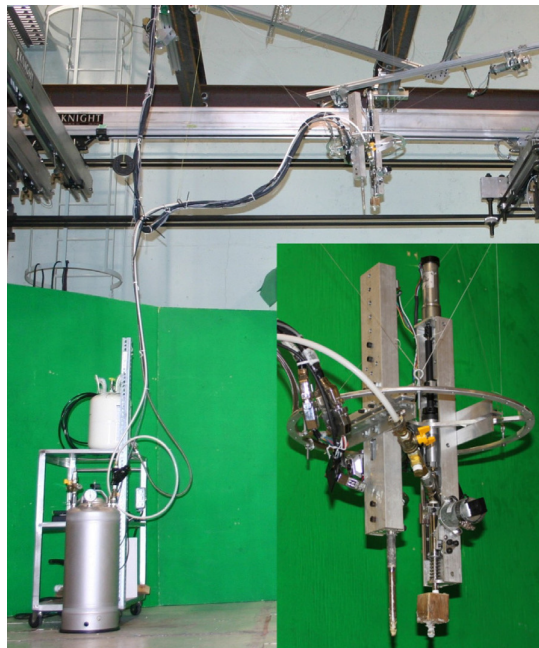
**Figura 2.18:** Braço Robô com Plataforma de Impressão e Unidade de Extrusão [51]

A aplicabilidade deste novo conceito tecnológico e a sua relação entre o custo-efeito foi demonstrada através da produção de algumas peças de grande escala a partir de um protótipo do sistema robotizado de extrusão anteriormente apresentado.

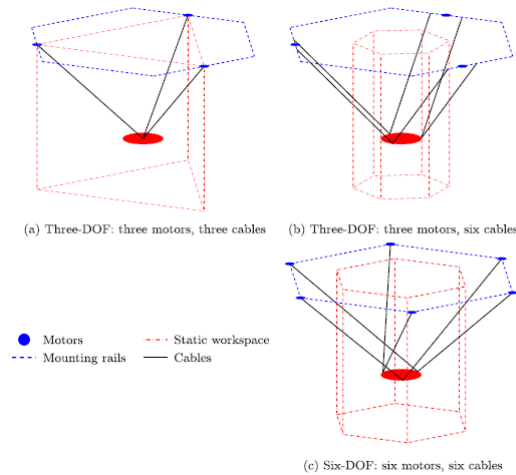
Uma necessidade encontrada no estudo é o melhoramento do processo geral de impressão em grande escala e o alargamento da área de impressão como função das unidades de extrusão. Outro aspeto bastante relevante para o melhoramento do sistema proposto é a aplicação de um mecanismo que evite potenciais colisões [51].

Barnett concluiu num estudo por ele realizado que uma impressora de FDM composta por um sistema de cabos para posicionamento do robô faz com que a mesma possa ser bastante portátil, e também reconfigurável. Ainda três grandes vantagens deste tipo de mecanismos é o facto destes sistemas se apresentarem simples porque são necessários poucos motores para o posicionamento, todos os atuadores podem ser instalados na zona superior do sistema em suspensão e permite 6 graus de liberdade. Este tipo de sistemas evita o problema de interferência de cabos, com a consequência de limitar a área de impressão com os cabos todos em tensão [52]. Um sistema de "*feedback geométrico*" está instalado na impressora de maneira a poder detetar e corrigir a geometria de erros de impressão. Graças a esta tecnologia é possível imprimir com uma ótima precisão e também permitir o uso de materiais para impressão que normalmente são difíceis de controlar a extrusão [52]. Também algumas desvantagens são apontadas a este mecanismo entre as quais o facto de como qualquer sistema composto por cabos é necessário um cuidado especial no design do mesmo, e de um plano prévio do percurso do robô antes de realizar uma impressão de modo a evitar a interferência de cabos [52]. O funcionamento da impressora para a realização da impressão depende desde logo da configuração da mesma entre o número de cabos e motores.

A figura 2.19 e a figura 2.20 ilustram a impressora de FDM proposta por Barnett, e as diferentes configurações da mesma que proporcionam espaços de trabalho diferentes também, respetivamente.



**Figura 2.19:** Impressora de FDM suspensa por cabos e alimentada com espuma [52]



**Figura 2.20:** Configurações possíveis da impressora de FDM suspensa por cabos e alimentada com espuma [52]

### 2.3.2 Material

Apesar de existirem diversas impressoras de FDM disponíveis no mercado, só algumas conseguem processar polímeros de alta-engenharia, como é o caso de: poliamidas (PA) ou polieterimida (PEI) devido ao facto de os mesmos materiais apresentarem temperaturas de processamento bastante elevadas, entre os 350°C e os 400°C [53].

O sistema desenvolvido por Felsch inclui três unidades de extrusão independentes, que desta maneira torna possível construir peças com diferentes composições ao nível dos materiais, desde materiais mais suaves a outros mais duros, de diferentes cores e até a possibilidade de juntar fibras de carbono e de vidro [51]. Nesse mesmo estudo utilizou-se material em forma granular. Assim, substitui-se a necessidade de utilizar os clássicos filamentos como nos sistemas standard de FDM, o que resultou numa vantagem considerável ao nível dos gastos económicos, chegando a ser 5 vezes mais barato. Também o uso de material neste estado de processamento permitiu que o valor total da produção do modelo fosse substancialmente mais baixo do que quando são utilizados os filamentos de FDM, e assim "abrir portas" para outras aplicações que possam existir para esta nova tecnologia apresentada neste estudo [51].

M. Harris idealizou um sistema de FDM para grande escala. O mesmo incluiu uma unidade de extrusão que pode ser alimentada por material em *pellet*. Desta maneira, também ele concluiu que assim pouparam-se largamente os custos de processamento do material em filamento, e sistemas de extrusão direta revelam ser os sistemas mais eficazes na mistura de materiais sem ser preciso um pré-processamento de polímeros para o efeito [49].

O já referido trabalho realizado por João Horta no Instituto Politécnico de Leiria demonstrou que modelos em grande-escala obtidos pelo processamento de materiais como ABS e HDPE (high density polyethylene - misturado depois com pó de madeira) apresentam resul-

tados próximos aos mesmo modelos quando impressos numa escala muito mais reduzida, o que indica que existe um potencial no uso destes dois tipos de materiais para quando seja necessária a fabricação aditiva em grande-escala por FDM [50].

Ainda Xiaojun Liu et al. veio demonstrar que através de uma impressora para grande escala de duas extrusoras em série é possível imprimir utilizando material em forma de "pellets" com alguma qualidade, a baixo custo e com alguma rapidez [54]. Ele apontou algumas desvantagens das tecnologias existentes até à época, entre as quais:

- A transferência dos materiais não é estável e torna-se evidente o fenómeno de "bridge", isto é, o material ao ser derretido não escorre pela ponteira com um caudal estável e constante, mas sim irregular.
- O material polimérico facilmente se mistura com o ar durante o processo de plasticização.
- O fenómeno de "babamento" na ponteira da extrusora ocorre de uma maneira descontrolada causando "overflow", que resulta numa qualidade muito fraca nas peças obtidas pela a impressora.

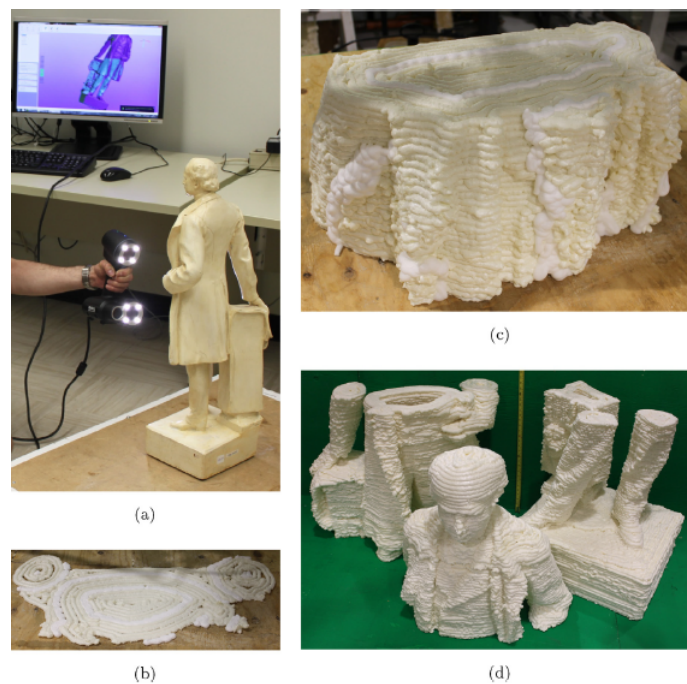
Assim sendo, e evidenciando estas desvantagens elas próprias limitam o uso extensivo de material em forma de "pellet" para as impressoras 3D. O estudo preferiu adotar o sistema de dois fusos para permitir colmatar as dificuldades reveladas pelas outras impressoras que já usavam "pellets". O "design" proposto pelo estudo propõe uma distribuição mais equilibrada do consumo energético que as impressoras que aplicam o sistema de um fuso apenas. A função do primeiro fuso é de derreter o material e conduzi-lo, bem como de imprimir a pressão necessária. Já a função do segundo fuso, que é mais pequeno que o primeiro, serve para plasticizar e dosear a fase derretida [54].

Um estudo sobre FDM em grande escala veio demonstrar que com um robô de 6 graus de liberdade suspenso por cabos é possível a impressão de espuma de poliuretano, tendo espuma de barbear a servir como material de suporte [52]. Esse estudo concluiu que a espuma de poliuretano ao ser usada como material de construção para o fabrico aditivo acaba por degradar-se com o tempo, e isto deve-se ao facto de a mesma estar exposta ao ar e luz, que são condições contrárias aquelas que a espuma necessita para se manter intacta e em bom estado. Também um bom manuseamento do modelo físico já concluído é de extrema importância nos dias seguintes à fabricação. Se a espuma que serviu de suporte não for totalmente removida, os resíduos podem degradar a superfície de espuma que compõem o modelo ao longo do tempo, criando uma película alaranjada e viscosa na zona onde se encontram. Este problema pode contudo ser eliminado com a pulverização da peça com água após a construção [52].

### 2.3.3 Precisão dimensional

Num estudo realizado por Barnett, em que se utilizou um robô suspenso por cabos que usa como material de impressão espuma de barbear, foi concluído que o desempenho da impressora pode ser avaliado em três categorias: precisão, robustez, e velocidade, e maximizar a precisão foi o principal foco no desenvolvimento da impressora. Um bom indicador da precisão são as medidas obtidas a partir do laser para o "feedback" geométrico. O sistema de "feedback geométrico" também provou ser um componente essencial no sistema de impressão apresentado neste estudo, permitindo uma maior robustez e precisão [52].

Uma estátua de 2.16m de altura do sétimo primeiro-ministro, Sir Wilfried Laurier, foi impressa em três partes diferentes utilizando o sistema de impressão anteriormente mencionado, e demorou 38h. O volume total das 3 partes foi de 182l. Só em material de suporte foram precisos 93l de espuma de poliuretano e de 23l de espuma de barbear [52]. A figura 2.21 ilustra a estátua de espuma de Laurier, em vários momentos da construção do modelo.



**Figura 2.21:** Estátua de Laurier durante a construção (a) Scan 3D (b) Primeira camada da 3ª parte da estátua; (c) 3ª parte da estátua semi-acabada; (d) As três partes que compõem a estátua [52].

