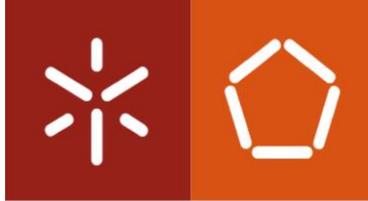




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe António Silva Fernandes

**Otimização de um equipamento para
montagem de micro acessórios**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Filipe António Silva Fernandes

**Otimização de um equipamento para
montagem de micro acessórios**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Óscar Samuel Novais Carvalho

Professor Doutor Filipe Samuel Pereira da Silva

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, sem os quais não se teria tornado uma realidade, e por isso, deixo aqui o meu enorme agradecimento:

Ao meu Orientador desta dissertação, Prof. Óscar Carvalho, por toda a ajuda e dedicação na partilha de conhecimento e experiência;

Ao Prof. Filipe Silva, por desde o início me receber no seu laboratório (de Microfabricação e Sistemas Integrados), dispondo-se desde logo por me apoiar em todos os meios necessário para o desenvolvimento da minha dissertação;

Ao supervisor da empresa João Neto, aluno de doutoramento, por toda a sua disponibilidade e colaboração;

Ao projeto “*CutInov*”, por me dar a oportunidade de contribuir no desenvolvimento de “*new aesthetics for cutlery by using new technologies*”;

Ao PROJETO MAGSENSE - Sistema de sensores magnetostriativos para monitorização estrutural à corrosão de ativos críticos- POCI-01-0247-FEDER-033783

Aos alunos e professores, que integram o laboratório de Microfabricação e Sistemas Integrados, pela assistência na execução da minha dissertação e partilha de conhecimentos e experiências durante o desenvolvimento criativo das minhas ideias;

E claro, deixo um agradecimento à minha família, pelo apoio incondicional, pelo incentivo e preocupação permanente, já que sem eles o meu percurso académico não seria possível, e em especial à minha irmã, Rosalina Fernandes, pelos conselhos, pela competência e pela sua total disponibilidade, que tornaram possível esta última etapa.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo o aumento do espectro de utilização de uma máquina de prototipagem de placas de circuito impresso (PCB), também denominada *Cirqoid Machine*, recorrendo às suas capacidades básicas de maquinagem de circuitos, à deposição de pasta de solda e ao posicionamento dos componentes eletrónicos. O projeto surge da necessidade de execução de tarefas complexas dadas as dimensões dos materiais preciosos utilizados na área de ornação. Esta dissertação tem como principal fim, a criação de acessórios para o posicionamento de pequenos cristais num cabo de talher e posicionamento de pequenos filamentos de ouro numa moeda pixelizada, previamente perfurada, de modo a obter uma imagem através do contraste entre furos preenchidos e não preenchidos.

Para o desenvolvimento deste projeto, primeiramente foram testadas as capacidades básicas do aparelho, sendo elas, a maquinagem de um circuito, deposição de pasta de solda e posicionamento de um componente eletrónico. De seguida, foram projetados acessórios para proceder ao posicionamento de cola e, posteriormente os cristais nos furos de um cabo de talher. Depois, procedeu-se ao desenvolvimento de sistemas de corte, de modo a fragmentar em pequenos filamentos para posteriormente serem posicionados nos respetivos furos. Foram projetados diferentes sistemas de corte, desde corte mediante corrente elétrica até ao corte por cisalhamento. Devido a dificuldades na execução dos testes desses sistemas, projetou-se uma pinça mecânica que executasse a tarefa de posicionamento dos filamentos, que haviam sido previamente cortados e dispostos numa placa previamente perfurada.

Quanto aos resultados, o primeiro conjunto de acessórios para a deposição de cola para a posterior posicionar os cristais não correu da forma idealizada, já que o fluido utilizado com a função agregadora, tinha demasiada viscosidade. Relativamente ao conjunto de acessórios idealizado para o posicionamento, realizou-se o teste de forma correta na colocação dos cristais.

Por último, os acessórios desenvolvidos para o posicionamento dos filamentos, concluíram os seus objetivos, apesar de alguns dos filamentos testados não entrarem completamente dentro do orifício “alvo”, devido ao atrito do filamento com as paredes do furo e à fácil deformidade do filamento de cobre.

Palavras-Chave: Placas de circuito impresso, PCB, Posicionamento, Cristais, Filamento.

ABSTRACT

This project aims to increase the spectrum of use of a printed circuit board (PCB) prototyping machine, also called Cirquid Machine, using its basic circuit machining capabilities, the deposition of solder paste and the positioning of electronic components. The project arises from the need to perform complex tasks given the dimensions of the precious materials used in the jewelery area. This dissertation has as main purpose, the creation of accessories for the positioning of small crystals in a cutlery handle and the positioning of small gold filaments in a pixelated coin, previously drilled, in order to obtain an image through the contrast between filled and unfilled holes .

For the development of this project, the basic capabilities of the device were first tested, namely, the machining of a circuit, deposition of solder paste and positioning of an electronic component. Then, accessories were designed to proceed with the positioning of glue and, subsequently, the crystals in the holes of a cutlery handle. Then, the development of cutting systems was carried out, in order to fragment into small filaments to later be positioned in the respective holes. Different cutting systems were designed, from cutting by electric current to shear cutting. Due to the failure in carrying out the tests of these systems, a mechanical clamp was designed to perform the task of positioning the filaments, which had previously been cut and arranged on a previously perforated plate.

As for the results, the first set of accessories for the deposition of glue to later position the crystals did not run in the ideal way, since the fluid used with the aggregator function, had too much viscosity. Regarding the set of accessories idealized for positioning, the test was carried out correctly in the placement of the crystals.

Finally, the accessories developed for the positioning of the filaments have completed their objectives, although some of the tested filaments do not fully enter the “target” hole, due to the friction of the filament with the hole walls and the easy deformity of the filament of copper.

Keywords: Printed circuit boards, PCB, Positioning, Crystals, Filament.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice.....	viii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimo	xvii
1. Enquadramento	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Classificação dos diferentes sistemas de posicionamento	5
2.1.1 Sistema Cartesiano:	5
2.1.2 Sistema de coordenadas cilíndrico:	9
2.1.3 Sistema de coordenadas esféricas ou polares.....	11
2.1.4 Sistema de Posicionamento <i>Scara</i>	13
2.1.5 Braço robótico (6 graus de liberdade).....	15
2.1.6 Estrutura Hexápode (6 graus de liberdade).....	17
2.2 Atuadores para sistemas de posicionamento	20
2.2.1 Atuadores Magnéticos	20
2.3 Sistemas de fixação de objetos	27
2.3.1 Garra Mecânica	27
2.3.2 Garra Pneumática	28
2.3.3 Garra Magnética	29
3. Metodologia Experimental	31
3.1 Ensaio para fabricação de circuito elétricos	31
3.1.1 Máquina utilizada	31
3.1.2 <i>Software</i>	33

3.1.3	Maquinagem de circuitos	34
3.1.4	Metrologia dimensional.....	35
3.1.5	Deposição da pasta de solda.....	45
3.1.6	Posicionamento dos componentes elétricos.....	47
3.2	Posicionamento de cristais num cabo de talher	48
3.2.1	Levantamento das necessidades	48
3.2.2	Criação de acessórios para o transporte de cristais	49
3.2.3	Criação de acessório para deposição de cola	53
3.2.4	<i>Software</i> e códigos de controlo do acessório desenvolvido	55
3.2.5	Acessórios para fixação do cabo de talher e para os cristais	55
3.2.6	Explicação do funcionamento.....	57
3.3	Criação de uma imagem pixelizada	58
3.3.1	Levantamento das necessidades	59
3.3.2	Criação de um dispositivo para o posicionamento de filamentos de modo obter uma moeda pixelizada	59
4.	Validação e Resultados	79
4.1	Validação do posicionamento de cristais	79
4.1.1	Deposição de cola	79
4.1.2	Colocação dos cristais	80
4.2	Teste de produção de uma moeda pixelizada.....	82
4.2.1	Teste do dispositivo de corte através do desfasamento de furos.....	82
4.2.2	Teste da pinça mecânica	83
5.	Conclusão	86
6.	Trabalhos Futuros	89
6.1	Rotação do cabo de talher.....	89
6.2	Tapete rotativo	89
7.	Bibliografia	90
8.	Anexos.....	94
8.1.	Anexo I.....	94
8.2	Anexo II.....	94
8.3	Desenhos técnicos	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos 2 eixo cartesiano XY[1].....	6
Figura 2 - Representação dos 3 eixo cartesiano XYZ[1].....	6
Figura 3 - Representação do sentido positivo dos 3 eixos, utilizados no sistema cartesiano[1]	7
Figura 4 - Representação de um sistema de posicionamento utilizando o princípio dos eixos cartesianos[1].....	7
Figura 5- Aparelho utilizado neste projeto, este dispositivo recorre ao uso do sistema cartesiano (X, Y,Z) para proceder ao posicionamento.....	8
Figura 6 - Aparelho responsável pela transferência de amostras de um tabuleiro para outro[1].	8
Figura 7 - Aparelho verifica o produto e descarta as peças que não estão em conformidade[1].....	9
Figura 8 - Aparelho para empilhamento de placas[1].	9
Figura 9 - Representação esquemática de um sistema de coordenadas cilíndricas[1].	10
Figura 10 - Representação de uma máquina de posicionamento que baseada nos princípios das coordenadas cilíndricas[1].	10
Figura 11 - Aparelho de posicionamento para aplicações medicas[1].....	11
Figura 12 - Representação esquemática de um sistema de coordenadas esféricas[1].	11
Figura 13 - Representação esquemática das coordenadas esféricas na superfície do globo terrestre[1]......	12
Figura 14 - Representação de uma máquina de posicionamento que utilizadas as coordenadas esféricas[1].	13
Figura 15 - Máquina de soldagem para componentes de automóveis[1].....	13
Figura 16 - Máquina de posicionamento <i>Scara</i> [1].....	14
Figura 17 - Máquina de posicionamento <i>Scara</i> de teste de produtos finalizados[1]...	14
Figura 18 - Máquina de posicionamento <i>Scara</i> para montagem[1].....	15

Figura 19 - Máquina de posicionamento <i>Scara</i> para realização de testes a produtos[1].	15
Figura 20 - Representação esquemática dos graus de liberdades de um braço robótico com 6 graus de liberdade[9].	16
Figura 21 - Braço robótico com 7 graus de liberdade(produzido pela empresa: “KUKA”)[10].....	17
Figura 22 - Estrutura de teste para simulação das condições de voo recorrendo a plataforma de <i>Stewart</i> [11].....	17
Figura 23 - Representação esquemática dos graus de liberdade de uma plataforma de <i>Stewart</i> (Imagem traduzida)[11].....	18
Figura 24 - Representação esquemática das limitações da estrutura hexápode relativamente ao centro da plataforma <i>Stewart</i> (Imagem traduzida)[11].....	19
Figura 25 - Representação esquemática das limitações da estrutura hexápode.....	19
Figura 26 - Estrutura de alta precisão , desenvolvida nos dias de hoje, recorrendo ao princípios da plataforma de <i>Stewart</i> [14].	20
Figura 27 - Exemplo de um motor DC[17]	21
Figura 28 - Parte interna de um motor de passo[19].	22
Figura 29 - Servomotor[20].....	23
Figura 30 - Representação esquemática dos componentes de um servomotor[22] ...	23
Figura 31 - Representação esquemática propriedades de um material piezoelétrico quando lhe é aplicada uma diferença de potencial e também quando lhe é aplicada uma força mecânica[24].....	25
Figura 32 - Estrutura de posicionamento com 6 graus de liberdade acionada por materiais com propriedades piezoelétricas[23]	26
Figura 33 - Exemplo de uma garra mecânica de duas hastes[30].	28
Figura 34 - Exemplo de uma garra autocentrante[31].	28
Figura 35 - Exemplo de uma garra pneumática de 4 ventosas[32].	29
Figura 36 - Exemplo de uma garra pneumática para objetos de pequenas dimensões[33].....	29
Figura 37 - Exemplo de um dispositivo de acionamento magnético[34].	30
Figura 38 - Exemplo de íman permanente, sem uso de energia(Grupo FEM)[35].....	30

