

INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa

***μScope* - Conceção, Implementação e Teste de um Microscópio Digital *open-source* operado por Robô Delta e fabricado por Manufatura Aditiva**

Miguel Ângelo Burt Costa Ferreira da Rocha

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Versão Definitiva

Orientadores

Prof. Dr. Manfred Niehus (ISEL)

Prof. Dr. Tiago Gorjão Clara Charters de Azevedo (ISEL)

Dezembro 2023

[Página propositadamente deixada em branco]

INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa

***μScope* - Conceção, Implementação e Teste de um
Microscópio Digital *open-source* operado por Robô
Delta e fabricado por Manufatura Aditiva**

Miguel Ângelo Burt Costa Ferreira da Rocha

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Versão Definitiva

Orientadores

Prof. Dr. Manfred Niehus (ISEL)

Prof. Dr. Tiago Gorjão Clara Charters de Azevedo (ISEL)

Júri

Presidente: Prof. Dr. Luís Miguel Minhalma (ISEL)

Vogais: Prof. Dr. Luís Miguel Tavares Fernandes (ISEL)

Prof. Dr. Tiago Gorjão Clara Charters de Azevedo (ISEL)

Dezembro 2023

[Página propositadamente deixada em branco]

“Challenges are what make life interesting and overcoming them is what makes life meaningful.”

Joshua J. Marine

[Página propositadamente deixada em branco]

Agradecimentos

A elaboração da presente tese representa o culminar de todo o trabalho desenvolvido ao longo de vários anos letivos, trabalho esse que não seria possível sem a colaboração e estímulo de algumas pessoas. Por isso, expresso desta forma a minha maior gratidão a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para que isto fosse possível.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus professores orientadores Tiago Charters Azevedo e Manfred Niehus por toda a dedicação, ajuda e empenho. Quero salientar toda a liberdade de ação que me foi dada e que contribuiu indiscutivelmente para o meu desenvolvimento pessoal, assim como por todas as recomendações que me sugeriram para que pudesse atingir os meus objetivos com o máximo de brio. Obrigado pela transmissão de saberes que permitiram a realização de todo este trabalho e por se mostrarem sempre disponíveis e prontos a ajudar.

Agradeço também ao ISEL pelo acolhimento durante estes 3 anos e pela disponibilização de recursos que foram essenciais à minha aprendizagem e à realização da presente tese, nomeadamente a Oficina Digital.

Obrigado à minha família pela constante preocupação comigo, que tornou tudo isto possível e que tanto contribuíram para todos os meus sucessos.

À minha namorada Inês, obrigado por toda a paciência e apoio demonstrado e por acreditar constantemente em mim e no meu trabalho, mesmo nos momentos em que minha dedicação ao estudo me tornou mais afastado.

Aos meus amigos Luís Henrique, Henrique Duarte, Cláudio Ferreira, João Carvalho e Rodrigo Fernandes, obrigado pela vossa presença durante o meu percurso académico, pelo apoio e companheirismo demonstrado e que sem dúvida tornam toda esta jornada de aprendizagem num processo mais simples e divertido.

Por fim, agradeço a todos os professores que se cruzaram no meu caminho e que tanto contribuíram para a minha formação e crescimento intelectual.

A todos, o meu sincero obrigado. Bem hajam!

[Página propositadamente deixada em branco]

Resumo

Vive-se num mundo em que a inovação é um elemento-chave ao avanço tecnológico, e com a disponibilidade cada vez maior de recursos à comunidade em geral que permitem inovar, todos os dias surgem novas ideias de produtos que podem revolucionar a forma de trabalho e lazer. A impressão 3D possui um papel inevitável na medida em que rapidamente é possível tornar ideias em algo físico. Aliada à variada disponibilidade de dispositivos eletrônicos de baixo custo, surgem assim produtos inovadores acessíveis e com qualidade capazes de colmatar a indisponibilidade de soluções no mercado.

O *μScope* é um microscópio digital modular totalmente impresso em 3D que integra eletrónica de baixo custo e utiliza os princípios da ótica com foco no objetivo de visualização de estruturas e moléculas segundo a configuração de transmissão simples (campo claro) ou fluorescência. O sistema desenvolvido é independente de fontes externas (fornecimento de energia constante, visualização de imagem e controlo da amostra) e integra um robô delta como forma inovadora de manipular amostras através de um *joystick* e dois botões.

Após a conceção de cada módulo e respetiva modelação num *software* de *Computer Aided Design*, procedeu-se ao fabrico dos módulos através de impressão 3D e respetiva montagem do sistema. Para uma primeira iteração do sistema, os resultados mostraram-se bastante satisfatórios dada a solidez e fiabilidade da sua construção. A componente mecânica relacionada com o robô delta necessita de melhorias a nível de *design* e codificação, no entanto os resultados produzidos foram satisfatórios no que respeita à manipulação da amostra em *z* e no plano *xy* para pequenas deslocações. Os *inputs* de controlo revelaram um nível de precisão suficiente para o objetivo a que se destinam. Produziram-se resultados bastante satisfatórios na análise a células de *Allium Cepa*, fibras de seda e grãos de pólen de *Petunia Hybrida* para a configuração de transmissão simples. As imagens obtidas pela câmara integrada no sistema apresentam um nível de contraste e nitidez que permitem a fácil distinção dos elementos estruturais analisados. Os resultados relacionados com configuração de fluorescência mostraram-se bastante promissores na medida em que as fibras de poliéster analisadas eram claramente visíveis aquando da incidência de luz.

O *μScope* mostrou resultados positivos na sua generalidade.

Palavras-chave: Microscópio, Impressão 3D, Robô Delta, Campo claro, Fluorescência

[Página propositadamente deixada em branco]

Abstract

We live in a world where innovation is a key element in technological advancement, and with the increasing availability of resources to the general community that enable innovation, new ideas for products that can revolutionize the way we work and play emerge every day. 3D printing plays an inevitable role as it quickly turns ideas into tangible objects. Combined with the wide availability of low-cost electronic devices, this leads to accessible and quality innovative products that can fill gaps that previously could only be addressed if companies intended to do so.

The μ Scope is a fully 3D-printed modular digital microscope that integrates low-cost electronics and utilizes optical principles focused on the visualization of structures and molecules using either simple transmission (bright-field) or fluorescence configurations. The developed system is self-contained concerning external sources (power supply, image visualization and sample control) and includes a delta robot as an innovative way to manipulate samples using a joystick and two buttons.

After designing each module and creating their models in Computer Assisted Design software, the modules were 3D-printed and the system was assembled. For the first iteration of the system, the results proved to be quite satisfactory due to the robustness and reliability of its construction. The mechanical component related to the delta robot needs improvement in terms of design and coding; however, the results were satisfactory regarding sample manipulation in z and xy planes for small displacements. The control inputs showed a level of precision sufficient for their intended purpose. The analysis of *Allium Cepa* cells, silk fibers, and *Petunia Hybrida* pollen grains under the bright-field configuration produced quite satisfactory results. The images obtained by the integrated camera in the system demonstrated sufficient contrast and sharpness, allowing easy distinction of the analyzed structural elements. The results related to the fluorescence configuration showed great promise, as the analyzed polyester fibers were clearly visible under light incidence.

In general, the μ Scope showed positive results; however, future iterations will be necessary to address some shortcomings.

Keywords: Microscope, 3D Printing, Delta Stage, Brigh-field, Fluorescence

[Página propositadamente deixada em branco]

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	viii
Índice de Tabelas	ix
Índice de Figuras	xv
Lista de Siglas e Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	3
1.2 Motivação	4
1.3 Microscópios digitais	4
1.4 Impressão 3D	11
1.4.1 Impressão 3D associada à microscopia	15
1.5 Robô Delta: Geometria e cinemática	16
1.6 Sistema proposto: μ Scope	21
1.6.1 Microscópio <i>OpenFlexure</i>	22
1.6.2 Microscópio <i>Microscopi</i>	24
1.7 Objetivos	25
1.8 Organização do documento	26
1.9 Contribuições originais introduzidas	26
2 μScope Conceito de <i>Design</i>. Modelação, Impressão e Montagem do Sistema.	29
2.1 Conceito de <i>design</i> do μ Scope	31

2.2	Modelação e impressão dos módulos com recurso ao <i>Solidworks</i> e <i>Cura</i>	34
2.3	Integração dos componentes óticos e eletrónicos	42
2.3.1	Módulo do Robô Delta	42
2.3.2	Módulo de Controlo	44
2.3.3	Módulo da Objetiva	46
2.3.4	Módulo Permutável	48
2.3.5	Caixa	49
2.3.6	Codificação do Robô Delta: definição de constantes	49
2.3.7	Codificação do <i>joystick</i> e dos botões	52
2.4	Robô delta: planeamento de testes	53
3	Discussão de Resultados	57
3.1	Caracterização do robô delta	59
3.1.1	Análise dos resultados obtidos	66
3.2	Microscópio <i>µScope</i> : sistema finalizado	70
3.2.1	Análise dos resultados obtidos	71
3.3	Caracterização do poder de ampliação do microscópio	73
3.4	Obtenção de imagens na configuração de transmissão simples (campo claro)	75
3.4.1	Análise dos resultados obtidos	76
3.5	Obtenção de imagens na configuração de fluorescência	79
3.5.1	Análise dos resultados obtidos	80
3.6	Teste de autonomia à bateria	81
4	Conclusão	83
4.1	Conclusão	85
4.2	Perspetivas futuras	86
	APÊNDICE	93
A	Robô Delta: extração de coordenadas	95
	ANEXOS	100
A	Robô Delta: código C++	102

Índice de Tabelas

3.1	Extração de coordenadas: Teste em z : Teste 4	67
3.2	Tabela de Custos	73
A.1	Extração de coordenadas: Triângulo Equilátero	95
A.2	Extração de coordenadas: Quadrado	96
A.3	Extração de coordenadas: Hexágono	97

[Página propositadamente deixada em branco]

Índice de Figuras

1.1	Diagrama de <i>hardware</i> de um microscópio digital. (Fonte: <i>Microscope Australia</i> [1]) . . .	6
1.2	Comparação entre os passos requeridos para operar com um microscópio vertical versus microscópio invertido (Fonte: Five Advantages of Inverted Over Upright Microscopes in Industrial Applications Science Lab Leica Microsystems [2])	6
1.3	Formação de imagem num microscópio composto. F_o : Ponto focal do objeto na objetiva; F'_o : Ponto focal da imagem na objetiva; F_e : Ponto focal do objeto na ocular; F'_e : Ponto focal da imagem na ocular (Fonte: <i>Medical Imaging Systems – An Introductory Guide</i> [3])	8
1.4	Modos de imagem num microscópio. A: Microscopia de transmissão em campo claro; B: Microscopia de Fluorescência (Fonte: <i>Medical Imaging Systems – An Introductory Guide</i> [3])	9
1.5	As 4 imagens inerentes à microscopia digital (Fonte: <i>Microscope Image Processing</i> [4]) .	10
1.6	<i>Artillery Sidewinder X1</i> . A: <i>Gantry</i> ; B: Mesa; C: Cabeça extrusora; D: Suporte para Filamento (Fonte: <i>Artillery 3D</i>)	12
1.7	Sistema <i>Bowden</i> (à esquerda) e sistema de extrusão direta (à direita) (Fonte: <i>3D printing of nonplanar layers for smooth surface generation</i> [5])	13
1.8	<i>Warping</i> (Fonte: <i>Airwolf 3D</i> [6])	15
1.9	Robô Delta. A: Coluna A; B: Coluna B; C: Coluna C; D: Elemento deslizante; E: Braço; F: Plataforma. (Fonte: <i>A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace</i> [7])	17
1.10	Robô Delta (Modelo simplificado)	17
1.11	Representação simplificada dos planos e vetores de um robô delta (Fonte: <i>Style Delta Robot Kinematics</i> [8])	18
1.12	Sistema de coordenadas cartesiano do robô delta (Fonte: <i>Style Delta Robot Kinematics</i> [8])	19
1.13	Robô Delta: Modelo matemático simplificado de <i>S.Graves, et al</i> [8] (Fonte: <i>Style Delta Robot Kinematics</i> [8])	20

1.14	Sistema de <i>flexures</i> proposto por <i>J. E. Correa, et al</i> [9]. (Fonte: <i>Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based Delta robot</i> [9])	22
1.15	Microscópio <i>OpenFlexure</i> (Fonte: <i>Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope</i> [10])	23
1.16	Secção ampliada de um Glóbulo Vermelho infetado pelo parasita <i>Plasmodium Falciparum</i> (Fonte: <i>Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope</i> [10])	24
1.17	<i>Microscopi</i> (Fonte: <i>Democratising 'Microscopi': A 3D printed automated XYZT fluorescence imaging system for teaching, outreach and fieldwork</i> [27])	25
1.18	Robô Delta (Fonte: <i>Optimal Design and Tuning of PID-Type Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Delta Parallel Robots</i> [11])	27
2.1	Hierarquização dos módulos do μ Scope. Módulo de controlo (à direita)	32
2.2	Módulo O na configuração 1 (A) e na configuração 2 (B)	32
2.3	<i>Design</i> de conceito do sistema de <i>flexures</i>	33
2.4	Conceito de <i>design</i> do μ Scope	34
2.5	Modelação da estrutura hexagonal do robô delta. A: Furos para acoplamento de motores 28BYJ-48; B: Furos dos eixos; C: Furos para acoplamento dos controladores dos motores; D: Furo de acoplamento para a vara roscada.	35
2.6	Modelação do sistema de <i>flexures</i>	35
2.7	Montagem do módulo R	36
2.8	Modelação do módulo C. A: Estrutura principal; B: Tampa 1; C: Tampa 2; D: Base antiderrapante.	37
2.9	Montagem do módulo C	38
2.10	Modelação dos componentes do módulo O. A: Estrutura principal; B: Gaveta; C: Acoplamento.	39
2.11	Montagem do módulo O	39
2.12	Modelação dos componentes do módulo P. A: Acoplamento para LED; B: Suporte.	40
2.13	Montagem do módulo P	40
2.14	Modelação de peças acessórias à caixa. A: Peças para fixação das portas; B: Maçaneta; C: Peça para orifício de saída dos cabos.	41
2.15	Modelação da caixa. A: Caixa; B: Plataforma para montagem do módulo R; C: Encaixe do módulo O; D: Compartimento para componentes eletrónicos; E: Compartimentos para cabos; F: Encaixe para o módulo P; G: Portas.	41
2.16	Montagem da caixa	42

2.17	Montagem dos motores de passo 28BYJ-48 e respetivos controladores na estrutura hexagonal do robô delta	43
2.18	Modo de operação <i>Half Step</i> . O gráfico apresenta a corrente (mA) em função do tempo (s)	43
2.19	Circuito eletrónico inerente ao módulo R	44
2.20	<i>Raspberry Pi 3 Model B</i> e esquema dos <i>pins</i> GPIO. A: Porta CSI; B: Porta micro USB.	45
2.21	Integração do ecrã, do <i>joystick</i> e dos botões no módulo C.	46
2.22	Configurações do módulo O. A: Configuração para o modo de transmissão simples (1: gaveta com lente de magnificação); B: Configuração para o modo de fluorescência (1: gaveta com lente de magnificação; 2: gaveta com espelho dicróico; 3: gaveta com lente convergente; 4: LED)	47
2.23	Características do espelho dicróico <i>ThorLabs DMLP4490T</i>	48
2.24	Montagem do LED no módulo P	48
2.25	Integração da câmara <i>Raspberry Pi Cam V2</i> na caixa	49
2.26	Comprimento dos vetores <i>Ae</i> e <i>l</i> . A: Vetor <i>Ae</i> ; B: Vetor <i>l</i>	50
2.27	Vetor <i>R</i>	51
2.28	Localizações dos <i>pivots</i> fixos.	51
2.29	Vetores <i>Ae</i> , <i>Be</i> e <i>Ce</i>	52
2.30	Posição inicial da plataforma para os testes em <i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i> e <i>XY</i> . A: Ponto desenhado numa tira de folha que representa aproximadamente o centro da plataforma. As duas linhas perpendiculares representam os eixos <i>x</i> e <i>y</i>	56
2.31	Setup de testes. A: Microscópio <i>Leica S6D</i> ; B: Câmara; C: Robô Delta.	56
3.1	Teste em <i>z</i> : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste; C: Posição da plataforma em $z = 10\text{mm}$ (z teórico) durante o estágio intermédio do teste (a seta indica o ponto).	59
3.2	Teste em <i>z</i> : Teste 2. A linha “ <i>l</i> ” representa a posição inicial da plataforma. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste.	60
3.3	Teste em <i>z</i> : Teste 3. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste.	60
3.4	Teste em <i>z</i> : Teste 4 (deslocação de 5mm da plataforma em <i>z</i>). Posição final da plataforma após execução do G-CODE (escala da grelha em mm).	61
3.5	Teste em <i>x</i> , no plano <i>XY</i> : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste. C: Posição da plataforma em $x = 5\text{mm}$ (x teórico) durante o estágio intermédio do teste.	61

3.6	Teste em y , no plano XY : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste. C: Posição da plataforma em $y = 5$ (y teórico) durante o estágio intermédio do teste.	62
3.7	Teste no plano XY : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY , antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.	63
3.8	Teste no plano XY : Teste 2. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY , antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.	64
3.9	Teste no plano XY : Teste 3. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY , antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.	65
3.10	Discrepância originada pela diferença de perímetros entre os eixos e as peças que compõem os carris.	66
3.11	<i>backlash</i> associado a um motor de passo. Fonte: <i>Modern Approach to Maintenance in Spinning</i> [12]	67
3.12	<i>Flexures</i>	69
3.13	Modelo concebido por <i>S.Graves, et al.</i> [8]	70
3.14	μ Scope - Sistema finalizado.	70
3.15	Módulo C	72
3.16	Amostra de calibração.	74
3.17	Amostra de calibração visualizada ao microscópio: distância mínima entre duas barras.	74
3.18	<i>Frame</i> de uma observação de uma camada fina de <i>Allium cepa</i> com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.	75
3.19	<i>Frame</i> de uma observação de uma camada fina de <i>Allium cepa</i> com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples, onde é visível a largura integral da célula.	75
3.20	<i>Frame</i> de uma observação de um núcleo de uma célula de <i>Allium cepa</i> com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.	76
3.21	<i>Frame</i> de uma observação de uma fibra de seda verde com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.	76
3.22	<i>Frame</i> de uma observação de um grão de pólen de <i>Petunia Hybrida</i> com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.	76
3.23	Constituição de uma célula de <i>Allium cepa</i> . A: Núcleo; B: Parede celular; C: Citoplasma.	77

3.24	Percepção do utilizador em relação à movimentação da imagem quando o <i>joystick</i> é deslocado para cima, conforme indica a imagem. A: Movimentação esperada da imagem; B: Movimentação real.	78
3.25	Comparação entre a qualidade de imagem obtida no <i>OpenFlexure</i> (à esquerda) (Fonte: <i>Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope</i> [10]) e o <i>μScope</i> (à direita). A amostra analisada no <i>OpenFlexure</i> são glóbulos vermelhos, alguns infetados pelo parasita protozoário <i>Plasmodium Falciparum</i> , numa ampliação de 1000 vezes com objetiva de imersão em óleo.	79
3.26	<i>Frames</i> obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras, na configuração de fluorescência.	80
3.27	<i>Frames</i> obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras coradas em solução amarela fluorescente, na configuração de fluorescência. A luminosidade da imagem à esquerda foi incrementada em 40%	80
3.28	Espectro de cores e respetivos comprimentos de onda [13]	81

[Página propositadamente deixada em branco]

Lista de Siglas e Acrónimos

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CMOS	<i>Complementary metal–oxide–semiconductor</i>
CSI	<i>Camera Serial Interface</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FOV	<i>Field of View</i>
FPS	<i>Frames per Second</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
RMS	<i>Royal Microscopy Society</i>
TPU	<i>Polyurethane Thermoplastic</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 1

Introdução

Conteúdo

1.1	Enquadramento	3
1.2	Motivação	4
1.3	Microscópios Digitais	4
1.4	Impressão 3D	11
1.4.1	Impressão 3D associada à microscopia	15
1.5	Robô delta: Geometria e cinemática	16
1.6	Sistema proposto: <i>μScope</i>	21
1.6.1	Microscópio <i>OpenFlexure</i>	22
1.6.2	Microscópio <i>Microscopi</i>	24
1.7	Objetivos	25
1.8	Organização do Documento	26
1.9	Contribuições originais introduzidas	26

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 1 | Introdução

Neste capítulo é realizado o enquadramento do tema, é referida a estrutura do documento, são descritos os objetivos que se pretendem atingir e são referidas as contribuições originais introduzidas. É ainda descrito o estado da arte dos microscópios digitais mais atuais, fazendo referência a modelos com forte presença no mercado. São abordados alguns conceitos de ótica relevantes, assim como a formação de imagem no microscópio. É abordado o estado da arte da impressão 3D e alguns dos avanços mais notórios nas tecnologias incorporadas nas impressoras 3D. São referidos alguns problemas comuns inerentes à impressão 3D. É introduzido o conceito de robô delta, funcionalidade principal a ser implementada no sistema proposto. Por fim é abordado o sistema proposto, fazendo uma breve referência a dois projetos que serviram como base de apoio ao seu desenvolvimento: *OpenFlexure* e *Microscopi*.

1.1 Enquadramento

A área afeta à impressão 3D está em constante desenvolvimento, e com o aparecimento de novas empresas dedicadas à área, a oferta torna-se bastante diversificada e os custos competitivos. Estes fatores favorecem a acessibilidade das impressoras 3D ao público em geral, contribuindo para o aparecimento de comunidades que se dedicam ao desenvolvimento de produtos mais acessíveis em termos de custo, que de outra forma seriam difíceis de serem adquiridos.

A microscopia digital é uma área abrangida pela impressão 3D que juntamente com a oferta de mercado já existente de eletrónica *low-cost* e *open-source* (*Arduino*, *Raspberry Pi*, etc) permite a criação de novas soluções que podem ser utilizadas facilmente para fins pessoais ou coletivos, tais como escolas ou outras instituições. Os microscópios digitais diferenciam-se dos microscópios óticos na medida em que são mais precisos, não utilizam oculares e utilizam uma câmara digital como detetor de imagem, que por sua vez é transmitida para uma fonte de visualização externa.

Os microscópios digitais fabricados por *Fused Filament Fabrication* - FFF tornaram-se numa mais-valia para instituições com menores recursos financeiros dado o baixo custo de produção e a garantia de qualidade. Sendo que a maioria dos microscópios são *open-source*, o *design* e as suas funcionalidades podem ser adaptados às necessidades destas instituições para assim melhor servir o propósito a que se destinam.

Para que o fabrico de microscópios seja possível através de impressão 3D são necessários *softwares* de *Computer Aided Design* - CAD e de pós processamento. A oferta de *softwares* de modelação é bastante diversificada e permite, para além da própria modelação, a execução de diversos estudos que simulam o comportamento dos materiais ou de um conjunto de peças modeladas quando sujeitos a algum tipo de *stress* ou outros fatores externos (temperatura, pressão, exposição à radiação, exposição a

químicos, etc). Os *softwares* de pós-processamento permitem ajustar parâmetros de impressão, já que devem ser respeitados os requisitos de impressão de cada material. Por exemplo, para *Polylactic Acid* - PLA é necessária uma temperatura ótima de impressão mais baixa em relação ao *Polyurethane Thermoplastic* - TPU, assim como uma velocidade relativamente mais alta. Também podem ser realizados ajustes ao nível da peça fabricada, tal como a aplicação de deformações.

Pretende-se fabricar um microscópio digital com recurso à impressão 3D, aliado a conceitos de automatização, modularidade, portabilidade, baixo custo e código aberto. A comunidade de impressão 3D está constantemente a inovar e a contribuição com novas ideias é fulcral para o desenvolvimento de novas soluções, sendo que os microscópios desenvolvidos pela comunidade têm margem para serem melhorados.

1.2 Motivação

A contribuição com novas ideias/soluções na comunidade de impressão 3D torna-se essencial para a propagação de conhecimento e potenciais novos desenvolvimentos. Estas soluções são importantes na medida em que, por exemplo, instituições de ensino com menores recursos financeiros tenham acesso a microscópios digitais de qualidade que auxiliem o leccionamento de algumas unidades curriculares. As instituições com menores recursos financeiros também podem tirar partido destes microscópios, uma vez que é possível aumentar o *stock* disponível de material com um menor investimento. Também é possível transportar facilmente o microscópio quando o trabalho de campo é requerido dado que se trata de uma solução 100% portátil, algo que os microscópios digitais presentes no mercado de marcas reconhecidas não permitem dado que dependem sempre de fontes externas para alimentação ou visualização de imagem.

A facilidade de operação de um microscópio é importante no que diz respeito à interação do utilizador. A implementação de um método de manipulação da amostra mais preciso e mais rápido permite poupar tempo ao utilizador, visto que necessita de despende de menos tempo para colocar a amostra na posição pretendida. Os microscópios digitais *low-cost*, fabricados em 3D, não são sinónimo de menos funcionalidades. É possível manter os mesmos modos de imagem disponíveis nos microscópios digitais de marcas conhecidas assim como mecanismos de automatização neles presente.

1.3 Microscópios digitais

A transformação digital é um processo que visa aumentar a produtividade com base na utilização dos mais recentes meios tecnológicos. A utilização de recursos tecnológicos assim como metodologias de análise de dados melhoram a eficiência de processos internos e geram valor. A contemplação da

transformação digital na área da medicina moderna é o caminho a seguir, sendo que os microscópios digitais mais atuais tendem a seguir também este caminho. O investimento e investigação nestes sistemas por parte de empresas com forte presença no mercado permitiu a transição do ótico para o digital, que por consequência acarreta um novo lote de funcionalidades que podem ser introduzidas via *software* e *hardware*. A automatização, a introdução de inteligência artificial e *machine learning* já são uma realidade nos microscópios, permitindo diagnósticos automáticos e mais precisos, libertando o utilizador para outras tarefas importantes.

A constituição dos microscópios digitais (Figura 1.1) evoluiu ao longo dos anos, porém os componentes óticos, mecânicos e digitais principais mantêm-se os mesmos: uma fonte de luz (*Light-Emitting Diode* - LED), condensador (diafragma de abertura variável com o objetivo de focar a luz na amostra), objetiva, mesa (local onde é colocada a amostra) e câmara digital (com sensores de imagem baseados em *charge-coupled device* - CCD ou *complementary metal-oxide-semiconductor* - CMOS).

O *layout* dos microscópios digitais segue uma de duas configurações distintas: configuração vertical ou configuração invertida. Na configuração vertical, a objetiva está localizada acima da mesa, do condensador e da fonte de luz, enquanto que na configuração invertida está localizada abaixo dos componentes mencionados. Segundo *Kay Scheffler, et al* [2], afiliada à *Leica Microsystems GmbH*, empresa fabricante de microscópios, existem vantagens na utilização de uma configuração invertida em comparação à vertical. Estas vantagens assentam em 5 pontos:

- Possibilidade de utilização de amostras com maior peso e dimensão, que por consequência significa uma distância de trabalho maior;
- Visualização de um maior número de amostras por período de tempo: são necessários menos passos para focar a amostra e trocar a mesma, mantendo-a sempre focada (Figura 1.2);
- Inexistência do risco de comprimir a amostra contra a mesa;
- Permite encurtar tempo e poupar dinheiro na preparação de amostras;
- A imagem da amostra move-se no mesmo sentido que a mesa.

Benedict Diederich, et al [14] afirma que os microscópios digitais da atualidade situam-se num patamar de grande complexidade no que diz respeito ao conjunto de componentes óticos e fotomecânicos que os constituem. Uma vez que os componentes são originários de diferentes fabricantes, a compatibilidade de peças não é garantida, o que obriga à conceção de adaptadores que podem comprometer a integridade e estabilidade dos diferentes microscópios. Por isso, a adesão a normas *standard*, tais como a *International Organization for Standardization* (ISO) ou *Royal Microscopy Society* (RMS), é cada vez mais frequente [14]. Os microscópios comerciais assumem o compromisso de qualidade garantida, porém obrigam a que o utilizador se restrinja à marca escolhida. *George O.T. Merces, et al* [15] refere que uma das contrapartidas é o utilizador não ter liberdade na escolha de componentes após a aquisição

do microscópio, acabando por se restringir aos componentes comercializados pela marca.

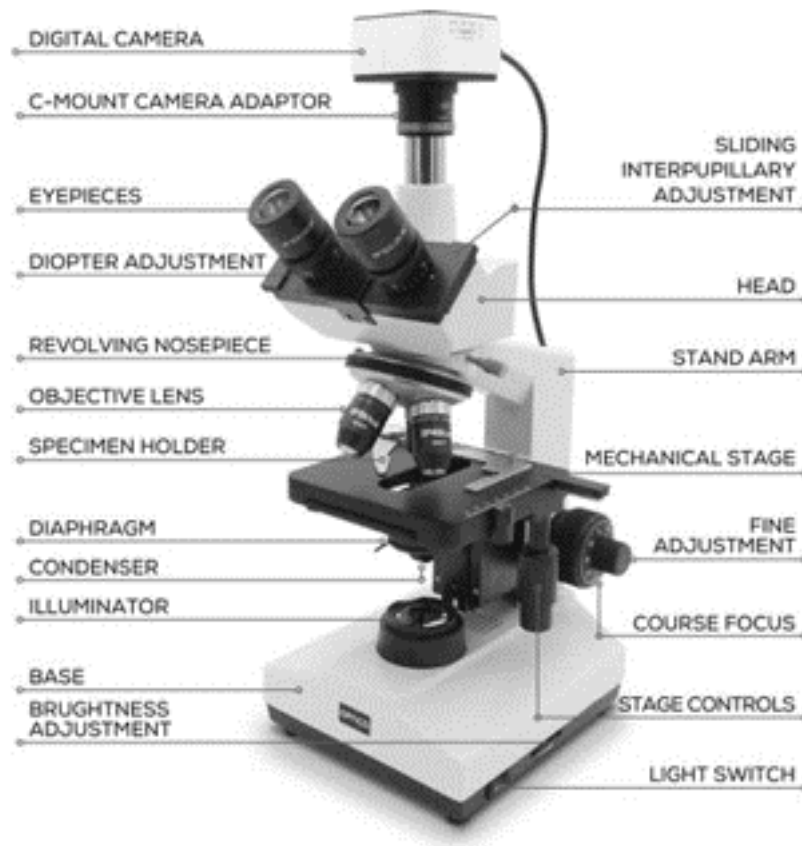


Fig. 1.1: Diagrama de *hardware* de um microscópio digital. (Fonte: *Microscope Australia* [1])

Action	Upright	total	Inverted	total
Lower the stage	5 sec.	5	–	
Move the stage out	5 sec.	10	–	
Remove the sample holder/take a new one	5 sec.	15	–	
Place the sample holder on the holder and protect it	5 sec.	20	–	
Use a sample press to level the sample surface	5 sec.	25	–	
Change to lower magnification for positioning	5 sec.	30	5 sec.	5
Place sample back onto the stage, move back, refocus	10 sec.	40	5	10

Fig. 1.2: Comparação entre os passos requeridos para operar com um microscópio vertical versus microscópio invertido (Fonte: Five Advantages of Inverted Over Upright Microscopes in Industrial Applications | Science Lab | Leica Microsystems [2])

Existem várias marcas dedicadas ao fabrico e comercialização de microscópios para diferentes áreas, como é o caso da *Nikon*, da *Leica Microsystems* e da *Olympus*. No caso da *Nikon*, presente neste mercado desde 1917, os modelos *Eclipse* na vertente vertical ou invertida são bastante reconhecidos por combinarem diferentes características de acordo com a área em que se aplicam. Os modelos *Eclipse Si* e *Eclipse Ei* são usados na área clínica e educativa, priorizando a estabilidade do equipamento, o fácil manuseamento e a qualidade da visualização da imagem ao utilizar objetivas da série *CFI BE2 Plan Achromat* que se caracterizam por serem de correção infinita e por terem a capacidade de corrigir a aberração cromática, fornecendo imagens com alto nível de contraste. Estes modelos podem incorporar câmaras digitais para aquisição de imagens em alta definição. O modelo *Eclipse Si* permite observações em campo claro, campo escuro, contraste de fase, polarização simples e fluorescência [16] [17].

Colocando mais uma vez o foco na área educativa, a *Leica Microsystems* e a *Olympus* comercializam igualmente modelos competitivos, possuindo características semelhantes às mencionadas acima. No caso da *Leica Microsystems*, são comercializados os modelos DM300, DM500 e DM750 e no caso da *Olympus* os modelos CX. Todos os modelos tratam-se de microscópios óticos, alguns com a particularidade de poderem ser adaptados a digital e de permitirem diferentes modos de imagem. [18] [19].

Independentemente do microscópio e respetiva marca que se pretenda adquirir, é necessário ter em conta alguns aspetos que garantam a qualidade da observação. A qualidade das objetivas impacta diretamente na observação realizada, pelo que deve ser escolhida uma de acordo com a dimensão da espécie a analisar. A abertura numérica (*Numerical Aperture* - NA) da objetiva determina a quantidade de luz capturada, o que por sua vez irá determinar o brilho, a profundidade do foco e a resolução da imagem. Especialmente no caso da fluorescência recomendam-se objetivas com maior NA. O campo de visão é outro aspeto a ter em conta já que um *Field of View* - FOV maior implica uma maior quantidade de informação capturada.

O facto de um microscópio ser digital implica a presença de uma câmara. A câmara deve ser de alta resolução de modo a reproduzir imagens com maior detalhe possível. O *frame rate* é importante na medida em que determina a quantidade de imagens obtidas por segundo, o que afeta diretamente o *stream* de vídeo em tempo real. Devem ser escolhidas câmaras que garantam um mínimo de 30 *frames per second* - FPS.

Em relação ao domínio ótico, *Paul Gordon, et al* [20] refere que, de modo a se identificarem características morfológicas em células, é necessário que a resolução da imagem seja menor que as características da mesma. Por exemplo, se um agente patogénico provoca infeções numa célula que variam em tamanho entre 0,5 μm e 1 μm , a resolução da imagem obtida deve ser, pelo menos, de 0,5 μm [20]. Para este efeito, a abertura numérica da objetiva e do condensador devem seguir o critério de *Rayleigh* (Equação 1.1).

$$d_{xy} = \frac{1.22\lambda}{NA_{Obj} + NA_{Cond}} \quad (1.1)$$

onde d_{xy} é a distância mínima entre dois pontos, λ é o comprimento de onda, NA_{Obj} é a abertura numérica da objetiva e NA_{Cond} é a abertura numérica do condensador [20].

Para que ocorra a formação de imagem (Figura 1.3) é necessário que a distância da amostra à objetiva (d_o) se situe entre a distância focal da objetiva (f_o) e o dobro da mesma ($2f_o$). Também é imperativo que a distância da imagem real invertida (G_o) à ocular (d_e) seja menor que a distância focal da ocular (f_e) [3]. O poder de ampliação de um microscópio é determinado pelo produto entre o poder ampliação das lentes presentes na ocular com a objetiva (Equação 1.2).

$$A_T = A_{oc} \times A_{ob} \quad (1.2)$$

onde A_T é a ampliação total, A_{oc} é a ampliação da ocular e A_{ob} é a ampliação da objetiva.

A ampliação pode ainda ser calculada através da Equação 1.3:

$$A_T = \frac{D_i}{D_r} \quad (1.3)$$

onde A_T é a ampliação Total, D_i é a distância medida na imagem entre dois pontos e D_r é a distância real medida entre dois pontos.