Comparações foram feitas entre o modelo físico obtido e o modelo virtual que lhe deu origem, de modo a avaliar a precisão da impressora. Foram efetuadas 10 medições, cada entre dois pontos específicos do modelo como se verifica na figura e lista que se apresentam na figura 2.22 [52]. Também como se pode perceber pela interpretação da tabela apresentada na figura 2.22, que a diferença entre o modelo físico e virtual é quase sempre inferior a 10mm. Apesar da tabela apresentar 3 valores superiores a 10mm, 2 deles são referentes às 2 maiores dimensões,  $l_1$  e  $l_8$ . É natural que o erro seja maior quanto maior for a distância entre 2 pontos de medição de um modelo, pois este tipo de tecnologia de FA não

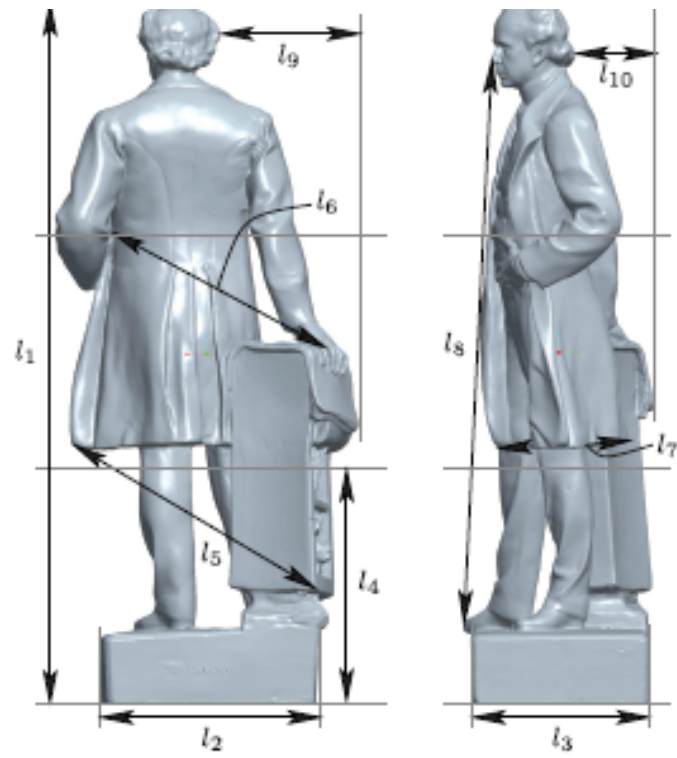
é 100% preciso o que faz com que ocorra uma acumulação do erro ao longo da construção do modelo. Já a medição  $l_9$  apresenta o erro mais elevado, talvez a causa possa estar na técnica usada para a medição dos dois pontos de medição que compõem essa medição, ou então uma má construção do modelo nesses mesmos dois pontos.

Uma outra avaliação realizada à impressora foi a sua robustez, e o que se verificou foi a necessidade de intervir pelo menos cinco vezes durante a fase de construção da estátua, por razões como: necessidade de desentupir o tubo que alimenta a impressora de material, e arranjar um motor. Também alguns pequenos ajustes tiveram de ser feitos para melhorar a qualidade da impressão, como remover resíduos de espuma acumulada na ponteira. Se não fossem haver estas necessidades de intervir e de realizar ajustes, a construção do modelo teria decorrido de uma maneira automática [52].

### 2.3.4 Parâmetros

No estudo realizado por M. Harris, que incluiu a utilização de um sistema de extrusão direta apoiado num braço-robô de movimentos, quatro parâmetros físicos relativos ao material foram analisados : a temperatura de transição vítrea (A), a viscosidade (B), o peso molecular (C) e o índice de fluidez ou MFI (*Melt Flow Index*) (D), e obtiveram-se algumas conclusões sobre os mesmos:

- Temperatura de Transição Vítrea - Para o caso deste parâmetro físico concluiu-se que quanto maior fosse o seu valor maior é a probabilidade de obter boas propriedades mecânicas. Nos moldes de plástico o material encontra-se completamente fundido durante a injeção ao contrário do FDM em que o material está num estado semi-líquido durante a extrusão. Sendo assim, durante o arrefecimento os materiais com uma elevada temperatura de transição vítrea tendem a cristalizar rapidamente pelo processo de extrusão, promovendo desta maneira uma estrutura sólida e rígida quando arrefecida. É por isso importante que o material escolhido tenha uma alta temperatura de transição vítrea.
- Viscosidade - Este é um importante parâmetro físico do material a ter em consideração. Os materiais para injeção em moldes ou os materiais convencionais para uso em FDM têm uma viscosidade mais baixa do que aquela que é precisa para FDM quando utilizada uma ponteira com uma abertura tão grande como  $10mm$ . Este facto deve-se a haver uma quantidade considerável de material que flui constantemente da ponteira sob a ação da força da gravidade - fluxo gravitacional. Isto implica que é importante controlar a fluidez do material para minimizar esse fluxo - *gravitational flow*.
- Peso Molecular - Quanto maior o peso molecular maior a viscosidade, o que contribui para uma melhor compensação das perdas de ligação molecular que possam existir devido às altas temperaturas durante o processamento. Este facto serve para explicar



| Measurement | CAD model<br>[±3 mm] | Foam statue<br>[±5 mm] | Error<br>[mm] |
|-------------|----------------------|------------------------|---------------|
| $l_1$       | 2156                 | 2137                   | 19            |
| $l_2$       | 618                  | 619                    | 1             |
| $l_3$       | 545                  | 540                    | 5             |
| $l_4$       | 720                  | 718                    | 2             |
| $l_5$       | 861                  | 864                    | 3             |
| $l_6$       | 711                  | 704                    | 7             |
| $l_7$       | 404                  | 413                    | 9             |
| $l_8$       | 1749                 | 1727                   | 22            |
| $l_9$       | 435                  | 485                    | 50            |
| $l_{10}$    | 242                  | 245                    | 3             |

**Figura 2.22:** Medições efetuadas no modelo virtual e impresso da estátua de Laurier Wilfried [52].

a necessidade que o material usado no estudo tenha um grande peso molecular para evitar que durante o processamento ou extrusão, o material expelido venha em estado líquido.

- *Melt Flow Index* (MFI) - O índice de fluidez promove o preenchimento de uma cavidade de um molde. Contudo, numa situação em que seja utilizado FDM, um MFI de baixo valor proporciona uma ótima fluidez num estado semi-líquido. No caso de ser usada uma versão aumentada da unidade de extrusão de uma impressora FDM, um MFI mais baixo é vantajoso no sentido de compensar a força provocada pela ação da gravidade. Isto é, se as ponteiros utilizadas nestes casos de impressão em grande escala são de um diâmetro grande a força da gravidade atuará mais expressivamente quando o material escoar pela ponteira do que seria se fossem utilizadas ponteiros de diâmetro menor, logo um índice de fluidez mais baixo seria vantajoso neste caso para melhor controlar a taxa de deposição do material.

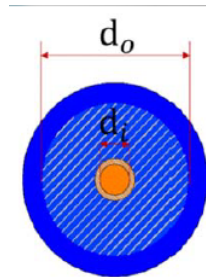
Um dos parâmetros que o estudo realizado por T. Felsch considerou de bastante relevância foi a viscosidade: se este parâmetro se mantiver estável reduz-se muito a possibilidade de empenos e chupados no modelo a ser impresso, e também garante uma homogeneidade na sua composição. Uma medição contínua da temperatura permite que seja garantida uma viscosidade mais ou menos estável [51].

Atualmente o sistema está a ser alvo de melhoramentos no sentido de o otimizar. O mesmo estudo também demonstrou que é essencial haver uma otimização da estabilidade térmica dos materiais durante a impressão [51] que pode ser conseguida através da adição de diferentes aditivos [51]. Estes aditivos no fundo previnem ou atrasam a degradação da cadeia polimérica que afeta também a coloração do polímero, mantendo as características do produto final [55]. Nomeadamente um estudo realizado no departamento de química da universidade de Aveiro por Patrícia Alexandra e Costa Pereira Fresco concluiu que a adição de determinados aditivos ao PVC, permitiu um aumento significativo da estabilidade térmica do PVC. Aditivos esses que revelaram-se eficazes num aumento bastante considerável do tempo de degradação do termoplástico quando o mesmo é sujeito a altas temperaturas de processamento [55].

No estudo realizado por Xiaojun Liu et al. foi utilizado ABS+10GF (ABS + fibra de vidro) como material de impressão, e o estudo focou-se essencialmente nos efeitos da pressão e da velocidade do fuso, e a influência do mesmo no caudal da extrusão [54]. Também o mesmo estudo interessou-se pela qualidade superficial e a força com que as camadas se ligam utilizando material em forma de filamento. E partindo daí o estudo revelou que também a impressora projetada por eles é capaz de imprimir a partir de "pellets"[54].

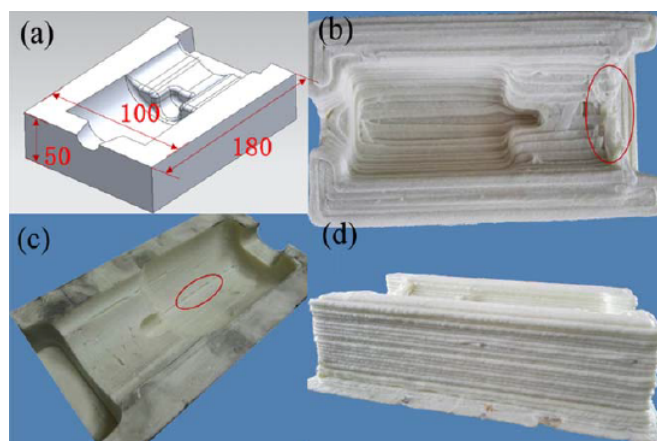
Depois de alguns ensaios e de registados os resultados das mesmas foi concluído que para garantir uma boa união entre as camadas, uma área de união suficientemente grande entre as camadas é de enorme importância, para tal é necessário que a espessura da ca-

mada seja de dimensão menor que o diâmetro do filamento extrudido. Também, a espessura da camada deve ser menor que  $2.5mm$  devido ao arrefecimento e contração do filamento, senão torna-se extremamente difícil assegurar uma boa adesão entre os filamentos. Também foi concluído que para assegurar uma boa qualidade superficial e rigidez do produto, a espessura do filamento depositado deve ser superior ao diâmetro interno da ponteira ( $d_i$ ) e inferior ao diâmetro externo da mesma ( $d_o$ ), para assim evitar o fenómeno de "overflow" e promover uma sobreposição adequada entre dois filamentos [54]. A figura 2.23 procura ilustrar esses diâmetros.



**Figura 2.23:** Diâmetro Interno e Externo de uma Ponteira de Extrusão [54]

Também neste estudo dois moldes que originalmente serviriam para fundição foram imprimidos com o mesmo material para testar as propriedades da impressora, e os resultados demonstraram que os modelos podem ser imprimidos com sucesso se forem otimizados os parâmetros de impressão, mas mesmo assim alguns problemas persistiam como um caudal instável na extrusão e também um atraso no controlo desse mesmo caudal. O mesmo estudo concluiu que é relevante escolher uma extrusora que mantenha estável a pressão, e um sistema de extrusão que consiga controlar o caudal de filamento fundido com exatidão, são estes os dois pontos essenciais para a extrusão de "pellets" em grande escala [54]. Um exemplo da bucha de um molde impresso neste estudo é evidenciado na figura 2.24.



**Figura 2.24:** Molde da bucha impresso (a) e o seu modelo 3D (b,d) bem como a mesma após tratamento superficial (c) [54]

No estudo realizado por Barnett que envolvia a conceção de uma impressora que imprime a partir de espuma de barbear, ele concluiu que a orientação da construção afeta várias propriedades da peça que faz com que a otimização do material, ou da velocidade de

construção por vezes não sejam os parâmetros de maior relevância. Primeiramente, operações na peça que ocorram em contacto com a espuma de barbear terão um acabamento mais rugoso. Em segundo lugar, a geometria se for olhada na lateral mostra-se muito mais atrativa do que se for visualizada por cima ou por baixo [52].

Numa impressão 3D por FDM é importante escolher a morfologia e temperatura da ventilação junto ao bico da extrusora, e também a temperatura da plataforma de aquecimento. Essas variáveis, relacionadas com o arrefecimento, têm um peso substancial no sucesso da impressão.

O arrefecimento é tão importante como o aquecimento, e por essa razão assim que o material fundido é expelido pela ponteira ele deve ser imediatamente arrefecido para garantir que o mesmo não se deforma, e assim não comprometer as camadas que lhe sucedem, e sobretudo o sucesso da impressão. Por isso é necessário aplicar um ventilador junto ao bico da extrusora que permita um arrefecimento eficaz do material recém-extrudido [56, 57]. Se é aplicada uma ventilação junto ao bico da extrusora, então também é conveniente falar da temperatura da mesma - uma temperatura mais baixa irá naturalmente provocar um arrefecimento mais rápido, e vice-versa.