Figura 39 - Fluxograma da metodologia relativo aos ensaios para a fabricação de circuitos elétricos.	31
Figura 40 - Máquina de prototipagem de PCB, denominada <i>Cirqoid</i>	32
Figura 41 - Acessório de maquiagem das placas de circuito.	34
Figura 42 - Acessório acoplado na máquina.	34
Figura 43 - Exemplo de maquinagem e furação de um circuito elétrico.....	35
Figura 44 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do X, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 0.99mm).....	36
Figura 45 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do Y, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 1.06mm).....	36
Figura 46 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do Z, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 2.16mm).....	37
Figura 47 - Comparador utilizado no teste de repetibilidade.....	37
Figura 48 - Representação dos rasgos efetuados durante o teste de toleranciamento dimensional.	39
Figura 49 - Exemplo de uma amostra do teste de toleranciamento (mediação do comprimento dos segmentos) (Ampliação de 5 vezes(500µm)).	39
Figura 50 - Microscópio ótico <i>Leica</i> DM 2500 M.	40
Figura 51 - Representação do posicionamento do comparador em relação ao equipamento, para o teste da resolução mecânica mínima.....	45
Figura 52 - Acessório para deposição de pasta de solda.	46
Figura 53 - Acessório de deposição de pasta de solda acoplado na máquina.	46
Figura 54 - Bomba pneumática, utilizada na pressurização do ar para o reservatório do equipamento.	46
Figura 55 - Exemplo testado da colocação de pasta de solda num circuito elétrico. ..	46
Figura 56 - Acessório de vácuo	47
Figura 57 - Acessório de vácuo acoplado na máquina.	47
Figura 59 - Fluxograma da metodologia relativa ao posicionamento de cristais num cabo de talher.	48
Figura 60 - Cristal utilizado durante o processo experimental.....	49
Figura 61 - Exemplo de um modelo de um cabo de talher representado com as diferentes angulações dos furos.	49

Figura 62 - Modelação em <i>Solidworks</i> do acessório responsável pela acomodação do motor de passo com representação do orifício e saliência.	50
Figura 63 - Acessório 3D impresso em PLA, responsável pela acomodação do motor de passo.....	50
Figura 64 - Modelação em <i>Solidworks</i> do acessório responsável pela acomodação da pistola de vácuo com representação dos orifícios.....	51
Figura 65 - Acessório 3D impresso em PLA, responsável pela acomodação da pistola de vácuo.	51
Figura 66 - Imagem do conjunto montado, relativo ao posicionamento dos cristais..	52
Figura 67 - Veio achatado na extremidade do motor de passo (representado com um círculo vermelho), com o intuito de promover a tração.....	52
Figura 68 - Extensão responsável pela deposição da pasta de solda (forma básica)..	54
Figura 69 - Extensão modelada para deposição de cola pela parte lateral.....	54
Figura 70 - Imagem do conjunto montado, relativo a deposição de cola.....	54
Figura 72 - Exemplo do código de controlo, para posicionamento dos cristais.....	55
Figura 73 - Molde em PLA, responsável pela acomodação de cabo de talher.....	56
Figura 74 - Acessório responsável pela acomodação do molde do cabo de talher (“porta moldes”).	56
Figura 75 - Conjunto montado, molde e “porta-moldes”.	57
Figura 76 - Tabuleiro dos cristais	57
Figura 77 - Ciclo de posicionamento de cristais num cabo de talher.....	58
Figura 78 - Fluxograma da metodologia relativa ao posicionamento de filamento numa moeda linearmente perfurada.....	59
Figura 79 - Estrutura desenvolvida para os testes de corte do fio, através da diferença de potencial.....	60
Figura 80 - Estrutura desenvolvida para os testes de corte do fio, através de um curto-circuito.....	61
Figura 81 - Dispositivo desenvolvido para testar o corte do fio através de um curto circuito.....	61
Figura 82 - Representação esquemática da técnica de corte do fio, através de um curto-circuito propositado.	62

Figura 83 - Ciclo referente á execução de moedas pixelizadas, utilizando descargas elétricas para o corte do fio	63
Figura 84 - Representação esquemática do fenómeno de sobreposição, que acontece quando o fio passa por entre as duas superfícies cortantes.	64
Figura 85 - Moldação de Solidwoks do dispositivo completo para o posicionamento de corte de filamentos através do desfasamento de 2 furos.	65
Figura 86 - Moldação em <i>Solidworks</i> do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte da bobine onde se encontra do fio.....	65
Figura 87 - Moldação em <i>Solidworks</i> do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte responsável pelo desenrolamento do fio.....	66
Figura 88 - Moldação em <i>Solidworks</i> do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte responsável pelo corte do fio.	66
Figura 89 - Parte responsável pelo corte do fio, fabricada toda ela em aço (representada em duas vistas diferentes).	66
Figura 90 - Ciclo referente á execução de moedas pixelizadas, utilizando o corte por cisalhamento.	67
Figura 91 - Moldação em <i>Solidworks</i> da pinça mecânica, onde se encontram representados alguns componentes da estrutura, responsáveis pelo posicionamento dos filamentos.....	69
Figura 92 - Moldação em <i>Solidworks</i> da pinça mecânica, onde se encontram representados alguns componentes da estrutura, responsáveis pelo posicionamento dos filamentos.....	69
Figura 93 - Pinça mecânica impressa, para movimentar filamentos (fabricado em PLA).	70
Figura 94 - Moldação em <i>Soliworks</i> da estrutura responsável pela acomodação do motor de passo.....	70
Figura 95 - Acessório impresso em PLA para acomodar o motor de passo.	71
Figura 96 - Tabuleiro perfurado para a colocação de filamentos.....	71
Figura 97 - Filamento com a extremidade "afiada" com um angulo de aproximadamente de 45°.....	72
Figura 100 - Modulação em <i>Solidworks</i> da placa perfurada e com um furo interno para alojar a moeda perfurada.....	73

Figura 101 - Modulação em <i>Solidworks</i> da moeda perfurada.....	73
Figura 102 - Modulação em <i>Solidworks</i> do posicionador responsável pela centralização da moeda.....	73
Figura 103 - Modulação em <i>Solidworks</i> do conjunto completo, representando a forma como é procedido a centralização da moeda.	74
Figura 104 - Ciclo referente á execução de moedas pixelizadas, recorrendo a uma pinça	75
Figura 105 - Imagem original utilizada para a execução de uma moeda pixelizada. ...	75
Figura 106 - Imagem modelada em <i>Coreldraw</i> 2018 de tamanho 33*33 pixéis e apenas 2 cores (preto e branco).....	76
Figura 107 - Exemplo da matriz logica extraída, recorrendo ao programa de <i>Matlab</i> , da imagem moldada em <i>software Coreldraw</i> (true = branco, false=preto).	78
Figura 108 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder a deposição de cola.	79
Figura 109 - Resultado obtido da deposição de cola nos furos.....	80
Figura 110 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder ao posicionamento dos cristais.....	81
Figura 111 - Resultado obtido do posicionamento dos 3 cristais.....	82
Figura 112 - Apresentação de um exemplo de teste do corte do fio de cobre, atreves do dispositivo projetado, sem aparência de qualquer rebarba nas suas extremidades (imagem obtida através de um microscópio ótico apresentado na figura seguinte (Figura 113)).....	83
Figura 113 - Microscópio ótico <i>Lampert</i>	83
Figura 114 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder ao posicionamento dos filamentos.....	84
Figura 115 - Resultado obtido depois de realizado o ensaio de posicionamento dos filamentos.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa dos diferentes motores eletromagnéticos[9].	24
Tabela 2 - Tabela comparativa entre atuadores piezoelétrico e atuadores eletromagnéticos[26].	27
Tabela 3 - Tabela relativa as especificações do aparelho.	33
Tabela 4 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do X.	38
Tabela 5 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do Y.	38
Tabela 6 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do Z.	38
Tabela 7 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento referência, sendo o valor do deslocamento, a subtração do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de referência (400,604 μm), relativos à amostra 1 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Referência).	42
Tabela 8 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento referência, sendo o valor do deslocamento, a subtração do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de referência (371,451 μm), relativa à amostra 2 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Referência).	43
Tabela 9 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento referência, sendo o valor do deslocamento, a subtração do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de referência (346,804 μm), relativa à amostra 3 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Referência).	43
Tabela 10 - Apresentação da média de para cada comprimento de rasgo, média total de todos os rasgos efetuados e o desvio padrão total.	43
Tabela 11 - Tabela relativa aos valores da média total e á médio desvio padrão do ensaio de toleranciamento.	43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMO

PCB - *Printed circuit board* (Placa de circuito impressa)

Motor CC/DC motor - Motor de corrente contínua/corrente direta

UHV - *Ultra high vacuum* (Ultra vácuo)

PZT - Titanato de zirconato de chumbo

Roll - Rotação Angular perpendicular ao eixo X

Pitch - Rotação Angular perpendicular ao eixo Y

Yaw - Rotação Angular perpendicular ao eixo Z

mm - Unidade de distância (milímetro)

µm - Unidade de distância (micrómetro)

bar - Unidade de pressão (definido como 101 325 Pascal)

N - Unidade de força (Newton)

° - Unidade de angulação (Graus)

V - Unidade de diferença de potencial (Volt)

A - Unidade de Amperagem (Ampere)

H - Unidade de indutância (Henry)

Ω - Unidade de resistência (Ohm)

Rpm - Rotação por minuto

PLA - Polímero poliácido láctico

3D - 3 dimensões

€ - Símbolo monetário (Euro)

Etc - "e outras coisas mais"

Código G (português)/*Gcode* (inglês) - Linguagem de programação para sistemas de comando numérico computadorizado

1. ENQUADRAMENTO

1.1 Motivação

Nos dias de hoje, a joalheria e ourivesaria são áreas da moda de grande destaque, devido à beleza do design e dos materiais preciosos utilizados nas peças produzidas nessas áreas. Desta forma, o aumento da complexidade do design das peças e as dimensões dos elementos preciosos, utilizados na decoração dessas peças, têm sido cada vez mais de menores dimensões (chegando à ordem de micron), comparando com as peças produzidas no passado. Esta nova realidade, exige que os fabricantes de joias recorram cada vez mais a máquinas de posicionamento, que permitam a alocação dos materiais preciosos nos locais “alvo”, de forma mais rápida, cómoda e precisa para o fabricante, quando comparadas com o processo manual utilizado habitualmente na execução deste tipo de peças. Além disso, hoje em dia, não existem nenhum equipamento com a finalidade específica de produção de moeda pixelizadas, havendo apenas a possibilidade de configuração de máquinas de posicionamento já existentes.

Neste contexto, pensou-se em criar acessórios no sentido de aumentar e diversificar as aplicações de posicionamento de uma máquina de produção de placas de circuito impresso (PCB), utilizando as suas capacidades básicas de posicionamento, para a produção de dois tipos de artigos de ourivesaria.

1.2 Objetivos

Com o intuito de ampliar o espectro de aplicações da máquina de prototipagem de placas de circuito impresso, *Cirquid machine*, alguns dos tópicos seguintes correspondem aos objetivos a concretizar. Sendo eles:

1. Análise das funções e limitações funcionais do equipamento para as funções básicas;
2. Desenvolvimento de uma ferramenta para a colocação de cristais num cabo de talher;
3. Desenvolvimento de uma ferramenta para a produção de uma moeda pixelizada;
4. Validação experimental das ferramentas desenvolvidas;

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

Capítulo 1 - Enquadramento

No primeiro capítulo da dissertação fez-se o enquadramento do trabalho e do problema que se pretende tratar. Aqui encontra-se a motivação que deu origem ao presente trabalho e os objetivos que se pretendem alcançar. Além disso, neste capítulo é ainda apresentada a estrutura da presente dissertação.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

No segundo capítulo, realizou-se a revisão bibliográfica, onde foram abordados os diferentes tipos de sistemas de coordenadas que originaram o desenvolvimento de posicionadores para as diferentes áreas, de modo a conhecer os diferentes posicionadores utilizados nos dias de hoje. Neste ponto, trata-se ainda de descrever outras estruturas utilizadas no posicionamento de objetos. E por fim, retrata-se os três principais sistemas de fixação para a movimentação de objetos.

Capítulo 3 - Metodologia Experimental

Ao longo do terceiro capítulo, aborda-se todo o processo de desenvolvimento até à ideia final, incluindo as criações não finalizadas, isto é, incorpora-se aqui o funcionamento de todos os dispositivos criados, os seus *softwares* de controlo e as dificuldades encontradas ao longo do projeto. Mais, aqui, são ainda realizados três testes relativamente ao toleranciamento, repetibilidade e resolução mecânica mínima de forma a medir o rigor da máquina utilizada.

Capítulo 4 - Validação e Resultados

Já no capítulo quatro, apresenta-se e descreve-se as experiências testadas para a validação dos acessórios criados, também se realiza uma análise aos resultados extraídos dessa mesma validação, de modo a compreender as razões pelas quais determinado processo não correu da forma pretendida.

Capítulo 5 - Trabalhos Futuros

No penúltimo capítulo projeta-se dois trabalhos possíveis para futuro, mediante a experiência adquirida ao longo deste projeto, com o intuito de melhorar a eficácia e o espetro de utilizações da máquina.