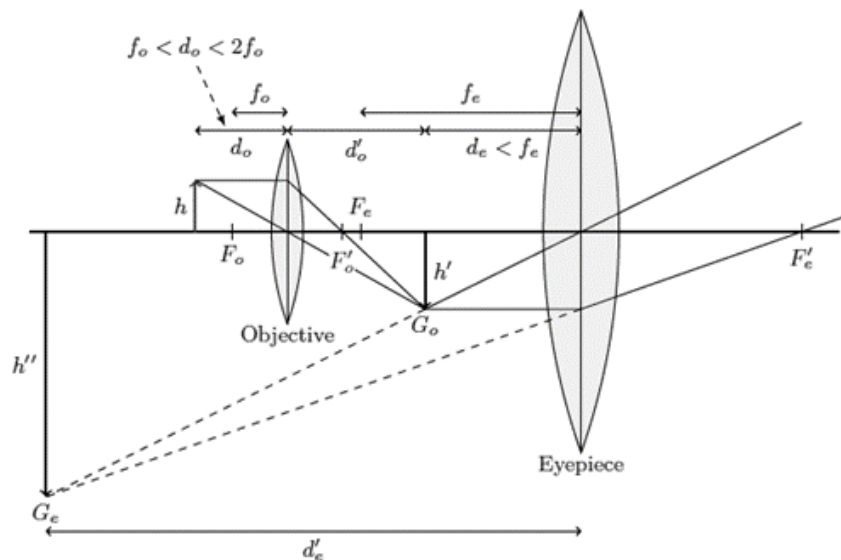


Fig. 1.3: Formação de imagem num microscópio composto. F_o : Ponto focal do objeto na objetiva; F'_o : Ponto focal da imagem na objetiva; F_e : Ponto focal do objeto na ocular; F'_e : Ponto focal da imagem na ocular (Fonte: *Medical Imaging Systems – An Introductory Guide* [3])

O modo de imagem *standard* presente na maioria dos microscópios é a transmissão simples, conhecida também por configuração de campo claro. Na microscopia de campo claro (Figura 1.4A), o feixe

de luz emitido pela fonte atravessa um sistema de lentes convergentes que o direciona para a amostra e distribui de forma igualitária pelo campo de visão do microscópio. O feixe atravessa a amostra e é captado pela objetiva, que por sua vez projeta a imagem de forma invertida e ampliada na ocular. Por fim, a ocular amplia e inverte a imagem fornecida pela objetiva, formando-se uma imagem virtual que, no caso de se tratar de um microscópio digital, é aquela que vai ser captada pela câmara.

Segundo *Quiang Wu, et al.* [4], durante o processo de observação de uma amostra existem quatro momentos distintos respeitantes à captação da imagem que se traduzem em quatro tipos de imagem: imagem ótica, imagem contínua, imagem digital e imagem exibida. Entende-se por imagem ótica como a distribuição contínua de luz sobre uma face bidimensional. Esta imagem não possui a totalidade da informação presente na amostra uma vez que se trata da projeção de um plano de duas dimensões com origem numa fonte de três dimensões.

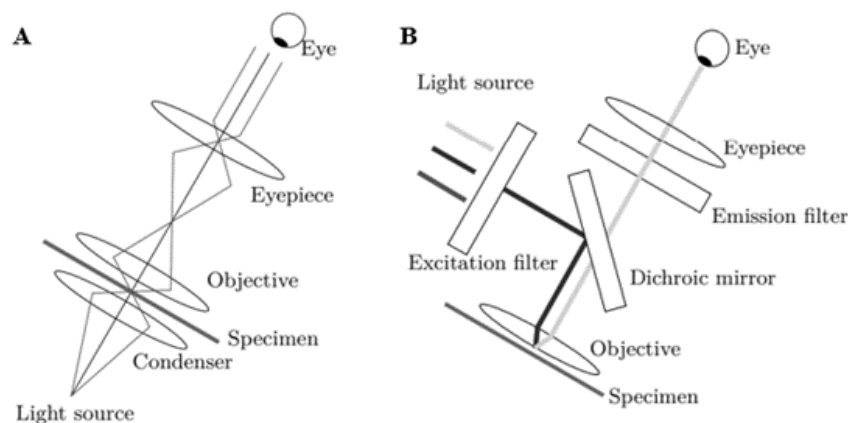


Fig. 1.4: Modos de imagem num microscópio. A: Microscopia de transmissão em campo claro; B: Microscopia de Fluorescência (Fonte: *Medical Imaging Systems – An Introductory Guide* [3])

A imagem contínua define-se como a imagem traduzida matematicamente como uma função contínua de duas variáveis espaciais (x,y) [4].

A imagem digital traduz-se como a imagem produzida através do processo de digitalização, ou seja, a imagem ótica é traduzida num *array* retangular de valores inteiros. Este processo é caracterizado pela introdução de ruído ou perda de informação vital quando mal aplicado, o que pode tornar a imagem digital imprópria para análise. *Quiang Wu, et al.* afirma que a digitalização de uma imagem nunca preserva a informação original na sua totalidade, estabelecendo ainda este facto como uma tarefa impossível. No entanto é vital que a informação mais importante seja preservada de forma a que o processo de digitalização seja capaz de trabalhar sobre a mesma, permitindo uma maior aproximação desta imagem à imagem real [4].

Por fim, a imagem exibida consiste na conversão da imagem digital de volta à imagem ótica através do método de interpolação, uma vez que os olhos não são capazes de interpretar uma imagem digital [4].

A relação existente entre estas imagens encontra-se representada na Figura 1.5.

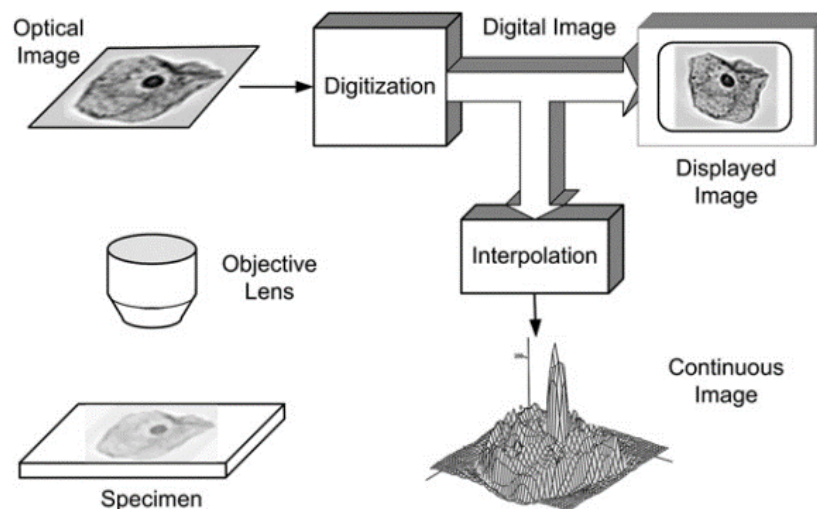


Fig. 1.5: As 4 imagens inerentes à microscopia digital (Fonte: *Microscope Image Processing* [4])

Quando se pretende visualizar estruturas pontuais de uma espécie utiliza-se o método de fluorescência, que utiliza anticorpos acoplados a fluoróforos para visualização dessas estruturas através do efeito de fluorescência. Na microscopia de fluorescência (Figura 1.4B), uma fonte emissora de luz emite um feixe que atravessa um filtro de excitação. Aqui, é filtrado um determinado comprimento de onda que, ao refletir no espelho dicróico e atravessar a objetiva até à amostra, excita o fluoróforo presente nesta. A fluorescência ocorre porque os eletrões, ao serem excitados por um determinado comprimento de onda, passam para um estado de energia mais alto e posteriormente voltam ao estado inicial, sendo que neste processo existe libertação de energia. A fluorescência gerada na amostra produz um feixe de luz de comprimento de onda maior que o original que atravessa o espelho dicróico e um filtro de barreira, sendo que este último bloqueia qualquer excitação residual. O espelho dicróico funciona como refletor e transmissor em simultâneo. Posteriormente o feixe atravessa a objetiva e incide sobre a câmara digital.

Tal como *Quiang Wu, et al.* [4] afirma no livro *Microscope Image Processing*, esta libertação de energia pode ser efetuada sob a forma de calor ou emissão de luz. Se o *spin* do eletrão se mantiver inalterado, o estado de excitação designa-se por Estado Singlete (*Singlet State*), mas se existir alteração do *spin*, o estado de excitação designa-se por Estado Tripleto (*Triplet State*). Se um eletrão cai de um Estado Singlete, o fenómeno dá origem a emissão de fluorescência, mas se cair de um Estado Tripleto o fenómeno dá origem à fosforescência. A diferença entre estes dois termos reside na rapidez com que o eletrão volta ao seu estado fundamental, que é mais rápido no caso da fluorescência.

Através da Equação 1.4 é possível calcular o comprimento de onda do fóton emitido, que corresponde à diferença de energia entre os estados de excitação e emissão (*Quiang Wu, et al.* [4]).

$$\lambda_{EM} = \frac{hc}{E_{EM}} \quad (1.4)$$

onde λ_{EM} é o comprimento de onda do fóton emitido, h é a constante de *Planck*, c é a velocidade da luz e E_{EM} é a diferença de energia entre dois estados durante a emissão de luz.

A intensidade do brilho resultante da emissão varia entre 0 e 1, sendo que 0 corresponde a ausência de fluorescência e 1 à intensidade máxima de brilho. A fluorescência é maior quanto maior foi a intensidade da iluminação sobre a amostra, dado que o número de fótons emitidos é maior e, por consequência, existe uma maior quantidade de energia libertada [4]. A lei que quantifica a intensidade de luz fluorescente que atravessa uma amostra é a Lei de *Beer-Lambert*, que estabelece uma relação entre a concentração do fluoróforo, a espessura da amostra e a absorção de luz. Esta lei é definida pela Equação 1.3.

$$I = I_o \times 10^{-xl} \quad (1.5)$$

onde I representa a intensidade de luz transmitida, I_o a intensidade de luz incidente, x o coeficiente de absorção do meio e l a espessura do meio absorvente.

É necessário ter em atenção que o fluoróforo só fluoresce na presença de um determinado comprimento de onda, algo que é obtido através da escolha acertada do espelho dicróico e do filtro de barreira. Na maioria das aplicações, este espelho funciona como um filtro passa-alto, o que significa que corta os comprimentos de onda abaixo do λ definido para o mesmo, mas também funciona como refletor de comprimentos de onda compreendidos num determinado intervalo abaixo do λ definido para o espelho.

Cada fluoróforo possui um espectro de emissão único que representa os comprimentos de onda específicos em que ele emite luz após a excitação. Isto permite a identificação e distinção de diferentes estruturas numa amostra, tornando esta técnica seletiva (um fluoróforo só emite radiação perante a incidência de um determinado comprimento de onda). Este método é altamente sensível e produz um contraste significativo em relação ao fundo escuro, útil para a observação de estruturas e processos celulares.

1.4 Impressão 3D

O termo *Filament Deposition Modeling* - FDM foi aplicado pela primeira vez em 1989 por *Scott Crump* com a criação da patente US5121329 com o nome “*Apparatus and method for creating three-dimensional objects*” [21]. FDM é um processo de fabrico que consiste na deposição de material extrudido por camada, onde normalmente se utilizam polímeros como o PLA, para criar objetos tridimensionais. Este método de fabrico era unicamente utilizado pela *Stratasys Ltd*, empresa fundada por *Crump* no ano de 1989. A popularização deste processo apenas se deu em 2005 com o aparecimento do projeto *RepRap* e

respetiva comunidade, que introduziu o conceito de *Fused Filament Fabrication* - FFF (termo semelhante ao FDM). Foi a partir deste projeto, e após a expiração da patente US5121329 em 2009, que nasceram várias empresas que investiram fortemente nesta área e atualmente possuem uma forte presença no mercado: *Ultimaker*, *Prusa Research* e *Creality* [22].

A diversidade de empresas no mercado orientadas para impressoras e impressão 3D contribuiu para a diversificação da oferta, o que por sua vez contribuiu para o baixo custo e conseqüente banalização das impressoras 3D. A popularidade desta área levou ao aparecimento de diversas comunidades que contribuem para a inovação de produtos.

Uma impressora 3D (Figura 1.6) é constituída por uma estrutura principal, denominada por *Gantry*, uma mesa, uma cabeça extrusora, um suporte para filamento e eletrônica diversa. As impressoras mais populares do mercado utilizam três motores de passo para movimentação em x , y e z e um quarto para extrusão de filamento. A extrusão de filamento pode basear-se em dois sistemas: sistema de extrusão direta (a extrusora e a *hotend* formam um único elemento, minimizando a distância entre o ponto de tração e o bico) ou sistema *Bowden* (a extrusora é fixa na *Gantry* e empurra o filamento através de um tubo de *Bowden* até à *hotend*) (Figura 1.7). O cabo *Bowden* foi inventado por *Frank Bowden* como forma de substituir as hastes rígidas utilizadas nos sistemas de travagem das bicicletas fabricadas pela sua empresa, a *Raleigh Bicycle Company*. O cabo *Bowden* é constituído por um tubo exterior e por um cabo interior, sendo que este último é utilizado para transmitir força mecânica ao ser movido.

A popularidade da impressão 3D continua a aumentar, assim como o investimento das empresas em novas tecnologias e métodos de fabrico. Nas impressoras mais recentes já se utiliza o conceito de robô delta, onde uma das grandes vantagens reside num menor tempo de impressão gasto em comparação às impressoras cartesianas. Fazem parte das funcionalidades mais notórias o auto nivelamento da mesa; a mesa aquecida que atinge normalmente temperaturas até 80°C, aumentando adesão da primeira camada à mesma e evitando assim que a peça se desloque no decorrer da impressão; extrusão dupla ou tripla, que permite a impressão de um objeto com dois ou três filamentos diferentes, respetivamente.

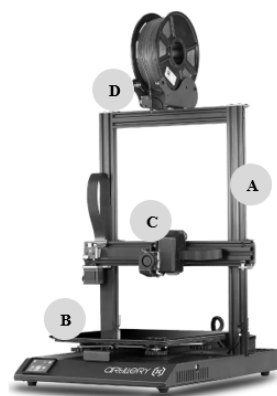


Fig. 1.6: *Artillery Sidewinder X1*. A: *Gantry*; B: *Mesa*; C: *Cabeça extrusora*; D: *Suporte para Filamento* (Fonte: *Artillery 3D*)

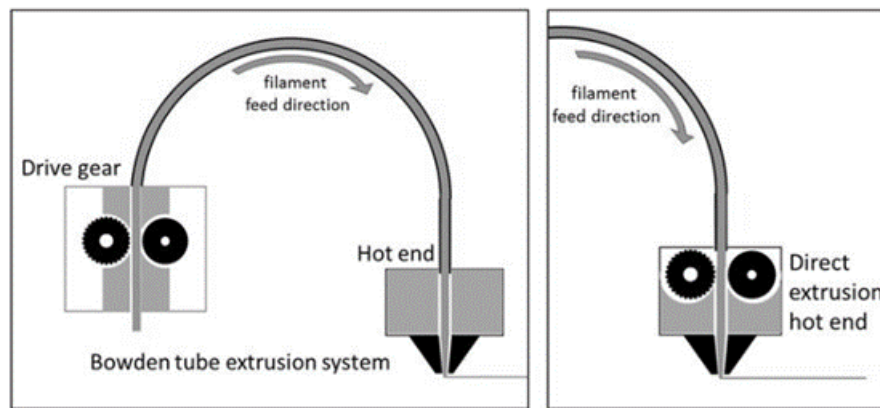


Fig. 1.7: Sistema Bowden (à esquerda) e sistema de extrusão direta (à direita) (Fonte: *3D printing of nonplanar layers for smooth surface generation* [5])

O material mais popular utilizado na impressão 3D são os polímeros e copolímeros, nomeadamente PLA e TPU. São materiais baratos e dotados de excelentes características que permitem a criação de objetos para diferentes fins. O PLA é um material de dureza rígida e de alta resistência e o TPU é caracterizado pela sua alta maleabilidade. Existe ainda a Acrilonitrila Butadieno Estireno - *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), caracterizado por ser resistente a altas temperaturas e impactos e ser menos frágil que o PLA, e o *Polyethylene Terephthalate Glycol* - PETG, caracterizado por ser muito resistente a impactos e *Food-Friendly*, ou seja, indicado para aplicações gastronómicas. Existem também no mercado filamentos biocompatíveis. O PETG é uma adaptação do *Polyethylene terephthalate* - PET ao qual é adicionado *Glycol* - G a nível molecular, conferindo-lhe assim diferentes propriedades químicas.

As comunidades criadas em torno desta temática permitiram a partilha de ideias, conhecimento e inovações na área. O setor de impressão 3D faturou cerca de 11 biliões de dólares em 2021 e, segundo *Michael Molitch-Hou*, analista de impressão 3D, estima-se que se atinjam os 50 biliões de dólares até 2050 [23]. Para que uma ideia se torne em algo palpável são necessários *softwares* de que permitam desenhar tridimensionalmente cada objeto. Estes *softwares* são denominados por *softwares* de *Computed Assisted Design* - CAD e permitem criar, publicar e gerir processos de modelação assistida por computador. Existe uma ampla oferta de *softwares* CAD no mercado, com destaque para o *SolidWorks* e *CATIA* fornecidos pela *Dassault Systèmes S.A.* Colocando o foco no *SolidWorks*, visto que foi o *software* utilizado para o desenvolvimento do sistema proposto, o mesmo pode ser utilizado nas mais diversas áreas, como a áreas médica, industrial, científica, educacional e tecnológica. A conceção de um objeto passa por agregar diferentes partes tridimensionais através de uma primeira conceção bidimensional, isto é, primeiramente é desenhada a peça no plano bidimensional e depois converte-se para o plano tridimensional onde a agregação é feita.

O *SolidWorks* permite realizar montagens de diferentes peças e simular os respetivos pontos de articulação, assim como simular diferentes estudos estruturais de um objeto de modo a compreender

o seu comportamento no mundo real.

Anteriormente à impressão de um objeto, é necessário recorrer a *softwares* de pós-processamento. Estes *softwares* são responsáveis pelo *slicing* dos objetos a imprimir, convertendo-os em várias camadas adjacentes. Os ficheiros carregados são convertidos em G-CODE, formato compreendido pelas impressoras 3D e que indica como deve ser impresso determinado objeto. É nos *softwares* de *slicing* que se parametriza uma impressão, isto é, definem-se parâmetros como a qualidade de impressão (correlacionada em parte com a espessura das camadas), o enchimento de um objeto (define se um objeto é oco ou não), temperatura de impressão (materiais diferentes requerem temperaturas de impressão diferentes), suportes (apoios necessários à impressão), modos de aderência (evitam que o objeto se mova durante a impressão), entre outras centenas de opções.

A impressão 3D caracteriza-se por ser um método de prototipagem rápida e precisa. Os materiais mais comuns são os plásticos e alguns metais desde que a sua temperatura seja facilmente manipulável para impressão 3D.

A área útil de impressão também poderá ser um obstáculo quando se pretendem fabricar peças de maiores dimensões. Isto implica que o objeto seja dividido em partes, o que pode prejudicar o design e função final a que se destina. Em contrapartida, objetos mais pequenos acabam por ser mais rápidos a ser fabricados, tendo um menor custo associado. Volumes maiores implicam custos maiores, sendo que a produção em massa de grandes volumes pode não compensar o investimento quando comparado a outros métodos de produção.

Dado que a impressão 3D se efetua camada por camada, isto pode implicar problemas em condições específicas, isto é, um objeto fabricado por este método submetido a condições de *stress* pode acabar por se delaminar, levando à sua quebra. Esta é uma situação em que o pós-processamento de um objeto pode ser crucial, isto é, pode fazer diferença na medida em que um objeto se torne mais resistente através da aplicação de produtos destinados a este fim. Além disso, o pós-processamento é essencial quando se pretende obter um objeto apelativo a nível visual. A desvantagem do pós-processamento acaba por ser a quantidade tempo despendido e os custos do material associado ao processo.

A resolução de impressão determina a qualidade do objeto final. Quanto menor for o diâmetro do *nozzle*, maior será a qualidade do objeto uma vez que os detalhes ficarão mais bem definidos, e vice-versa. No entanto, algumas impressoras possuem tolerâncias menores que outras, o que implica que o objeto fabricado será igual ao design original. Isto implica a aplicação de pós-processamento, que por consequência afetará o custo de produção [24].

O *warping* é outro problema inerente à impressão 3D, embora ocorra menos frequentemente em impressoras mais recentes. Trata-se de uma deformação que ocorre durante a impressão de um objeto devido ao arrefecimento diferencial das camadas. Este arrefecimento causa acumulação de tensões in-

ternas que puxam a camada subjacente para cima, causando distorção (Figura 1.8).

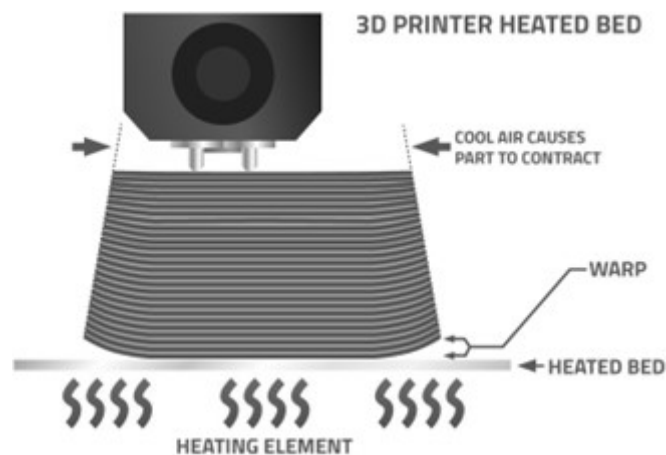


Fig. 1.8: *Warping* (Fonte: *Airwolf 3D* [6])

A solução para o problema apresentado passa por utilizar uma base aquecida durante a impressão de modo a minimizar a deformação, mas nem sempre a temperatura é uniforme em todos os pontos da base, por isso é também aconselhado o uso de um *raft* que consiste numa caixa de ar que serve de base ao objeto, aumentando assim a aderência da primeira camada do mesmo.

1.4.1 Impressão 3D associada à microscopia

A microscopia é essencial no estudo da biologia e dos processos biológicos, contudo é necessário um alto investimento e treino especializado. Estes obstáculos colocam utilizadores com menores possibilidades financeiras em desvantagem. O aparecimento da impressão 3D foi crucial ao desenvolvimento de soluções de baixo custo nesta área, tornando possível a redução de custos e tempo de fabrico de microscópios. Segundo *L. J. Salazar-Serrano, et al* [25], peças impressas em 3D para microscópios podem torná-lo entre 50% a 90% mais barato. Desde então que muitos projetos *open-source* têm sido desenvolvidos, onde o grande destaque vai para projetos como o *OpenFlexure*, *Microscopi* ou *FlyPi*. Estes microscópios foram idealizados com o propósito de apoio à educação, onde a prototipagem rápida conjugada ao baixo custo de produção permitiu o desenvolvimento de soluções compostas por mecanismos e peças complexas facilmente fabricáveis [26] [27].

Outro projeto de sucesso é o microscópio holográfico desenvolvido por *Timothy O'Connor, et al* [28]. Com este equipamento de baixo custo, fabricado com recurso a FFF, foi possível diagnosticar infeções por *SARS-CoV-2* através da análise de células do sangue. Num período de tempo em que era ideal o diagnóstico rápido e eficaz do vírus, este microscópio revelou-se benéfico para instituições de saúde com menores recursos financeiros.

O acesso do público geral às novas tecnologias permitiu a liberdade de conceção, levando à idealização

novas abordagens de *design*, mecanismos e automação de microscópios. As *flexures* são um exemplo de um mecanismo de translação que podem ser impressas em 3D e que podem ser aplicadas nos microscópios como auxílio à movimentação da plataforma. São peças únicas com zonas deformáveis que permitem uma movimentação muito precisa (na ordem do micron) e são altamente duráveis.

A liberdade de concepção permite que a maioria dos componentes de um microscópio sejam aptos a serem impressos [26]. Desta forma é possível evitar barreiras impostas pelas empresas fabricantes de microscópios, isto é, a maioria dos componentes disponibilizados no mercado não são compatíveis entre diferentes marcas e, com a impressão 3D, é possível adaptar ou até mesmo universalizar alguns tipos de componentes. Contudo, é necessário ter em conta que nem todas as peças originais de um microscópio podem ser substituídas. *Jeffrey Kuhn* [29] refere características como a expansão termal plástica, tolerância na deposição do material e baixa resistência à tração, que devem ser consideradas nas limitações de peças substituídas. É necessário implementar estratégias na impressão 3D para minimizar estes fatores.

Os materiais biocompatíveis tornam-se uma grande vantagem na medida em que é possível manipular as amostras diretamente no material impresso, já que o mesmo não altera as suas propriedades ou fisiologia. Além disso, é possível criar sistemas de microfluídica que permitem dispensar, misturar ou separar reagentes numa amostra, elevando claramente o nível de manipulação da amostra por um custo inferior a um produto comercial.

Os microscópios fabricados por FFF têm margem para serem melhorados. *Paul J. Tadrous, et al* [30] afirma que a maioria dos microscópios fabricados por este método possuem limitações ao nível dos mecanismos de manipulação da amostra e que estes não são desenhados para observação direta e triagem, metodologia frequentemente utilizada em contexto clínico. *Paul J. Tadrous, et al* [30] afirma ainda que a dependência de uma câmara para aquisição de imagem compromete a portabilidade, o tamanho da imagem e respetivo campo de visão para profissionais que pretendam apenas fazer observações diretas. A conversão de analógico para digital também influencia a imagem ao nível do contraste e da resolução espacial, espectral e radiométrica [30].

1.5 Robô Delta: Geometria e cinemática

Um robô delta é constituído por três braços que permitem uma movimentação rápida e precisa em *xyz*. Comparativamente aos métodos tradicionais de deslocação no espaço, um robô delta permite agilizar o tempo de deslocação despendido entre dois pontos e, por consequência, o tempo geral despendido para a execução de uma tarefa. A sua geometria pode ser variável, isto é, existem diferentes concepções de robôs delta, porém todos se baseiam no mesmo princípio.

O modelo analisado no presente documento e que serve como base ao desenvolvimento do robô delta

a ser aplicado ao sistema proposto é o modelo de *S.Graves, et al* [8] segundo a cinemática inversa. Um robô delta (Figura 1.9) possui na sua estrutura três colunas: (A), (B) e (C). Cada coluna suporta um elemento deslizante (D) e cada elemento possui dois braços paralelos (E). Os braços dos três elementos conectam-se todos à mesma plataforma (F). Todos os braços possuem o mesmo comprimento e as colunas são perpendiculares em relação à base. [8].

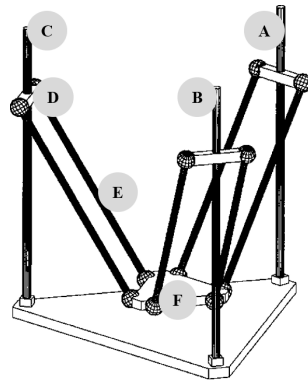


Fig. 1.9: Robô Delta. A: Coluna A; B: Coluna B; C: Coluna C; D: Elemento deslizante; E: Braço; F: Plataforma. (Fonte: *A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace* [7])

Segundo *S.Graves, et al* [8], é possível escrever as equações matemáticas simplificando o modelo da Figura 1.9. Uma linha de ação paralela e central aos dois braços conectar-se-á nas suas extremidades a duas linhas perpendiculares: uma correspondente ao carril e outra correspondente à plataforma. Existe ainda um vetor que se conecta até ao centro da plataforma. As relações geométricas são mantidas neste modelo (Figura 1.10).

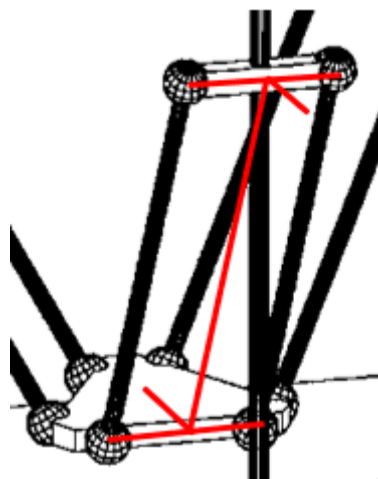


Fig. 1.10: Robô Delta (Modelo simplificado)

Segundo *S.Graves, et al* [8], é necessário assumir que: as colunas formam um triângulo equilátero, de modo a facilitar o cálculo das equações já que a variável respectiva à distância S entre colunas é a mesma; os pares de braços possuem o mesmo comprimento L ; No centro da plataforma localiza-se uma

cabeça. Tendo em conta as 3 colunas representadas por A , B e C , as restantes distâncias são representadas conforme a Figura 1.11 indica. Acz representa a altura do carril em relação à plataforma, Az representa a altura do elemento deslizante em relação à base, Hez representa a altura entre a plataforma e a cabeça E e Z a altura da cabeça em relação à base.

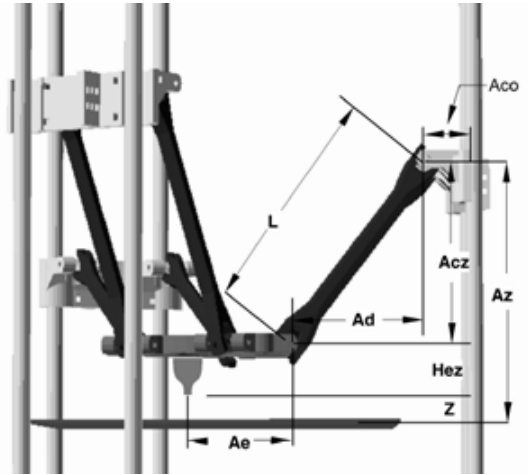


Fig. 1.11: Representação simplificada dos planos e vetores de um robô delta (Fonte: *Style Delta Robot Kinematics* [8])

Deste modo, é possível deduzir as equações 1.6, 1.7 e 1.8 [8].

$$Az = Z + Acz + Hez \quad (1.6)$$

$$Bz = Z + Bcz + Hez \quad (1.7)$$

$$Cz = Z + Ccz + Hez \quad (1.8)$$

De acordo com *S.Graves, et al* [8], resolvendo as equações em ordem a Z (Equações 1.9, 1.10 e 1.11), é possível transladar o plano XY para qualquer posição de Z . Para aplicar o conceito de cinemática inversa, processo matemático utilizado para calcular a posição de uma articulação de modo a colocar a plataforma numa determinada posição no espaço (Equação 1.12), é primeiramente definido um sistema de coordenadas cartesianas. *S.Graves, et al* [8] definiu um sistema em que a sua origem é o centro da base e onde a coluna A coincide com o eixo y e tem distância R ao centro da base. As colunas B e C ficam a 120° e -120° em relação à coluna A , respetivamente (Figura 1.12) [8]. A cinemática direta é o oposto da cinemática inversa (Equação 1.13).

$$Z = Az - Acz - Hez \quad (1.9)$$

$$Z = Bz - Bcz - Hez \quad (1.10)$$

$$Z = Cz - Ccz - Hez \quad (1.11)$$

$$\begin{cases} (x, y, z) \rightarrow (Az, Bz, Cz) \\ (Az, Bz, Cz) \rightarrow (x, y, z) \end{cases} \quad (1.12)$$

$$\begin{cases} (Az, Bz, Cz) \rightarrow (x, y, z) \\ (x, y, z) \rightarrow (Az, Bz, Cz) \end{cases} \quad (1.13)$$

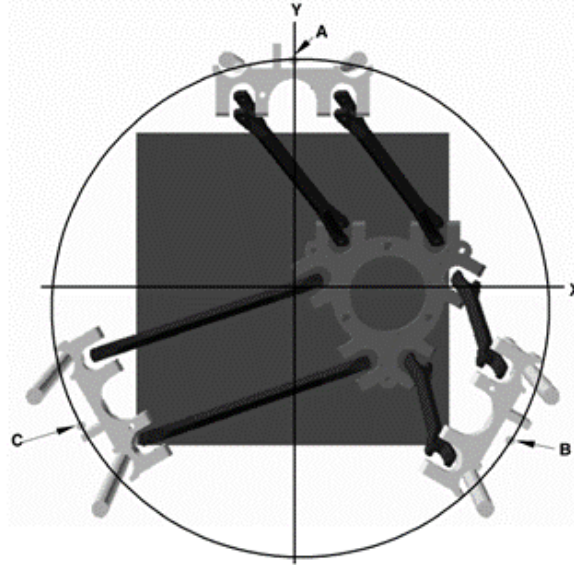


Fig. 1.12: Sistema de coordenadas cartesiano do robô delta (Fonte: *Style Delta Robot Kinematics* [8])

Tomando em consideração o esquema da Figura 1.11 para o cálculo das equações finais e aplicando o teorema de Pitágoras, obtêm-se as equações 1.14, 1.15 e 1.16.

$$L^2 = Ad^2 + Acz^2 \quad (1.14)$$

$$L^2 = Bd^2 + Bcz^2 \quad (1.15)$$

$$L^2 = Cd^2 + Ccz^2 \quad (1.16)$$

Seguidamente, *S.Graves, et al* [8] descreve a localização das colunas *A*, *B* e *C* no plano *XY*, definindo estas mesmas posições através das coordenadas (Ax, Ay) , (Bx, By) e (Cx, Cy) . Os *pivots*, definidos pelas coordenadas (Apx, Apy) , (Bpx, Bpy) e (Cpx, Cpy) , estão localizados no término da linha de ação do elemento deslizante. Entende-se o término como o ponto que liga *Aco* (*carriage offset*) com *L*. Tomando em consideração os vetores *Ae*, *Be* e *Ce*, *S.Graves, et al* [8] define as coordenadas correspondentes aos pontos que correlacionam a linha de ação *L* com a linha de ação da plataforma como (Acx, Acy) , (Bcx, Bcy) e (Ccx, Ccy) . Os vetores *Ae*, *Be* e *Ce* podem ser representados por Δx e Δy , logo obtêm-se as Equações 1.17 e 1.18.

$$x = Acx - Aex = Bcx - Bex = Ccx - Cex \quad (1.17)$$

$$y = Acy - Aey = Bcy - Bey = Ccy - Cey \quad (1.18)$$

De acordo com *S.Graves, et al* [8], as linhas de ação L deslocam-se sob forma de um arco, logo é possível aplicar a equação reduzida da circunferência para descobrir as localizações das colunas virtuais que definem o modelo matemático do robô delta. Neste modelo simplificado, uma das extremidades dos braços do robô coincidem num único ponto. O braços deslocam-se sob as colunas virtuais. Este modelo simplificado encontra-se representado na Figura 1.13.