A plataforma de aquecimento melhora a qualidade da impressão ao prevenir que ocorra o fenómeno de empeno; assim que o plástico recém-extrudido inicia o arrefecimento, ele contrai ligeiramente, e quando esta contração não ocorre de uma maneira uniforme em todo o modelo, a consequência é o empeno do mesmo. O empeno é visível nos cantos do modelo. Eles descolam-se da plataforma de aquecimento e levantam, chegando até a "encaracolarem". Assim, a utilização de uma plataforma de aquecimento permite que a peça a ser impressa se mantenha o mais uniformemente quente possível durante a impressão resultando numa contração o mais uniforme possível assim que o plástico inicia o arrefecimento [58]. Um exemplo de empeno é ilustrado na figura 2.25 que se apresenta de seguida.



**Figura 2.25:** Exemplo de Empeno (assinalado a vermelho) [58]

# 3 Materiais, Equipamentos e Procedimentos Experimentais

Neste capítulo serão descritos os materiais e equipamentos utilizados, bem como os procedimentos experimentais tidos em consideração.

## 3.1 Material

O material utilizado neste estudo foi o ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) do fabricante *Ineos Styrolution* com o nome comercial *Terluran GP-35*. As principais características deste material são: a alta fluidez, grande resistência ao impacto e ao calor, alta qualidade superficial e brilho, e também a sua rigidez [59]. Nos anexos deste trabalho encontra-se a ficha técnica deste material, onde é possível ver todas as suas propriedades. Na tabela 3.1, e de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, são apontadas as principais propriedades pertinentes para o estudo em causa e os respetivos valores.

## 3.2 Equipamentos

Para a realização das impressões foi usado o *YASKAWA HP20F*, um braço-robô articulado de 6 eixos de grande alcance -  $1717mm$  [60]. Esse mesmo robô é comercializado pela *YASKAWA Europe GmbH*. Para controlar o braço-robô foi usado um controlador, o *FS100*. Ele é compacto, de fácil utilização e compatível com o robô *HP20F* acima mencionado [61]. Uma ilustração do braço-robô e do respetivo controlador encontra-se na figura 3.1.

| Propriedade            | Norma     | Valor       |
|------------------------|-----------|-------------|
| Contração Linear       | ISO 294-4 | 0.4-0.7[%]  |
| Temperatura de Fusão   | ISO 294   | 220-260[°C] |
| Temperatura de Secagem | -         | 80°C        |
| Tempo de Secagem       | -         | 2-4[h]      |

**Tabela 3.1:** Propriedades Principais do ABS utilizado nos testes



**Figura 3.1:** YASKAWA FS100 (esquerda) e FS100 (direita) [61]

A plataforma onde são realizadas as impressões é de alumínio, com uma dimensão de  $150 \times 150 \times 4$  [cm]. No seu interior, e espaçadas a  $38$ cm, encontram-se 4 resistências com os respetivos termopares de maneira a aquecer a plataforma e controlar gradualmente a temperatura, respetivamente.

Durante a realização dos testes com a plataforma aquecida, isto é, com as resistências e termopares ligados, usaram-se 3 placas de acrílico de dimensão  $160 \times 153 \times 1$  [cm] e 4 cantos em perfil de alumínio de maneira a prender essas mesmas placas, e assim garantir algum isolamento térmico ao sistema de impressão e sobretudo ao modelo que é impresso.

Na figura 3.2 pode-se observar o braço-robô durante a realização de uma impressão, a plataforma de aquecimento com as resistências ligadas, e a caixa de acrílico improvisada.



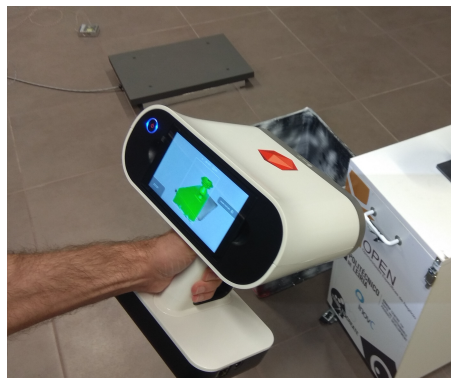
**Figura 3.2:** Braço-robô e plataforma de aquecimento utilizada nos testes (esquerda), e caixa de acrílico improvisada utilizada nos testes (direita)

Para o acondicionamento do ABS foi usada uma estufa, de maneira a evitar a penetração de humidade no ABS, e dessa maneira não afetar as suas propriedades, e por conseguinte não afetar as impressões. A figura 3.3 ilustra a estufa utilizada.



**Figura 3.3:** Estufa utilizada para o acondicionamento do ABS

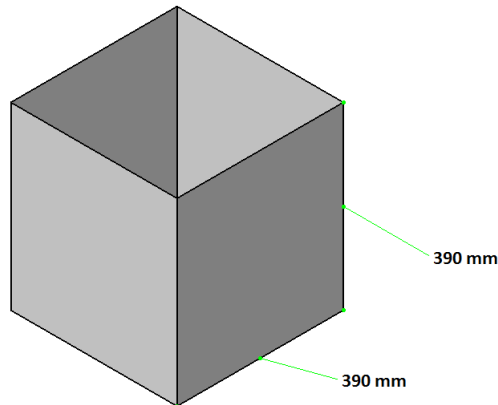
Para a digitalização dos cubos impressos de maneira poder comparar alguns pontos de medição com o cubo do ficheiro CAD original foi usado um digitalizador, o *Artec Leo*. A figura 3.4 ilustra a digitalizador utilizado.



**Figura 3.4:** Digitalizador

### 3.3 Geometria

A geometria escolhida para realizar os testes foi um cubo sem topo nem base, com apenas as faces laterais, e de dimensões  $390 \times 390 \times 390$  [mm]. Uma das limitações do robô utilizado é o facto que o mesmo extrude continuamente não sendo possível interromper a extrusão para executar movimentos do robô onde material não seria desejado. No fundo, é como escrever sem nunca levantar o bico da caneta do papel. Produziu-se um desenho 3D do cubo com o apoio de um software de modelação 3D, o *CATIA v5*, e a figura 3.5 ilustra esse mesmo desenho. A escolha desta geometria deve-se à limitação do robô anteriormente referida, e também devido a ela ser simples e básica, com faces planares de maneira a ser possível avaliar as distorções tanto em relação ao plano horizontal como ao vertical, bem como a contração e o empeno. Estipulou-se que  $390\text{mm}$  de aresta e altura seria o valor mínimo para uma produção em grande escala.



**Figura 3.5:** Desenho 3D da geometria escolhida para os testes com as respectivas dimensões

Após escolhida a geometria e a respetiva dimensão foi gerado um ficheiro de extensão *.jbi* com o apoio de um software - *Visual Basic*, onde o trajeto a percorrer pela mão-robô é definido em coordenadas em *x,y* e *z*. O ficheiro foi copiado para uma unidade de armazenamento externo que por sua vez foi colocada diretamente no comando do controlador *FS100*, para depois ser lido e introduzidos valores para os parâmetros exigidos pelo robô.

### 3.4 Parâmetros

O robô exige que se indiquem alguns valores concretos para a execução da impressão. Foram definidos alguns valores tanto para os parâmetros do material, como para o equipamento.

#### 3.4.1 Parâmetros do Material

A Temperatura de Extrusão segundo o fabricante, e como anteriormente referida é de  $240^{\circ}C$ .

A temperatura recomendada da plataforma de aquecimento para os diferentes materiais termoplásticos está diretamente relacionada com a temperatura de transição vítrea - temperatura em que o material sofre uma transição de rígido e frágil, chamado "estado vítreo", para um material mole e macio, muitas vezes definido com um estado "borrachoso"[62, 63]. Partindo deste pressuposto a plataforma de aquecimento deve ser aquecida até aproximadamente à temperatura de transição vítrea do material a extrudir de maneira a promover uma boa adesão entre o modelo impresso e a plataforma. O ABS tem uma temperatura de transição vítrea de aproximadamente  $105^{\circ}C$ , pois é precisamente nessa ordem de temperaturas que se deve aquecer a plataforma quando se imprime em ABS segundo várias fontes [64, 65, 66].

O tempo de arrefecimento - tempo que o modelo, após concluída a sua construção, permanece na plataforma estipulado foi de 10 minutos por ser suficiente para que o modelo possa estabilizar a temperatura no seu interior e assim evitar ao máximo a contração do mesmo quando retirado da plataforma, e sobretudo para que os últimos cordões de material depositados estejam devidamente arrefecidos.

### 3.4.2 Parâmetros do Equipamento

Foram introduzidos valores para alguns parâmetros no robô, bem como escolhido o tamanho do bico a utilizar - componente que se encontra no final do bloco da extrusora por onde é extrudido o material. Os parâmetros inseridos no robô e os valores correspondentes são os seguintes:

- Velocidade de Avanço do Robô:  $20\text{mm/s}$
- Altura da 1ª camada:  $4\text{mm}$
- Altura das camadas posteriores à 1ª:  $6\text{mm}$  (80 % do diâmetro do furo do bico)

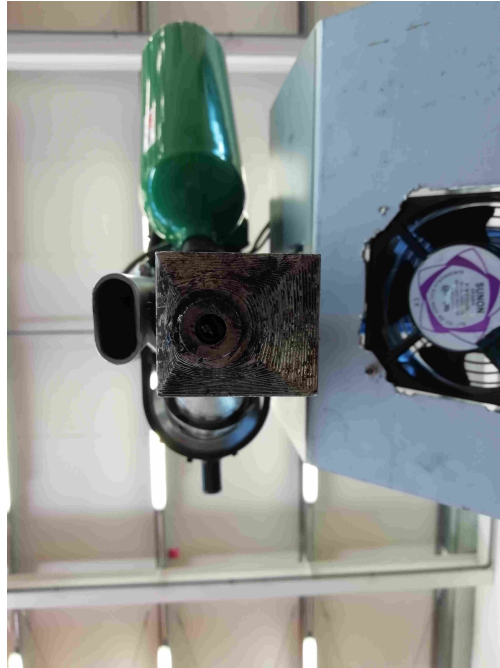
É de notar que a primeira camada é menos espessa que as seguintes. O objetivo é que a mesma seja mais achatada para oferecer uma boa sustentação às camadas posteriores, e sobretudo garantir um maior contacto e fixação do modelo à plataforma, e desta maneira prevenir o empeno. As camadas seguintes à primeira têm uma espessura igual a 80 por cento do diâmetro do furo do bico ao e não 100 por cento pela mesma razão anteriormente apresentada, só que para o caso destas camadas não é necessária nenhuma fixação à plataforma e por isso elas podem ser ligeiramente mais espessas do que a primeira.

O tamanho do bico escolhido para realizar as impressões nestes estudo foi o de  $8\text{mm}$ . A figura 3.6 ilustra o bico da extrusora utilizado.