Capítulo 6 - Conclusões

Por fim, no último capítulo desta dissertação, apresenta-se os aspetos e conclusões relevantes obtidas durante todo o estudo desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de desenvolver acessórios que possibilitem o posicionamento de objetos no seu local “alvo”, procurou-se reunir informação suficiente para entender um pouco mais sobre matérias relativas ao posicionamento de objetos. Com essa informação pretende-se entender quais e onde são usados os sistemas desenvolvidos nos dias de hoje, procurando também entender um pouco mais sobre a gama de possibilidades de acessórios que permitam a fixação de objetos, para que os mesmos possam ser deslocados de uma posição para outra de forma intacta. De forma a facilitar a compreensão, dividiu-se o estudo em três partes.

2.1 Classificação dos diferentes sistemas de posicionamento

Os sistemas de posicionamento são uma das principais chaves na automatização de uma indústria, uma vez que exigem cada vez menos mão de obra e utiliza cada vez mais as máquinas como substituto (Indústria 3.0).

Devido à relevância destes sistemas de posicionamento, é importante compreender os fatores que os permitem identificar. O principal fator que os permite reconhecer, é o tipo de movimento que o equipamento utiliza para alcançar a posição desejada. Alguns sistemas exigem apenas que o objeto seja deslocado num eixo, enquanto noutros casos o mesmo objeto é movimentado em diferentes eixos simultaneamente. Os diferentes tipos de sistema de coordenadas determinam a posição de um ponto mediante a distância, ângulo ou ambos. Para descrever um ponto no espaço é necessário ter três dimensões em cada um dos três eixos de coordenadas. De ressaltar, que este mesmo ponto pode ser descrito em qualquer outro sistema de coordenadas.

Atualmente, são utilizados diferentes sistemas de coordenadas, mediante as vantagens existentes em cada um deles.

2.1.1 Sistema Cartesiano:

O sistema de coordenadas mais utilizado e familiar, é o sistema de coordenadas cartesianas. Recorrentemente as pessoas reconhecem como x e y, sendo estes eixos distanciados 90 ° entre si.

Um ponto pode ser definido num plano, através da distância desse ponto á origem (0, 0), ao longo de cada eixo. Esta é uma representação bidimensional, daí os dois eixos x e y (Figura 1)[1][2] [3].

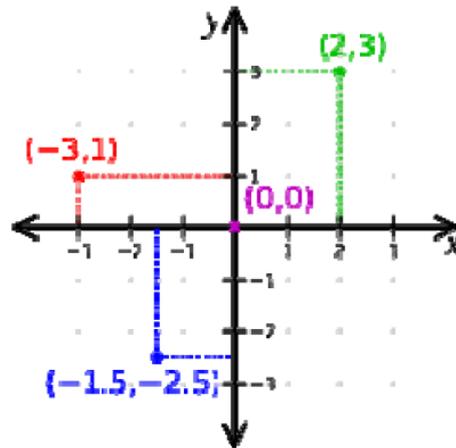


Figura 1 - Representação dos 2 eixo cartesiano XY[1].

Para encontrar um ponto no espaço, é necessário adicionar um terceiro eixo, o eixo do z. Este terceiro eixo permitirá formar um espaço tridimensional correspondendo a um conjunto de coordenadas capaz de definir qualquer ponto no espaço (Figura 2)[1][2][3].

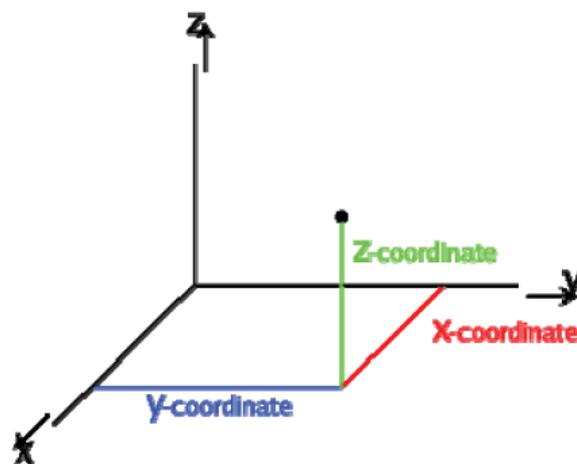


Figura 2 - Representação dos 3 eixo cartesiano XYZ[1]

Os eixos das máquinas foram estabelecidos seguindo a conhecida “regra da mão direita”. Se considerarmos que o polegar representa a direção do eixo do x positivo, o dedo indicador de forma perpendicular ao polegar representa o eixo do y positivo e que o dedo médio representa o eixo do z positivo, podemos compreender melhor esta representação tridimensional (Figura 3)[1].

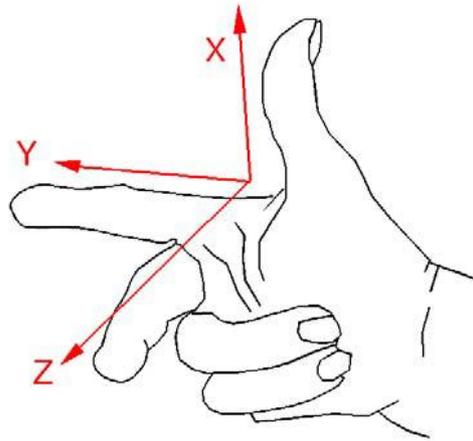


Figura 3 - Representação do sentido positivo dos 3 eixos, utilizados no sistema cartesiano[1]

Os sistemas de posicionamento cartesianos (Figura 4) são usados para trabalhos de recolha e posterior colocação na aplicação de selantes, nas operações de montagem, no manuseio de máquina-ferramenta e na soldagem a arco. É um mecanismo cujo braço tem três articulações prismáticas e cujos eixos coincidem com os coordenadores cartesianos [1][4][2][5].

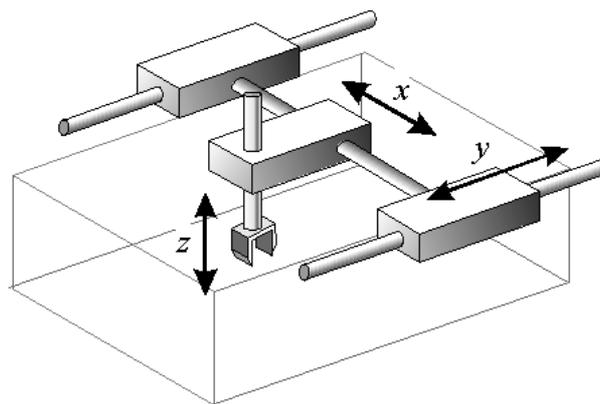


Figura 4 - Representação de um sistema de posicionamento utilizando o princípio dos eixos cartesianos[1].

Este sistema de posicionamento é utilizado no aparelho do projeto (Figura 5). Este sistema é também aplicado na colocação de adesivos em painéis de vidro, nos cortadores a laser, nas máquinas CNC, entre outros [1][4][5].



Figura 5- Aparelho utilizado neste projeto, este dispositivo recorre ao uso do sistema cartesiano (X, Y,Z) para proceder ao posicionamento.

A máquina representada a seguir (Figura 6) recorre a um sistema de posicionamento cartesiano, transfere os circuitos integrados de uma palete e, de seguida, posiciona a peça num local específico.

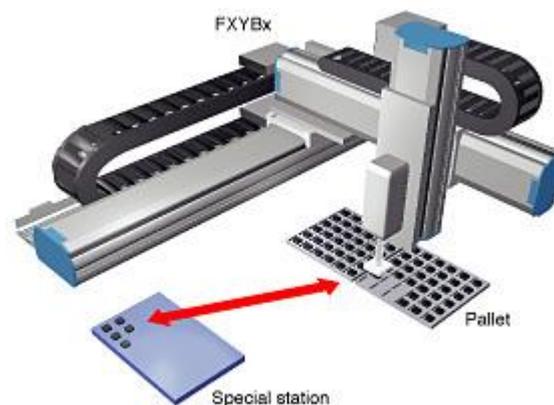


Figura 6 - Aparelho responsável pela transferência de amostras de um tabuleiro para outro[1].

Em muitas empresas de produção existe a necessidade de inspecionar os seus produtos para garantir que eles tenham a qualidade necessária. As câmaras montadas no sistema de posicionamento cartesiano (Figura 7) inspecionam os componentes que vão passando na passadeira rolante, com o intuito de avaliar se a peça cumpre os requisitos mínimos. Graças à forma como foi construído, o sistema pode mover-se à mesma velocidade da passadeira rolante e, assim, consegue analisar a mesma peça [1][5].

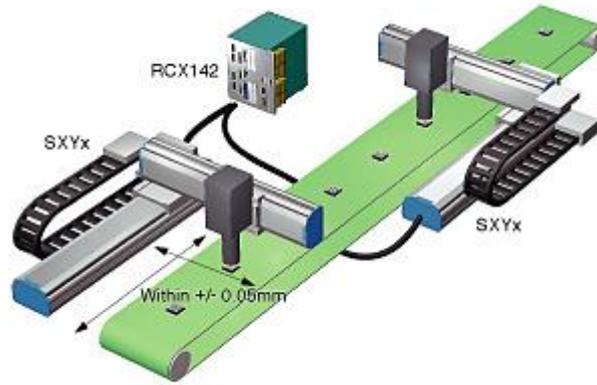


Figura 7 - Aparelho verifica o produto e descarta as peças que não estão em conformidade[1].

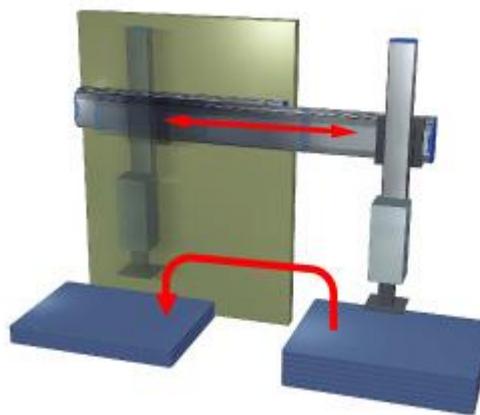


Figura 8 - Aparelho para empilhamento de placas[1].

Devido ao seu movimento linear, o sistema de posicionamento cartesiano é ideal para a transferência e empilhamento de chapas metálicas ou de madeira (Figura 8). Este mecanismo permite alimentar máquinas através da transferência de placas para processamento sendo possível, em seguida, retirá-las como produtos acabados [1].

2.1.2 Sistema de coordenadas cilíndrico:

Um ponto no espaço, "A", numa estrutura de coordenadas cilíndrica, pode ser definido, por um cilindro com raio "r" e altura "Z". A terceira informação necessária para definir o ponto vem de um ângulo θ no plano XY (Figura 9)[1][3].

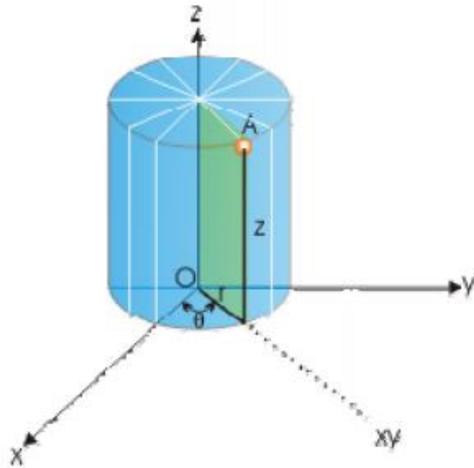


Figura 9 - Representação esquemática de um sistema de coordenadas cilíndricas[1].

Os sistemas de posicionamento cilíndricos (Figura 10) são usados em operações de montagem, no manuseamento de acessórios-ferramenta, solda a ponto e no manuseamento de máquinas de fundição sob pressão. Este sistema é também muito usado em testes médicos.

Como podemos verificar, no exemplo seguinte, consiste num sistema formado por duas juntas prismáticas e uma junta rotativa. Este sistema cilíndrico é capaz de girar ao longo dos seus eixos principais, produzindo a forma de um cilindro [1][6][3].

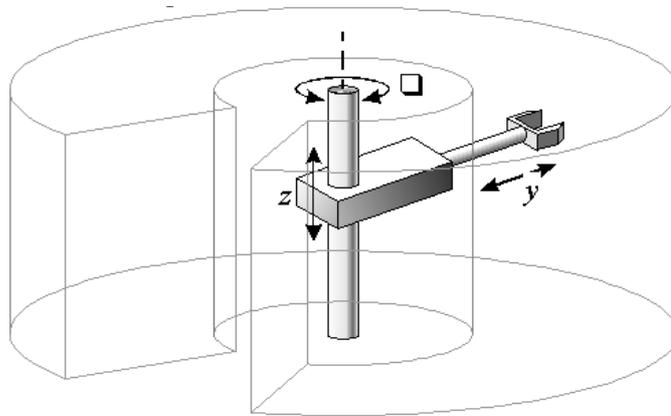


Figura 10 - Representação de uma máquina de posicionamento que baseada nos princípios das coordenadas cilíndricas[1].