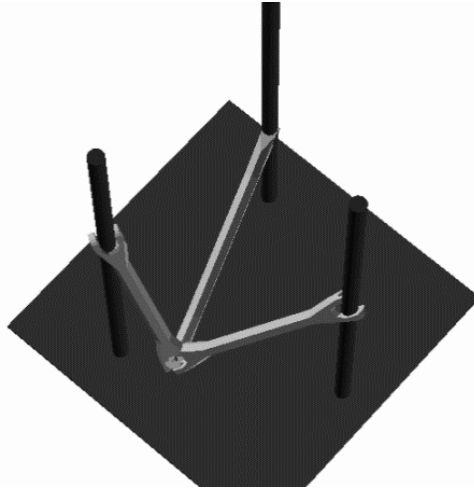


Fig. 1.13: Robô Delta: Modelo matemático simplificado de *S.Graves, et al* [8] (Fonte: *Style Delta Robot Kinematics* [8])

A equação reduzida da circunferência é dada pela Equação 1.19.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (1.19)$$

onde (a, b) representa o centro a circunferência e r o raio. Esta mesma equação é equivalente a (Equação 1.20)

$$(Acx - Apx)^2 + (Acy - Apy)^2 = Ad^2 \iff (x + Aex - Apx)^2 + (y + Aey - Apy)^2 = Ad^2 \quad (1.20)$$

S.Graves, et al [8] conclui que o centro da circunferência pode ser definido por $(Apx - Aex, Apy - Aey)$, que por sua vez representam a localização das colunas virtuais através das coordenadas definidas por (Avx, Avy) . Aplicando o conceito às colunas A, B e C , *S.Graves, et al* [8] define as Equações 1.21, 1.22, 1.23, 1.24, 1.25 e 1.26.

$$Avx = Apx - Aex \quad (1.21)$$

$$Avy = Apy - Aey \quad (1.22)$$

$$Bvx = Bpx - Bex \quad (1.23)$$

$$Bvy = Bpy - Bey \quad (1.24)$$

$$Cvx = Cpx - Cex \quad (1.25)$$

$$Cvy = Cpy - Cey \quad (1.26)$$

Resolvendo a equação reduzida da circunferência para as colunas A , B e C (Equações 1.27, 1.28 e 1.29), *S.Graves, et al* [8] obtém as fórmulas para a altura dos carris em relação à plataforma, que juntamente com as Equações 1.9, 1.10 e 1.11 resolvidas em ordem a Az , Bz e Cz , respetivamente, definem as fórmulas do robô delta segundo a cinemática inversa.

$$Acz = \sqrt{L^2 - (x - Avx)^2 - (y - Avy)^2} \quad (1.27)$$

$$Bcz = \sqrt{L^2 - (x - Bvx)^2 - (y - Bvy)^2} \quad (1.28)$$

$$Ccz = \sqrt{L^2 - (x - Cvx)^2 - (y - Cvy)^2} \quad (1.29)$$

1.6 Sistema proposto: μ Scope

A contribuição de ideias é fundamental ao aparecimento de novas soluções e, através de projetos como o *OpenFlexure* e o *Microscopi*, foi possível conceptualizar um microscópio que atende principalmente às necessidades educativas atuais. Na idealização do μ Scope foram considerados como principais conceitos chave a portabilidade, a modularidade e o termo *low-cost*. O *OpenFlexure* e o *Microscopi* são dois dos exemplos de microscópios *open-source*, automatizados e multi-imagem mais populares. O *OpenFlexure* possui 3 versões: uma *low-cost*, uma básica e uma de alta resolução. O preço varia de acordo com a versão. Com este microscópio é possível visualizar células do sangue ou moléculas com dimensões a partir de $1\mu\text{m}$. O *Microscopi* é uma abordagem semelhante ao *OpenFlexure*, porém com diferenças a nível de arquitetura, sistema de *flexures* (elemento/combinção de elementos flexíveis com um determinado número de graus de liberdade) e alguns componentes eletrónicos e de microscopia.

O μ Scope integra algumas funcionalidades presentes em ambos os microscópios. O μ Scope é um microscópio que envolve três módulos principais: o módulo da objetiva, filtros e lente; o módulo do robô delta; o módulo permutável. Este é também responsável por armazenar a eletrónica necessária ao funcionamento do sistema. Externamente ao microscópio, e conectado ao mesmo através de um cabo, ficará o módulo de controlo do robô delta e respetivo ecrã para visualização de imagem proveniente da câmara digital. No Capítulo 2, a conceção do *design* será abordada com mais detalhe.

A eletrónica que integra o μ Scope baseia-se num computador *Raspberry Pi* [31], ao qual está conectado um ecrã tátil para visualização de imagem proveniente da câmara digital com sensor *Sony IMX219* [32]. É utilizado um microcontrolador *Arduino* [33] para operar 3 motores de passo 28BYJ-48 [34] através de um *joystick* e dois botões. Os motores de passo mencionados são uma boa solução para o sistema proposto já que o *step size* é suficientemente pequeno (32 passos por revolução) para garantir a precisão necessária ao deslocamento da plataforma do robô delta. São ainda utilizados LEDs para fins de iluminação da amostra. O *Raspberry Pi* e o *Arduino* são componentes bastante conhecidos na co-

munidade *open-source*, sendo excelentes soluções para projetos de automação e controlo. Grande parte dos projetos de microscopia utilizam estes dispositivos pois está comprovado o sucesso da sua aplicação. Será ainda utilizada uma *powerbank* de 10000mAh para alimentar todo o sistema.

Os materiais utilizados para a impressão das peças do sistema são o PLA e o TPU. O PLA é aplicado em peças com funções estruturais em que a rigidez é crucial. O TPU é aplicado em peças que necessitam de ser deformadas, como o caso das *flexures*.

O μ Scope integra um módulo permutável que pode acoplar diversos componentes. A hierarquia dos módulos é abordada com mais detalhe no Capítulo 2.

O material de ótica utilizado consiste numa objetiva RMS com poder de ampliação de 40x e abertura numérica de 0.65NA, uma lente de magnificação (referência N/D), uma lente convexa (referência N/D) e um espelho dicróico *ThorLabs DMLP490T*.

Como já foi referido anteriormente, o μ Scope integra um robô delta com fim de manipular a posição da amostra. O robô delta conceptualizado foi inspirado no design proposto por *J. E. Correa, et al* [9]. Foram realizadas adaptações deste modelo para o μ Scope, já que a eletrónica utilizada no sistema proposto é distinta. O sistema de *flexures* concebido por *J. E. Correa, et al* [9] baseia-se em três camadas: duas camadas rígidas em PLA e uma camada intermédia em polietileno (Figura 1.14).

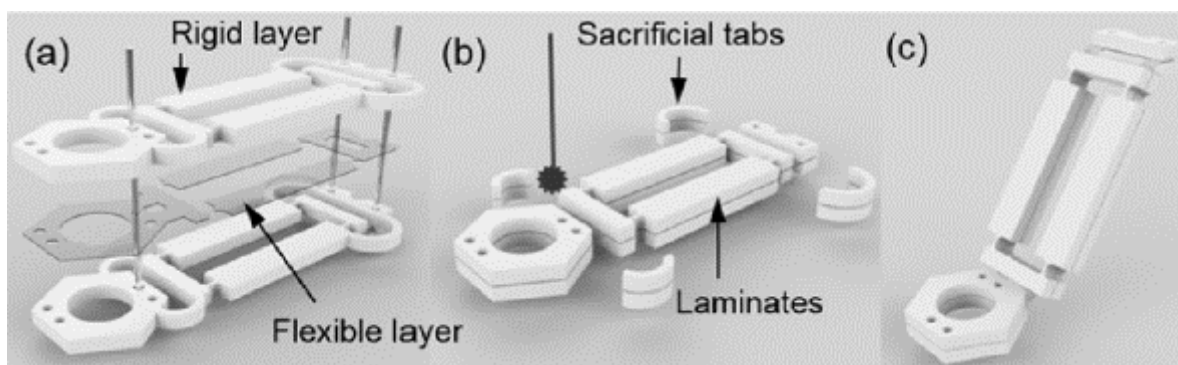


Fig. 1.14: Sistema de *flexures* proposto por *J. E. Correa, et al* [9]. (Fonte: *Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based Delta robot* [9])

O μ Scope utiliza uma simplificação destas *flexures*, ou seja, o sistema conceptualizado consiste numa única camada em TPU com 24 pontos deformáveis que permitem movimentos de translação quando sujeitos a forças externas.

1.6.1 Microscópio *OpenFlexure*

O microscópio *OpenFlexure* (Figura 1.15) é um dos projetos mais bem-sucedidos de microscopia *low-cost* e *open-source* com mais de 100 unidades fabricadas para fins educacionais, científicos e clínicos em países como o Quênia e a Tanzânia [10]. A necessidade de um microscópio deste tipo surgiu devido à

oferta de mercado apresentar preços não comportáveis por instituições com menores recursos financeiros. Além disso, os custos de manutenção são altos e a disponibilidade de peças de substituição é reduzida [10]. A disponibilidade de *hardware open-source* auxiliou bastante no desenvolvimento de projetos científicos deste género.

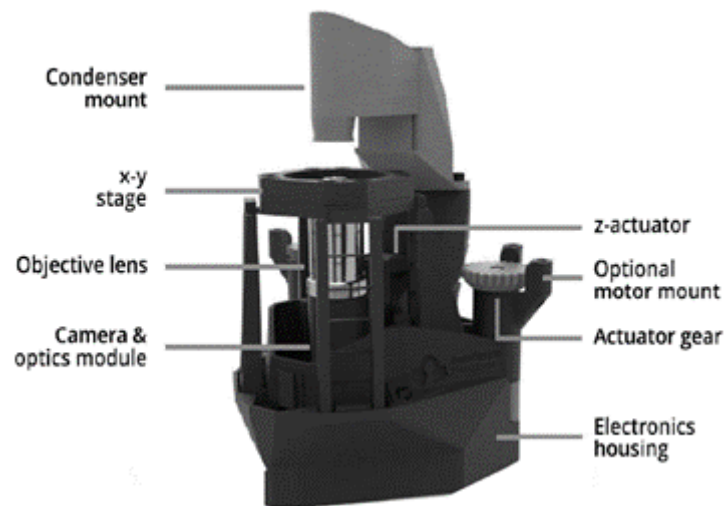


Fig. 1.15: Microscópio *OpenFlexure* (Fonte: *Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope* [10])

O *OpenFlexure* caracteriza-se por ser totalmente impresso em 3D e com *design* modular, permitindo 4 modos de imagem: transiluminação, epi-iluminação, polarização e fluorescência. Utiliza um módulo de ótica permutável e a obtenção de imagens é realizada com recurso a uma *Raspberry Pi Cam V2*, já amplamente testada para aplicações científicas como esta. Este microscópio é totalmente automatizado, possui controlo de foco e o posicionamento da amostra pode ser controlado por motores [10].

A manipulação da amostra é realizada também com recurso a um sistema de *flexures* com uma precisão de 50 nm no eixo *z* e 70 nm no eixo *x* e *y*. A distância máxima percorrida possível em *x* e *y* são 12 mm e em *z* são 4 mm. Segundo *J. T. Collins et al.* [10], a limitação deste sistema são as amostras grandes ou muito pesadas devido à construção do sistema ser maioritariamente em plástico, contudo defende que a capacidade de carga e a amplitude de movimento são suficientes para a tarefa a que o *OpenFlexure* se destina.

No que diz respeito aos modos de imagem, são permitidos vários devido ao módulo de ótica permutável. À semelhança do *µScope*, é utilizado um sensor *Sony IMX219*, um sensor bem caracterizado e já amplamente testado neste tipo de aplicações. Existem projetos que, segundo *J. T. Collins, et al.* [10], utilizam as câmaras digitais de *smartphones* como fonte para aquisição de imagem. Isto acaba por nem sempre ser vantajoso já que são necessários componentes óticos adicionais e isso implica custos adicionais. *J. T. Collins, et al.* [10] defende ainda que a utilização de um sensor permanente facilita a automatização do microscópio. A precisão do *OpenFlexure* pode ser demonstrada através de uma

imagem obtida por transiluminação de uma secção ampliada de um glóbulo vermelho infetado pelo protozoário parasita *Plasmodium Falciparum* (Figura 1.16).

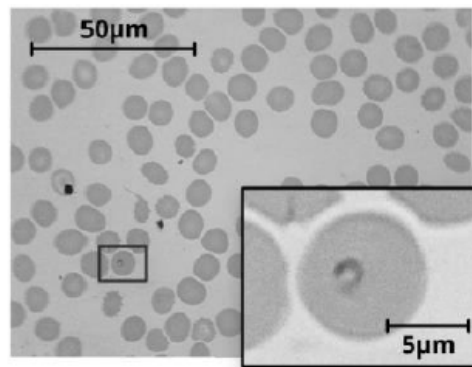


Fig. 1.16: Secção ampliada de um Glóbulo Vermelho infetado pelo parasita *Plasmodium Falciparum* (Fonte: *Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope* [10])

O *OpenFlexure* está disponível em três versões: *Low-cost* (sem motores, câmara de baixa resolução, sem microcomputador), básica (sem motores, *Raspberry Pi*, *Raspberry Pi Cam V2*) e motorizada de alta resolução (com motores, *Raspberry Pi*, *Raspberry Pi Cam V2*, objetiva RMS, ocular).

1.6.2 Microscópio *Microscopi*

O *Microscopi* (Figura 1.17) é outro projeto *open-source* de microscopia direcionado principalmente para o apoio ao ensino. À semelhança do *OpenFlexure*, este microscópio é também impresso em 3D, é portátil, possui vários modos de imagem e é *low-cost*.

Segundo *M. Wincott, et al.* [35], os microscópios *low-cost* podem classificar-se em dois tipos diferentes. A primeira classe de microscópios está diretamente associada a fins de diagnóstico na área da saúde. São caracterizados por recorrerem a *smartphones* no seu funcionamento, são considerados de excelente portabilidade e de custo muito baixo. Permitem vários modos de imagem das quais estão abrangidas a fluorescência. No entanto, *M. Wincott, et al.* [35] afirma que tais microscópios oferecem funcionalidades limitadas e não se assemelham aos microscópios automatizados que se podem encontrar num laboratório.

A segunda classe de microscópios pretende concorrer com a oferta existente no mercado. Alguns dos pontos fortes desta classe são o baixo custo, a robustez, a variedade de funcionalidades e o controlo eletrónico, porém *M. Wincott, et al.* [35] afirma que a qualidade de imagem destes sistemas está dependente da escolha da objetiva, o que acaba por interferir diretamente no custo total do microscópio. *M. Wincott, et al.* [35] ainda refere que o grande desafio de um sistema automatizado *low-cost* está na recriação de um método de manipulação da amostra em *xyz* que seja robusto e adaptado a vários tipos de amostra.

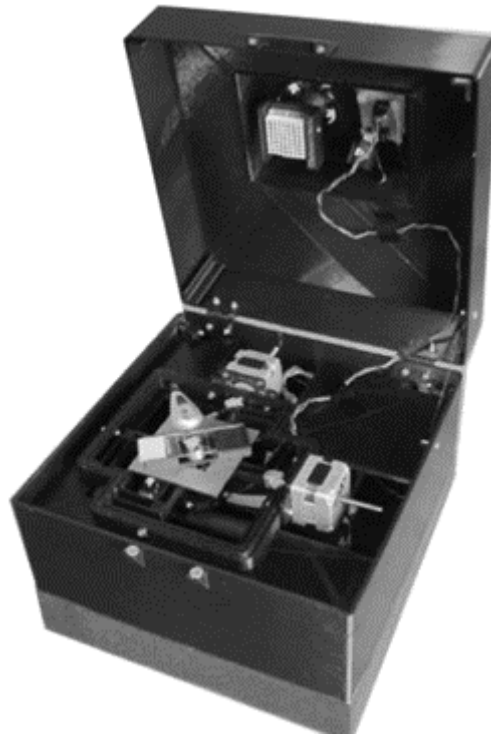


Fig. 1.17: *Microscopi* (Fonte: *Democratising 'Microscopi': A 3D printed automated XYZT fluorescence imaging system for teaching, outreach and fieldwork* [27])

M. Wincott, et al. [35] afirma que o *Microscopi* tem um custo reduzido de 300£ face a um microscópio semelhante e de 400£ na sua versão com capacidade de fluorescência. Tendo em conta esta redução de custos, este defende que o *Microscopi* apresenta uma boa relação qualidade/preço dada a variedade de funcionalidades que inclui, como por exemplo: manipulação de amostra automatizada, aquisição e processamento de imagem digital, *software user-friendly* e quatro modos de imagem (transiluminação, epi-iluminação, pseudo-fase e fluorescência).

O sistema de manipulação da amostra consiste numa *flexure* que permite movimentos de translação no plano *XY*. O movimento em *z* fica a cargo de um motor que movimenta a objetiva neste eixo. A distância máxima percorrida em *x* e *y* são 3 mm e em *z* são 4 mm [35]. A bateria incorporada no microscópio tem autonomia até, aproximadamente, 10h.

O *Microscopi* apresenta uma configuração invertida que facilita a colocação e manipulação de amostras, principalmente aquelas que requerem componentes líquidos para respetiva análise.

1.7 Objetivos

Os principais objetivos inerentes ao desenvolvimento da presente tese são:

1. Conceptualizar, desenvolver e fabricar um microscópio digital *open-source*, com recurso a CAD e FDM;

2. Observar células de dimensão semelhante à escala mínima de resolução do microscópio, com recurso às técnicas de microscopia de campo claro e microscopia de fluorescência;
3. Comparar os resultados obtidos com observações realizadas em microscópios de referência na comunidade afeta à impressão 3D.

Os objetivos secundários que se pretendem atingir após o alcance do objetivo principal são:

4. Contribuir com novas ideias/soluções para a comunidade de impressão 3D, relacionadas com microscópios *open-source*, robôs delta e sistemas de *flexures*.

1.8 Organização do documento

O presente documento está organizado por capítulos:

1. **Capítulo 1:** Enquadramento geral. Temas inerentes ao desenvolvimento da tese. Apresentação do sistema proposto e respetiva aplicação em contexto real. Apresentação de objetivos. Panorama geral sobre microscópios digitais de algumas marcas com forte presença no mercado. Funcionalidades existentes nos microscópios digitais atuais. Conceitos de ótica e formação de imagem. Panorama geral sobre a impressão 3D, impressoras 3D, *softwares* associados e problemas/obstáculos existentes. Robô Delta. Explicação do sistema proposto e *software* necessário ao seu desenvolvimento. Análise de microscópios digitais fabricados com recurso a impressão 3D com forte reconhecimento pela comunidade de impressão 3D.
2. **Capítulo 2:** Descrição e explicação das fases de desenvolvimento do sistema proposto nos objetivos da presente tese. Planeamento de testes.
3. **Capítulo 3:** Apresentação dos resultados obtidos. Comparação e discussão de resultados.
4. **Capítulo 4:** Considerações finais e objetivos futuros.
5. Apêndices e Anexos

1.9 Contribuições originais introduzidas

O sistema proposto pretende contribuir originalmente com a introdução de um robô delta (Figura 1.18), também conhecido como robô paralelo, para manipular a amostra. Os robôs delta são frequentemente utilizados em tarefas de *pick and place* dada a sua rapidez e eficiência. Num robô deste tipo existem 3 braços de comprimento fixo conectados a uma base, denominados por ligações proximais. A cada braço proximal está conectado um braço distal de comprimento variável em que a extremidade oposta ao braço proximal está conectada a uma plataforma móvel através de uma articulação.

O robô delta utilizado no sistema proposto foi redesenhado para se adaptar melhor à aplicação a que se destina e é totalmente independente do mesmo, o que permite facilmente a sua adaptação a outros

projetos dentro e fora da temática. Esta abordagem diferente de um robô delta puro tem a vantagem de ser mais robusta e de longa duração uma vez que as *flexures* são altamente duráveis. A dimensão do robô desenhado torna a sua aplicabilidade ideal em projetos que requerem sistemas de *pick and place* precisos e de pequenas dimensões.

A dependência de fontes externas é comum na maioria dos microscópios digitais fabricados com recurso a impressão 3D, dado que é necessária uma fonte de energia externa para alimentar toda a eletrónica ou de um monitor para visualizar a imagem obtida na câmara. A utilização de componentes eletrónicos de baixo consumo no sistema proposto é uma solução para que a independência de fontes externas seja possível, sendo que o objetivo passa por utilizar uma fonte de energia com capacidade moderada e recarregável para tornar o microscópio 100% portátil. A integração de um ecrã no sistema aumenta a independência do microscópio e consequentemente a sua portabilidade.

Outra das contribuições originais introduzidas é o controlo da amostra através de um *joystick* e botões. Os *joysticks* são elementos bastante populares atualmente e permitem um controlo preciso. Integrar este método de controlo na manipulação de uma amostra facilita a interação do utilizador com o microscópio e permite poupar tempo de observação, já que a deslocação em XY se torna mais eficiente. Os botões destinam-se à deslocação em Z.

A modularidade será um elemento-chave para a fácil operação e manutenção do sistema. Pretende-se contribuir com melhorias na arquitetura e construção.

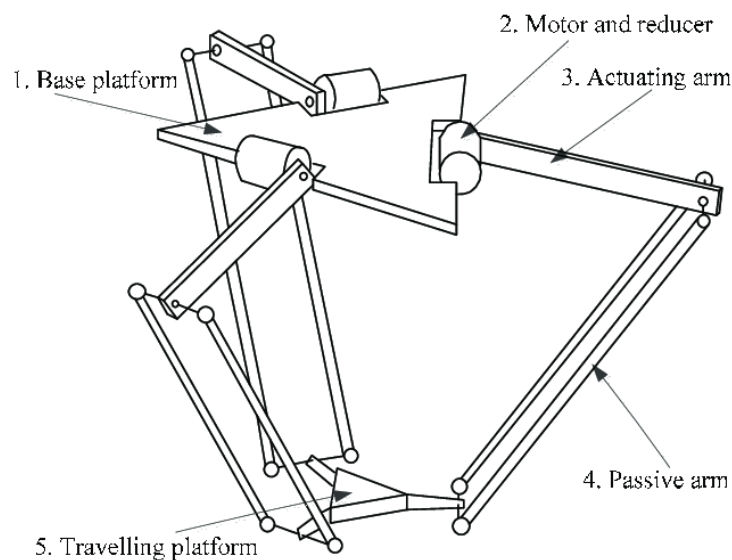


Fig. 1.18: Robô Delta (Fonte: *Optimal Design and Tuning of PID-Type Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Delta Parallel Robots* [11])

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 2

μScope | Conceito de *Design*. Modelação, Impressão e Montagem do Sistema.

Conteúdo

2.1	Conceito de <i>design</i> do <i>μScope</i>	31
2.2	Modelação e impressão dos módulos com recurso ao <i>Solidworks</i> e <i>Cura</i>	34
2.3	Integração dos componentes óticos e eletrónicos	42
2.3.1	Módulo do Robô Delta	42
2.3.2	Módulo de Controlo	44
2.3.3	Módulo da Objetiva	46
2.3.4	Módulo Permutável	48
2.3.5	Caixa	49
2.3.6	Codificação do Robô Delta: definição de constantes	49
2.3.7	Codificação do <i>joystick</i> e dos botões	52
2.4	Robô delta: planeamento de testes	53

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 2 | Conceito de *Design*. Modelação, Impressão e Montagem do Sistema.

Neste capítulo estão descritas as várias fases de conceção e fabricação do μ Scope. São apresentados os materiais utilizados e são descritos os vários processos associados à montagem do sistema. É realizada uma abordagem à codificação do robô delta no que diz respeito à definição das constantes, tendo por base o modelo proposto por *S.Graves, et al* [8].

2.1 Conceito de *design* do μ Scope

A primeira fase da conceção do μ Scope consiste na organização dos diferentes módulos que o constituem. Esta organização define a configuração do microscópio e a posição do conjunto de componentes necessários ao seu funcionamento. O μ Scope utiliza uma configuração invertida, tal como os microscópios abordados no Capítulo 1. Tendo em consideração esta configuração, a amostra situa-se-á acima da objetiva. Deste modo é possível definir uma hierarquização dos módulos tendo em conta o caminho ótico a ser percorrido. O primeiro módulo (mais inferior) é o da objetiva. Este módulo pode integrar um LED, filtros, uma lente e a objetiva propriamente dita. O segundo módulo (localizado acima do primeiro módulo) é o do robô delta. Neste módulo é realizada a manipulação da amostra. O terceiro (módulo mais superior) trata-se de um módulo permutável. Este módulo pode integrar qualquer tipo de componente, como LEDs, filtros, entre outros.

Os três módulos referidos situam-se dentro de uma caixa. Externamente à caixa situa-se o módulo de controlo. Este módulo integra um *joystick* e dois botões para controlo do robô delta, um *Raspberry Pi* e um ecrã para visualizar a imagem obtida pela câmara digital.

Diretamente acoplados à caixa ficam a câmara digital (*Raspberry Pi Cam V2*), um *Arduino* e uma *powerbank*. A caixa possui compartimentos para a passagem de cabos necessários às ligações dos componentes eletrónicos presentes nos diferentes módulos. A Figura 2.1 ilustra a hierarquização dos módulos referidos.

Para facilitar a designação dos módulos nos próximos capítulos e subcapítulos utilizar-se-á a seguinte designação: **módulo O** (módulo da objetiva); **módulo R** (módulo do robô delta); **módulo P** (módulo permutável); **módulo C** (módulo de controlo).

O módulo O acopla a objetiva no topo. O caminho ótico percorrido pela luz proveniente de um LED pode fazer-se de duas formas distintas:

1. Se o feixe de luz for proveniente do LED localizado no módulo P, este atravessa a amostra, a objetiva, e a lente que direciona o feixe para a câmara, pela ordem referida.
2. Se o feixe de luz for proveniente do LED do próprio módulo O (configuração de fluorescência),

este será refletido para a amostra pelo espelho dicróico posicionado a 45° em relação ao feixe, atravessando a objetiva. A fluorescência provocada na amostra gera um segundo feixe de luz que atravessará a objetiva e a lente que direciona o feixe para a câmara.

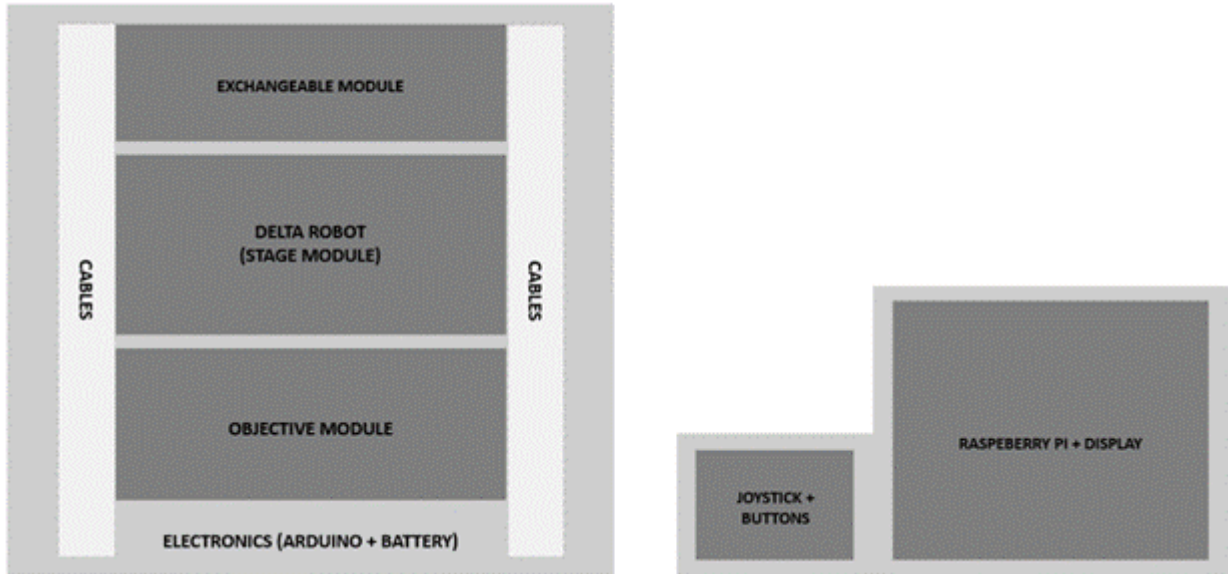


Fig. 2.1: Hierarquização dos módulos do *μScope*. Módulo de controlo (à direita)

A configuração abordada no ponto 1 serve essencialmente para microscopia de transmissão em campo claro. A configuração abordada no ponto 2 serve para microscopia de fluorescência. A Figura 2.2 ilustra a disposição dos componentes na configuração 1 (A) e na configuração 2 (B), no módulo O.

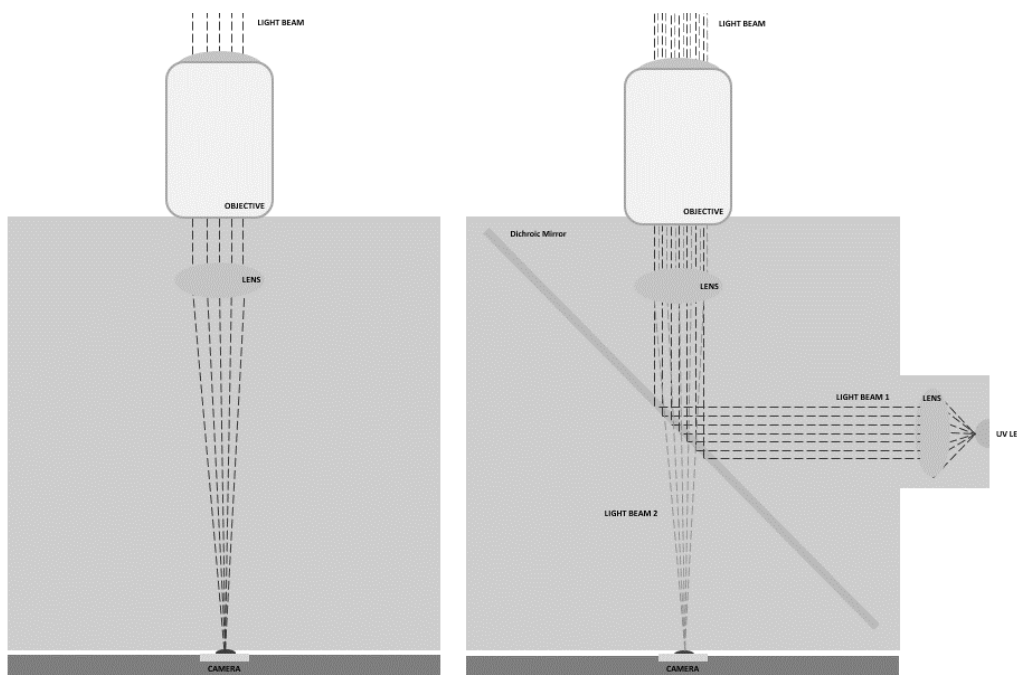


Fig. 2.2: Módulo O na configuração 1 (A) e na configuração 2 (B)

O módulo R do microscópio é o maior e aloca três motores 28BYJ-48, respetivos controladores e o sistema de *flexures* numa estrutura hexagonal. Os motores são colocados no topo da estrutura e é acoplada uma vara roscada em cada um através de um adaptador impresso em 3D. Cada vara encaixa numa porca que, por sua vez, está presa em cada extremidade do sistema de *flexures* (três extremidades no total). Cada extremidade atravessa dois eixos acoplados à estrutura principal para que a movimentação em z seja possível. Os eixos mencionados são dois pregos. Cada controlador está alocado à estrutura hexagonal, ao lado do respetivo motor. Este robô delta foi conceptualizado com base no sistema desenvolvido por *J. E. Correa, et al.* [9].

Como já foi referenciado anteriormente, o sistema de *flexures* desenhado possui 24 pontos deformáveis e foi desenvolvido com base no modelo construído por *J. E. Correa, et al.* [9]. Os pontos deformáveis caracterizam-se pela sua menor espessura, de modo a permitir que uma força menor seja necessária para provocar uma deformação na peça. Em cada extremidade está presente uma porca e dois furos por onde passam dois eixos. O furo correspondente à porca é apertado o suficiente para que a mesma não se desloque, caso contrário o funcionamento do robô delta seria comprometido. Na Figura 2.3 está representado o design de conceito da *flexure*. Os pontos deformáveis estão assinalados com um círculo e as setas representam a direção do movimento de translação segundo o sistema de coordenadas cartesiano xyz , considerando que o sistema está desenhado no plano XY e que a vista é superior. O espaço alocado ao módulo P permite a adição de funcionalidades ao microscópio consoante as necessidades do utilizador. O módulo P encaixa-se diretamente na caixa do microscópio e, originalmente, integra um LED que possibilita a microscopia de transmissão em campo claro. No entanto, o mesmo pode ser alterado para alocar um polarizador e adaptar o microscópio para polarização cruzada, por exemplo. Não foi gerado qualquer conceito de *design* para este módulo.

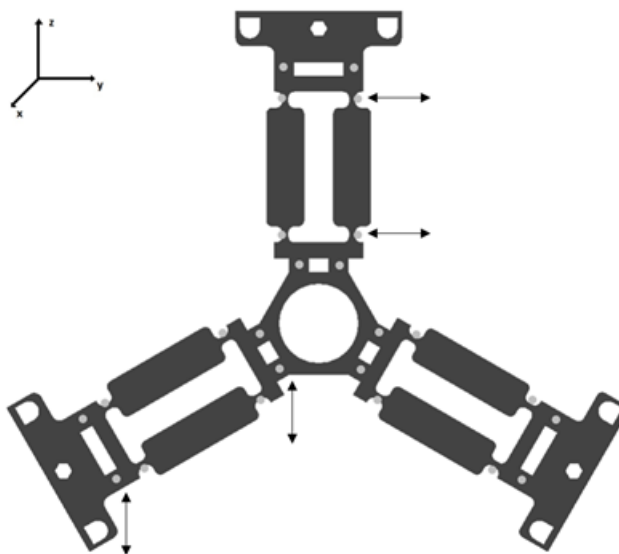


Fig. 2.3: *Design* de conceito do sistema de *flexures*

Também não foi gerado qualquer conceito de *design* para a caixa e para o módulo C, tanto que o seu desenvolvimento foi ponderado durante a própria modelação em *Solidworks* e de acordo com o formato dos módulos conceptualizados referidos anteriormente.

O conceito da totalidade do microscópio encontra-se ilustrado na Figura 2.4. A imagem é meramente ilustrativa e não representa a forma física final do microscópio.

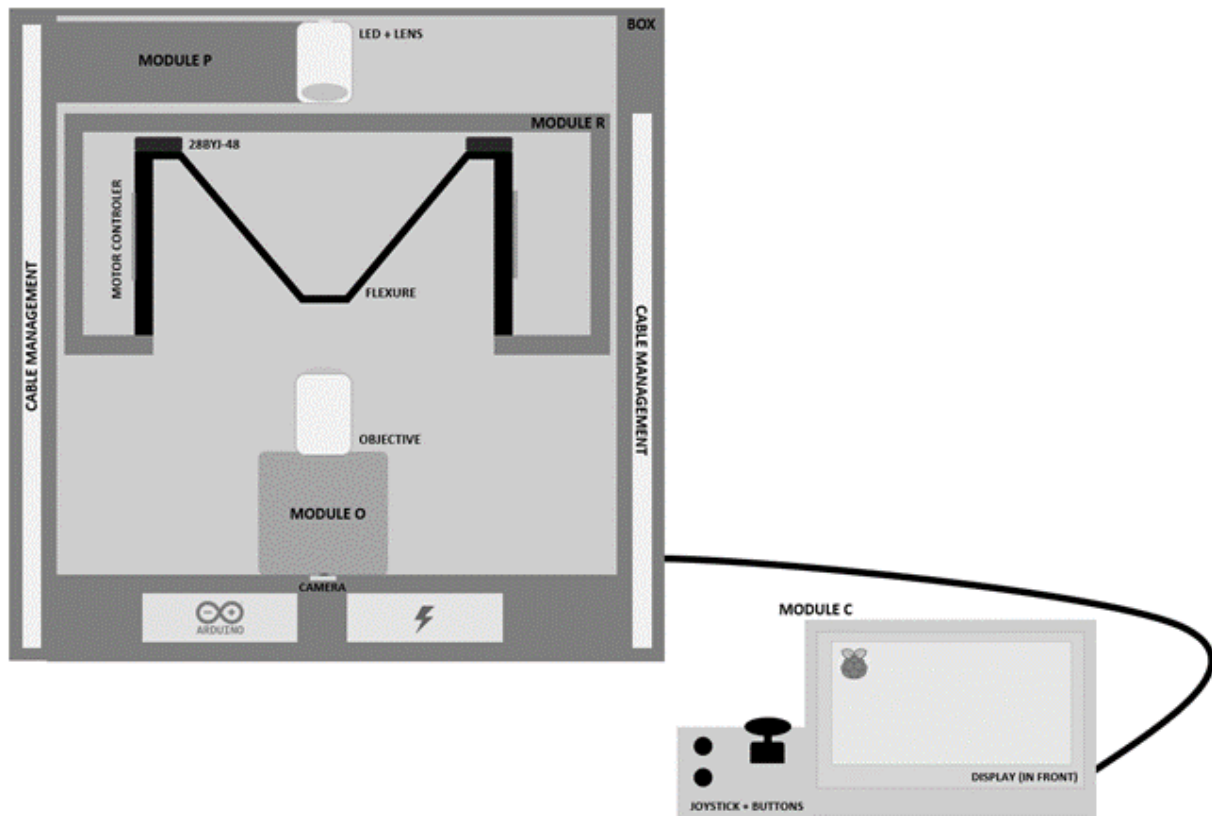


Fig. 2.4: Conceito de *design* do μ Scope

2.2 Modelação e impressão dos módulos com recurso ao *Solidworks* e *Cura*

O primeiro módulo a ser desenvolvido é o módulo do robô delta. Esta necessidade surgiu pelo facto de ser o módulo mais complexo e mais trabalhoso dado que envolve uma componente de código, detalhada na Subsecção 2.3.6 e na Subsecção 2.3.7, e todo um processo moroso para que o seu funcionamento seja garantido. A modelação deste módulo divide-se em duas partes: estrutura hexagonal e *flexures*.

