



Otimização de uma impressora 3D

Implementação de um sistema para impressão em multicores e multimateriais

João de Sousa Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor André Ferreira Costa Vieira

Janeiro de 2021

Agradecimentos

Aos meus pais, por acreditarem em mim, por respeitarem e apoiarem todas as minhas escolhas assim como todos os esforços que fizeram para me possibilitarem o percurso acadêmico até aqui.

A minha irmã, por todos os conselhos e ensinamentos dados.

Ao Carlos Silva, por me ensinar todos os princípios da mecânica e por me encorajar e ajudar em todos os projetos, certamente foi uma influência para que chegasse aqui.

Ao meu orientador, Professor Doutor André Ferreira Costa Vieira, por toda a orientação, disponibilidade e autonomia dada neste trabalho.

Ao técnico do *FabLab* Nuno Santos, por partilhar toda a sua experiência na impressão 3D, toda ajuda e paciência na depuração dos problemas encontrados.

Aos meus colegas de curso, particularmente, ao Bruno Sequeira, ao Daniel Silveira e ao Luís Venâncio que fizeram parte de maior parte das histórias vividas na Covilhã, da mesma forma que me incentivaram sempre a ser uma melhor pessoa. Assim como, apoiaram sempre os meus projetos, especialmente, nas Ingratas.

Às amizades que o núcleo me deu, especialmente, à Laura Leite e ao Pedro Andrade, por todo o espírito de equipa desenvolvido.

Resumo

Com o término da patente do processo FDM, em 2009, é notado um forte crescimento da impressão 3D, em especial adesão a esta tecnologia para uso próprio pelo consumidor final. Essa utilização, naturalmente, visa substituir os bens provenientes de processos de fabricação tradicionais. Posto isto, a presente dissertação tem como objetivo a otimização de uma impressora 3D, assim como, a implementação de um sistema capaz de imprimir uma grande variedade de cores e a combinação de diferentes materiais, de forma a que a experiência de utilização seja semelhante aos processos industriais. Inicialmente, fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre esta tecnologia, tendo em conta todos os sistemas passíveis de implementação. Após análise dos mesmos, decidiu-se implementar e otimizar o bico extrusor *Diamond Hotend*. Foram implementadas todas as melhorias pretendidas, na qual foram projetadas e dimensionadas todas as peças necessárias para a incorporação do novo *hardware*. Por fim, foram impressos e testados através de ensaios de tração vários provetes, combinando os materiais PLA e TPU, com propriedades mecânicas muito diferentes, na qual se verificou a necessidade da combinação através de um *design* próprio. Foram também feitos dois testes multicolor (com e sem mistura de filamento), onde se observou limitações de *firmware*.

Palavras-chave

Impressão 3D; FDM; Multicolor; Multimateriais; PLA; TPU

Abstract

With the expiration of the FDM process patent in 2009, a strong growth in 3D printing is noted, adhesion to this technology for the final consumer's own use. This use, of course, aims to replace goods from traditional manufacturing processes. Having said this, this dissertation aims at the optimisation of a 3D printer, as well as the implementation of a system capable of printing a wide variety of colours and the combination of different materials, so that the user experience is like industrial processes. Initially, a bibliographical research on this technology was done, considering all the systems that can be implemented. After analysing them, it was decided to implement and optimise the Diamond Hotend extruder nozzle. All the intended improvements were implemented, in which all the parts necessary for the incorporation of the new hardware were designed and dimensioned. Finally, several specimens were printed and tested through tensile tests, combining PLA and TPU materials, with very different mechanical properties, in which the need for combination was verified through an own design. Two multicolor tests (with and without filament mixture) were also performed, where firmware limitations were observed.

Keywords

3D Printing; FDM; Multicolor; Multi-material; PLA; TPU

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Acrónimos	xxv

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Enquadramento.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Estrutura e organização da dissertação.....	3

Capítulo 2

Estado da arte	5
2.1 História.....	5
2.2 Processos de impressão	6
2.2.1 FDM	6
2.2.2 SLA.....	7
2.2.3 SLS (<i>Selective Laser Sintering</i>).....	7
2.2.4 <i>Multi Jet Fusion</i>	8

2.2.5	DMLS/SLM.....	9
2.3	Tipos de impressoras	10
2.4	Tipos de extrusoras.....	10
2.5	Funcionamento	12
2.6	Materiais utilizados.....	14
2.7	Conceitos existentes	15
2.7.1	<i>Pallete 2</i>	16
2.7.2	<i>Prusa multimaterial 2.0</i>	16
2.7.3	<i>Diamond Hotend</i>	17
2.7.4	<i>Quadfusion Print Head</i>	19
2.7.5	Múltiplos bicos de impressão	20
2.8	Impressão 3D na atualidade.....	20

Capítulo 3

	Otimização da impressora 3D.....	23
3.1	Análise da impressora 3D.....	23
3.2	Escolha dos componentes.....	24
3.2.1	Cabeça extrusora.....	24
3.2.2	Placa de controlo.....	25
3.2.3	Microcontroladores dos motores.....	27
3.2.4	Extrusoras.....	29
3.2.5	Motores	30
3.2.6	Acessórios de arrefecimento	31
3.3	Projeto e dimensionamento	32
3.3.1	Caixa	32
3.3.2	Suporte do motor para extrusora <i>bowden</i>	32
3.3.3	Suporte da extrusora <i>direct drive</i>	33
3.3.4	Bocal para ventilador	33
3.3.5	Apoio para porta rolos	34

3.3.6 Componentes	35
-------------------------	----

Capítulo 4

Projeto de detalhe e montagem	37
4.1 Simulações de componentes desenhados	37
4.1.1 Suporte da caixa	37
4.1.2 Suporte da extrusora <i>bowden</i>	38
4.1.3 Suporte da extrusora <i>direct drive</i>	39
4.2 Cálculos verificação.....	40
4.2.1 Parafusos do suporte do motor para extrusora <i>bowden</i>	40
4.2.2 Vida útil dos rolamentos da cabeça de extrusão.....	42
4.2.3 Suporte extrusora <i>direct drive</i>	45
4.3 Montagem final.....	47
4.4 Alteração do <i>firmware</i>	50
4.5 Esquema elétrico.....	50
4.6 Calibração	51
4.6.1 Microcontroladores	51
4.6.2 Passos dos motores	53
4.6.3 Fluxo	54
4.7 Resolução de problemas	55
4.7.1 Calibração da temperatura do <i>Diamond</i>	58

Capítulo 5

Aplicação prática.....	61
5.1 Impressão simultânea de multimateriais.....	61
5.2 Testes dos provetes	65
5.3 Resultados experimentais	66
5.4 Impressão multicores	78

Capítulo 6

Conclusão e propostas de trabalhos futuros.....	83
6.1 Conclusão	83
6.2 Trabalhos futuros.....	84
Bibliografia	85
Anexos	91
Anexo A: Montagem dos componentes	91
Anexo B: Lista de Material.....	102
Anexo C: Dados técnicos dos rolamentos	103
Anexo D: Código de mistura de cores	105
Anexo E: Alterações <i>Marlin</i>	106
Anexo F: Desenhos técnicos	109

Lista de Figuras

Figura 1 – Principais finalidades da utilização da impressão 3D [5].	2
Figura 2 – As tecnologias mais utilizadas, em 2020, segundo a <i>Statista</i> [11].....	6
Figura 3 – Processo de impressão FDM [12].....	7
Figura 4 – Processo de impressão SLA [12].	7
Figura 5 – Processo de impressão SLS [12].....	8
Figura 6 – Etapas da tecnologia <i>Multi Jet Fusion</i> (adaptado de [14]).....	8
Figura 7 – Processo de impressão DMLS [14].....	9
Figura 8 – Tipos de impressoras: (a) cartesiana, (b) delta [18].	10
Figura 9 – Extrusora <i>bowden</i> (adaptado de [19]).....	11
Figura 10 – Extrusora <i>direct drive</i> (adaptado de [19]).	11
Figura 11 – <i>Remote extruder</i> (adaptado de [19]).	12
Figura 12 – Detalhe no processo de impressão FDM [20].	13
Figura 13 – Bico extrusor de impressora FDM (adaptado de [21]).	13
Figura 14 – Pallette 2: vista interior dos diversos componentes [27].	16
Figura 15 – Sistema de seleção de cor tipo árvore de cames (adaptado de [28]).....	17
Figura 16 – (a) <i>Diamond Hotend</i> com 3 entradas; (b) <i>Diamond Fullcolor</i> com 5 entradas (adaptado de [29]; [30]).	18
Figura 17 – Amostra de cores obtidas com o <i>Diamond Hotend</i> [30].....	19

Figura 18 – Cabeça de impressão <i>Quadfision</i> [31].	19
Figura 19 – <i>Hyppe cycle</i> de 2019 [32].	20
Figura 20 – (a) Sapatilha impressa em 3D; (b) Peça número 1 000 000 para o BMW i8 Roadster [34]; [37].	22
Figura 21 – Impressora utilizada na presente dissertação [39].	23
Figura 22 – Placa de controlo original.	25
Figura 23 – Gráfico do ruído emitido durante uma impressão de teste.	25
Figura 24 – Placa de controlo selecionada, <i>SKR PRO V1.1</i> [41].	27
Figura 25 – Motor de passo híbrido com um ângulo de passo de 1.8° (adaptado de [43]).	28
Figura 26 – Comparação de onda de corrente e da ondulação de posição entre <i>full steps</i> , <i>half steps</i> e <i>microsteps</i> [44].	29
Figura 27 – Microcontrolador TMC 2208.	29
Figura 28 – Extrusoras com caixa redutora à esquerda; extrusora <i>bowden</i> à direita. ..	30
Figura 29 – Motores de passo adquiridos: <i>Nema 17 42 – 23 mm</i> à esquerda; <i>Nema 17 42 – 40 mm</i> à direita	31
Figura 30 – Ventilador para arrefecimento das peças à esquerda; ventilador para refrigeração do bico extrusor à direita.....	31
Figura 31 – Parte superior da caixa à esquerda; parte inferior da caixa à direita.....	32
Figura 32 – Suporte da extrusora <i>bowden</i> .	33
Figura 33 – À esquerda o suporte da extrusora <i>direct drive</i> ; à direita o conjunto assembled.	33
Figura 34 – Bocal para ventilador à esquerda; bocal assembled à direita.	34
Figura 35 – Apoio para porta rolos.....	34
Figura 36 – Fixação do porta rolos original com apoio projetado.	35

Figura 37 – Tensão equivalente de <i>Von Mises</i> à esquerda; deslocamento à direita.	37
Figura 38 – Simulação do deslocamento da peça retificada.	38
Figura 39 – Deslocamento provocado pelo peso da extrusora.....	38
Figura 40 – Distribuição de pressões a que o suporte está sujeito.	39
Figura 41 – Simulação deslocamento do suporte da extrusora <i>direct drive</i>	39
Figura 42 – Diagrama de forças exercidas no suporte.	40
Figura 43 – Diagrama de forças: à esquerda vista posterior do conjunto; à direita vista lateral.	43
Figura 44 – Diagrama de corpo livre.....	43
Figura 45 – Diagrama de forças do suporte da extrusora <i>direct drive</i>	45
Figura 46 – Imagem real da cabeça extrusora à esquerda; render da cabeça extrusora à direita.....	47
Figura 47 – <i>Render</i> da caixa com os componentes.	48
Figura 48 – Aspeto final da impressora e localização dos principais componentes.	49
Figura 49 – Esquema elétrico.....	51
Figura 50 – Esquema de ligações dos <i>jumpers</i> para funcionamento em 16 bit.....	52
Figura 51 – Teste de verificação de ruído após otimização.	53
Figura 52 – Configuração do cubo aberto no <i>software Cura</i>	55
Figura 53 – Deslocamentos dos eixos Z e Y.....	56
Figura 54 – Alteração do <i>Y_BED_SIZE</i> e do <i>Y_MIN_POS</i> , no <i>firmware</i>	56
Figura 55 – Suporte para interruptor de fim de curso do eixo Z.....	57
Figura 56 – Erro apresentado no ecrã.	57
Figura 57 – Revestimento dos condutores do sensor danificados.	58
Figura 58 – Erro apresentado no ecrã durante a impressão.	59

Figura 59 – Valores PID devolvidos pelo programa.....	59
Figura 60 – Provetes de PLA em cima; TPU em baixo.....	62
Figura 61 – Divisão do provete em CAD.....	63
Figura 62 – Configuração do provete multimaterial para impressão.	63
Figura 63 – Provete multimaterial TPU-PLA-TPU.	64
Figura 64 – Provete multimaterial em serie PLA-TPU-PLA.	64
Figura 65 – Provete multimaterial em paralelo PLA+TPU.	64
Figura 66 – Máquina utilizada para realizar testes de tração, <i>Shimadzu AGS-X 10KN</i> .65	
Figura 67 – Provetes após os testes de tração.	66
Figura 68 – Gráfico força-alongamento TPU.	67
Figura 69 – Gráfico força-alongamento PLA.	68
Figura 70 – Gráfico força-alongamento TPU-PLA-TPU.	68
Figura 71 – Gráfico força-alongamento PLA-TPU-PLA.	69
Figura 72 – Gráfico força-alongamento PLA+TPU.	70
Figura 73 – Gráfico força-alongamento de comparação entre ensaios.	71
Figura 74 – Gráfico força-alongamento da zona elástica de todos os ensaios.	72
Figura 75 – Esquema de forças de molas em paralelo.	74
Figura 76 – Esquema de forças molas em série.	75
Figura 77 – À esquerda, aspeto da janela de configuração das cores de cada extrusora virtual; à direita, código RGB das cores das extrusoras virtuais [56].	78
Figura 78 – Código de mistura para a cor verde.	79
Figura 79 – Referência à cor verde (green) no código G do vaso.	79
Figura 80 – Vaso multicolor pronto para impressão.	80
Figura 81 – Resultado do teste de impressão multicolor (mistura de filamentos).	80

Figura 82 – Cone impresso em 3 cores.	81
Figura 83 – Acoplamento da base da caixa à fonte de alimentação.....	91
Figura 84 – Acoplamento da ficha IEC 3P, do interruptor e dos conectores.....	91
Figura 85 – União da caixa com a respetiva base.....	92
Figura 86 – Ecrã LCD instalado.	92
Figura 87 – Ligação os <i>jumpers</i> em MS0 e MS1.	93
Figura 88-Fixação inicial da placa controladora e ligação dos condutores	93
Figura 89 – Montagem do ventilador, do bocal do ventilador e o canal de ventilação..	94
Figura 90 – Vista posterior da caixa.....	94
Figura 91 – Ligação de todos os condutores.....	95
Figura 92 – Vista do aspeto final.	95
Figura 93 – Junção bico extrusor com o suporte.	96
Figura 94 – Fixação do bico extrusor ao suporte com abraçadeiras plásticas.	96
Figura 95 – Fixação do ventilador do bico extrusor e suporte da extrusora <i>direct drive</i>	97
Figura 96 – Montagem do motor e da extrusora <i>direct drive</i>	97
Figura 97 – Fixação do ventilador na lateral do bico extrusor.	98
Figura 98 – Junção do adaptador ao conjunto do bico extrusor.	98
Figura 99 – Cabeça de impressão fixada na estrutura da impressora.	99
Figura 100 – Encaixe do suporte na estrutura da impressora.	100
Figura 101 – Fixação do suporte da extrusora <i>bowden</i> , através de dois parafusos.	100
Figura 102 – Aspeto final da extrusora <i>bowden</i>	101
Figura 103 – Retirado do catálogo dos rolamentos [59].	103
Figura 104 – Retirado do catálogo dos rolamentos [59].	104

Figura 105 – Códigos de mistura de cores [56].	105
Figura 106 – Representação esquemática dos pinos da placa mãe SKR PRO V1.1[41].	108
Figura 107 – Desenho técnico da caixa, vista superior e lateral.....	109
Figura 108 – Desenho técnico caixa, vista posterior e frontal.	110
Figura 109 – Desenho técnico da base da caixa.	111
Figura 110 – Desenho técnico do suporte extrusora <i>direct drive</i>	112
Figura 111 – Desenho técnico do suporte da extrusora <i>bowden</i>	113
Figura 112 – Desenho técnico do bocal para ventilador.	114
Figura 113 – Desenho técnico do suporte do interruptor de fim de curso.	115

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos materiais comuns utilizados no FDM.	15
Tabela 2 – Matriz de decisão da cabeça extrusora.	24
Tabela 3 – Comparação de características das placas de controlo seleccionadas.	26
Tabela 4 – Matriz de decisão da placa de controlo.....	27
Tabela 5 – Restantes componentes impressos.	36
Tabela 6 – Componentes da cabeça de impressão.	48
Tabela 7 – Componentes na caixa	49
Tabela 8 – Principais componentes da impressora.....	50
Tabela 9 – Valores da tensão a aplicar nos microcontroladores.....	53
Tabela 10 – Valores de passos para todos os motores.....	54
Tabela 11 – Parâmetros importantes para a impressão.....	62
Tabela 12 – Dimensões dos provetes e valores dos gráficos.....	73
Tabela 13 – Resultados obtidos para os provetes multimateriais.....	77
Tabela 15 – Lista de material.....	102

Lista de Acrónimos

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
CMYK	<i>Cyan Magenta Yellow Black</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DLS	<i>Digital Light Synthesis</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GND	<i>Ground</i>
MMU	<i>Multi Material Upgrade</i>
PA	Poliamida
PETG	Polietileno tereftalato
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Ácido Poliláctico
PTFE	Politetrafluoretileno
PVA	Álcool polivinílico
RepRap	<i>Replicating rapid prototyper</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TPE	<i>Thermoplastic Elastomer</i>
TPU	Termoplástico poliuretano
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Capítulo 1

Introdução

Este primeiro capítulo apresenta as motivações para a realização deste trabalho, o enquadramento, os objetivos, bem como, a sua estrutura e a organização.

1.1 Motivação

Numa era de elevada concorrência e a progressiva complexidade dos produtos, tem exigido das empresas mudanças no processo de desenvolvimento e fabricação dos produtos, visando, especialmente, a redução de tempo de produção, o aumento da qualidade e, ao mesmo tempo, a diminuição de custos, de forma a elevar a competitividade dos produtos [1].

A impressão 3D, tal como, a internet, quando foi inventada, não se previa o impacto que hoje tem nas nossas vidas. Mudou a forma como interagimos, como compramos e trabalhamos. A impressão 3D está a evoluir de forma a que se faça novamente história [2]. Segundo o relatório “*3D printing trends 2020*” é esperado que o mercado cresça 24% nos próximos 5 anos [3]. Tendo como exemplo o consumidor final, houve uma larga adesão a esta tecnologia devido ao término da patente dos processos “*Fused Depositon Modeling*” (FDM), em 2009, o que levou vários fabricantes a investir nesta tecnologia. E como dita o senso comum, quanto maior a oferta, mais baixos serão os preços.

Com esta tecnologia, vários benefícios podem ser destacados em comparação com os tradicionais processos, tal como, a fabricação de peças com elevado grau de complexidade, a redução de restrições geométricas, a personalização de produtos e a utilização de outros materiais. Desta forma, existe uma grande variedade de opções disponíveis nos diversos setores industriais, criando assim bases tecnológicas renovadas [4].

A impressão 3D está hoje presente em vários mercados, nomeadamente, automóvel, aeroespacial, máquinas industriais, aplicações para o consumidor comum e medicina.

1.2 Enquadramento

Atualmente, as impressoras comerciais mais económicas, ou seja, as mais procuradas pelo utilizador comum, estão por norma limitadas à impressão de uma única cor, tendo a possibilidade de impressão em várias cores, recorrendo a um processo manual de troca de filamento. Isto obriga a acompanhar a impressão no seu todo.

Como constatado na figura 1, a impressão 3D é utilizada em grande percentagem para finalidades de interesse próprio. É assim notado que o consumidor final valoriza bastante esta tecnologia com tendência para continuar o crescimento para estas finalidades. Neste momento, as impressões realizadas maioritariamente são feitas numa única cor ou único material, sendo quando necessário pintadas. Como muitos utilizadores se aliciam a esta tecnologia para substituir bens provenientes de processos de fabricação tradicionais, é importante garantir que as experiências de utilização destes produtos fabricados por manufatura aditiva mantenham as mesmas características, nomeadamente as cores. Assim, surge a necessidade de otimizar e aplicar um sistema capaz de imprimir uma grande variedade de cores, e também combinar diversos materiais, de modo a melhorar as propriedades mecânicas da peça final.

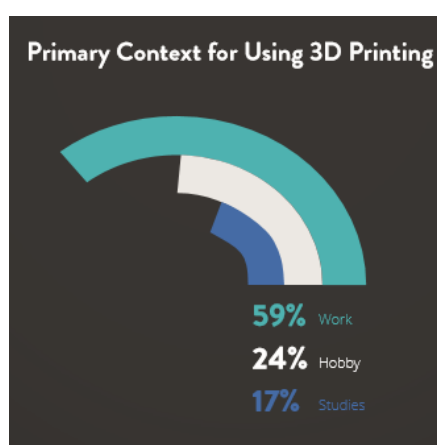


Figura 1 – Principais finalidades da utilização da impressão 3D [5].

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo a otimização de uma impressora 3D cartesiana para a impressão de multimateriais e multicores. Ou seja, é pretendido colmatar características negativas da impressora utilizada, como o ruído durante as impressões. A substituição do bico extrusor atual por um capaz de realizar a impressão da maior parte dos filamentos comerciais, que possibilite a impressão de multimateriais, assim como, a possibilidade de

imprimir peças em diversas cores. Por fim, é pretendido testar a adesão entre diferentes materiais.

Devido ao vasto leque de filamentos comerciais, neste trabalho irão ser testadas a adesão de dois materiais, o PLA e o TPU, com propriedades mecânicas significativamente diferentes em termos de rigidez, visando as vantagens da associação dos mesmos.

1.4 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, nomeadamente, a introdução, o estado da arte, a otimização da impressora, o projeto de detalhe e montagem, a aplicação prática, bem como, as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

No primeiro capítulo é apresentado as motivações para a realização do presente trabalho, o enquadramento, os objetivos e, por fim, a estrutura e organização da dissertação.

Num segundo capítulo, é feita uma abordagem da impressão 3D e dos materiais utilizados pelo consumidor final, assim como, uma descrição dos principais conceitos existentes.

O terceiro capítulo engloba a otimização da impressora, ou seja, é feito o estudo da viabilidade das alterações e são descritas as alterações necessárias, tal como, o projeto e o dimensionamento dos componentes necessários.

No quarto capítulo são apresentadas as simulações mecânicas e verificações às peças dimensionadas. Também é descrita a montagem e a respetiva calibração dos componentes.

É apresentado no quinto capítulo os resultados dos testes de impressão de peças multimateriais e multicores, na qual se pretende avaliar o desempenho deste conceito e, sobretudo, avaliar as propriedades mecânicas das peças impressas em multimateriais.

No sexto capítulo estabelecem-se as principais conclusões do trabalho, apresentando as limitações na realização do mesmo. Para finalizar, são também sugeridas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

O capítulo 2 faz referência à história da impressão 3D, aos seus processos, aos tipos de impressoras e de extrusoras, ao seu funcionamento, aos materiais utilizados, aos conceitos existentes, bem como, à impressão 3D na atualidade.

2.1 História

Define-se impressão 3D (também conhecida como manufatura aditiva) como a produção de peças complexas com base em desenhos construídos em ambiente virtual, isto é, quando um objeto digital se torna num objeto físico.

Esta tecnologia, apesar de se parecer bastante inovadora para os tempos que correm, na verdade surgiu descrita pela primeira vez em 1964. O trabalho desenvolvido por Arthur C. Clarke já descrevia, de uma forma geral, o funcionamento de um “*replicator*” como um dispositivo capaz de replicar qualquer objeto “*duplicating machine*” [6].

Passados alguns anos, em 1986, foi desenvolvida e patenteada a primeira impressora 3D de estereolitografia, do inglês *stereolithography* (SLA), por Charles “Chuck” Hull. Dois anos mais tarde, Scott Crump inventou o processo de impressão designado de *fused deposition modeling* (FDM). Com recurso a esta tecnologia, Scott Crump e sua esposa fundaram uma empresa, *Stratasys*, em 1989. Após esta data, durante um período de cerca de 25 anos, a impressão 3D foi evoluindo de forma discreta, sendo utilizada principalmente por engenheiros e designers [7].

Contudo, em 2004, *Adrian Bowyer* [8] começou o projeto *RepRap*, que tinha como objetivo desenvolver uma impressora 3D *low-cost*, em que a maioria dos seus componentes seriam impressos em 3D, justificando assim o nome do projeto, ***replicating rapid prototyper*** [9].

Anos mais tarde, após ter expirado a patente da tecnologia FDM [10], é criada a *Makerbot* por voluntários da *RepRap*, em 2009. Esta empresa desenvolveu kit’s *open-source* para todos os que quisessem construir a sua própria impressora. Foi também responsável pela criação da biblioteca, *Thingiverse*, de ficheiros 3D que, atualmente, continua a ser uma das mais utilizadas na comunidade 3D.

2.2 Processos de impressão

Como visto anteriormente, ao longo da história foram desenvolvidos diversos processos de impressão. No gráfico da figura 2 estão representados os processos mais utilizados segundo a *Statista*, do quais será analisado o funcionamento dos cinco primeiros.

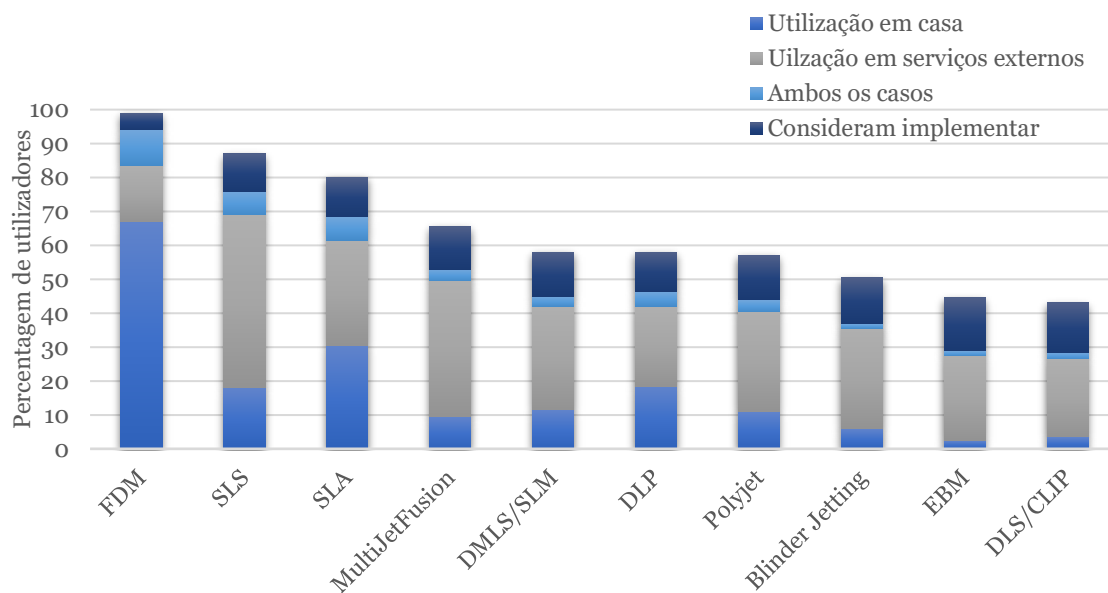


Figura 2 – As tecnologias mais utilizadas, em 2020, segundo a *Statista* [11].

2.2.1 FDM

Esta tecnologia, é de longe a mais utilizada na comunidade 3D, devido ao seu baixo custo pelas causas referidas anteriormente. As impressoras que utilizam este processo recorrem a um termoplástico disposto em bobinas que, por sua vez, é puxado e derretido ao mesmo tempo. Em simultâneo, a impressora deposita o material fundido num percurso predeterminado. Em breves segundos o filamento arrefece e solidifica, tornando-se assim um objeto sólido [12]. Terminado todo o percurso dessa camada, dá-se início à próxima de igual forma.

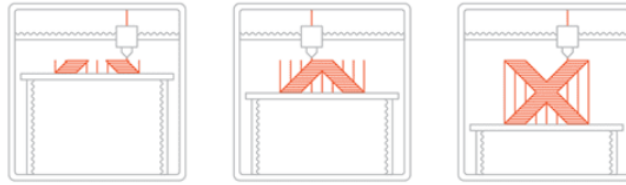


Figura 3 – Processo de impressão FDM [12].

2.2.2 SLA

Este processo tem como características o uso de *laser* ultravioleta e uma cuba de resina fotossensível para a construção de peças. O raio *laser* ao “desenhar” na superfície da resina faz com que ocorra a polimerização no local onde a luz incide. As resinas ao reagirem com o *laser* formam uma parte sólida muito precisa [13].

Na figura 4 são mostradas algumas etapas do processo. A linha laranja simboliza a tina que contém a resina, esta é transparente para ser penetrada pelo *laser*. Por sua vez, este irá ser focado no eixo X e Y, na superfície superior da resina [13]. Este processo é feito de forma bastante precisa, pois, a resina endurece onde é atingida pelo *laser*. Depois de uma camada estar finalizada o suporte (onde a peça está fixa) sobe, para dar origem a próxima camada.

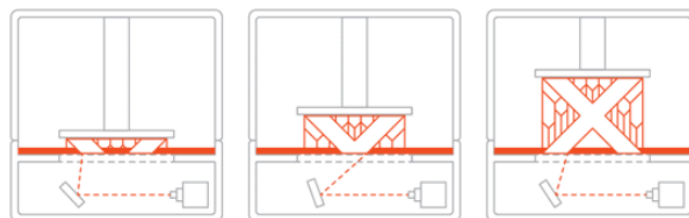


Figura 4 – Processo de impressão SLA [12].

2.2.3 SLS (*Selective Laser Sintering*)

Esta tecnologia, à semelhança da SLA, utiliza também um *laser* para a impressão. Porém, difere no material que é utilizado. Este método utiliza pós, tipicamente cerâmicos ou metálicos, enquanto o SLA utiliza resinas líquidas [12]. Nos pontos onde o *laser* incide, ocorre a sinterização local e a união entre os pós.

Como apresentado na figura 5, o *laser* ao mover-se nos eixos X e Y, desenha na primeira camada de pó. Após essa camada inicial, o eixo Z desce (altura de uma camada) e, de seguida, um rolo transporta mais material ao longo da plataforma de impressão e no seu

retorno faz o nivelamento da camada. Este processo é repetido sucessivamente até à finalização de peça [12].

Este processo apresenta uma grande precisão, mas também uma das suas excelentes características é o facto de não necessitar de suportes, visto que, o material em pó que não é sintetizado desempenha essa função. Material esse que, facilmente, se remove por meio mecânicos ou por ar comprimido.

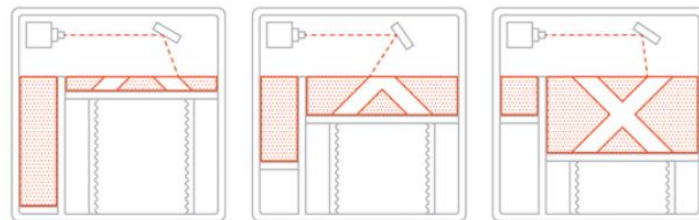


Figura 5 – Processo de impressão SLS [12].

2.2.4 Multi Jet Fusion

Uma das empresas líderes de mercado de impressão a jato de tinta, *HP*, desenvolveu a tecnologia *Multi Jet Fusion*, que permite uma elevada qualidade de impressão, mais rápida e com menor custo em comparação às tecnologias concorrentes [13]. Esta tecnologia permite a impressão com diversos tipos de termoplásticos, tal como o termoplástico poliuretano (TPU) e poliamida (PA) [14].

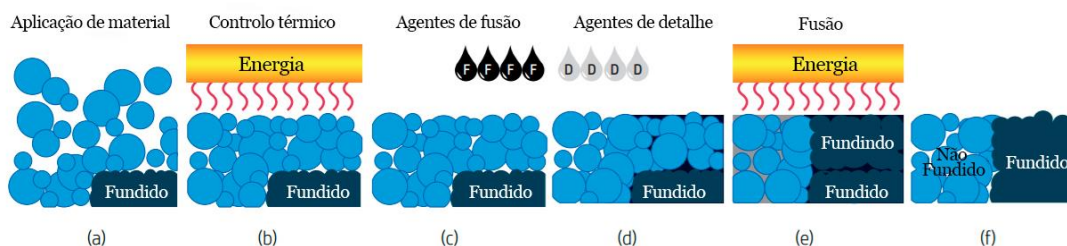


Figura 6 – Etapas da tecnologia *Multi Jet Fusion* (adaptado de [14]).

A construção das peças é feita em camadas de pó, começando a impressão pelo depósito de uma fina camada de material, figura 6 (a). Segue-se um pré-aquecimento da área de impressão, figura 6 (b). Logo de seguida, são aplicados no material agentes de fusão, figura 6 (c), e agentes de detalhe, figura 6 (d), em locais de forma precisa para definir a geometria das peças e as respetivas propriedades [14]. Concluído este passo, são fundidas as áreas impressas, figura 6 (e), ficando assim completa esta camada, figura 6 (f), com uma zona de pó não fundido e outra zona fundida (peça). Caso não seja a última camada, é colocada uma

nova camada de material, repetindo-se os procedimentos anteriormente descritos. Quando concluído todo o processo, é retirada a peça do interior do pó, sendo escovada e soprada para eliminar todo o material não fundido da sua superfície.

É de ressaltar que esta tecnologia também permite a impressão em multicores em determinados modelos de impressoras, recorrendo à aplicação de agentes responsáveis pela coloração.

2.2.5 DMLS/SLM

A sinterização direta de metal a laser, do inglês *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), é uma das poucas tecnologias de impressão 3D que cria diretamente peças em metal. Este processo utiliza um pó metálico fino, com um tamanho de cerca 20 a 40 micrones, com relação direta à qualidade final de acabamento. Concluindo-se que quanto menor o tamanho, maior será a resolução [15].

À semelhança de outros tipos de impressão 3D, o modelo é dividido em diversas camadas com alturas aproximadas do tamanho do pó. O processo de impressão é relativamente simples. Inicialmente, é depositada uma camada de pó. De seguida, a câmara de impressão é aquecida com uma temperatura abaixo do ponto de fusão do pó. Após esse processo, é utilizado um *laser* para aumentar a temperatura de áreas predefinidas, de forma a fundir as mesmas [16]. Após a finalização deste último processo, a plataforma de impressão desce a altura de uma camada e é depositado uma nova camada de material. Após a finalização da peça, é feita a limpeza de forma semelhante à tecnologia anterior.

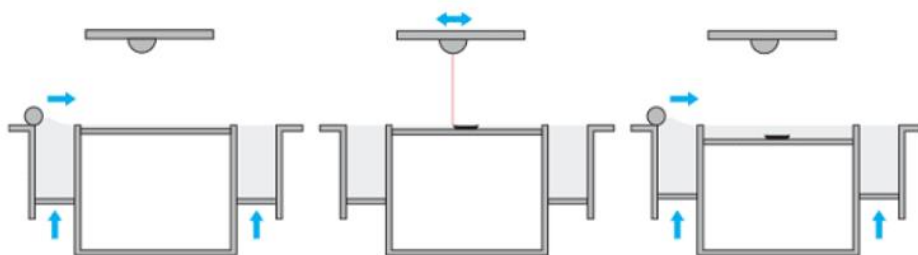


Figura 7 – Processo de impressão DMLS [14].