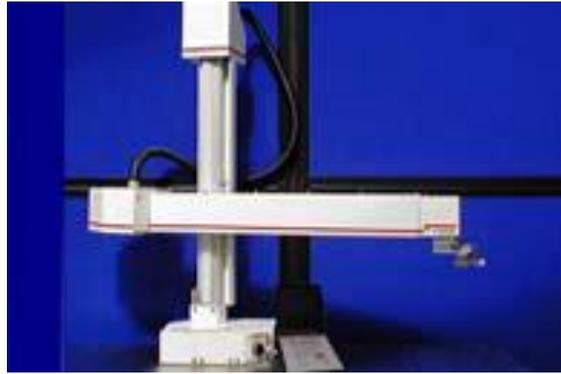


Figura 11 - Aparelho de posicionamento para aplicações medicas[1].

Este sistema de posicionamento (Figura 11) é utilizado em inúmeras aplicações médicas desde a triagem de DNA, o desenvolvimento de drogas e também para a toxicologia. Estes sistemas são adequados para pesquisas médicas, uma vez que centenas de amostras são testadas, ou seja, as mesmas tarefas podem ser executadas várias vezes. Com este sistema é possível eliminar erros humanos, fornecendo maior eficiência em tarefas repetidas [1][6].

2.1.3 Sistema de coordenadas esféricas ou polares

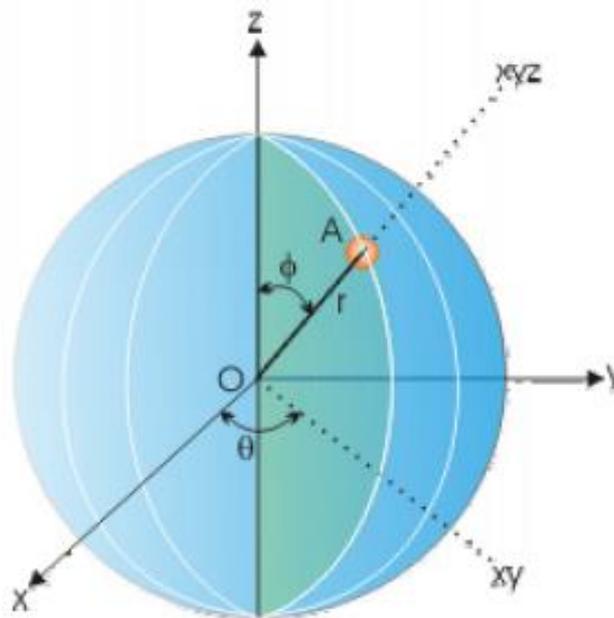


Figura 12 - Representação esquemática de um sistema de coordenadas esféricas[1].

Um ponto tridimensional "A", num sistema de coordenadas esféricas pode ser encontrado numa esfera de raio "r". Esse ponto encontra-se numa seção transversal específica da esfera, como numa estrutura cilíndrica, essa secção transversal faz um ângulo "θ" do plano ZX.

Uma vez definido o plano, a última informação pode ser encontrada unindo o ponto "A" à origem, que é o ângulo (ϕ) que esse segmento cria com o eixo do z define o ponto.

Como exemplo, para a localização de uma posição na superfície da Terra (Figura 14), utilizando o sistema de coordenadas esféricas, tem-se o raio da superfície da Terra representada pela letra "r" e utilizam-se as linhas de longitude (θ) e as de latitude (ϕ) para definir a posição específica na superfície da Terra. Assim, como tínhamos visto, necessitamos de três informações para permitir conhecer uma posição na superfície da terra [1][3].

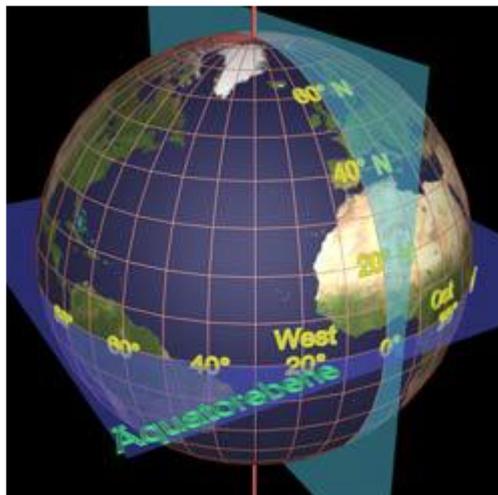


Figura 13 - Representação esquemática das coordenadas esféricas na superfície do globo terrestre[1].

Os sistemas de posicionamento esféricos ou polares combinam movimentos rotacionais com um único movimento linear do braço (Figura 14). São geralmente usados em aplicações como a soldagem, especialmente na soldagem por pontos, mas também são utilizadas na soldagem por gás e arco. Os sistemas polares são extremamente adequados para a cessar a furos horizontais e inclinados[1], ou seja, a principal aplicação para esses tipos de sistemas de posicionamento é a soldagem, atingindo uma elevada dimensão, que pode superar os 1000 kg. Tipicamente, estes sistemas são muito utilizados na indústria automóvel (Fig. 15)[1].

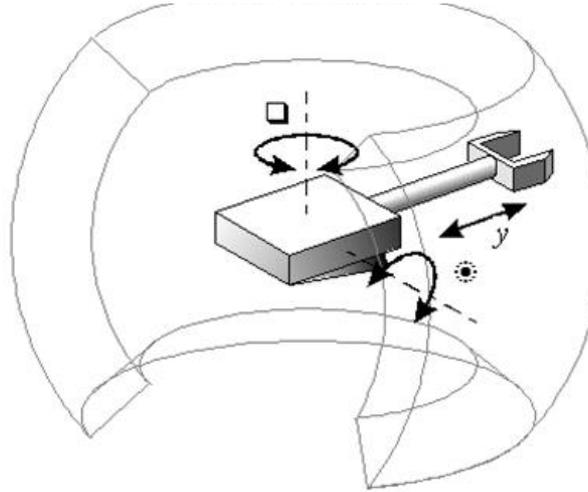


Figura 14 - Representação de uma máquina de posicionamento que utiliza as coordenadas esféricas[1].



Figura 15 - Máquina de soldagem para componentes de automóveis[1].

2.1.4 Sistema de Posicionamento *Scara*

Este sistema foi desenvolvido com intuito de atender às necessidades do trabalho de montagem moderno, onde é necessária movimentação rápida com cargas leves. A colocação de componentes eletrônicos nos PCB é uma das suas principais aplicações. O sistema de posicionamento *Scara* é uma combinação de dois eixos rotacionais horizontais e um linear que se movem verticalmente (Figura 16),[1,3,7].

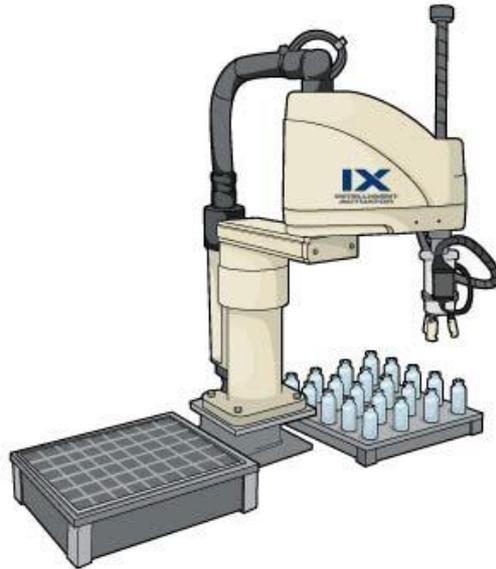


Figura 16 - Máquina de posicionamento *Scara*[1].



Figura 17 - Máquina de posicionamento *Scara* de teste de produtos finalizados[1].

O sistema de posicionamento *Scara* (Figura 17) é capaz de testar um produto recém-fabricado e permite garantir que o produto está operacional, antes de o embalar. A câmera observa a tela e verifica se a operação executada pelo robô está a atingir o resultado desejado. O design do sistema *Scara* pode remover rapidamente componentes de uma linha de montagem e empilhá-los com precisão [1][7].



Figura 18 - Máquina de posicionamento *Scara* para montagem[1].

O sistema de posicionamento *Scara* é também excelente para posicionamentos precisos, o que o torna muito adequado para a montagem de componentes. A figura acima (Figura 18) mostra o mecanismo que consiste em apanhar numa peça e, de seguida montá-la noutro componente. Este sistema está preparado para mudar de ferramenta, tendo em conta as suas necessidades [1][7].

No exemplo seguinte apresentado (Figura 20), vê-se o sistema de posicionamento *Scara* a transferir uma componente da etapa de montagem para a etapa de teste que, depois de ser avaliado e no caso de ter resposta favorável, o braço deste mecanismo colocá-lo-á no tapete rolante para ser transferido para a próxima etapa [1].

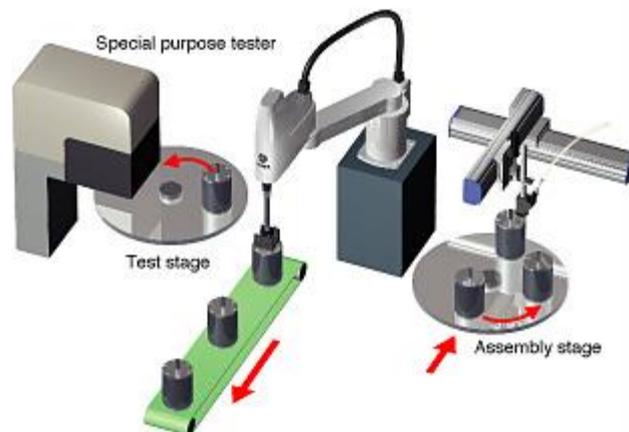


Figura 19 - Máquina de posicionamento *Scara* para realização de testes a produtos[1].

2.1.5 Braço robótico (6 graus de liberdade)

Atualmente, um dos mecanismos de posicionamento mais utilizados na produção industrial é o braço robótico. Este mecanismo baseia-se na fisionomia do braço humano, onde os seus motores representam os músculos, o comando de controlo representa o cérebro humano e a visão robótica

representa o olho humano. Este mecanismo tem como base os três pontos de rotação do braço humano: ombro, cotovelo e pulso.

O braço robótico permite uma grande variedade de utilizações como por exemplo, a soldagem, a embalagem, a pintura, o posicionamento e a montagem de equipamentos. Esta variedade de utilizações é possível, pois na extremidade do braço robótico é possível colocar qualquer acessório e aplicar qualquer função desejada.

Para o funcionamento deste mecanismo é necessário que cada motor seja responsável por cada grau de liberdade, só assim será possível um manuseamento competente [1,8,3].

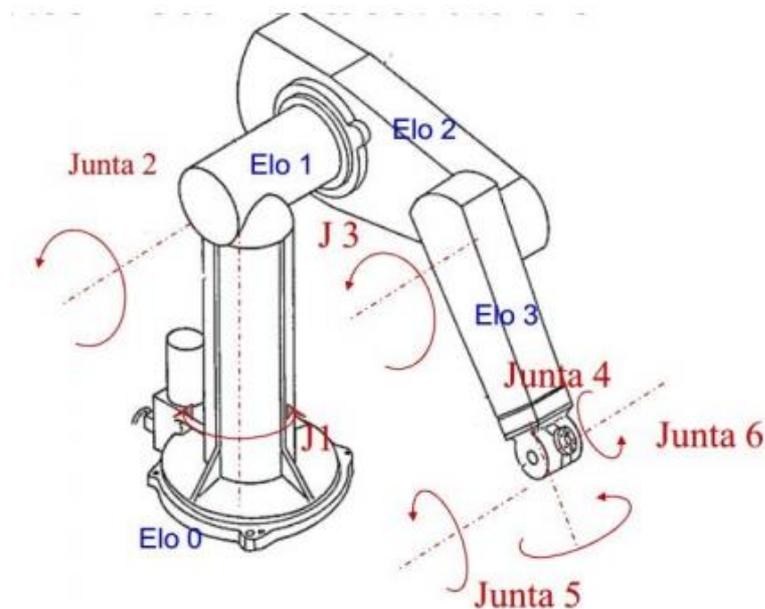


Figura 20 - Representação esquemática dos graus de liberdade de um braço robótico com 6 graus de liberdade[9].

Nos dias que correm, existem mecanismos ainda mais complexos. Um exemplo disso é um mecanismo produzido pela empresa *Kuka* que apresenta um robô com 7 graus de liberdade, como podemos ver na imagem seguinte (Figura 21).