Nesta modelação foram levados em conta aspetos como a simplicidade da impressão (evitar usar suportes) e poupança de material. A estrutura hexagonal modelada é uma peça única com os respetivos furos para os componentes a serem integrados. Existem zonas da estrutura às quais foram aplicados furos estrategicamente, de modo a utilizar menos PLA durante a impressão, isto sem comprometer a

robustez da montagem final. Menos material utilizado significa menor tempo de impressão e menores custos inerentes ao fabrico. As dimensões do sistema foram pensadas tendo em conta a facilidade no manuseamento, as dimensões dos motores utilizados, a dimensão da lâmina da amostra e a aplicabilidade do sistema noutros projetos.

A estrutura modelada encontra-se representada na Figura 2.5. Nesta figura estão indicados os furos para acoplamento dos motores 28BYJ-48 (A), dos eixos (B), dos controladores dos motores (C) e da vara roscada (D).

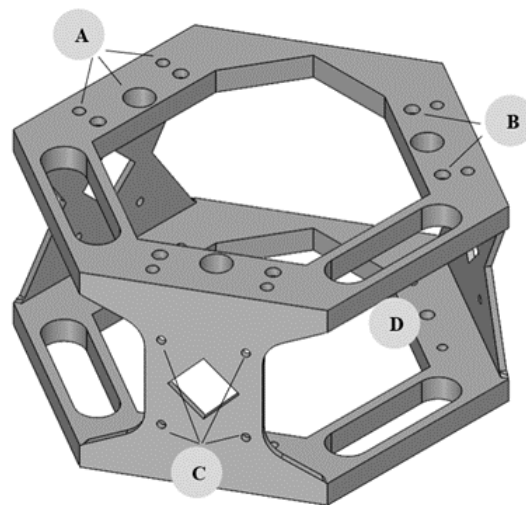


Fig. 2.5: Modelação da estrutura hexagonal do robô delta. A: Furos para acoplamento de motores 28BYJ-48; B: Furos dos eixos; C: Furos para acoplamento dos controladores dos motores; D: Furo de acoplamento para a vara roscada.

A Figura 2.6 representa o sistema de *flexures* modelado. A zona central da peça permite a passagem do feixe de luz proveniente do LED, e é nesta zona onde se coloca a amostra. A espessura da peça é maior nas zonas não deformáveis para que não ocorram deformações em zonas indesejáveis.

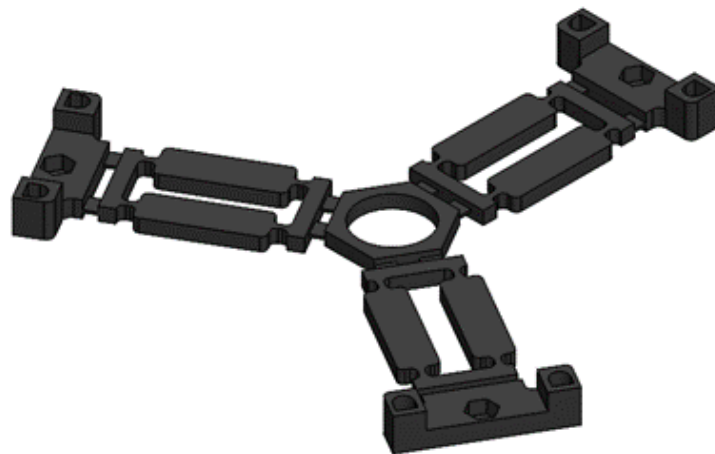


Fig. 2.6: Modelação do sistema de *flexures*

Após a modelação das peças, foram definidos os parâmetros de impressão no *software Cura*. Foram criados dois perfis de impressão para PLA e TPU, respetivamente.

No perfil referente ao PLA, definiu-se uma espessura de camadas de 0.18mm. Quanto menor a espessura da camada, maior é detalhe da peça impressa. O diâmetro da linha foi estabelecido nos 0.4mm, o que corresponde ao diâmetro do *nozzle* da impressora utilizada. A densidade do enchimento foi parametrizada nos 20%, o que significa que o interior das peças impressas só está 20% preenchido com material. Reduzir a densidade significa diminuir o material utilizado durante a impressão e, consequentemente, o tempo. O padrão de enchimento utilizado é o formato cúbico, fornecendo uma distribuição mais uniforme da resistência em cada direção.

A temperatura de impressão parametrizada situa-se nos 210°C e a temperatura da base de construção nos 65°C, evitando assim que a peça se descole da mesma. A velocidade de impressão está estabelecida nos 60mm/s com exceção da velocidade de impressão das paredes (30mm/s) e velocidade de deslocação (150mm/s). Uma velocidade mais baixa aumenta a qualidade da peça fabricada. Os ventiladores da impressora foram parametrizados para a velocidade máxima, não foi definido qualquer tipo de suporte e definiu-se o uso de um *raft* para aumentar a aderência da peça à base de construção. O *raft* consiste numa plataforma composta por uma grelha e um teto que funcionam como uma caixa de ar.

No perfil referente ao TPU, a espessura de camadas está parametrizada nos 0.2mm, a densidade de enchimento nos 50%, a temperatura de impressão nos 220°C, a temperatura da base de construção nos 60°C, a velocidade de impressão nos 40mm/s (paredes a 20mm/s) e o modo de aderência como contorno. O contorno evita defeitos na primeira camada provocados pela extrusão inicial, realizando assim um contorno inicial com a forma da peça antes de imprimir a mesma. Todos os restantes parâmetros mencionados no perfil para PLA mantiveram-se inalterados.

A montagem do módulo R encontra-se representada na Figura 2.7.

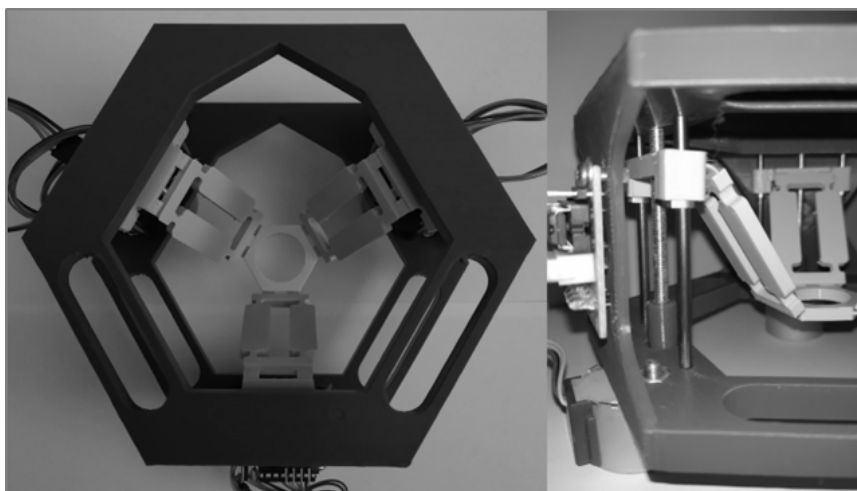


Fig. 2.7: Montagem do módulo R

A modelação do módulo C prioriza a ergonomia oferecida ao utilizador. Este módulo é a parte do microscópio com que o utilizador irá interagir, por isso é necessário garantir a simplicidade e o conforto no manuseamento. O módulo C consiste em 4 peças distintas: uma estrutura principal, duas tampas e uma base antiderrapante.

Na estrutura principal ficam acoplados o *Raspberry Pi*, o ecrã, os dois botões e o *joystick*. A estrutura tem ainda um compartimento para cabos e um orifício para a saída dos mesmos, permitindo a comunicação dos componentes deste módulo com os componentes que se encontram na caixa do microscópio (*Arduino* e *powerbank*). Uma das tampas serve para cobrir a zona dos botões e *joystick* e a outra para cobrir uma zona do *Raspberry Pi* que ficaria exposta. A base antiderrapante é colocada na base da estrutura principal. A Figura 2.8 representa o acoplamento de todas as peças deste módulo.

A orientação do ecrã é um aspeto importante na utilização do módulo de controlo, e dado que este módulo ficará assente numa mesa, foi definida uma amplitude de 60° em relação à mesma para que não existam dificuldades na visualização do ecrã. Se o utilizador optar por utilizar este módulo nas mãos, a curvatura existente na parte posterior permite uma utilização confortável do conjunto. Os botões e o *joystick* foram colocados estrategicamente ao lado do ecrã mimetizando a experiência de um *gamepad*. Foram também modeladas duas peças que aumentam a área de contacto dos botões.

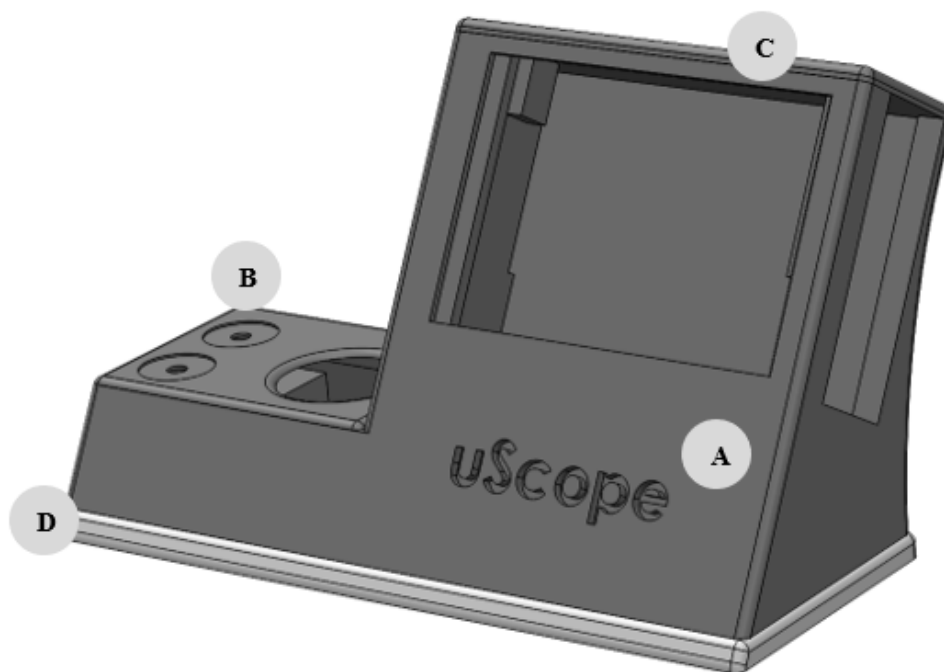


Fig. 2.8: Modelação do módulo C. A: Estrutura principal; B: Tampa 1; C: Tampa 2; D: Base antiderrapante.

Ao nível dos parâmetros de impressão no *software Cura*, foi utilizado o perfil de PLA citado anteriormente, sem recurso a qualquer tipo de suporte.

A montagem do módulo C encontra-se representada na Figura 2.9.

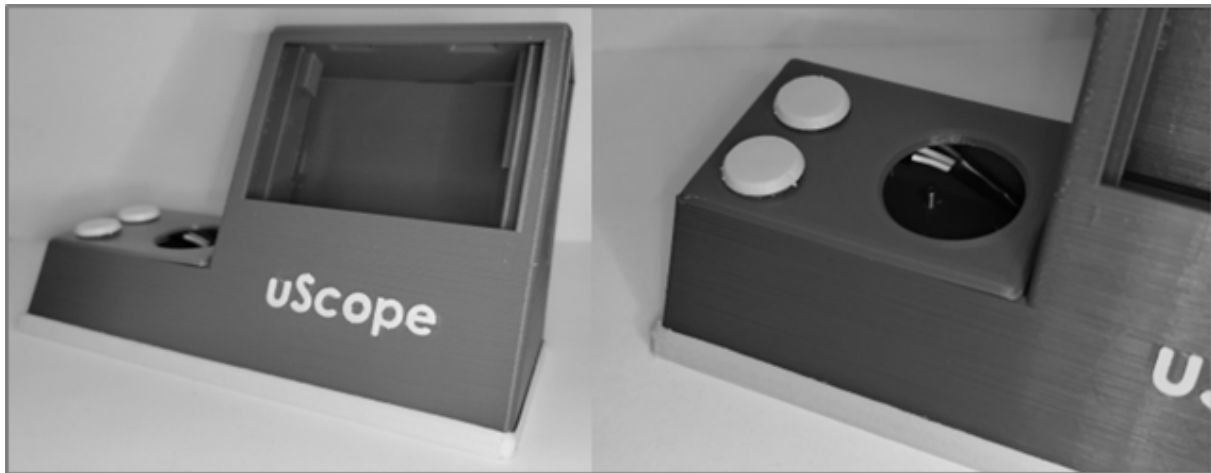


Fig. 2.9: Montagem do módulo C

Antes de iniciar a modelação do módulo O, foram obtidas as distâncias que garantem a correta visualização da imagem sem desfoque. Para este efeito, as mesmas foram obtidas em laboratório através de uma simulação ótica: foi realizada uma montagem em mesa que mimetiza o modo de transmissão simples com o objetivo de visualizar a imagem obtida de uma amostra num monitor. O robô delta, a objetiva, a lente de magnificação e a câmara foram colocados em suportes aparafusados a uma mesa ótica. O esquema de montagem consistiu numa configuração horizontal em relação à mesa. As distâncias entre estes elementos foram manipuladas até que a imagem visualizada no monitor ficasse nítida o suficiente. As distâncias foram anotadas e aplicadas na modelação. Foi também simulado o modo de fluorescência com a respetiva anotação das distâncias necessárias.

Dado que se pretendem adquirir imagens provenientes de múltiplos modos, isto significa que o sistema proposto terá no módulo O um conjunto de lentes e filtros combinados de forma diferente. É imperativo que o manuseamento deste conjunto seja rápido e simples, por isso foi conceptualizado um sistema de gavetas. Em cada gaveta fica uma lente ou um filtro. A gaveta é colocada diretamente na estrutura principal, permitindo a troca rápida de componentes óticos e consequente alteração para o modo de imagem pretendido. A estrutura principal deste módulo (Figura 2.10A) acopla a objetiva no topo e a câmara no lado oposto. Entre estes dois pontos, são colocadas as gavetas (Figura 2.10B).

Especificamente para o modo de fluorescência, foi criado um acoplamento à estrutura principal que integra uma lente e um LED (Figura 2.10C), dado que neste modo o feixe de luz deve ser proveniente do próprio módulo e não do módulo P. Os parâmetros de impressão utilizados neste módulo foram os citados anteriormente para o perfil de PLA. A montagem do módulo O encontra-se representada na Figura 2.11. A modelação do módulo P foi dividida em duas partes: modelação de uma peça para acoplamento de um LED e modelação de um suporte (Figura 2.12). A ideia inerente é que o suporte seja único para qualquer tipo de peça com função específica que possa ser acoplada. Este módulo é inserido na caixa através de um encaixe localizado acima do módulo R. A montagem do módulo P encontra-se na Figura 2.13.

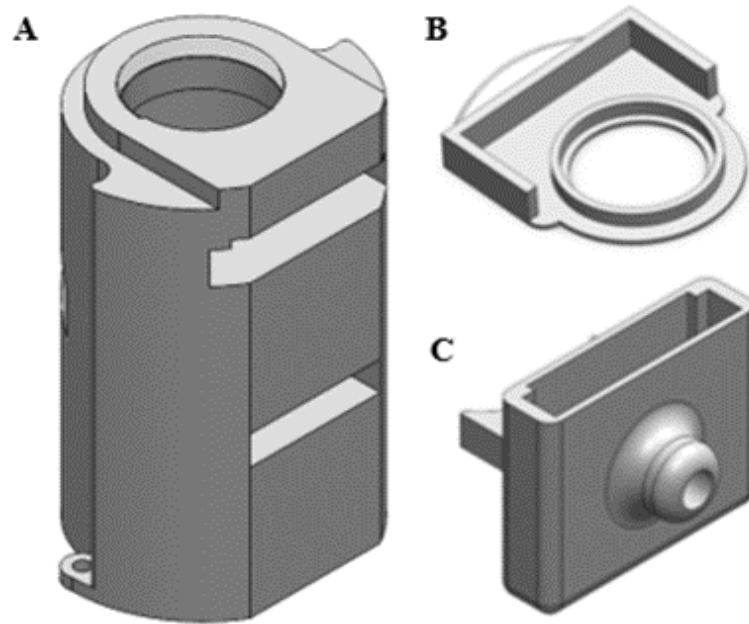


Fig. 2.10: Modelação dos componentes do módulo O. A: Estrutura principal; B: Gaveta; C: Acoplamento.

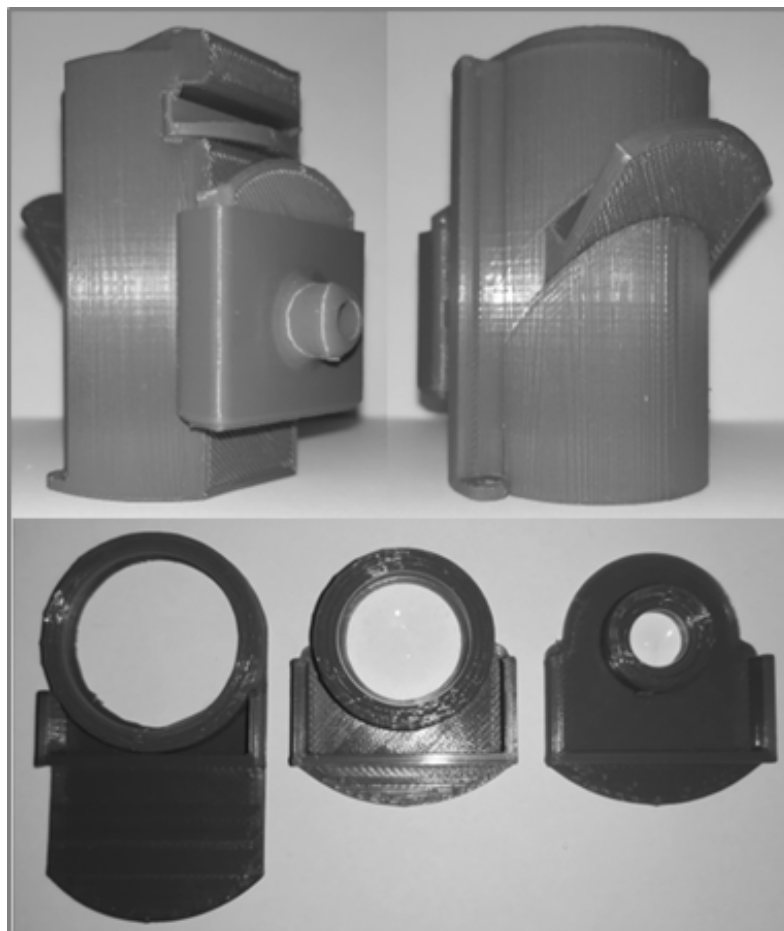


Fig. 2.11: Montagem do módulo O

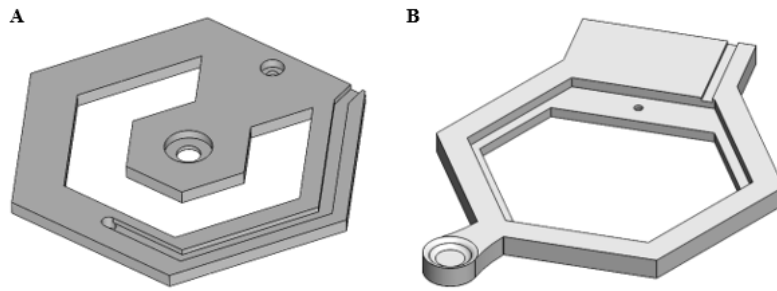


Fig. 2.12: Modelação dos componentes do módulo P. A: Acoplamento para LED; B: Suporte.

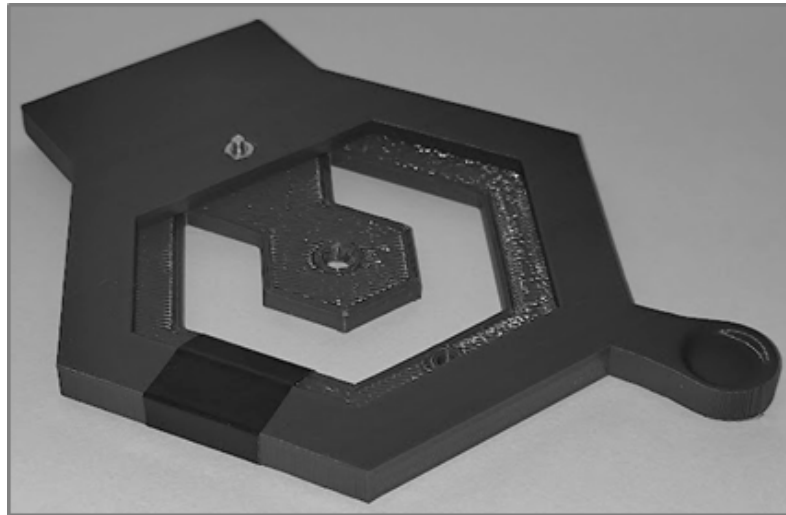


Fig. 2.13: Montagem do módulo P

A caixa do microscópio é a maior peça e agrega todos os módulos à exceção do C. O aspeto principal a ter em conta na modelação da caixa foi o dever de ser minimamente compacta e permitir a fácil integração e acesso aos módulos. O *design* da caixa segue a forma geométrica do robô delta e pode ser colocada na vertical ou horizontal. O interior da caixa é separado do exterior através de duas portas de modo que a luz ambiente não interfira na obtenção de imagem numa configuração de fluorescência. As laterais possuem um compartimento para passar cabos para que os módulos comuniquem entre si. A fixação das portas é feita através de uma pequena peça modelada que fixa o eixo superior da mesma e é posteriormente imobilizada com um parafuso. Foi modelada também uma maçaneta para facilitar a abertura das portas e uma peça cilíndrica para o orifício de saída dos cabos.

Ao nível dos parâmetros de impressão no *software Cura*, foi utilizado o perfil de PLA citado anteriormente, sem recurso a qualquer tipo de suporte. Foi efetuada uma ligeira alteração ao perímetro do *raft* que consistiu no seu aumento, de modo a aumentar eficazmente a aderência da caixa durante a impressão. As portas necessitaram de um pequeno suporte na zona dos eixos. A peça para o orifício de saída dos cabos foi impressa em TPU.

A modelação das peças de fixação das portas, a maçaneta e a peça para o orifício de saídas dos cabos

encontra-se na Figura 2.14. A modelação da caixa e das portas encontra-se representada na Figura 2.15. A montagem da caixa encontra-se na Figura 2.16.

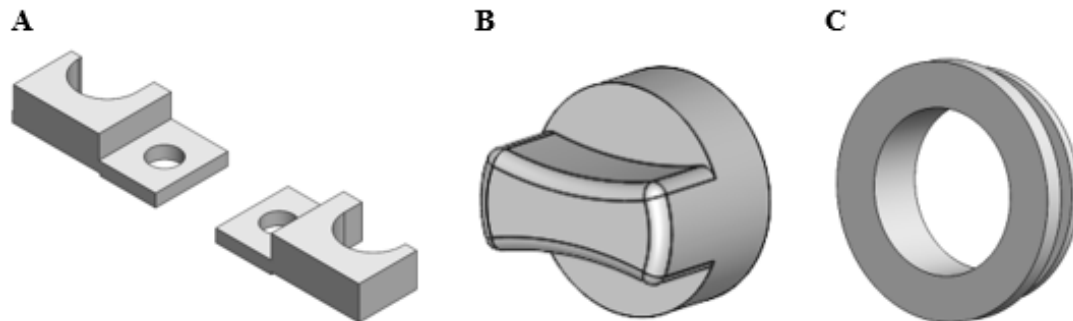


Fig. 2.14: Modelação de peças acessórias à caixa. A: Peças para fixação das portas; B: Maçaneta; C: Peça para orifício de saída dos cabos.

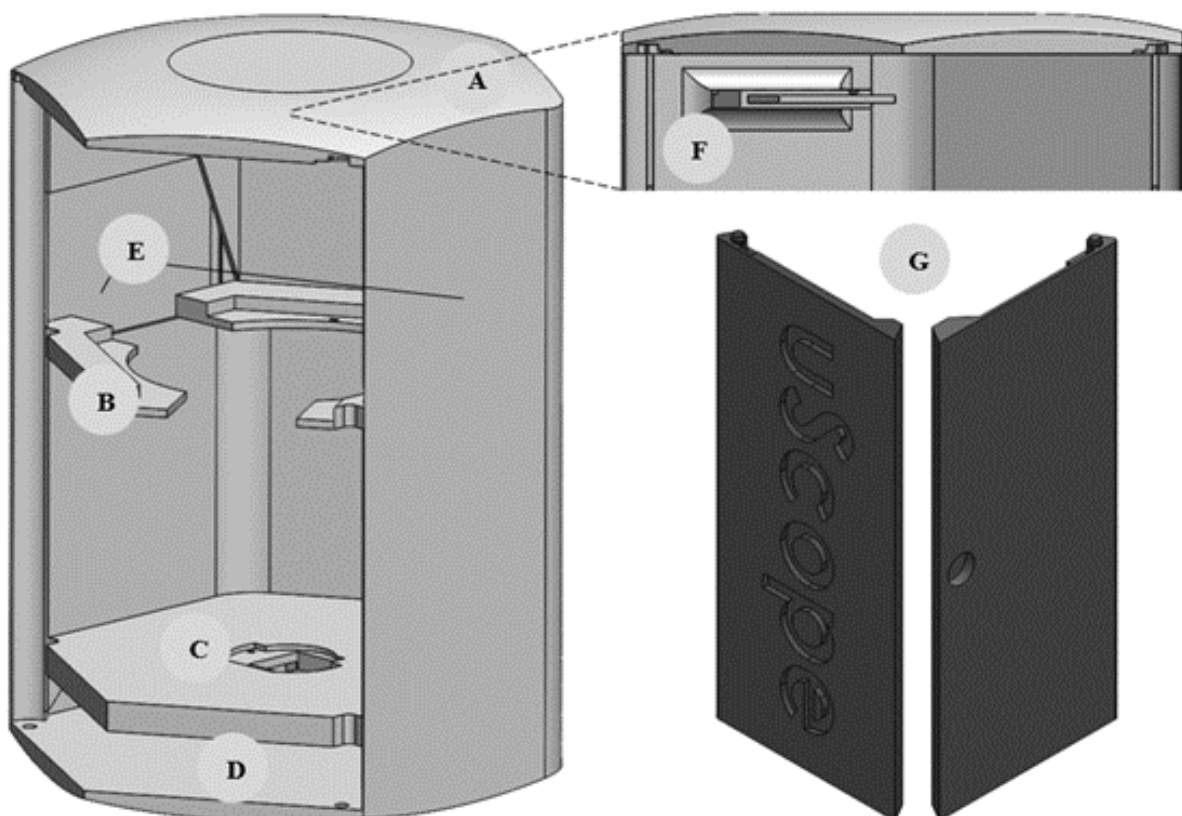


Fig. 2.15: Modelação da caixa. A: Caixa; B: Plataforma para montagem do módulo R; C: Encaixe do módulo O; D: Compartimento para componentes eletrónicos; E: Compartimentos para cabos; F: Encaixe para o módulo P; G: Portas.



Fig. 2.16: Montagem da caixa

2.3 Integração dos componentes óticos e eletrónicos

2.3.1 Módulo do Robô Delta

Neste módulo são integrados os seguintes componentes:

- 3 motores de passo 28BYJ-48 e respetivos *drivers* ULN2003.

A integração dos motores e dos respetivos *drivers* na estrutura hexagonal encontra-se representado na Figura 2.17. A escolha dos motores 28BYJ-48 deve-se às características adequadas à aplicação pretendida: baixo consumo de energia (5V 240mA) e baixa rotação, dado que os motores são unipolares, isto é, possuem 4 fases. Os motores 28BYJ-48 permitem também diferentes modos de operação de acordo com a ativação de cada *driver*. O *μScope* utiliza o modo *Half Step* porque se pretende um movimento delicado e preciso do motor, já que o número de passos necessários para uma revolução normal multiplica. Este

modo intercala um passo com duas fases ativas e um passo com uma fase ativa. A Figura 2.18 mostra o resultado obtido em laboratório para o modo de operação *Half Step*.

Para o controlo dos motores são utilizadas as bibliotecas *Stepper* [36] e *AccelStepper* [37], sendo que a *AccelStepper* é uma extensão da *Stepper*. A inclusão desta biblioteca é necessária para o controlo dos motores 28BYJ-48, já que a biblioteca *standard (Stepper)* não oferece suporte para múltiplos motores. A coordenação dos motores é essencial para o funcionamento do robô delta e por isso foi incluída a classe *MultiStepper* [38] que permite sincronizar o movimento de vários motores em simultâneo, ou seja, todos os motores giram a uma velocidade constante até uma certa posição alvo à qual todos chegam ao mesmo tempo. A aceleração e desaceleração não são suportadas nesta classe [38].

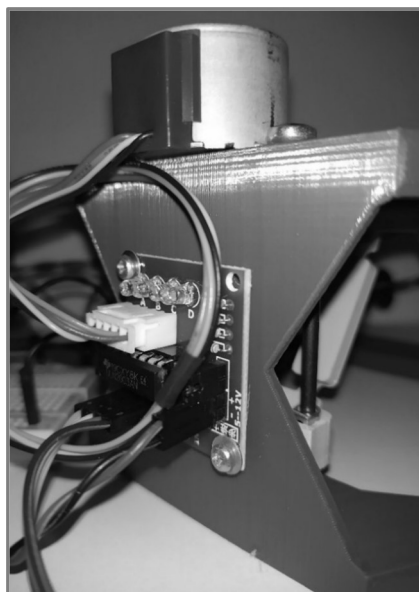


Fig. 2.17: Montagem dos motores de passo 28BYJ-48 e respetivos controladores na estrutura hexagonal do robô delta

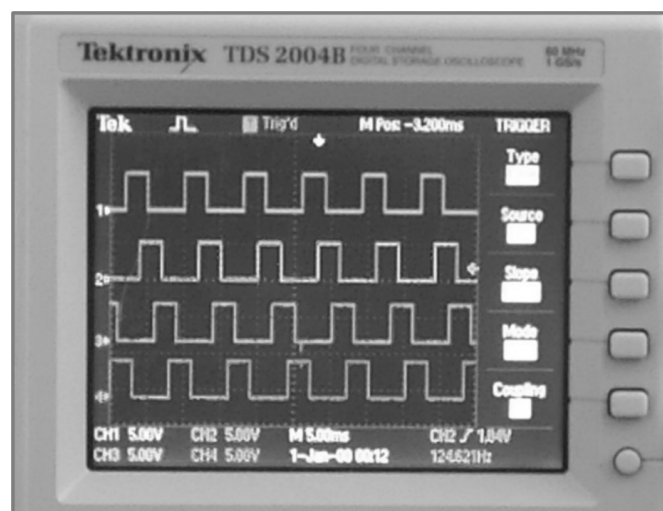


Fig. 2.18: Modo de operação *Half Step*. O gráfico apresenta a corrente (mA) em função do tempo (s)

A montagem do circuito inerente a este módulo encontra-se na Figura 2.19. A pilha é o equivalente à *powerbank*.

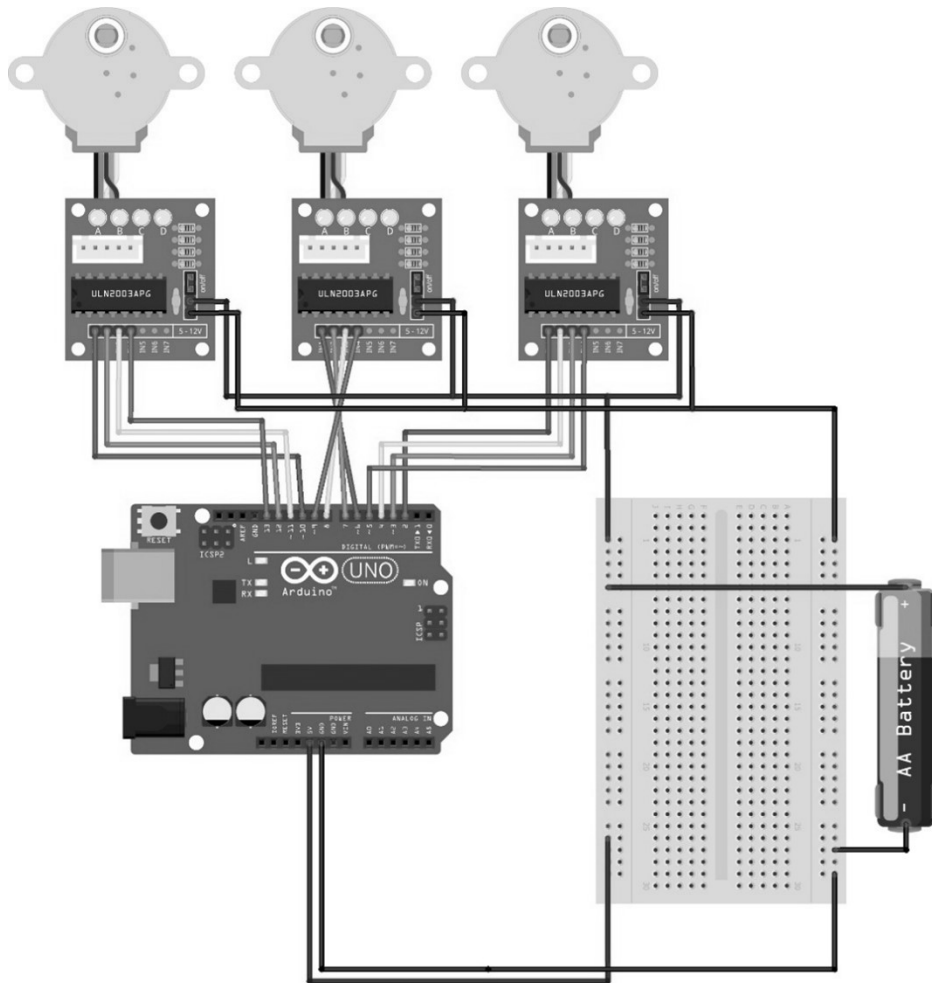


Fig. 2.19: Circuito eletrónico inerente ao módulo R

2.3.2 Módulo de Controlo

Neste módulo são integrados os seguintes componentes:

- *Raspberry Pi 3 Model B v1.2*;
- *Display LCD Touchscreen 3.5" 480x320 jOY-it*;
- *Joystick* de polegar compatível com *Arduino*;
- 2 módulos de botão *jOY-it* compatíveis com *Arduino*.