O DMLS e o *Selective Laser Melting* (SLM) são normalmente associados, pois os seus processos são semelhantes, diferindo apenas num ponto. O SLM aumenta a temperatura do pó até que este fique no estado líquido, enquanto que o DMLS não derrete o material,

utilizando menos energia. Devido a esta característica, o DMLS utiliza normalmente ligas metálicas, ao passo que o SLM funciona melhor em metais puros [15].

2.3 Tipos de impressoras

No mercado, existem, atualmente, vários tipos de impressoras com relação direta ao seu tipo de movimento. Nas impressoras do tipo da cartesiana, tal como representado na figura 8 (a), os movimentos X e Y podem ser feitos de duas formas:

- A cama de impressão realiza os dois movimentos lineares nas direções X e Y, porém apresenta uma área de impressão menor;
- A cama realiza o movimento Y e o *nozzle* realiza o movimento X.

Uma outra variante das impressoras cartesianas é a o modelo *Core XY*. Este modelo apresenta como característica o movimento vertical Z feito pela cama e os restantes movimentos (X e Y) realizados pelo bico extrusor [17].

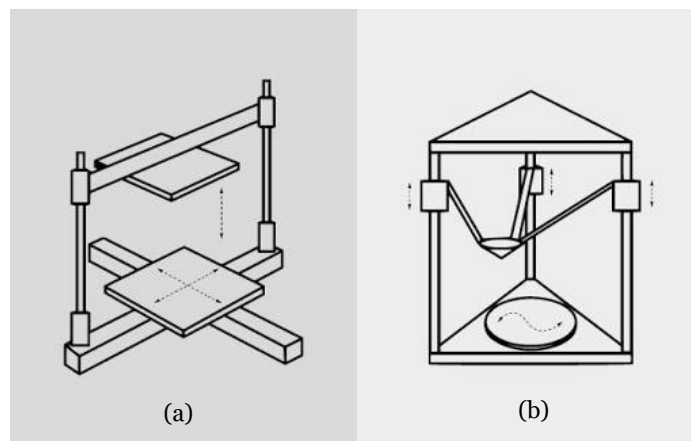


Figura 8 – Tipos de impressoras: (a) cartesiana, (b) delta [18].

Por outro lado, as impressoras do tipo delta, figura 8 (b), são facilmente reconhecidas pelo seu design. Estas são caracterizadas por serem, normalmente, mais altas e mais estreitas que as impressoras cartesianas, apresentando assim uma área de impressão menor. Porém, é possível uma maior altura de trabalho.

2.4 Tipos de extrusoras

A extrusora é um dos componentes mais importantes das impressoras FDM, pois tem como principal função mover o filamento até à zona quente do bico extrusor. Existem dois tipos principais de extrusoras: *bowden* e *direct drive*.

O sistema *bowden* é caracterizado por apresentar uma distância considerável da extrusora (localizada fora da zona de impressão) ao bico extrusor, estando a estes dois ligados um tubo politetrafluoretileno (PTFE) oco, que servirá de guia ao filamento. Esta característica, reduz drasticamente a massa do conjunto da cabeça de impressão, permitindo assim, velocidades de impressão maiores. Contudo, apresenta várias desvantagens, como retrações mais elevadas e uma grande ineficiência na impressão de materiais flexíveis [19].

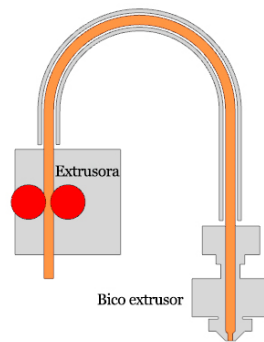


Figura 9 – Extrusora *bowden* (adaptado de [19]).

Por sua vez, o sistema *direct drive*, como o nome indica, tem uma extrusão direta, ou seja, a extrusora está localizada a uma distância muito curta do bico extrusor, tal como se pode observar na figura 10. Neste sistema, devido à curta distância entre os dois componentes, a encurvadura do filamento é mínima, o que permite um melhor controlo do material depositado, possibilitando a impressão de materiais flexíveis e retrações mais baixas em comparação às do sistema *bowden* [19]. Todavia, apresenta algumas desvantagens, como o aumento da inércia da cabeça de impressão e ondulações causadas nas peças impressas devido à massa adicional.

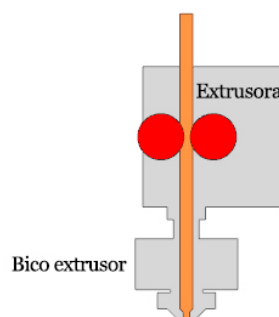


Figura 10 – Extrusora *direct drive* (adaptado de [19]).

Para além destes dois principais sistemas, existe um outro conhecido como *remote extruder*. Tem um funcionamento semelhante ao sistema *direct drive*, porém o motor que

aciona a extrusora fica separado desta, assim como representado na figura 11. Por meio de um veio flexível, conectado nos dois componentes, o motor consegue mover a extrusora colocada no bico extrusor [19].

Este conjunto com estas características, reúne (teoricamente) todas as vantagens dos dois sistemas referidos anteriormente, anulando também as desvantagens de ambos. Contudo, não é um sistema comum nas impressoras 3D devido ao seu alto custo associado.

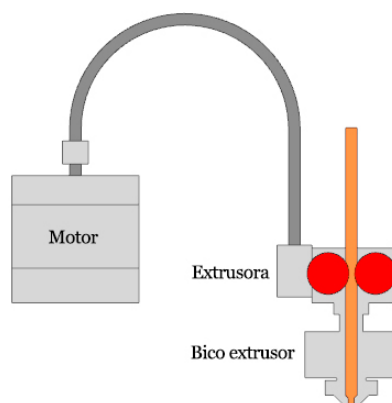


Figura 11 – *Remote extruder* (adaptado de [19]).

2.5 Funcionamento

Inicialmente é desenhado em ambiente virtual ou descarregado o ficheiro pretendido de plataformas *on-line*. De seguida o ficheiro é “fatiado” ou segmentado em camadas, através de programas próprios (por exemplo, o *Cura*). Por outras palavras, o programa transforma o objeto em camadas (de altura ajustável) tal como é impresso, assim como são ajustados todos os parâmetros relevantes para a impressão. Após este processo, é guardado um ficheiro que contem o código G, que normalmente é transferido para um cartão de memória “*Secure Digital*” (SD), em alternativa por via cabo “*Universal Serial Bus*” (USB) ou, ainda, através de tecnologias sem fios.

Após a impressora receber o ficheiro, é iniciado o aquecimento da mesa de impressão (figura 12 – 1) (caso exista), e de seguida, quando esta atingir a temperatura ideal, é iniciado o aquecimento do bico extrusor (figura 12 – 4). O aquecimento destes componentes é feito nesta ordem devido a razões de eficiência energética, isto é, a cama de impressão, normalmente, demora mais tempo até atingir a temperatura de trabalho em comparação com o bico extrusor. Depois de todos os procedimentos anteriores concluídos, a extrusora (figura 12 – 3) entra em funcionamento, encaminhando o filamento (figura 13 – A) do rolo de armazenamento até ao bico extrusor [20].

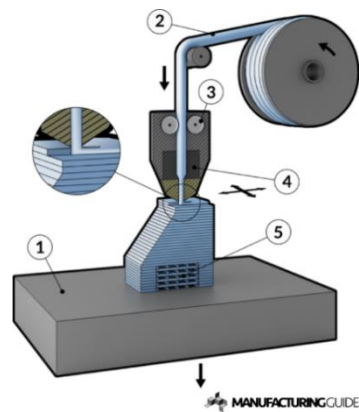


Figura 12 – Detalhe no processo de impressão FDM [20].

Aquando da chegada do filamento à entrada do bico extrusor, através de um tubo PTFE (figura 13 – B) que é encaixado no suporte (figura 13 – C) e que faz a conexão ao dissipador de calor (figura 13 – D). Este apresenta como função principal o impedimento da fusão do filamento antes do bico. Dessa forma, dissipa o calor através de convecção forçada, geralmente, recorrendo a um ventilador (figura 13 – E) ou a um líquido circulante. O calor dissipado é proveniente de um cartucho aquecedor (figura 13 – G) montado num suporte (figura 13 – F), na qual também está aparafusado o bico de impressão metálico (figura 13 – H) que vê a sua temperatura aumentada por transferência de calor por condução. Assim que chega o filamento ao bico é iniciado o processo de purga inicial e de seguida é feita a impressão de acordo com o código G [21].

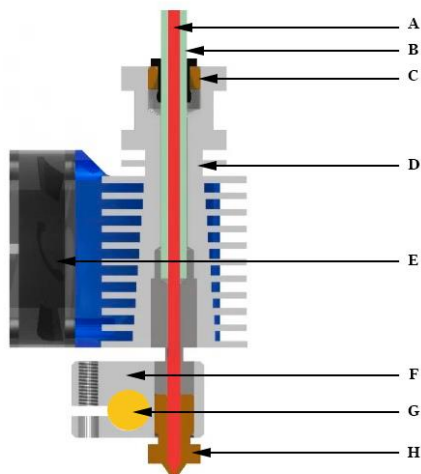


Figura 13 – Bico extrusor de impressora FDM (adaptado de [21]).

2.6 Materiais utilizados

Nas impressoras com a tecnologia FDM são habitualmente utilizados vários tipos de materiais, tais como:

Ácido Polilático (PLA): É um dos materiais usados com maior frequência, também conhecido como ácido polilático, pois é constituído por monómeros de ácido láctico ligados por ligações covalentes, formando assim macro moléculas de elevado peso molecular [22]. O monómero, o ácido láctico, pode ser extraído de fontes renováveis (milho, açúcar, entre outros). Este polímero apresenta várias vantagens, nomeadamente, a sua biodegradabilidade, o seu comportamento mecânico (semelhante a um polímero de fontes fósseis), a sua biocompatibilidade (para aplicações médicas) e por fim, o seu preço [23]. Como principal desvantagem, é higroscópico, o que implica cuidados no armazenamento. Também apresenta alguma deformação a temperaturas não muito elevadas relativamente à temperatura de fusão ser das mais baixas (consultar tabela 1).

Polietileno Tereftalato (PET): o polietileno tereftalato é o plástico mais utilizado em todo o planeta, devido à sua larga aplicação em recipientes alimentares, como por exemplo as garrafas de água. Este polímero não é habitualmente utilizado na impressão 3D, mas sim a variante PETG. O “G” significa que o polímero foi alterado com glicol. Como principais vantagens apresenta flexibilidade, durabilidade, boa resistência mecânica e baixa contração na impressão. Por outro lado, é também higroscópico à semelhança do PLA [24].

Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS): este é considerado o segundo filamento mais utilizado, a seguir ao PLA. Este polímero de origens fósseis, apresenta diversas propriedades interessantes, nomeadamente, alta durabilidade, boa resistência mecânica e alguma flexibilidade. É assim facilmente justificável a sua larga utilização. Porém, durante a impressão, tende a deformar e os gases que liberta durante todo o processo são tóxicos [24].

TPU: É uma variante de elastómeros termoplásticos, do inglês *thermoplastic elastomer* (TPE), muitas vezes também chamado de “flex”, devido às suas características elásticas. Apresenta, assim, como principal vantagem a flexibilidade. Como desvantagem apresenta algumas dificuldades de impressão, normalmente, é recomendado o sistema *direct drive*, pois este reduz ao mínimo a distância da extrusora até ao bico de impressão, evitando assim que o filamento se dobre dentro do tubo. Este material requer uma velocidade de impressão baixa [24].

PA: Este popular polímero sintético, também designado por NYLON, consegue superar os restantes filamentos apresentados em termos de resistência, durabilidade e flexibilidade [24]. Também apresenta outras características, tais como, o fabrico de peças que serão expostas ao sol (resistência térmica) e a possibilidade de tingimento [25]. Por fim, tem como desvantagens ser higroscópico, necessitando, habitualmente, de um ambiente fechado para a impressão e também por apresentar um custo elevado [24].

Álcool Polivinílico (PVA): é um polímero sintético solúvel em água, ao contrário dos outros materiais referidos. Por esta razão, é usado para impressões que necessitem de suportes em sítios que é difícil a remoção por meios mecânicos. Este pode ser combinado com vários materiais, como o PLA, ABS, NYLON [26]. O facto de ser solúvel, é ao mesmo tempo uma vantagem e desvantagem, pois é necessário um armazenamento e manuseamento cuidado, para que não seja danificado pela humidade antes da utilização.

Tabela 1 – Características dos materiais comuns utilizados no FDM.

Material	Temperatura (°C)		Resistência Mecânica	Facilidade em Impressão
	Bico	Cama		
PLA	185-230	0-60	Média	Boa
ABS	230-270	80-100	Boa	Média
TPU	200-250	90-110	Boa	Baixa/Média
NYLON	235-270	90-110	Boa	Média
PVA	190-215	35-60	-	Média/Má
PETG	220-240	50-70	Boa	Média/Boa

2.7 Conceitos existentes

A impressão de objetos através da combinação de diversos materiais, em simultâneo, é um método com grande potencial, comparativamente a outros processos de manufatura [27]. Com vista a utilização comum será descrito todos os conceitos existentes atualmente no mercado.

2.7.1 *Pallette 2*



Figura 14 – Pallette 2: vista interior dos diversos componentes [27].

O *Pallette 2* da empresa *Mosaic* combina 4 filamentos, ao mesmo tempo, num único filamento. Este equipamento, através de um *software Canvas* em que o utilizador escolhe as cores nas diferentes áreas e após o processamento da informação, o dispositivo vai cortando as diversas cores e fundindo num único filamento, de modo a que, quando o bico de impressão chegar a posição de impressão, já esteja com a cor pretendida [27].

Vantagens:

- Poderá ser aplicado nas impressoras comuns;
- Processo simples para o utilizador;

Desvantagens:

- Preço;
- Limitação de cores;
- *Software* fechado.

2.7.2 *Prusa multimaterial 2.0*

Este conceito surge de uma evolução da primeira geração do *Multimaterial Upgrade Version 1* (MMU 1) desenvolvido pelo fabricante de impressoras *Prusa* [28]. Este conceito, através de 3 motores, como é visível na figura 15, aciona vários mecanismos. O motor 1 move uma espécie de árvore de cames, que contém diversos rolamentos posicionados ao longo de

um cilindro. Quando um rolamento entra em contacto com o filamento, faz com que este seja pressionado contra um eixo com estrias, movido de forma constante pelo motor 2. De seguida, o motor 3 é acoplado a um varão roscado, fazendo mover o seletor de filamentos, ao mesmo tempo, que corta o excesso de filamento quando este não sofreu uma retração total. Nesta secção, existe também um sensor *F.I.N.D.A* para detetar a presença de filamento. Por fim, na cabeça extrusora existe um quarto motor (*direct drive*), para conseguir extrudir todo o tipo de materiais.

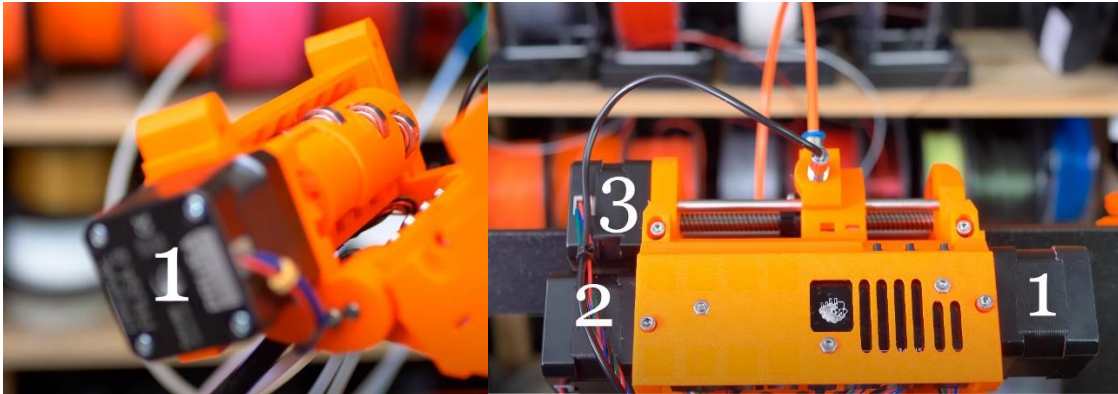


Figura 15 – Sistema de seleção de cor tipo árvore de cames (adaptado de [28]).

Vantagens:

- Peso reduzido da cabeça extrusora;
- Capacidade de imprimir 5 cores ou materiais compatíveis;
- Quando acoplados vários filamentos da mesma cor não se corre o risco de a impressão ficar a meio.

Desvantagens:

- Preço;
- Alteração de *software* e *hardware*;
- Limite de 5 filamentos em simultâneo.

2.7.3 *Diamond Hotend*

O *Diamond Hotend* desenvolvido pela *RepRap*, está disponível em 2 opções, sendo constituído por 3 entradas, tal como representado na figura 16. Por outro lado, o *Diamond Hotend Fullcolor* apresenta 5 entradas. Tomando como referência a primeira opção, consiste num bico extrusor com 3 entradas, em que cada uma é alimentada por uma cor primária (magenta, azul e amarelo). Estas, ao serem misturadas, permitem obter uma

grande variedade de cores, como observado na figura 17. A percentagem de cada cor é controlada por uma extrusora individual. No caso do *Diamond Fullcolor*, para além das cores primárias, também é alimentado por um filamento branco e preto, o que permite obter todas as cores possíveis [29].

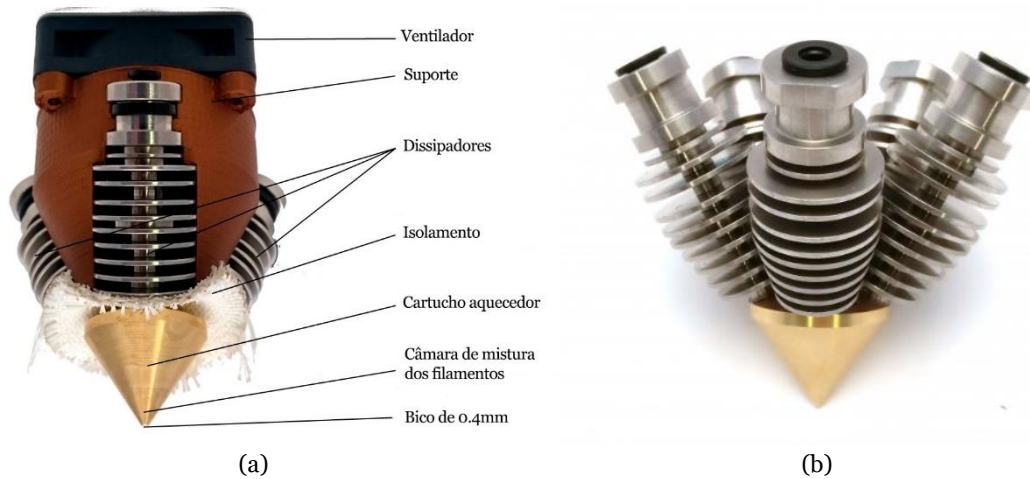


Figura 16 – (a) *Diamond Hotend* com 3 entradas; (b) *Diamond Fullcolor* com 5 entradas (adaptado de [29]; [30]).

Este conceito tem características de funcionamento semelhantes a uma cabeça extrusora convencional com algumas diferenças. Tem 3 ou 5 dissipadores, que através de um ventilador, garantem que o filamento não é derretido antes do *nozzle*. Como só no *nozzle* é feita a mistura dos filamentos, não é necessário fazer uma purga muito demorada, pois a zona de mistura é relativamente curta. Esta cabeça extrusora é fixada de forma semelhante a um *nozzle* comum, permitindo desta forma uma fácil calibração, apenas sendo necessário afinar a cama, apresentando uma maior precisão comparativamente aos sistemas de múltiplas bicos de impressão.

Uma das suas desvantagens é a sua geometria associada, que confere uma elevada massa, apresentando um impacto negativo na velocidade de impressão. Quando apresenta 3 entradas, uma das desvantagens é a ausência do branco e do preto puro (quando utilizadas as cores primárias). Para além destas desvantagens, também é necessário alterar o *software* e o *hardware* de todo o conjunto.

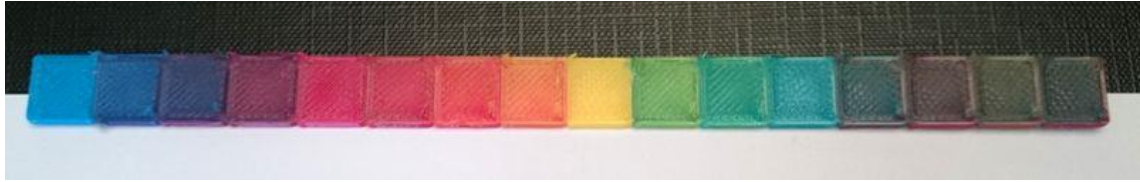


Figura 17 – Amostra de cores obtidas com o *Diamond Hotend* [30].

2.7.4 *Quadfusion Print Head*

A empresa *M3D* desenvolveu uma cabeça de impressão destinada aos entusiastas de impressão 3D, com a finalidade de impressão de multimateriais e multicores, recorrendo ao sistema de cores *Cyan Magenta Yellow Black* (CMYK). Desta forma, é possível imprimir até 50 000 cores [31]. Este dispositivo conta com quatro motores incorporados na cabeça de impressão, permitindo assim imprimir todo o tipo de materiais, para uma melhor compreensão segue a figura 18. De momento, está disponível apenas para alguns modelos de impressoras comuns. À semelhança dos outros conceitos, é necessário também alterar grande parte do *hardware*.

A marca promete uma redução natural da quantidade de rolos necessários para imprimir todas as cores, mas há que ter em consideração o alto preço dos filamentos calibrados recomendados pela mesma.

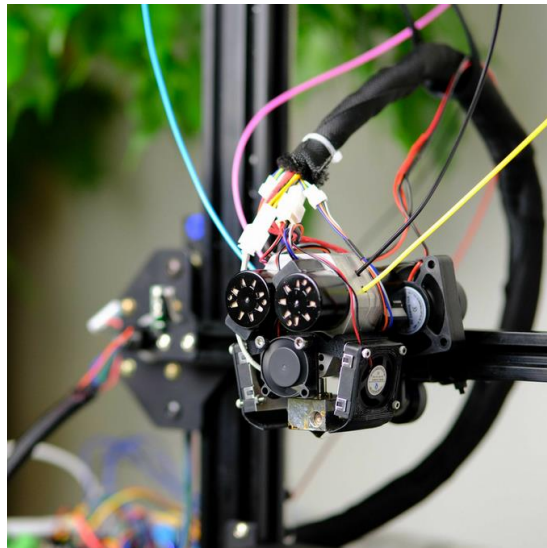


Figura 18 – Cabeça de impressão *Quadfusion* [31].

2.7.5 Múltiplos bicos de impressão

São também encontradas no mercado algumas soluções para impressão, com vários bicos extrusores. Neste sistema de impressão, o tipo *dual extruder*, isto é, 2 extrusoras em paralelo, é um dos mais utilizados. Este permite a impressão de dois filamentos individualmente. Por não misturar materiais, apresenta vantagens em relação à pureza dos mesmos e a dispensa de torres de purga. Todavia, reduz a área de impressão consideravelmente, assim como, a difícil calibração dos bicos extrusores.

Apesar das desvantagens apresentadas, costuma ser utilizado para a impressão de materiais que necessitem de um material de suporte diferente, tal como o PVA. Apesar de o mais comum ser de dois bicos combinados, é possível encontrar no mercado outras tipologias de três ou mais bicos.

2.8 Impressão 3D na atualidade

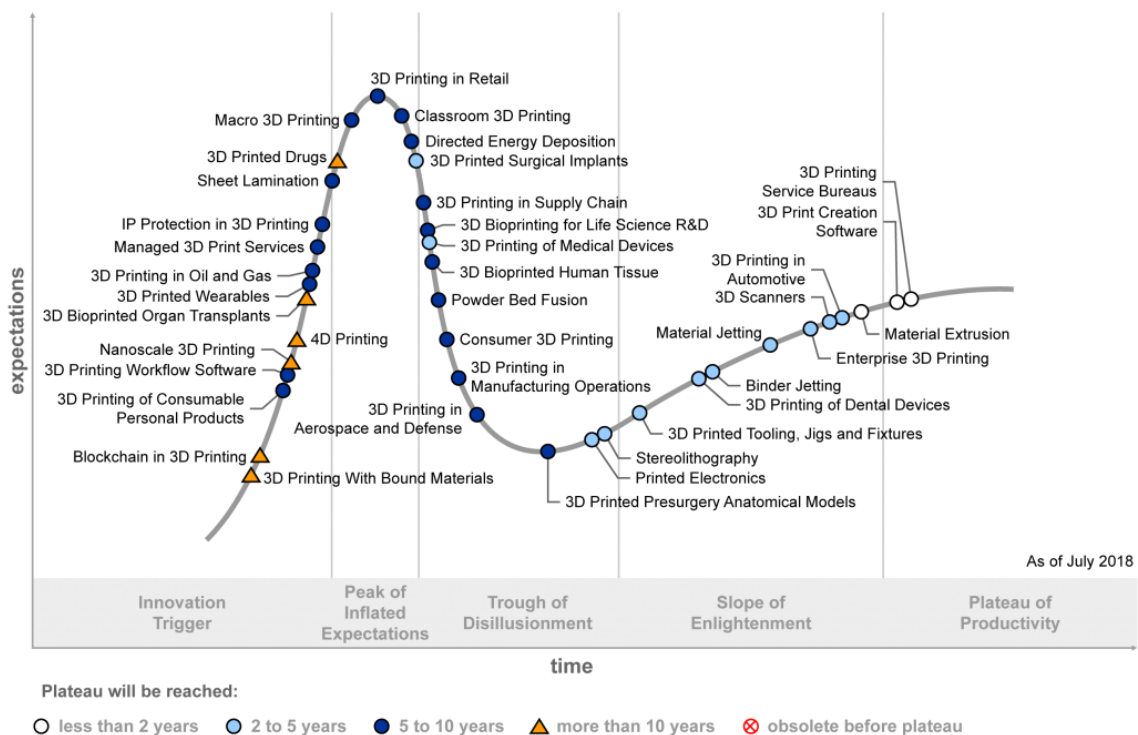


Figura 19 – *Hype cycle* de 2019 [32]

O gráfico apresentado é conhecido como *Hype cycle*, desenvolvido pela empresa americana *Gartner*. Este gráfico mostra a maturidade e adoção de tecnologias e aplicações, tal como,

a sua relevância para resolver problemas reais e explorar novas oportunidades. Desta forma, este método prevê como uma tecnologia ou aplicação irá evoluir ao longo do tempo [33].

Na pesquisa de revisão da literatura, só foi possível encontrar o *Hype cycle* de 2019. No entanto, consegue-se extrapolar os dados de 2019 para 2020, visto que, nesta transição não houve motivos aparentes que acelerasse o crescimento. Algo que, daqui em diante, não será possível de se realizar.

Após análise do gráfico, é perceptível observar pontos que, hoje, já são uma realidade e outros que muito em breve (tal como indicado nas estimativas) também serão. Analisando alguns pontos deste gráfico, é notório que alguns deles, apesar de não estarem em aplicação pelo grosso da indústria, é perceptível que muito em breve serão implementados pela maioria das indústrias. Um exemplo disso, no topo do gráfico o ponto “*3D Printing in Retail*” com um período de implementação de 5 a 10 anos, é contrariado pelo desenvolvimento de sapatilhas das marcas *Reebok* e *Adidas* disponíveis para o consumidor final no ano de 2018 [34]. Com ofertas destas no mercado é perceptível que a indústria do retalho aumente a transição para a impressão 3D com o reconhecimento dos produtos e das vantagens de todo o processo, tais como, a inexistência de moldes, a utilização de materiais mais eficientes, a produção de pequenas e médias séries, entre outras.

Outro dos pontos com o mesmo período de implementação é “*Classroom 3D Printing*”. Este ponto é um dos mais importantes, pois é necessário garantir que as crianças/jovens adquiram as capacidades e conhecimentos para trabalharem e continuarem a desenvolver esta tecnologia. De acordo com um relatório publicado pelo Fórum Económico Mundial, em 2016, cerca de 65% das crianças que ingressem no ensino primário irão trabalhar em empregos que ainda não existem na atualidade [35].

Por fim, feita análise do ponto “*3D Printing in Automotive*” conclui-se que está dentro do período esperado. É possível justificar o mesmo sem sair do nosso país. Por exemplo, a *Volkswagen* Autoeuropa desde há alguns anos que tem vindo a implementar a impressão 3D no desenvolvimento das suas ferramentas, tendo reduzido os custos de produção das mesmas em 90% [36]. Já fora das nossas fronteiras, várias marcas têm vindo a implementar esta tecnologia na sua produção. A marca BMW foi das pioneiras a incluir tal tecnologia nas suas linhas de montagem, atingindo a meta de 1 milhão de peças impressas, em 2018 [37]. Recentemente, inaugurou um campus em Munique para “industrializar a impressão 3D” [38]. É assim notório o investimento e crescimento deste mercado que certamente se irá

expandir no setor automóvel. A figura 20 faz uma alusão aos exemplos anteriormente descritos.



(a)



(b)

Figura 20 – (a) Sapatilha impressa em 3D; (b) Peça número 1 000 000 para o BMW i8 Roadster [34]; [37].

Todos estes pontos referidos anteriormente e os demais que constituem o gráfico, são esperados que tenham os prazos de implementação encurtados devido à larga utilização da impressão 3D nos últimos tempos e pela necessidade de redução de custos das empresas para garantirem a sustentabilidade, fruto da pandemia vivida atualmente.

Capítulo 3

Otimização da impressora 3D

Numa primeira fase é feita a análise da impressora a otimizar. De seguida, é feita uma discussão de todos os componentes a aplicar, na qual são projetadas todas as peças em desenho assistido por computador, do inglês *computer aided design* (CAD) necessárias à sua otimização.

3.1 Análise da impressora 3D

A impressora utilizada nesta dissertação é de uso pessoal da marca *Creality* modelo *CR10-S*, tal como se pode observar na figura 21. Esta impressora resulta de uma melhoria da geração anterior (*CR10*), apresentando vantagens em relação a outros modelos da mesma marca.

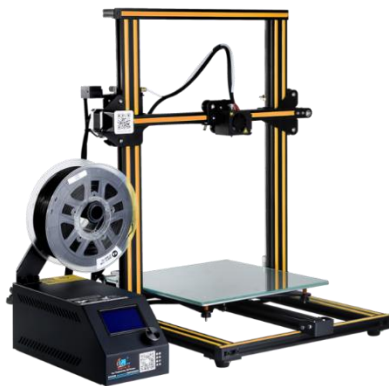


Figura 21 – Impressora utilizada na presente dissertação [39].

As principais características da impressora são:

- Possibilidade de retomar a impressão após a uma falha de energia;
- Duplo eixo Z (dois varões roscados, em lados opostos);
- Cama aquecida;
- Detetor de filamento;
- Velocidade de impressão até 150 mm/s;
- Área de impressão de largas dimensões (300×300×400 mm);

- Placa mãe melhorada (*Creality V2.1*).

3.2 Escolha dos componentes

Com vista ao objetivo desta dissertação foi necessário escolher diversos componentes para substituir pelos atuais, nomeadamente, a placa de controlo e cabeça extrusora.

3.2.1 Cabeça extrusora

Dos diversos conceitos existentes, já referenciados no capítulo 2, foi feita uma matriz de decisão, tal como se pode verificar na tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de decisão da cabeça extrusora.

Critério de Seleção	Peso	Conceitos			
		<i>Diamond Hotend</i>	<i>Prusa MMU 2</i>	<i>Pallete 2</i>	<i>Quadfusion</i>
Custo	4	4	2	1	1
Número de cores	3	4	2	2	4
Multimateriais	2	2	4	4	1
Preços dos filamentos	1	4	4	4	1
Total		36	26	22	19
Escolhido		×			

O *Diamond Hotend*, apesar de ter mostrado um valor baixo no critério de multimateriais, foi o que demonstrou ser mais viável em todos os outros critérios, dessa forma foi o escolhido. É de interesse a impressão de uma grande variedade de materiais, na qual se considerou um sistema *direct drive* para contornar a limitação de impressão de materiais flexíveis, que será visto mais à frente no subcapítulo 3.3.3.

3.2.2 Placa de controlo

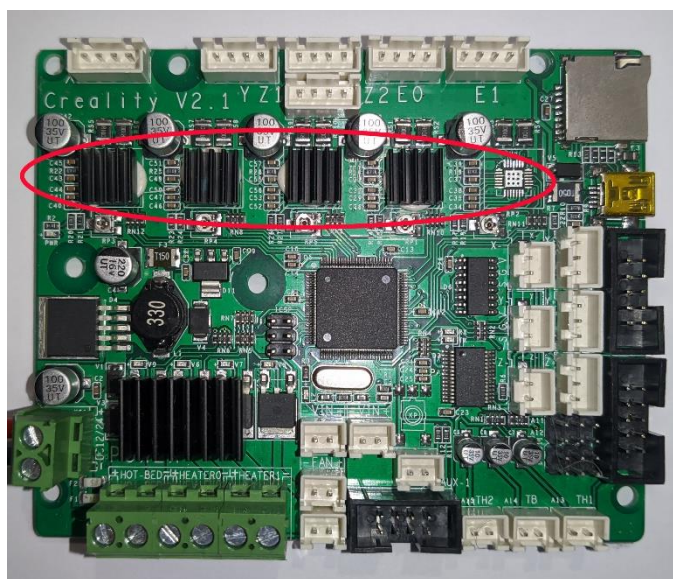


Figura 22 – Placa de controlo original.

Quanto à placa de controlo incorporada nesta impressora, esta não detém problemas de aquecimento, à semelhança das versões anteriores. Por outro lado, permite a ligação de duas extrusoras (estando em falta o dissipador do *driver* referente a E1) e apresenta *drivers* soldados, como se pode verificar na figura 22. Este pormenor é um grande inconveniente, pois como registado através de uma aplicação para telemóvel “iNVH” da Bosch, é possível observar no gráfico da figura 23, que os níveis de ruído durante uma impressão são cerca de 68 a 70 dB(A). Como referido anteriormente, esta placa apenas suporta a ligação de duas extrusoras. Apesar de ser possível expandir para 3, irá ponderar-se a escolha de uma nova placa, principalmente pelo aspeto do ruído.