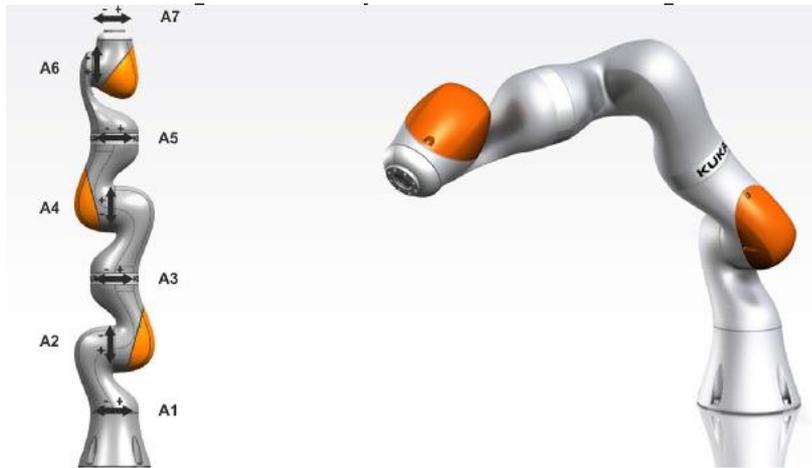


Figura 21 - Braço robótico com 7 graus de liberdade(produzido pela empresa: “KUKA”)[10].

2.1.6 Estrutura Hexápode (6 graus de liberdade)

Com o objetivo de simular condições de voo, num treino para pilotos de helicóptero, foi desenvolvido um mecanismo com os graus de liberdade capazes de simular as condições de voo. Este mecanismo é capaz de controlar todos os seis graus de liberdade simultaneamente (Figura 23), [11].

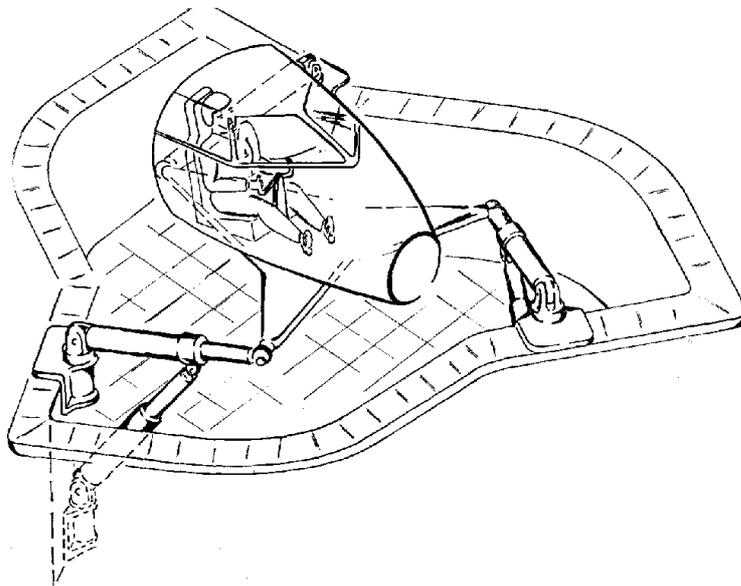


Figura 22 - Estrutura de teste para simulação das condições de voo recorrendo a plataforma de *Stewart*[11].

Esta plataforma hexápode ou plataforma de *Stewart*, consiste como o próprio nome diz, numa estrutura com seis graus de liberdade onde é possível mover nas três direções lineares e três direções angulares (*XYZ, Pitch, Roll, Yaw*), isoladamente ou em qualquer combinação entre as mesmas. A base de teste consiste num plano triangular onde cada um dos vértices do triângulo é conectado a uma haste. As três hastes são ligadas à base, onde cada haste, na ligação com a plataforma triangular, é

conectada através de uma rótula, o que permite a rotação em qualquer direção. Cada haste permite também aumentar o seu comprimento.

Cada haste na ligação com a base permite o controlo de rotação numa direção e livre rotação noutra direção (Figura 23), [11,3].

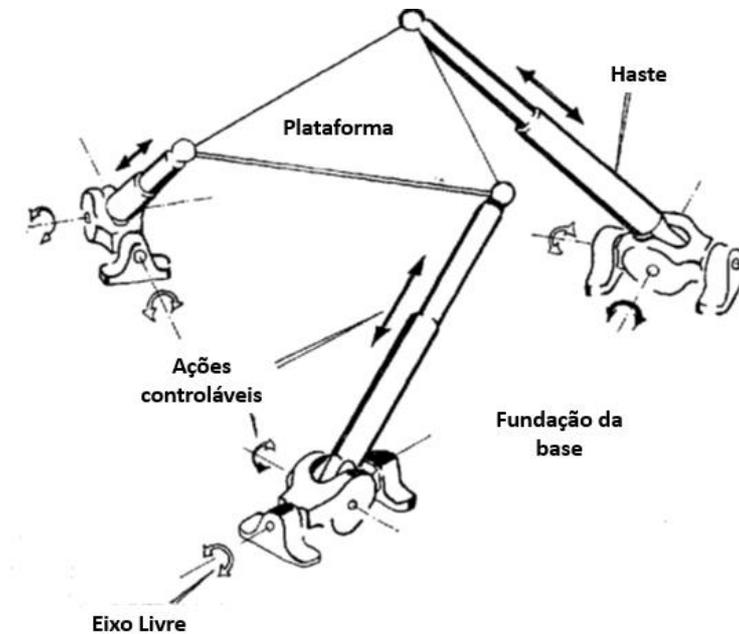


Figura 23 - Representação esquemática dos graus de liberdade de uma plataforma de *Stewart* (Imagem traduzida)[11].

O movimento da plataforma fica restrito quando qualquer ponto de suporte de uma plataforma coincide com o eixo de liberdade de qualquer sistema de uma haste. A instabilidade ocorre se o centroide do suporte da plataforma e as duas extremidades de qualquer haste ficarem alinhadas. Isso ocorrerá no caso da figura 24, quando uma amplitude de rotação específica for alcançada, e no caso da figura 25, quando uma distância angular específica for atingida. Obviamente, existe o limite de amplitude normal definido pela extensão e contração máximas de cada tomada [11].

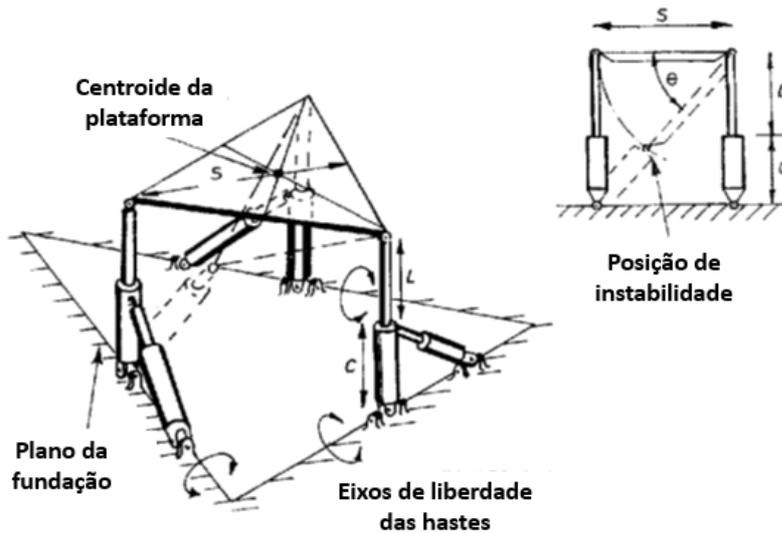


Figura 24 - Representação esquemática das limitações da estrutura hexápode relativamente ao centro da plataforma Stewart (Imagem traduzida)[11].

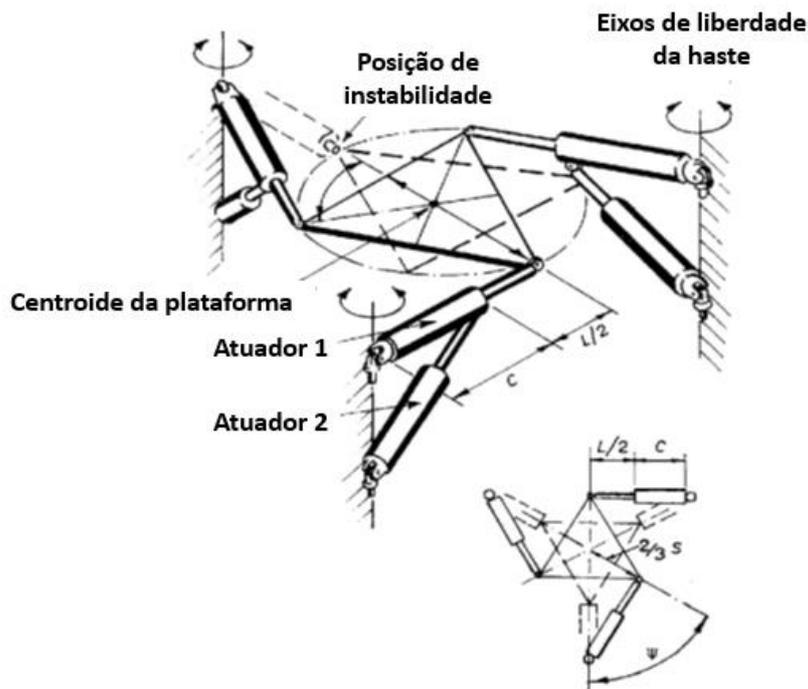


Figura 25 - Representação esquemática das limitações da estrutura hexápode relativamente a rotação da mesma Stewart (Imagem traduzida)[11].

Atualmente, podemos ver estruturas de posicionamento baseadas na plataforma de Stewart, sendo fabricados posicionadores hexápode com alta precisão, recorrendo a motores de acionamento como piezo hexápode, hexápode eletromecânicos e também hexápodes a vácuo (para níveis de UHV (ultra vácuo) de 10 a 9 Torr.). Neste momento, as empresas mais inovadoras na fabricação de posicionadores, desenvolvem plataformas de diferentes tamanhos, com alta precisão e com diferentes capacidades de carga (podendo chegar a cargas de 2000kg) (Figura 26), [12,13].



Figura 26 - Estrutura de alta precisão , desenvolvida nos dias de hoje, recorrendo ao princípios da plataforma de Stewart[14].

2.2 Atuadores para sistemas de posicionamento

2.2.1 Atuadores Magnéticos

Os motores são a maneira mais comum de controlar os movimentos de sistemas de posicionamento. Eles podem ser conectados a rodas dentadas, a fusos roscados, entre outros. Devido a essa diversidade, este tipo de atuadores são uma maneira eficiente de adicionar mobilidade. Existem diferentes tipos de motores que podem ser usados, tais como o “*DC motor*” (motor de corrente contínua ou motor de corrente direta), o “*stepper motor*” (motor de passo) e os servomotores[1].

Motor de corrente direta

Estes são os motores mais comuns disponíveis, conectados a uma fonte de alimentação por dois fios (Figura 27). A direção de um motor corrente contínua pode ser alterada revertendo a polaridade da tensão de alimentação do motor. Para além disso, estes consomem uma grande quantidade de corrente (4.5 A) e, como resultado, não podem ser conectados diretamente a um sistema de controle. Mais, os motores CC não permitem rotação precisa e controlada [15,16].



Figura 27 - Exemplo de um motor DC[17]

Uma das principais vantagens destes motores é o torque inicial (60% do torque máximo), sendo comparativamente mais alto do que outros motores. Estes motores também podem ser usados para alimentar em corrente alternada ou corrente contínua e, por isso, também são conhecidos como motores universais. Para além disso, não têm harmónicos.

No entanto, estes motores não permitem controlar com precisão a velocidade do motor e necessitam de ter uma carga antes de iniciar os motores da série DC, o que faz com que os motores da série DC não sejam tão bons para uso onde a carga não se aplica ao estágio inicial.

Devido às velocidades altas de rotação e ao torque inicial elevado, o motor DC é frequentemente utilizado em algumas aplicações, tanto para uso industrial como para uso doméstico. Comboios eléctricos, guinchos eléctricos, máquinas, ferramentas e elevadores são apenas alguns exemplos onde podemos encontrar o uso de um motor DC [15,16].

Motor de Passo

Os motores de passo funcionam de maneira semelhante aos motores de corrente contínua, todavia, enquanto o motor de corrente contínua tem apenas um eletroímã, o motor de passo tem muitos (Figura 28). Este último é controlado pela ativação e desativação sequencial dessas bobinas, ou seja, cada vez que uma nova bobina é energizada, o motor gira mais alguns graus. O número de graus que um motor gira com cada pulso é chamado de ângulo do passo. A repetição da sequência faz com que ela se mova mais alguns graus, isso continua até que uma rotação completa seja alcançada [9;15;16;18].