Realizou-se a instalação do sistema operativo *Raspberry OS v10 (Buster)* num cartão micro SD destinado ao *Raspberry Pi*. Na placa do *Raspberry Pi* integrou-se o ecrã LCD, conectado através dos *pins General Purpose Input/Output (GPIO)*. O esquema GPIO está representado na Figura 2.20. Foram utilizados os *pins* 1 a 26. De seguida foi realizada a montagem do módulo da câmara à porta *Camera*

Serial Interface (CSI), assinalada com a letra A na Figura 2.20. O cabo de alimentação do *Raspberry Pi* fica conectado à porta micro USB assinalada com a letra B na Figura 2.20.

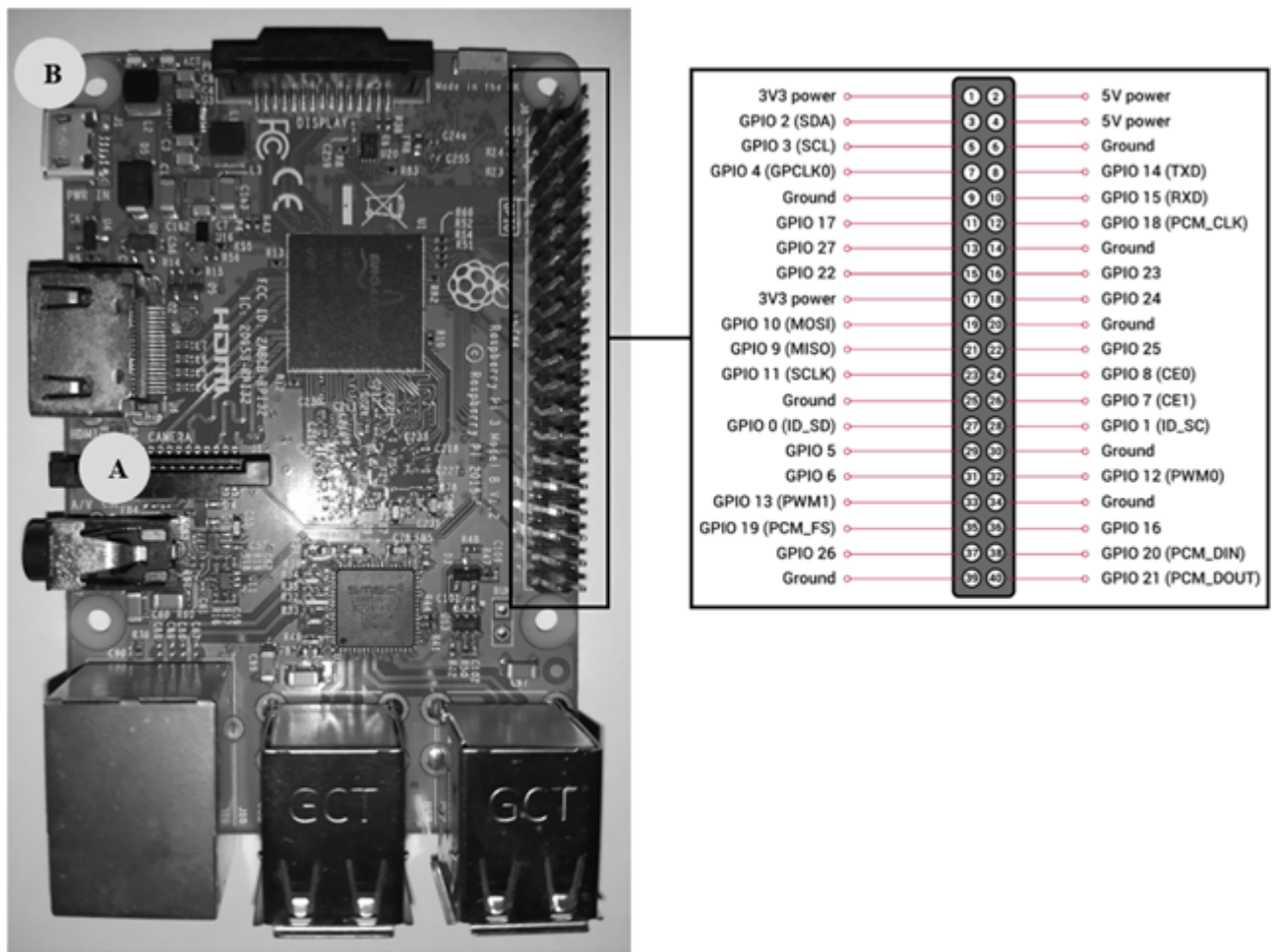


Fig. 2.20: *Raspberry Pi 3 Model B* e esquema dos *pins* GPIO. A: Porta CSI; B: Porta micro USB.

Para visualizar a imagem obtida no módulo da câmara, instalou-se o *driver* V4L2 através da linha de comandos, da seguinte forma:

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt update
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt install snapd

pi@raspberrypi:~ $ sudo reboot

pi@raspberrypi:~ $ sudo snap install core

pi@raspberrypi:~ $ sudo snap install v4l2tools
```

Os comandos introduzidos realizam a atualização dos *packages* já existentes no sistema operativo e instalam os *packages* necessários do *driver* em questão, assim como a aplicação.

De seguida foi realizada a instalação do *driver* do ecrã LCD através da linha de comandos, da seguinte forma:

```
pi@raspberrypi:~ $ git clone https://github.com/waveshare/LCD-show.git

pi@raspberrypi:~ $ cd LCD-show/
pi@raspberrypi:~ $ chmod +x LCD35-show
pi@raspberrypi:~ $ ./LCD35-show

pi@raspberrypi:~ $ cd LCD-show/
pi@raspberrypi:~ $ LCD35-show 180
```

O primeiro comando realiza a clonagem do conteúdo presente no diretório especificado. Os comandos 2, 3 e 4 inicializam o ecrã e os dois últimos comandos alteram a orientação da imagem em 180°. Esta alteração é necessária tendo em conta a posição do *Raspberry Pi* e, conseqüentemente, do ecrã no módulo C, caso contrário a imagem seria visualizada ao contrário. O *Raspberry Pi* e o ecrã foram integrados no conjunto de peças impressas para o módulo C. O resultado final encontra-se na Figura 2.21.



Fig. 2.21: Integração do ecrã, do *joystick* e dos botões no módulo C.

2.3.3 Módulo da Objetiva

Neste módulo são integrados os seguintes componentes:

- Objetiva RMS 40x, 0.65NA;
- LED ($\lambda = 475\text{nm}$);
- Lente de magnificação (referência N/D);
- Lente convexa (referência N/D);

- Espelho dicroico *ThorLabs DMLP490T*.

Para que exista formação de imagem na câmara é necessário que o conjunto de lentes de fábrica desta sejam substituídas por uma lente com maior ampliação, isto porque as lentes originais não são capazes de realizar a ampliação necessária da imagem proveniente da objetiva. Removeram-se as lentes originais, ficando apenas o sensor. A nova lente é colocada no *slot 1* (Figura 2.22) criando um sistema de lentes convergentes. Esta configuração (objetiva – lente – câmara) é indicada para a microscopia de transmissão simples.

Para a configuração de microscopia de fluorescência é necessário adicionar uma lente convexa, um espelho dicroico e um LED. No acoplamento da estrutura principal é colocado um LED com $\lambda = 475\text{nm}$ e uma lente convexa que direciona o feixe de luz para o espelho que, imediatamente, reflete-o a 90° . O espelho colocado na estrutura principal encontra-se a 45° , valor ideal para a reflexão pretendida do feixe. Uma vez que o LED possui um λ que se enquadra nas características de reflexão do espelho dicroico (Figura 2.23), então este último tem apenas a função de refletir o feixe uma vez que não é possível barrar outros comprimentos de onda. O feixe emitido pela amostra devido ao fenómeno de fluorescência atravessa o espelho dicroico (apto para transmissão de λ entre 505nm e 800nm segundo a informação que consta na tabela da Figura 2.23) e incide na câmara.

O LED é alimentado pelo *Arduino* e no circuito consta uma resistência de $150\ \Omega$ ($\pm 5\%$).

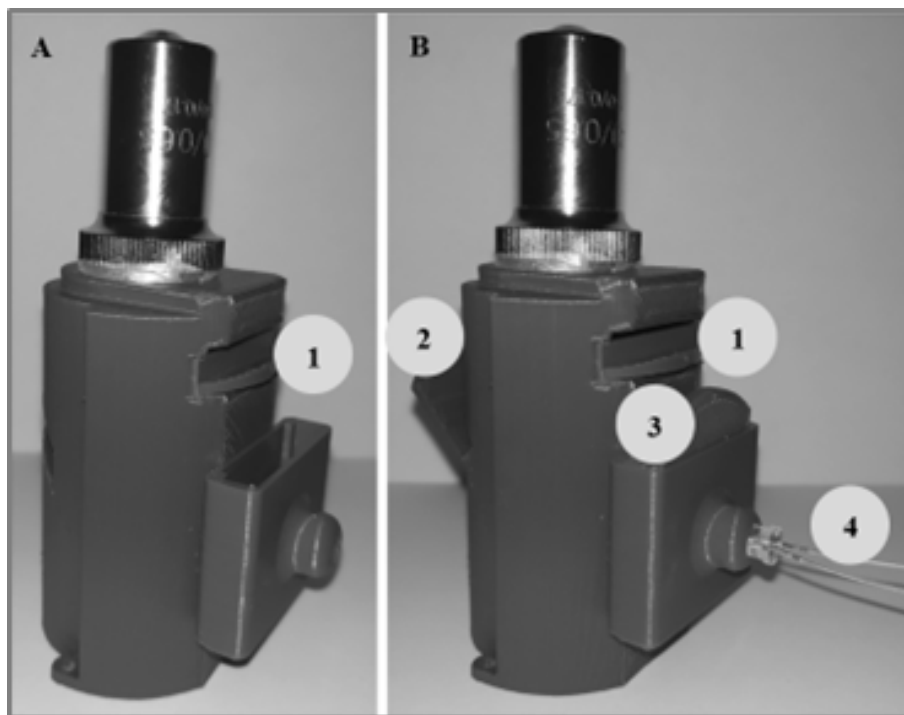


Fig. 2.22: Configurações do módulo O. A: Configuração para o modo de transmissão simples (1: gaveta com lente de magnificação); B: Configuração para o modo de fluorescência (1: gaveta com lente de magnificação; 2: gaveta com espelho dicroico; 3: gaveta com lente convergente; 4: LED)

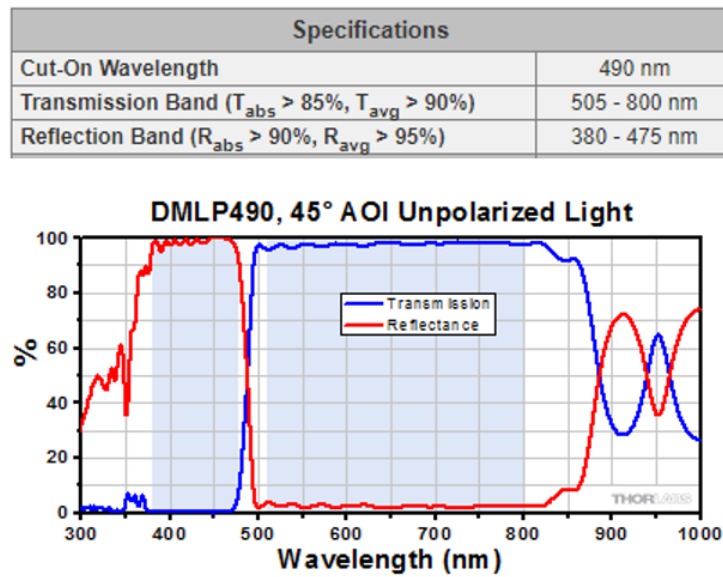


Fig. 2.23: Características do espelho dicróico *ThorLabs* DMLP4490T.

2.3.4 Módulo Permutável

Neste módulo são integrados os seguintes componentes:

- LED de luz branca.

O LED é inserido no orifício, de modo que a luz incida sobre a amostra. A montagem do LED neste módulo encontra-se na Figura 2.24. A fonte de energia do LED é o *Arduino*.

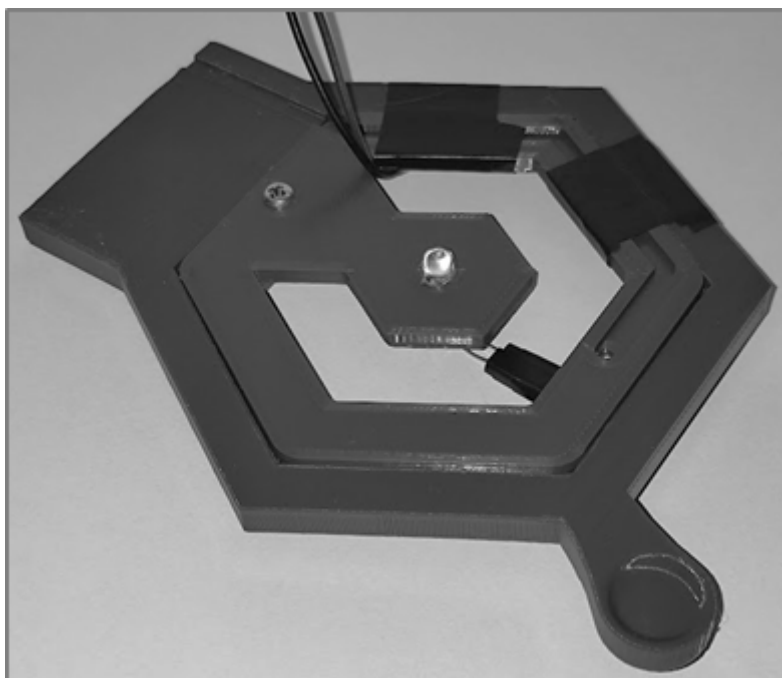


Fig. 2.24: Montagem do LED no módulo P

2.3.5 Caixa

Na caixa são integrados os seguintes componentes:

- *Câmara Raspberry Pi Cam V2*;
- *Arduino Uno*;
- *Powerbank 10000mAh*.

A câmara *Raspberry Pi Cam V2* é encaixada no compartimento a que se destina, conforme mostra a Figura 2.25. O compartimento abaixo do módulo O integra o *Arduino* e a *Powerbank* que alimenta todo o sistema. Para garantir o correto fornecimento de energia, foi escolhida uma *powerbank* de 3 saídas de 5V e 3A que possui potência suficiente para alimentar todos os componentes: o *Arduino Uno* opera com tensões de 5V, assim como o *Raspberry Pi 3 Model B v1.2* e os motores 28BYJ-48. A corrente consumida pelos principais componentes não excede os 3A na totalidade: o *Raspberry* consome cerca de 260 mA, o ecrã cerca de 120 mA, o *Arduino* cerca de 50 mA e cada motor 28BYJ-48 cerca de 240 mA, perfazendo um total de 1.15A. O *Arduino* e o *Raspberry Pi* são ligados a uma saída USB distinta e os motores são alimentados através da saída *Type-C*. A capacidade da *powerbank* é de 10000mAh e foram realizados testes quanto à autonomia do sistema.

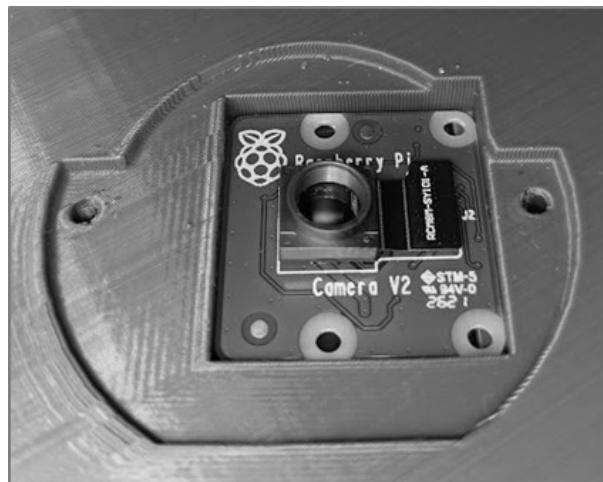


Fig. 2.25: Integração da câmara Raspberry Pi Cam V2 na caixa

2.3.6 Codificação do Robô Delta: definição de constantes

O código usado para operar com o robô delta encontra-se no Anexo A. O código tem como base a teoria mencionada no documento elaborado por *S.Graves, et al* [8]. O controlo dos motores pode ser efetuado com dois botões e um *joystick* ou através de *gcode*, sendo que este último tem como base o código desenvolvido pela *Marginally Clever Robots, Limited* [39]. Para que o conjunto funcione, é necessária a definição de algumas constantes que representam as medidas reais do robô delta. Estas constantes estão

definidas nas linhas 38 a 66.

As linhas 38 e 39 correspondem às constantes que definem os motores, isto é, a linha 38 define a quantidade de passos necessários para a realização de uma revolução e a linha 39 define a distância em milímetros resultante da revolução mencionada anteriormente. É importante frisar que os motores 28BYJ-48 atuam no modo *Half Step*, o que faz com que seja necessário o dobro dos passos (4096) para completar uma revolução quando comparado ao modo *Full Step* (2048) (modo *default* dos motores), conforme mencionado na Subsecção 2.3.1 da Secção 2.3 do Capítulo 2.

Todos os pontos e vetores mencionados doravante seguem a nomenclatura utilizada por *S.Graves, et al* [8]. As linhas 41, 42 e 43 definem os vetores Ae , Hez e l , respetivamente. Hez representa originalmente a distância em z entre a plataforma e a cabeça, no entanto o robô delta desenvolvido possui apenas uma plataforma plana, tornando este vetor nulo. A Figura 2.26 representa a definição dos vetores Ae e l .

As linhas 46 a 66 definem a localização dos *pivots*. Os *pivots* estão localizados na peça flexível do robô delta (sistema de *flexures*) e são os pontos em que existe uma deformação que separa duas partes distintas dessa mesma peça. Esta zona deformável denomina-se por *flexure*. O sistema possui um total de 24 *flexures*. Idealmente cada *flexure* deveria corresponder a um ponto único no plano xy , porém corresponde a dois devido à natureza do sistema que possui *flexures* aos pares. Deste modo, e dado que a base do robô delta se apoia no modelo de *S.Graves, et al.* [8], o ponto correspondente a cada *pivot* resulta da meia distância entre cada par de *flexures*.

R é o vetor que define a distância entre uma coluna sobre a qual desliza o sistema de *flexures* e o centro da estrutura principal (Figura 2.27).

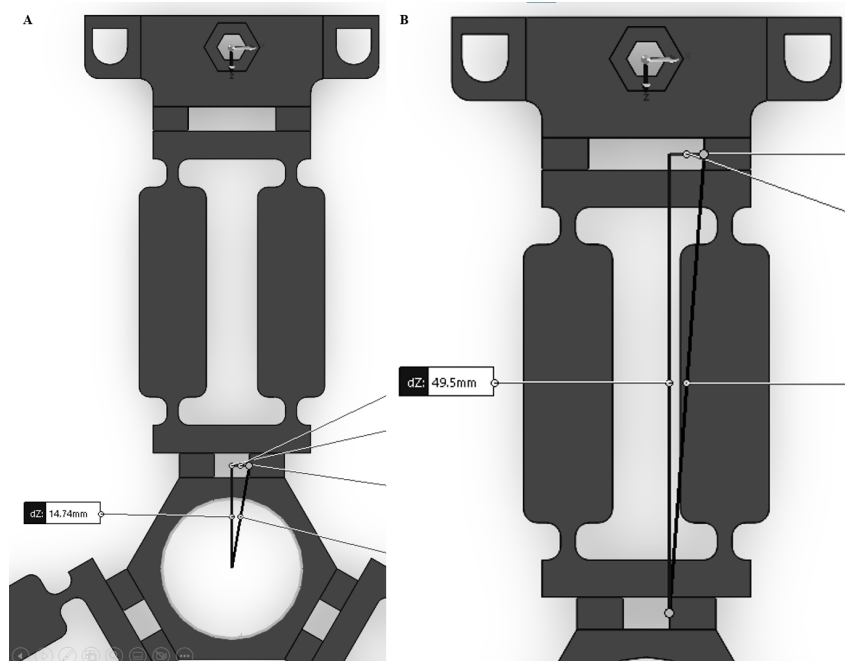


Fig. 2.26: Comprimento dos vetores Ae e l . A: Vetor Ae ; B: Vetor l .

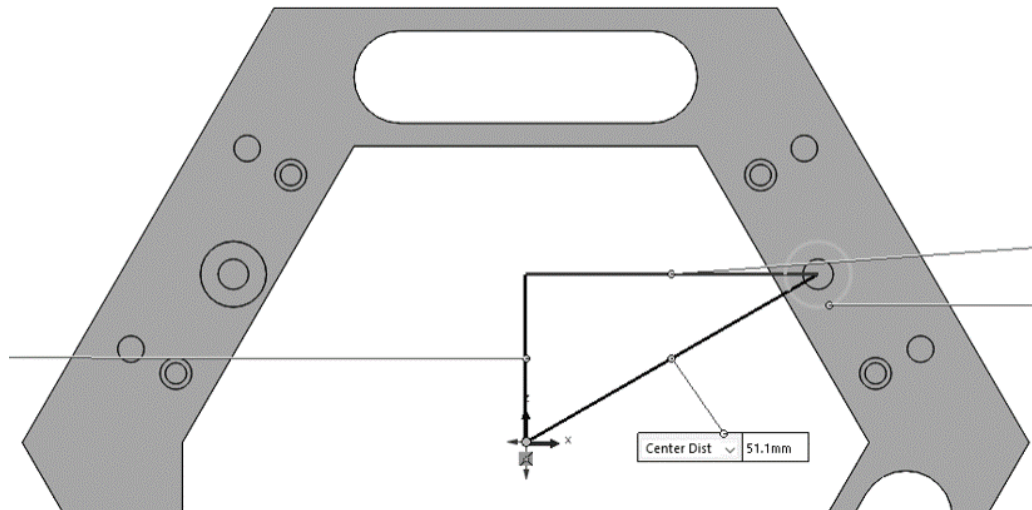


Fig. 2.27: Vetor R .

Os pontos com coordenadas (A_{px}, A_{py}) , (B_{px}, B_{py}) e (C_{px}, C_{py}) correspondem à localização dos *pivots* fixos (Figura 2.28). O ponto A tem coordenadas $(0, 40.85)$, o ponto B $(50.03, -20.43)$ e o ponto C $(-50.03, -20.43)$.

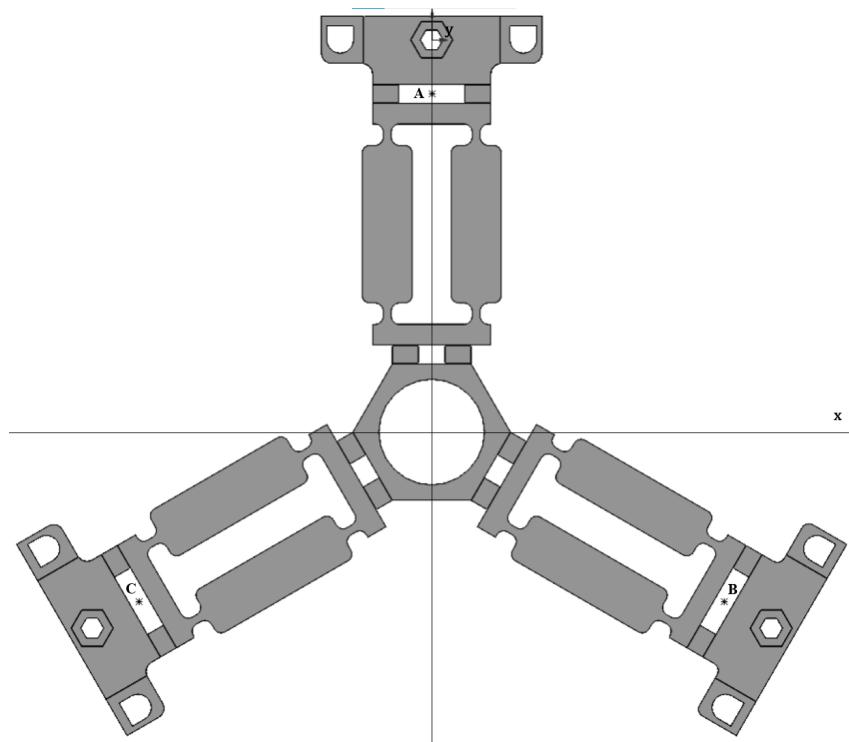


Fig. 2.28: Localizações dos *pivots* fixos.

Os pontos (A_{ex}, A_{ey}) , (B_{ex}, B_{ey}) e (C_{ex}, C_{ey}) definem os vetores A_e , B_e e C_e , respetivamente. É conhecido que $A_e = 14.74\text{mm}$. As coordenadas dos pontos que definem A_e são $(0, 14.74)$, que definem B_e são $(18.05, -7.37)$ e que definem C_e são $(-18.05, -7.37)$. A Figura 2.29 indica os vetores mencionados.

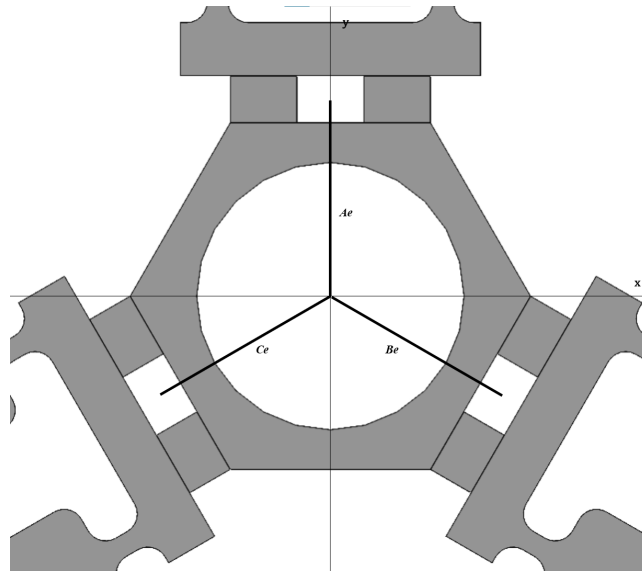


Fig. 2.29: Vetores A_e , B_e e C_e .

As linhas 61 a 66 definem as coordenadas das colunas virtuais: (A_{vx}, A_{vy}) , (B_{vx}, B_{vy}) e (C_{vx}, C_{vy}) .

As linhas 70 a 83 definem as ligações entre os motores de passo e o *Arduino*. Estas ligações encontram-se representadas na Figura 2.19, na Subsecção 2.3.1 da Secção 2.3 do Capítulo 2. As linhas 85 a 88 definem a quantidade de motores presentes no robô, no qual é indicado para cada um o modo de operação e os *pins* correspondentes no *Arduino*.

Numa primeira fase, a operação do robô delta é feita com recurso a *gcode*. Isto permitiu uma caracterização mais precisa do sistema dado que é possível trabalhar com valores em concreto. Através do *Serial Monitor* do *Arduino IDE* são indicadas as coordenadas de deslocação da plataforma, sendo que a coordenada começa sempre com G0 (indicativo de deslocação linear) seguido do eixo e valor de deslocação em milímetros (exemplo 1: G0 X5; exemplo 2: G0 X5 Y10; exemplo 3: G0 X5 Y10 Z15). É possível a indicação de valores com casas decimais, no entanto a precisão de deslocação está sempre dependente do próprio sistema e dos componentes que o constituem.

2.3.7 Codificação do *joystick* e dos botões

A codificação do *joystick* e dos botões está compreendida nas linhas 13 a 35. As linhas 13 a 16 definem os *pins* do *Arduino* aos quais se ligam o *joystick* e os botões. Os *pins* A0 e A1 correspondem ao *joystick* (x e y , respetivamente) e A2 e A3 ao botão de *up* e *down*, respetivamente.

As linhas 18 a 22 definem as constantes iniciais para a posição do *joystick* e dos botões. O *joystick* é constituído por dois potenciômetros que enviam como *output* um valor digital entre 0 e 1023, ou seja, quando a posição do mesmo é alterada o valor da voltagem varia entre 0V e 5V para x e y , e o valor de *output* varia proporcionalmente a esta variação para x e y também. É aplicada uma média a um determinado conjunto de leituras realizadas aos valores provenientes do *joystick* de forma a tornar

a movimentação da plataforma do robô delta mais fluída. A linha 24 indica o número de amostras necessárias a obter para se efetuar essa média. Foi utilizado este método dada a sua simplicidade e rapidez de aplicação. O número de amostras para cálculo da média deve ser escolhido com precaução, uma vez que quanto maior for esse número, maior é o tempo despendido para efetuar cálculos, impactando a performance do robô delta por consequência. As linhas 25 a 28 são constantes utilizadas como auxiliares nos cálculos realizados com os valores analógicos obtidos para o *joystick* e botões.

A posição predefinida do *joystick* corresponde a 512. Foi definida uma *deadzone* de forma a que a movimentação da plataforma só ocorra quando a posição do *joystick* ultrapasse um determinado valor. Na linha 30 é definida uma constante que representa o valor a somar à posição predefinida para que ocorra movimento da plataforma. As linhas 31 a 33 definem a menor distância realizada pelos motores enquanto o *joystick* é manipulado ou os botões são pressionados. A linha 35 define um booleano que indica o modo de operação do robô: *gcode* ou controlos (*joystick* e botões).

Em suma, enquanto os valores obtidos no *joystick* para *x* e *y* forem superiores a 768, a plataforma movimentar-se-á para *x* positivo e *y* positivo, e vice-versa. Para o caso dos botões, enquanto o *Arduino* receber sinal de voltagem proveniente de cada um, então os motores operam para *z* positivo ou *z* negativo consoante o botão pressionado, caso contrário não operam.

2.4 Robô delta: planeamento de testes

A execução de testes ao robô delta tem como objetivo analisar o movimento da plataforma, consequente da rotação dos eixos dos motores 28BYJ-48. Os testes foram executados separadamente para *z* e para o plano *XY* e pressupõem a execução de código no formato G-CODE de modo a serem realizadas repetições de movimentos por um número determinado de vezes. Colocou-se um papel com um ponto desenhado na plataforma que representa aproximadamente o seu centro, tal como indica a Figura 2.30. Com a ajuda de um microscópio *Leica S6D*, foi monitorizado o movimento desse ponto no plano *XY* através de uma câmara que obtém imagens em tempo real (Figura 2.31). Os testes dividem-se em 4 partes:

- Teste em *z*:
 - **Teste 1:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de subidas e descidas da plataforma em 10mm por 20 vezes, de modo a analisar se o ponto sofre algum desvio do referencial cartesiano. Obtenção de imagens no ponto de vista superior no estágio inicial, intermédio e final.
 - **Teste 2:** Observação do ponto de vista lateral do robô delta, sem microscópio. Execução de subidas e descidas da plataforma em 10mm por 20 vezes, de modo a analisar o nivelamento da plataforma (**teste macro**). Obtenção de imagens no ponto de vista lateral no estágio inicial

e final.

Nos testes 1 e 2, foi executado o seguinte código no formato G-CODE repetido por 20 vezes:

```
G0 Z10  
G0 Z0
```

- **Teste 3:** Observação do ponto de vista lateral do robô delta, com microscópio. Execução de subidas e descidas da plataforma em 5mm por 50 vezes, de modo a analisar o nivelamento da plataforma (**teste micro**). Obtenção de imagens no ponto de vista lateral no estágio inicial e final.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE, repetido por 50 vezes:

```
G0 Z5  
G0 Z0
```

- **Teste 4:** Observação do ponto de vista lateral do robô delta, com microscópio. Execução de uma subida da plataforma em 5mm, de modo a analisar a precisão da deslocação. Obtenção de imagem no ponto de vista lateral no estágio final.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE:

```
G0 Z5
```

- Teste em x , no plano XY :

- **Teste 1:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de deslocações da plataforma no plano XY , segundo o eixo x , de 5mm por 50 vezes. Obtenção de imagens no ponto de vista superior no estágio inicial, intermédio e final.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE, repetido por 50 vezes:

```
G0 X5  
G0 X0
```

- Teste em y , no plano XY :

- **Teste 1:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de deslocações da plataforma no plano XY , segundo o eixo y , de 5mm por 50 vezes. Obtenção de imagens no ponto de vista superior no estágio inicial, intermédio e final.

Foi executado o seguinte código no formato .gcode, repetido por 50 vezes:

```
G0 Y5
```

```
G0 Y0
```

- Teste no plano *XY*:

- **Teste 1:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de deslocações da plataforma no plano *XY* de modo a desenhar virtualmente um triângulo equilátero com 5mm de lado. As deslocações são capturadas através de um vídeo que, posteriormente, é introduzido no *software Kinovea* para realizar o rastreio do ponto desenhado. Comparação da forma geométrica desenhada com a forma geométrica esperada.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE:

```
G0 X2.5 Y4.33  
G0 X5 Y0  
G0 X0 Y0
```

- **Teste 2:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de deslocações da plataforma no plano *XY* de modo a desenhar virtualmente um quadrado com 5mm de lado. As deslocações são capturadas através de um vídeo que, posteriormente, é introduzido no *software Kinovea* para realizar o rastreio do ponto desenhado. Comparação da forma geométrica desenhada com a forma geométrica esperada.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE:

```
G0 X0 Y5  
G0 X5 Y5  
G0 X5 Y0  
G0 X0 Y0
```

- **Teste 3:** Alinhamento do ponto desenhado com o referencial gerado pela câmara. Execução de deslocações da plataforma no plano *XY* de modo a desenhar virtualmente um hexágono com 5mm de lado. As deslocações são capturadas através de um vídeo que, posteriormente, é introduzido no *software Kinovea* para realizar o rastreio do ponto desenhado. Comparação da forma geométrica desenhada com a forma geométrica esperada.

Foi executado o seguinte código no formato G-CODE:

```
G0 X0 Y5  
G0 X4.33 Y7.5  
G0 X8.66 Y5  
G0 X8.66 Y0  
G0 X4.33 Y-2.5
```

```
G0 X0 Y0
```

O *software Kinovea* permite realizar o rastreamento de pontos num ficheiro de vídeo. Em cada *frame* do vídeo é localizado esse mesmo ponto e é realizada uma sobreposição com um ponto virtual de cor diferente. A junção de todos os *frames* com pontos virtuais origina uma trajetória.

Os vídeos relativos ao desenho do triângulo, do quadrado e do hexágono são inseridos no *software* e é definida uma escala através de um segmento de reta com base numa dimensão real conhecida, neste caso o lado do hexágono que compõe a forma da plataforma. Desta forma é possível criar um sistema de coordenadas cartesiano calibrado de acordo com as medidas reais. A origem do sistema coincide com o ponto desenhado na plataforma. Por fim são extraídas as coordenadas do ponto em x e y em função do tempo para um ficheiro *xml*.

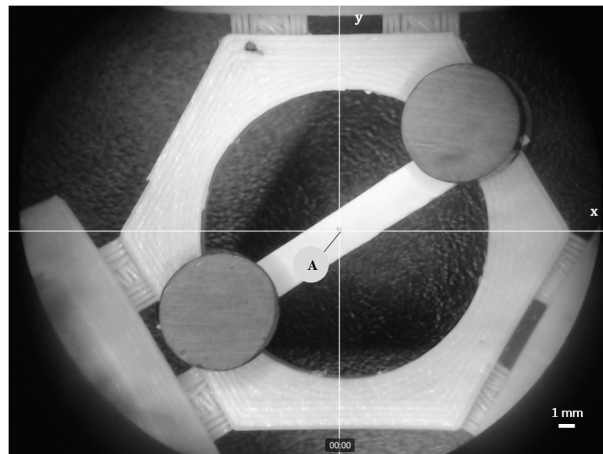


Fig. 2.30: Posição inicial da plataforma para os testes em x , y , z e XY . A: Ponto desenhado numa tira de folha que representa aproximadamente o centro da plataforma. As duas linhas perpendiculares representam os eixos x e y .

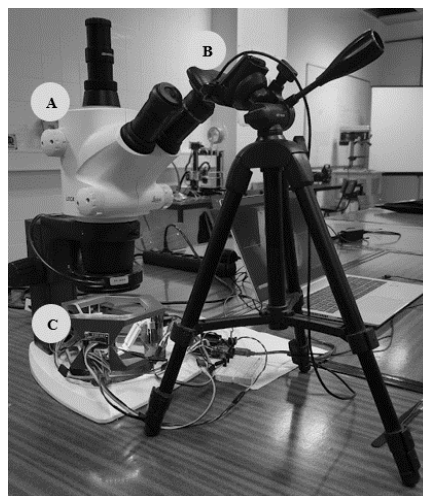


Fig. 2.31: Setup de testes. A: Microscópio *Leica S6D*; B: Câmara; C: Robô Delta.

Capítulo 3

Discussão de Resultados

Conteúdo

3.1	Caracterização do robô delta	59
3.1.1	Análise dos resultados obtidos	66
3.2	Microscópio <i>μScope</i> : sistema finalizado	70
3.2.1	Análise dos resultados obtidos	71
3.3	Caracterização do poder de ampliação do microscópio	73
3.4	Obtenção de imagens na configuração de transmissão simples (campo claro)	75
3.4.1	Análise dos resultados obtidos	76
3.5	Obtenção de imagens na configuração de fluorescência	79
3.5.1	Análise dos resultados obtidos	80
3.6	Teste de autonomia à bateria	81

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 3 | Discussão de Resultados

Neste capítulo são abordados e discutidos os resultados de todo o sistema produzido, assim como os testes realizados em cada etapa. São efetuadas observações relacionadas com melhorias ao sistema proposto, tendo em conta os resultados produzidos.

3.1 Caracterização do robô delta

Os resultados dos testes realizados ao robô delta no eixo z encontram-se nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. O resultado relativo a x , no plano XY , encontra-se na Figura 3.5. O resultado relativo a y , no plano XY , encontra-se na Figura 3.6. Os resultados relativos ao desenho de figuras geométricas no plano XY encontram-se nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9. É importante referir que os valores teóricos das deslocamentos efetuadas pela plataforma, pressupostas no planeamento dos testes mencionados anteriormente, podem não corresponder ao deslocamento verificado nos testes práticos. Este aspeto será abordado mais exaustivamente na Subsecção 3.1.1. A partir deste ponto será sempre mencionado quando um valor de x , y ou z é teórico ou real. No Apêndice A encontram-se as tabelas de extração de coordenadas em função do tempo, para alguns testes realizados.

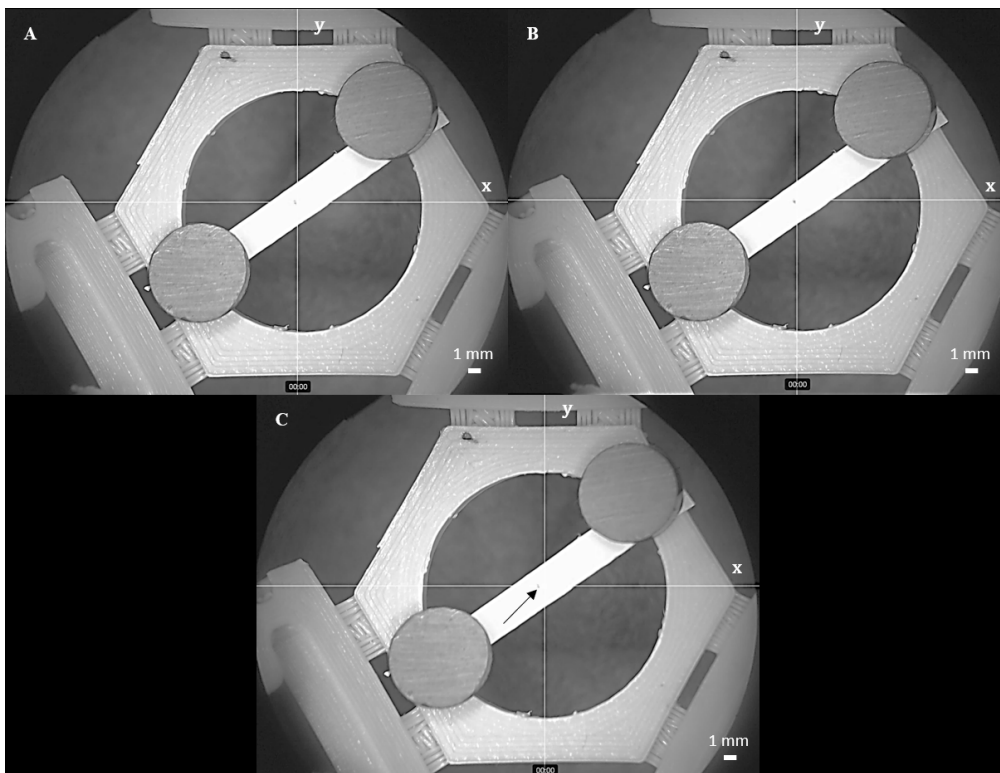


Fig. 3.1: Teste em z : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste; C: Posição da plataforma em $z = 10\text{mm}$ (z teórico) durante o estágio intermédio do teste (a seta indica o ponto).

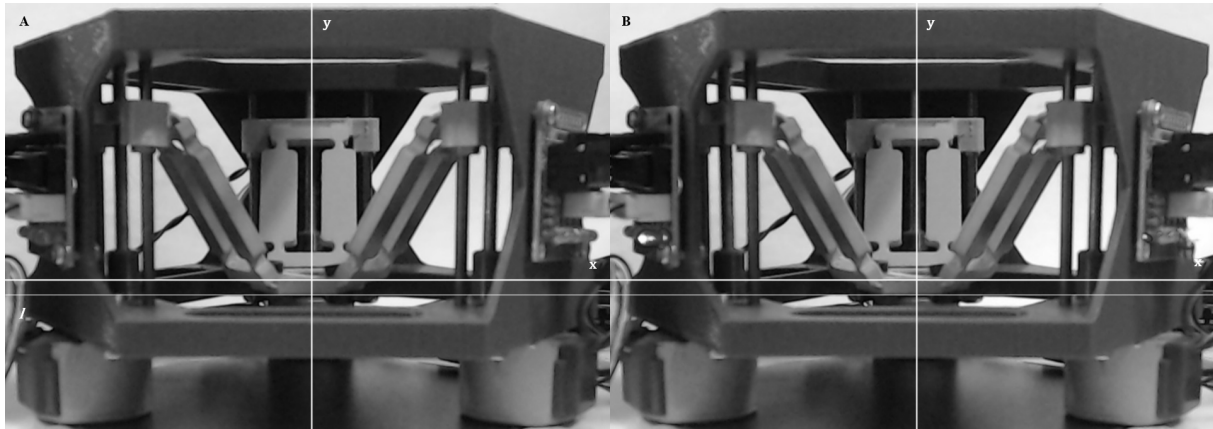


Fig. 3.2: Teste em z : Teste 2. A linha “ T ” representa a posição inicial da plataforma. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste.

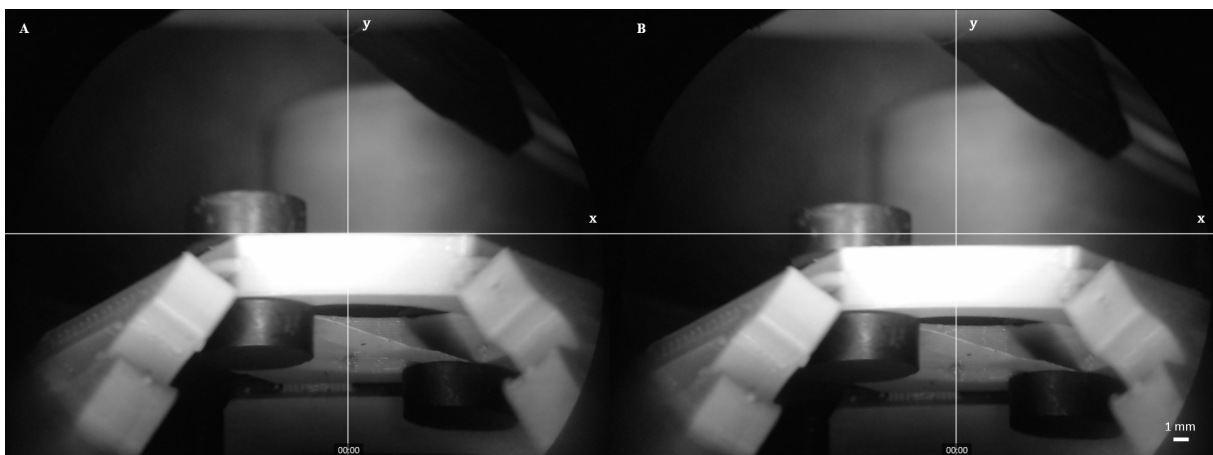


Fig. 3.3: Teste em z : Teste 3. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste.

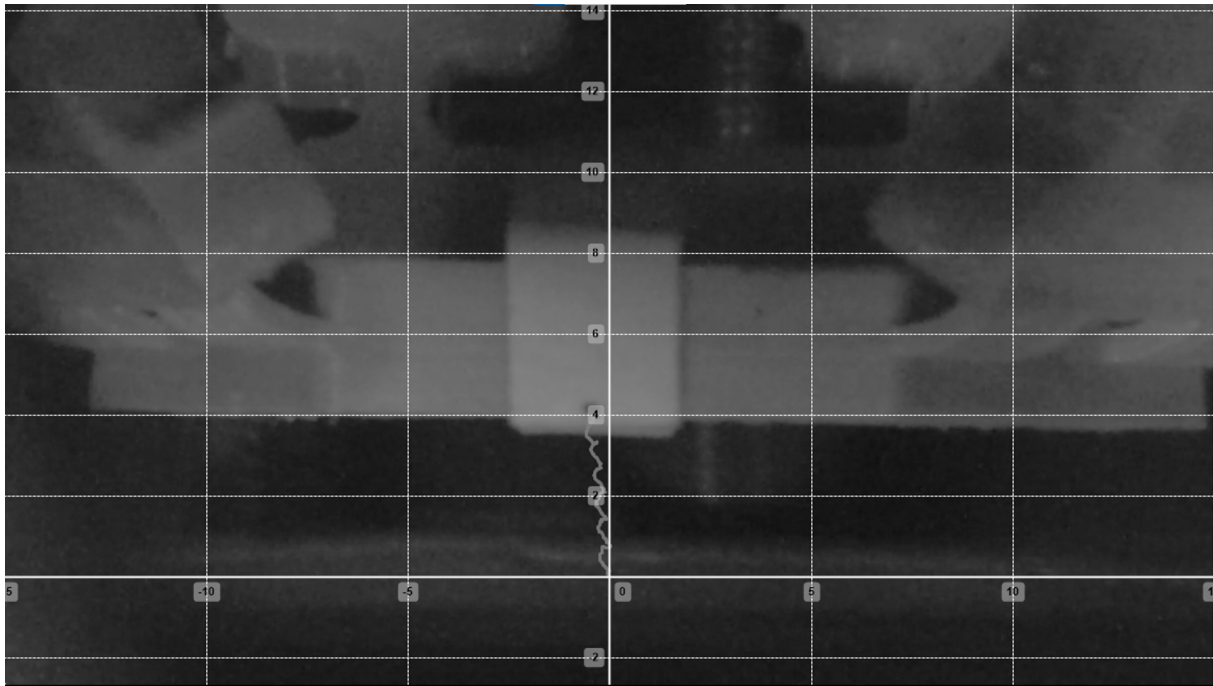


Fig. 3.4: Teste em z : Teste 4 (deslocação de 5mm da plataforma em z). Posição final da plataforma após execução do G-CODE (escala da grelha em mm).

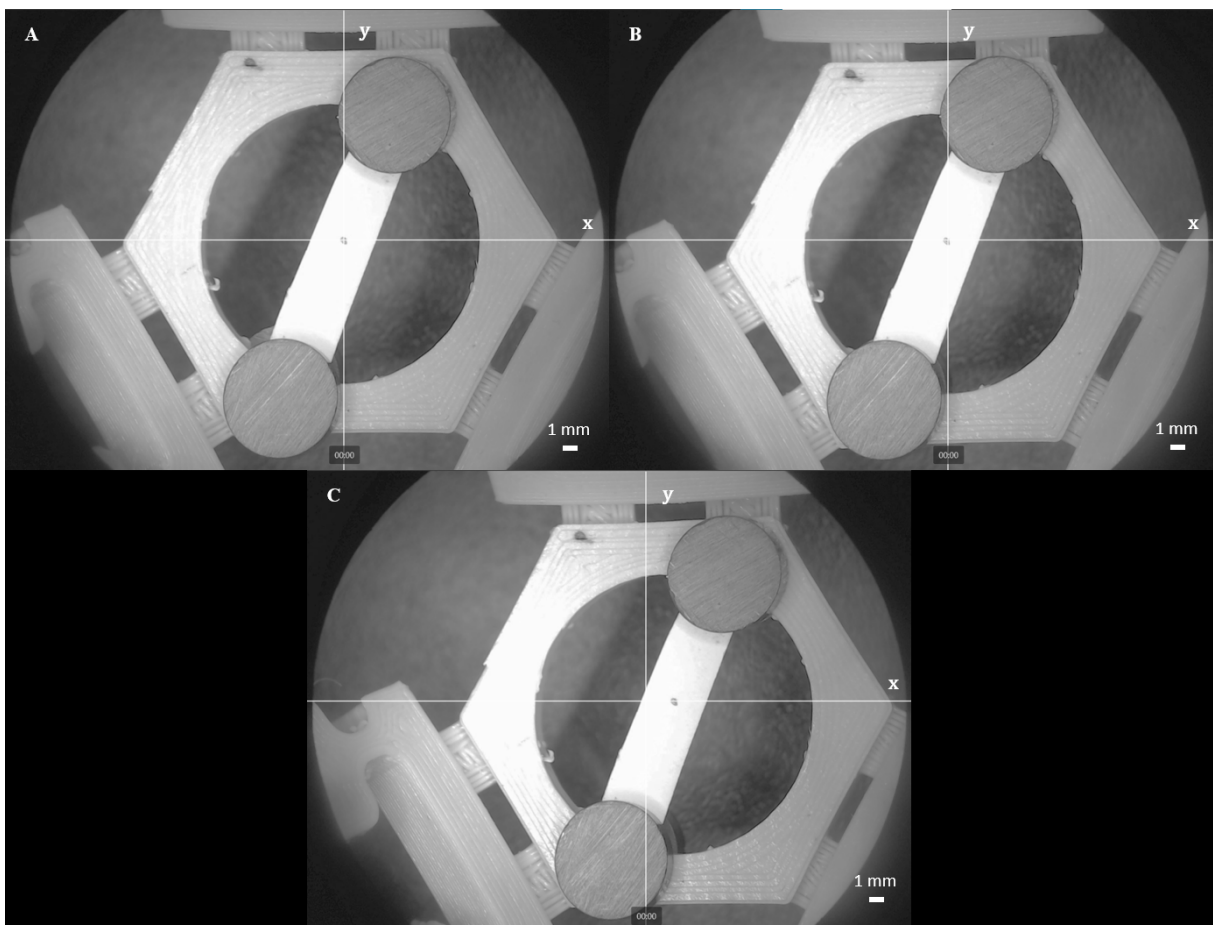


Fig. 3.5: Teste em x , no plano XY : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste. C: Posição da plataforma em $x = 5\text{mm}$ (x teórico) durante o estágio intermédio do teste.

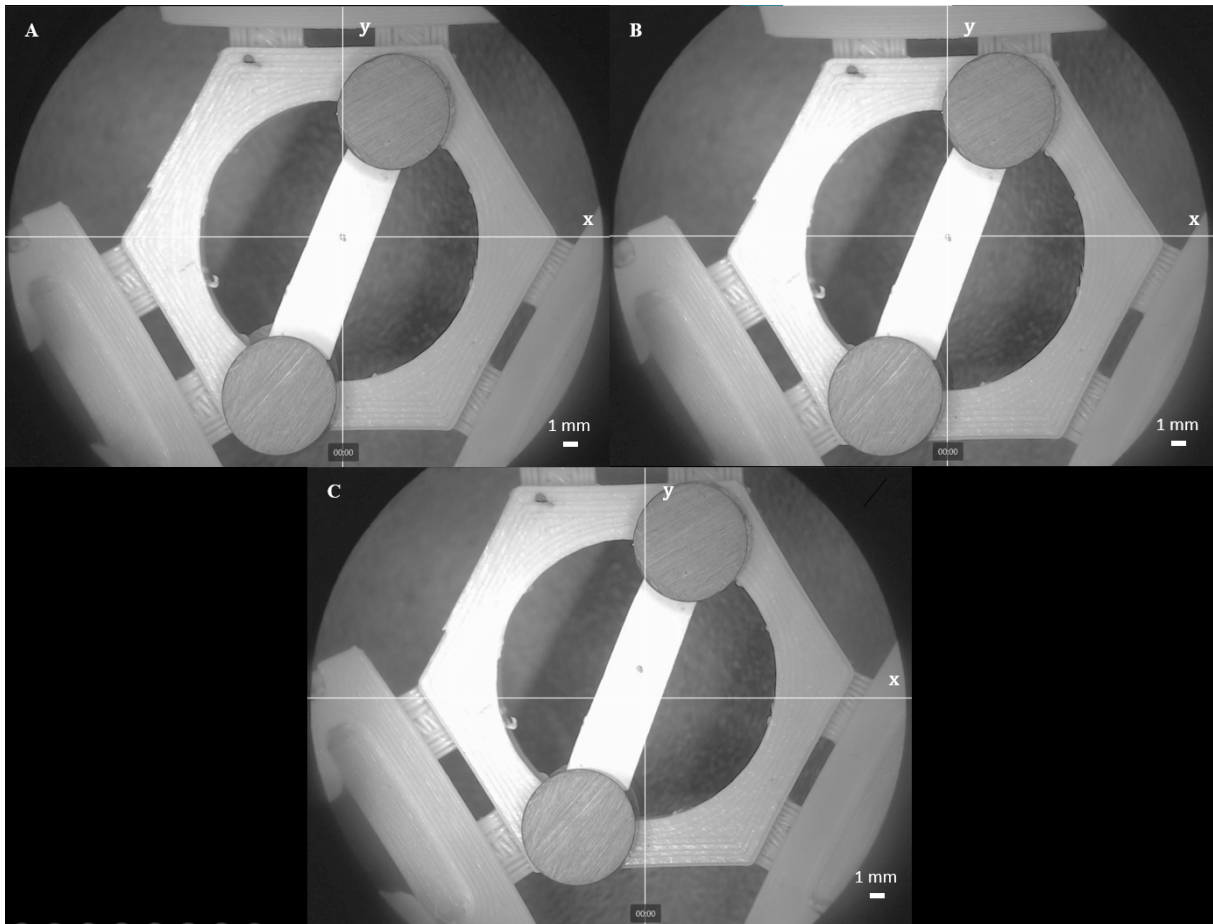


Fig. 3.6: Teste em y , no plano XY : Teste 1. A: Posição inicial da plataforma antes da realização do teste; B: Posição final da plataforma após realização do teste. C: Posição da plataforma em $y = 5$ (y teórico) durante o estágio intermédio do teste.

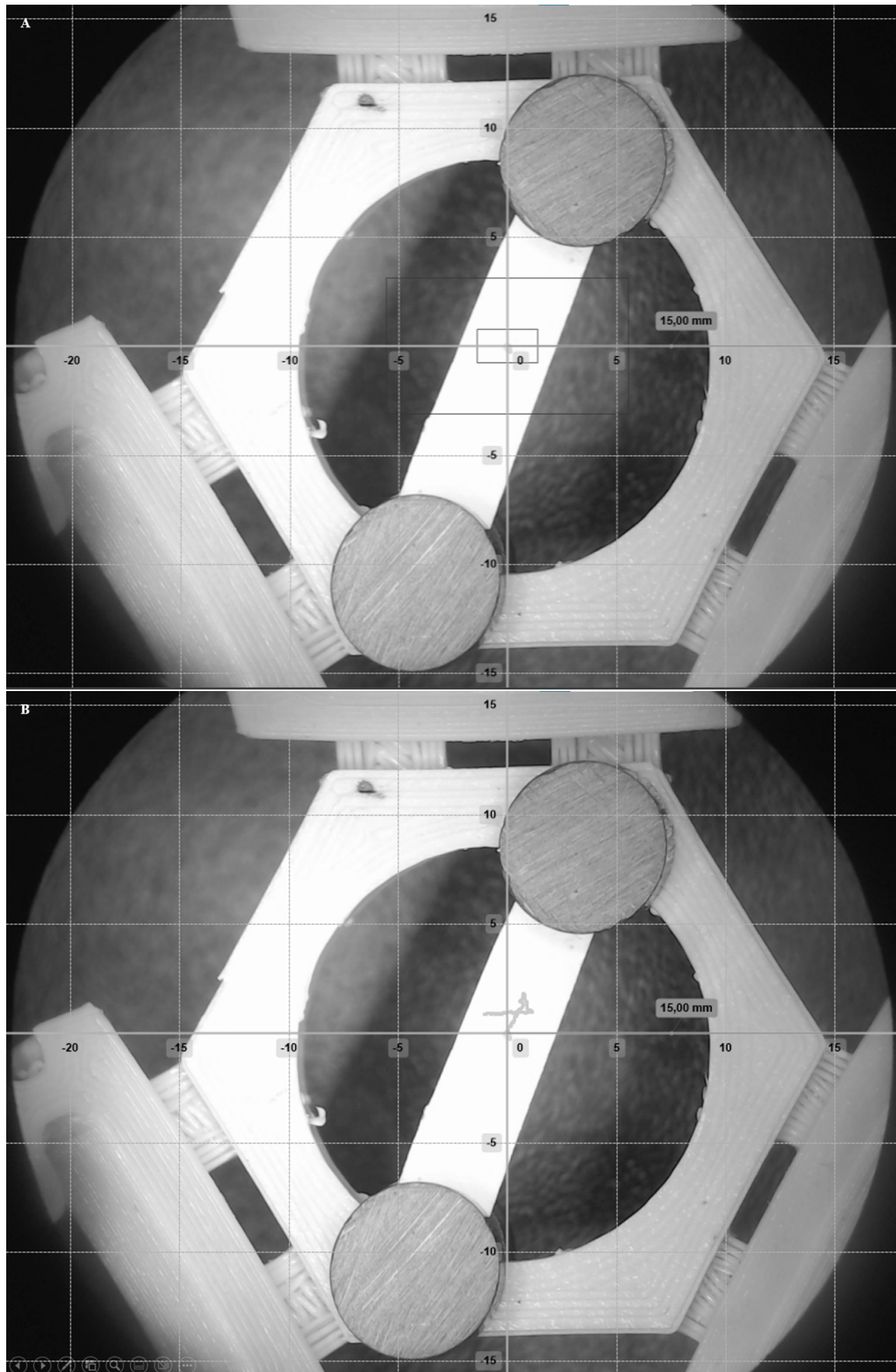


Fig. 3.7: Teste no plano XY: Teste 1. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY, antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.

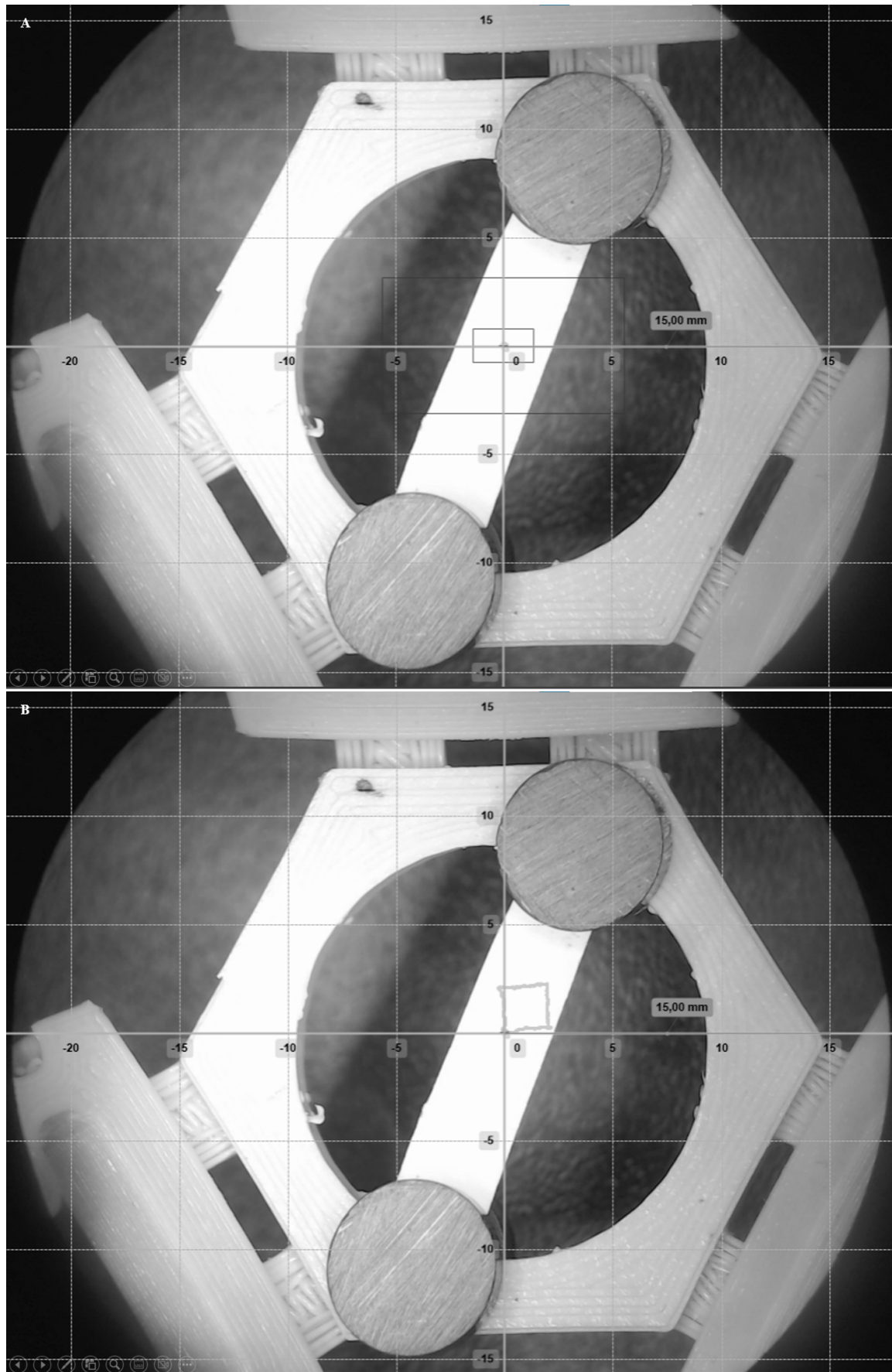


Fig. 3.8: Teste no plano XY: Teste 2. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY, antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.

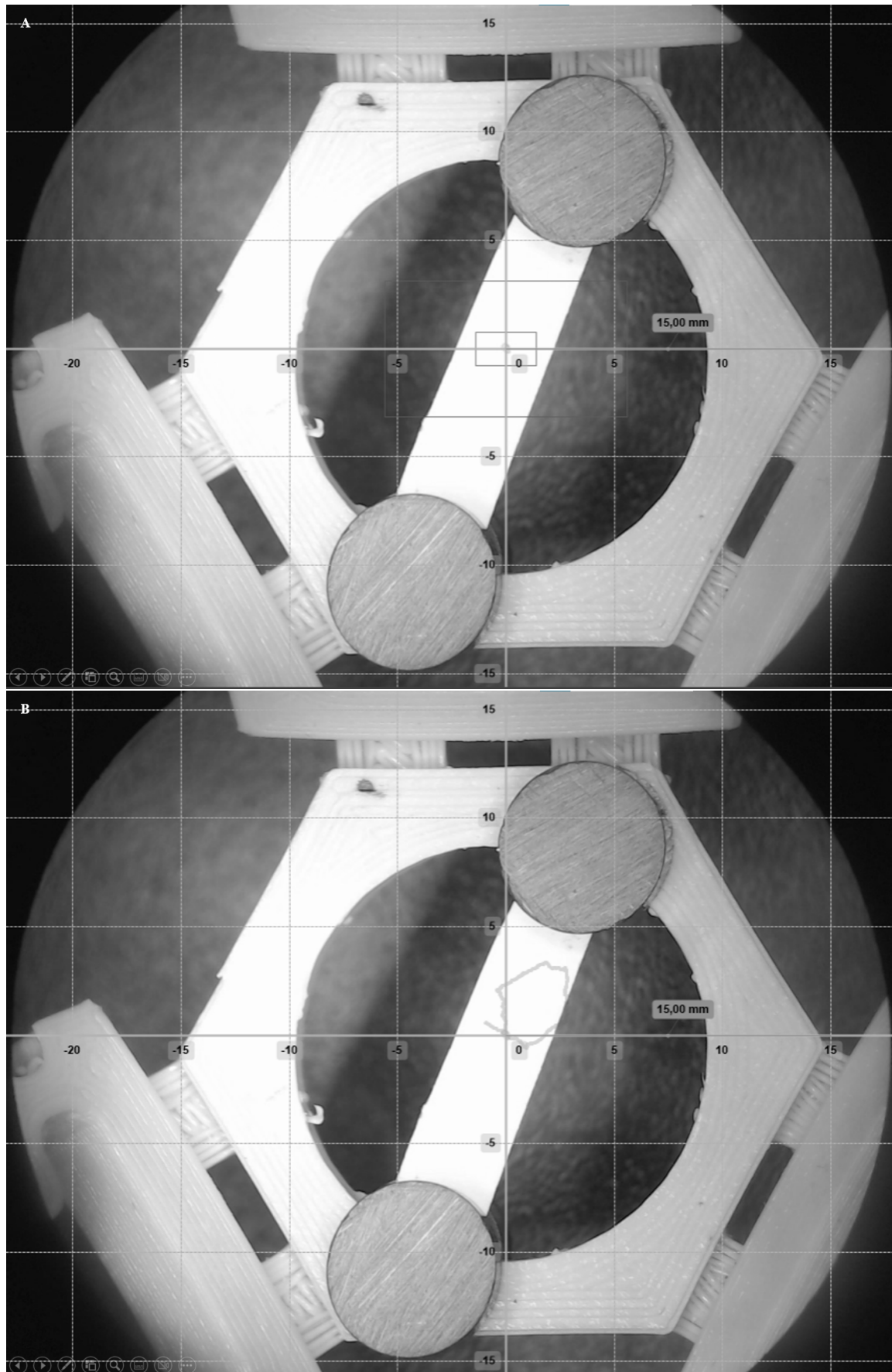


Fig. 3.9: Teste no plano XY: Teste 3. A: Posição inicial da plataforma no sistema de coordenadas XY, antes da execução do G-CODE; B: Figura desenhada pela trajetória do ponto desenhado na plataforma após a execução do G-CODE.

3.1.1 Análise dos resultados obtidos

A utilização de G-CODE revelou-se essencial durante os testes efetuados, uma vez que permitiu uma análise mais precisa acerca das deslocações efetuadas pelo robô devido à utilização de valores concretos. O robô delta pode ser aplicado noutros projetos independentes e o G-CODE facilita a integração do mesmo nesses projetos dado que se trata de uma linguagem universal para operação com máquinas. O teste 1 relativamente a z produziu resultados bastante satisfatórios. O alinhamento do ponto com a origem do referencial cartesiano manteve-se igual no início e no fim do teste, o que indica que a imagem obtida pela câmara não sofre desvios após várias iterações. É perceptível no estágio intermédio a existência de um desvio do ponto em relação à origem, contudo este fenómeno está relacionado com o comportamento do sistema de *flexures* ao deslizar sobre os eixos. Quando a vara roscada gira sobre si própria, o carril do sistema de *flexures* sobe ou desce consoante a direção da rotação. Cada carril possui duas peças metálicas de tamanho predefinido que foram escolhidas de acordo com a maior proximidade ao perímetro dos eixos. O objetivo é que a peça metálica deslize no eixo sem que esta se desloque noutra direção para além de z , caso contrário o sistema está suscetível a pequenas deslocações em x e y . Dado que existe essa discrepância entre o eixos e a peças dos carris (Figura 3.10), então por consequência o ponto desenhado na plataforma sofre desvios.

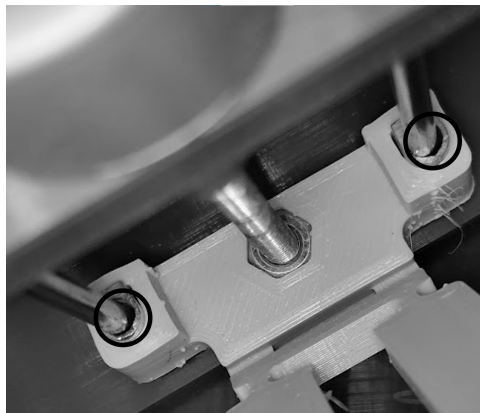


Fig. 3.10: Discrepância originada pela diferença de perímetros entre os eixos e as peças que compõem os carris.

O facto do ponto se manter coincidente com a origem do referencial remete para a conclusão de que a plataforma se mantém nivelada. Foram realizados testes para comprovar este nivelamento. Num teste considerado macro, dado que foi realizado a olho nu, a plataforma parece manter-se nivelada após 20 iterações em z , conforme ilustra a Figura 3.2. A linha auxiliar l ajuda a compreender esse nivelamento a olho nu, no entanto foram necessários testes mais aprofundados para precisar os resultados. O teste 3 relativo a z produziu resultados muito satisfatórios em relação ao nivelamento da plataforma após 50 iterações. É perceptível que a plataforma se mantém nivelada antes e após as deslocações, contudo é notória a perda de precisão. Na Figura 3.3B é possível observar que a plataforma não retornou à sua

posição inicial. Este fenómeno pode ser explicado com base no *backlash* dos motores e, possivelmente mas menos provável, com a acumulação de erros durante a execução do código.

O *backlash* (??) é a consequência do espaçamento entre as rodas dentadas que compõem as engrenagens dos motores. Este espaçamento não pode ser nulo, caso contrário as engrenagens não conseguiriam efetuar o movimento de rotação. Ao aplicar este conceito ao sistema produzido, o *backlash* ocorre no momento em que existe uma alteração na direção de rotação dos motores. Esse momento é caracterizado pela alteração da localização do *backlash* em relação ao dente da engrenagem, fazendo com que num curto espaço de tempo não ocorra rotação do motor. A acumulação destes momentos influencia a posição final da plataforma na medida em que não será a mesma definida inicialmente. Em 50 iterações ocorreram, na melhor das hipóteses, 100 momentos deste tipo.

Embora menos provável, é necessário considerar a acumulação de erros durante os cálculos efetuados na execução do código do robô delta. Durante os cálculos são efetuadas várias aproximações ao nível decimal. Estas sucessivas aproximações fazem com que o sistema acumule erros ao longo do tempo em que o robô delta é operado. Estes erros podem não ser significativos para resultado observado na Figura 3.3, pelo que o *backlash* tem maior peso no sucedido.

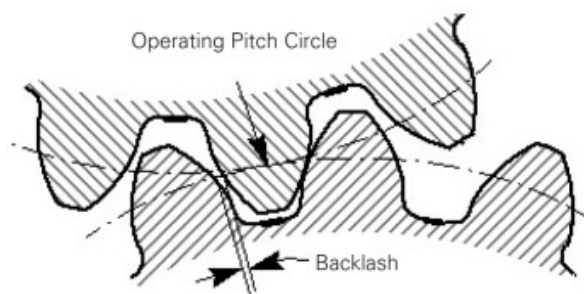


Fig. 3.11: *backlash* associado a um motor de passo. Fonte: *Modern Approach to Maintenance in Spinning* [12]

No teste 4 relativo a z , são observados dois aspetos: o primeiro consiste no facto da plataforma sofrer um desvio em x à medida que vai subindo; o segundo consiste no facto da plataforma não efetuar uma subida de 5mm (valor indicado no G-CODE). Após ser realizada a extração de coordenadas deste teste (Tabela 3.1), foi possível perceber que para $t = 40s$, o desvio em x era de 0.4mm e o y_{Max} era de 3.94mm. A plataforma só começou a deslocar-se em $t = 12s$

Tabela 3.1 Extração de coordenadas: Teste em z : Teste 4

x	y	t
0	0.01	12
-0.4	3.94	40

onde x é a coordenada em mm, y é a coordenada em mm e t é o tempo em segundos.

Os testes ao deslocamento linear em x e em y produziram resultados muito satisfatórios. É possível observar através das Figuras 3.5 e 3.6 que após 50 iterações o ponto voltou exatamente à origem do referencial. Em $x = 5$ (valor teórico) verifica-se que o ponto está perfeitamente alinhado com o respetivo eixo, embora em $y = 5$ (valor teórico) seja perceptível um ligeiro desvio. A deslocação máxima testada foram 5mm (valor teórico), no entanto para deslocações maiores é possível que se possa verificar um aumento do desvio, principalmente em y . Para a aplicação a que o robô delta se destina, 5mm (valor teórico) é um valor máximo razoável para a maioria das deslocações a serem efetuadas.

Dos testes realizados até este ponto, foi perceptível que os valores teóricos expectáveis para a deslocação da plataforma não coincidem com os valores reais. Esta discrepância foi mais notória nos testes de desenho de figuras geométricas. A dureza do material utilizado para o sistema de *flexures* assim como o próprio *design* das mesmas pode estar a interferir indiretamente na posição final da plataforma. Em iterações futuras deste sistema será necessário realizar testes para *flexures* mais ténues e em que o sistema na sua generalidade seja também mais ténue.

No teste do desenho do triângulo é possível identificar que a segunda diagonal realizada pelo robô delta foi mais curta em relação ao que era expectável. Assumindo que esta diagonal fosse bem executada, o resultado seria claramente um triângulo equilátero mesmo que as suas dimensões fossem inferiores ao previsto. Foi realizada uma revisão ao código G-CODE de modo a identificar algum erro, mas nada foi encontrado dado que a sua simulação em computador formava efetivamente um triângulo equilátero. O *backlash* dos motores também foi colocado em causa dado que após a primeira diagonal os motores invertem a direção de rotação, no entanto, o *backlash* existente não justifica a distância não realizada do segmento de reta na segunda diagonal. Este facto é alicerçado pelo desenho do hexágono (Figura 3.9), onde é possível observar uma nova falha numa diagonal. Trata-se de uma diagonal semelhante no que diz respeito ao sentido da sua execução.

O teste que produziu melhores resultados foi o do quadrado, algo que já seria expectável tendo em conta os resultados obtidos nos testes em x e em y . O perímetro de cada lado não corresponde aos 5mm expectáveis. Estes resultados, e os demais relacionados com o triângulo e o hexágono, são comprovados pela extração de coordenadas apresentadas nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 do Apêndice A. Para o desenho do triângulo, y_{Max} ocorre em $t = 24s$ (o expectável seria 4.33mm) e x_{Max} ocorre em $t = 35s$ (o expectável seria 5mm). Para o desenho do quadrado, y_{Max} ocorre em $t = 19s$ (o expectável seria 5mm) e x_{Max} ocorre em $t = 38s$ (o expectável seria 5mm). No desenho do hexágono, y_{Max} ocorre em $t = 46s$ (o expectável seria 7.5mm) e x_{Max} ocorre em $t = 61s$ (o expectável seria 8.66mm).

Apesar dos valores teóricos não corresponderem aos valores reais, é necessário reforçar que o controlo do robô delta é realizado pelo utilizador através de um *joystick*, pelo que a distância percorrida pela plataforma depende unicamente da distância desejada por ele.

No que diz respeito ao sistema como peça física, o resultado final é bastante satisfatório. A estrutura principal é robusta, mantendo a integridade do sistema. Paralelamente à estrutura, foram identificados alguns aspetos menos positivos no sistema de *flexures* e que podem ser melhorados, incrementando assim a qualidade dos resultados dos testes realizados:

- As *flexures* identificadas com círculos na Figura 3.12 são impressas com uma espessura de 0.8mm. Uma diminuição desta espessura poderá levar a resultados mais satisfatórios em relação à deformação do sistema, evitando assim comportamentos anómalos da plataforma em relação ao seu nivelamento no momento em que se efetuam certos deslocamentos [40];

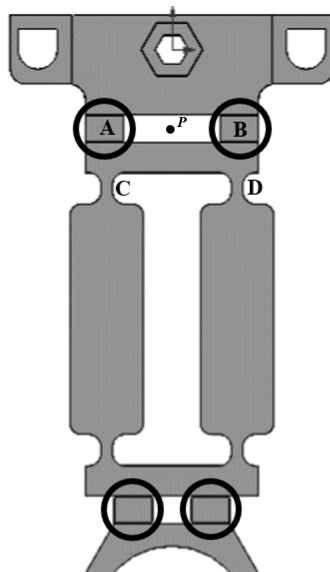


Fig. 3.12: *Flexures*

- No modelo concebido por *S.Graves, et al.* [8] (Figura 3.13), os *pivots* consistem em pontos. Na teoria, os *pivots* de cada carril permitem mais opções de rotação quando comparados com o sistema do *μScope* que utiliza um sistema de *flexures* baseado no modelo concebido por *J. E. Correa, et al.* [9]. O código criado para o robô delta considera como coordenadas dos *pivots* o ponto médio entre as *flexures* A e B (ponto P) (Figura 3.12) e ignora as *flexures* C e D. Assim sendo, o código não reflete exatamente o modelo real do robô delta implementado e por consequência existe a probabilidade de verificar comportamentos anómalos no mesmo. Uma forma de minimizar esta situação seria diminuir a distância entre as *flexures* A e C e, respetivamente, B e D. As *flexures* A e B devem ser mantidas dado que apenas uma *flexure* não é suficiente para manter a integridade do sistema;
- Na zona onde é encaixada a vara roscada à estrutura principal do robô, existe um espaçamento entre esta e a estrutura, o que faz com que a vara não fique bem fixa e, conseqüentemente, leva à possibilidade da ocorrência de pequenos deslizamentos da vara. Este problema pode ser minimizado

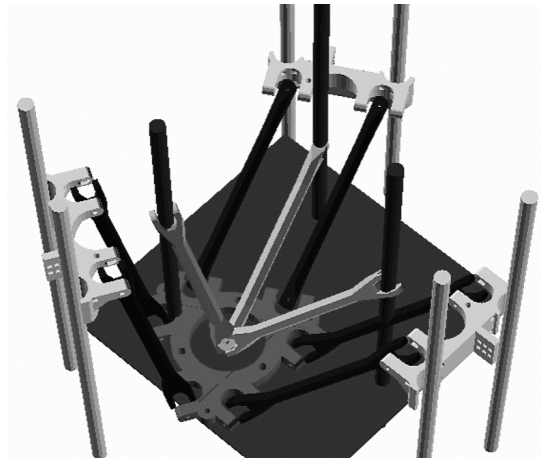


Fig. 3.13: Modelo concebido por *S.Graves, et al.* [8]

com um aperfeiçoamento nesta zona da estrutura, porém não foram identificados impactos diretos nos testes.

Foi ainda realizado um teste relacionado com a menor distância possível de ser executada pelo robô delta. Este valor é de 0.01mm, uma vez que foi o valor mais baixo para o qual o sistema respondeu com uma rotação dos motores.

3.2 Microscópio μ Scope: sistema finalizado

A Figura 3.14 mostra o sistema final obtido.



Fig. 3.14: μ Scope - Sistema finalizado.

3.2.1 Análise dos resultados obtidos

O resultado do sistema como um todo é bastante satisfatório, porém pode ser alvo de melhorias ao nível do *design* e do processo de montagem. O espaço interior pode ser melhor aproveitado dado que existe alguma quantidade de espaço vazio. Por exemplo, o espaço envolvente ao módulo O pode ser diminuído e o módulo P pode ser agregado ao módulo R, diminuindo assim as dimensões gerais do microscópio. É um facto que o módulo R é volumoso e permite uma manipulação da amostra superior ao que realmente é necessário, por outro lado permite que o mesmo seja reutilizável noutros projetos com diferentes fins.

O compartimento destinado ao *Arduino* e à *powerbank* deve possuir maior altura, dado que a altura do *Arduino* somada à altura da ponta do *jumper* é maior do que o que está atualmente implementado. Desta forma, o *Arduino* ficou implementado no espaço envolvente ao módulo O. Futuramente, os *jumpers* devem ser substituídos por circuitos fixos. Foi também utilizada uma *breadboard* como forma de auxiliar as ligações necessárias, porém é um elemento a eliminar numa eventual versão melhorada. A *powerbank* utilizada no sistema encaixa no espaço a que está destinada, porém quando os cabos estão ligados à mesma, esta impede que as portas fechem. Além disso, o espaço é pequeno para contemplar a *powerbank*, o *Arduino* e os cabos remanescentes em simultâneo. É necessário assim um aumento deste espaço ou uma nova conceção para a disposição dos elementos. A gestão dos cabos também deve ser melhorada.

Quanto ao processo de montagem, foi observada uma dificuldade acrescida na montagem do módulo R na caixa. Primeiramente seria ideal realizar uma montagem virtual do conjunto de modo a antecipar eventuais problemas na montagem real, porém os modelos digitais dos elementos não impressos em 3D (motores, *drivers*, LEDs, câmara, objetiva, roscas, porcas e parafusos) não estão todos disponíveis. A dificuldade mencionada provém das dimensões deste módulo face ao espaço disponível na caixa e à saliência existente para a montagem do módulo P. Também foi notória alguma dificuldade na montagem do módulo O, dado que os parafusos que fixam o mesmo à caixa são de difícil acesso. Além disso, após sucessivas montagens, foi possível notar algum desgaste nos furos destinados a estes parafusos, o que faz com que o módulo fique instável a certa altura. A introdução de um espaço para porcas resolverá o problema numa futura versão.

A zona de encaixe do módulo P também sofreu algum desgaste após várias montagens do sistema, pelo que é necessária uma nova abordagem para a integração deste módulo. Além disso, o suporte providenciado pela caixa ao módulo é relativamente fraco, o que fez com que o módulo ficasse desnivelado com o passar do tempo. Tal como referido anteriormente, a agregação deste módulo ao módulo R pode ser uma solução dado que a altura máxima da plataforma nunca coincide com a parte mais superior da estrutura do robô delta.

O resultado obtido para o módulo C foi bastante satisfatório, necessitando apenas de um ligeiro

acerto na posição do ecrã em relação à moldura e de um acerto da posição do *joystick* em relação à tampa (Figura 3.15). O processo de montagem deste módulo não tem dificuldades acrescidas. É necessário criar uma abordagem para que os cabos utilizados no módulo C que ligam os vários componentes não estejam expostos, principalmente o *flat cable*, uma vez que é o mais sensível e não deve ser dobrado.

A transição entre o modo *standard* de imagem e o modo de fluorescência pode ser melhorada. Atualmente esta mudança é realizada através da alteração das ligações responsáveis por alimentar os LEDs. A introdução de um botão facilitará este processo de alternância de modos.



Fig. 3.15: Módulo C

Em relação ao custo total do sistema, a Tabela 3.2 apresenta o custo de cada componente ou conjunto de componentes.

Numa primeira análise é possível verificar que o sistema aqui abordado é tem um custo superior ao *OpenFlexure* [10]. O custo do μ Scope pode ser minimizado na medida em que alguns componentes eletrónicos podem ser alterados por outros mais baratos. A nível de eletrónica, é possível substituir o *Arduino* utilizado pela versão *micro*, já que possui os *pins* necessários às ligações a efetuar. O *Raspberry Pi* pode também ser substituído pela versão *Zero W* que é mais barata e é capaz de suportar uma câmara e um *display*. Em relação aos outros componentes, também é possível baixar os respetivos custos, porém a qualidade do sistema final poderá começar a ficar comprometida ao escolher uma câmara de menor qualidade ou um *display* mais pequeno ou de menor resolução, por exemplo. O componente com maior peso no custo do microscópio é o espelho dicróico.

O custo estimado das peças impressas é bastante satisfatório, no entanto é possível baixá-lo ainda mais através de novas iterações no *design* com vista à poupança de material, isto é, remover partes desnecessárias do sistema, optar por peças de menor dimensão ou realizar furos em zonas não essenciais, por exemplo. É importante referir como aspeto positivo o facto do microscópio ser desenhado de forma a que, maioritariamente, não sejam necessários suportes para a impressão de peças. Esta abordagem

permite reduzir bastante os custos e poupar material, já que são partes descartáveis.

Tabela 3.2 Tabela de Custos

<i>Componente</i>	<i>Categoria</i>	<i>Custo</i>
Peças em PLA	Material de Impressão	~ 26,41€
Peças em TPU	Material de Impressão	~ 2,12€
Ferragens Diversas	Ferragens	~ 5,00€
Objetiva RMS	Componentes óticos	30,00€
LEDs	Componentes óticos	0,50€
Lente de Magnificação	Componentes óticos	N/D
Lente Convexa (x2)	Componentes óticos	N/D
Espelho Dicroico <i>ThorLabs DMLP490T</i>	Componentes óticos	119,63€*
<i>Arduino Uno</i>	Componentes Eletrónicos	29,50€*
<i>Raspberry Pi 3 Model B</i>	Componentes Eletrónicos	39,90€*
<i>Display LCD jOY-it</i>	Componentes Eletrónicos	22,90€*
Motores 28BYJ-48 + Controladores	Componentes Eletrónicos	12,00€*
<i>Raspberry Pi Cam V2</i>	Componentes Eletrónicos	30,00€*
<i>Powerbank Qilive (10.000mAh)</i>	Componentes Eletrónicos	20,00€*
<i>Flat Cable 15 vias 75cm</i>	Componentes Eletrónicos	4,30€*
<i>Cabos Jumper</i>	Componentes Eletrónicos	~ 1,00€
Botão <i>jOY-it</i> (x2)	Componentes Eletrónicos	4,70€*
<i>Joystick jOY-it</i>	Componentes Eletrónicos	2,55€*
Total:		~ 350,51€

*PVP recomendado.

Os preços podem sofrer oscilações.

O custo das peças impressas em PLA e TPU é estimado.

O filamento PLA utilizado tem um custo de 19,50€/kg e o filamento TPU utilizado tem um custo de 49,80€/kg.

3.3 Caracterização do poder de ampliação do microscópio

A lente utilizada como forma de ampliação da imagem a ser captada na câmara digital não possui uma referência. Tendo em conta este aspeto, é necessário caracterizar o poder de ampliação do microscópio. Para este efeito, utilizou-se uma amostra de calibração (Figura 3.16) cuja menor distância possível de

medir são 0.2mm ($200\mu\text{m}$). Foi obtida uma imagem na configuração de transmissão simples dessa amostra (Figura 3.17). Os 16cm representam a distância medida na imagem que correspondem aos 0.2mm reais. A medição foi obtida utilizando a imagem de dimensões originais (704p x 439p) sem qualquer zoom.

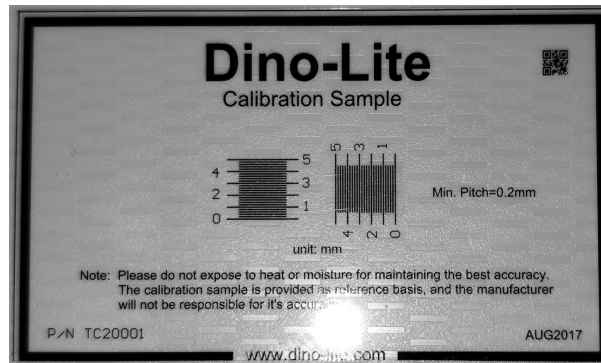


Fig. 3.16: Amostra de calibração.

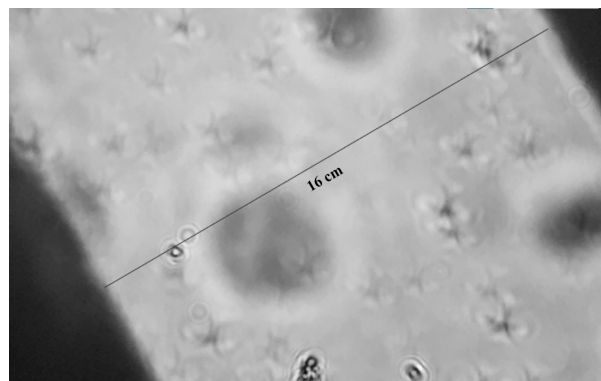


Fig. 3.17: Amostra de calibração visualizada ao microscópio: distância mínima entre duas barras.

Para o cálculo da ampliação foi utilizada a Equação 1.3. A ampliação é adimensional. Utilizando centímetros como unidade de referência para o cálculo e sabendo que a menor distância medida na amostra de calibração são $200\mu\text{m}$, então $200\mu\text{m}$ convertidos em centímetros são 0.02cm. Deste modo, segundo a Equação 3.1,

$$A_T = \frac{16}{0.02} = 800 \quad (3.1)$$

é possível concluir que o microscópio tem um poder de ampliação de 800 vezes. Isto significa que, utilizando a Equação 1.2 e resolvendo-a em ordem a A_{oc} , a lente de referência desconhecida possui uma ampliação de 20 vezes (onde $A_T = 800$, $A_{ob} = 40$ e A_{oc} é a variável desconhecida).

3.4 Obtenção de imagens na configuração de transmissão simples (campo claro)

A Figura 3.18 apresenta um *frame* obtido no microscópio com ampliação de 800 vezes de uma camada fina de *Allium cepa* (cebola) na configuração de transmissão simples. A Figura 3.19 apresenta um *frame* obtido no microscópio com ampliação de 800 vezes de uma camada fina de *Allium cepa* na mesma configuração, onde é visível a largura integral da célula. A Figura 3.20 apresenta um *frame* obtido no microscópio com ampliação de 800 vezes do núcleo de uma célula do mesmo elemento, na mesma configuração, mas de uma amostra diferente. A Figura 3.21 apresenta um *frame* obtido no microscópio com ampliação de 800 vezes de uma fibra de seda verde, na mesma configuração. A Figura 3.22 apresenta um *frame* obtido no microscópio com ampliação de 800 vezes de um grão de pólen de *Petunia Hybrida*, na mesma configuração.

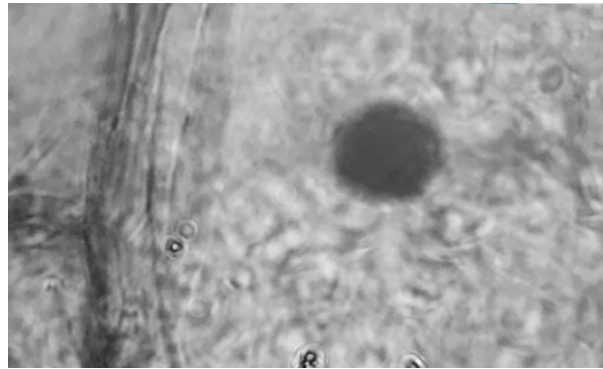


Fig. 3.18: *Frame* de uma observação de uma camada fina de *Allium cepa* com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.

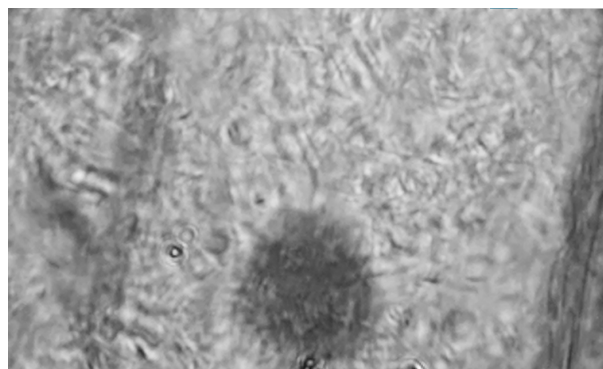


Fig. 3.19: *Frame* de uma observação de uma camada fina de *Allium cepa* com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples, onde é visível a largura integral da célula.

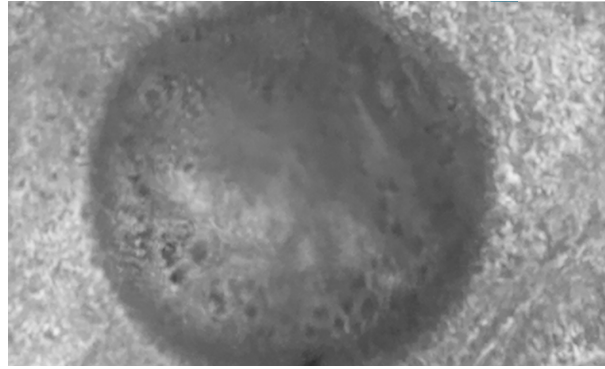


Fig. 3.20: *Frame* de uma observação de um núcleo de uma célula de *Allium cepa* com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.

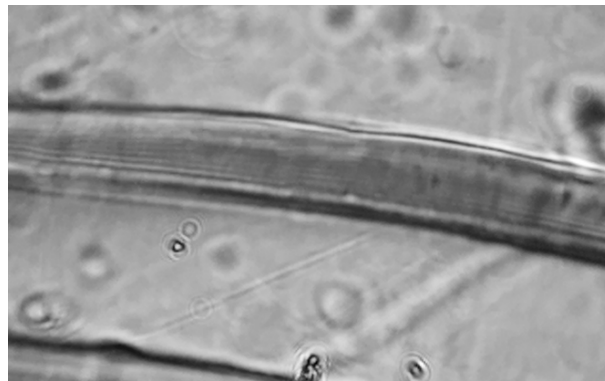


Fig. 3.21: *Frame* de uma observação de uma fibra de seda verde com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.

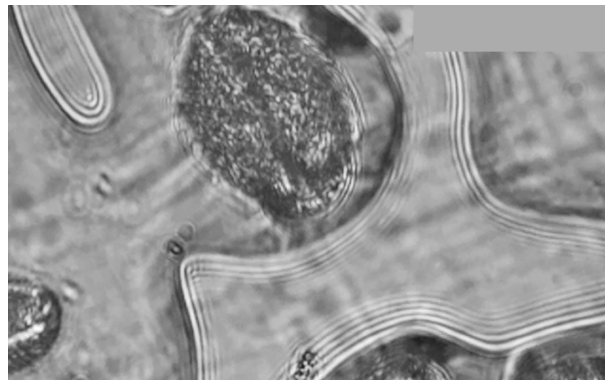


Fig. 3.22: *Frame* de uma observação de um grão de pólen de *Petunia Hybrida* com ampliação de 800 vezes na configuração de transmissão simples.

3.4.1 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 3.18 é possível observar claramente a constituição de uma célula de *Allium cepa*. Esta constituição encontra-se evidenciada na Figura 3.23. Na Figura 3.19 é possível observar uma outra célula da mesma amostra, em que a largura total da mesma é totalmente visível. Este *frame* foi captado com vista ao cálculo desta mesma distância.

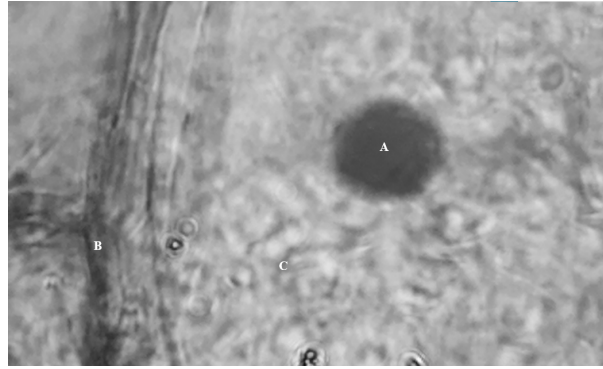


Fig. 3.23: Constituição de uma célula de *Allium cepa*. A: Núcleo; B: Parede celular; C: Citoplasma.

Na Figura 3.20 é possível observar claramente o núcleo da célula e proceder à definição do seu tamanho através da Equação 1.3, assim como para a Figura 3.19. Iniciando com a Figura 3.19, a largura medida na imagem original é de, aproximadamente, 15cm. Assim, a largura real da célula corresponde a:

$$A_T = \frac{D_I}{D_R} \iff D_R = \frac{D_I}{A_T} \iff D_R = \frac{15}{800} \iff D_R = 0.01875\text{cm} = 187.5\mu\text{m} \quad (3.2)$$

O diâmetro do núcleo medido na Figura 3.20 possui 12cm, o que significa que após a aplicação da Equação 1.3 e resolvendo-a em ordem a D_R , o mesmo mede $150\mu\text{m}$ de diâmetro. É possível verificar que a dimensão deste núcleo é quase semelhante à largura da célula da Figura 3.19, o que pode ser explicado por se tratarem de amostras diferentes cujos espécimes cresceram sob condições de cultura diferentes. O grão de pólen possui uma dimensão de $50\mu\text{m}$ na sua zona mais achatada, por isso enquadra-se no intervalo de dimensões médias para este tipo de grão, segundo a *PalDat* [41].

Em relação à fibra de seda, o resultado é bastante satisfatório, sendo que o diâmetro da mesma é de aproximadamente $20\mu\text{m}$.