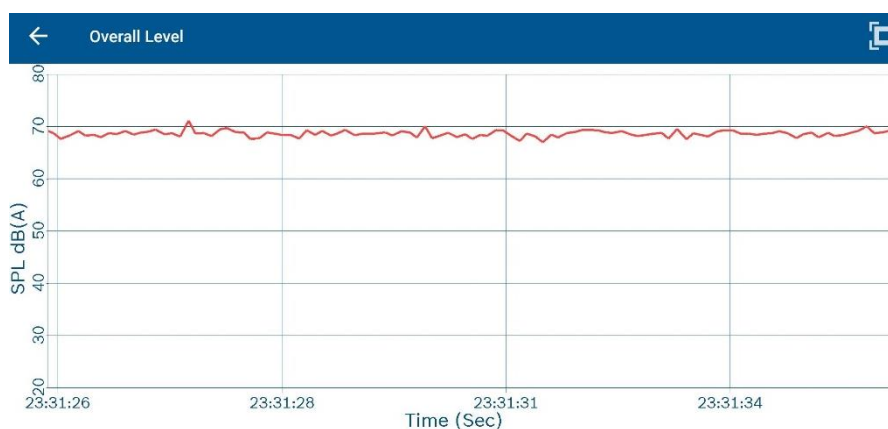


Figura 23 – Gráfico do ruído emitido durante uma impressão de teste.

A placa de controlo é um componente, o qual merece atenção na sua escolha. Este contém o componente eletrónico fundamental por fazer todas as operações, o microcontrolador. Este componente, faz constantemente os cálculos de conversão de posição dos eixos. Cálculos que são feitos por métodos numéricos, na qual a velocidade e resolução do microcontrolador influenciam diretamente o funcionamento de todo o sistema [40]. Normalmente são utilizados microcontroladores de 8 bit baseados em *arduino*, tal como, o caso das placas *Rumba* e *Fysetc F6 v1.3*. Com o decorrer do tempo, foram aumentando as ofertas de 32 bits, como é o caso da *SKR PRO V1.1*, tornando-se mais acessíveis e, naturalmente, mais comuns no controlo de impressoras 3D.

Na tabela 3, pode-se comparar as principais características dos três modelos de placas de controlo escolhidos. Teve-se em conta que estas fossem compatíveis com todo o *hardware* já existente. É exemplo disso, a possibilidade de ligar os dois motores do eixo Z, sem a necessidade de adquirir outros componentes adicionais que permitissem essa funcionalidade.

Tabela 3 – Comparação de características das placas de controlo selecionadas.

Modelo	Nº de drivers	Tipo de driver	Microcontrolador	Z duplo	Cartão SD	Firmware	Bits	Preço (€)
SKR PRO V1.1	6	Externo	STM32F407ZGT6	Sim	Sim	<i>Marlin</i>	32	43,27
Rumba	6	Externo	ATmega2560	Sim	Não	<i>Open-source</i>	8	78,41
Fysetc F6 v1.3	6	Externo	ATmega2560	Sim	Não	<i>Open-source</i>	8	34,49

De forma a decidir uma das placas apresentadas, foi feita uma matriz de decisão com os principais critérios de seleção, tal como se pode observar na tabela 4.

Tabela 4 – Matriz de decisão da placa de controlo.

Critério de Seleção	Peso	Conceitos		
		<i>SKR PRO V1.1</i>	<i>Rumba</i>	<i>Fysetc F6 v1.3</i>
Custo	4	3	2	4
Drivers Removíveis	3	4	4	4
Resolução	2	4	2	2
Cartão SD	1	4	1	1
Total		36	25	33
Escolhido		×		

Na matriz de decisão foram considerados os custos das placas, a possibilidade de remoção dos microcontroladores dos motores, possibilitando *upgrades* ou a substituição dos danificados. A resolução do microcontrolador da placa também foi ponderada, pois, como referido anteriormente, tem influência no funcionamento da mesma. Finalmente, considerou-se a presença de um leitor de cartões SD, pois é utilizado, frequentemente, para carregar os códigos G sem a necessidade de ter o computador ligado durante toda a impressão. Tendo em conta todos estes critérios, foi escolhida a placa *SKR PRO V1.1*, como se pode ver na figura 24.

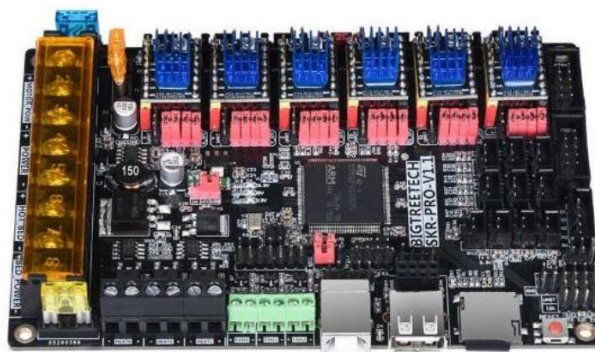


Figura 24 – Placa de controlo selecionada, *SKR PRO V1.1* [41].

3.2.3 Microcontroladores dos motores

As impressoras 3D estão equipadas com motores de passo, que da sua natureza, são mais complexos que os motores elétricos convencionais. Os motores convencionais funcionam apenas com dois estados (ligado e desligado) e apenas se consegue controlar as rotações do mesmo, não havendo informação de quanto graus ele rodou [42]. Desta forma, o motor de passo, garante que os eixos da impressora são movidos de forma precisa.

Os motores utilizados na impressora, são do tipo híbridos, compostos por um estator e um rotor dentados, tal como representado na figura 25. Os rotores dispõem de dentes que são atraídos pelos enrolamentos do estator e a cada movimento é chamado de passo. Nos motores utilizados nesta dissertação, devido à sua geometria, cada passo tem um ângulo de 1.8° , o que permite 200 passos por revolução. Assim, com a combinação de algumas engrenagens, consegue-se precisões abaixo do milímetro nos movimentos lineares nos eixos da impressora [42].

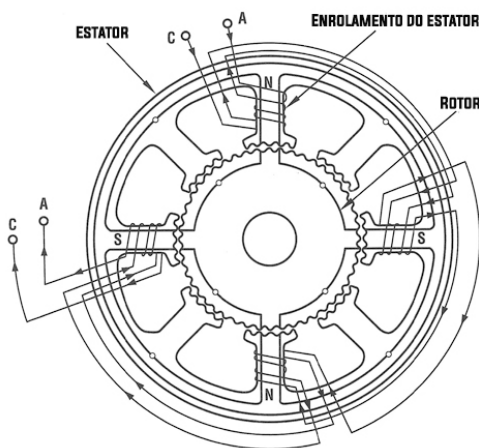


Figura 25 – Motor de passo híbrido com um ângulo de passo de 1.8° (adaptado de [43]).

Visto que estes motores são mais complexos que os convencionais, é necessário controlar o ângulo de rotação do motor, através da corrente fornecida. Uma impressora é composta por vários motores e outros acessórios para controlar na mesma faixa temporal. Contudo, o microcontrolador da placa controladora é limitado e não tem capacidade para fazer toda essa gestão. Por essa razão utilizam-se microcontroladores independentes (ou *drivers*) para cada motor [42].

Estes microcontroladores trabalham com algoritmos que permitem *microstepping*, em que o objetivo é acionar os motores de forma suave, na qual o ângulo varia linearmente e sem degraus. Para tal, a corrente fornecida às bobinas dos estatores não é máxima nem zero, mas sim com correntes intermédias desses dois extremos, aproximando-se assim de uma onda sinusoidal. A resolução máxima de *microstep* é sempre definida pelo microcontrolador. Um motor de passo de 1.8° com um *microstep* de 256 (2^8) vezes consegue 51 200 *microsteps* por uma revolução do motor, o que se traduz em 0.007° por passo [44]. Ao aumentar a divisão de cada passo, a transição de passo é cada vez menor, o que permite diminuir a ondulação na posição como verificado na figura 26. Dessa forma a precisão é

aumentada ao mesmo tempo que se reduz a vibração e, conseqüentemente, o ruído emitido pelos motores.

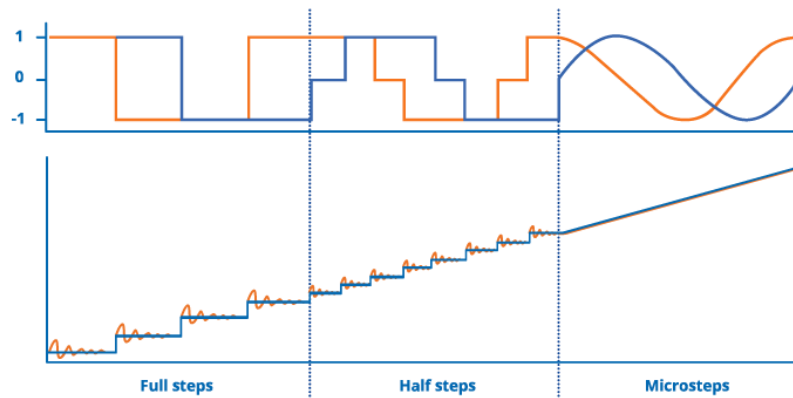


Figura 26 – Comparação de onda de corrente e da ondulação de posição entre *full steps*, *half steps* e *microsteps* [44].

Para este trabalho foi escolhido um microcontrolador TMC 2208, como representado na figura 27, com características de redução de ruído (até 10dB), com interpolação de 256 *microsteps*, com uma corrente RMS de 1.2 A e uma tensão suportada pelo motor de 4.75 a 36 V.

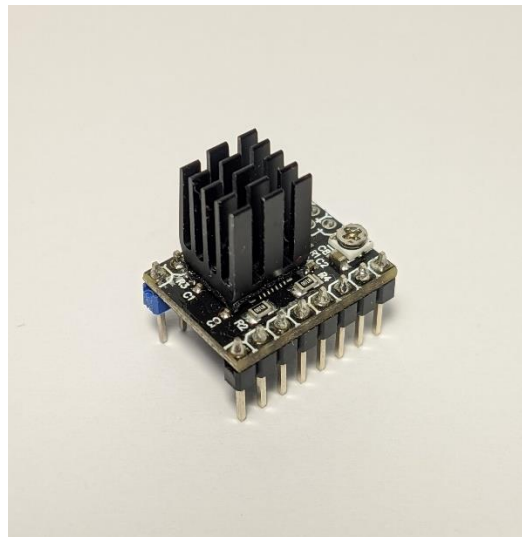


Figura 27 – Microcontrolador TMC 2208.

3.2.4 Extrusoras

A impressora inicialmente estava equipada com uma extrusora *bowden*, eficiente em filamentos rígidos, porém, ineficiente com filamentos flexíveis. Dessa forma, após a escolha do bico extrusor (*Diamond Hotend*) e de modo a atingir um dos objetivos iniciais,

(impressão multimateriais), foi necessário incorporar um sistema *direct drive*, para possibilitar a impressão de materiais flexíveis. Assim, foi adquirida uma extrusora para essa finalidade e outra de características semelhantes à existente, observável na figura 28. Como não existe uma grande variedade de extrusoras com essa finalidade, foi adquirida a versão mais económica com redução 3:1 da velocidade.



Figura 28 – Extrusoras com caixa redutora à esquerda; extrusora *bowden* à direita.

3.2.5 Motores

Como referido anteriormente, foram adquiridos dois motores de passo, um de características semelhantes ao existente (*Creality 3D 42-40*) e outro de diferentes dimensões para o sistema *direct drive*. Para a escolha deste último, teve-se em consideração o binário necessário para ocorrer extrusão sem estrangimentos. Porém, não foi possível encontrar informação que sustente algum valor. Assim sendo, optou-se por escolher um motor, de forma que em conjunto com a extrusora, o binário resultante seja semelhante ao da extrusora original. Como a extrusora tem uma relação de 3:1 e o motor um binário 14 N.cm e sabendo que a caixa redutora diminui a velocidade e aumenta o binário, obtemos um binário final de 42 N.cm, aproximado ao da extrusora original, 40 N.cm, tal como representado na figura 29.



Figura 29 – Motores de passo adquiridos: *Nema 17 42 – 23 mm* à esquerda; *Nema 17 42 – 40 mm* à direita

3.2.6 Acessórios de arrefecimento

Foi adquirido um ventilador radial de 50 mm com o propósito de arrefecer o filamento logo após ser impresso. Assim, com um ventilador axial de 50 mm com uma altura de 10 mm para aumentar o fluxo de ar nos dissipadores de calor do bico extrusor, de forma a que se mantenha a temperatura baixa nessa zona, evita-se a fusão de filamento nessa zona. Estes dois componentes são ambos fixados no suporte do bico extrusor, o ventilador radial é instalado na lateral e o ventilador axial entre o suporte do *Diamond* e o suporte da extrusora *direct drive*, como representado na figura 30.



Figura 30 – Ventilador para arrefecimento das peças à esquerda; ventilador para refrigeração do bico extrusor à direita.

3.3 Projeto e dimensionamento

Foi necessário projetar e dimensionar algumas peças para albergarem os novos componentes, nomeadamente, a caixa onde se encontra uma grande parte do *hardware*, visto que, a placa de controlo anterior tinha menores dimensões e suportes diferentes. Além disso, é pretendido adicionar mais alguns componentes no futuro, assim como melhorar o acesso à placa de controlo.

3.3.1 Caixa

Foi projetado uma nova caixa para albergar novos componentes e parte dos atuais. Optou-se por desenhar duas peças, como constatado na figura 31, separando assim a fonte de alimentação dos restantes componentes, de forma a melhorar acessibilidade a todos os componentes e a ventilação de todo o conjunto. Em ambas as peças existem furos, de forma a permitir o fluxo de ar. A fixação das duas partes uma à outra, é feita com 4 parafusos M3 e 4 porcas M3 e 4 anilhas. Para fixar os componentes à caixa, desenharam-se orifícios com diâmetros ligeiramente inferiores aos dos parafusos, de forma a que o parafuso crie a sua própria rosca. Para uma melhor compreensão, segue em Anexo F os desenhos técnicos.

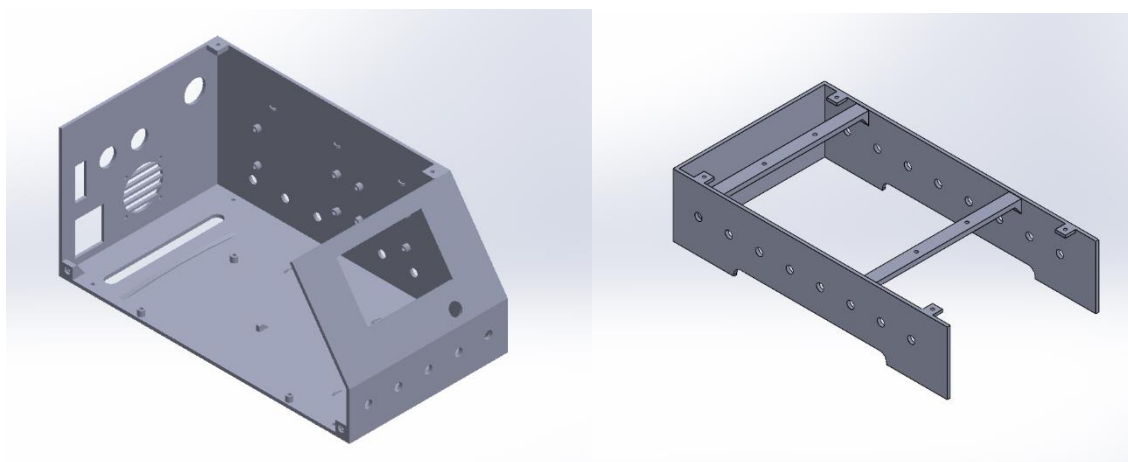


Figura 31 – Parte superior da caixa à esquerda; parte inferior da caixa à direita.

3.3.2 Suporte do motor para extrusora *bowden*

Tal como observado anteriormente, a impressora apenas tinha uma extrusora. Assim, foi necessário desenhar um suporte para o motor da extrusora, ver figura 32, para ser fixado na outra coluna do eixo Z. Este apoio foi projetado de forma a ser fixado em 3 pontos, em dois pontos do lado esquerdo por meio de parafusos, e por um suporte no lado direito, que irá encaixar na chapa do eixo Z.

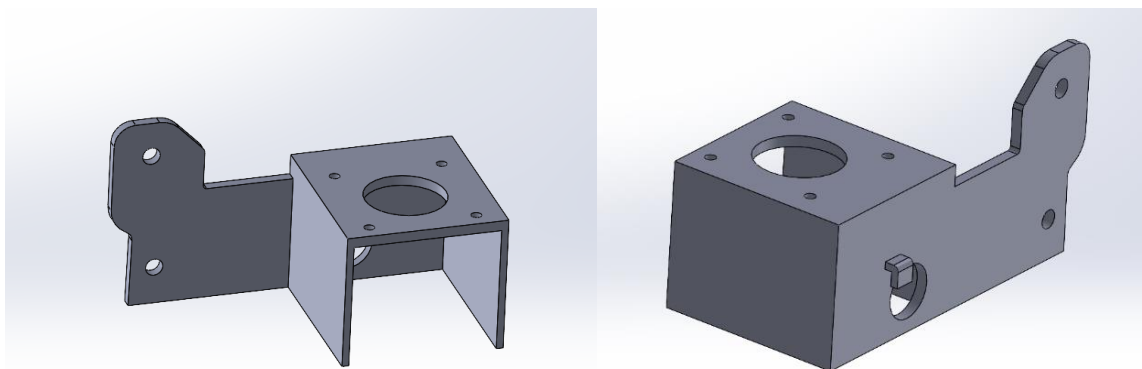


Figura 32 – Suporte da extrusora *bowden*.

3.3.3 Suporte da extrusora *direct drive*

Com vista à impressão de filamento flexível, foi necessário adaptar o sistema *direct drive* ao bico extrusor. Assim, foi desenvolvido um suporte para o motor de passo e para a extrusora. Este suporte tem uma inclinação de 62° de forma a que o filamento não sofra qualquer constrangimento no curto percurso da extrusora, até ao interior do bico extrusor. Este conjunto é fixo na parte superior do suporte do *Diamond* como se pode ver na figura 33.

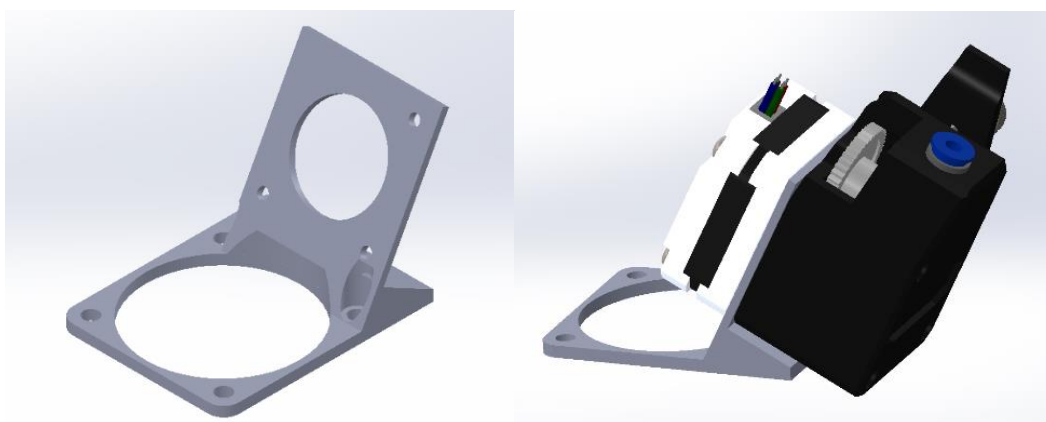


Figura 33 – À esquerda o suporte da extrusora *direct drive*; à direita o conjunto assembledo.

3.3.4 Bocal para ventilador

Foi desenhado um adaptador para ligar o ventilador a um canal que irá permitir a refrigeração dos *drivers*. Este adaptador foi projetado de forma que seja fixo à estrutura da caixa, juntamente, com o ventilador recorrendo a 4 parafusos M3×30 mm enroscados no próprio corpo. A ligação do bocal ao canal é feita por encaixe à pressão, tal como se pode verificar na figura 34.

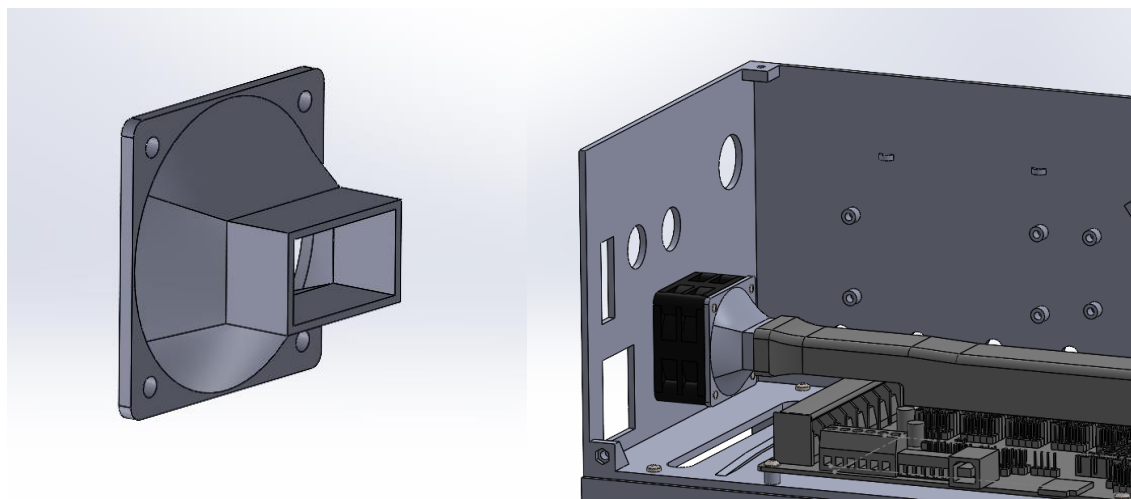


Figura 34 – Bocal para ventilador à esquerda; bocal assembledo à direita.

3.3.5 Apoio para porta rolos

Inicialmente, a impressora estava equipada com um porta rolos metálico, o qual estava acoplado na parte superior da caixa que albergava maior parte do *hardware*. Visto que, eram necessários três suportes para os rolos de filamento, foram impressos dois suportes em PLA como indicados na tabela 5, os quais foram inseridos no perfil de alumínio no topo da impressora. Como não existia espaço suficiente para um terceiro suporte igual (com uma rotação de 90°) decidiu-se adaptar o suporte original ao perfil de alumínio, referido anteriormente. Assim, foi desenhada uma peça que desempenha a função de apoio ao porta rolos.

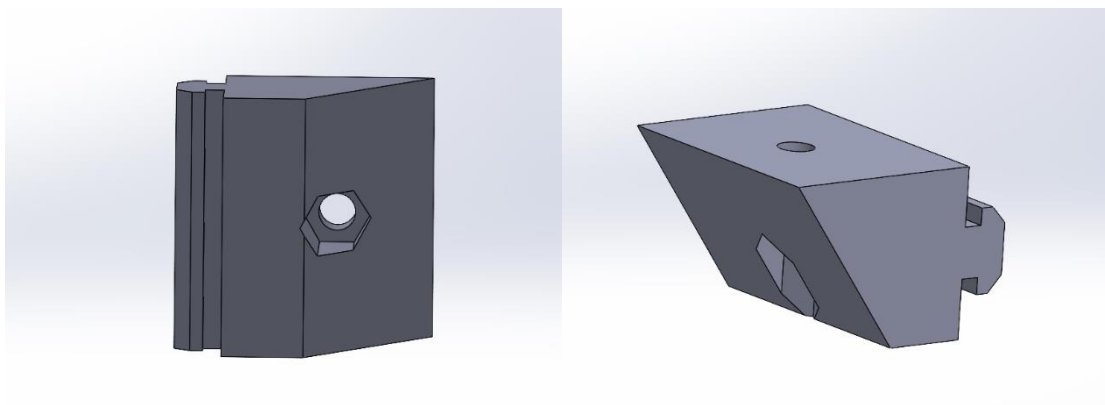


Figura 35 – Apoio para porta rolos.

Foi desenhada com uma ranhura para encaixar precisamente no perfil *V-Slot 2020*, ver figura 36, dando-lhe liberdade de movimento. Foi desenhada também uma saliência para uma porca M4 com a respetiva furação para se fixar o suporte.

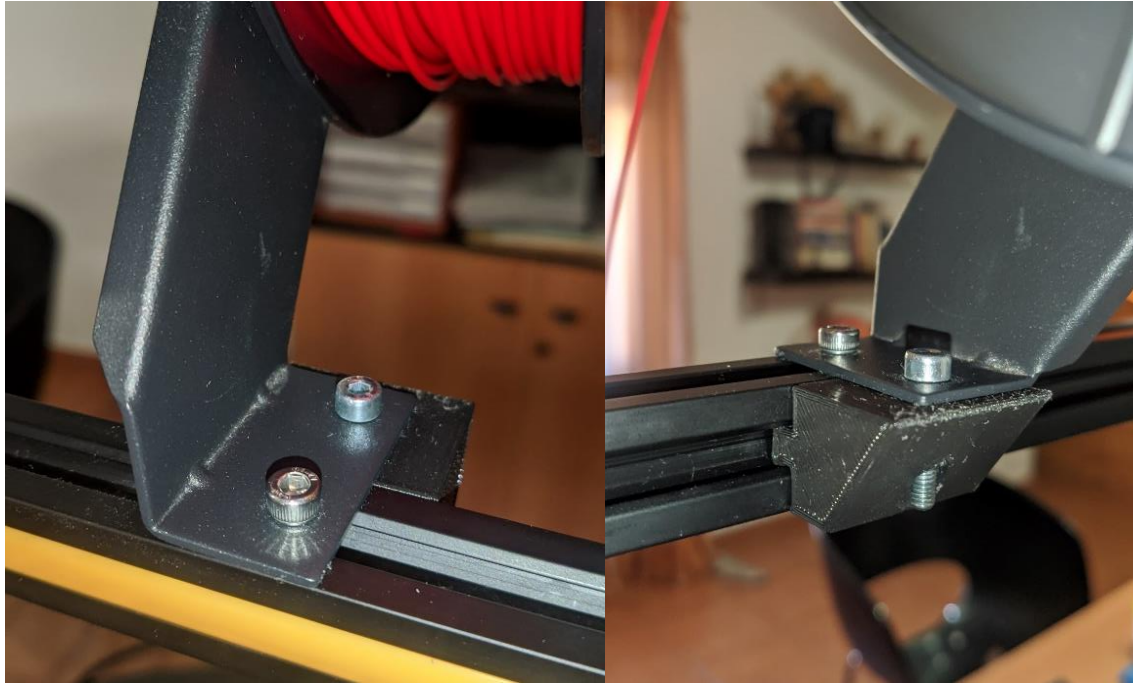
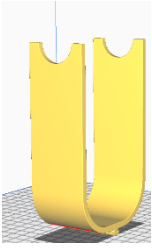
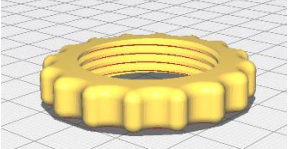
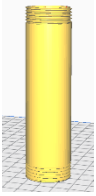
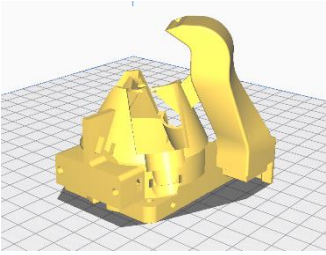
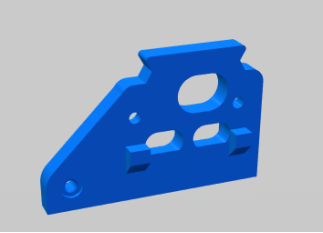
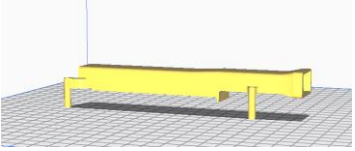


Figura 36 – Fixação do porta rolos original com apoio projetado.

3.3.6 Componentes

Os restantes componentes, não descritos anteriormente, não foram projetados, visto que, já existiam projetados em plataformas *on-line*. Dessa forma, foram selecionados os que correspondiam às necessidades e foram impressos diretamente em PLA, como comprovado na tabela 5.

Tabela 5 – Restantes componentes impressos.

Imagem do componente	Componente	Quantidade	Referência
	Suporte superior para rolo de filamento	2	[45]
	Porca para eixo do suporte	4	
	Eixo do suporte do rolo	2	
	Suporte para <i>Diamond Hotend</i>	1	[46]
	Adaptador para fixação do suporte do <i>Diamond</i>	1	[47]
	Canal de ventilação dos <i>drivers</i>	1	[48]

Capítulo 4

Projeto de detalhe e montagem

Neste capítulo são apresentadas as simulações, os cálculos de verificação, a montagem final, a alteração necessária ao *firmware*, o projeto final do esquema elétrico, as calibrações, bem como, a resolução de problemas.

4.1 Simulações de componentes desenhados

Das peças desenhadas, foram feitas simulações estruturais em *SolidWorks* das peças consideradas críticas, de forma a fazer a análise de tensões e deformações das mesmas quando estivessem submetidas às forças máximas previstas para o funcionamento.

4.1.1 Suporte da caixa

Tendo em consideração o *design* da parte inferior da caixa, onde será fixa a fonte de alimentação com uma massa considerável de 0,684 kg, foi feita uma simulação em *SolidWorks*, tal como se pode verificar na figura 37.

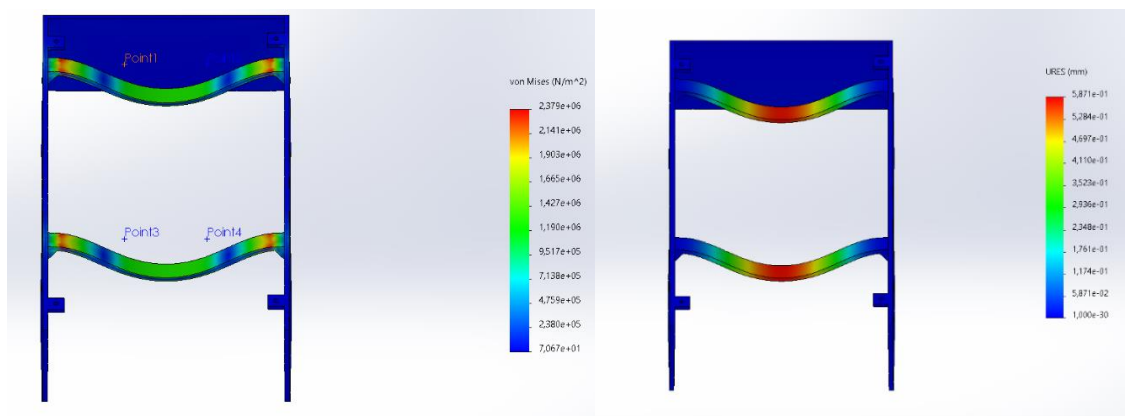


Figura 37 – Tensão equivalente de *Von Mises* à esquerda; deslocamento à direita.

Analisando a simulação obtida, é notório uma flexão nas barras que sustentam a fonte de alimentação. De forma a minimizar esse deslocamento, de cerca de 0,59 mm, foi aumentado a espessura da barra em 1,5 mm (3 – 4,5 mm), reduzindo o valor da flexão para cerca de 0,2 mm, como verificado na figura 38.

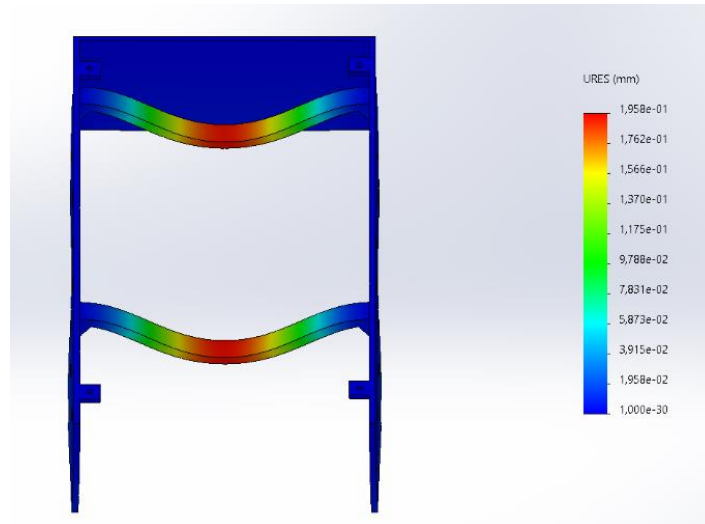


Figura 38 – Simulação do deslocamento da peça retificada.

4.1.2 Suporte da extrusora *bowden*

Foi feita uma simulação estrutural com uma carga pontual no suporte, para se observar o deslocamento que iria sofrer o mesmo, tal como analisar se o material se mantém no regime elástico, investigando o valor de tensão equivalente de *Von Mises*.

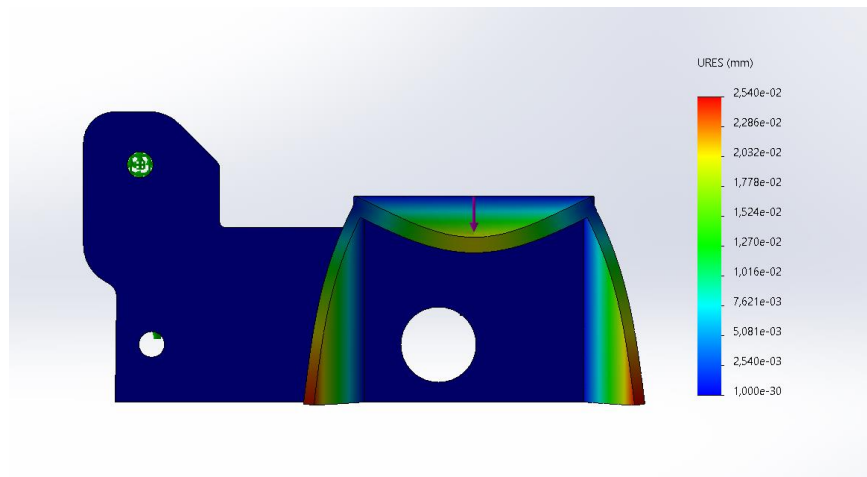


Figura 39 – Deslocamento provocado pelo peso da extrusora.

É possível observar na figura 39 que o deslocamento máximo é de 0,0254 mm na parte inferior do suporte. Esse valor é perfeitamente aceitável, visto que, é impercetível ao olho humano, uma vez que não altera as características do suporte.

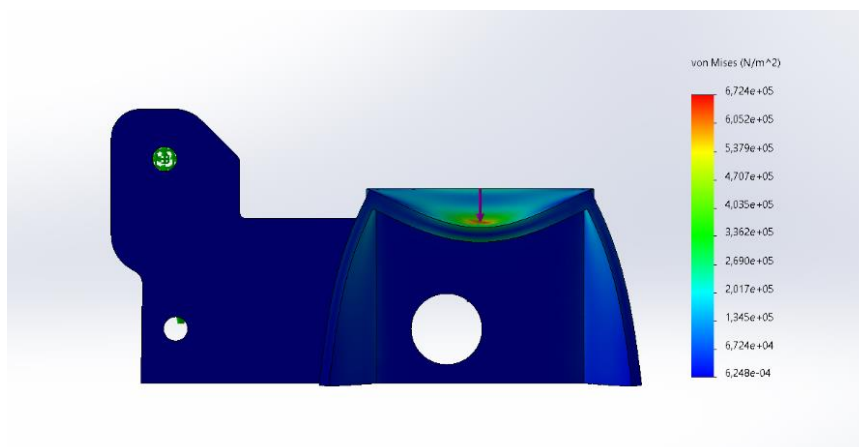


Figura 40 – Distribuição de pressões a que o suporte está sujeito.