## 3.5 Preparação e Cuidados com a Plataforma de Aquecimento

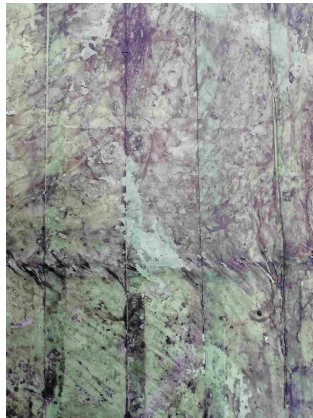
Para a realização das impressões foi necessário aplicar alguns procedimentos com a plataforma de aquecimento antes e após cada impressão:

- Antes de iniciar as impressões colocou-se fita adesiva verde de pintura na área que iria ocupar a impressão. De seguida verteu-se um pouco de acetona na fita adesiva já colocada para a seguir barrar um pouco de ABS de maneira à primeira camada poder



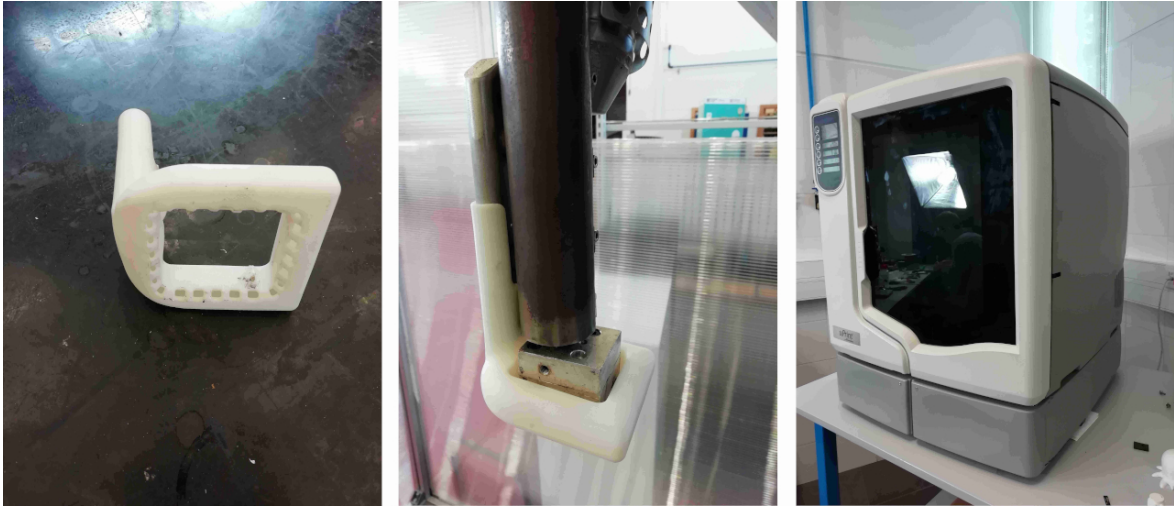
**Figura 3.6:** Bico da extrusora utilizado nos testes

agarrar melhor, e assim evitar ao máximo o empeno das peças produzidas. Após esse procedimento foi colocada um pouco de laca em cima da fita adesiva para garantir ainda uma melhor aderência. O aspeto da fita cola após estes passos é ilustrado na figura 3.7.



**Figura 3.7:** Aspeto da fita cola após a preparação

- Entre cada teste é esfregado de novo um pouco de ABS com acetona e aplicada um pouco de laca na zona onde agarrou a impressão anterior. Eventualmente poderá ser necessário colocar nova fita adesiva porque ela vai-se descolando ou rasgando devido ao esforço de remover os modelos impressos da plataforma, ou até mesmo devido ao calor da cama que provoca a evaporação da cola na fita adesiva.



**Figura 3.8:** Adaptador Quadrangular utilizado nos testes (esquerda); o mesmo montado no bloco da extrusora (meio); a impressora que o imprimiu, a U-Print 3D Printer (direita)

## 3.6 Ventilação

### 3.6.1 Ventilação Uniforme

A ventilação uniforme foi possível com recurso a um adaptador imprimido em ABS por uma impressora *desktop* de FDM. O adaptador encaixa na estrutura da ventilação original do robô no bloco da extrusora e tem um formato quadrangular, sendo oca no seu interior e com uns furos de pequena dimensão na base por onde ar é expelido para arrefecer uniformemente o material recém-extrudido. A figura 3.8 ilustra o adaptador usado nos testes, a impressora que lhe deu origem e ainda o próprio montado no bloco da extrusora.

### 3.6.2 Ventilação Original

A ventilação original é garantida por um tubo oval ventilado já existente na estrutura do bloco da extrusora do robô. É uma ventilação que afeta a impressão apenas do lado onde está fixo esse mesmo tubo oval ventilado. A figura 3.9 seguinte ilustra a ventilação original utilizada nos testes.

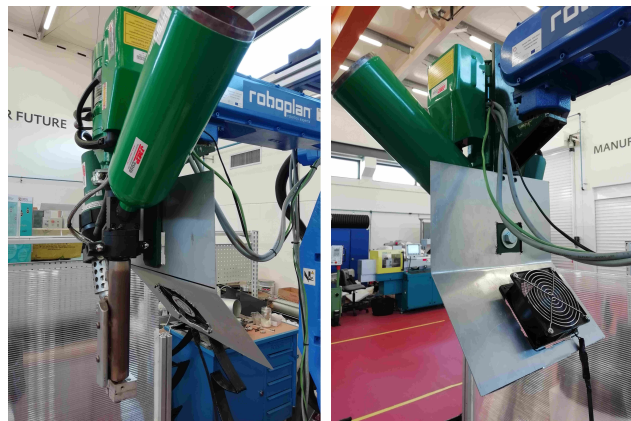
### 3.6.3 Ventilação Lateral

Foi aplicada uma ventoinha de 12V e de 12cm de diâmetro na estrutura do bloco da extrusora. Para isso foi necessário previamente furar uma chapa de alumínio para poder adaptá-la à furação já existente e disponível no bloco da extrusora, e ainda cortá-la e dobrá-la. Foi



**Figura 3.9:** Ventilação Original utilizada nos testes

fixa a ventoinha de 12V nessa mesma chapa já dobrada com a inclinação certa para que a ventilação seja dirigida para o material recém-extrudido. A figura 3.10 ilustra a ventoinha e a chapa de alumínio montadas no bloco da extrusora e utilizadas nos testes.



**Figura 3.10:** Ventoinha de 12V com respetivo suporte montado no braço-robô

### 3.6.4 Sem Ventilação

Para a realização das impressões sem ventilação foi necessário abrir a caixa de ligações elétricas onde se encontram as ligações dos componentes que compõem o bloco da extrusora, e desligar o cabo que pertence à ligação da ventilação junto ao bico da extrusora.

## 3.7 Temperatura da Mesa de Trabalho

Foram testadas várias temperaturas da mesa de trabalho, e inclusivamente realizados testes com a mesa de trabalho à temperatura ambiente de aproximadamente  $20^{\circ}C$ . A tabela 3.2 ilustra as várias combinações de temperaturas de mesa e ventilações aplicadas nos testes.

| Temperatura da Ventilação | Temperatura da Mesa |      |      |       |
|---------------------------|---------------------|------|------|-------|
|                           | 20°C (T.A.)         | 60°C | 80°C | 100°C |
| Sem Ventilação            |                     | X    | X    | X     |
| 20°C (V.L.)               |                     |      | X    |       |
| 45°C                      | X                   |      |      |       |
| 90°C                      | X                   |      |      |       |
| 135°C                     | X                   |      |      |       |

**Tabela 3.2:** Combinações de temperaturas da mesa e ventilações aplicadas nos testes. Legenda: T.A. - Temperatura Ambiente, V.L. - Ventilação Lateral.

### 3.7.1 Testes com a Plataforma à Temperatura Ambiente

As primeiras impressões foram realizadas com a plataforma à temperatura ambiente de aproximadamente 20°C, isto é, sem haver ligado as resistências da plataforma. Nesta condição foram testadas 2 morfologias de ventilação junto ao bico da extrusora: ventilação uniforme, ventilação original, e ainda realizado um terceiro teste sem ventilação.

Os testes realizados com a plataforma à temperatura ambiente servirão para evidenciar a importância de uma plataforma aquecida. Contudo tratam-se de testes e como tal não é negada a possibilidade de sucesso das impressões com a plataforma a esta temperatura.

A tabela 3.3 ilustra numa tabela as combinações de temperaturas de extrusão e de ventilação aplicadas nos testes realizados com a plataforma à temperatura ambiente para as várias morfologias de ventilação junto ao bico da extrusora.

| Temperatura de Ventilação | Temperatura de Extrusão |                    |       |
|---------------------------|-------------------------|--------------------|-------|
|                           | 230°C                   | 240°C              | 250°C |
| 45°C                      | V.U.                    | V.U + V.O. + S.V.  | V.U.  |
| 90°C                      |                         | V.O. + S.V.        |       |
| 135°C                     |                         | V.U. + V.O. + S.V. |       |

**Tabela 3.3:** Temperaturas de Extrusão e de Ventilação utilizadas nos testes com a plataforma à temperatura ambiente. Legenda: V.U. - Ventilação Uniforme, V.O. - Ventilação Original, S.V. - Sem Ventilação

### 3.7.2 Teste com a Plataforma Aquecida a 60°C e 100°C

Para a realização dos testes com a plataforma aquecida a 60°C e 100°C não se usou qualquer ventilação junto ao bico da extrusora, e montou-se a caixa de acrílico improvisada para um melhor isolamento térmico do modelo a ser impresso.

### **3.7.3 Teste com a Plataforma Aquecida a $80^{\circ}C$**

Para o teste com a plataforma aquecida a  $80^{\circ}C$  manteve-se desligada a ventilação junto ao bico da extrusora e introduziu-se uma nova ventilação através da instalação da ventoinha de  $12cm$  de  $12V$  com a respetiva chapa de alumínio a servir apoio montada no bloco da extrusora. Foi também utilizada a caixa de acrílico improvisada para um melhor isolamento térmico do modelo a ser impresso.

# 4 Resultados Experimentais e Discussão

## 4.1 Testes com a Plataforma à Temperatura Ambiente

Os testes efetuados com a plataforma à temperatura ambiente foram influenciados pela morfologia da ventilação e levaram à observação da necessidade de aquecer a plataforma. O resultado dos testes que se apresentam de seguida evidenciam essa necessidade.

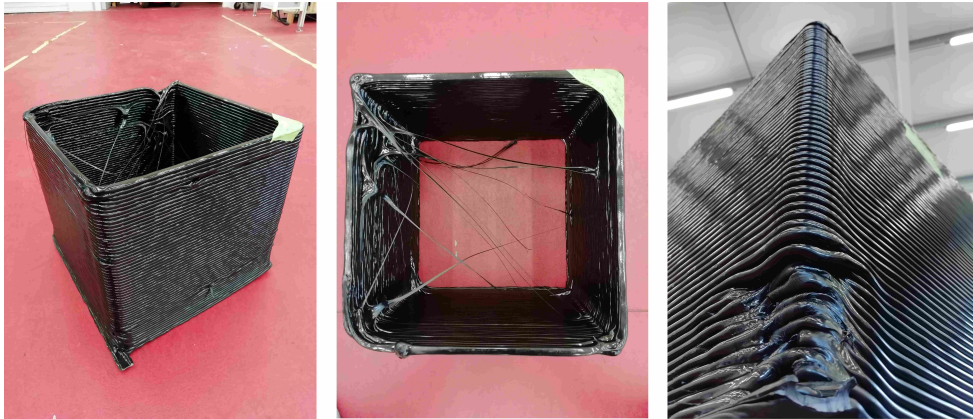
### 4.1.1 Ventilação Uniforme

Para esta morfologia de ventilação foram testadas duas temperaturas:  $45^{\circ}C$  e  $135^{\circ}C$ .

- Usando os  $45^{\circ}C$  como temperatura de ventilação junto ao bico da extrusora, e para as várias temperaturas de extrusão não houve melhorias, os resultados foram semelhantes - muito arrasto devido ao arrefecimento rápido do material, e camadas muito deformadas, com espessuras não constantes, a união das camadas é bastante deplorável, a figura 37 ilustra esse mesmo aspecto. Verificou-se ainda, e por curiosidade, que quando o robô extrudia no ar criava-se uma "bola" de material no bico da extrusora em vez de escorrer constantemente como era esperado, o que revela que o arrefecimento do material ocorreu de uma maneira rápida demais. Os cordões apresentam zonas de aspeto brilhante e outras mate distribuídas de maneira aleatória.
- Usando os  $135^{\circ}C$  como temperatura de ventilação obteve-se melhores resultados, não houve tanto arrasto e o material extrudido escorria normalmente, contudo como o adaptador é feito de plástico devido ao calor nas proximidades ele começou amolecer e a tocar no bloco da extrusora, o que fez com que começasse a derreter e consequentemente viesse a causar arrasto de material por interferir com os cordões de material recém-extrudidos e já depositados. Foi necessário abortar esta experiência pois de nada servia continuá-la se o adaptador estava a estragar-se e consequentemente o modelo também. O modelo apresentou empeno nos 4 cantos e a aresta a que corresponde o canto do início da construção demonstrou uma deposição deficiente de material até à 12<sup>a</sup> camada, acabando por depois estabilizar. Contudo, as outras 3

arestas do modelo também revelaram um mau aspeto apesar de não tau mau como a aresta do canto inicial. Ainda, uma zona específica de uma das faces cubo revelou também uma má deposição. A figura 4.3 ilustra esse mesmo defeito. Para além do defeito de impressão anteriormente mencionando, ainda houve outros mas de menor destaque. Os cordões apresentam um aspeto mate.