Motores de passo convertem pulsos eléctricos em rotações mecânicas, oferecendo um bom torque de retenção (podendo chegar a 1.56 N.m), uma velocidade regulada e movimentos precisos. As peças de desgaste de um motor de passo são limitadas, ao contrário do motor CC, pois não contêm escovas que podem desgastar e causar mau funcionamento [9] [15]–[17].

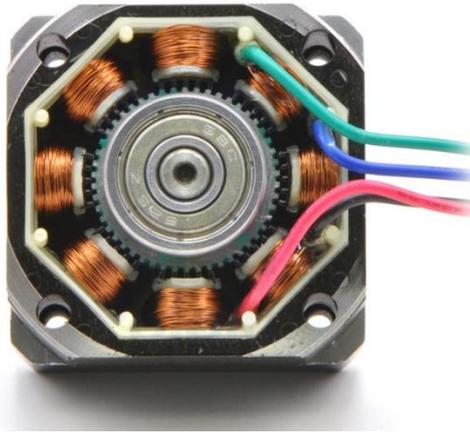


Figura 28 - Parte interna de um motor de passo[19].

No motor a passo constata-se que o ângulo de rotação do motor é proporcional ao pulso de entrada, que o motor tem torque total em repouso (no caso das bobines estarem energizadas), que o posicionamento é preciso e apresenta capacidade de repetição de movimento, que exibe uma excelente resposta a iniciar, parar, inverter o movimento e constata-se também que é um motor muito confiável, já que não há escovas de contato no motor logo, a vida útil do motor é dependente da vida útil do rolamento. Para além de todas estas características favoráveis a resposta dos motores aos pulsos de entrada digital fornece um controlo de malha aberta, tornando o motor mais simples e mais barato de controlar e apresenta uma vasta gama de velocidades de rotação pode ser realizada, já que a velocidade é proporcional à frequência do pulso de entrada.

Alguns inconvenientes deste motor prendem-se na dificuldade de o operar em velocidades extremamente altas (4000 rpm) e nas ressonâncias que podem ocorrer se não forem devidamente controladas. Os motores de passo são encontrados numa infinidade de máquinas e equipamentos comuns. Recorrem-se a eles para aplicações que exijam posicionamento preciso, torque a baixa velocidade e controle de velocidade. As aplicações incluem fresadoras CNC, máquinas de imagens médicas, impressoras, retrovisores laterais do carro, câmaras de segurança, robótica e, mais recentemente, impressoras 3D [9] [15]–[17].

Servomotor

Dos três motores, o servomotor é o que oferece o maior e mais suave controle (Figura 29). Pode ser instruído a girar para um ponto específico, tornando-o ideal para aplicações que exigem movimento preciso. A rotação de um servomotor é limitada, a maioria gira de 90 ° a 180°, embora alguns possam completar uma rotação completa. Não podem girar continuamente devido à sua estrutura e, conseqüentemente, não são adequados para as rodas motrizes, porém o seu torque e controle torna-los adequados para acionar braços robóticos [16]–[18].



Figura 29 - Servomotor[20].

Os servomotores são compostos por várias componentes que estão alojadas ordenadamente em unidades independentes. Estes contêm um controlador de motor, caixa de velocidades e *driver* (placa de controlo), permitindo assim, que sejam controlados diretamente por um microcontrolador (Figura 30). Os servomotores têm três fios conectados a eles e da mesma forma como no motor de passo, dois dos fios são para a fonte de alimentação - 0v e 5v e o terceiro é alimentado diretamente no pino de saída [15,16,21].

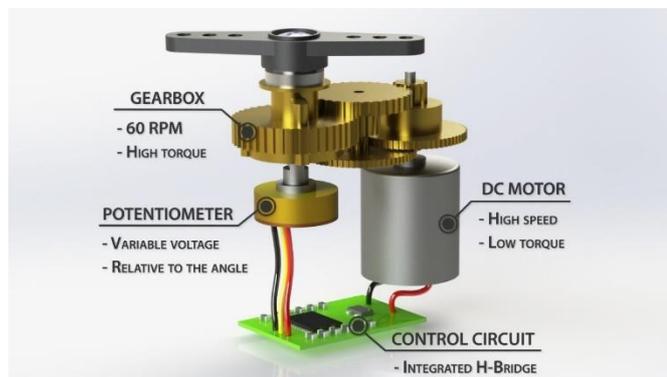


Figura 30 - Representação esquemática dos componentes de um servomotor[22]

Os servomotores apresentam um conjunto enorme de vantagens tais como, a alta eficiência que se pode aproximar de 90%, com cargas leves, o *feedback* obtido que permite controlar a velocidade e o torque, a existência do codificador que permite determinar e incrementar a precisão e a resolução em malha fechada. Este tipo de motores permite também realizar operações livre de ressonância e vibração e permitem atingir altas velocidades com elevados valores de torque (2000 rpm/ 22 N.m).

Contudo, estes motores não estão livres de apresentarem algumas desvantagens, entre elas o facto de não permitirem saber quando algum componente está danificado, o controlador requer codificador e suporte eletrónico, o motor poder ser danificado por sobrecarga contínua, pelo facto

do pico do torque ser limitado a um ciclo de trabalho de 1% e pelo seu custo elevado, quando comparado ao motor de passo, por exemplo.

Tabela 1 - Tabela comparativa dos diferentes motores eletromagnéticos[9].

	Motor de corrente direta	Motor de passo	Servomotor
Velocidade¹	Alta	Baixa	Média
Torque²	Zero/alto	Alto/médio	Baixo/alto
Facilidade de controle³	Fácil	Média	Complexo
Precisão⁴	Nenhuma	Alta	Muito alta
Durabilidade⁵	Média	Ótima	Média
Manutenção⁶	Sim	Não	Sim

Os servomotores são pequenos e eficientes, por isso são empregues em aplicações que exigem maior eficiência e potência, como por exemplo robôs, aviões, máquina CNC (Comando Numérico Computorizado), entre outras aplicações industriais e comerciais onde sejam necessário um controle preciso da posição [16]–[18].

Atuadores Piezoelétricos

¹ Motores de passo perdem passos em altas velocidades, já servomotores conseguem altas rotações por usarem a mesma forma de se mover que os motores de corrente contínua.

² Motores de corrente contínua e servomotores não conseguem manter-se numa posição fixa quando estão ligados, apenas o motor de passo tem esta característica. Entretanto é possível usar servomotores para tal fim, para isso é necessário fazer com que este motor “corrija” a sua posição, na tentativa de se manter parado, o que é pouco prático, uma vez que o seu torque a baixas velocidades é pequeno.

³ Motores de corrente contínua apenas precisam ser ligados para começar a funcionar, os motores de passo requerem pulsos numa determinada ordem para se movimentarem, o que requer um “driver” para o mesmo. Contudo, os servomotores requerem um hardware mais complexo que analise os dados como posicionamento e a velocidade, e que enviem as instruções de forma que o motor “ se mova” para a posição requisitada.

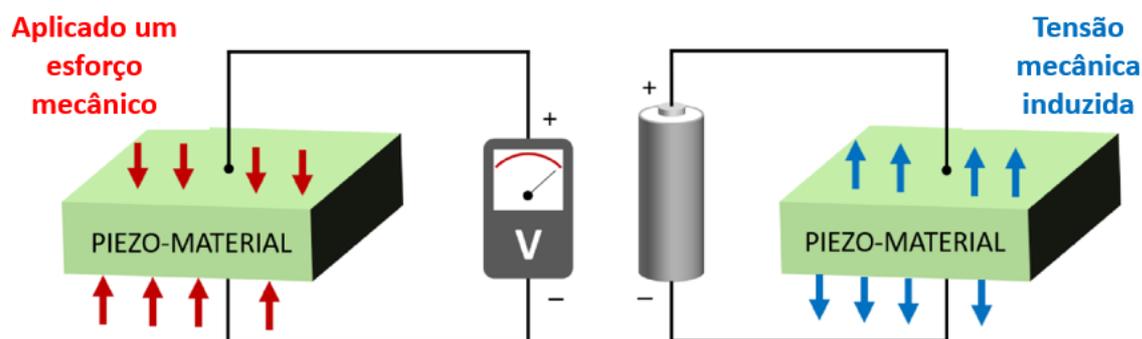
⁴ Motores de corrente contínua não possuem nenhum controle de posicionamento os motores de passo podem ser controlados de forma a fazer movimentos discretos (passos) e os servomotores podem fazer movimentos mais suaves que motores de passo (possuem maior resolução), sendo possível fazer um controle de posicionamento com o mesmo.

⁵ Motores de passo são extremamente duráveis uma vez que não usa escovas, ao contrário dos motores de corrente contínua ou os servomotores (motor de corrente contínua com controle de posicionamento).

⁶ O motor de passo é o único que não precisa de manutenção pois os rolamentos são os únicos componentes que sofrem desgaste.

Jacques and Pierre Currie, em 1880 descobriram que ao pressionar determinados cristais, como o *quartz*, obtinha-se dessa ação mecânica uma descarga elétrica. A este fenômeno deram o nome de "*piezoelectric effect*", divido a palavra "*piezo*" deriva do grego da palavra pressão. O efeito inverso denomina-se de "*inverse piezoelectric effect*", onde ocorre uma deformação no material piezoelétrico quando lhe é aplicada uma diferença de potencial (Figura 31) [23].

Figura 31 - Representação esquemática propriedades de um material piezoelétrico quando lhe é aplicada uma diferença de potencial e também quando lhe é aplicada uma força mecânica[24].



A pressão gerada na superfície de materiais piezoelétricos é chamada de efeito direto de piezoelétrico, podendo também ser chamado de sensor de efeito. Este converte a energia mecânica em energia elétrica, já o sistema oposto, também denominado por efeito inverso piezoelétrico ou efeito atuador, promove o alongamento do material através de uma tensão elétrica aplicada no material, ou seja, este sistema converte a energia elétrica em energia mecânica [23].

O efeito piezoelétrico pode ser encontrado em materiais mono cristalinos, mas também em matérias policristalinos ferromagnéticos cerâmicos. *Quartz*, *tourmaline* e também o sal *Rochelle* são matérias naturais monocristalinos, onde se pode verificar o efeito piezoelétrico, mas o seu efeito é muito pequeno quando comparado com materiais policristalinos ferromagnético cerâmicos, como *barium titante*($BaTiO_3$) e também titanato de zirconato de chumbo (PZT) . O efeito piezoelétrico neste materiais é muito superior em descarga elétrica e nos deslocamentos do material [23].

Os atuadores piezoelétricos produzem movimentos de flexão baseado na deformação elástica do material. O atrito e a aderência são totalmente eliminados e as flexões ocorridas durante a descarga elétrica, exibem alta rigidez com capacidade de carga e resistência a choques e vibrações. Os atuadores são livres de manutenção e não estão sujeitos a desgaste. Eles são compatíveis com vácuo, operam numa ampla faixa de temperatura e não requerem lubrificantes nem ar comprimido durante a sua operação [23;25].

Atualmente, são produzidos nano posicionadores, que fornecem orientação do sentido da flexão, sem atrito, com movimentos mais suaves e significativamente mais lineares, em comparação com os sistemas de guia convencionais (rolamentos, etc). Os nano posicionadores de flexão acionados por piezo atuadores, podem facilmente atingir repetibilidades e movimentos incrementais mínimos no domínio do subnanômetro [23,25].



Figura 32 - Estrutura de posicionamento com 6 graus de liberdade acionada por materiais com propriedades piezoelétricas[23]

Em seguida encontra-se uma tabela comparativa entre atuadores eletromagnéticos e atuadores piezoelétricos:

Tipo de atuador	Princípio	Exemplo	Vantagens	Desvantagens
Eletromagnético	Efeito de força no corpo do campo magnético.	Atuadores de ressonância magnética para intervenções robóticas.	Alto alcance de deslocamento (> 1 mm); Nenhuma fonte de energia adicional necessária; Controlável fora do espaço da ressonância magnética.	O circuito requer um campo ajustado para a operação do circuito; Aumentar a potência com material magnético aumenta o risco para operador; Não é totalmente compatível com Ressonância Magnética.
Piezoelétrico	Alterações da espessura do cristal piezoelétrico devido a descarga elétrica.	Piezo-motor.	Conceito comprovado; Disparo rápido e repetido (750Hz).	Alta tensão é necessária; Força baixa igual ao volume de construção; Não é totalmente compatível com Ressonância Magnética.
		Motor ultrassônico.	Bastante preciso (nanométrico); Pequeno (podem chegar a 46mm de comprimento).	Pode interferir na ressonância magnética; Alta tensão (até 100 V).

Tabela 2 - Tabela comparativa entre atuadores piezoelétrico e atuadores eletromagnéticos[26].