Nesta segunda simulação observou-se a tensão (N/m^2) a que a peça está submetida. No ponto mais crítico tem um valor registado na zona elástica de 672,4 KPa, valor bastante inferior a 54 MPa, que foi verificado nos ensaios de tração discutidos na secção 5.3.

4.1.3 Suporte da extrusora *direct drive*

Foi também feita uma simulação estrutural do suporte da extrusora *direct drive* com uma carga pontual de 2,06 N, que provoca um deslocamento máximo de 0,0124 mm, valor que é impercetível e não influencia o funcionamento. Nesta simulação é apenas considerado o peso do motor e da extrusora. Seria também importante analisar o deslocamento quando a extrusora empurra ou retrai o filamento, todavia não existem dados para fazer essa simulação.

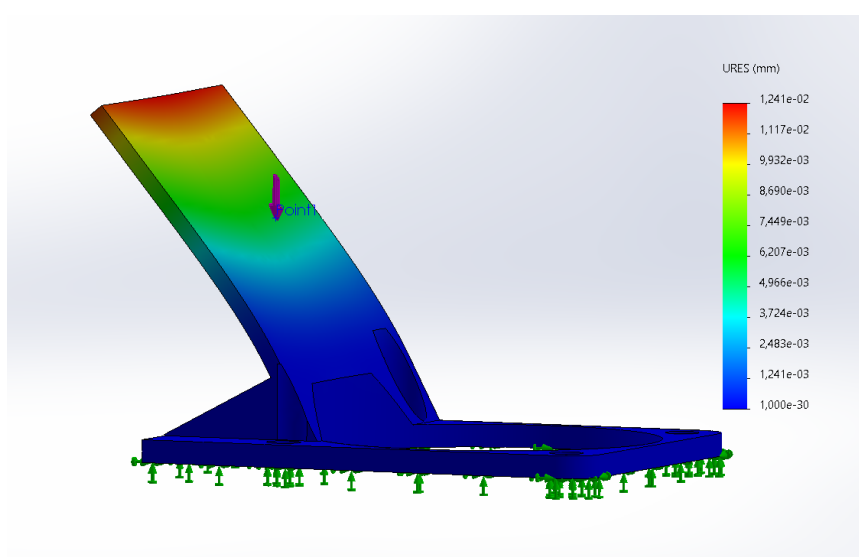


Figura 41 – Simulação deslocamento do suporte da extrusora *direct drive*.

4.2 Cálculos verificação

4.2.1 Parafusos do suporte do motor para extrusora *bowden*

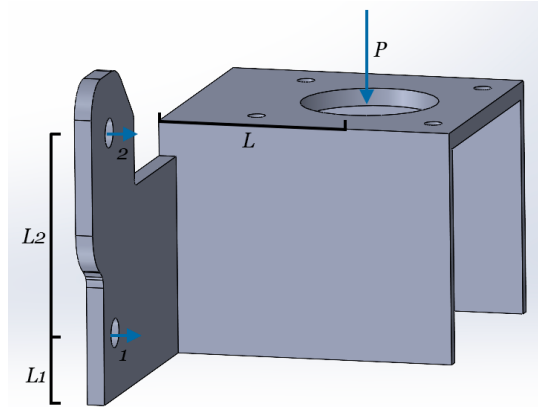


Figura 42 – Diagrama de forças exercidas no suporte.

$$L=30,5 \text{ mm } L_1=11,14 \text{ mm } L_2=46,02 \text{ mm}$$

- a) Força exercida no suporte (peso), desprezando o peso do próprio suporte:

$$P=m \cdot g \quad (1)$$

$$P=0,332 \cdot 9,81 = 3,26 \text{ N}$$

- b) Momento fletor na ligação que provocam tração nos parafusos:

$$M_y = PL = F_1 L_1 + F_2 L_2 \quad (2)$$

- c) Cálculo do c:

Como:

$$F_1 = c \cdot L_1 \quad F_2 = c \cdot L_2 \quad (3)$$

Então:

$$PL = cL_1^2 + cL_2^2 \quad (4)$$

$$c = \frac{PL}{L_1^2 + L_2^2} \quad (5)$$

$$c = \frac{3,26 \cdot 0,0305}{0,01114^2 + 0,04602^2} = 44,350 \text{ N/m}$$

d) Verificação da força de tração crítica nos parafusos:

$$F_1 = 44,35 \cdot 0,01114 \leftrightarrow F_1 = 0,494 \text{ N}$$

$$F_2 = 44,35 \cdot 0,04602 \leftrightarrow F_2 = 2,041 \text{ N}$$

F_2 apresenta um maior valor, logo é a força crítica aplicada aos parafusos de suporte.

e) Cálculo da área mínima da secção do parafuso:

$$\sigma = \frac{F_2}{A_2} \quad (6); \quad \tau = \frac{P}{2A} \quad (7)$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (8)$$

Substituindo (6) e (7) em (8), obtém-se:

$$\sigma' = \sqrt{\left(\frac{F_2}{A_2}\right)^2 + 4\left(\frac{P}{2 \cdot A}\right)^2} \quad (9)$$

Considerando uma tensão máxima de 150 MPa e substituindo pelos restantes valores:

$$150E6 = \sqrt{\left(\frac{2,041}{A_2}\right)^2 + 4\left(\frac{3,260}{2 \cdot A_2}\right)^2}$$

$$A_2 = 2,56E-8 \text{ m}^2 \leftrightarrow D_2 = 0,000181 \text{ m}$$

f) Cálculo do coeficiente de segurança:

Começando pelo cálculo da área da secção parafuso:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (10)$$

Substituindo:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{3E-3}{2}\right)^2 = 1.14E-5 \text{ m}^2$$

Em seguida, recorreu-se ao cálculo da tensão admissível do parafuso utilizado:

$$\sigma_{\text{adm}} = \sqrt{\left(\frac{2.041}{1.14E-5}\right)^2 + 4\left(\frac{3.260}{1.14E-5}\right)^2} = 571930 \text{ Pa}$$

O coeficiente de segurança é dado por:

$$c. s = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{adm}}} \quad (11)$$

Substituindo:

$$c. s = \frac{150E6}{571930} = 262,27$$

Os parafusos utilizados têm um diâmetro de 3 mm, os quais têm uma dimensão muito superior à dimensão calculada, que se traduz num coeficiente de segurança de 262,27. Dessa forma, os parafusos estão sobredimensionados e garantem a segurança desta ligação.

4.2.2 Vida útil dos rolamentos da cabeça de extrusão

Inicialmente, a impressora estava equipada com uma cabeça de extrusão com dimensões e massa diferente, ($m = 0,082 \text{ kg}$), com este *upgrade* essa massa aumentou significativamente ($m = 0,478 \text{ kg}$), assim, pretendeu-se verificar se a vida útil dos rolamentos foi posta em causa.

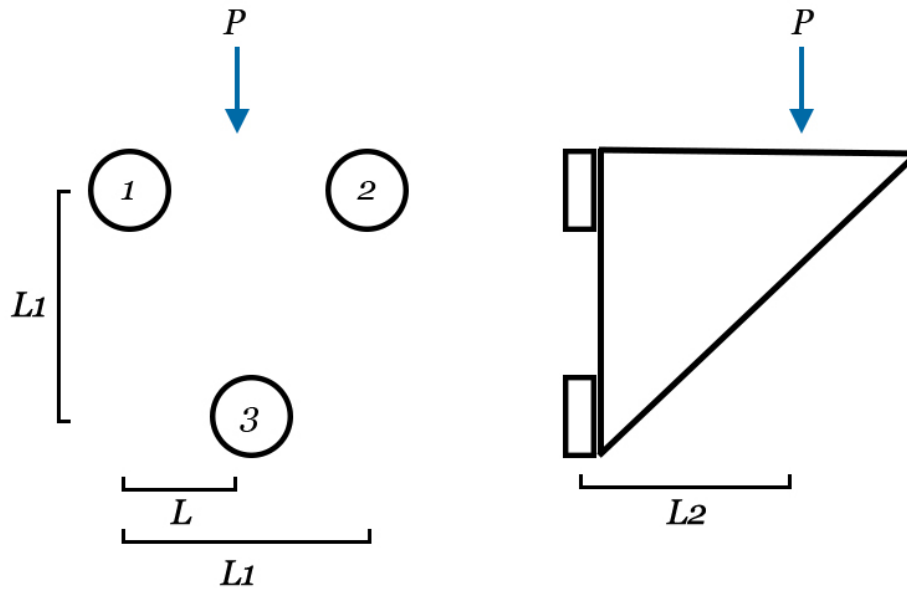


Figura 43 – Diagrama de forças: à esquerda vista posterior do conjunto; à direita vista lateral.

a) Força P (peso):

$$P = m \cdot g = 0,478 \cdot 9,81 = 4,689\text{N}$$

m – Massa (m=0,478 kg)

g – Força gravitacional (m/s²)

b) Balanço de forças

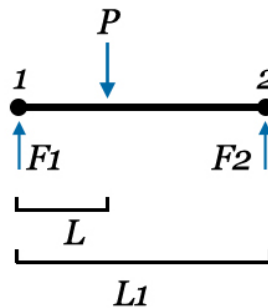


Figura 44 – Diagrama de corpo livre.

$$\Sigma F_y = -F_1 + P - F_2 = 0$$

$$F_1 = 3,585\text{ N}$$

$$\Sigma M_{F_1} = -P \cdot L - F_2 \cdot L_1 = 0$$

$$F_2 = 1,195 \text{ N}$$

L – Distância do rolamento 1 à linha paralela a P (0,01 m)

L1 – Distância entre rolamentos (0,04 m)

L2=0,065 m

c) Vida útil do rolamento:

A vida útil do rolamento é dada [49] por :

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot N} \times \left(\frac{C}{P}\right)^p \times 0,62 \quad (12)$$

Considerando uma rotação de 100 rpm e um fator de ajuste de confiabilidade de 90%:

$$\frac{10^6}{60 \cdot 100} \left(\frac{1,14 \cdot 10^3}{3,585}\right)^3 \cdot 0,62 = 3,32E9 \text{ h}$$

Lh – Vida útil do rolamento (horas)

N – Rotação do rolamento (rpm)

C – Capacidade de carga dinâmica do rolamento, dada em catálogo (N) [referência do catálogo (ver anexo C)]

P – Carga dinâmica equivalente aplicada no rolamento mais carregado (N)

p = 3 - elementos rolantes esféricos

0.62 – Fator de ajuste de confiabilidade de 90%

Com base no valor calculado (3,32E9 horas), é concluído que a vida útil dos rolamentos não foi posta em causa.

4.2.3 Suporte extrusora *direct drive*

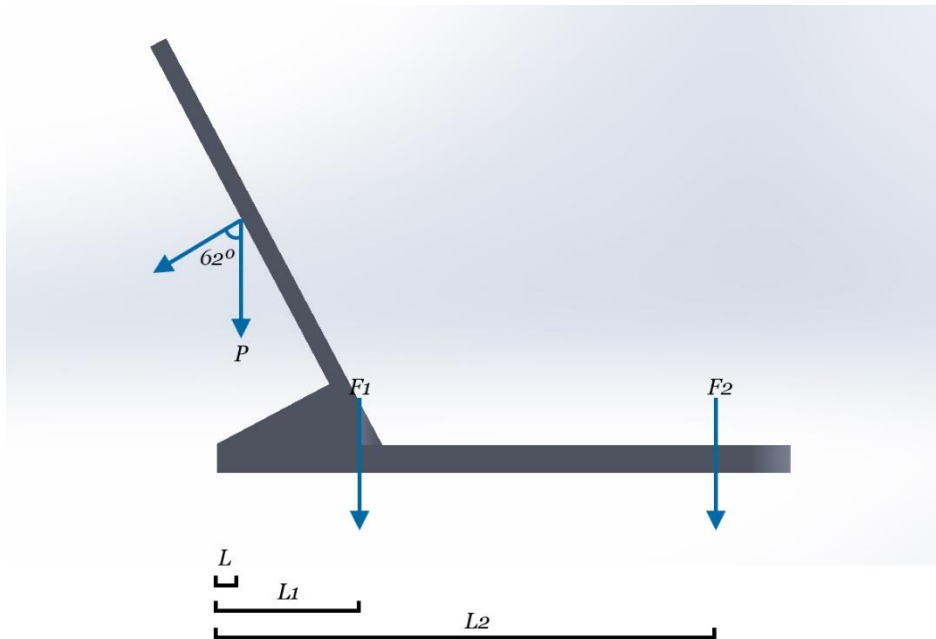


Figura 45 – Diagrama de forças do suporte da extrusora *direct drive*.

$$L=6,99 \text{ mm } L_1=17,99 \text{ mm } L_2=57,99 \text{ mm}$$

- a) Força exercida no suporte (peso):

$$P=0,210 \cdot 9,81 = 2.060\text{N}$$

- b) Momento fletor aplicado à ligação aparafusada, que provoca tração nos parafusos:

$$M_y = PL = 2F_1L_1 + 2F_2L_2$$

L – Distância do ponto de rotação a P (6,99E-3 m)

L1 – Distância do ponto de rotação a F₁ (17,99E-3 m)

L2 – Distância do ponto de rotação a F₂ (57,99E-3 m)

c) Cálculo do c:

Substituindo em (5):

$$c = \frac{2,060 \cdot 0,00699}{2 \cdot (0,01799^2 + 0,05799^2)} = 1,953 \text{ N/m}$$

d) Verificação da força tração crítica aplicada aos parafusos

$$F_1 = 1,953 \cdot 0,01799 \leftrightarrow F_1 = 0,035 \text{ N}$$

$$F_2 = 1,953 \cdot 0,05799 \leftrightarrow F_2 = 0,113 \text{ N}$$

F_2 Apresenta um maior valor, logo é a força crítica.

e) Cálculo da área mínima da secção dos parafusos:

Substituindo todos os valores em (9)

$$150 \text{ E}6 = \sqrt{\left(\frac{0,113}{A_2}\right)^2 + 4 \left(\frac{2,060}{2 \cdot A_2}\right)^2}$$

$$A_2 = 1,375 \text{ E} - 8 \text{ m}^2 \leftrightarrow D_2 = 0,000033 \text{ m}$$

f) Cálculo do coeficiente de segurança:

$$\sigma_{\text{adm}} = \sqrt{\left(\frac{0,113}{1,14 \text{ E} - 5}\right)^2 + 4 \left(\frac{2,060}{1,14 \text{ E} - 5}\right)^2} = 361404 \text{ Pa}$$

Substituindo na fórmula 11 para o coeficiente de segurança:

$$c. s = \frac{150 \text{ E}6}{361404} = 415,05$$

À semelhança do subcapítulo 4.2.1, os parafusos utilizados têm um diâmetro de 3 mm, os quais têm uma dimensão muito superior à dimensão calculada, que se traduz com o coeficiente de segurança de 415. Dessa forma, os parafusos estão sobredimensionados.

4.3 Montagem final

Foi feita a montagem de todos os componentes referidos no capítulo 3. Contudo, devido à extensão desse processo, foi colocado no anexo A.

Pode-se ver na figura 46, em detalhe, a cabeça de extrusão. A maior parte dos componentes são fixados ao suporte do bico extrusor (A). Também é possível observar todos os componentes assembled.

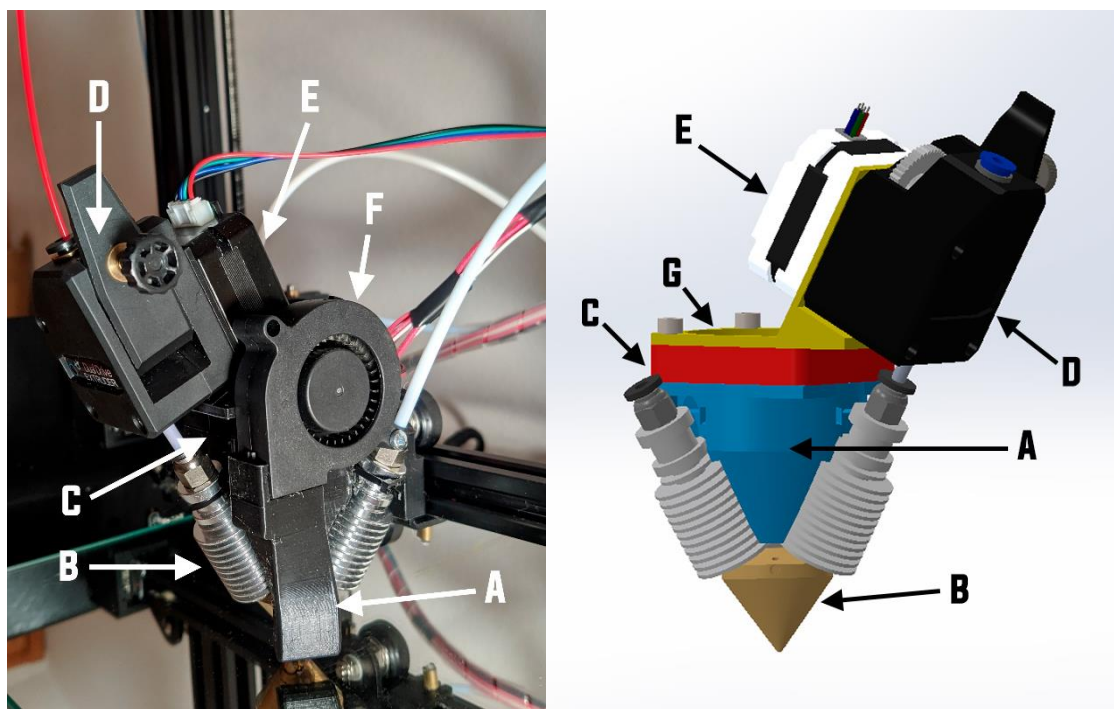


Figura 46 – Imagem real da cabeça extrusora à esquerda; render da cabeça extrusora à direita.

Na tabela 6 é feita a identificação de todos os componentes.

Tabela 6 – Componentes da cabeça de impressão.

Etiqueta	Componente
A	Suporte bico extrusor
B	Bico extrusor
C	Ventilador bico extrusor
D	Extrusora
E	Motor de passo
F	Ventilador impressões
G	Suporte extrusora

Em seguida, é apresentado o *render* da caixa projetada onde está albergado o *hardware*, a imagem real pode ser consultada no anexo A.

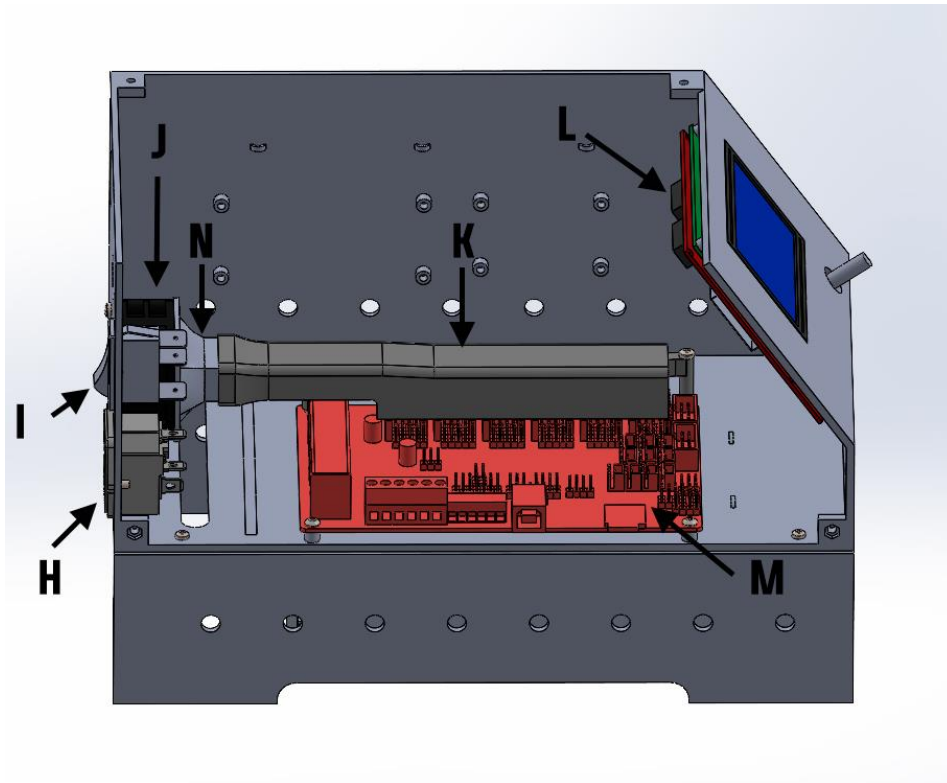


Figura 47 – *Render* da caixa com os componentes.

Novamente, pode-se consultar a lista de componentes na tabela 7.

Tabela 7 – Componentes na caixa.

Etiqueta	Componente
H	Conector alimentação C14
I	Interruptor
J	Ventilador microcontroladores
K	Túnel de arrefecimento
L	Ecrã LCD
M	Placa de controlo
N	Adaptador ventilador

Na figura 48 é possível ver o aspeto final da impressora depois de todos os componentes instalados. Esta está preparada para a impressão multicolor com 3 rolos de PLA (azul, vermelho e amarelo).

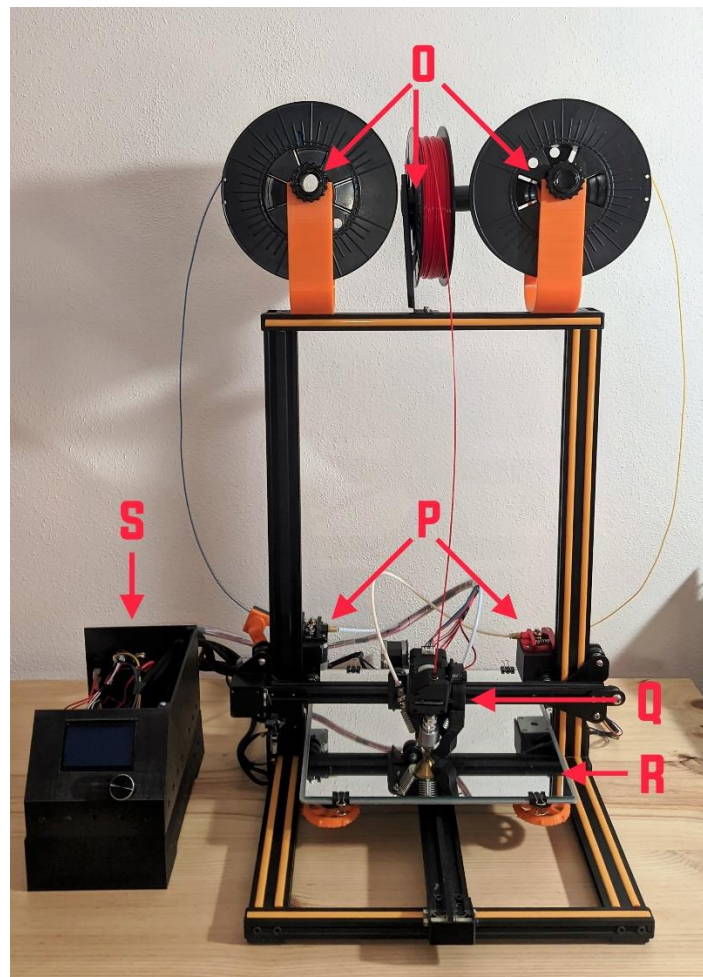


Figura 48 – Aspeto final da impressora e localização dos principais componentes.

Na tabela 8 é feita a identificação de todos os componentes identificados na figura 48.

Tabela 8 – Principais componentes da impressora.

Etiqueta	Componente
O	Suportes para rolos de filamento
P	Extrusoras <i>bowden</i>
Q	Bico extrusor
R	Cama aquecida
S	Caixa

4.4 Alteração do *firmware*

Como referido anteriormente, houve a necessidade de alteração do *firmware*. Inicialmente, implementou-se a nova placa controladora com todo o restante *hardware* original, de modo a tornar o processo de configuração do novo conceito mais eficiente. Ou seja, foi pretendido que não houvesse a alteração de tantas variáveis ao mesmo tempo, de forma a solucionar eventuais problemas de forma mais eficaz.

Essas alterações foram feitas no *firmware* de código aberto, *Marlin*, popularmente conhecido no mundo da impressão 3D. Este *firmware* é facilmente editado num programa de edição de código. Neste caso, foi utilizado o *Visual Studio Code*. Para a realização desta dissertação foi utilizada a versão mais recente do *Marlin* (2.0.7.2).

Devido à extensão de todo o processo, optou-se por colocar todos os passos realizados no anexo E. Esse está dividido em três partes, a configuração do *hardware* original, segunda parte da configuração para implementação do novo bico extrusor para multimateriais e, por último, a configuração para impressão com mistura de filamentos. Todos os parâmetros que necessitem de cálculos são apresentados no subcapítulo 4.6.

4.5 Esquema elétrico

Foi elaborado um esquema elétrico, tal e qual representado na figura 49, na qual é possível verificar todas as ligações necessárias para o correto funcionamento do *hardware* instalado.

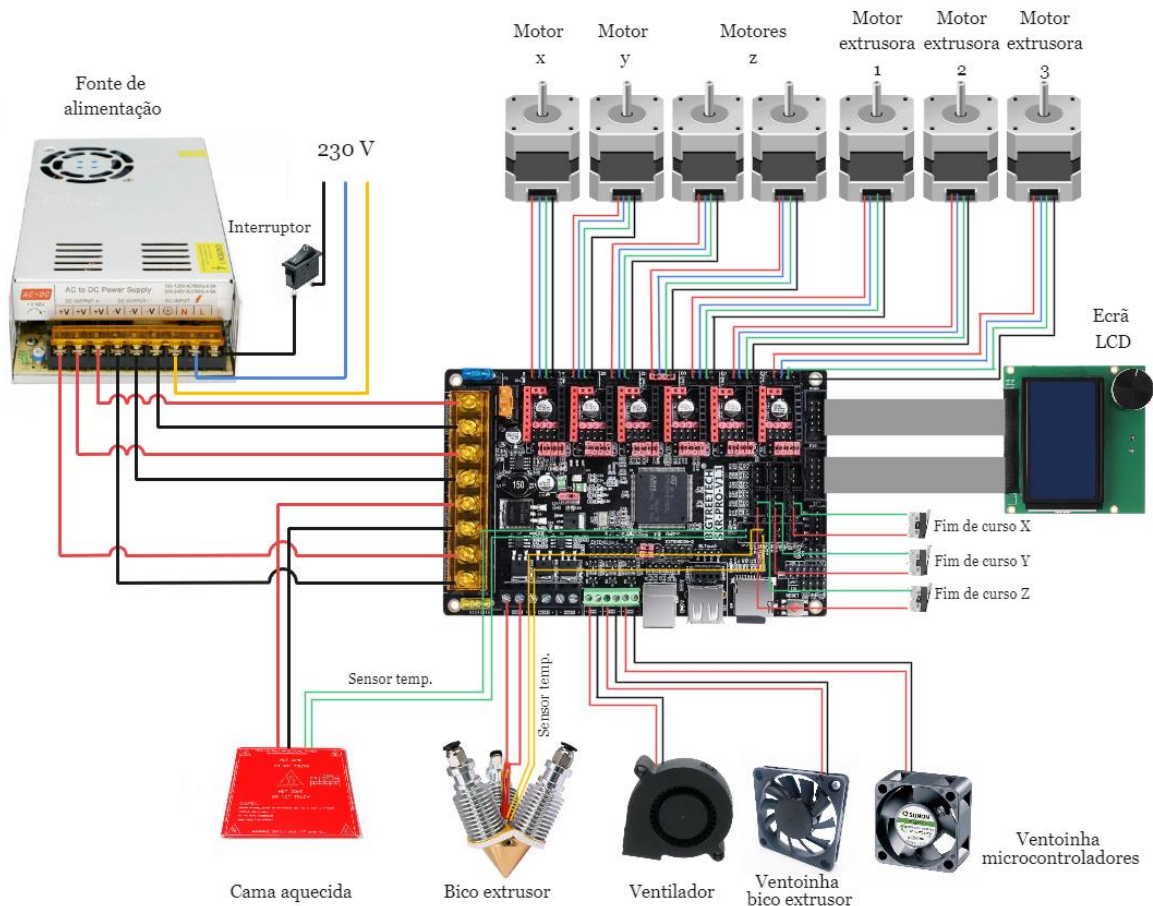


Figura 49 – Esquema elétrico.

4.6 Calibração

4.6.1 Microcontroladores

Nos microcontroladores dos motores de passo, é possível controlar a corrente fornecida ao motor, através de um potenciómetro. Essa corrente, é proporcional à tensão medida entre o potenciómetro e o pino *ground* (GND) (0V). Para realizar esta medição, os motores de passo não devem estar ligados [50].

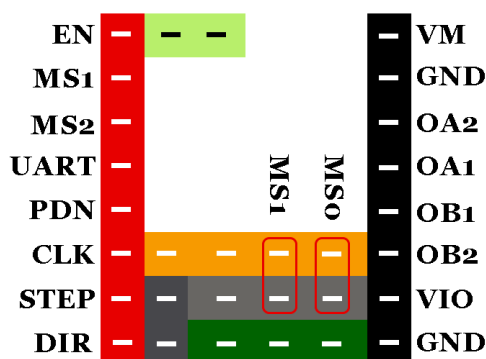


Figura 50 – Esquema de ligações dos *jumpers* para funcionamento em 16 bit.

De forma a tirar total proveito das capacidades destes novos microcontroladores foram ativos os pinos MS0 e MS1, na placa mãe como observado na figura 50. Esta combinação define o modo de funcionamento dos controladores, que neste caso está configurado para funcionar em *legacy mode* com um microstep de 16 vezes. Neste modo o *driver* por defeito irá interpolar os passos anteriores para 256 *microsteps* [51].

Os motores de passo utilizados, com exceção do motor da extrusora *direct drive*, funcionam com uma corrente de pico (ou máxima) de 1,5 A. O outro caso funciona com 1,4 A. Dessa forma, foram feitos os cálculos da tensão para cada caso [52]:

$$V_{REF} = \frac{I_{RMS} \cdot 2,5}{1,77} \quad (13)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

$$I_{RMS} = \frac{1,5}{\sqrt{2}} = 1,061 \text{ A}$$

Substituindo em (13):

$$V_{REF} = \frac{1,061 \cdot 2,5}{1,77} = 1,498 \text{ V}$$

É recomendado uma margem de segurança no mínimo do V_{REF} de 10 %, logo:

$$V_{REF} = 1,498 - 0,148 = 1,348 \text{ V}$$

Fazendo os mesmos cálculos para o segundo caso de 1,4 A, obtém-se o seguinte valor:

$$V_{REF} = 1,258 \text{ V}$$

Tabela 9 – Valores da tensão a aplicar nos microcontroladores.

Motor	V_{REF} (v)
Eixo X, Y e Z	1,348
Extrusora 1 e 3 (bowden)	1,348
Extrusora 2 (direct drive)	1,258

Após aplicação dos novos microcontroladores e todo o restante *hardware*, incluindo os ventiladores, realizou-se a mesma impressão para os mesmos parâmetros (velocidade, entre outros). Assistoriu-se a uma redução de 69dB(A) para cerca de 57 dB(A) no ruído, como constatado na figura 51. Essa redução devesse, principalmente, aos microcontroladores, e permitem um movimento mais suave dos motores de passo. Contudo, num trabalho futuro, seria importante testar a influência dos ventiladores no ruído geral, assim como a sua otimização, caso seja possível.

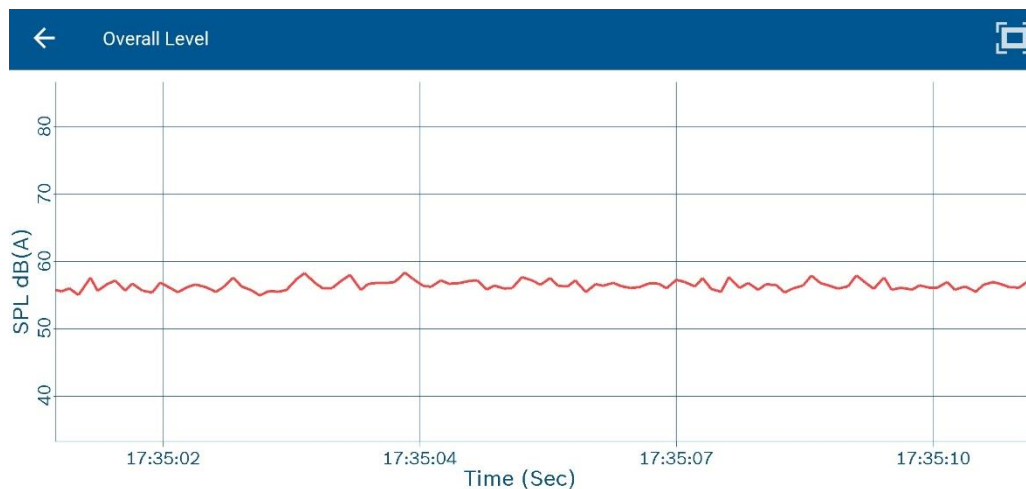


Figura 51 – Teste de verificação de ruído após otimização.

4.6.2 Passos dos motores

Por forma a ter um ponto de partida, após fazer a troca de todo o *hardware*, foi implementada de novo a extrusora original. Como foi alterado o *firmware*, foi necessário ajustar alguns parâmetros, nomeadamente, os passos dos motores.

Para calcular esse valor, foi feita uma marca com 100 mm e outra com 200 mm (para referência, caso ocorra extrusão em excesso) no filamento e fez-se extrudir 100 mm. Concluída a extrusão, verificou-se que foi extrudido 192 mm. Desta forma, para obter o novo valor de passos, multiplicou-se o valor pedido (100 mm) pelo valor de passos na configuração (100 passos/mm) dividindo-se pelo valor extrudido:

$$\text{Passos} = \frac{\text{Valor pedido} \cdot \text{Número de Passos}}{\text{Valor extrudido}} \quad (15)$$

Substituindo em (15)

$$\text{Passos} = \frac{100 \cdot 100}{192,4} = 51,97 \text{ passos/mm}$$

Foram feitos os restantes cálculos para todos os outros motores, aplicando o mesmo método à exceção da extrusora *direct drive*. Para esse caso, o fabricante recomenda valores entre 96 e 415 passos/mm [53], dessa forma considerou-se o valor médio desse intervalo (159,5) para referência inicial. De seguida, recorreu-se à metodologia anterior para obter o valor final. Os valores aplicados a todos os motores constam na tabela 10.

Tabela 10 – Valores de passos para todos os motores.

Motores	Passos/mm
Eixo X	39,88
Eixo Y	39,68
Eixos Z	196,72
Extrusora 1 e 3 (<i>bowden</i>)	51,97
Extrusora 2 (<i>direct drive</i>)	215,54

4.6.3 Fluxo

Foi também necessário calibrar o fluxo, através da impressão de um cubo aberto com uma espessura de parede de 0,8 mm., na figura 52 pode-se observar a configuração do mesmo.