As figuras 4.1 e 4.2 seguintes ilustram os modelos impressos nestas condições.



**Figura 4.1:** Cubo Impresso com a ventilação uniforme a  $135^{\circ}C$  e a plataforma à temperatura ambiente (esquerda); uma vista de topo do mesmo cubo para melhor visualização do fenómeno de arrasto (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)



**Figura 4.2:** Camadas dos cubos impressos com a ventilação uniforme a  $45^{\circ}C$ ; com a plataforma à temperatura ambiente e temperaturas de extrusão de  $240^{\circ}C$  e  $250^{\circ}C$  (esquerda); detalhe da união das camadas (direita)

#### 4.1.2 Ventilação Original

Paras as várias temperaturas de ventilação usando a ventilação original os resultados foram semelhantes. As peças levantaram dos quatro cantos como aconteceu quando foi utilizada a ventilação uniforme porque os cantos do modelo são pontos sensíveis devido ao resultado das tensões geradas durante arrefecimento. Sem a base aquecida é muito fácil que este fenómeno aconteça porque a diferença de temperatura entre a peça e a plataforma é grande, e existe ainda o ar frio que circula na atmosfera envolvente que também ajuda na contração. A aresta do canto onde se iniciou a construção do modelo apresentou um mau aspeto um má deposição do material, sendo ela desde a 7<sup>a</sup> até à 21<sup>a</sup> camada para o cubo impresso a



**Figura 4.3:** Defeito de impressão numa das faces do cubo impresso com ventilação uniforme a  $135^{\circ}C$  e a plataforma à temperatura ambiente

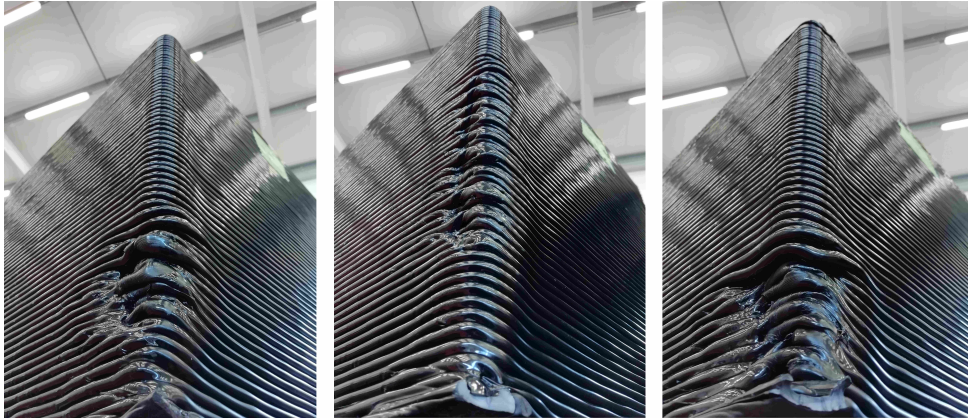
$45^{\circ}C$ , desde a 12<sup>a</sup> até à 44<sup>a</sup> camada para o cubo impresso a  $90^{\circ}C$ , e desde a 1<sup>a</sup> até à 13<sup>a</sup> camada para o cubo impresso a  $135^{\circ}C$ . Como anteriormente referido a ventilação original afeta apenas um dos lados da impressão, e o resultado é um aspeto brilhante nos cordões nesse mesmo lado após o arrefecimento, tendo o outro lado um aspeto mate. A figura 4.4 seguinte ilustra o modelo impresso nestas condições, e a figura 4.5 ilustra o detalhe da aresta do canto inicial dos mesmos.



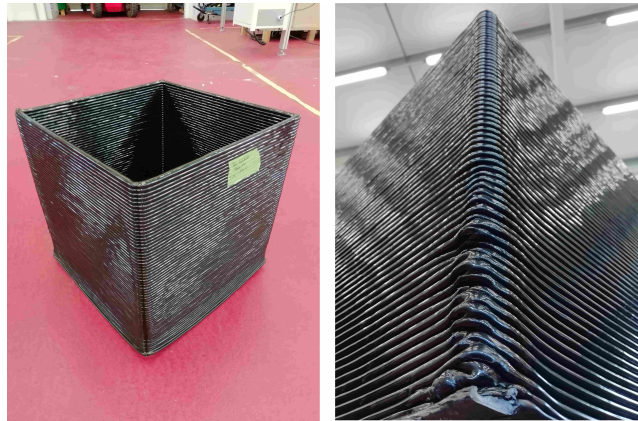
**Figura 4.4:** Cubos impressos com a ventilação original: a  $45^{\circ}C$  (esquerda), a  $90^{\circ}C$  (meio) e a  $135^{\circ}C$  (direita) com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$ )

### 4.1.3 Sem Ventilação

O modelo impresso tem relativamente o mesmo grau de perfeição que têm as peças obtidas no teste anterior com a ventilação original, com a diferença que os cordões de todas as arestas do cubo têm um aspeto brilhante, e a aresta a que corresponde o canto do início da construção demonstrou uma deposição deficiente de material até à 24<sup>a</sup> camada, acabando por depois estabilizar. O resultado da impressão sem ventilação foi o melhor comparado com o resultado das impressões com ventilação. A figura 4.6 seguinte ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.5:** Detalhe da aresta do canto inicial do cubo impresso com a ventilação original: a  $45^{\circ}C$  (esquerda), a  $90^{\circ}C$  (meio) e a  $135^{\circ}C$  (direito) com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$ )



**Figura 4.6:** Cubo impresso sem ventilação e com a plataforma de aquecimento à temperatura ambiente ( $20^{\circ}C$ ) (esquerda); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

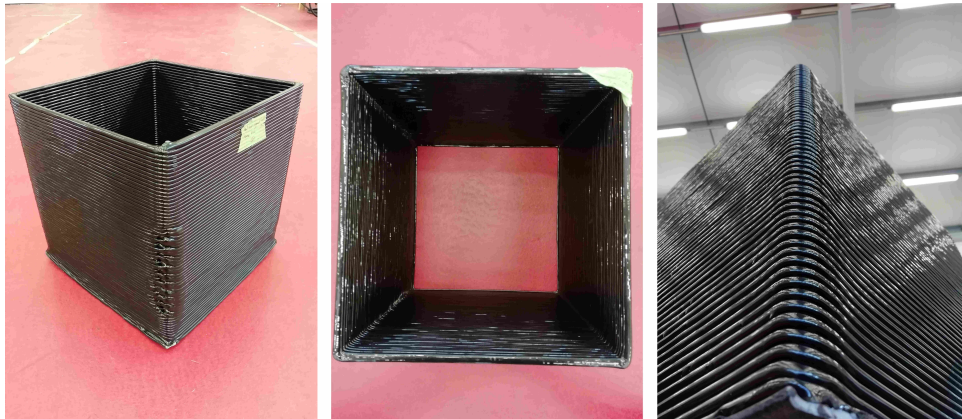
## 4.2 Testes com a Plataforma Aquecida

Os testes efetuados com a plataforma à temperatura ambiente evidenciaram a necessidade de aquecê-la para prevenir o empeno, e assim também testar a sua influência na deposição das camadas no canto inicial. Todos os testes realizados nesta fase não usaram qualquer tipo de ventilação junto ao bico da extrusora, dado que nos testes realizados com a plataforma à temperatura ambiente a conclusão foi que sem ventilação a impressão apresentava melhor aspeto, por isso os testes seguintes foram realizados sem ventilação.

Ainda, de maneira a obter uma certeza sobre os resultados obtidos, propôs-se repetir as impressões para assim confirmar qual o cubo que define os valores para os parâmetros de impressão.

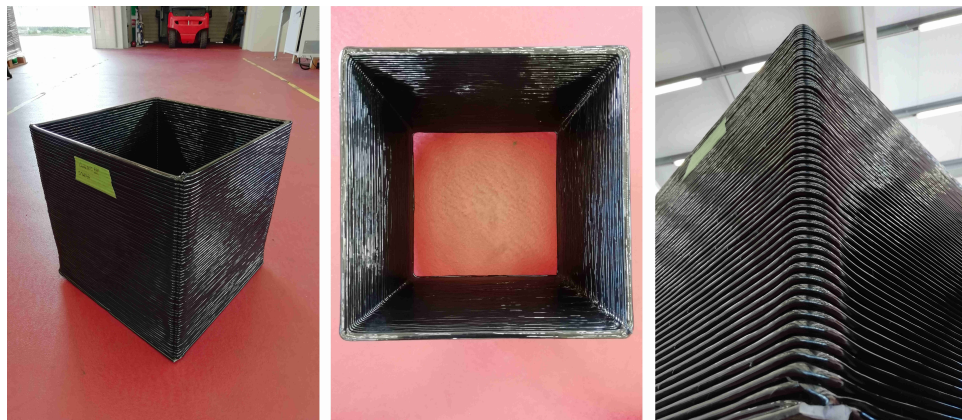
#### 4.2.1 Teste com a Plataforma a 60°C

O modelo impresso apresentou os melhores resultados até à data dos testes, com uma ótima qualidade de impressão. Os cantos ficaram com um ótimo aspeto e apresentam apenas um ligeiro empeno. Os cordões apresentam um aspeto brilhante. A figura 4.7 seguinte ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.7:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 60°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

**Segundo teste com a plataforma a 60°C** O cubo impresso nestas condições foi o que apresentou os melhores resultados, o que suscitou grandes expectativas sobre o facto de nos próximos testes ele continuar a ser o cubo que apresenta os melhores resultados. A figura 4.8 ilustra o modelo impresso nestas condições.

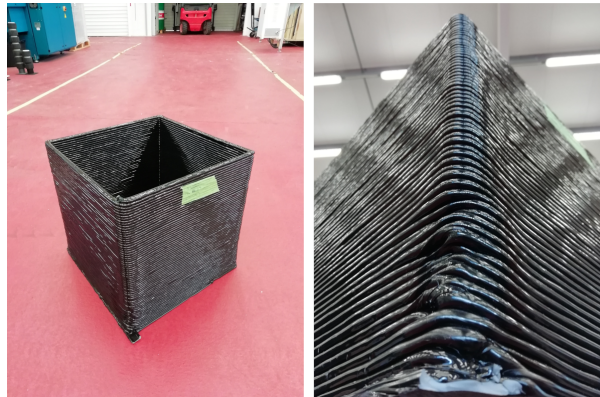


**Figura 4.8:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 60°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

Como se pode verificar pela figura acima, o modelo impresso apresenta um ótimo aspeto. Todas as aresta do cubo denotam uma ótima construção, isto é, uma boa deposição das camadas. O empeno é reduzido. É por isso, possível afirmar que o grau de perfeição do 2º cubo impresso a 60°C é igual ao 1º cubo impresso.