A iluminação providenciada às amostras permite uma boa visualização das mesmas, porém a focagem não é excepcional mas é relativamente boa, uma vez que permite uma observação nítida dos elementos da célula. A focagem está diretamente dependente da menor distância possível de ser percorrida em z , que neste caso são 0.01mm . Em adição, a coordenação dos três motores ao mover a plataforma em z não é exatamente uniforme. Como é possível observar na Figura 3.4, o movimento da plataforma define um percurso não retilíneo, o que dificulta na maioria das vezes a focagem num plano específico. Através da mesma figura é possível perceber que existe uma ligeira deslocação da plataforma em relação ao eixo vertical, o que na prática acaba por dificultar a visualização de uma eventual zona de interesse na amostra durante o processo de varrimento e focagem. A focagem também começa a ser afetada a certo ponto quando se efetuam deslocações em x e y . A posição ideal da plataforma implica a sua perpendicularidade em relação à objetiva, porém, à medida que se efetuam deslocações nos eixos mencionados, a plataforma

começa a entortar. As causas deste comportamento são as mencionadas na Subseção 3.1.1. Estes fatores afetam diretamente todo o processo de análise da amostra, tornando o mesmo mais moroso.

A nível de contraste, os resultados são satisfatórios. É possível distinguir com facilidade os elementos mais escuros dos mais claros, contudo, uma melhoria no sistema de iluminação ajudará na obtenção de resultados ainda melhores, como aproximar a fonte de luz à amostra.

O processo de varrimento da amostra é simplificado pelos controlos implementados, no entanto é dificultado porque a ampliação é demasiado grande para uma primeira análise da amostra. O processo normal de análise deve iniciar-se com um poder de ampliação mais baixo e terminar num nível de ampliação mais alto, de forma a facilitar a procura por áreas de interesse. É relevante implementar numa iteração futura um revólver com pelo menos duas objetivas com poderes de ampliação distintos.

A movimentação da plataforma só ocorre no momento em que o utilizador interage com os elementos de controlo. É necessário corrigir o *refresh rate* do ecrã, isto porque a atualização da imagem ocorre com *delay* em relação ao *input* do utilizador. A posição relativa da câmara em relação ao robô delta afeta a perceção do utilizador em relação à movimentação da plataforma. Por exemplo, uma deslocação em *y* positivo deveria corresponder à visualização de uma movimentação da imagem para baixo, porém é observada uma deslocação na diagonal (Figura 3.24).

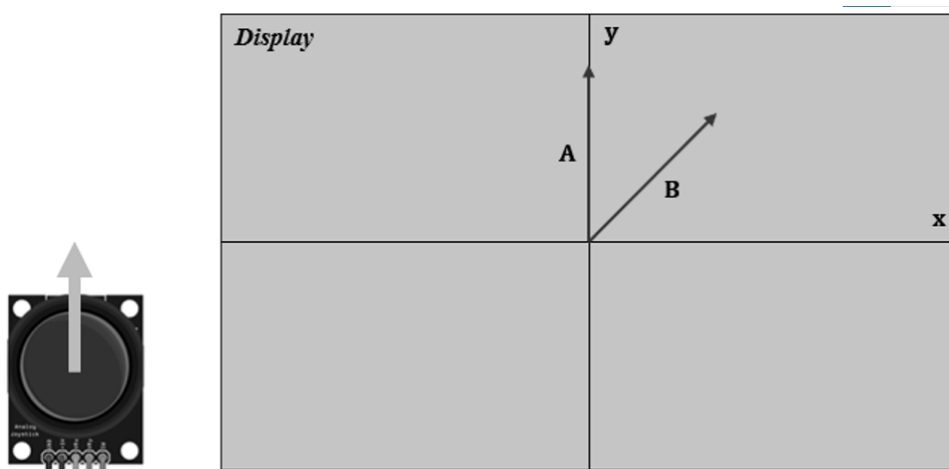


Fig. 3.24: Perceção do utilizador em relação à movimentação da imagem quando o *joystick* é deslocado para cima, conforme indica a imagem. A: Movimentação esperada da imagem; B: Movimentação real.

Futuramente será necessário alterar a disposição da câmara em relação ao robô delta de modo a melhorar a perceção do utilizador em relação à movimentação da amostra. O módulo C desempenha um papel fulcral na medida em que os *inputs* do utilizador não interferem com a estabilidade do microscópio, dado que é um módulo separado da caixa.

Quando se comparam os resultados obtidos na configuração de transmissão simples com os resultados do já estabelecido *OpenFlexure*, existem algumas diferenças na qualidade da imagem. O *Open-*

Flexure é acompanhado por um *software* que processa cada *frame* obtido pela câmara. É utilizado um método de compressão da imagem e é aplicado um algoritmo que melhora a nitidez da mesma. No caso do *μScope* não existe qualquer *software* associado que realize um tratamento dos *frames* obtidos, o que gera diferenças na qualidade da visualização. Estas diferenças podem tornar-se mais ou menos significativas dependendo da amostra em análise. A Figura 3.25 evidencia diferenças a nível de nitidez e contraste entre os dois microscópios (a imagem da esquerda sofreu ainda correção ao nível do brilho e *gamma*), porém em ambos os casos a distinção dos elementos das células são bem visíveis. Apesar de se tratarem de imagens com ampliações diferentes, a objetiva utilizada no *μScope* possui uma resolução de $0.42\mu\text{m}$, o que torna possível a visualização de elementos na ordem de $1\mu\text{m}$ ou menos na configuração em que se apresenta.

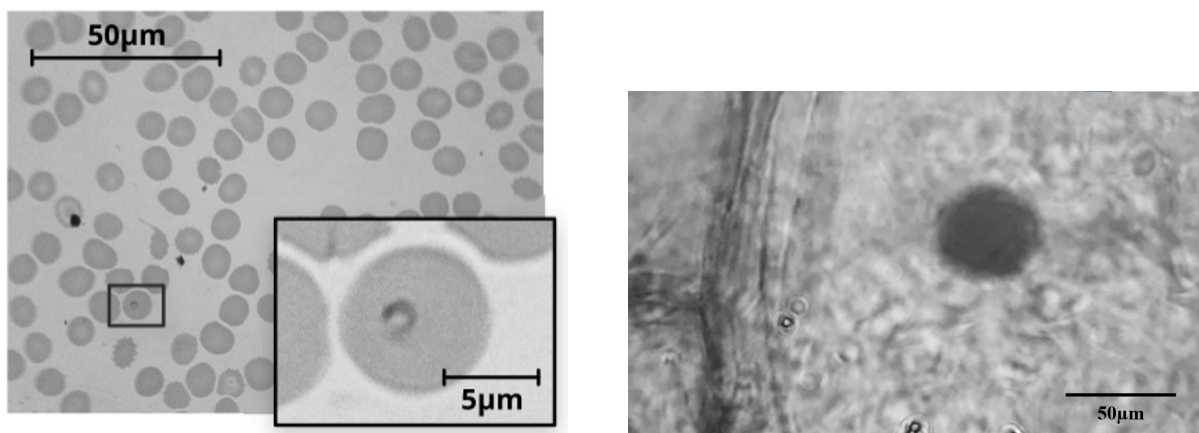


Fig. 3.25: Comparação entre a qualidade de imagem obtida no *OpenFlexure* (à esquerda) (Fonte: *Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope* [10]) e o *μScope* (à direita). A amostra analisada no *OpenFlexure* são glóbulos vermelhos, alguns infetados pelo parasita protozoário *Plasmodium Falciparum*, numa ampliação de 1000 vezes com objetiva de imersão em óleo.

3.5 Obtenção de imagens na configuração de fluorescência

A Figura 3.26 apresenta dois *frames* obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras, na configuração de fluorescência.

A Figura 3.27 apresenta dois *frames* obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras coradas em solução amarela fluorescente, na mesma configuração. A luminosidade da imagem à esquerda foi incrementada em 40% para melhor visualização do resultado. As restantes figuras apresentam-se sem qualquer tipo de modificação pós captura.

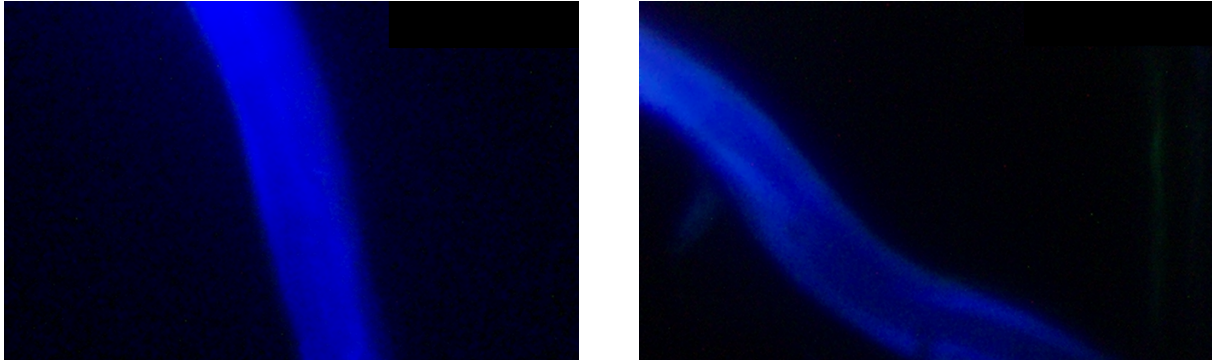


Fig. 3.26: *Frames* obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras, na configuração de fluorescência.

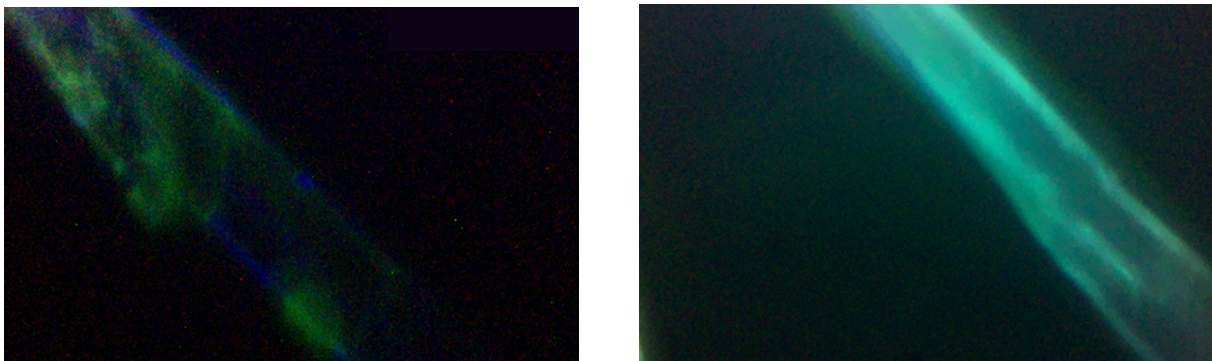


Fig. 3.27: *Frames* obtidos no microscópio com ampliação de 800 vezes de fibras coradas em solução amarela fluorescente, na configuração de fluorescência. A luminosidade da imagem à esquerda foi incrementada em 40%

3.5.1 Análise dos resultados obtidos

Os resultados produzidos para a configuração de fluorescência são positivos na medida em que foi possível visualizar o efeito pretendido, contudo serão necessárias observações de amostras coradas com fluoróforos para identificação de estruturas específicas.

A Figura 3.26 apresenta fibras não coradas mas que refletem naturalmente a luz proveniente do LED, por isso apresentam cor azul. No caso da Figura 3.27, as fibras encontram-se coradas com solução amarela fluorescente, por isso apresentam cor ciano. A razão para a observação desta cor deve-se ao facto do espelho dicróico barrar comprimentos de onda acima dos 490nm. De acordo com o espectro de cores da Figura 3.28, o ciano é a cor compreendida entre os 480nm e os 500nm.

A luminosidade das imagens varia de acordo com a quantidade de fluorescência emitida pela fibra. No caso das fibras não coradas a luminosidade é boa, porém a focagem não é suficientemente precisa para que a imagem seja completamente nítida. Na microscopia de fluorescência existe um plano de foco em comparação à microscopia de campo claro, o que torna o processo de focagem mais complicado. No caso das fibras coradas, a imagem da esquerda apresenta uma boa definição sendo que é possível perceber bem a delimitação da fibra e a respetiva solução fluorescente que, neste caso, não foi completamente absorvida. O contraste é razoável e permite uma boa distinção das cores, no entanto a luminosidade foi

aumentada em 40% uma vez que a imagem original possui pouco brilho, o que torna a compreensão da mesma mais dificultada. É importante referir que o aspeto mencionado torna-se menos evidente quando o utilizador vê a imagem em tempo real no ecrã do microscópio. Isto deve-se ao brilho configurado para o ecrã. Na imagem da direita encontra-se uma fibra totalmente corada e bem delimitada onde é possível observar um pequeno excesso de brilho na parte mais superior da mesma. Isto acontece porque neste caso em específico se perde o plano de focagem da fibra.

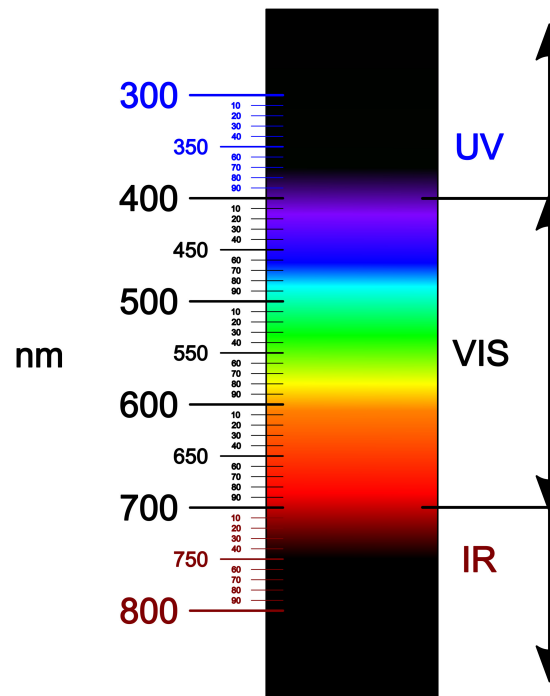


Fig. 3.28: Espectro de cores e respetivos comprimentos de onda [13]

3.6 Teste de autonomia à bateria

O esquema de ligação dos vários componentes eletrónicos à *powerbank* sofreu algumas alterações. A *powerbank* utilizada apenas fornece energia a dispositivos que comunicam a voltagem e a corrente necessária para operarem. Apesar do *Arduino* e do *Raspberry Pi* possuírem esta capacidade, os motores não possuem. De modo a contornar o problema, foi utilizado temporariamente um *hub* para ligar o *Arduino* e os motores. O *Arduino* tem a capacidade de comunicar a voltagem e corrente necessária à sua operação, por isso a *powerbank* irá fornecer a respetiva energia através do *hub*. Por sua vez, os motores serão alimentados dado que já existe uma comunicação de voltagem e corrente efetuada à *powerbank*.

A utilização do microscópio deve ser assegurada por um período de tempo aceitável. Defina-se aceitável como um período em que o utilizador opera o microscópio durante algumas horas para visuali-

zar diferentes amostras e no qual o sistema estará em constante funcionamento. De forma a caracterizar a autonomia do sistema, efetuou-se um teste em que foi cronometrado tempo de funcionamento do microscópio com uma carga completa. Durante o teste, a plataforma foi constantemente movimentada e foram realizadas algumas pausas de entre 10 a 15 minutos após a focagem de uma zona de interesse. Este teste caracteriza-se por ser mais exaustivo no uso do microscópio de modo a calcular aproximadamente a autonomia mínima do mesmo.

Após o teste, a autonomia mínima aproximada do microscópio situa-se em 5 horas e 30 minutos. Em condições de utilização normal, e tendo em conta um período laboral de 8 horas diárias, estima-se que a autonomia seja suficiente para um dia de trabalho.

Capítulo 4

Conclusão

Conteúdo

4.1	Conclusão	85
4.2	Perspetivas futuras	86

[Página propositadamente deixada em branco]

Capítulo 4 | Conclusão

Neste capítulo serão abordadas as considerações finais em relação ao sistema proposto e as perspectivas em termos de trabalho futuro para aperfeiçoamento do mesmo.

4.1 Conclusão

Para uma primeira iteração do $\mu Scope$, os resultados gerais foram satisfatórios e cumprem com os objetivos propostos inicialmente, tanto a nível da conceção da parte física como a nível de capacidades de imagem. A construção do microscópio revela-se sólida, simples devido à modularidade e *easy-to-use*. Estima-se que a autonomia seja suficiente para um dia normal de trabalho e a independência de fontes externas é um fator que caracteriza o $\mu Scope$, assim como o robô delta implementado.

O robô delta apresenta uma precisão suficiente para a aplicação a que se destina, embora na configuração de fluorescência seja mais notório a falta de uma maior precisão para efeitos de focagem. No entanto, a observação de imagens não é comprometida na sua totalidade. Relativamente à deslocação da plataforma, a precisão só é garantida para pequenas deslocações uma vez que a mesma começa a ficar desnivelada quanto maior for a deslocação. Existem algumas limitações mecânicas que podem ser atenuadas com novas iterações do sistema de *flexures* (abordagem efetuada na Seção 4.2), outras dependem diretamente do *hardware* utilizado. No caso dos motores 28BYJ-48, o *backslash* é um fator que contribui para a perda de precisão do robô em função do tempo de utilização. O robô delta conceptualizado é aplicável a outros fins devido à sua independência do sistema.

O processo de varrimento das amostras é moroso pois existe apenas uma objetiva que, quando conjugada com a lente de magnificação do módulo O, consegue ampliar a imagem em 800 vezes. Esta ampliação não é recomendada para efetuar varrimentos. Além disso, a deslocação irregular da plataforma em z dificulta este processo uma vez que pontos fixos da amostra definidos pelo utilizador perdem-se com relativa facilidade.

A qualidade das imagens obtidas é boa na medida em que é possível observar diferentes estruturas de um espécime sem dificuldades, porém não estão ao nível das imagens obtidas em microscópios já estabelecidos. O custo de produção do $\mu Scope$ situa-se acima de alguns microscópios com objetivos semelhantes, porém pode ser diminuído principalmente com recurso a outros componentes de *hardware*.

A comunidade de impressão 3D está constantemente a inovar e a contribuição com novas ideias é fulcral para o desenvolvimento de novas soluções, por isso o $\mu Scope$ enquadra-se como mais uma futura solução presente na comunidade. O maior objetivo que se pretende atingir é a sua disponibilização a instituições, principalmente de ensino, com ou sem margem financeira para aquisição de material de microscopia.

4.2 Perspetivas futuras

A resolução de problemas e o aperfeiçoamento do $\mu Scope$ só são possíveis com o desenvolvimento de novas iterações, que podem incluir a melhoria de conceitos já implementados ou a implementação de novas abordagens. Abaixo estão listados os pontos mais importantes a ter em atenção numa próxima versão do microscópio:

1. Rever o conceito de *design* de modo a melhorar o processo de montagem, o aproveitamento de espaço e a disposição dos elementos em cada módulo;
2. Melhorar o sistema de *flexures* ao implementar zonas de deformação menos espessas e tornar os *pivots* o mais próximo possível de pontos;
3. Efetuar a revisão de código do robô delta e implementar melhorias de performance;
4. Abordar a implementação de potenciômetros para operar a amostra segundo a eixo z em simultâneo com a introdução de melhorias ao código do robô delta;
5. Baixar o custo de produção do microscópio através da substituição de alguns componentes mais caros por outros mais baratos;
6. Implementar um *software* de pós-processamento de imagem de forma a melhorar as imagens mostradas ao utilizador;
7. Melhorar o método e alternância entre modos de imagem;
8. Melhorar o esquema de ligações entre componentes eletrónicos.

Bibliografia

- [1] Microscope Australia. Is the digital microscope with a camera the best for education? URL <https://microscopes.com.au/blogs/news/is-the-digital-microscope-with-a-camera-the-best-for-education>.
- [2] Müller Claudia Scheffler Kay. Five advantages of inverted over upright microscopes in industrial applications | science lab | leica microsystems, 2015. URL <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/five-advantages-of-inverted-over-upright-microscopes-in-industrial-applications/>.
- [3] Rowland W. Redington and Walter H. Berninger. *Medical Imaging Systems*, volume 34. 1981. ISBN 9783319965192. doi: 10.1063/1.2914691.
- [4] Qiang Wu, Fatima Aziz Merchant, and Kenneth R. Castleman. *Microscope Image Processing*. Elsevier/Academic Press, 2008.
- [5] Daniel Ahlers, Florens Wasserfall, Norman Hendrich, and Jianwei Zhang. 3d printing of nonplanar layers for smooth surface generation, 2019. ISSN 21618089.
- [6] Airwolf 3D. Buy a 3d printer using the 3d printer buying guide — airwolf 3d. URL <https://airwolf3d.com/3d-printer-buying-guide/>.
- [7] Marc Zimmerman, N Andrew Peterson, and Marc A Zimmerman. A new approach to the design of a delta robot with a desired workspace. 34, 2016. doi: 10.1023/B.
- [8] Steve Graves, Johann Rocholl, His Marlin, Kossel Clear, Blue Eagle Labs, and The Rostock. Style delta robot kinematics. 2012.
- [9] Jorge E. Correa, Joseph Toombs, Nicholas Toombs, and Placid M. Ferreira. Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based delta robot. *Journal of Manufacturing Processes*, 24:370–375, 2016. ISSN 15266125. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.06.016. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.016>.

- [10] Joel T. Collins, Joe Knapper, Julian Stirling, Joram Mduda, Catherine Mkindi, Valeriana Mayagaya, Grace A. Mwakajinga, Paul T. Nyakyi, Valerian L. Sanga, Dave Carbery, Leah White, Sara Dale, Zhen Jieh Lim, Jeremy J. Baumberg, Pietro Cicuta, Samuel McDermott, Boyko Vodenicharski, and Richard Bowman. Robotic microscopy for everyone: the openflexure microscope. *Biomedical Optics Express*, 11:2447, 2020. ISSN 2156-7085. doi: 10.1364/boe.385729.
- [11] Xingguo Lu and Ming Liu. Optimal design and tuning of pid-type interval type-2 fuzzy logic controllers for delta parallel robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13:1, 05 2016. doi: 10.5772/63941.
- [12] Neeraj Nijjaawan and Rasshmi Nijjaawan. *Modern Approach to Maintenance in Spinning*. Woodhead Publishing India, 1 2010. ISBN 978-0-85709-000-3. doi: 10.1533/9780857094056.272. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090003500155>.
- [13] Lumitex. Visible light spectrum: From a lighting manufacturer’s perspective. URL <https://www.lumitex.com/blog/visible-light-spectrum>.
- [14] Benedict Diederich, René Lachmann, Swen Carlstedt, Barbora Marsikova, Haoran Wang, Xavier Uwurukundo, Alexander S. Mosig, and Rainer Heintzmann. A versatile and customizable low-cost 3d-printed open standard for microscopic imaging. *Nature Communications*, 11, 2020. ISSN 20411723. doi: 10.1038/s41467-020-19447-9. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-19447-9>.
- [15] George O.T. Merces, Conor Kennedy, Blanca Lenoci, Emmanuel G. Reynaud, Niamh Burke, and Mark Pickering. The incubot: A 3d printer-based microscope for long-term live cell imaging within a tissue culture incubator. *HardwareX*, 9:e00189, 2021. ISSN 24680672. doi: 10.1016/j.ohx.2021.e00189. URL <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00189>.
- [16] Nikon Instruments Inc. Especificações — eclipse ei — microscópios verticais — produtos para microscópio da nikon — nikon instruments inc., . URL https://www.microscope.healthcare.nikon.com/pt_AMS/products/upright-microscopes/ei/specifications.
- [17] Nikon Instruments Inc. Eclipse si — microscópios verticais — produtos para microscópio da nikon — nikon instruments inc., . URL https://www.microscope.healthcare.nikon.com/pt_AMS/products/upright-microscopes/eclipse-si.
- [18] Olympus LS. Upright microscopes — olympus ls. URL <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/upright/>.

- [19] Leica Microsystems. Upright microscopes — products — leica microsystems. URL <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/upright-microscopes/>.
- [20] Paul Gordon, Vinicius Paula Venancio, Susanne U. Mertens-Talcott, and Gerard Coté. Portable bright-field, fluorescence, and cross-polarized microscope toward point-of-care imaging diagnostics. *Journal of Biomedical Optics*, 24:1, 2019. ISSN 15602281. doi: 10.1117/1.jbo.24.9.096502.
- [21] S. Scott Crump. Us5121329a - apparatus and method for creating three-dimensional objects - google patents, 1989. URL <https://patents.google.com/patent/US5121329>.
- [22] Lucas Carolo. Fused deposition modeling: Fdm 3d printing simply explained — all3dp, 2022. URL <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>.
- [23] Michael Molitch-Hou. Three areas holding back the \$10.6b 3d printing industry, 2022. URL <https://www.forbes.com/sites/michaelmolitch-hou/2022/04/25/three-areas-holding-back-the-106b-3d-printing-industry/?sh=2cd1aec54935>.
- [24] TWI. What are the advantages and disadvantages of 3d printing? - twi. URL <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>.
- [25] Luis José Salazar-Serrano, Juan P. Torres, and Alejandra Valencia. A 3d printed toolbox for optomechanical components. *PLoS ONE*, 12:1–13, 2017. ISSN 19326203. doi: 10.1371/journal.pone.0169832.
- [26] Mario Del Rosario, Hannah S. Heil, Afonso Mendes, Vittorio Saggiomo, and Ricardo Henriques. The field guide to 3d printing in optical microscopy for life sciences. *Advanced Biology*, 6, 2022. ISSN 27010198. doi: 10.1002/adbi.202100994.
- [27] Andre Maia Chagas, Lucia L. Prieto-Godino, Aristides B. Arrenberg, and Tom Baden. The €100 lab: A 3d-printable open-source platform for fluorescence microscopy, optogenetics, and accurate temperature control during behaviour of zebrafish, drosophila, and caenorhabditis elegans. *PLOS Biology*, 38:437–440, 2017. doi: 10.1371/journal.pbio.2002702.
- [28] Timothy O’Connor, Jian-Bing Shen, Bruce T. Liang, and Bahram Javidi. Digital holographic deep learning of red blood cells for field-portable, rapid covid-19 screening. *Optics Letters*, 46:2344, 2021. ISSN 0146-9592. doi: 10.1364/ol.426152.

- [29] Jeffrey Kuhn. 3d printed microscope optomechanical tools. *Microscopy and Microanalysis*, 26: 686–688, 2020. ISSN 14358115. doi: 10.1017/S1431927620015536.
- [30] Paul J. Tadrous. Puma – an open-source 3d-printed direct vision microscope with augmented reality and spatial light modulator functions. *Journal of Microscopy*, 283:259–280, 2021. ISSN 13652818. doi: 10.1111/jmi.13043.
- [31] Raspberry Pi Foundation. Teach, learn, and make with the raspberry pi foundation. URL <https://www.raspberrypi.org/>.
- [32] Sony Corporation. Imx219pqh5-c specification book, 2014. URL https://publiclab.org/system/images/photos/000/023/294/original/RASPBERRY_PI_CAMERA_V2_DATASHEET_IMX219PQH5_7.0.0_Datasheet_XXX.PDF.
- [33] Arduino. Arduino - home. URL <https://www.arduino.cc/>.
- [34] Kiatronics. 28byj-48 – 5v stepper motor, 2001. ISSN 1354523X. URL <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1006817/Kiatronics/28BYJ-48/1>.
- [35] Matthew Wincott, Richard M. Parton, Andrew Jefferson, Ian M. Dobbie, Martin J. Booth, and Ian Davis. Democratising 'microscopi': A 3d printed automated xyz fluorescence imaging system for teaching, outreach and fieldwork. *Wellcome Open Research*, 6, 2021. ISSN 2398502X. doi: 10.12688/wellcomeopenres.16536.1.
- [36] Stepper - arduino reference. URL <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/stepper/>.
- [37] Accelstepper: Accelstepper library for arduino. URL <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/>.
- [38] Accelstepper: Multistepper class reference. URL <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/classMultiStepper.html#details>.
- [39] MarginallyClever. Github - marginallyclever/gcodecncdemo: a simple example of making a cnc machine from an adafruit motor shield. URL <https://github.com/MarginallyClever/GcodeCNCdemo>.
- [40] Pragna Mannam, Avi Rudich, Kevin Zhang, Manuela Veloso, Oliver Kroemer, and F Zeynep Temel. A low-cost compliant gripper using cooperative mini-delta robots for dexterous manipulation. *Robotics: Science and Systems*, 2021. URL <https://sites.google.com/view/mini-delta-robots>.

[41] PalDat. *Petunia hybrida*. URL https://www.paldat.org/pub/Petunia_hybrida/305297.

[Página propositadamente deixada em branco]

APÊNDICE

[Página propositadamente deixada em branco]

Apêndice A. Robô Delta: extração de coordenadas

Tabela A.1 Extração de coordenadas: Triângulo Equilátero

x	y	t	x	y	t	x	y	t
-0,01	0	5	0,75	1,84	24	0,02	0,97	43
0,05	0,14	6	0,73	1,78	25	-0,16	0,95	44
0,08	0,29	7	0,78	1,69	26	-0,33	0,9	45
0,17	0,44	8	0,79	1,64	27	-0,42	0,92	46
0,22	0,52	9	0,84	1,52	28	-0,59	0,89	47
0,31	0,6	10	0,9	1,44	29	-0,68	0,92	48
0,34	0,75	11	0,9	1,35	30	-0,85	0,92	49
0,45	0,95	12	0,89	1,28	31	-0,99	0,89	50
0,51	1,01	13	0,94	1,13	32	-1,1	0,89	51
0,6	1,13	14	1,03	1,05	33	-1,11	0,89	52
0,68	1,21	15	1,09	1,01	34	-1,12	0,9	53
0,68	1,36	16	1,11	0,98	35			
0,63	1,45	17	1,05	1,01	36			
0,57	1,48	18	0,88	0,98	37			
0,66	1,6	19	0,71	0,96	38			
0,72	1,71	20	0,59	1,01	39			
0,72	1,77	21	0,48	1,01	40			
0,75	1,83	22	0,25	0,95	41			
0,73	1,82	23	0,13	1	42			

onde x é a coordenada em mm, y é a coordenada em mm e t é o tempo em segundos.

Tabela A.2 Extração de coordenadas: Quadrado

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>
-0,01	0	5	0,32	2,11	24	1,96	1,13	43	0,53	0,09	62
-0,07	0,22	6	0,39	2,09	25	1,95	1,01	44	0,45	0,01	63
0	0,4	7	0,53	2,12	26	1,98	0,81	45	0,3	0,04	64
-0,03	0,46	8	0,65	2,1	27	1,96	0,75	46	0,15	0,04	65
-0,03	0,72	9	0,83	2,16	28	2	0,63	47	0,04	0,02	66
-0,08	0,84	10	0,94	2,16	29	1,99	0,45	48			
-0,08	0,99	11	1,09	2,15	30	2,02	0,28	49			
-0,02	1,11	12	1,21	2,17	31	2,06	0,23	51			
-0,07	1,31	13	1,44	2,21	32	2,03	0,23	51			
-0,04	1,43	14	1,53	2,24	33	1,97	0,24	52			
-0,07	1,61	15	1,62	2,23	34	1,82	0,25	53			
-0,16	1,73	16	1,76	2,26	35	1,74	0,25	54			
-0,16	1,9	17	1,97	2,26	36	1,62	0,22	55			
-0,27	2,02	18	1,94	2	38	1,39	0,21	56			
-0,26	2,11	19	1,91	1,97	38	1,28	0,22	57			
-0,17	2,11	20	1,94	1,74	39	1,19	0,21	58			
-0,12	2,08	21	1,94	1,62	40	1,02	0,22	59			
0	2,11	22	1,98	1,45	41	0,82	0,19	60			
0,18	2,08	23	1,96	1,36	42	0,73	0,16	61			

onde *x* é a coordenada em mm, *y* é a coordenada em mm e *t* é o tempo em segundos.

Tabela A.3 Extração de coordenadas: Hexágono

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>
0	-0,02	8	-0,04	2,3	27	1,83	3,36	46	2,78	1,82	65
-0,05	0,1	9	0,14	2,39	28	1,95	3,27	47	2,81	1,73	66
-0,06	0,28	10	0,17	2,45	29	2,07	3,13	48	2,79	1,53	67
-0,06	0,45	11	0,26	2,51	30	2,16	3,08	49	2,76	1,27	68
0	0,54	12	0,34	2,54	31	2,27	3,1	50	2,7	1,21	69
-0,09	0,78	13	0,52	2,63	32	2,3	3,11	51	2,73	1,07	70
-0,18	0,92	14	0,58	2,69	33	2,33	3,09	52	2,79	0,92	71
-0,11	1,1	15	0,67	2,75	34	2,45	3,09	53	2,75	0,6	72
-0,11	1,25	16	0,76	2,83	35	2,53	3	54	2,72	0,57	73
-0,14	1,4	17	0,88	2,89	36	2,64	3,03	55	2,64	0,58	74
-0,08	1,52	18	0,99	2,92	37	2,73	3,08	56	2,63	0,58	75
-0,17	1,69	19	1,05	2,95	38	2,72	2,97	57	2,64	0,6	76
-0,25	1,81	20	1,14	3,01	39	2,78	3	58	2,61	0,59	77
-0,25	1,92	21	1,29	3,07	40	2,78	2,83	59	2,55	0,56	78
-0,36	2,01	22	1,43	3,13	41	2,84	2,6	60	2,46	0,47	79
-0,42	2,09	23	1,46	3,18	42	2,84	2,54	61	2,34	0,47	80
-0,27	2,15	24	1,54	3,25	43	2,79	2,34	62	2,25	0,38	81
-0,24	2,18	25	1,66	3,28	44	2,76	2,14	63	2,14	0,36	82
-0,16	2,27	26	1,78	3,34	45	2,75	1,9	64	2,08	0,27	83

continua na página seguinte

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>
1,99	0,21	84	-0,26	0,21	103
1,87	0,12	85	-0,41	0,26	104
1,78	0,03	86	-0,53	0,32	105
1,73	-0,08	87	-0,67	0,4	106
1,61	-0,17	88	-0,82	0,52	107
1,49	-0,23	89	-0,94	0,57	108
1,4	-0,31	90	-0,93	0,58	109
1,31	-0,34	91	-0,92	0,57	110
1,19	-0,4	92			
1,02	-0,43	93			
0,99	-0,52	94			
0,84	-0,55	95			
0,76	-0,43	96			
0,61	-0,26	97			
0,4	-0,14	98			
0,23	-0,17	99			
0,17	-0,09	100			
0,02	-0,03	101			
-0,12	0,09	102			

onde x é a coordenada em mm, y é a coordenada em mm e t é o tempo em segundos.

[Página propositadamente deixada em branco]

ANEXOS

[Página propositadamente deixada em branco]

Anexo A. Robô Delta: código C++

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <math.h>
4 #include "AccelStepper.h"
5 #include "MultiStepper.h"
6
7 #define HALFSTEP 8
8 #define baud (115200) // How fast is the Arduino talking?
9 #define verbatim true
10 #define max_buf (64) // What is the longest message Arduino can store?
11
12 //joystick & buttons
13 #define VRX A0
14 #define VRY A1
15 #define VRZup A2
16 #define VRZdown A3
17
18 int xv = 0;
19 int yv = 0;
20 int zv = 0;
21 int zvu = 0;
22 int zvd = 0;
23
24 int numsamples=10;
25 float sumx=0;
26 float sumy=0;
27 float sumzup=0;
28 float sumzdown=0;
29
30 float minvar=256;
31 float dx=.01;
32 float dy=.01;
33 float dz=.01;
34
35 bool joystick=true;
36
37 //machine
```

```

38 const long stepsPerRevolution = 4096; // step/revolution
39 const float mmPerRevolution = 0.8; // mm/revolution
40
41 const float Ae=14.74;
42 const float Hez=0;
43 const float l=49.50;
44
45 //pivot
46 const float R=51.10;
47 const float Apx=0;
48 const float Apy=R-10.25;
49 const float Bpx=(R-10.25)*sqrt(3)/2;
50 const float Bpy=-(R-10.25)/2;
51 const float Cpx=-(R-10.25)*sqrt(3)/2;
52 const float Cpy=-(R-10.25)/2;
53
54 const float Aex=0;
55 const float Aey=Ae;
56 const float Bex=Ae*sqrt(3)/2;
57 const float Bey=-Ae/2;
58 const float Cex=-Ae*sqrt(3)/2;
59 const float Cey=-Ae/2;
60
61 const float Avx=Apx-Aex;
62 const float Avy=Apy-Aey;
63 const float Bvx=Bpx-Bex;
64 const float Bvy=Bpy-Bey;
65 const float Cvx=Cpx-Cex;
66 const float Cvy=Cpy-Cey;
67
68 //motor pin definitions: note pin order
69 //A
70 #define motorPin1 2 // IN1 on the ULN2003 driver 1
71 #define motorPin2 4 // IN2 on the ULN2003 driver 1
72 #define motorPin3 3 // IN3 on the ULN2003 driver 1
73 #define motorPin4 5 // IN4 on the ULN2003 driver 1
74 //B
75 #define motorPin5 6 // IN1 on the ULN2003 driver 2
76 #define motorPin6 8 // IN2 on the ULN2003 driver 2