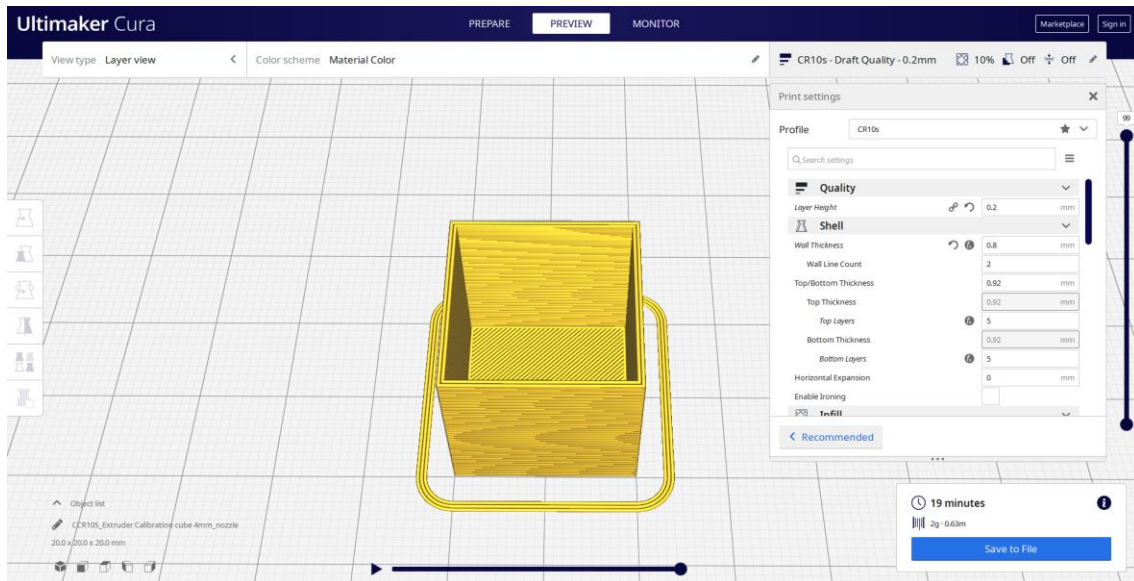


Figura 52 – Configuração do cubo aberto no *software Cura*.

Com um fluxo de 100%, a parede impressa tinha uma espessura de 0,86 mm. Desta forma, para corrigir esse excesso, dividiu-se a espessura (definida no programa de preparação do ficheiro, *Cura*) 0,8 mm pela espessura impressa 0,86 mm, obtendo-se assim o novo fluxo:

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{Espessura de parede pretendida}}{\text{Espessura de parede impressa}} \quad (16)$$

Substituindo os valores da espessura em (16):

$$\text{Fluxo} = \frac{0,8}{0,86} = 0,93$$

O fluxo foi assim reduzido para 93%, obtendo-se os valores pretendidos na impressão de outros cubos de teste.

4.7 Resolução de problemas

Após a instalação da cabeça extrusora verificou-se, como esperado, que a referência cartesiana (quando ativa todos interruptores de fim de curso) da impressora tinha sofrido alteração (ver figura 53). Foram medidas através de um paquímetro todas as dimensões excedentes, das quais se verificou um deslocamento de 28 mm no eixo Y e de 6 mm no eixo Z.

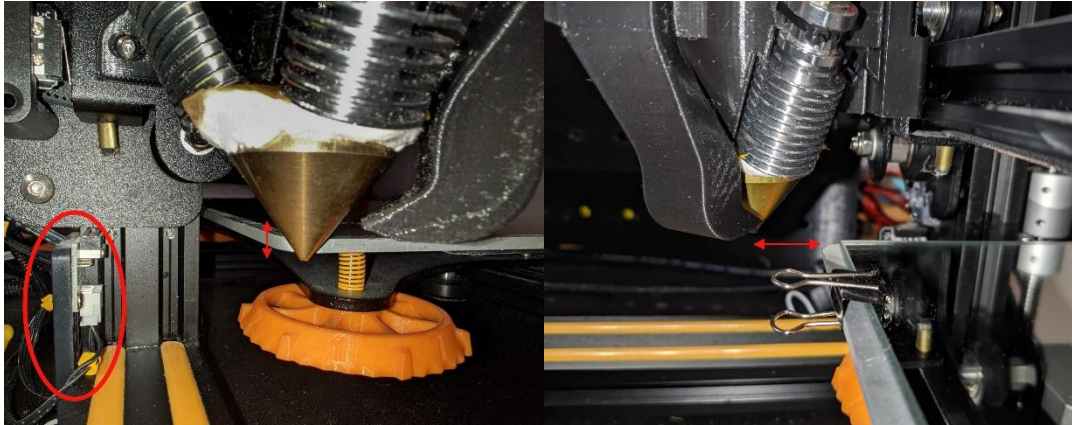


Figura 53 – Deslocamentos dos eixos Z e Y.

Para os diferentes eixos foram utilizados métodos de correção diferentes. Para o eixo Y foi corrigido em *firmware* as dimensões da cama, pois com o avanço do bico extrusor no eixo Y o comprimento útil passou de 300 mm a 283 mm. Para compensar o *offset* do mesmo após fazer *home*, foi alterado o mínimo do eixo Y de 0 mm para - 28 mm, tal como confirmado na figura 54.

```
// The size of the print bed
#define X_BED_SIZE 300
#define Y_BED_SIZE 283

// Travel limits (mm) after homing, corresponding to endstop positions.
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MIN_POS -28
```

Figura 54 – Alteração do Y_BED_SIZE e do Y_MIN_POS, no *firmware*.

Para o deslocamento no eixo Z foi desenhada uma nova peça para a substituição da sublinhada na figura 53, com um aumento de altura de 6 mm com as restantes características inalteradas. Na figura 55, é possível verificar a alteração feita.

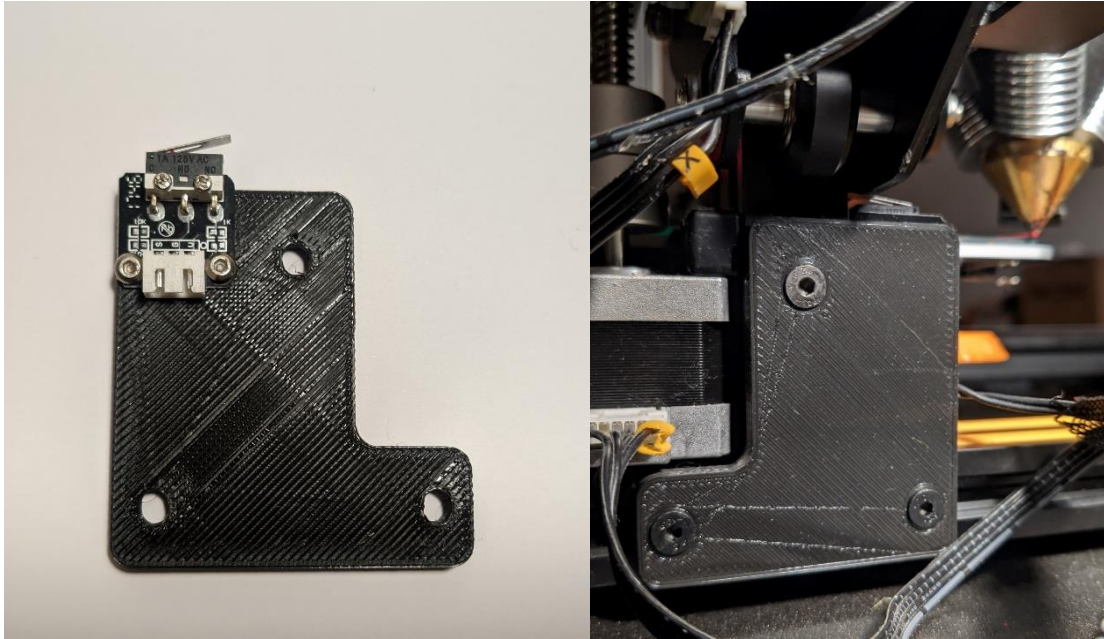


Figura 55 – Suporte para interruptor de fim de curso do eixo Z.

Após a montagem de todos os componentes, ligou-se a máquina, para se testar o funcionamento de todos. Porém, no arranque apresentou um aviso no ecrã, tal como se pode visualizar na figura 56.

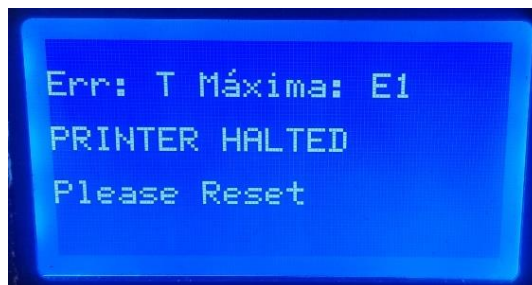


Figura 56 – Erro apresentado no ecrã.

De forma a encontrar o problema, foi revista a cablagem, não tendo sido encontrado nenhum defeito ou erro de montagem. Desligou-se a ficha correspondente ao sensor de temperatura do bico de extrusão. Ligou-se novamente a impressora, e não apresentou o erro. Com isto, foi medida a resistência do sensor, que apresentou valor próximos de 0Ω , o que indica um defeito, uma vez que o sensor no seu bom funcionamento oferece resistência elétrica. Dessa forma, foi desmontado todo o conjunto da cabeça de impressão para que fosse possível chegar ao sensor. Depois de desmontado o sensor, verificou-se que na montagem do mesmo, foi apertado excessivamente, resultando na deformação do revestimento dos condutores (ver figura 57), ficando o parafuso a fazer passagem de um condutor para o outro antes do sensor. Foi montado, novamente numa posição diferente, e

o problema ficou solucionado. Contudo a solução recomendada deveria ter sido usar manga termo retrátil.

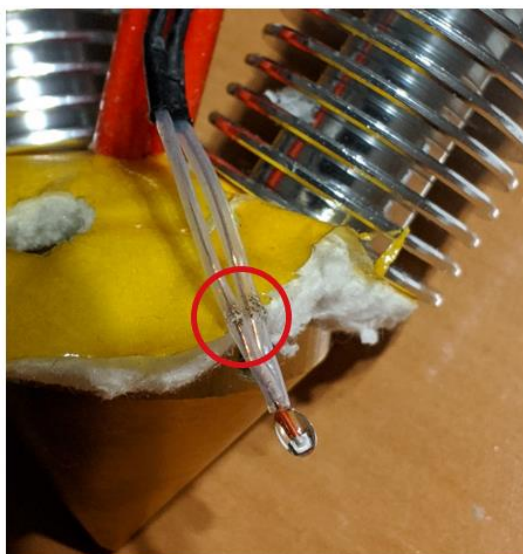


Figura 57 – Revestimento dos condutores do sensor danificados.

4.7.1 Calibração da temperatura do *Diamond*

Ao realizar-se as primeiras tentativas de impressão, a máquina parava após alguns minutos do começo da impressão, apresentando um erro no visor “*Thermal Runaway*”, acompanhado por um sinal sonoro.

Após várias tentativas, percebeu-se que as impressões paravam sempre no mesmo momento. Observou-se, que passados alguns segundos, após o arranque do ventilador de arrefecimento da peça, com velocidade definida a 100%, não só arrefecia a peça, como também o bico. Numa primeira instância, o problema foi resolvido com o ajuste de valor da velocidade para 50%. Porém, a impressora voltou a apresentar o mesmo erro, dessa forma optou-se por calibrar a temperatura de extrusão através do Proporcional, Integral, Derivativo (PID).



Figura 58 – Erro apresentado no ecrã durante a impressão.

Através do programa *Pronterface* foi enviado um o *G-code* M303 E0 S200 C16, onde M303 é o comando do PID, E0 é correspondente ao *Extruder* o (bico de impressão) S200 a temperatura em grau celsius e C16 o número de ciclos para calcular a média para obter o valor ideal. Depois de completar todos os ciclos, o programa devolveu os seguintes valores:

```
#define DEFAULT_Kp 85.34  
#define DEFAULT_Ki 14.04  
#define DEFAULT_Kd 129.72
```

Figura 59 – Valores PID devolvidos pelo programa.

Posteriormente, estes valores foram substituídos através do *Visual Studio Code* em *configuration.h*. Após esta calibração, o problema ficou resolvido.

Capítulo 5

Aplicação prática

O presente capítulo apresenta a aplicação prática desta dissertação. Numa primeira fase foram impressos e testados a combinação de materiais, através de ensaios de tração. Em seguida, realizaram-se testes de impressão a cores com e sem mistura de filamentos.

5.1 Impressão simultânea de multimateriais

Para a impressão multimateriais, começou-se por fazer um paralelepípedo em CAD com 140 mm de comprimento por 20 mm largura, com uma espessura de 5 mm. Para este teste foram utilizados dois materiais: o PLA, por ser um dos materiais mais utilizados e versáteis na impressão 3D e o TPU, pelas suas características de flexibilidade, podendo ser utilizado em peças que necessitem de zonas flexíveis, como por exemplo peças expostas a vibrações.

Inicialmente, foi impresso um provete de cada material para que fosse possível obter os valores do módulo de *Young* de cada material. Este, também designado por módulo elástico, é uma constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, que mede a resistência à deformação do material na aplicação de uma tensão, no regime elástico.

Na impressão dos provetes, teve-se em conta alguns parâmetros que são considerados fundamentais para o sucesso das impressões. Alguns desses valores são predefinidos por regras, tal como a altura de camada. Como é utilizado um bico de 0,4 mm, não deve ser utilizado mais do que 80% desse valor (0,32 mm). Dessa forma, é habitual usar o valor *standard* de 0,2 mm para a altura das camadas [54]. Os restantes parâmetros foram afinados em testes feitos em pequenas peças. A velocidade e a distância de retração foram uma das maiores preocupações. A deficiente calibração das mesmas compromete o sucesso das impressões a cores e a multimateriais, uma vez que a transição de material ou de cor pode não ser a pretendida. Estes dois parâmetros quando mal calibrados, para além da criação de uma “teia” durante as viagens que a cabeça de impressão realiza quando não está a imprimir, também compromete a qualidade final da peça e provoca entupimentos. Esses são causados por uma retração excessiva de filamento que promove a solidificação do material ao subir na câmara para a área fria, obrigando a desmontar a cabeça de impressão para desobstrução.

Tabela 11 – Parâmetros importantes para a impressão.

Parâmetros	Valor
Velocidade de impressão	15 mm/s
Velocidade de retração	30 mm
Distancia de retração	3 mm
Preenchimento	50%
Temperatura do bico extrusor	210 °C
Temperatura da cama de impressão	60 °C
Altura de camada	0,2 mm
Angulo de impressão	0°/45°
Padrão de enchimento	Retangular

Para a impressão dos provetes, demonstrados na figura 60, foram adicionadas 2 extrusoras ao *software Repetier-Host* para que fosse possível selecionar os materiais pretendidos para cada peça.

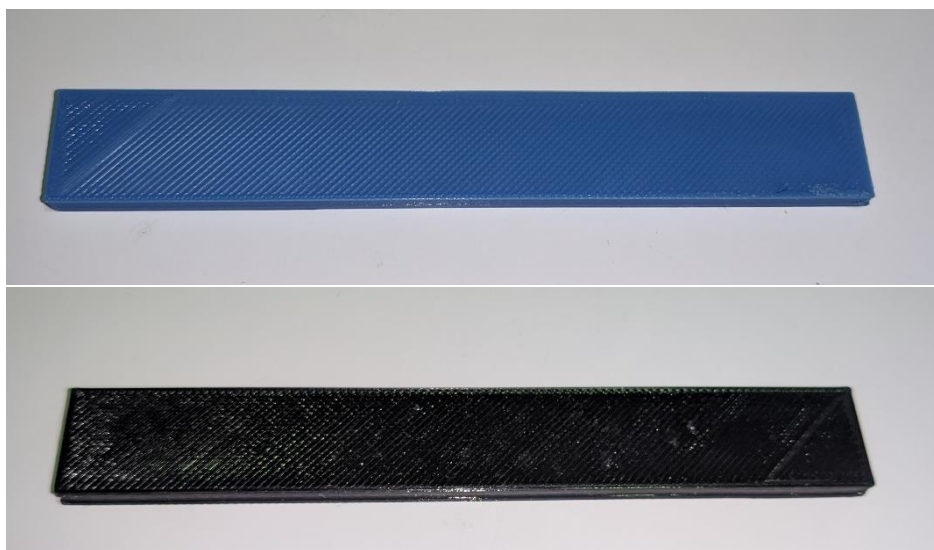


Figura 60 – Provetes de PLA em cima; TPU em baixo.

De forma a analisar a adesão e o comportamento mecânico da combinação dos dois materiais, foram desenhados 2 tipos de provetes. Para testar a combinação dos dois materiais em paralelo, dividiu-se o provete inicial em três partes iguais, tal como representado na figura 61.

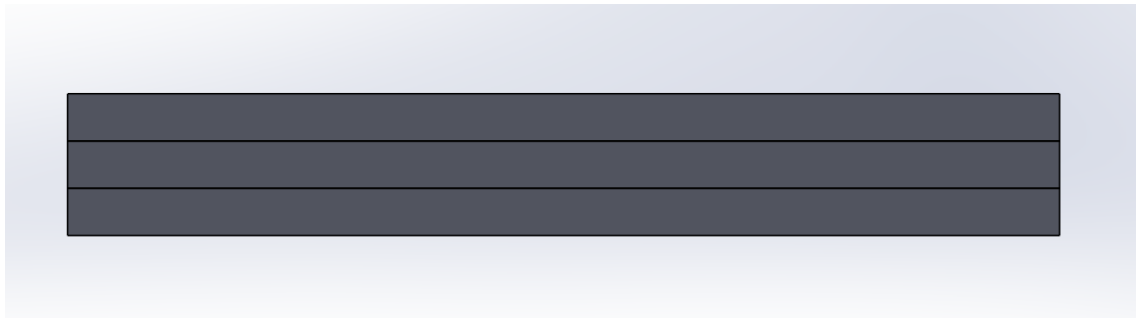


Figura 61 – Divisão do provete em CAD.

Este desenho foi carregado no *software Repetier-Host*, onde foram, inicialmente, configuradas 3 extrusoras para possibilitar imprimir 3 materiais diferentes, de acordo com a figura 62. Para os testes em questão foram apenas utilizados dois materiais, por isso as duas entradas do bico extrusor tinham filamento PLA e TPU. É também necessário ter sempre todas as entradas com filamento para evitar entupimentos, pois o filamento sob pressão tende a sair pelos orifícios livres.

Foi feita a seleção dos componentes a imprimir. Neste primeiro caso, foi para a parte intermédia do provete em PLA e as duas barras exteriores em TPU.

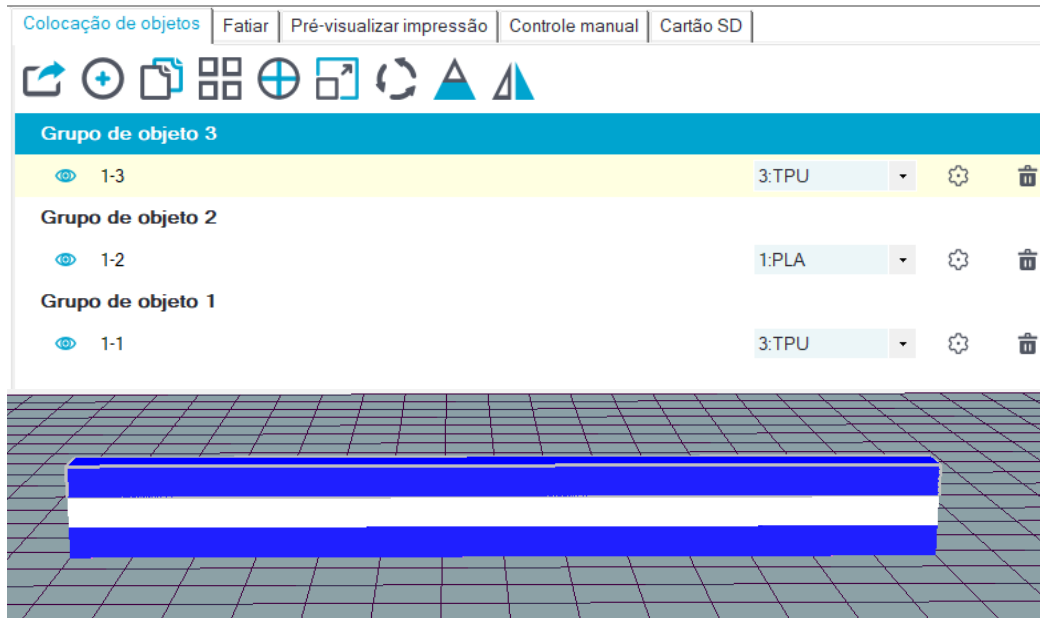


Figura 62 – Configuração do provete multimaterial para impressão.

Este provete foi impresso na vertical, pois a limpeza do bico seria mais eficiente apesar de ser sempre impressa paralelamente uma torre de limpeza de 15 mm³. Por ter sido impressa nessa posição, o ângulo de depósito do material é de 0°. Este provete sofreu uma ligeira

deformação na parte inferior, o que não condicionou os testes realizados, como se pode observar na figura 63.

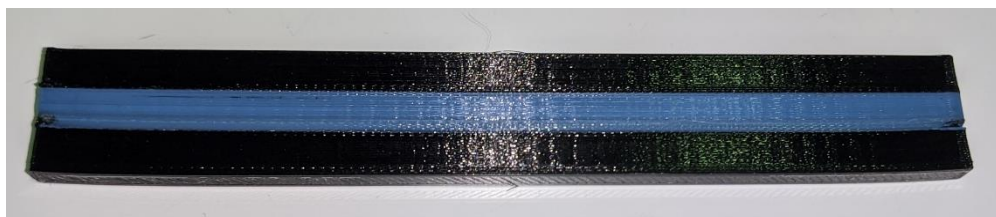


Figura 63 – Provete multimaterial TPU-PLA-TPU.

Alterando a sequência dos materiais, foi impresso outro provete com a mesma estrutura. Desta vez o material que garantiu a adesão foi o PLA, o qual mostrou melhores resultados de adesão em comparação com o TPU, pelo menos nesta faixa de temperaturas (210 °C), tal como se pode visualizar na figura 64.

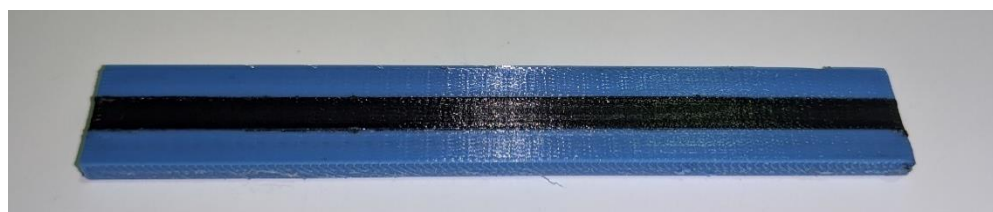


Figura 64 – Provete multimaterial em serie PLA-TPU-PLA.

Por fim, foi desenhado um provete para combinar os dois materiais em série. Para reforçar a ligação usou-se uma geometria tipo *puzzle* (ver figura 65). De acordo com o trabalho de [54], a união somente por ligação química torna esta região muito mais fragilizada, mesmo usando um material igual.

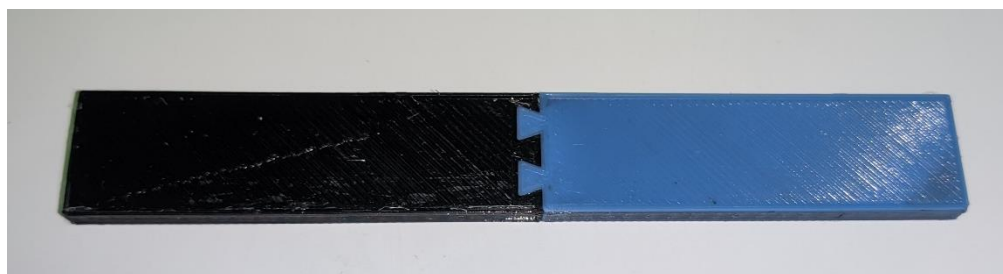


Figura 65 – Provete multimaterial em paralelo PLA+TPU.

5.2 Testes dos provetes

Os ensaios de tração aos provetes foram realizados numa máquina da marca *Shimadzu* modelo *AGS-X*, modelo 10 kN, ilustrada na figura 66. Durante o ensaio, através do *software Trapezium X* (versão 1.4.0), foi contruído um gráfico força-alongamento, de acordo com a força lida pela célula de carga e o deslocamento do suporte superior móvel. De seguida, foram exportados os valores num documento txt., que foram utilizados para construir os gráficos em Excel.

Foram realizados cinco testes de tração, um para cada provete, utilizando uma velocidade constante de 5 mm/min para o suporte móvel. Com estes testes eram pretendidos gráficos força-alongamento para que fosse possível observar o regime elástico e o regime plástico do provete.



Figura 66 – Máquina utilizada para realizar testes de tração, *Shimadzu AGS-X 10KN*.

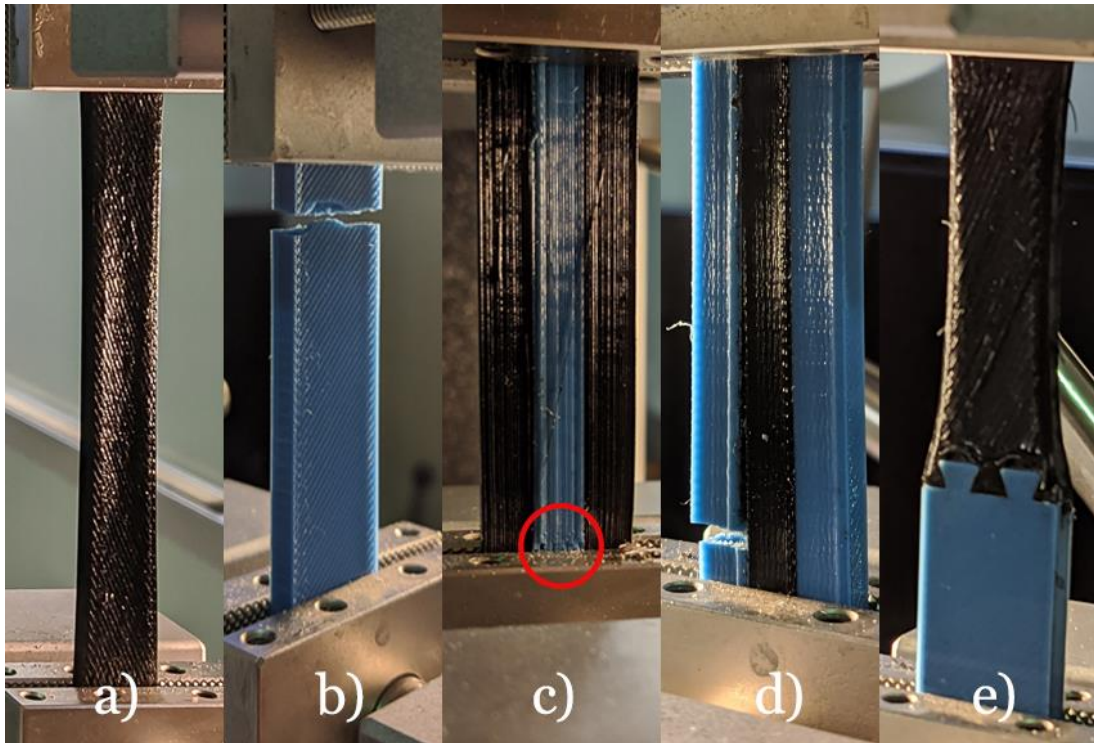


Figura 67 – Provetes após os testes de tração.

Numa análise inicial, observou-se no provete em TPU, figura 67 (a), uma grande estrição típica de uma rutura dúctil. No provete em PLA, figura 67 (b), observou-se uma rutura frágil sem estrição. Para o provete com ambos os materiais combinados em paralelo, com o PLA na parte intermédia (TPU-PLA-TPU), devido à concentração de tensões na garra, verificou-se a fratura do PLA na zona da garra, figura 67 (c). No caso do provete com ambos os materiais combinados em paralelo, com o TPU na parte intermédia (PLA-TPU-PLA), é visível, figura 67 (d), a rutura frágil na zona do PLA, porque este não aguenta grande deformação. Também se verificou a fraca adesão do PLA com o TPU. Por fim, na combinação de ambos os materiais em série, figura 67 (e), observa-se uma falha na ligação química e mecânica entre ambos os materiais, devido à grande diferença de módulo elástico e à correspondente descontinuidade do campo de deformações.

5.3 Resultados experimentais

Para interpretar corretamente os resultados experimentais dos ensaios de tração realizados, é necessário recordar os dois tipos de deformações. A deformação elástica, verifica-se quando o material recupera as suas dimensões originais, após a remoção da força. No caso da deformação plástica, após a remoção da força, o material não recupera as dimensões iniciais, criando-se uma deformação permanente e irreversível.

Assim, é importante garantir que todos os componentes projetados funcionem no regime elástico, sem ultrapassar a tensão limite de elasticidade, de forma a não comprometer o seu bom funcionamento.

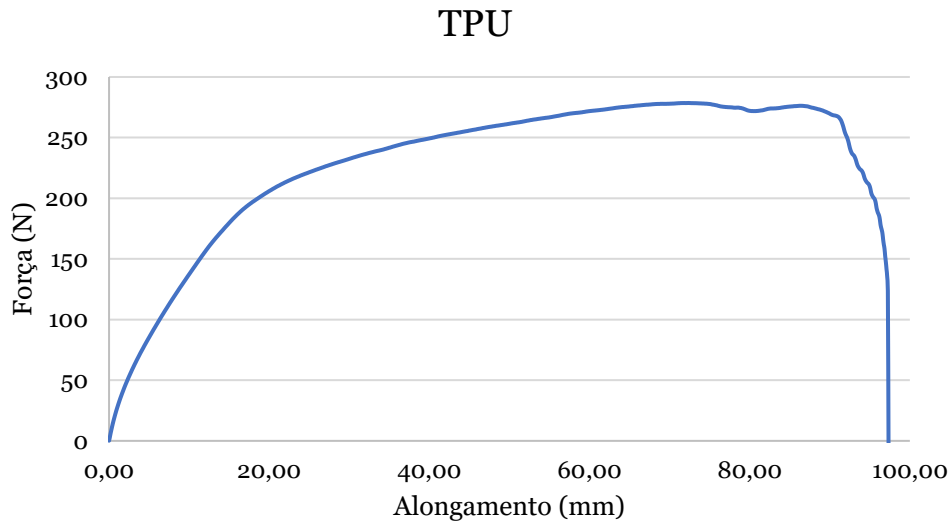


Figura 68 – Gráfico força-alongamento TPU.

O TPU é um termoplástico muito dúctil e flexível, o que permite elevadas deformações tanto no regime elástico como no plástico. No gráfico da figura 68, verificou-se um pico de força máxima inferior a 300 N e um alongamento de cerca de 100 mm até interromper o ensaio. Como seria de esperar, este material não entrou em rutura, verificando-se uma elevada estrição. Após interromper o ensaio, verificou-se uma deformação permanente.

PLA

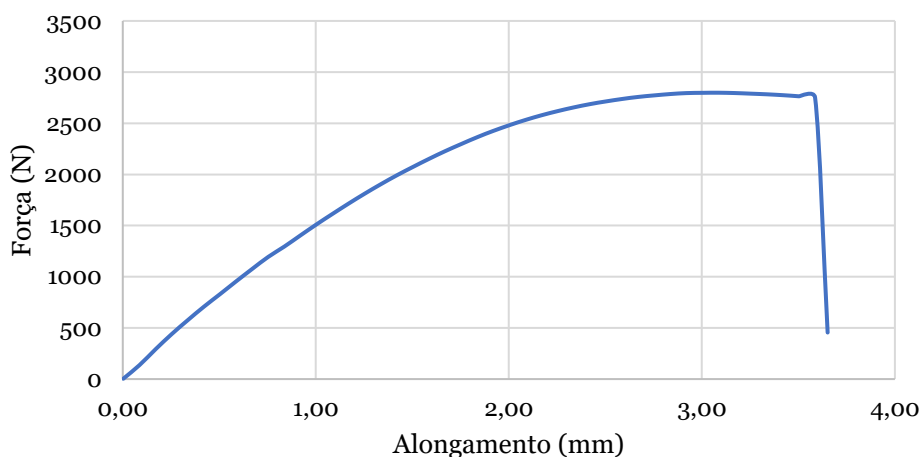


Figura 69 – Gráfico força-alongamento PLA.

O PLA é um polímero frágil e rígido. Por esta razão, apresenta no gráfico da figura 69 um baixo alongamento (menos de 4 mm) em comparação com o TPU. O pico de força máxima foi cerca de 10 vezes superior ao verificado para o TPU, de cerca de 3000 N.

TPU-PLA-TPU

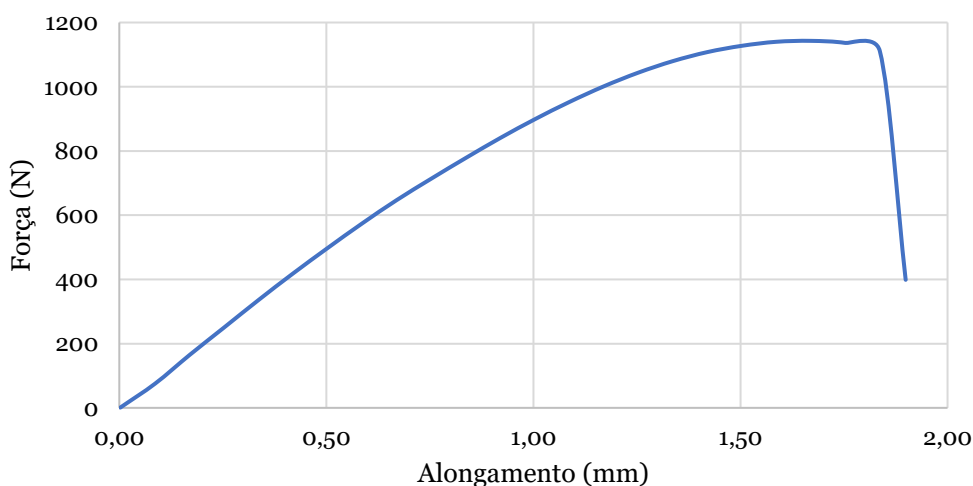


Figura 70 – Gráfico força-alongamento TPU-PLA-TPU.