2.3 Sistemas de fixação de objetos

Em qualquer sistema de posicionamento de objetos é necessário o uso de um mecanismo de fixação que permita deslocamento dos objetos, desde a posição de partida até ao posicionamento “alvo”. Deste modo, será descrito em seguida os três mecanismos principais utilizados para fixar objetos com o intuito de modificar a sua posição.

2.3.1 Garra Mecânica

A pinça mecânica mais comum é a de duas hastes (Figura 33). Existem vários formatos para as hastes de uma pinça para que seja possível executar tarefas mais complexas.

O mecanismo de uma garra com várias hastes (Figura 34), baseia-se no movimento de contração contra o objeto, com força mecânica suficiente para segurá-lo firmemente em proporção

as forças de gravidade e à inércia do movimento. No entanto, a força não deve ser demasiado elevada para não causar danos ao componente.

As garras podem ser alimentadas por servomotores, energia pneumática ou hidráulica. Este mecanismo de fixação de objetos, nem sempre é adequado para o manuseio de alguns componentes, devido ao seu tamanho ou à sua fragilidade. Contudo, as suas funções são utilizadas em variados campos de aplicações, devido à sua versatilidade na força exercida e no tamanho que a peça transportada pode ter [1,27,28,29,3].



Figura 33 - Exemplo de uma garra mecânica de duas hastes[30].



Figura 34 - Exemplo de uma garra autocentrante[31].

2.3.2 Garra Pneumática

As extensões de vácuo são geralmente usadas para manipular todos os componentes durante as operações de posicionamento. Existem vários tamanhos de extensões de vácuo de forma a ter em conta os diferentes tamanhos dos componentes (Figura 35). Para o manuseio de componentes pequenos, geralmente é fornecida pressão positiva além do vácuo, no momento da colocação, para

que o componente seja completamente liberado da extensão (Figura 36). Este tipo de garra não permite o manuseio de objetos com superfícies estranhas, isto é, é mais apropriado para superfícies planas [1,29].



Figura 35 - Exemplo de uma garra pneumática de 4 ventosas[32].



Figura 36 - Exemplo de uma garra pneumática para objetos de pequenas dimensões[33].

2.3.3 Garra Magnética

Estes tipos de pinças são utilizados para manusear materiais ferrosos. Estas pinças, geralmente, são ímãs eletromagnéticos ou permanentes. O ímã eletromagnético permite a escolha da ativação/desativação mesmo durante a fixação do material ferroso (Figura 37). Já no uso de um ímã permanente, o componente não pode ser simplesmente retirado do ímã, podendo apenas ser retirado usando um pistão pneumático (Figura 38). Esta opção pode parecer inútil quando existe a opção de utilização de um eletroímã, mas essa escolha deve-se ao facto de haver um risco reduzido de faísca, uma vez que não é utilizada energia elétrica, tornando este tipo mais adequados em ambientes perigosos[1,29].



Figura 37 - Exemplo de um dispositivo de acionamento magnético[34].



Figura 38 - Exemplo de ímã permanente, sem uso de energia(Grupo FEM)[35].

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

De forma a criar os acessórios para os transportes de objetos, conforme o apresentado nos objetivos, iniciou-se este processo experimental pela testagem das capacidades básicas do aparelho e pela execução da avaliação das tolerâncias de posicionamento e toleranciamento dimensional no processo de maquinagem que é utilizada pelo aparelho. Isto, para que se possam conhecer as aptidões da máquina, para posterior proceder ao alargamento das suas aplicações, nomeadamente, a projeção de acessórios para o posicionamento de cristais num cabo de talher e o posicionamento de filamentos numa moeda pixelizada.

3.1 Ensaios para fabricação de circuito elétricos

Com o intuito de testar o aparelho para a produção de PCB, seguiu-se a metodologia representada no fluxograma da figura seguinte (Figura 39).

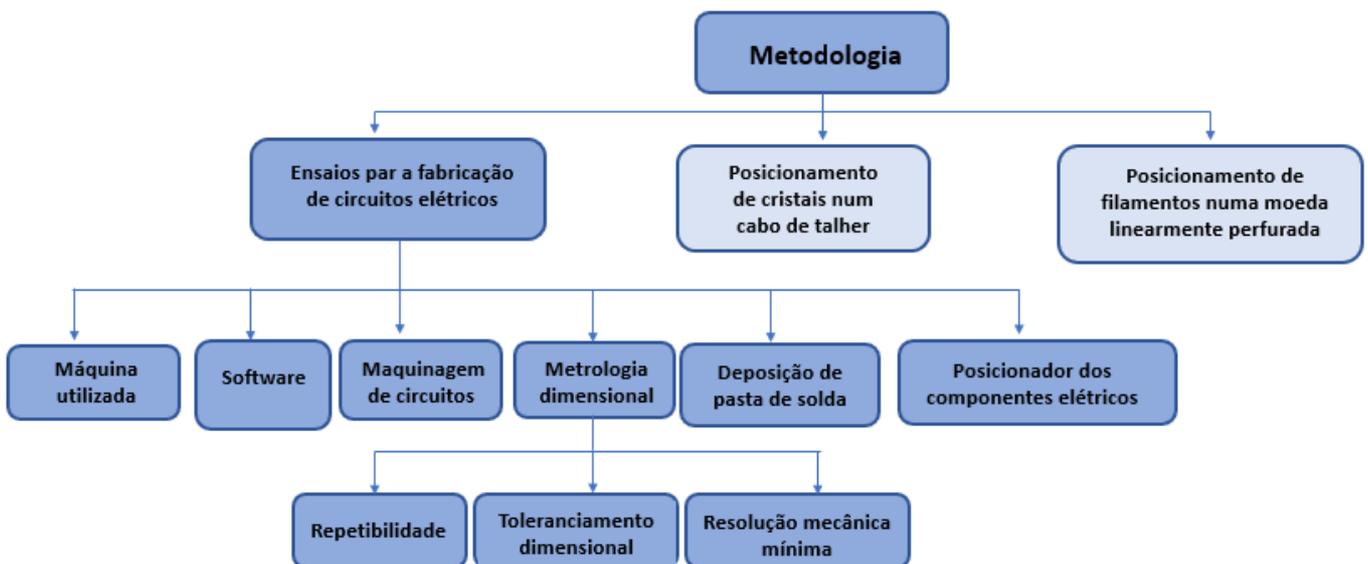


Figura 39 - Fluxograma da metodologia relativo aos ensaios para a fabricação de circuitos elétricos.

3.1.1 Máquina utilizada

O equipamento em análise, denominado por *Cirqoid* (Figura 40), tem como função principal a prototipagem de placas de PCB, desde a maquinagem de um circuito numa placa de PCB, deposição de pasta de solda até ao posicionamento dos elementos do circuito nessa mesma placa. Como foi descrito nos objetivos, este equipamento irá ser testado para executar as suas funções básicas de

maquinagem, deposição de pasta de solda e posicionamento de um *led* num pequeno circuito eletrônico, sendo posteriormente adaptado de forma a potenciar as suas capacidades para uma maior amplitude no campo das aplicações.



Figura 40 - Máquina de prototipagem de PCB, denominada *Cirquid*.

Especificações da máquina (dados apresentados pelos livros de instruções da própria máquina):

Especificações do aparelho	
Dimensão da placa de circuito	100x160 mm e 100x75mm
Resolução mecânica	0.01mm
Repetibilidade	<0.02mm
Velocidade máxima, no eixo do X	1200mm/min
Velocidade máxima, no eixo do Y	1000mm/min
Velocidade máxima, no eixo do Z	1500mm/min
Fonte de energia	19 V DC, 4.5A
Dimensões	280x470x380mm
Peso	14 kg
<i>Drill</i>	
Mandril	ERN11
Pinça da ferramenta	ERN11 3,175mm (1/8")
Velocidade	De 7000 rpm até 30 000 rpm
<i>Run-out</i>	< 0.03 mm

Tabela 3 - Tabela relativa as especificações do aparelho.

3.1.2 *Software*

Para controlar este aparelho existem duas opções. A primeira opção de controlo, praticamente só permite a criação de PCB. Para isso é necessário desenhar em *software Eagle* (versão 7.2.0 ou uma versão superior) o circuito que se pretende construir. Depois de desenhado em *software Eagle* o circuito com os seus componentes, procede-se à conversão do ficheiro criado. Este processo de conversão, permite a passagem para uma linguagem que possa ser lida pelo *software* da máquina, ficando este processo descrito no *website* (<http://cirqwizard.org/docs/intro.html>)(Anexo II). Posteriormente, após ter-se criado os ficheiros no formato, que já podem ser lidos pelo *software* da máquina, procede-se para a execução do PCB. O *software* da máquina permite fazer o processo de maquinagem, deposição de pasta de solda e posicionamento de componentes.

A segunda opção disponível para o controlo do dispositivo passa pela criação de código *Gcode*. Através deste tipo de código é possível controlar todos os acessórios disponíveis de forma livre, de

referir que o código de controlo de cada acessório encontra-se no seu manual de instruções (Anexo I). Este foi o controlo do aparelho, utilizado no posicionamento tanto do cabo de talher como da moeda pixelizada.

3.1.3 Maquinagem de circuitos

Neste subcapítulo relativo à maquinagem de circuitos, serão abordados os pontos de maior relevância, para a execução de operações de maquinagem, sendo também demonstrado um exemplo do teste dessa operação.

Setup inicial de maquinagem

Um dos acessórios disponíveis por este aparelho é o *drill*, que permite executar operações de maquinagem e furação dos circuitos (Figura 41) (Figura 42). O *setup* de maquinagem está apto para maquinar placas de circuito de dimensões 100x75mm e 160x100mm. A sua velocidade de rotação está compreendida entre 7000 rpm e 30000 rpm.



Figura 41 - Acessório de maquiagem das placas de circuito.



Figura 42 - Acessório acoplado na máquina.

Exemplo testado

Para testar as capacidades de maquinagem do aparelho procedeu-se à maquinagem de um circuito (Figura 43).

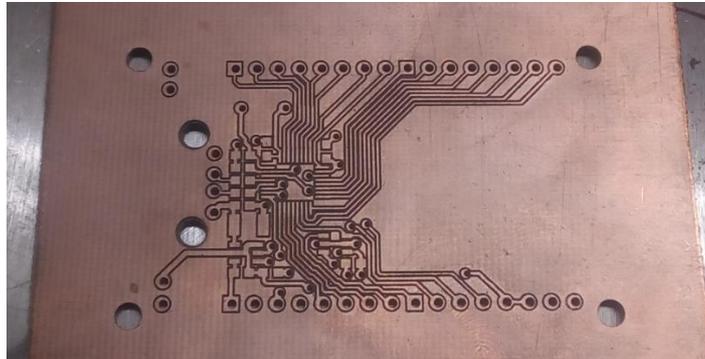


Figura 43 - Exemplo de maquinagem e furação de um circuito elétrico.

3.1.4 Metrologia dimensional

Com o intuito de avaliar a metrologia dimensional do aparelho, procedeu-se a execução de três ensaios de metrologia: repetibilidade, toleranciamento dimensional, resolução mecânica mínima [36].

Repetibilidade

Para testar a repetibilidade do aparelho [37], a medição utilizou a seguinte metodologia. Primeiramente posicionou-se o comparador paralelamente com o eixo a medir, sendo que o posicionamento deste instrumento deve ser de tal forma, que este já meça um determinado deslocamento (0.99mm no eixo X, 1.06mm no eixo Y, 2.16mm no eixo Z), para um determinado conjunto de coordenadas de referência, de forma que o comparador tenha margem suficiente para registar tanto um desfasamento positivo como um desfasamento negativo (Figura 44, Figura 45, Figura 46). De seguida, reinicia-se o aparelho, e desloca-se o sistema de coordenadas para a posição inicial (0,0,0). Depois de posicionado, a parte móvel do aparelho nas coordenadas iniciais (0,0,0), reposiciona-se a parte móvel do aparelho nas coordenadas de referência, coordenadas essas, onde o comparador medirá um determinado deslocamento (0.99mm no eixo X, 1.06mm no eixo Y, 2.16mm no eixo Z). Por fim, regista-se os valores do deslocamento do comparador e compara-se com os valores de referência do deslocamento do comparador (0.99mm no eixo X, 1.06mm no eixo Y, 2.16mm no eixo Z). Para este teste foram efetuadas três medições para cada um dos eixos de liberdade do aparelho (X,Y,Z).

Como já foi referido, o teste de repetibilidade consistiu no uso de um comparador para medir o desfasamento, entre os diferentes reposicionamentos, para as mesmas coordenadas de posição, sendo o equipamento reiniciado em cada reposicionamento. É importante referir que o aparelho foi colocado numa mesa estável de modo a não existirem vibrações que comprometessem as medições. O comparador utilizado (Figura 47) tem uma resolução máxima de apenas 0.01mm, o que permitiu apenas verificar o valor representado nas especificações do aparelho. A escolha deste instrumento de medição deveu-se ao facto de não ter havido um comparador disponível em laboratório com maior resolução.