```

```

77 #define motorPin7 7 // IN3 on the ULN2003 driver 2
78 #define motorPin8 9 // IN4 on the ULN2003 driver 2
79 //C
80 #define motorPin9 10 // IN1 on the ULN2003 driver 2
81 #define motorPin10 12 // IN2 on the ULN2003 driver 2
82 #define motorPin11 11 // IN3 on the ULN2003 driver 2
83 #define motorPin12 13 // IN4 on the ULN2003 driver 2
84
85 MultiStepper steppers;
86 AccelStepper stepper1(HALFSTEP, motorPin1, motorPin2, motorPin3,
    motorPin4);
87 AccelStepper stepper2(HALFSTEP, motorPin5, motorPin6, motorPin7,
    motorPin8);
88 AccelStepper stepper3(HALFSTEP, motorPin9, motorPin10, motorPin11,
    motorPin12);
89
90 float px, py, pz; //gcode position
91 float oldx=0, oldy=0, oldz=0; //current position
92 int sofars; // how much is in the buffer
93
94 char buffer[max_buf]; // where we store the message until we get a ';'
95
96 void setup() {
97     Serial.begin(baud);
98     initSteppers(1000.0);
99     //motor.setMinPulseWidth(20); //in microseconds
100 }
101
102 void loop() {
103     Serial.println("Alive and kicking!");
104     Serial.println("Assuming initial position: (0,0,0) (home).");
105     Serial.println(" ");
106
107     //-----
108     // gotopos(0,0,0);
109     //Moving each motor individually
110     // A -> 1
111     // B -> 2
112     // C -> 3

```

```

113 //up -> 1
114 //down -> -1
115
116 //example
117 //moving stepper C 5mm up
118 // moveStepper(2, 20, -1);
119 //-----
120 if (joystick){
121     while(1){
122         sumx=0;
123         sumy=0;
124         sumzup=0;
125         sumzdown=0;
126
127         bool aux=false;
128         for(int i=0; i<=numsamples; i++){
129             sumx += analogRead(VRX);
130             sumy += analogRead(VRY);
131             sumzup += analogRead(VRZup);
132             sumzdown += analogRead(VRZdown);
133         }
134         xv=sumx/numsamples;
135         yv=sumy/numsamples;
136         zvu=sumzup/numsamples;
137         zvd=sumzdown/numsamples;
138
139         if (xv>512+minvar){
140             gotopos(oldx+dx,oldy,oldz);
141             aux=true;}
142         else if (xv<512-minvar){
143             gotopos(oldx-dx,oldy,oldz);
144             aux=true;}
145
146         if (yv>512+minvar){
147             gotopos(oldx,oldy+dy,oldz);
148             aux=true;}
149         else if (yv<512-minvar){
150             gotopos(oldx,oldy-dy,oldz);
151             aux=true;}

```

```

152
153     if (zvu>512+minvar){
154 gotopos(oldx,oldy,oldz+dz);
155 zv=zvu;
156 aux=true;}
157
158     if (zvd>512+minvar){
159 gotopos(oldx,oldy,oldz-dz);
160 zv=zvd;
161 aux=true;}
162
163
164     if (aux){
165 Serial.print(xv);
166 Serial.print(",");
167 Serial.print(yv);
168 Serial.print(",");
169 Serial.println(zv);
170     }
171     }
172 }
173     else{
174     while(1){
175 while(Serial.available()){
176     char c = Serial.read();
177     if(sofar<max_buf-1) buffer[sofar++]=c;
178     if(c=='\n') {
179     buffer[sofar]=0;
180     process_command(); // do something with the command
181     ready();
182     }
183 }
184     }
185     }
186 }
187
188 void gotopos(float x, float y, float z){
189     long positions[3]; //array of desired stepper positions
190     float dir=1;// sets correct motor direction

```

```

191
192 float Aocz=sqrt (pow (l, 2) -pow (Avx, 2) -pow (Avy, 2) );
193 float Bocz=sqrt (pow (l, 2) -pow (Bvx, 2) -pow (Bvy, 2) );
194 float Cocz=sqrt (pow (l, 2) -pow (Cvx, 2) -pow (Cvy, 2) );
195
196 float Acz=sqrt (pow (l, 2) -pow (x-Avx, 2) -pow (y-Avy, 2) );
197 float Bcz=sqrt (pow (l, 2) -pow (x-Bvx, 2) -pow (y-Bvy, 2) );
198 float Ccz=sqrt (pow (l, 2) -pow (x-Cvx, 2) -pow (y-Cvy, 2) );
199
200 float Az=z+Hez+(Acz-Aocz);
201 float Bz=z+Hez+(Bcz-Bocz);
202 float Cz=z+Hez+(Ccz-Cocz);
203
204 if (verbatim){
205     Serial.println(" ");
206     Serial.print("Moving to pos:");
207     Serial.print(x);
208     Serial.print(",");
209     Serial.print(y);
210     Serial.print(",");
211     Serial.print(z);
212     Serial.println(")");
213
214     Serial.println(" ");
215     Serial.print("Moving motor A:");
216     Serial.println(Az);
217     Serial.print("Moving motor B:");
218     Serial.println(Bz);
219     Serial.print("Moving motor C:");
220     Serial.println(Cz);}
221
222 positions[0]=(long) (dir*Az*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
223 positions[1]=(long) (dir*Bz*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
224 positions[2]=(long) (dir*Cz*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
225
226 oldx=x;
227 oldy=y;
228 oldz=z;
229 steppers.moveTo(positions);

```

```

230  steppers.runSpeedToPosition(); // Blocks until all are in position
231  }
232
233  void moveStepper(int i, float l, int dir){
234      // move stepper i, by distance l with direction dir
235      long positions[3]; // Array of desired stepper positions
236      switch (i){
237          case 1:
238              positions[0]=(long) (dir*l*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
239              positions[1]=0;
240              positions[2]=0;
241              steppers.moveTo(positions);
242              steppers.runSpeedToPosition();
243              break;
244          case 2:
245              positions[0]=0;
246              positions[1]=(long) (dir*l*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
247              positions[2]=0;
248              steppers.moveTo(positions);
249              steppers.runSpeedToPosition();
250              break;
251          case 3:
252              positions[0]=0;
253              positions[1]=0;
254              positions[2]=(long) (dir*l*stepsPerRevolution/mmPerRevolution);
255              steppers.moveTo(positions);
256              steppers.runSpeedToPosition();
257              break;
258          default:
259              break; }
260  }
261
262  void initSteppers(float defaultSpeed){
263      //define max speed
264      stepper1.setMaxSpeed(defaultSpeed);
265      stepper2.setMaxSpeed(defaultSpeed);
266      stepper3.setMaxSpeed(defaultSpeed);
267
268      //set speed

```

```

269 stepper1.setSpeed(defaultSpeed);
270 stepper2.setSpeed(defaultSpeed);
271 stepper3.setSpeed(defaultSpeed);
272
273 //control steppers with MultiStepper
274 steppers.addStepper(stepper1);
275 steppers.addStepper(stepper2);
276 steppers.addStepper(stepper3);
277 }
278
279 void process_command() {
280 //-----
281 // look for commands that start with 'G'
282 int cmd=parseNumber('G',-1);
283 switch(cmd) {
284 case 0: {
285     gotoPos(parseNumber('X',px),parseNumber('Y',py),parseNumber('Z',pz));
286     break;
287 }
288 case 1: {
289     gotoPos(parseNumber('X',px),parseNumber('Y',py),parseNumber('Z',pz));
290     break;
291 }
292 case 4: pause(parseNumber('P',0)*1000); break; // wait a while
293 case 28: gotoPos(0,0,0);
294     break; // go home
295 case 92:
296     break;
297 }
298 //-----
299 // look for commands that start with 'M'
300 cmd=parseNumber('M',-1);
301 switch(cmd) {
302 case 17: {
303     break; }
304 case 112: {
305     break; }
306 case 114: {
307     Serial.print("Absolute position: X=");

```

```

308 Serial.print(oldx,3);
309 Serial.print(" - Y=");
310 Serial.print(oldy,3);
311 Serial.print(" - Z=");
312 Serial.println(oldz,3);
313 break;}
314 default: break;
315 }
316 //-----
317 // if the string has no G or M commands it will get here and the Arduino
    will silently ignore it
318 }
319
320 void ready() {
321   sofar=0; // clear input buffer
322   Serial.println("ok");
323   // Serial.print(F(">")); // signal ready to receive input
324 }
325
326 float parsenumber(char code,float val) {
327   char *ptr=buffer; // start at the beginning of buffer
328   while((long)ptr > 1 && (*ptr) && (long)ptr < (long)buffer+sofar) { //
    walk to the end
329     if(*ptr==code) { // if you find code on your walk,
330       return atof(ptr+1); // convert the digits that follow into a float and
    return it
331     }
332     ptr=strchr(ptr,' ') +1; // take a step from here to the letter after the
    next space
333   }
334   return val; // end reached, nothing found, return default val.
335 }
336
337 void pause(long us) {
338   delay(us/1000);
339   delayMicroseconds(us%1000);
340 }

```