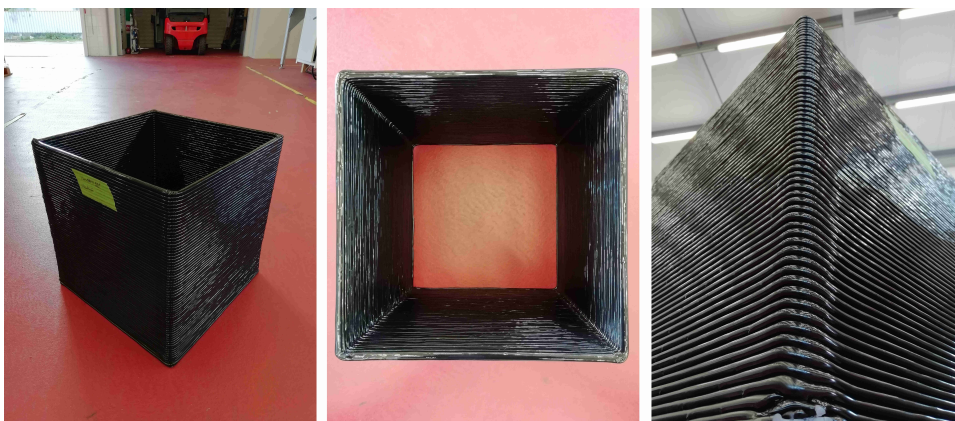
#### 4.2.2 Teste com a Plataforma a 100°C

O modelo impresso nestas condições apresentou uma deposição deficiente de material no canto inicial até à 14ª camada. Os cantos não apresentaram qualquer empeno. De todos os testes efetuados até à data foi o modelo impresso em que os cantos não descolaram da plataforma, o que indica que 100°C é a temperatura adequada para a plataforma de aquecimento quando se imprime em ABS. A figura 4.9 seguinte ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.9:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 100°C e sem ventilação (esquerda); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

**Segundo teste com a plataforma a 100°C** O cubo antes impresso nestas condições não apresentou os mesmos resultados que agora, quando realizado o segundo teste. Não apresentou qualquer defeito na deposição de camadas, o que antes havia acontecido com bastante proeminência, e não apresentou empeno em nenhum dos 4 cantos. Aparentemente este será o cubo melhor impresso. A figura 4.10 ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.10:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a 100°C e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

**Teste com a Plataforma a 80°C** O teste anterior mostrou que a temperatura adequada para a plataforma é de 100°C para que não haja empeno no modelo, contudo ele apresentou

uma deposição deficiente de material no canto principal, o que no modelo impresso a  $60^{\circ}C$  não aconteceu. Por isso optou-se por realizar um teste com a plataforma aquecida a uma temperatura intermédia para procurar evitar o empeno e deposição deficiente de material no canto principal. Para garantir um arrefecimento moderado do material depositado no canto principal para que ele não se deforme instalou-se uma ventoinha de  $12V$  e de  $12cm$  de diâmetro que permite um fluxo de ar lateral mais brando e suave que a da ventilação original do robô.

O modelo impresso nestas condições apresenta um ligeiro empeno nos 4 cantos assim como no modelo impresso a  $60^{\circ}C$ , e ainda um arrasto de material apesar de pouco. O cordões apresentam um aspeto brilhante e é de notar a deposição deficiente do material no canto inicial até à 9ª camada. A figura 4.11 seguinte ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.11:** Cubo impresso com a plataforma aquecida a  $80^{\circ}C$  com ventilação lateral a partir de uma ventoinha de  $12V$  e de  $12cm$  de diâmetro (esquerda); detalhe do fenómeno de arrasto (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

**Segundo teste com a plataforma a  $80^{\circ}C$**  Para a realização deste teste decidiu-se não usar qualquer ventilação devido ao mau aspeto do 1º cubo impresso, e devido aos testes anteriores que verificaram que a impressão de ABS tem um melhor grau de perfeição se se omitir a ventilação. O 2º cubo impresso revela melhores resultados que o 1º cubo porque não apresentou uma deposição deficiente na aresta do canto principal. O empeno nos 4 cantos é da mesma ordem de grandeza que o 1º cubo. A figura 4.12 ilustra o modelo impresso nestas condições.

### 4.3 Controlo de Geometria

Os cubos impressos nestes segundos testes foram sujeitos a uma digitalização de maneira a comprovar qual o cubo que apresenta os melhores resultados. Para tal, foram definidos os vários pontos de medição, e posteriormente cruzados os valores das medições obtidas com



**Figura 4.12:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a  $80^{\circ}C$  e sem ventilação (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (meio); detalhe da aresta do canto inicial (direita)

as do CAD original. Para efetuar a digitalização foi utilizado o *Artec Leo*, um digitalizador 3D, e para a realização das medições foi utilizado o software CATIA. De maneira a poder realizar as digitalizações foi necessário pintar os cubos com spray de cor branca de maneira ao digitalizador poder identificar o cubo, pois o preto brilhante, a cor original dos cubos impressos, não permite a digitalização pois a imagem que surge no digitalizador é de uma "sombra". Uma ilustração de como ficou o aspeto dos cubos após serem pintados com spray encontra-se na figura 4.13.



**Figura 4.13:** Cubos impressos após serem pintados com spray para posterior digitalização

Após efetuada a digitalização, foi gerado um ficheiro STL para cada cubo impresso e de seguida esse mesmo ficheiro foi aberto no SolidWorks para realizar as medições. A figura 4.14 ilustra os cubos no ambiente de trabalho do SolidWorks.

As medições consideradas para este estudo foram a altura do cubo e o comprimento do lado. Para tal, considerou-se a altura dos 4 cantos e a distancia máxima entre os cantos superiores do cubo para o cálculo dos 4 lados. Para realizar essas mesmas medições tiveram de ser marcados individualmente cada ponto no STL, e devido ao facto de ser uma digitalização de um modelo impresso, e por isso apresenta alguma irregularidade na sua superfície, é de notar a dificuldade que é escolher o ponto para medição. O rigor foi o melhor

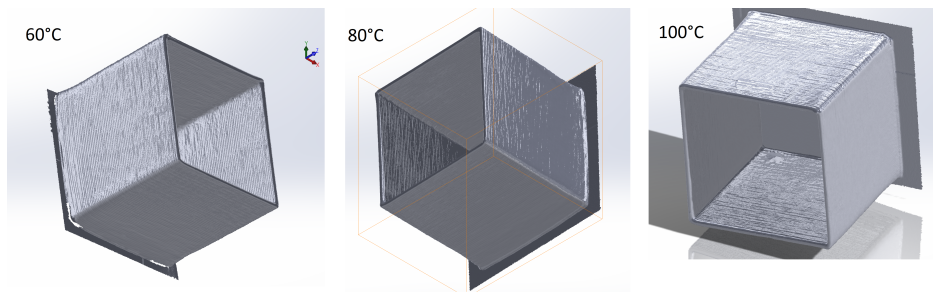


Figura 4.14: Cubos no ambiente de trabalho do SolidWorks

| Dimensões dos lados [mm]           | Temperatura da plataforma |              |              |
|------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
|                                    | 60°C                      | 80°C         | 100°C        |
| Lado 1                             | 389.4                     | 393.5        | 393.5        |
| Lado 2                             | 394.8                     | 391.4        | 390.9        |
| Lado 3                             | 395                       | 390.3        | 388.4        |
| Lado 4                             | 391.2                     | 393.5        | 388.2        |
| <b>Média dos Lados</b>             | <b>392.6</b>              | <b>392.2</b> | <b>390.3</b> |
| <b>Desvio Padrão dos Lados</b>     | <b>2.39</b>               | <b>1.38</b>  | <b>2.15</b>  |
| <b>Desvio Percentual dos Lados</b> | <b>0.61%</b>              | <b>0.35%</b> | <b>0.55%</b> |

Tabela 4.1: Resultados das medições dos lados das digitalizações dos cubos

possível, não sendo por isso o método mais preciso para a comparação dos cubos, mas pode fornecer alguma informação. A comparação entre as medições do STL e as do CAD original estão expressas na tabelas 4.1 e 4.2.

Face aos resultados apresentados nas duas tabelas, é possível verificar que o cubo que no global apresenta as dimensões mais próximas do pretendido é o cubo impresso a 100°C sem ventilação. A média de lados do mesmo cubo é muito próxima dos 390mm que é o valor pretendido. O desvio padrão, medida que indica a dispersão dos dados dentro de uma amostra em relação à média, dos lados e das alturas para os 3 cubos é de, no máximo 2.5mm, o que são valores bastante razoáveis convenhamos. Em termos percentuais, o cálculo do desvio percentual dos lados e das alturas em relação à medida teórica - 390mm, indica-nos que o mesmo nunca é superior a 1%, o que são boas notícias porque se considerarmos 1% o desvio mínimo, nem a esse valor chegou, face às análises efetuadas, tanto para os lados como para as alturas. Face à maneira como foram escolhidos os pontos para medição no STL é possível afirmar que tanto o desvio padrão como o desvio percentual dos lados e alturas do cubo apresentam bons valores, o que indica algum rigor nos procedimentos utilizados.

| Altura [mm]                          | Temperatura da plataforma |              |              |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
|                                      | 60°C                      | 80°C         | 100°C        |
| Altura 1                             | 392.9                     | 394.8        | 397.1        |
| Altura 2                             | 395.1                     | 394.4        | 395.7        |
| Altura 3                             | 394.3                     | 395.2        | 394.1        |
| Altura 4                             | 395.7                     | 394.4        | 392.1        |
| <b>Média das Alturas</b>             | <b>394.5</b>              | <b>394.7</b> | <b>394.8</b> |
| <b>Desvio Padrão das Alturas</b>     | <b>1.05</b>               | <b>0.33</b>  | <b>1.86</b>  |
| <b>Desvio Percentual das Alturas</b> | <b>0.27%</b>              | <b>0.08%</b> | <b>0.48%</b> |

**Tabela 4.2:** Resultados das medições das alturas das digitalizações dos cubos

## 4.4 Teste da Sustentação do Material

Já se comprovou a possibilidade de impressão em ABS para uma peça com as paredes direitas, resta comprovar se a impressão decorre normalmente com paredes inclinadas. Realizaram-se testes de sustentação do material, e para isso imprimiram-se cubos com 390mm de altura com as faces inclinadas. O objetivo é encontrar o ângulo de sustentação máximo, ou seja, até que ângulo se podem inclinar as paredes sem que o material ceda ou descaia. Inicialmente estipularam-se 3 ângulos diferentes: 15°, 30° e 45° em relação à vertical, sendo que a base começa com um quadrado de 195x195mm, metade da dimensão do quadrado da base dos cubos anteriormente impressos.

### 4.4.1 Faces Inclinadas a 45°

O modelo impresso nestas condições revelou um péssimo aspeto. Ao fim de 3 ou 4 camadas de material os cordões começaram a descair devido à maior parte do seu peso estar suspenso no ar, e conseqüentemente o bico da extrusora foi-se distanciando gradualmente da impressão. A figura 4.15 (esquerda) ilustra bem esse acontecimento. Apenas foram impressas 10 camadas do cubo, porque de nada servia continuar a impressão pois o estado da mesma só tinha em piorar e o bico distanciava-se cada vez mais do modelo fazendo com o material se depositasse aleatoriamente sobre a camada anterior. A base do modelo nunca descolou da plataforma. A figura 4.15 (centro e direita) ilustra o modelo impresso nestas condições.



**Figura 4.15:** Esquerda: Bico da extrusora afastado da impressão. Centro: Cubo impresso com com a plataforma aquecida a  $100^{\circ}C$ , sem ventilação e com as faces inclinadas a  $45^{\circ}$ . Direita: vista de topo do mesmo cubo.



**Figura 4.16:** Esquerda: Bico da extrusora afastado da impressão. Centro: Cubo impresso com com a plataforma aquecida a  $100^{\circ}C$ , sem ventilação e com as faces inclinadas a  $30^{\circ}$ . Direita : vista de topo do mesmo cubo.