Na mistura de ambos os materiais em paralelo, no caso TPU-PLA-TPU, observa-se no gráfico da figura 70 um valor de força sustentado pelo material central (PLA). Após a rutura frágil do PLA, o valor da força diminui abruptamente. Se o teste tivesse continuado, os valores da força iriam manter-se até à rutura do TPU, com um alongamento elevado. Como a área de PLA neste provete misto é menor do que o provete de PLA, o pico de força máxima

é significativamente menor, inferior a 1200 N, uma vez que a força total aplicada ao provete é dividida por ambas as áreas de seção resistente. Ou seja:

$$F = F_{PLA} + F_{TPU}$$

Quanto ao alongamento, ambos os materiais sofrem o mesmo alongamento:

$$\delta = \delta_{PLA} = \delta_{TPU}$$

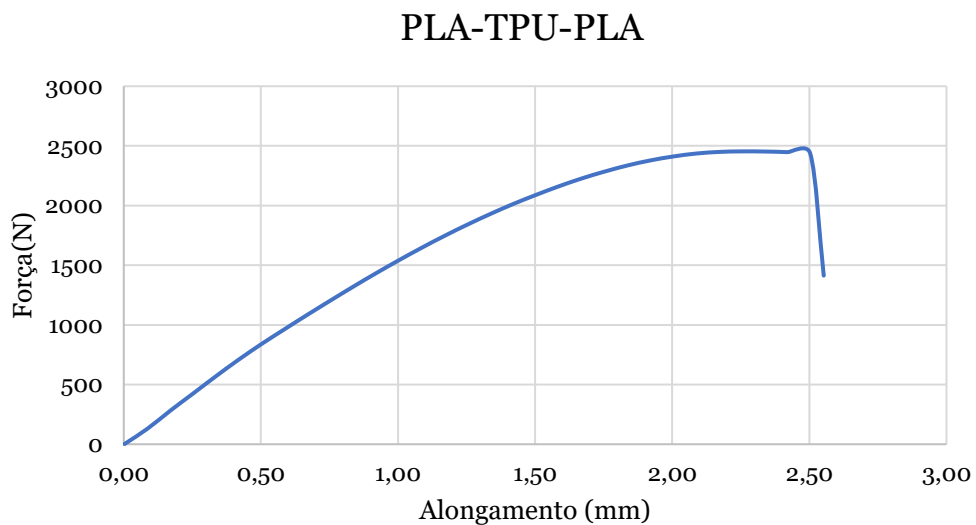


Figura 71 – Gráfico força-alongamento PLA-TPU-PLA.

Nesta combinação de materiais PLA-TPU-PLA, é observado um comportamento semelhante ao PLA. Contudo, observa-se no gráfico da figura 71 uma força menor, de cerca de 2500 N, devido à menor área do PLA e à baixa resistência do TPU.

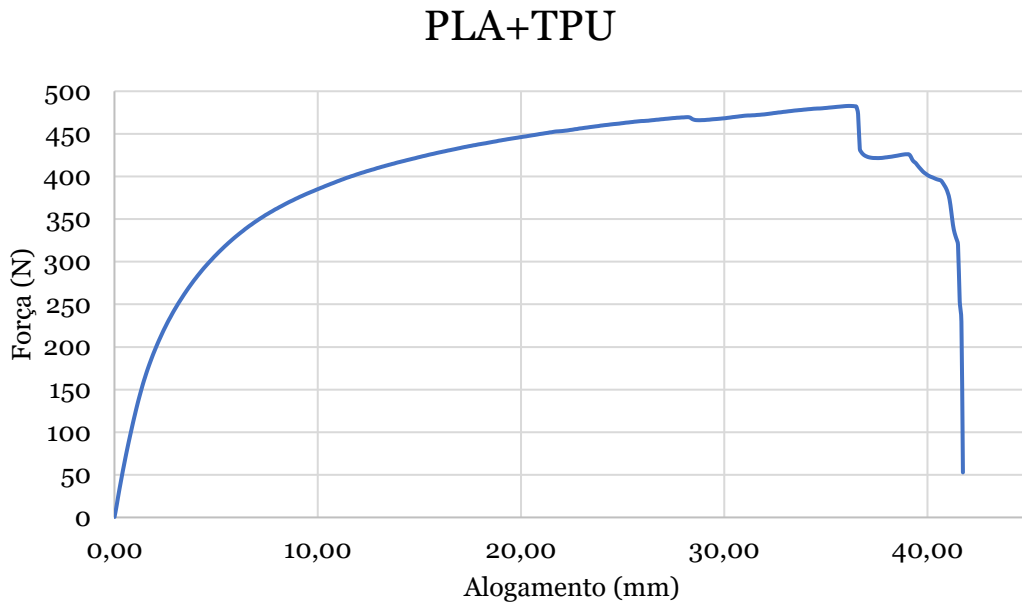


Figura 72 – Gráfico força-alongamento PLA+TPU.

Na combinação em série entre TPU e PLA, observa-se no gráfico da figura 72 uma parte inicial elástica com uma rigidez intermédia entre o PLA e o TPU. Após a região elástica, denota-se uma grande deformação até a separação dos materiais na ligação. Neste caso, a força aplicada ao provete é igual para ambos os materiais. Ou seja:

$$F = F_{\text{PLA}} = F_{\text{TPU}}$$

O alongamento total é a soma dos alongamentos de ambos os materiais:

$$\delta = \delta_{\text{PLA}} + \delta_{\text{TPU}}$$

Comparação entre ensaios

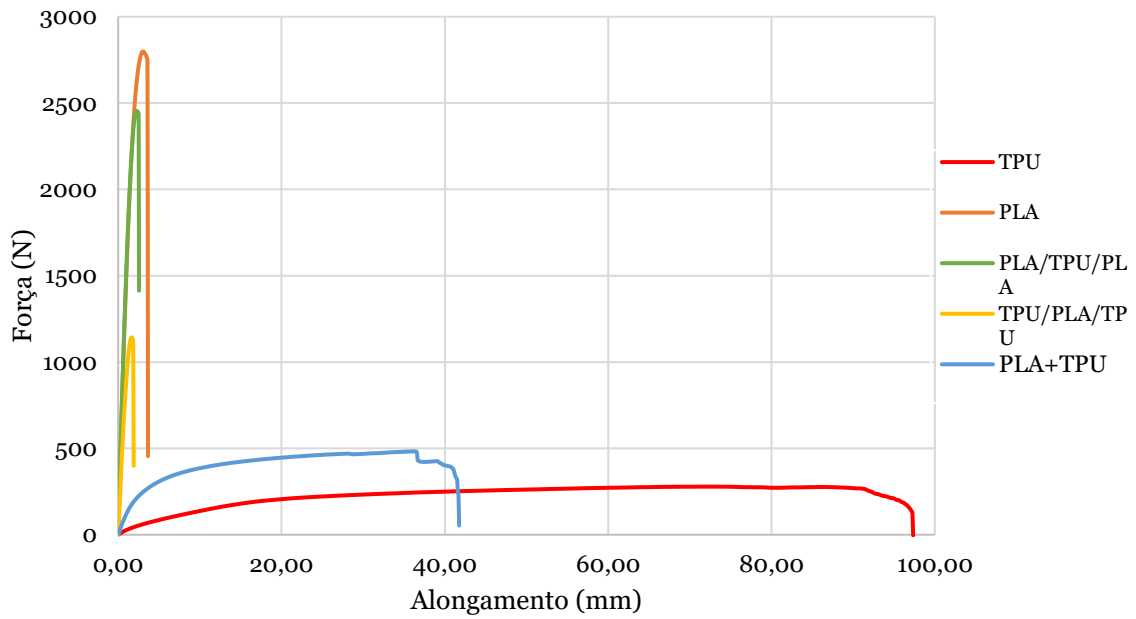


Figura 73 – Gráfico força-alongamento de comparação entre ensaios.

No gráfico da figura 73, pode-se verificar que o TPU apresenta um elevado alongamento em comparação com o PLA, confirmando as suas características de elevada ductilidade e flexibilidade, enquanto que o PLA é frágil e rígido, permitindo forças maiores e alongamentos menores.

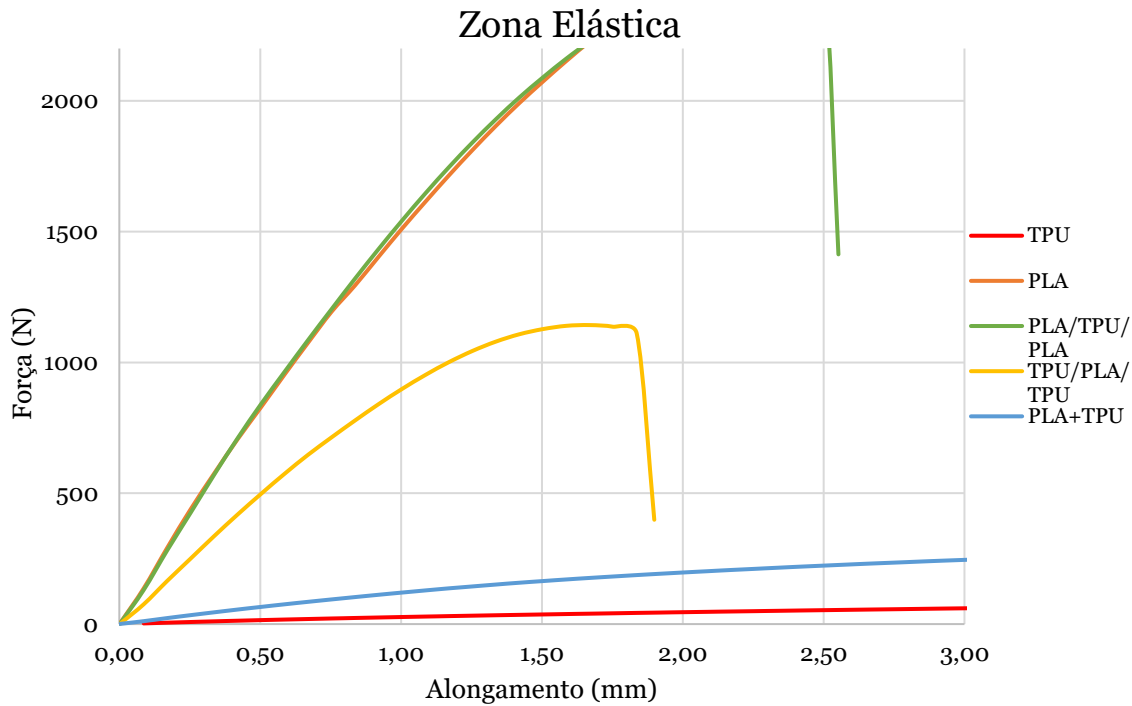


Figura 74 – Gráfico força-alongamento da zona elástica de todos os ensaios.

O comportamento no regime elástico dos provetes multimateriais, tendem notoriamente a combinar o comportamento dos materiais puros. No caso do TPU-PLA-TPU ocupa uma zona media entre os dois materiais. Pode-se concluir que a inclinação da reta no regime elástico é inversamente proporcional à quantidade de TPU presente nas amostras, tal como se pode comprovar no gráfico da figura 74.

Tabela 12 – Dimensões dos provetes e valores dos gráficos

Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm²)	L (mm)	ΔF (N)	Δδ (mm)	F_{max}(N)
TPU	19,99	4,94	98,75	58,21	7,17	0,25	278,56
PLA	19,95	5,23	104,34	58,78	390,234	0,25	2798,37
PLA-TPU-PLA			100,41	58,13	415,479	0,25	2453,97
PLA	6,61	5,13	33,91				
TPU	6,54	5,07	33,16				
PLA	6,50	5,13	33,35				
TPU-PLA-TPU			100,63	57,84	247,4	0,25	1142,84
TPU	6,50	5,04	32,76				
PLA	6,53	5,09	33,24				
TPU	6,79	5,1	34,63				
PLA+TPU			103,29	56,40	31,53	0,25	482,78
PLA	19,99	5,28	105,55	28,20			
TPU	19,89	5,08	101,04	28,20			

Para uma análise mais completa dos resultados experimentais dos ensaios de tração aos provetes dos materiais combinados, em série e em paralelo, é necessário fazer uma analogia entre estes provetes e a combinação de molas ou usando a lei das misturas normalmente usada para prever as propriedades mecânicas de materiais compósitos [55]. Numa mola, a funcionar no regime elástico, verifica-se que o alongamento é proporcional à força aplicada. A constante de proporcionalidade é dada pela constante elástica da mola.

$$F = k\delta \quad (17)$$

k – Constante elástica da mola (N/m)

δ – Alongamento da mola (m)

Assim, uma barra de um material submetido à tração também pode ser vista como uma mola, com a sua própria constante elástica, que depende da seção A , do comprimento L e do módulo de *Young* E . Considerando a lei de *Hooke*, na região elástica a tensão é proporcional à deformação ε , e a constante de proporcionalidade é designada de módulo de *Young*:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (18)$$

Ou seja:

$$\frac{F}{A} = E \cdot \frac{\delta}{L}$$

Assim, a constante elástica de uma barra é dada por:

$$k = \frac{EA}{L} \quad (19)$$

Para os casos (c) e (d) da figura 67 foram consideradas 3 molas em paralelo. Neste caso, como ilustrado na figura 75 a força resultante (F) é a soma das forças que está submetida a cada mola e o alongamento é igual em ambos os materiais.

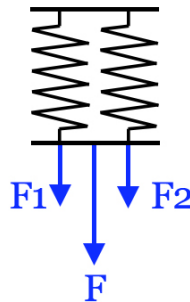


Figura 75 – Esquema de forças de molas em paralelo.

Assim, para a combinação de molas em paralelo tem-se:

$$F = F_1 + F_2 \quad \delta = \delta_1 = \delta_2$$

Substituindo na fórmula (17):

$$F = k \delta = k_1 \delta + k_2 \delta$$

Como o alongamento é igual para ambos, tem-se:

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

Para o único caso da combinação em série, a análise é feita de forma diferente. A força resultante (F) é igual a cada força exercida em cada mola (ver figura 76). O deslocamento total é igual à soma do deslocamento individual de cada mola:

$$F = F_1 = F_2 \quad \delta = \delta_1 + \delta_2$$



Figura 76 – Esquema de forças molas em série.

Como:

$$\delta = \frac{F}{k} \quad (20)$$

Então:

$$\frac{F}{k} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \leftrightarrow \frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \leftrightarrow \frac{1}{k} = \frac{k_2 + k_1}{k_1 \cdot k_2}$$

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (21)$$

Em que k_1 e k_2 são as constantes elásticas das barras de cada material, dados respetivamente por:

$$k_1 = \frac{E_1 A_1}{L_1}$$

$$k_2 = \frac{E_2 A_2}{L_2}$$

E_x – Módulo de *Young* material x (Pa)

A_x – Área de secção material x (m^2)

L_x – Comprimento da barra de material x (m)

Para os cálculos das equações anteriores, é necessário primeiro o cálculo do módulo de *Young* de cada material. Foram utilizados dois pontos da curva força-alongamento na região

elástica. Dessa forma, calculou-se a razão entre as diferença finitas dos dois pontos, entre as forças (ΔF) e os alongamentos correspondentes ($\Delta\delta$). Assim sendo, o módulo de Young é dado pela fórmula (22):

$$E = \frac{\Delta F \cdot L}{A \cdot \Delta\delta} \quad (22)$$

E – Modulo de Young (MPa)

$\Delta\delta$ – Diferença do alongamento do provete entre dois pontos do regime elástico(m)

ΔF – Diferença da força entre dois pontos do regime elástico (N)

Para efeitos de comparação entre os diversos materiais, pode-se também calcular a resistência dos materiais, ou a tensão máxima, que é dada pela fórmula (23):

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad (23)$$

F_{max} – Força máxima registada (N)

Como o preenchimento do provete é de 50%, é necessário multiplicar a área da secção resistente por 0,5.

Substituindo na fórmula (22) para o caso do PLA:

$$E \text{ (PLA)} = \frac{390,23 \cdot 58,78}{0,5 \cdot 104,34 \cdot 0,25} = 1758,73 \text{ MPa}$$

Tabela 13 – Resultados obtidos para os provetes multimateriais.

Provete	E (MPa)	$K=F/\delta$ (N/mm)	K experimental (N/mm)	σ (MPa)
TPU	34	2,87E+04	2,87E+04	6
PLA	1759	1,56E+06	1,56E+06	54
PLA+TPU+PLA	1924	1,66E+06	1,03E+06	49
PLA			5,13E+05	
TPU			9,64E+03	
PLA			5,04E+05	
TPU+PLA+TPU	1138	9,90E+05	5,25E+05	23
TPU			9,58E+03	
PLA			5,05E+05	
TPU			1,01E+04	
PLA+TPU	138	1,26E+05	5,95E+04	9
PLA			3,29E+06	
TPU			6,06E+04	

Um dos objetivos era testar a impressão multimaterial é a verificação da adesão entre os materiais. Dessa forma, não foram feitos vários testes para cada caso, de forma a obter resultados médios. Assim sendo, todos os valores apresentados são de uma amostra e não são tomados como referência. Contudo, é importante discuti-los para obter conclusões.

Quando são combinados os dois materiais, é notório o decréscimo do valor do módulo elástico. Porém, no caso do PLA-TPU-PLA isso não se verifica, podendo estar associado ao desvio padrão esperado. É por isso recomendável a realização de um maior número de testes num trabalho futuro.

Dos resultados dos ensaios de tração ao PLA, registou-se um valor de 1759 MPa para o módulo elástico e 54 MPa para a resistência à tração. No caso do TPU, os valores são notoriamente baixos em comparação com o PLA, sendo de 34 MPa para o módulo elástico e 6 MPa para a resistência à tração. Na referência bibliográfica [54] verificam-se resultados semelhantes com os descritos anteriormente.

Nos provetes em que a quantidade de TPU é mais elevada, apresenta-se, naturalmente, um maior alongamento e, portanto, um módulo elástico mais baixo e uma menor tensão máxima. Nos casos em que a quantidade de PLA (mais rígido) é maior, a rigidez do conjunto aproxima-se do modelo de molas em paralelo.

No provete em série, existem problemas na adesão, apesar do reforço da ligação mecânica complementar a ligação puramente química entre os dois materiais, como sugerido na

bibliografia [54]. Por esta razão o modelo de molas em série não é capaz de prever a constante elástica combinada dos dois materiais.

5.4 Impressão multicores

Para a vertente multicores, foi necessário fazer algumas alterações ao *firmware* para que se desse a mistura de filamentos. A principal diferença do pretendido para a impressão a cores (sem mistura) ou multimateriais, é no número de motores declarados no início do código em EXTRUDERS como 1. Contudo, a meio do código é feita a ativação da linha de código MIXING_EXTRUDER, com MIXING_STEPPERS 3, pois o número de motores que se pretende “misturar” são 3, com 16 ferramentas virtuais em MIXING_VIRTUAL_TOOLS, que correspondem ao número de cores. Assim sendo, foi adicionado no *Repetier-Host* um *script* intitulado como “Início de código” com o código de cada cor, ou seja, para cada cor a quantidade de filamento de cada extrusora para obtenção da cor pretendida. No mesmo *software* são criadas 16 extrusoras virtuais, em que é configurada a cor de cada uma de acordo o código “Red, Green, Blue” (RGB) da figura 77 para fins de visualização de cores na preparação da peça no *software*.

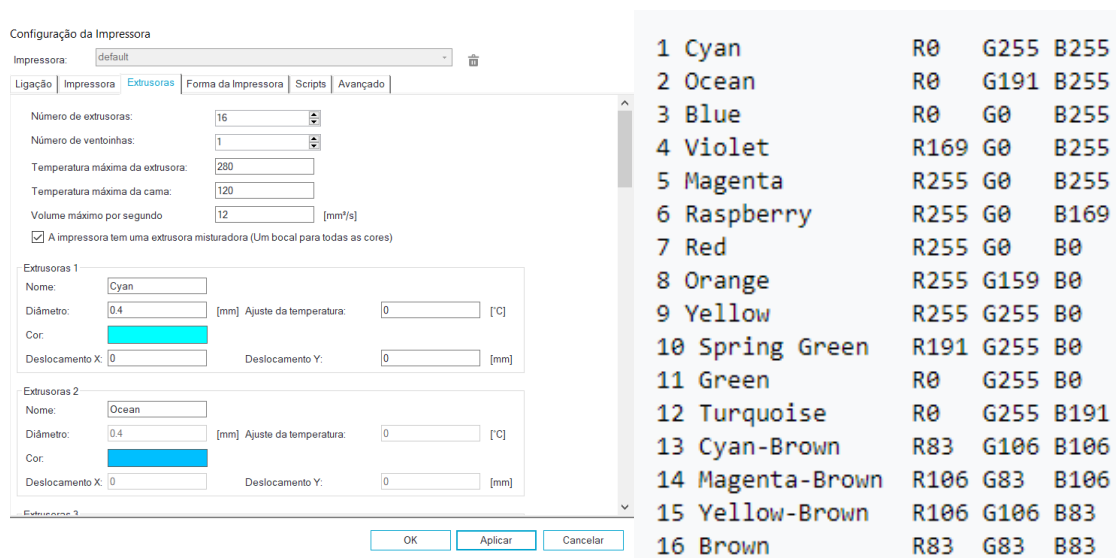


Figura 77 – À esquerda, aspeto da janela de configuração das cores de cada extrusora virtual; à direita, código RGB das cores das extrusoras virtuais [56].

Na figura 78, é demonstrado um exemplo do código para a cor verde. O código começa com comando M163 que define a percentagem de material a ser misturado. O parâmetro S é relativo à extrusora. Por exemplo, S0 corresponde à extrusora 0. O parâmetro P define a quantidade de material. Por fim, a cor fica guardada, através do comando M164 com S

(número da cor). Essa cor pode ser chamada ao longo do código G, através do comando T (número de cor).

```
; Green  
M163 S0 P1  
M163 S1 P0  
M163 S2 P1  
M164 S10
```

Figura 78 – Código de mistura para a cor verde.

Para exemplificar a potencialidade deste conceito, imprimiu-se um vaso com um espectro de cores semelhante ao arco-íris. Para a impressão deste vaso descarregado na plataforma *thingiverse* [57], adicionou-se também uma torre de limpeza para melhorar a eficiência na limpeza do bico. Este conjunto foi, inicialmente, fatiado com as configurações que foram utilizadas na impressão multimateriais. De seguida, fizeram-se alterações ao código de forma a fazer um espectro de cores semelhante ao arco-íris. Assim, foi dividida a altura total da peça (100 mm) por 12 cores pretendidas, na qual se obteve uma divisão por cor de aproximadamente 8 mm. Logo, como podemos ver no exemplo da figura 79, a cor T10 (green) foi colocada na camada Z57.403.

```
G1 Z57.403 F3000.000  
T10  
G10  
G92 E0  
G1 X140.912 Y209.352 F3000.000
```

Figura 79 – Referência à cor verde (green) no código G do vaso.

Após introdução de todos os códigos referentes às 12 cores, obteve-se o espectro pretendido como visível na figura 80.

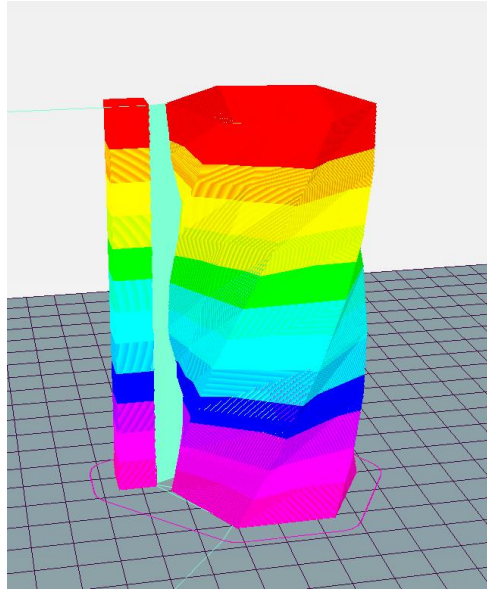


Figura 80 – Vaso multicolor pronto para impressão.

Durante a impressão, observou-se uma deficiente extrusão na zona dos vermelhos figura 81 (1). Dessa forma, foi aumentado o fluxo durante a impressão para 150%. Esse fluxo foi repostado quando houve uma transição para a zona azul, a 100%, mantendo-se assim até ao final da impressão. Dessa forma, é possível observar-se que no final da impressão (3), quando utiliza a cor T6 (red), há novamente uma fraca extrusão.



Figura 81 – Resultado do teste de impressão multicolor (mistura de filamentos).

Verificado esse erro, tentou-se novamente calibrar os passos da extrusora *direct drive* (responsável pelo filamento vermelho) e abrigou-se que a alteração desse parâmetro não originou nenhuma mudança. Dessa forma, em fase de depuração, alterou-se os passos da extrusora E0 e verificou-se que a extrusora em questão extrudiu o filamento pretendido. Contudo, as restantes extrusoras apresentavam excesso de extrusão. Verificando-se isto, fez-se uma pesquisa intensiva e percebeu-se que era um problema, frequentemente relatado pelos utilizadores que usavam extrusoras diferentes na alimentação deste bico extrusor. Assim, conclui-se que existe uma limitação de *firmware*, pois quando o MIXING EXTRUDER é ativo, o *firmware* assume o valor dos passos da primeira extrusora (E0) para as restantes extrusoras (E1 e E2). Posto isto, é recomendado a utilização de extrusoras iguais para contornar essa limitação.

Por fim, na figura 81 em (3), é observado um efeito “pasta de dentes” por falha na mistura dos filamentos. Essa falha poderá ser causada pelas fracas tensões de corte existentes dentro da câmara de mistura, assim como, da temperatura de fusão. Desta forma, num trabalho futuro será importante fazer vários testes de mistura de cor a diferentes temperaturas.

Perante este problema, decidiu-se imprimir um cone [58] em três cores de forma a testar a impressão com três filamentos. Para a impressão desta peça, foi adotada a mesma configuração a nível de *firmware*, utilizada para os testes multimateriais, bem como, a configuração a nível de *software*.



Figura 82 – Cone impresso em 3 cores.

A impressão foi realizada sem recurso a torres de purga para evitar o desperdício de filamento. Por sua vez, foi desativado no *Repetier-Host* a opção “Perímetro antes do

enchimento” para que fosse primeiro impressa a parte interna do cone, pela razão de ser feita a limpeza da câmara de mistura ao longo do enchimento antes de imprimir a camada externa. Como observado na figura 82, essa transição ocorreu tal como esperado. No entanto, observou-se umas “bolhas” na zona do filamento amarelo. O surgimento desses defeitos pode estar associado à humidade no filamento. É sugerido para trabalhos futuros uma estrutura fechada para minimizar a influência de agentes deste tipo.

Capítulo 6

Conclusão e propostas de trabalhos futuros

6.1 Conclusão

Devido à crescente importância da impressão 3D tanto a nível industrial como doméstico, foi desejado um sistema de baixo custo que possibilitasse a impressão, na generalidade, dos materiais, assim como, a impressão de um grande leque de cores. Após a definição dos objetivos, fez-se um estado da arte, para adquirir conhecimentos dos demais tipos de impressão 3D, bem como, de todos os sistemas de impressão mais versáteis e as tendências de expansão desta área.

Foi feita uma análise da impressora 3D de forma a verificar as possíveis otimizações. Foram projetadas algumas peças para adaptação dos novos componentes, que foram desenhadas em CAD com alguma facilidade. Contudo, na maioria delas foram impressas diversas vezes pelo facto de os componentes utilizados nos *assemblys* não corresponderem, linearmente, às medidas dos componentes adquiridos, em simultâneo, que se identificava deformações durante a impressão que causasse conflito na montagem.

A substituição da placa controladora e a instalação de uns microcontroladores evoluídos com características de redução de ruído, foi surpreendente, pois permitiu solucionar um grande inconveniente, principalmente, nas impressões mais demoradas nos períodos noturnos.

Dos diversos problemas encontrados, concluiu-se que quando há troca de uma grande parte do *hardware* é necessário calibrar todos os componentes possíveis, conseguindo-se obter os melhores resultados e, conseqüente, diminuição de problemas associados.

Após adaptação do sistema *direct drive* ao bico extrusor *Diamond Hotend*, demonstrou-se que é possível a impressão de grande parte dos filamentos comerciais, enquanto se mantém todas as suas características de rápida transição de cor, traduzindo-se na poupança de material desperdiçado nas torres de purga. Os efeitos da retração neste bico foram uma fonte de preocupação, pois o sucesso e a qualidade das impressões estão diretamente relacionados. Foram necessárias diversas tentativas iniciais para encontrar valores viáveis,

que implicaram desmontar o sistema de extrusão diversas vezes, pelos constantes entupimentos.

Dos testes realizados com multimateriais, pode-se concluir que a junção é viável em peças que não sejam muito solicitadas, todavia, é necessário utilizar um *design* adequado na fronteira entre os materiais.

Nos testes de multicores foi verificado uma limitação a nível de *firmware* quando é pretendido a mistura de filamentos com extrusoras de tipologia diferente. Nos testes de impressão a cor sem mistura, demonstraram-se resultados satisfatórios de impressão, com nota em alguns defeitos apontados numa primeira instância a agentes externos.

Em suma, pode-se confirmar a possível otimização de uma impressora 3D, bem como, a implementação de um sistema para impressão em multicores e multimateriais, após o procedimento adotado. Chegou-se à conclusão de que a melhor condição de ensaio é a impressão em multimateriais ou a impressão a cores sem mistura de filamentos.

6.2 Trabalhos futuros

Após conclusão dos principais objetivos deste trabalho são sugeridos os seguintes trabalhos de propostas futuras:

- Substituição das duas extrusoras *bowden* por duas extrusoras *direct drive* de características iguais à já implementada, de forma a contornar a limitação de *firmware*;
- Criação de uma tampa para a caixa do *hardware*;
- Instalação de um ventilador na mesma caixa, por forma a ventilar todos os componentes;
- Repetição dos testes multimateriais com maior número de ensaios para os mesmos provetes;
- Impressão de todas as cores possíveis a várias temperaturas para verificação do ponto ótimo de mistura;
- Criação de uma estrutura fechada, com controlo de temperatura e humidade, para minimizar a influência de elementos externos;
- Implementação de um relé de corte de energia após termino da impressão, assim como, uma *Uninterruptible Power Supply* (UPS).

Bibliografia

- [1] N. Volpato, *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher, 2017.
- [2] R. Leering, «3D printing: a threat to global trade». ING, Set. 28, 2017, (acedido Jul. 18, 2020).
- [3] «3D printing trends 2020», 3D HUBS, Jan. 2020.
- [4] Aires, M. D. O. , Rosa, A. C. M., Gyori, C. A. M., Reis, C. R. G. & Buttignon, K. «Indústria 4.0: a manufatura aditiva como ferramenta de inovação e otimização / Industry 4.0: additive manufacture as an innovation and optimization tool», *Braz. J. Bus.*, vol. 1, n. 4, Art. n. 4, Nov. 2019.
- [5] «The State of 3D Printing Report: 2020 by Sculpteo», *Sculpteo*. <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2020/> (acedido Jan. 28, 2021).
- [6] *BBC Horizon (1964) with Arthur C. Clarke (Part 2 of 2)*. .
- [7] Matias, E. & Rao, B. «3D printing: On its historical evolution and the implications for business», em *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, Portland, OR, USA, Ago. 2015, pp. 551–558, doi: [10.1109/PICMET.2015.7273052](https://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273052).
- [8] «The Official History of the RepRap Project», *All3DP*, Abr. 08, 2016. <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/> (acedido Abr. 23, 2020).
- [9] «The Realization». https://reprap.org/wiki/About#The_Realization (acedido Jan. 28, 2021).
- [10] «The History of 3D Printing», *MakerBot*, Mar. 19, 2019. <https://www.makerbot.com/stories/engineering/history-of-3d-printing/> (acedido Abr. 27, 2020).

- [11] «Most used 3D printing technologies 2020», *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/> (acedido Ago. 29, 2020).
- [12] «Tipos de Impressão 3D: conheça os seus benefícios!», *3D Lab*, Set. 25, 2018. <https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/> (acedido Jun. 05, 2020).
- [13] Jasveer, S & Jianbin, X «Comparison of Different Types of 3D Printing Technologies», *Int. J. Sci. Res. Publ. IJSRP*, vol. 8, n. 4, Abr. 2018, doi: [10.29322/IJSRP.8.4.2018.p7602](https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.4.2018.p7602).
- [14] «HP3D Technical White Paper». <https://reinvent.hp.com/us-en-3dprint-wp-technical> (acedido Jan. 26, 2021).
- [15] «Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained», *All3DP*, Abr. 13, 2019. <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/> (acedido Dez. 27, 2020).
- [16] «Como Funciona A Tecnologia DMLS: Sinterização Direta A Laser De Metal», *EngiPrinters Engenharia e Impressão 3D*. <https://engiprinters.com.br/como-funciona-a-tecnologia-dmls-sinterizacao-direta-a-laser-de-metal/> (acedido Dez. 27, 2020).
- [17] «CoreXY 3D Printer: Why It Makes a Difference», *All3DP*, Out. 06, 2019. <https://all3dp.com/2/corexy-3d-printer-is-it-worth-buying/> (acedido Jul. 14, 2020).
- [18] Anderson, T. «Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work?», *MatterHackers*. /articles/anatomy-of-a-3d-printer (acedido Jan. 28, 2021).
- [19] «Direct Drive, Bowden, Remote Motor, the differences...», *SpiderBot by Qualup*, Fev. 01, 2019. <http://www.spiderbot.eu/direct-drive-bowden-remote-motor-the-differences/?lang=en> (acedido Jan. 10, 2021).
- [20] «Fused Deposition Modeling, FDM». /en/fused-deposition-modeling-fdm (acedido Abr. 28, 2020).

- [21] «Tipos de extrusoras 3D e HotEnd». https://filament2print.com/pt/blog/36_tipos-extrusoras-3d-e-hotend.html (acedido Set. 14, 2020).
- [22] eCycle, E. «Plástico PLA: alternativa biodegradável e compostável», *eCycle*. <https://www.ecycle.com.br/738-plastico-pla> (acedido Mai. 18, 2020).
- [23] Brito, G. F., Araújo, E. M. A. P. & Mélo, T. J. A. «Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes», Set. 2011.
- [24] «Os 25 melhores filamentos para impressoras 3D de 2020», *All3DP*, Fev. 25, 2020. <https://all3dp.com/pt/1/filamento-impressora-3d-comparacao-melhor-tipo/> (acedido Mai. 18, 2020).
- [25] «Guia de comparação dos filamentos para impressora 3D!», *3D Lab*, Fev. 12, 2019. <https://3dlab.com.br/comparativo-filamentos-para-impressora-3d/> (acedido Mai. 22, 2020).
- [26] «PVA Filament – The Basics & Best Brands», *All3DP*. <https://all3dp.com/2/pva-filament-explained-and-compared/> (acedido Mai. 19, 2020).
- [27] «Multi-Material 3D Printing Guide», *All3DP*, Ago. 11, 2019. <https://all3dp.com/2/multi-material-3d-printing-an-overview/> (acedido Abr. 02, 2020).
- [28] «Original Prusa i3 Multi Material 2.0», *Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša*. <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-multi-material-2-0/> (acedido Jan. 26, 2021).
- [29] «Diamond Nozzle for multi-color and multi-material 3D printing». <https://www.reprap.me/diamond-fullcolor-nozzle.html> (acedido Set. 15, 2020).
- [30] «Diamond Hotend - RepRap». https://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend (acedido Jan. 28, 2021).
- [31] F. for Launch, «The QuadFusion 3D Print Head - The First Four Material Mixing 3D Extruder - Making Color 3D Printing Possible», *Fit for Launch*. <https://fitforlaunch.com/projects/the-quadfusion-print-head-making-color-3d-printing#section2> (acedido Jul. 27, 2020).