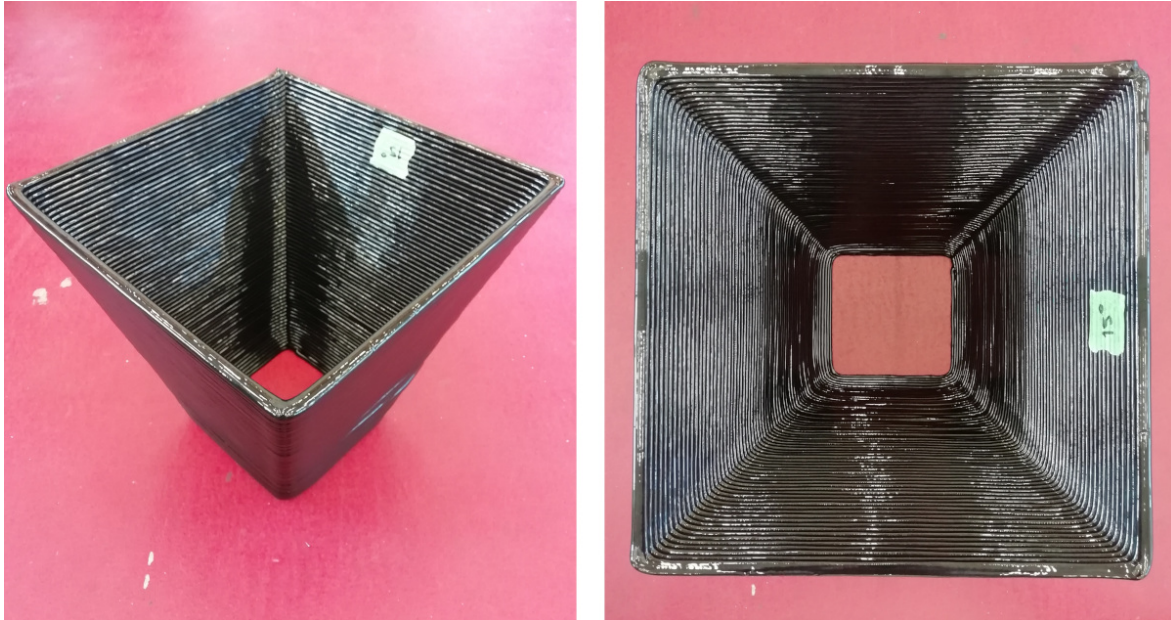
#### 4.4.2 Faces Inclinadas a $30^{\circ}$

No modelo impresso com as faces inclinadas a  $30^{\circ}$  ele revelou uma melhor sustentação de material que o anterior, pelo menos até à  $10^{\text{a}}$  camada, a partir daí o material depositado descaiu e o bico começou a distanciar-se gradualmente do modelo, sendo abortada a impressão ao fim de 17 camadas. De notar que a base do modelo nunca descolou da plataforma. A figura 4.16 (esquerda) ilustra o pormenor do bico afastado da impressão, e a figura 4.16 (centro e direita) apresenta 2 vistas do modelo impresso nestas condições.

#### 4.4.3 Faces Inclinadas a $15^{\circ}$

O modelo com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$  apresentou um ótimo aspeto, e a sustentação do material foi ótima em todas as camadas. É de notar apenas um defeito estético: as primei-

ras camadas estão ligeiramente mais defeituosas, isto é, os cordões não estão tão direitos e uniformemente unidos como os cordões das camadas superiores, mas isso deve-se ao reduzido tempo que o material teve para arrefecer, o que é normal pois nessas condições o material está mais mole e com o peso das camadas que lhe seguem ele acaba por se deformar. A figura 4.17 ilustra o modelo impresso nestas condições.

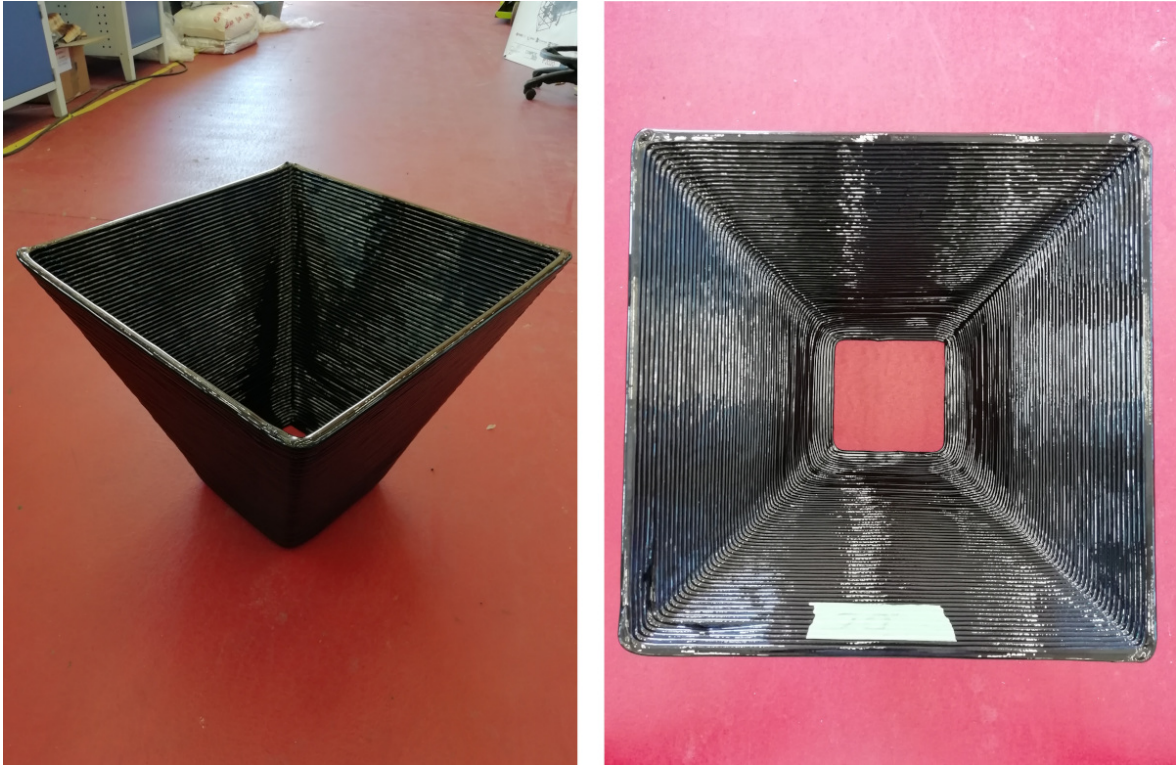


**Figura 4.17:** Cubo impresso com com a plataforma aquecida a  $100^{\circ}C$ , sem ventilação e com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$  (esquerda); vista de topo do mesmo cubo (direita)

Ora, face aos testes acima realizados o cubo que apresentou os melhores resultados foi sem dúvida o cubo com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$  em relação à vertical, mas o objetivo deste teste é encontrar o valor do ângulo de sustentação máximo do material, e por isso, procedeu-se a um quarto teste com as faces inclinadas a  $20^{\circ}$ .

#### 4.4.4 Faces Inclinadas a $20^{\circ}$

Este teste revelou que o material ainda se consegue sustentar para este grau de inclinação em toda a extensão da peça apesar de na base, isto é, nas primeiras camadas o modelo apresentar uma deposição mais deficiente do material comparado com as camadas superiores. Na base do modelo o material descaiu um pouco e conferiu nessa zona o aspeto de uma "taça" semelhante ao resultado obtido no teste com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$ . As arestas cubo estão mais "arredondas" nas primeiras camadas. Este cubo não apresenta melhor aspeto que o cubo com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$  mas permitiu constatar que o ângulo máximo de sustentação do material deve situar-se entre os  $20^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ .



#### 4.5 Utilidade Prática para as Impressões

Após a impressão dos vários cubos de paredes direitas e inclinadas, resolveu-se dar um utilidade prática a pelo menos um dos modelos impressos, e a partir do cubo com as faces inclinadas a  $15^\circ$  criou-se um vaso para plantas. Outras geometrias igualmente úteis poderiam ser criadas com o equipamento utilizado nestes testes, mas resolveu-se aproveitar uma geometria já impressa e atribuir-lhe uma utilidade. A figura 4.18 ilustra o vaso elaborado já com a terra e plantas.



**Figura 4.18:** 2 vistas do vaso de plantas criado a partir do cubo impresso com as faces inclinadas a 15°

# 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

## 5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, algumas conclusões foram retiradas.

- A impressão com ABS resulta melhor se não houver ventilação do que quando é utilizada ventilação, e a mesma influencia o aspeto do material depois de arrefecido, que pode variar entre mate e brilhante.
- A plataforma de aquecimento é um elemento importante para o sucesso da impressão com o ABS. Numa primeira fase obtiveram-se melhores resultados quando usada a plataforma de aquecimento, e neste caso, aquecida a  $60^{\circ}C$  e sem aplicada nenhuma ventilação, mas após a repetição dos testes verificou-se que o o cubo obtido com a plataforma aquecida a  $100^{\circ}C$  e sem ventilação apresentou o melhor aspeto. Neste impressão não ocorreu empeno ao contrário de todas as outras.
- Os desvios percentuais calculados ao nível da altura e dos lados dos cubos impressos permitiram comprovar que o cubo que no global apresenta as dimensões mais próximas do pretendido é o cubo impresso a  $100^{\circ}C$  sem ventilação.
- No conjunto de todos os cubos impressos sem ventilação, o valor do desvio percentual dos lados e das alturas é inferior a 1% o que indica um boa precisão da impressora e um rigor nos procedimentos utilizados.
- O canto inicial da construção do modelo é sensível ao aparecimento de defeitos porque é nesse canto que se inicia a sobreposição das camadas, e porque o material nessa zona está mais arrefecido.
- A impressão de ABS aparenta indicar uma relação direta entre a temperatura ótima da plataforma de aquecimento e a temperatura de transição vítrea do material, que são da mesma ordem.
- Para os testes da sustentação do material o cubo que apresentou o melhor resultado foi o cubo impresso com as faces inclinadas a  $15^{\circ}$ , e o ângulo de sustentação máximo situa-se entre os  $20^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ .

## 5.2 Trabalhos Futuros

No sentido de dar uma continuação ao trabalho desenvolvido, novas propostas de trabalho são consideradas, entre as quais:

- Realização de novas impressões com um material de uma cor que não preta e de preferência mate para melhor identificação do cubo pelo digitalizador, mas sobretudo encontrar um método mais preciso para controlar e comparar geometricamente os modelos impressos com o modelo digital do que o utilizado neste relatório.
- Realização de testes para verificação de uma possível relação direta entre a temperatura de transição vítrea do material e a temperatura ótima da plataforma de aquecimento.
- Realização de novos testes para outros materiais de impressão, no sentido de chegar também aos valores dos parâmetros mais adequados para a impressão com esses materiais.

# Bibliografia

- [1] Susmita Bose et al. «Additive manufacturing of biomaterials». Em: *Progress in Materials Science* 93 (2018), pp. 45–111. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>.
- [2] Wei Gao et al. «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering». Em: *CAD Computer Aided Design* 69 (2015), pp. 65–89. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [3] Mary Kathryn Thompson et al. «Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints». Em: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65.2 (2016), pp. 737–760. ISSN: 17260604. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [4] Stratasys. *What is FDM Technology?* 2018. URL: <http://www.stratasys.com/fdm-technology> (acedido em 11/10/2018).
- [5] Stefan Dimov D. T. Pham. *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. 2001.
- [6] Solaiman Tarafder e Susmita Bose. «Polycaprolactone-coated 3D printed tricalcium phosphate scaffolds for bone tissue engineering: In vitro alendronate release behavior and local delivery effect on in vivo osteogenesis». Em: *ACS Applied Materials and Interfaces* 6.13 (2014), pp. 9955–9965. ISSN: 19448252. DOI: 10.1021/am501048n.
- [7] Dr. Brent Stucker Dr. Ian Gibson, Dr. David W. Rosen. *Additive Manufacturing Technologies*. Second. New York: Springer, 2010, p. 510. ISBN: 9781493921126.
- [8] Kaufui V. Wong e Aldo Hernandez. «A Review of Additive Manufacturing». Em: *ISRN Mechanical Engineering 2012* (2012), pp. 1–10. ISSN: 2090-5130. DOI: 10.5402/2012/208760. arXiv: 208760. URL: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>.
- [9] Sofia Alexandra Chaves Abreu. «Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo». Tese de doutoramento. Universidade do Porto (FEUC), 2015, p. 235.
- [10] Seong Bin Kim et al. «Evaluation of the fit of metal copings fabricated using stereolithography». Em: *Journal of Prosthetic Dentistry* (2018), pp. 1–6. ISSN: 00223913. DOI: 10.1016/j.prosdent.2018.01.012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.01.012>.