- [32] «A Look Ahead in 3D Printing with Gartner’s Pete Basiliere «Fabbaloo»». <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/1/10/a-look-ahead-in-3d-printing-with-gartners-pete-basiliere> (acedido Jan. 29, 2021).
- [33] «Hype Cycle Research Methodology», *Gartner*. <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (acedido Mai. 22, 2020).
- [34] «Reebok releases Liquid Factory 3D printed Floatride Run sneakers in the U.S.», *3D Printing Industry*, Mar. 23, 2018. <https://3dprintingindustry.com/news/reebok-releases-liquid-factory-3d-printed-floatride-run-sneakers-u-s-131033/> (acedido Jul. 09, 2020).
- [35] «The Future of Jobs», *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs/> (acedido Jan. 28, 2021).
- [36] «7 Exciting Examples of 3D Printing in the Automotive Industry», *AMFG*, Mai. 28, 2019. <https://amfg.ai/2019/05/28/7-exciting-examples-of-3d-printing-in-the-automotive-industry/> (acedido Jul. 14, 2020).
- [37] Nica, G. «BMW Used 1 Million 3D Printed Parts for Its Cars over the Last Decade», *BMW BLOG*, Nov. 13, 2018. <https://www.bmwblog.com/2018/11/13/bmw-used-1-million-3d-printed-parts-for-its-cars-over-the-last-decade/> (acedido Jul. 20, 2020).
- [38] «BMW opens new €15 million additive manufacturing campus in Munich to “industrialize 3D printing”», *3D Printing Industry*, Jul. 01, 2020. <https://3dprintingindustry.com/news/bmw-opens-new-e15-million-additive-manufacturing-campus-in-munich-to-industrialize-3d-printing-173039/> (acedido Jul. 20, 2020).
- [39] «Creality3D CR-10S 3D Printer New Version (Random Color)», *Creality 3D*. <https://creality3d.shop/products/creality-cr-10s-diy-desktop-3d-printer-300x300x400mm> (acedido Jan. 29, 2021).
- [40] Abreu, J. T. F. «Desenvolvimento de uma Impressora FDM tipo Delta», Mar. 2017, (acedido Jan. 06, 2021). <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/103416>.
- [41] CAPKIN, M. «SKR PRO V1.1 User Manual». BIGTREE TECHNOLOGY CO., LTD.

- [42] 3DAddict, «Stepper Drivers Guide for 3D Printer Mainboards», *3DAddict*, Abr. 27, 2019. <https://3daddict.com/stepper-drivers-guide-for-3d-printer-mainboards/> (acedido Nov. 11, 2020).
- [43] «What is a Step Motor? | Applied Motion». <https://www.applied-motion.com/support/what-is-a-step-motor> (acedido Jan. 13, 2021).
- [44] «Microstepping», *Trinamic*. <https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/microstepping/> (acedido Jan. 24, 2021).
- [45] Thingiverse.com, «CR-10 Top Mounted Spool Holder by STSmith94». <https://www.thingiverse.com/thing:2727179> (acedido Jan. 13, 2021).
- [46] Thingiverse.com, «Diamond cooler shield PRUSA i3 by Elpo». <https://www.thingiverse.com/thing:1370444> (acedido Jan. 13, 2021).
- [47] Thingiverse.com, «Creality Adapter Plate for RepRap Diamond Hotend Universal Mount by BlueCurtain». <https://www.thingiverse.com/thing:4215691> (acedido Jan. 13, 2021).
- [48] Thingiverse.com, «SKR PRO V1.1 / TFT24 for Creality CR-X by Mouses». <https://www.thingiverse.com/thing:3838770> (acedido Jan. 13, 2021).
- [49] Vieira, A. «Tópico 5-Apoios de veios Notas de aulas 2019-Orgãos de Máquinas», Universidade da Beira Interior.
- [50] Regadas, J. J. L. M. «Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores», Jul. 2017, (acedido Jan. 02, 2021). <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/105218>.
- [51] «AN045: TRINAMIC Technology Access Package». TRINAMIC Motion Control GmbH & Co, Jul. 2020, https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Support/Appnotes/AN045-How_to_replace_Allegro_A4988_with_TMC2208_01.pdf.
- [52] «TMC2208 - FYSETC WIKI». <https://wiki.fysetc.com/TMC2208/> (acedido Jan. 29, 2021).

- [53] «Bondtech Firmware Updates For Bondtech Extruders», *Bondtech*. <https://www.bondtech.se/en/knowledge-base/firmware-updates-for-bondtech-extruders/> (acedido Jan. 26, 2021).
- [54] Lopes, L. R., Silva, A. F. & Carneiro, O. S. «Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the boundary interface performance», *Addit. Manuf.*, vol. 23, pp. 45–52, Out. 2018, doi: [10.1016/j.addma.2018.06.027](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.027).
- [55] Costa, A. e Vieira, J «Ciência e Tecnologia dos Materiais-Tecnologia dos Materiais Compósitos», Universidade da Beira Interior.
- [56] «Repetier Color Mixing - RepRap». https://reprap.org/wiki/Repetier_Color_Mixing (acedido Jan. 24, 2021).
- [57] Thingiverse.com, «Twisted 6-sided Vase Basic by MaakMijnIdee». <https://www.thingiverse.com/thing:18672> (acedido Jan. 24, 2021).
- [58] Thingiverse.com, «Tri-Colour Traffic Cone by RepRapPro». <https://www.thingiverse.com/thing:49702> (acedido Jan. 29, 2021).
- [59] «625-Z | SKF». <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-625-Z> (acedido Jan. 28, 2021).

Anexos

Anexo A: Montagem dos componentes

a) Montagem da caixa

1 – A base da caixa foi fixada à fonte de alimentação com 4 parafusos (M4 × 8 mm) que fixavam a mesma na caixa original.

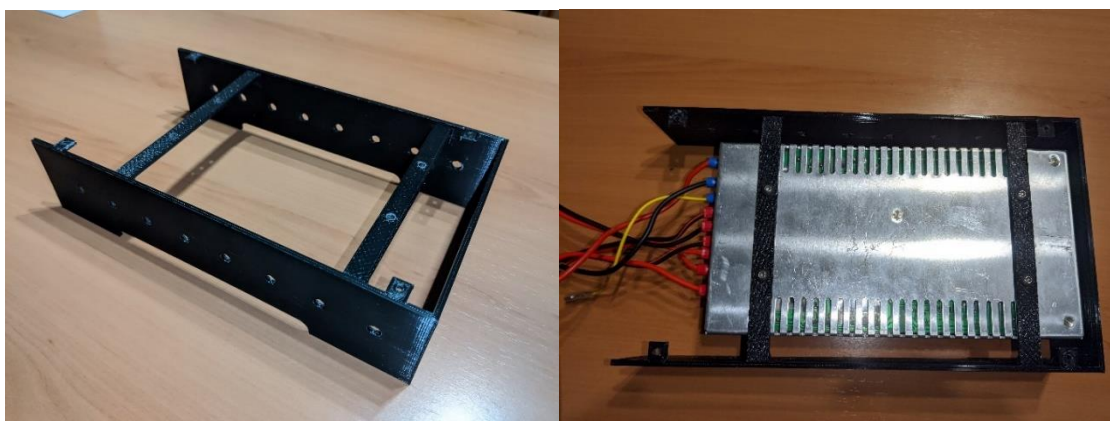


Figura 83 – Acoplamento da base da caixa à fonte de alimentação.

2 – Foi montada a ficha IEC 3P com um fusível na estrutura da caixa com recurso a dois parafusos M2 (já existentes), encaixou-se o interruptor na estrutura. Colocou-se os conectores metálicos dos cabos da cama aquecida e da cabeça de extrusão.



Figura 84 – Acoplamento da ficha IEC 3P, do interruptor e dos conectores.

3 – Uniu-se as duas partes da caixa através de 4 Parafusos M3x30, 4 anilhas e 4 porcas m3.



Figura 85 – União da caixa com a respetiva base.

5 – Instalou-se o LCD, recorrendo a 4 parafusos auto-roscentes de 3 mm.



Figura 86 – Ecrã LCD instalado.

6 – Colocou-se os *jumpers* em MS0 e MS1.

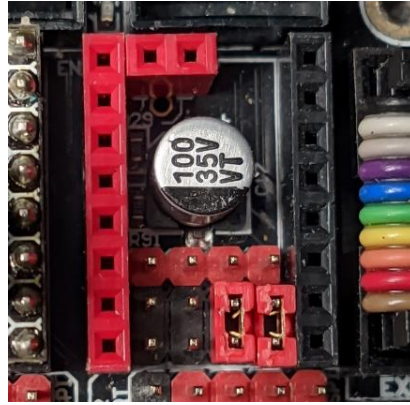


Figura 87 – Ligação os *jumpers* em MS0 e MS1.

7- Montou-se a placa controladora recorrendo a dois parafusos M2(já existentes). Após fixação, foram feitas as ligações das duas fichas do LCD e os fios condutores que alimentam a placa mãe. Foram colocados os drivers dos 3 eixos (XYZ) e da extrusora.

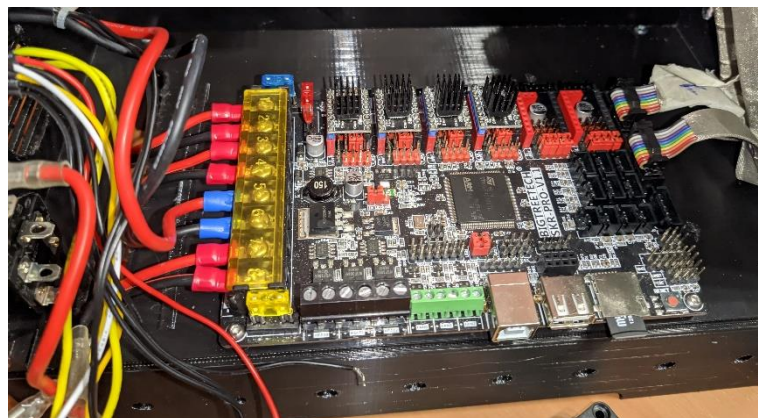


Figura 88-Fixação inicial da placa controladora e ligação dos condutores

8 – Montou-se o canal de ventilação com dois parafusos M3 × 26(inicialmente, 30 mm) no mesmos orifícios da placa mãe de forma a fixar a mesma (anteriormente, só tinham sido colocados 2 parafusos), tal como a ventilador de refrigeração dos *drivers* com 4 parafusos M3 × 30 mm

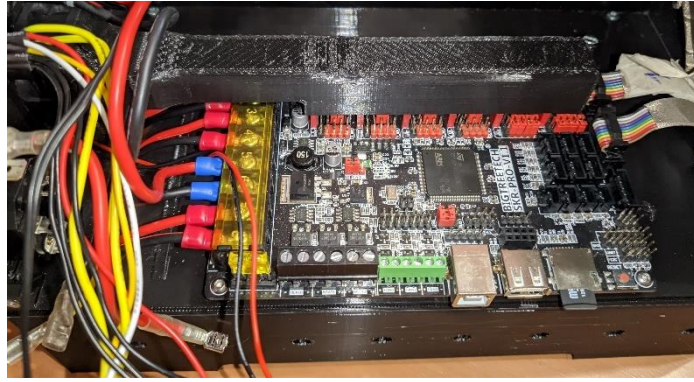


Figura 89 – Montagem do ventilador, do bocal do ventilador e o canal de ventilação.

9 – Colocou-se o passa fios em borracha no orifício do lado esquerdo e os respectivos condutores. Acondicionou-se os condutores da fonte de alimentação com abraçadeiras plásticas, no suporte desenhado para esse fim.



Figura 90 – Vista posterior da caixa.

10 – Foram ligados todos os condutores (alimentação da cama aquecida, alimentação da cabeça extrusora e ventiladores), tal como todas as fichas (sensores de fim de curso, motores de passo, sensores de temperatura).

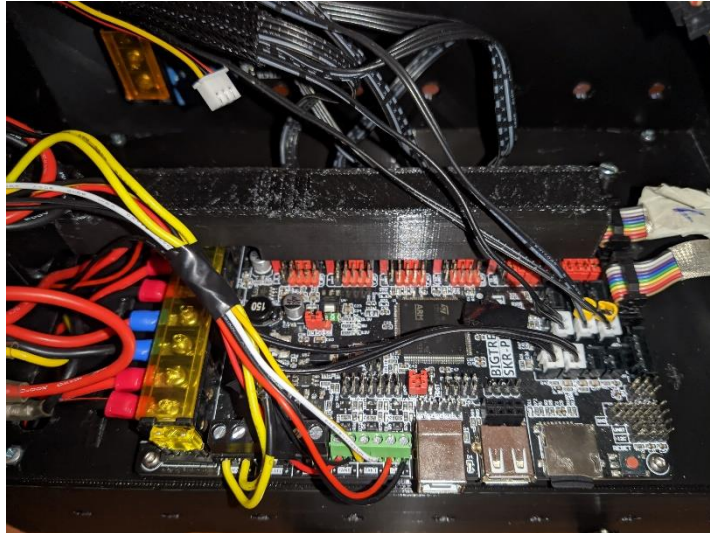


Figura 91 – Ligação de todos os condutores.



Figura 92 – Vista do aspeto final.

b) Montagem da cabeça de extrusão

11 – Encaixou-se a cabeça extrusora num suporte impresso e acondicionou-se os condutores no interior com ajuda de uma abraçadeira de plástico com serrilha.

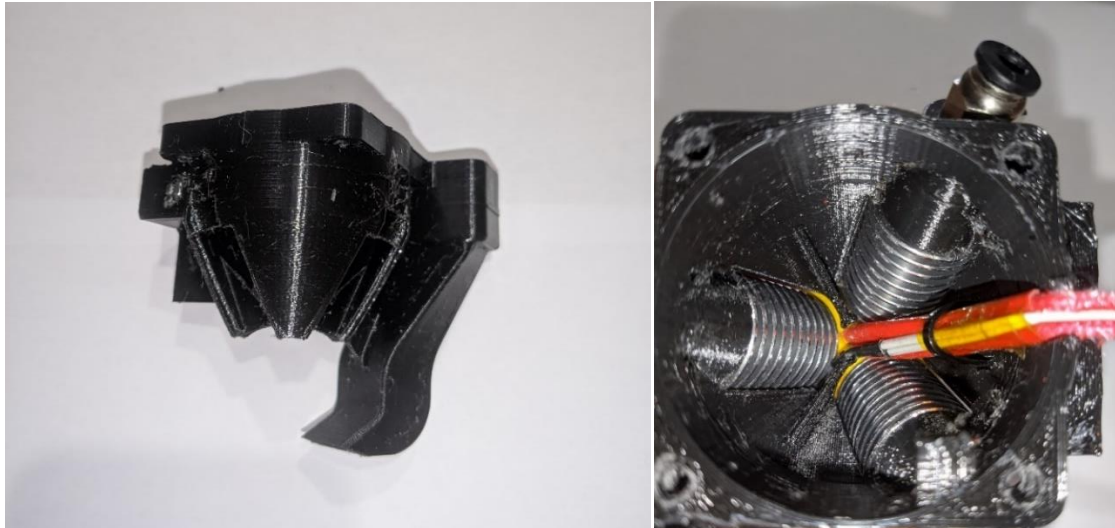


Figura 93 – Junção bico extrusor com o suporte.

12 – Para garantir que as duas peças não se iriam separar colocou-se 3 abraçadeiras plásticas com serrilha no topo dos dissipadores.

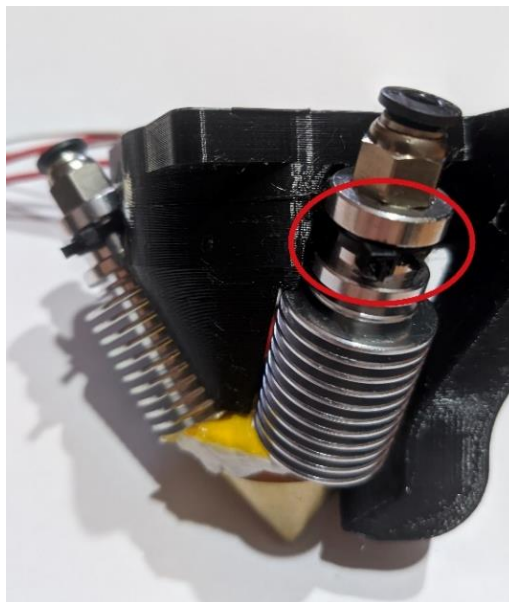


Figura 94 – Fixação do bico extrusor ao suporte com abraçadeiras plásticas.

13 – Acoplou-se o ventilador e o suporte para a extrusora *direct drive* no suporte da cabeça de extrusão com 4 parafusos M4 × 20 mm.

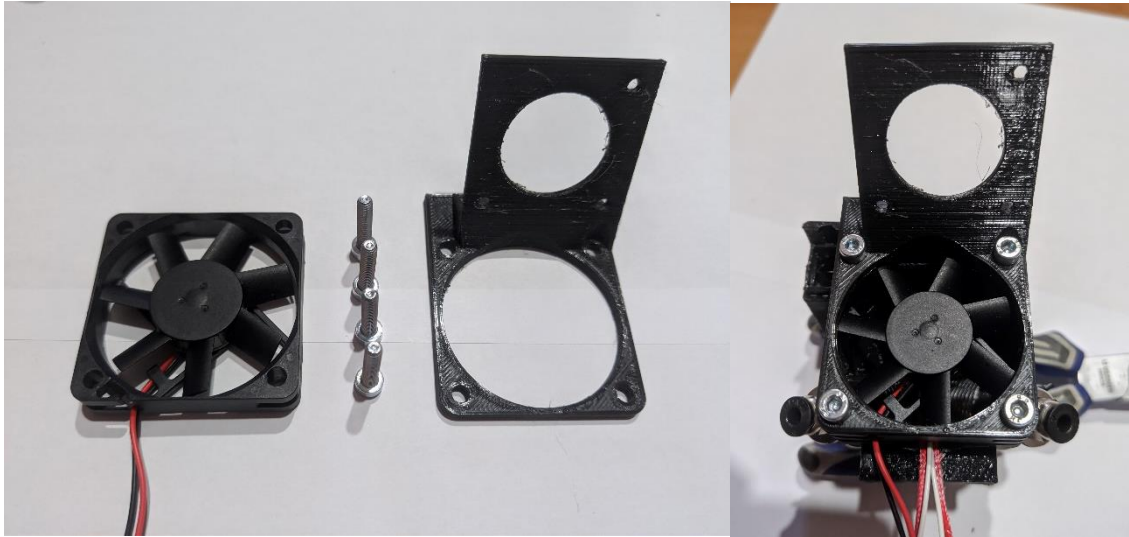


Figura 95 – Fixação do ventilador do bico extrusor e suporte da extrusora *direct drive*.

14 – Cortou-se um tubo PTFE com 74 mm, inseriu-se no radiador central, e procedeu-se à montagem da extrusora motor de passo com 3 parafusos $M3 \times 35$ mm (fornecidos com a extrusora).

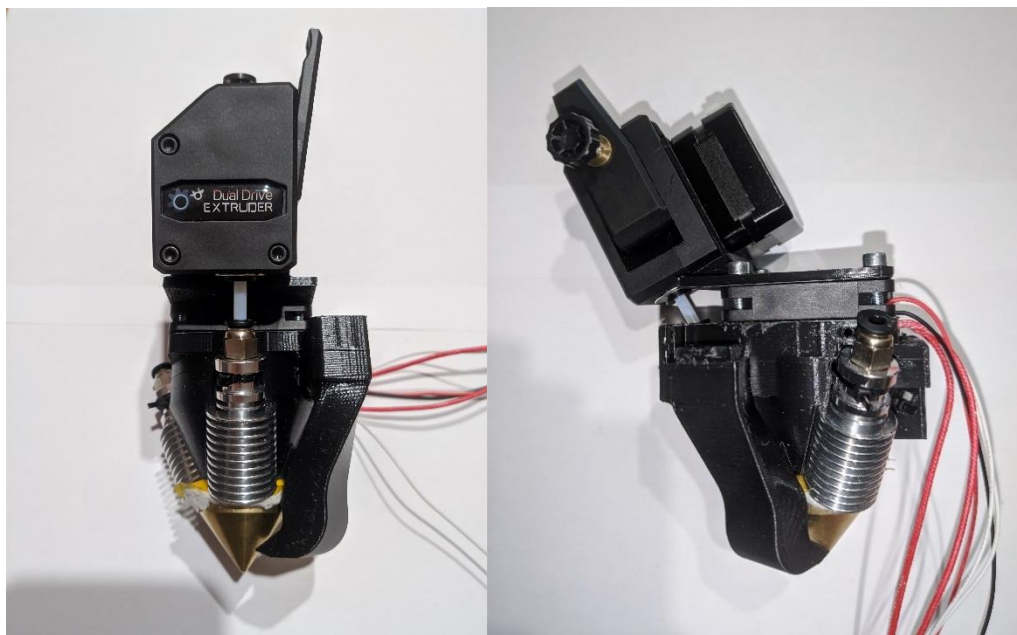


Figura 96 – Montagem do motor e da extrusora *direct drive*.

15 – Encaixou-se o ventilador na lateral do conjunto e fixou-se com um parafuso $M3 \times 20$ mm.

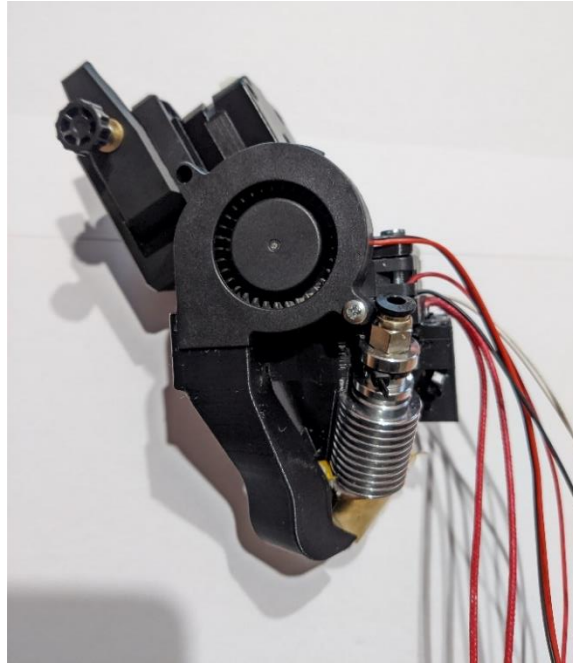


Figura 97 – Fixação do ventilador na lateral do bico extrusor.

16 – Asssemblou-se o adaptador para fixação do suporte do bico extrusor com dois parafusos M3 × 30 mm e duas porcas M3.

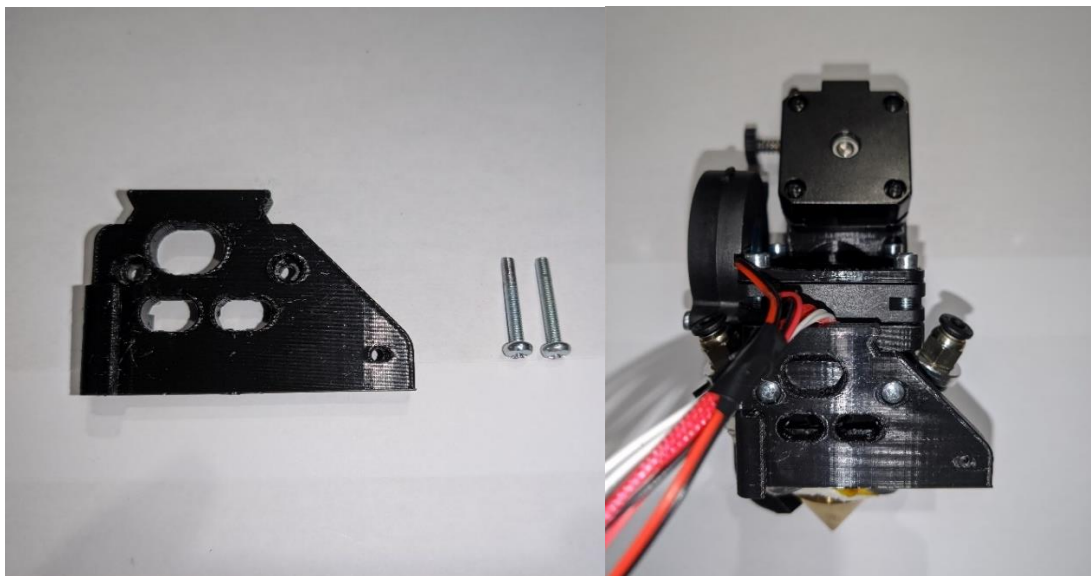


Figura 98 – Junção do adaptador ao conjunto do bico extrusor.

17 – Encaixou-se e fixou-se com um parafuso M2 × 20 mm ao conjunto do bico extrusor à estrutura da impressora.

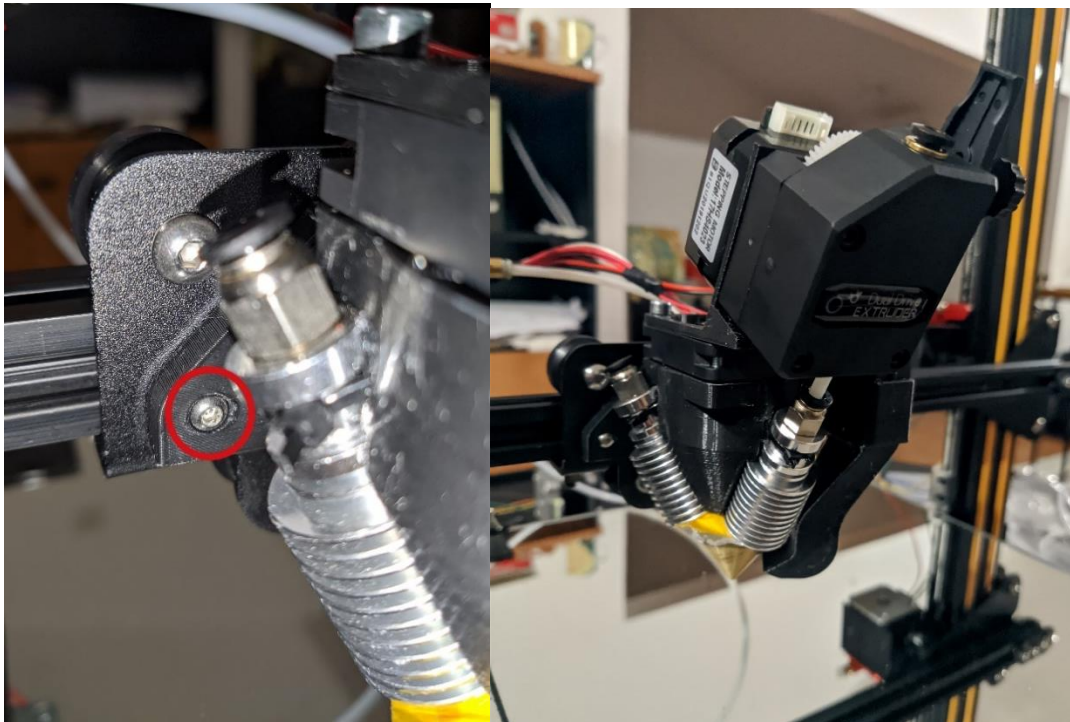


Figura 99 – Cabeça de impressão fixada na estrutura da impressora.

c) Montagem da extrusora *bowden*

18 – Fixou-se o suporte recorrendo a um parafuso e porca já existente na parte superior, na parte inferior por um parafuso M3×20 mm. A parte posterior encaixou-se na chapa do eixo Z.

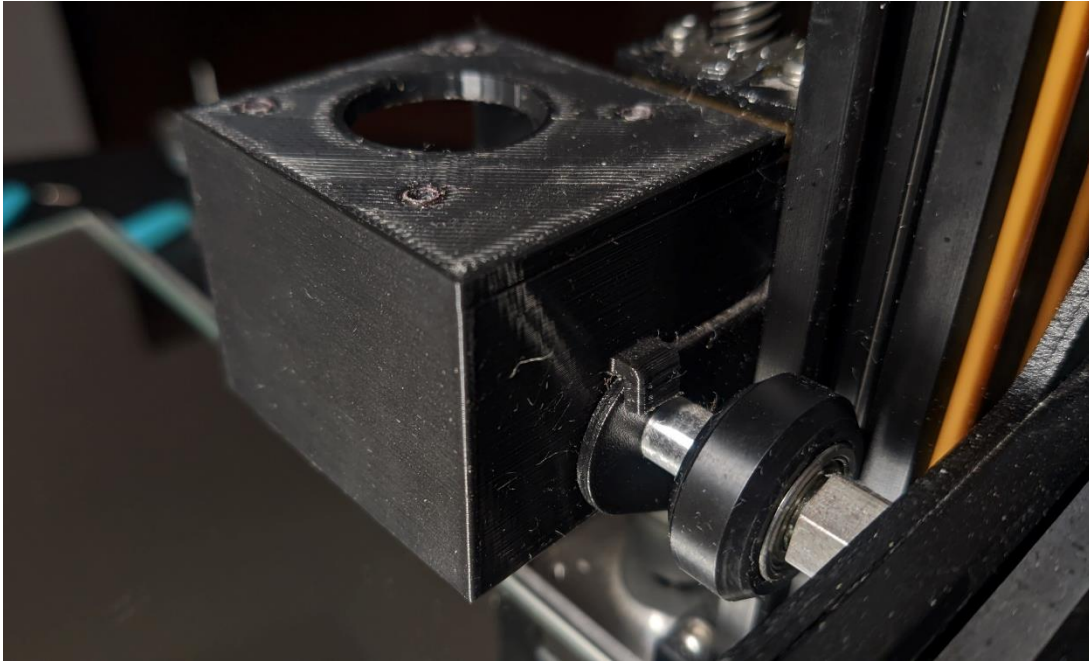


Figura 100 – Encaixe do suporte na estrutura da impressora.

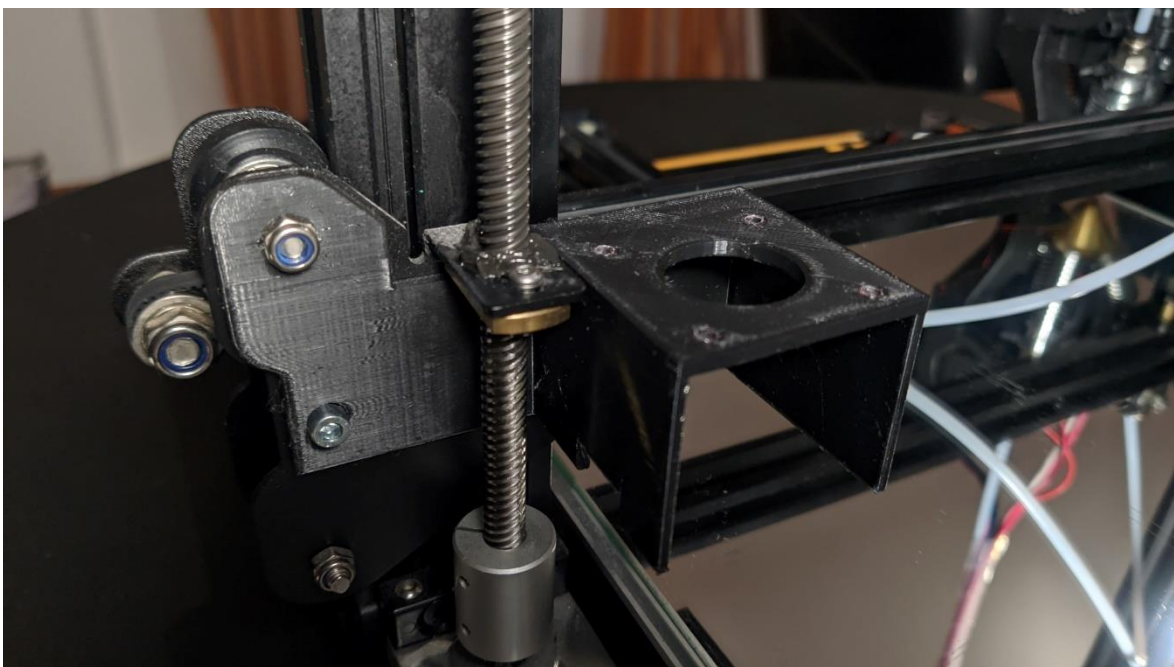


Figura 101 – Fixação do suporte da extrusora *bowden*, através de dois parafusos.

19 – Acoplou-se o motor e a extrusora com 4 parafusos fornecidos no kit da extrusora. De seguida, enroscou-se o tupo PTFE à extrusora e ligou-se o cabo de alimentação.

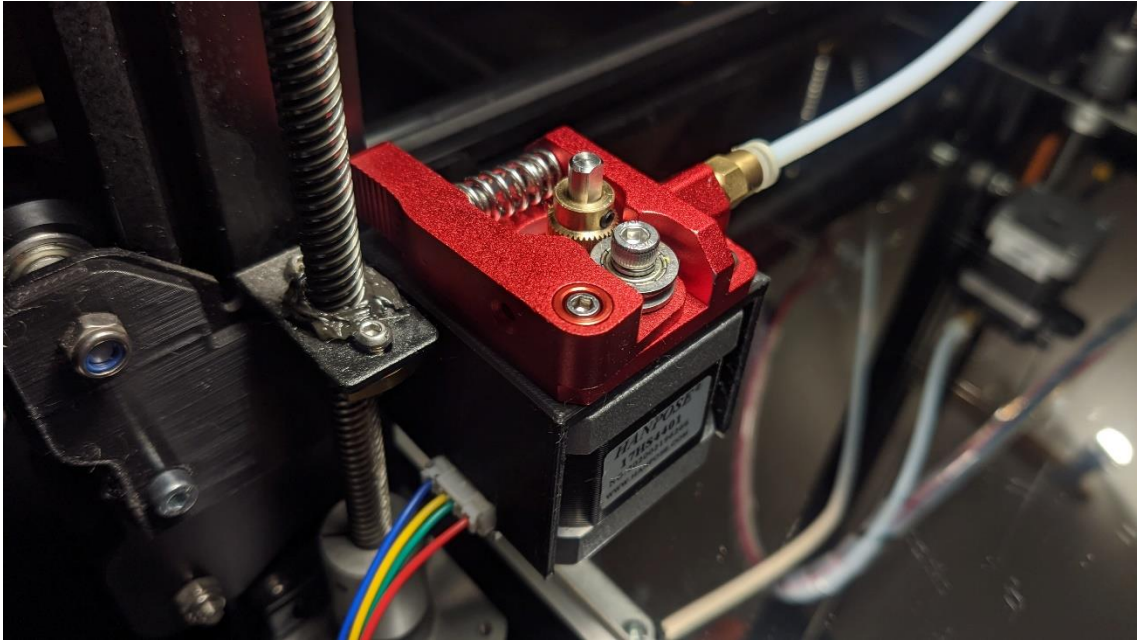


Figura 102 – Aspeto final da extrusora *bowden*.

Anexo B: Lista de Material

Tabela 14 – Lista de material.