- [11] Krisztián Kun. «Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology». Em: *Procedia Engineering* 149.June (2016), pp. 203–211. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.657. arXiv: arXiv:1011.1669v3. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657>.
- [12] Tuan D. Ngo et al. «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges». Em: *Composites Part B: Engineering* 143.December 2017 (2018), pp. 172–196. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836817342944>.
- [13] Daekeon Ahn et al. «Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing». Em: *Journal of Materials Processing Technology* 212.2 (2012), pp. 339–346. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013>.
- [14] M. Launhardt et al. «Detecting surface roughness on SLS parts with various measuring techniques». Em: *Polymer Testing* 53 (2016), pp. 217–226. ISSN: 01429418. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.05.022.
- [15] Cassiopée Galy et al. «Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences». Em: *Additive Manufacturing* 22.July 2017 (2018), pp. 165–175. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.005>.
- [16] Custompart.net. *3D Printing*. URL: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>.
- [17] R. A. Buswell et al. «Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction». Em: *Automation in Construction* 16.2 (2007), pp. 224–231. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.05.002.
- [18] David Rejeski, Fu Zhao e Yong Huang. «Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing». Em: *Additive Manufacturing* 19 (2018), pp. 21–28. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.019. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>.
- [19] Syed A.M. Tofail et al. *Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. Vol. 21. 1. 2017, pp. 22–37. ISBN: 13697021 (ISSN). DOI: 10.1016/j.mattod.2017.07.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- [20] Karel Kellens et al. «Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?» Em: *Procedia CIRP* 61.Section 3 (2017), pp. 582–587. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.153. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153>.
- [21] Brent Stephens et al. «Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers». Em: *Atmospheric Environment* 79 (2013), pp. 334–339. ISSN: 13522310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.050.

- [22] Sanjay Kumar e Aleksander Czekanski. «Development of filaments using selective laser sintering waste powder». Em: *Journal of Cleaner Production* 165 (2017), pp. 1188–1196. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.202. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.202>.
- [23] Jamison Go e A. John Hart. «Fast Desktop-Scale Extrusion Additive Manufacturing». Em: *Additive Manufacturing* 18 (2017), pp. 276–284. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.016. arXiv: arXiv:1709.05918[physics.app-ph]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.016>.
- [24] Mahesh B. Mawale, Abhaykumar M. Kuthe e Sandeep W. Dahake. «Additive layered manufacturing: State-of-the-art applications in product innovation». Em: *Concurrent Engineering Research and Applications* 24.1 (2016), pp. 94–102. ISSN: 15312003. DOI: 10.1177/1063293X15613111.
- [25] Daniel R. Eyers et al. «Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective». Em: *Computers in Industry* 92-93 (2017), pp. 208–218. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2017.08.002.
- [26] Patrick Terriault e Vladimir Brailovski. «Modeling and simulation of large, conformal, porosity-graded and lightweight lattice structures made by additive manufacturing». Em: *Finite Elements in Analysis and Design* 138.September 2017 (2018), pp. 1–11. ISSN: 0168874X. DOI: 10.1016/j.finel.2017.09.005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.09.005>.
- [27] Ugur M. Dilberoglu et al. «The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0». Em: *Procedia Manufacturing* 11.June (2017), pp. 545–554. ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
- [28] Desktop Metal. *Metal 3D printing at scale*. 2018. URL: <https://www.desktopmetal.com/products/production/>.
- [29] Michael Petch. *DESKTOP METAL 3D PRINTERS PRICING AND TECHNICAL SPECIFICATIONS ANNOUNCED*. 2017. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/desktop-metal-3d-printers-pricing-technical-specifications-announced-111531/>.
- [30] Danfang Chen et al. «Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications». Em: *Journal of Cleaner Production* 107 (2015), pp. 615–625. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- [31] Jianing Sun et al. «Smart Services for Enhancing Personal Competence in Industrie 4.0 Digital Factory». Em: *Logforum* 14.1 (2018), pp. 51–57. ISSN: 1895-2038. DOI: 10.17270/J.LOG.2018.239.
- [32] Joseph M. Flynn et al. «Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments». Em: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 101 (2016), pp. 79–101. ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.

- [33] R. A. Buswell et al. «Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction». Em: *Automation in Construction* 16.2 (2007), pp. 224–231. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.05.002.
- [34] C. Gosselin et al. «Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders». Em: *Materials and Design* 100 (2016), pp. 102–109. ISSN: 18734197. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- [35] S. Lim et al. «Developments in construction-scale additive manufacturing processes». Em: *Automation in Construction* 21.1 (2012), pp. 262–268. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010. arXiv: NIHMS150003.
- [36] R. Duballet, O. Baverel e J. Dirrenberger. «Classification of building systems for concrete 3D printing». Em: *Automation in Construction* 83.July (2017), pp. 247–258. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
- [37] T. Artaza et al. «Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine». Em: *Procedia Manufacturing* 13 (2017), pp. 778–785. ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.184>.
- [38] J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez e A. M. Camacho. «Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)». Em: *Procedia Manufacturing* 13 (2017), pp. 895–902. ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.154>.
- [39] Joris Peels. *Comparison of Metal 3D Printing – Part Two: Directed Energy Deposition*. 2017. URL: <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>.
- [40] M. Javidani et al. «Additive Manufacturing of AlSi10Mg Alloy Using Direct Energy Deposition: Microstructure and Hardness Characterization». Em: *Journal of Thermal Spray Technology* 26.4 (2017), pp. 587–597. ISSN: 10599630. DOI: 10.1007/s11666-016-0495-4.
- [41] Loughborough University. *Directed Energy Deposition*. URL: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>.
- [42] Do Sik Shim et al. «Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process». Em: *Optics and Laser Technology* 86 (2016), pp. 69–78. ISSN: 00303992. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.07.001. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.001>.
- [43] Marc. *Directed Energy Deposition*. 2017. URL: [3D%20Printing,%20EBAM,%20LENS%207B%5C%7D7C](https://www.youtube.com/watch?v=7B5C%7D7C) (acedido em 30/09/2019).
- [44] Paul Bosscher et al. «Cable-suspended robotic contour crafting system». Em: *Automation in Construction* 17 (2007), pp. 45–55. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.02.011.
- [45] Gabriel Fernandes et al. «Impact of Contour Crafting on Civil Engineering». Em: *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 4.08 (2015), pp. 628–632.

- [46] Anes Jakupovic. *D-Shape Report*. Rel. téc. Monolite UK (Dinitech SpA), 2016, p. 33.
- [47] Gary P Halada et al. «The Intersection of Design, Manufacturing, and Surface Engineering». Em: *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. New York: William Andrew Inc., 2005. Cap. Chapter 16. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-081551500-5.50018-5>.
- [48] Sangwoo Nam et al. «Effect of Process Parameters on Deposition Properties». Em: *Metals* (2018). DOI: 10.3390/met8080607.
- [49] Muhammad Harris, Johan Potgieter e Khalid Arif. «Large scale 3D printing : feasibility of novel extrusion based process and requisite materials». Em: *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) Large April 2018* (2017). DOI: 10.1109/M2VIP.2017.8211519.
- [50] J. F. Horta, F. J.P. Simões e A. Mateus. «Large scale additive manufacturing of eco-composites». Em: *International Journal of Material Forming* (2017), pp. 1–6. ISSN: 19606214. DOI: 10.1007/s12289-017-1364-5.
- [51] T. Felsch et al. «Robotic system for additive manufacturing of large and complex parts». Em: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* (2018), pp. 1–4. ISSN: 19460759. DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247739.
- [52] Eric Barnett e Clément Gosselin. «Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot». Em: *Additive Manufacturing 7* (2015), pp. 27–44. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2015.05.001. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.05.001>.
- [53] M. Rinaldi et al. «Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM». Em: *Composites Part B: Engineering* 145.December 2017 (2018), pp. 162–172. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.03.029. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836817343688>.
- [54] Xiaojun Liu et al. «A large-scale double-stage-screw 3D printer for fused deposition of plastic pellets». Em: *Journal of Applied Polymer Science* 134.31 (2017), pp. 1–9. ISSN: 10974628. DOI: 10.1002/app.45147.
- [55] Patrícia Alexandra e Costa Pereira Fresco. «Estabilidade Térmica do PVC – Seleção de Aditivos Estabilidade Térmica do PVC – Seleção de Aditivos». Tese de doutoramento. University of Aveiro, 2014.
- [56] General Fabb. *The Critical Importance Of Cooling During Plastic 3D Printing*. 2016. URL: <https://www.fabbaloo.com/blog/2016/11/14/the-critical-importance-of-cooling-during-3d-printing>.
- [57] Richard Horne Kalani Kirk Hausman. *HOW TO COOL EXTRUDERS WITH FANS ON YOUR 3D PRINTER*. URL: <https://www.dummies.com/computers/pcs/printers/how-to-cool-extruders-with-fans-on-your-3d-printer/>.
- [58] RepRap dev Team. *Heated Bed*. 2018. URL: [https://reprap.org/wiki/Heated%7B%5C\\_%7DBed](https://reprap.org/wiki/Heated%7B%5C_%7DBed).

- [59] Acrylonitrile Butadiene e Styrene Abs. *Terluran GP-35 Terluran GP-35*. 2016.
- [60] YASKAWA Europe GmbH. *ROBÔ ARTICULADO / DE 6 EIXOS / DE MANUSEIO / PARA MONTAGEM*. URL: <http://www.directindustry.com/pt/prod/yaskawa-europe-gmbh/product-14473-1891621.html> (acedido em 22/03/2019).
- [61] YASKAWA Motoman. *FS100 Controller*. 2018. URL: [https://www.motoman.com/products/controllers/fs100%7B%5C\\_%7Dcontroller](https://www.motoman.com/products/controllers/fs100%7B%5C_%7Dcontroller).
- [62] SD3D. *H – Heated Build Plate*. URL: <https://www.sd3d.com/portfolio/h-heated-build-plate/>.
- [63] Michel Biron. «Glass Transition Temperature». Em: *Thermosets and Composites* (2004).
- [64] Habibur Rahman et al. «Investigation on the Scale Factor applicable to ABS based FDM Additive Manufacturing». Em: *Materials Today: Proceedings* 5.1 (2018), pp. 1640–1648. ISSN: 22147853. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.258. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.258>.
- [65] MatterHackers. *How To Succeed When Printing With ABS*. 2014. URL: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-with-abs>.
- [66] Hestay.nl. *ABS 3D-Printer Settings*. URL: <https://www.hestay.nl/en/3d-print-support/3d-printer-setting-per-material/abs/>.

# Anexos

## Anexo 1

### Ficha Técnica do ABS



## Terluran GP-35

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

TECHNICAL  
DATASHEET

### DESCRIPTION

Terluran® GP-35 is high-flow, general purpose injection molding grade with good ductility, intended for moldings with thin walls and/or adverse flow length to wall ratio.

### FEATURES

- Excellent colorability
- High flowability
- Good impact resistance
- Good heat distortion resistance
- High quality surface finish and gloss
- Great mechanical strength and rigidity

### APPLICATIONS

- Injection molding
- Thin wall components for telecommunications
- Household and sanitary appliances
- Toys
- Automotive components
- Electroplating

| Property, Test Condition               | Standard    | Unit                    | Values |
|--|-------------|-------------------------|--------|
| <b>Rheological Properties</b>          |             |                         |        |
| Melt Volume Rate 220 °C/10 kg          | ISO 1133    | cm <sup>3</sup> /10 min | 34     |
| <b>Mechanical Properties</b>           |             |                         |        |
| Izod Notched Impact Strength, 23 °C    | ISO 180/A   | kJ/m <sup>2</sup>       | 22     |
| Izod Notched Impact Strength, -30 °C   | ISO 180/A   | kJ/m <sup>2</sup>       | 7      |
| Charpy Notched Impact Strength, 23° C  | ISO 179/1eA | kJ/m <sup>2</sup>       | 19     |
| Charpy Notched Impact Strength, -30 °C | ISO 179/1eA | kJ/m <sup>2</sup>       | 7      |
| Charpy Unnotched, 23 °C                | ISO 179/1eU | kJ/m <sup>2</sup>       | 125    |
| Charpy Unnotched, -30 °C               | ISO 179/1eU | kJ/m <sup>2</sup>       | 90     |
| Tensile Stress at Yield, 23 °C         | ISO 527     | MPa                     | 44     |
| Tensile Strain at Yield, 23 °C         | ISO 527     | %                       | 2.4    |
| Tensile Modulus                        | ISO 527     | MPa                     | 2300   |
| Nominal Strain at Break, 23 °C         | ISO 527     | %                       | 12     |
| Flexural Strength, 23 °C               | ISO 178     | MPa                     | 65     |
| Hardness, Ball Indentation             | ISO 2039-1  | MPa                     | 99     |
| <b>Thermal Properties</b>              |             |                         |        |

Contact us:  
Phone +49 (2133) 9309 – 168  
INSTY.emea@ineos.com  
www.ineos-styrolution.com

Page 1 of 3  
Revision Date: 2016.05.30