Artigo	Quantidade	Preço (€)	Fornecedor
Motor Nema 17 (40×40)	1	9,68	<i>Banggood</i>
Motor Nema 17 (40×23)	1	9,8	<i>Banggood</i>
Bico extrusor <i>Hotend Diamond</i>	1	12,37	<i>Aliexpress</i>
Drivers motores	6	16,94	<i>Aliexpress</i>
Ventilador 50×50×10	1	8	<i>Servelec</i>
Tubo de teflon 1 m 2×4	1	1,58	<i>Banggood</i>
<i>Bowden</i> Extruder	1	3,48	<i>Banggood</i>
Placa de controlo	1	43,27	<i>Banggold</i>
Ventilador radial 12V	1	1,92	<i>Banggood</i>
<i>BMG Extruder</i>	1	10,47	<i>Banggood</i>
Parafusos 3×20	20	1,5	<i>Maxmat</i>
Porca Sextavada M3	20	1,5	<i>Maxmat</i>
Filamento flexível 250g	1	14,90	<i>Amazon</i>
Filamento Pla Vermelho 500g	1	9,10	<i>Amazon</i>
Filamento Pla Azul 500g	1	9,10	<i>Amazon</i>
Filamento Pla Verde 500g	1	9,10	<i>Amazon</i>
Abraçadeira Plástica	15	1	<i>Amazon</i>
Caixa	1	-	Impresso em 3D
Base da caixa			Impresso em 3D
Suporte extrusora <i>bowden</i>	1	-	Impresso em 3D
Suporte extrusora <i>direct drive</i>	1	-	Impresso em 3D
Bocal ventilador	1	-	Impresso em 3D
Apoio porta rolos	1	-	Impresso em 3D
Suporte sensor de fim de curso	1	-	Impresso em 3D
Suporte superior para rolo de filamento	2	-	Impresso em 3D
Porca para eixo do suporte	4	-	Impresso em 3D
Eixo do suporte do rolo	2	-	Impresso em 3D
Suporte para <i>Diamond Hot-end</i>	1	-	Impresso em 3D
Adaptador para fixação do suporte do <i>Diamond</i>	1	-	Impresso em 3D
Canal de ventilação dos drivers	1	-	Impresso em 3D
Parafusos M3×30 mm	25	2	<i>Maxmat</i>
Total		165,71	

Anexo C: Dados técnicos dos rolamentos



625-Z

SKF Explorer

Rolamentos rígidos de esferas

Especificações do rolamento

Tolerâncias,

Normal (métrico), P6, P5, Normal (polegadas),

Folga interna radial,

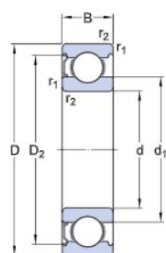
Pares de rolamentos pareados, Aço inoxidável $d < 10$ mm, Outros rolamentos

Interfaces do rolamento

Tolerâncias de assento para condições padrão,

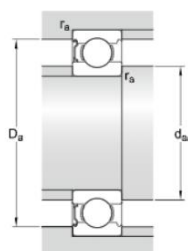
Tolerâncias e ajustes resultantes

Especificações técnicas



DIMENSÕES

d	5 mm
D	16 mm
B	5 mm
d ₁	≈ 8.4 mm
D ₂	≈ 13.22 mm
r _{1,2}	min. 0.3 mm



DIMENSÕES DO ENCOSTO

d _a	min. 7.4 mm
d _a	max. 8.3 mm
D _a	max. 13.6 mm
r _a	max. 0.3 mm

Figura 103 – Retirado do catálogo dos rolamentos [59].

DADOS DE CÁLCULO

Classificação de carga dinâmica básica	C	1.14 kN
Classificação de carga estática básica	C_0	0.38 kN
Limite de carga de fadiga	P_u	0.016 kN
Velocidade de referência		95 000 r/min
Velocidade-limite		60 000 r/min
Fator de cálculo	k_f	0.025
Fator de cálculo	f_0	8.4

MASSA

Massa do rolamento		0.005 kg
--------------------	--	----------

Figura 104 – Retirado do catálogo dos rolamentos [59].

Anexo D: Código de mistura de cores

```
; Cyan                ; Yellow
M163 S0 P1           M163 S0 P0
M163 S1 P0           M163 S1 P0
M163 S2 P0           M163 S2 P1
M164 S0              M164 S8

; Ocean               ; Spring Green
M163 S0 P5           M163 S0 P1
M163 S1 P1           M163 S1 P0
M163 S2 P0           M163 S2 P5
M164 S1              M164 S9

; Blue                ; Green
M163 S0 P1           M163 S0 P1
M163 S1 P1           M163 S1 P0
M163 S2 P0           M163 S2 P1
M164 S2              M164 S10

; Violet              ; Turquoise
M163 S0 P1           M163 S0 P5
M163 S1 P5           M163 S1 P0
M163 S2 P0           M163 S2 P1
M164 S3              M164 S11

; Magenta             ; Cyan-Brown
M163 S0 P0           M163 S0 P2
M163 S1 P1           M163 S1 P1
M163 S2 P0           M163 S2 P1
M164 S4              M164 S12

; Raspberry           ; Magenta-Brown
M163 S0 P0           M163 S0 P1
M163 S1 P5           M163 S1 P2
M163 S2 P1           M163 S2 P1
M164 S5              M164 S13

; Red                 ; Yellow-Brown
M163 S0 P0           M163 S0 P1
M163 S1 P5           M163 S1 P1
M163 S2 P1           M163 S2 P2
M164 S6              M164 S14

; Orange              ; Brown
M163 S0 P0           M163 S0 P1
M163 S1 P1           M163 S1 P1
M163 S2 P1           M163 S2 P1
M164 S7              M164 S15
```

Figura 105 – Códigos de mistura de cores [56].

Anexo E: Alterações *Marlin*

a) Alteração do *firmware* original para *Creativity CR10-S* com uma extrusora

Platformio.ini	
Código	Funcionalidade
default_envs= BIGTREE_SKR_PRO	Ambiente padrão

Todos os códigos que apresentados são antecidos por #define, dessa forma não será incluído na tabela, haverá casos que o código não sofreu alteração, mas consta na tabela porque foi lhe retirado as duas barras (//) ficando o mesmo ativo.

Configuration.h	
Código	Descrição
SERIAL_PORT -1	Seleção da porta -1 (USB) para comunicação com o host
SERIAL_PORT_2 1	Seleção da porta secundária 1 para comunicação com o host
MOTHERBOARD BOARD_BTT_SKR_PRO_V1_1	Seleção da placa escolhida
TEMP_SENSOR_BED 1	Ativação do sensor de temperatura da cama
X_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver utilizado
Y_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver utilizado
Z_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver utilizado
Eo_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver utilizado
DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {39.88, 39.68, 200, 52}	Passos/mm de cada motor(calculados anteriormente)
INVERT_X_DIR true	Inverter do sentido do motor do eixo X
INVERT_Eo_DIR true	Inverter do sentido do motor da extrusora
X_BED_SIZE 300	Dimensão da cama no eixo X
Y_BED_SIZE 300	Dimensão da cama no eixo Y
Z_MAX_POS 400	Altura máxima no eixo Z
MESH_BED_LEVELING	Nivelamento manual da cama em vários pontos
PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 200	Temperatura do bico extrusor para pré-aquecimento do material PLA
PREHEAT_1_TEMP_BED 60	Temperatura da cama para pré-aquecimento do material PLA
LCD_LANGUAGE pt	Linguagem apresentada no LCD em português
SDSUPPORT	Ativação da leitura do cartão SD
ENCODER_PULSES_PER_STEP 1	Pulsos necessários para o encoder produzir um passo
ENCODER_PULSES_PER_MENU_ITEM 4	Número de passos necessários para mover o seletor do menu
REPRAP_DISCOUNT_FULL_GRAPHIC_SMART_CONTROLLER	Ativar o ecrã LCD

Configuration.adv.h Teste inicial (uma extrusora)	
Código	Descrição
Eo_AUTO_FAN_PIN PE5	Atribuição do pin PE5 para controlo da ventilador de arrefecimento da extrusora
FANMUXo_PIN PC8	Atribuição do pin PC8 para controlo da ventilador de arrefecimento da peça
CONTROLLER_FAN_PIN PE6	Saída para ventilador driver
SDCARD_CONNECTION ONBOARD	Local de leitura do cartão SD

Adaptações Diamond Configuration.h- Multimaterial/Cores separadas	
Código	Descrição
EXTRUDERS 3	Número de extrusoras utilizados
SINGLENOZZLE	A utilização de um único bico extrusor pelos três extrusoras
E1_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver TMC2208
E2_DRIVER_TYPE TMC2208_STANDALONE	Seleção do driver TMC2208
DISTINCT_E_FACTORS	Cada extrusor tem passos diferentes
DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {39.88, 39.68, 196.72, 52, 215.54, 52}	Passos/mm de cada motor (calculados anteriormente)
DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 300, 300, 5, 25, 25, 25}	Valores máximos de <i>feedrate</i>
Y_BED_SIZE 283	Tamanho da cama aquecida
Y_MIN_POS-28	Valor negativo para calibração
ENABLED(PIDTEMP)	Ativação do PID, para calibração da temperatura
DEFAULT_Kp 85.34	Constantes obtidas no <i>pronterface</i> após calibração do bico extrusor
DEFAULT_Ki 14.04	
DEFAULT_Kd 129.72	

Adaptações Diamond Configuration.h- Multicor (mistura de filamentos)	
Código	Funcionalidade
EXTRUDERS 1	Número de extrusoras utilizados
MIXING EXTRUDER	Ativa a mistura de filamentos
MIXING_STEPPERS 3	Número de motores que permitem mistura

Btt_SKR_PRO_common.h	
Código	Funcionalidade
TEMP_1_PIN PF4	Atribuição do PIN PF4 do sensor de temperatura, o mesmo que TEMP_0 (A existência de um único sensor de temperatura implica que seja utilizado pelas 3 extrusoras)
TEMP_2_PIN PF4	
HEATER_1_PIN PB1	Atribuição do PIN PB1 do cartucho aquecedor, o mesmo que HEATER_0(A existência de um único aquecedor implica que seja utilizado pelas 3 extrusoras)
HEATER_2_PIN PB1	

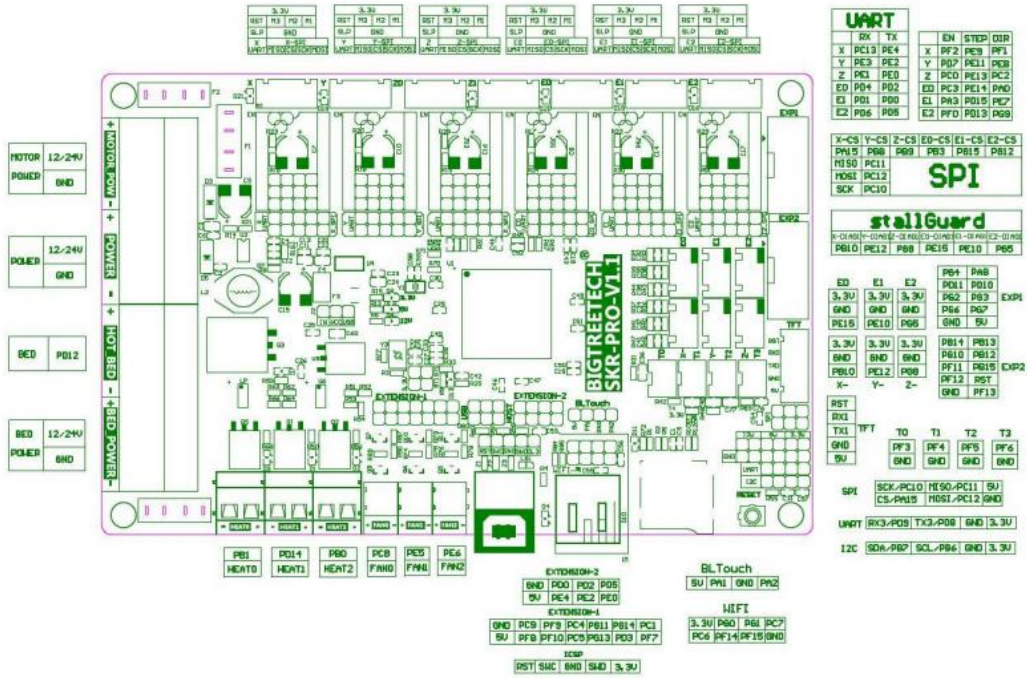


Figura 106 – Representação esquemática dos pinos da placa mãe SKR PRO V1.1[41].

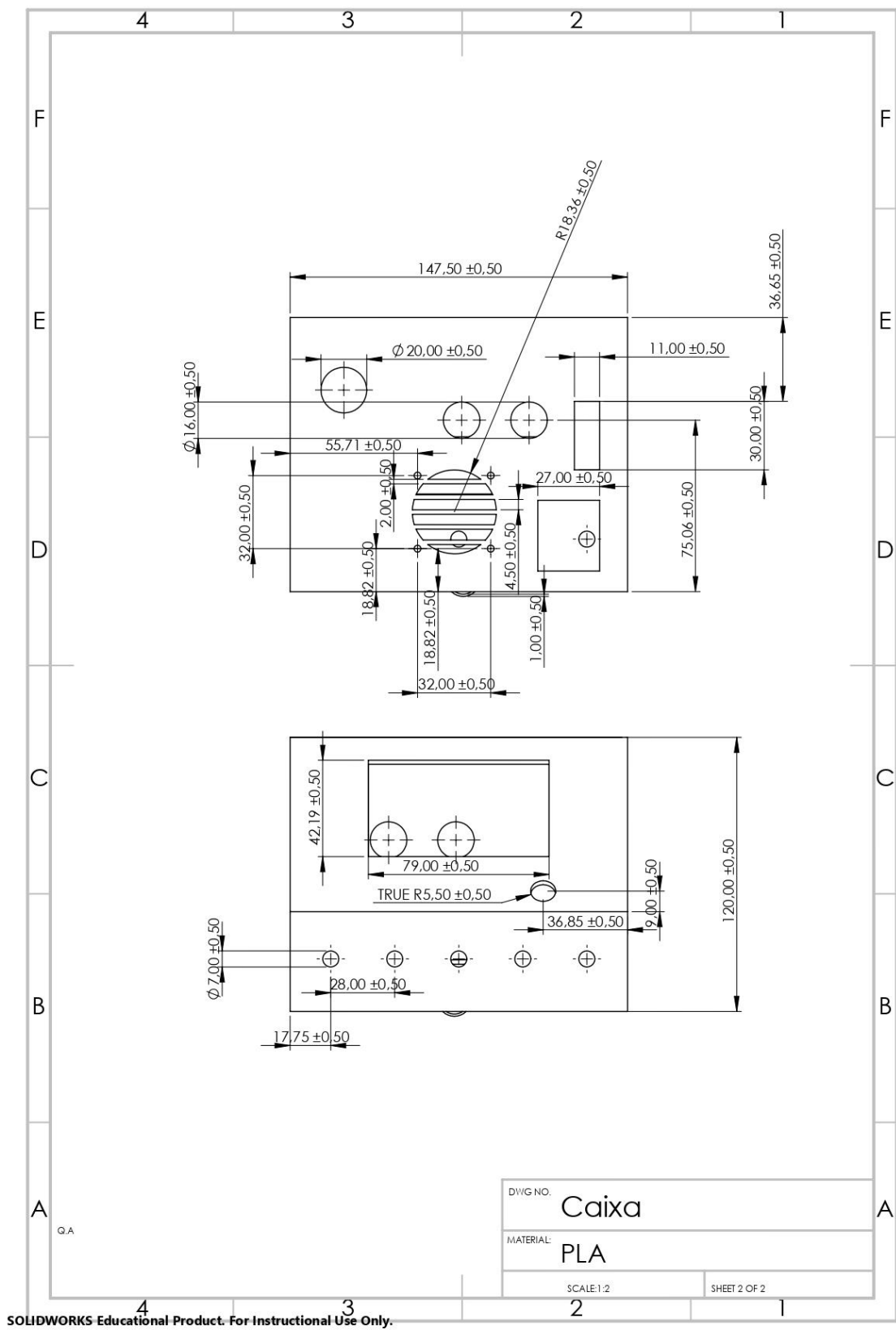


Figura 108 – Desenho técnico caixa, vista posterior e frontal.

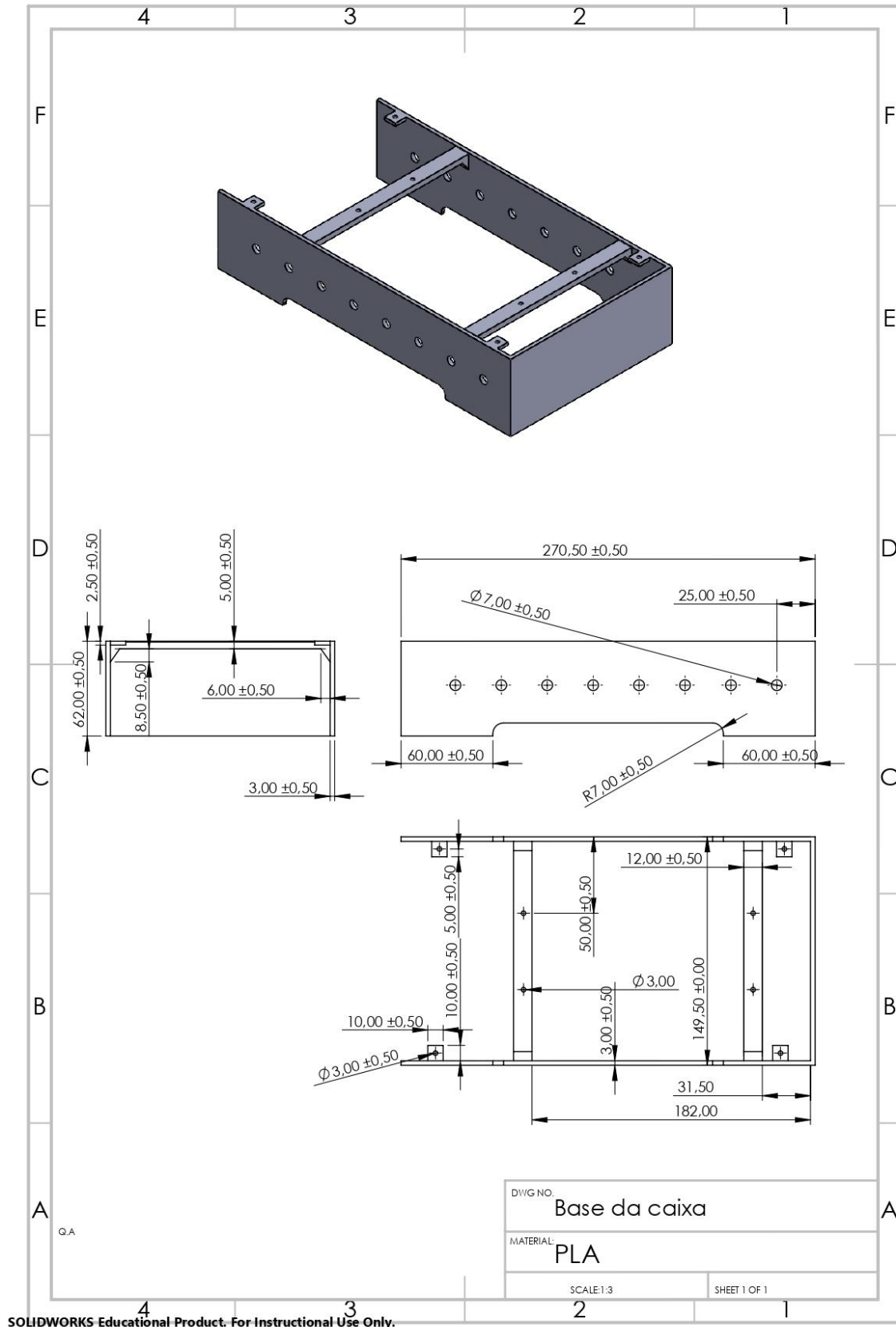


Figura 109 – Desenho técnico da base da caixa.

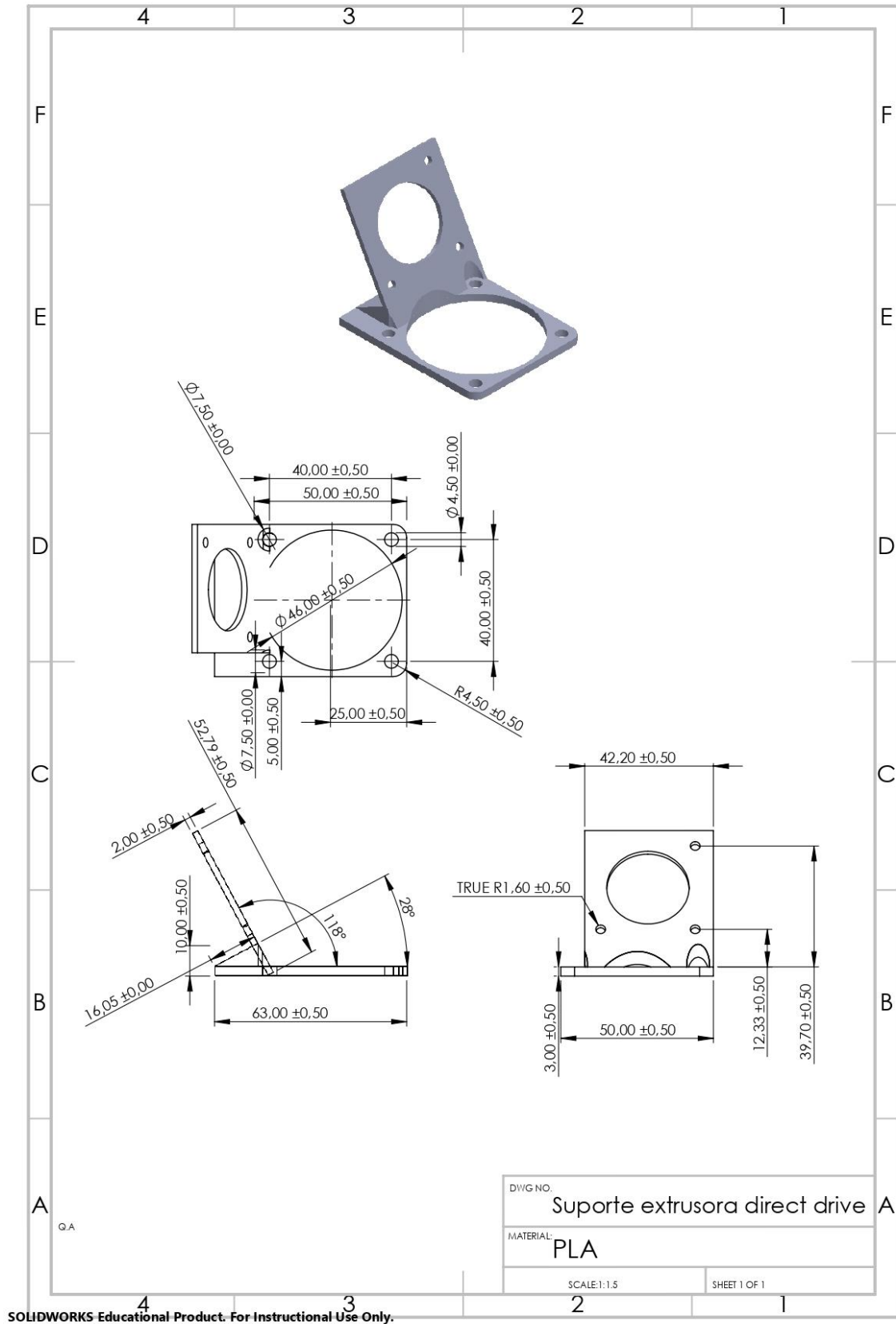


Figura 110 – Desenho técnico do suporte extrusora *direct drive*.

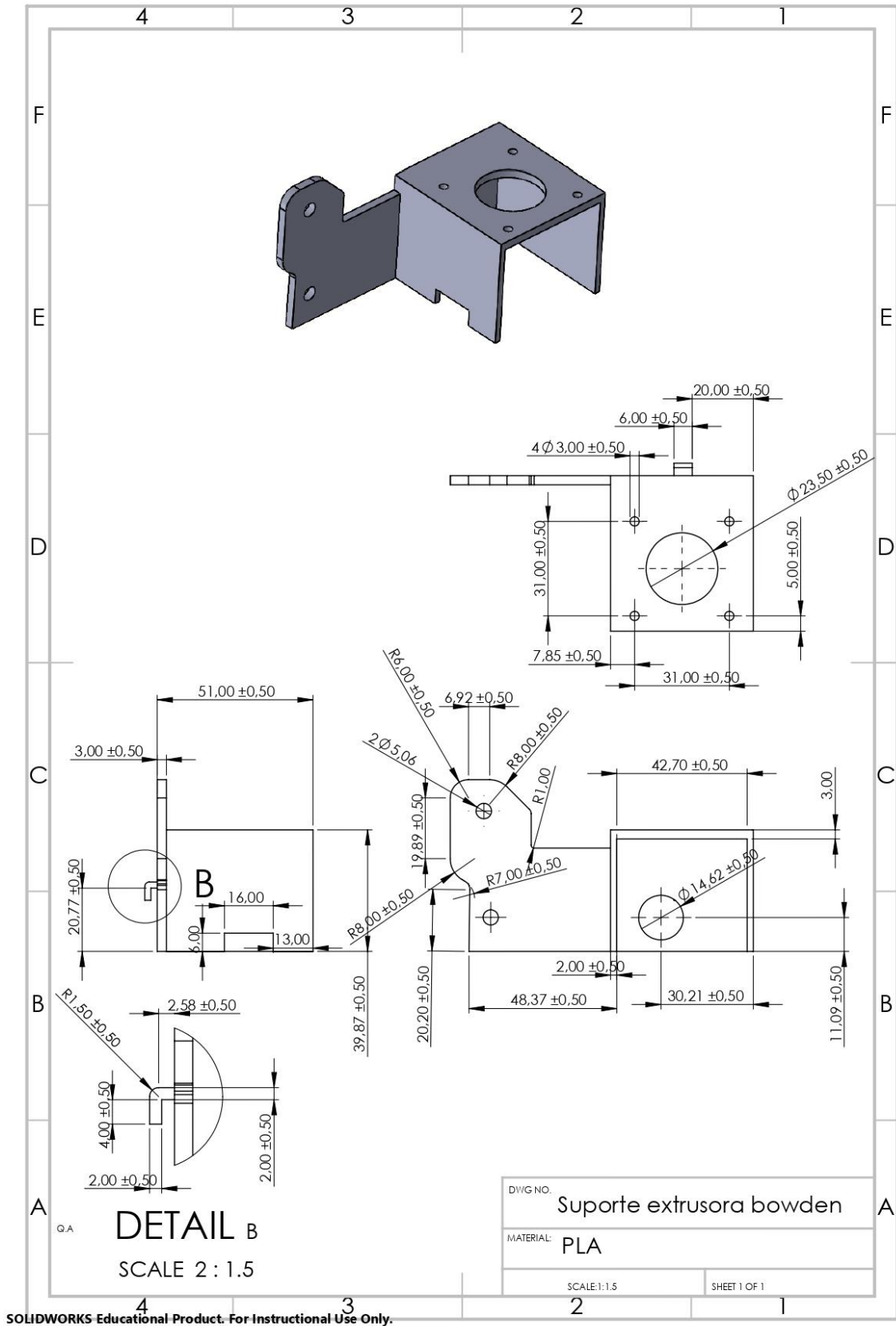


Figura 111 – Desenho técnico do suporte da extrusora *bowden*.

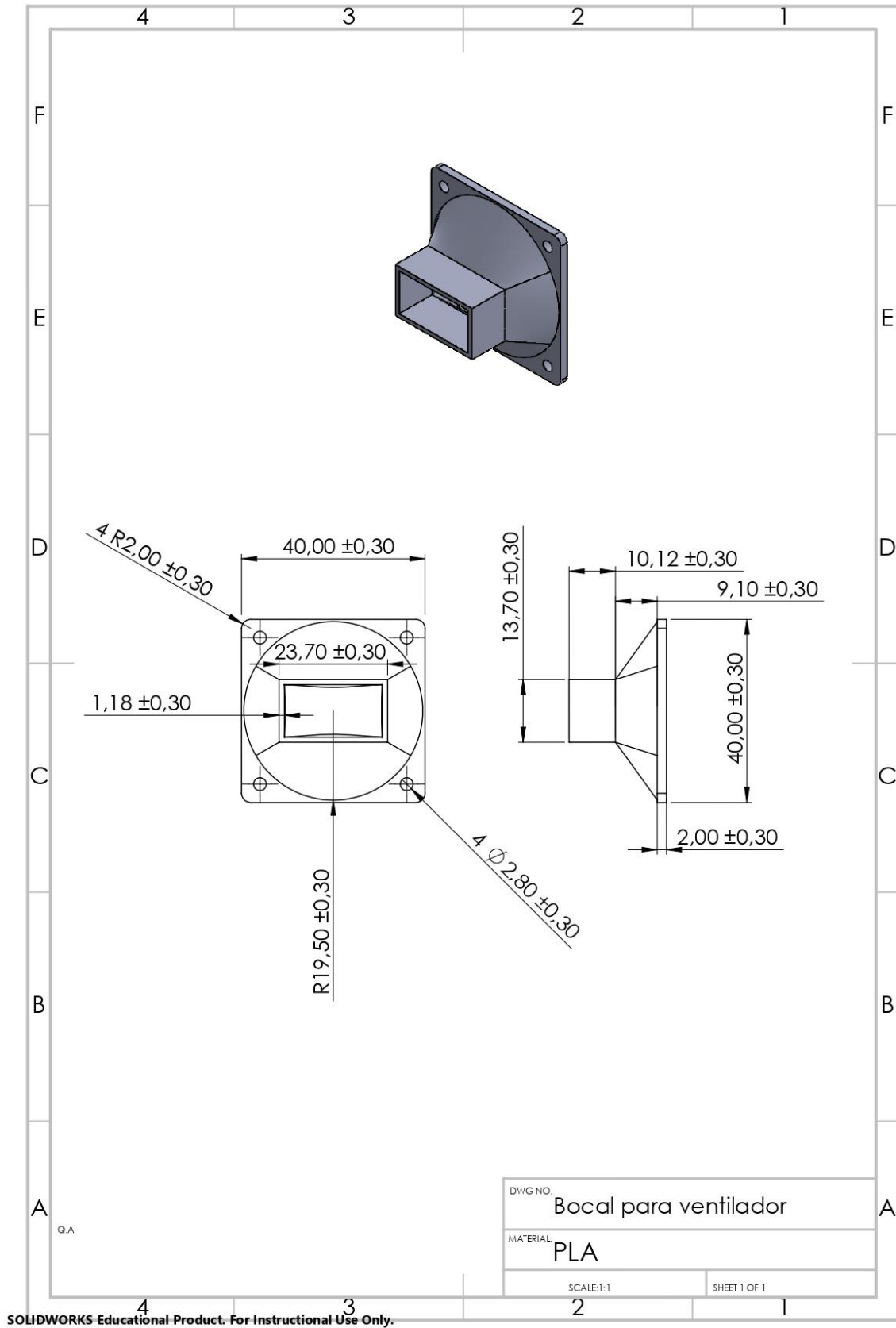


Figura 112 – Desenho técnico do bocal para ventilador.

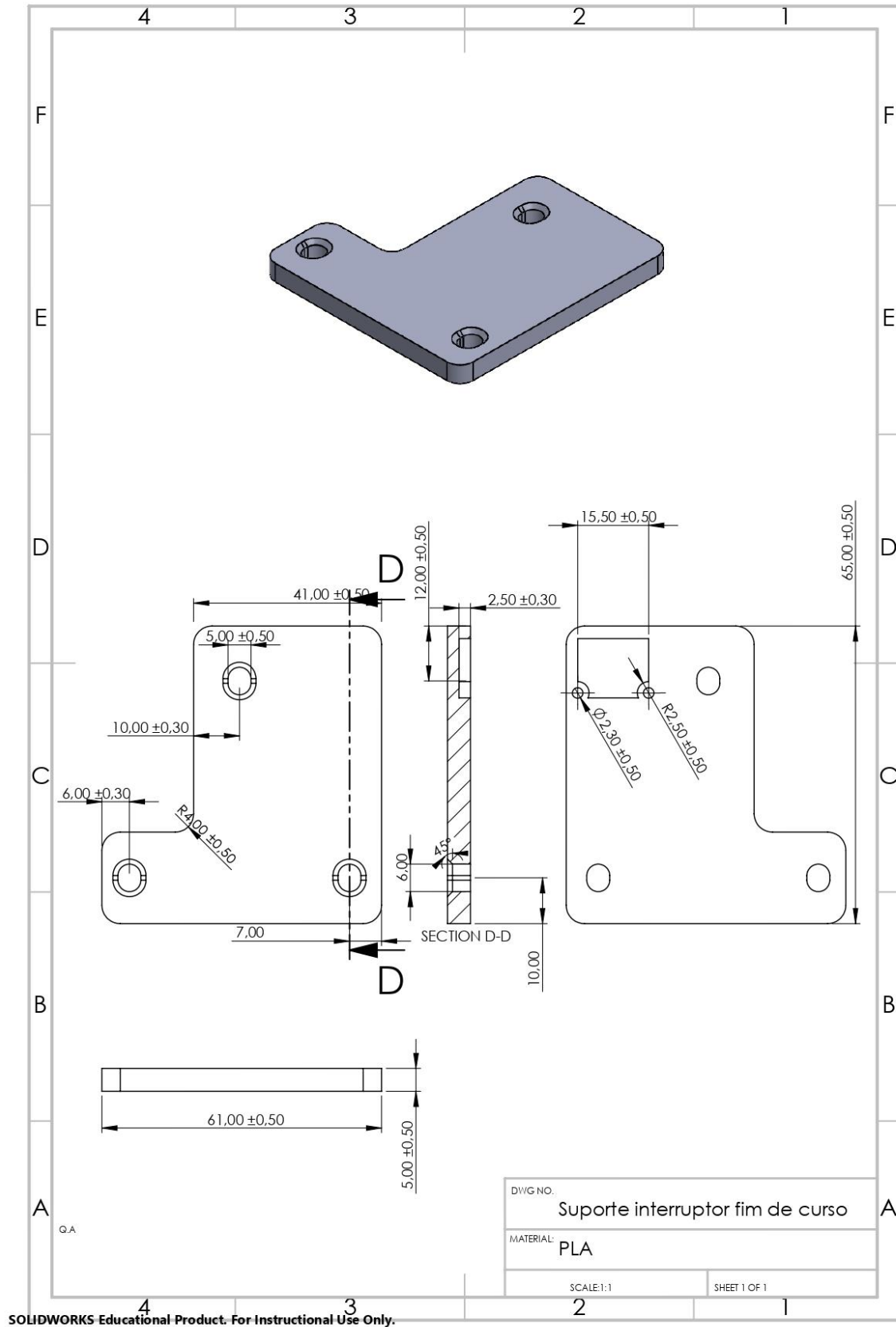


Figura 113 – Desenho técnico do suporte do interruptor de fim de curso.