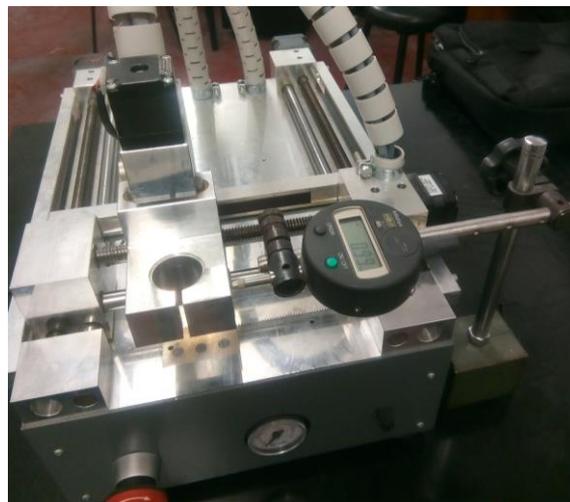


Figura 44 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do X, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 0.99mm).



Figura 45 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do Y, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 1.06mm).

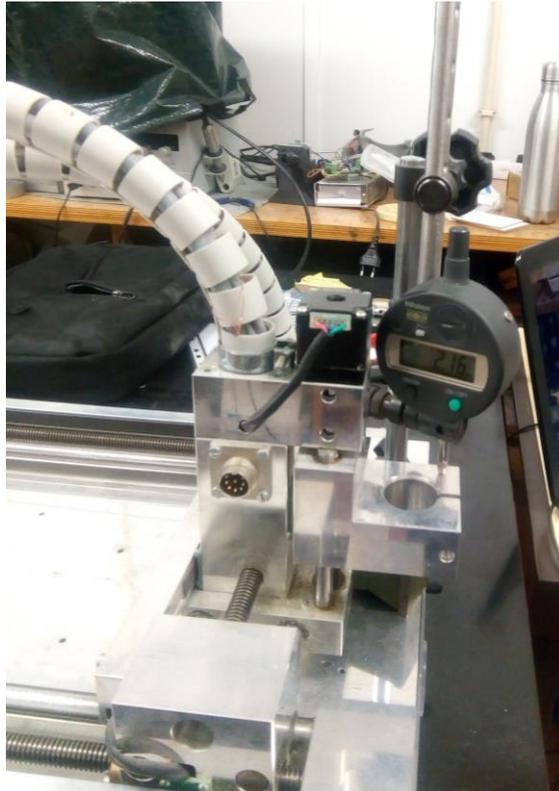


Figura 46 - Avaliação da repetibilidade do equipamento, no eixo do Z, utilizando um comparador (com um valor inicial pré-definido de 2.16mm)



Figura 47 - Comparador utilizado no teste de repetibilidade

Em seguida, encontram-se as tabelas com os dados retirados das experiências:

Eixo do X (mm)			
Posição inicial (pré-definida)	Posição de teste		Desfasamento (Posição inicial- Posição teste)
0.99	1º Tentativa	0.99	0
0.99	2º Tentativa	0.99	0
0.99	3º Tentativa	0.99	0

Tabela 4 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do X.

Eixo do Y (mm)			
Posição inicial (pré-definida)	Posição de teste		Desfasamento (Posição inicial- Posição teste)
1.06	1º Tentativa	1.06	0
1.06	2º Tentativa	1.06	0
1.06	3º Tentativa	1.06	0

Tabela 5 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do Y.

Eixo do Z (mm)			
Posição inicial (pré-definida)	Posição de teste		Desfasamento (Posição inicial- Posição teste)
2.16	1º Tentativa	2.16	0
2.16	2º Tentativa	2.16	0
2.16	3º Tentativa	2.16	0

Tabela 6 - Tabela relativa ao desfasamento entre uma posição pré-definida e uma posição de teste para as mesmas coordenadas de posição, no teste da repetibilidade para o eixo do Z.

Toleranciamento dimensional

De modo a testar o toleranciamento dimensional do processo de maquinagem do aparelho, procedeu-se à execução de um conjunto de nove segmentos, sendo um deles o segmento de referência. Este conjunto de segmentos foi executado três vezes (Figura 48). Cada conjunto de

segmentos consistia em deslocamentos da fresa de 1mm, 0.5mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm, 0.01mm, 0.0075mm, 0.005mm e o último segmento consiste apenas da descida da broca a mesma profundidade dos outros segmentos, obtendo apenas uma cavidade. Este segmento definiu-se como sendo o de referência. Este, tem como propósito a anulação de erros de medição, por exemplo, erros que podem advir da possibilidade de corte incorreto por parte da fresa, vibrações de rotação do dril, entre outros. Depois de efetuadas a maquinagem das amostras, procedeu-se a captações de imagem (Figura 49), com uma ampliação de 5 vezes (500 μm), através do microscópio da *Leica DM 2500 M* (Figura 50), e posteriormente, com o auxílio do *software ImageJ* procedeu-se a medições do comprimento dos segmentos. Imagem seguinte (figura 49) representa um exemplo de uma fotografia captada pelo microscópio.



Figura 48 - Representação dos rasgos efetuados durante o teste de toleranciamento dimensional.

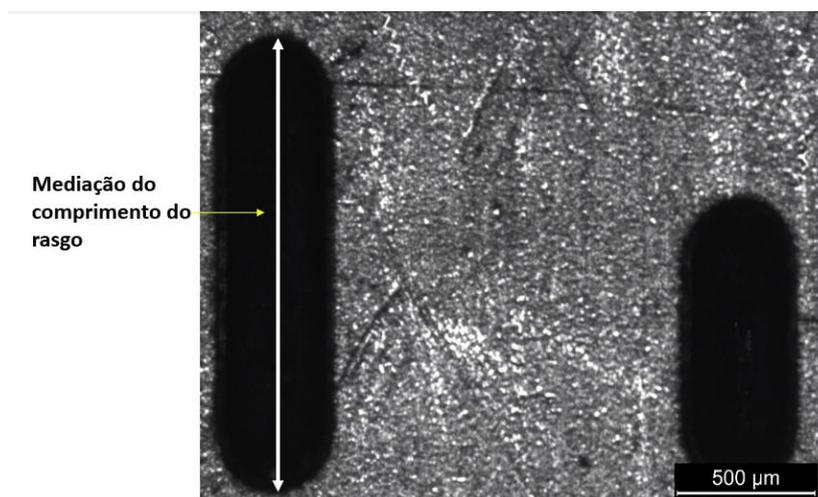


Figura 49 - Exemplo de uma amostra do teste de toleranciamento (medição do comprimento dos segmentos) (Ampliação de 5 vezes(500 μm)).



Figura 50 - Microscópio ótico *Leica DM 2500 M*.

Em seguida é apresentado o *Gcode* para obter a maquinagem dos segmentos:

```
fileDf = fopen('testelinhas.txt','w');
prompt = 'qual o valor de Z? '

valorz = input(prompt);

prompt = 'Qual a coordenanda inicial em x? ';
coordx = input(prompt);

prompt = 'Qual a coordenanda inicial em y? ';
coordy = input(prompt);

v1=1
v2=0.5
v3=0.1
v4=0.05
v5=0.025
v6=0.01
v7=0.0075
v8=0.005

x1=coordx+v1
x2=coordx+v2
x3=coordx+v3
x4=coordx+v4
x5=coordx+v5
x6=coordx+v6
x7=coordx+v7
x8=coordx+v8

y2=coordy+1.5
y3=y2+1.5
y4=y3+1.5
y5=y4+1.5
y6=y5+1.5
y7=y6+1.5
y8=y7+1.5
y9=y8+1.5
```

```

fprintf(fileDf, 'M3 S1325\n');

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, coordy);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, coordy, valorz);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x1, coordy, valorz); % linha de 1 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x1, coordy);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y2);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y2, valorz);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x2, y2, valorz); % linha de 0.5 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x2, y2);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y3, valorz);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x3, y3, valorz); % linha de 0.1 mm

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y4);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y4, valorz);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x4, y4, valorz); % linha de 0.05 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x4, y4);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y5);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y5, valorz);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x5, y5, valorz); % linha de 0.025 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x5, y5);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y6);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y6, valorz);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x6, y6, valorz); % linha de 0.01 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x6, y6);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y7);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y7, valorz);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x7, y7, valorz); % linha de 0.0075
mm de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x7, y7, valorz);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y8);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y8, valorz);
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', x8, y8, valorz); % linha de 0.005 mm
fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', x8, y8);

fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-5\r\n', coordx, y9);
de largura fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z%f\r\n', coordx, y9, valorz); % PONTO
REFERÊNCIA fprintf(fileDf, 'G0 X%f Y%f Z-1\r\n', coordx, y9);

fprintf(fileDf, 'M5');
fclose(fileDf);

```

Em seguida encontram-se as tabelas dos ensaios de toleranciamento dimensional[38]:

Ensaio de toleranciamento dimensional(μm)			
Deslocamento refer\u00eancia	Amostra 1		
	Comprimento do rasgo (valor experimental)	Deslocamento (Comp. do rasgo – Ref.)	Desfasamento (Deslocamento – Deslocamento de ref.)
1000	1546,087	1145,48300	145,48300
500	999,015	598,41100	98,41100
100	558,037	157,43300	57,43300
50	489,976	89,37200	39,37200
25	443,267	42,66300	17,66300
10	416,139	15,53500	5,53500
7,5	413,166	12,56200	5,06200
5	397,971	-2,63300	-7,63300
Refer\u00eancia	400,604		

Tabela 7 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento refer\u00eancia, sendo o valor do deslocamento, a subtra\u00e7\u00e3o do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de refer\u00eancia (400,604 μm), relativos \u00e0 amostra 1 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Refer\u00eancia).

Ensaio de toleranciamento dimensional(μm)			
Deslocamento refer\u00eancia	Amostra 2		
	Comprimento do rasgo (valor experimental)	Deslocamento (Comp. do rasgo – Ref.)	Desfasamento (Deslocamento – Deslocamento de ref.)
1000	1513,319	1141,868	141,868
500	959,716	588,265	88,265
100	515,067	143,616	43,616
50	455,143	83,692	33,692
25	416,438	44,987	19,987
10	378,782	7,331	-2,669
7,5	374,845	3,394	-4,106
5	386,826	15,375	10,375
Refer\u00eancia	371,451		

Tabela 8 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento referência, sendo o valor do deslocamento, a subtração do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de referência (371,451 μm), relativa à amostra 2 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Referência).

Ensaio de toleranciamento dimensional(μm)			
Deslocamento referência	Amostra 3		
	Comprimento do rasgo (valor experimental)	Deslocamento (Comp. do rasgo – Ref.)	Desfasamento (Deslocamento – Deslocamento de ref.)
1000	1507,474	1160,67	160,67
500	972,732	625,928	125,928
100	501,39	154,586	54,586
50	449,434	102,63	52,63
25	404,175	57,371	32,371
1	403,632	56,828	46,828
7,5	395,028	48,224	40,724
5	370,771	23,967	18,967
Referência	346,804		

Tabela 9 - Tabela referente ao desfasamento entre o deslocamento e o deslocamento referência, sendo o valor do deslocamento, a subtração do comprimento do rasgo, feito experimentalmente e o valor de referência (346,804 μm), relativa à amostra 3 (Nota: Comp. rasgo- Comprimento do rasgo, Ref.- Referência).

Ensaio de toleranciamento dimensional(μm)		
Deslocamento de referência	Média	Desvio Padrão
1000	149,3	8,15
500	104,2	15,91
100	51,9	5,96
50	41,9	7,94
25	23,3	6,46
10	16,6	21,66
7,5	13,9	19,34
5	7,2	11,08
	Média do desvio padrão	12,06

Tabela 10 - Apresentação da média de para cada comprimento de rasgo, média total de todos os rasgos efetuados e o desvio padrão total.

Ensaio de toleranciamento dimensional(μm)	
Média total	Média do Desvio Padrão
51,0	12,06

Tabela 11 - Tabela relativa aos valores da média total e á médio desvio padrão do ensaio de toleranciamento.

Depois dos ensaios realizados e de efetuados os cálculos do toleranciamento dimensional pode se afirmar que, o toleranciamento do aparelho é de $51\mu\text{m}$ com um desvio padrão de $12,06\mu\text{m}$.

Resolução mecânica mínima

A medição da resolução mínima passou pelo uso de um comparador, utilizado normalmente para a medição da excentricidade de uma peça circular. Este teste tem como intuito medir a distância mínima a que o dispositivo se move.

Para isso, o instrumento foi colocado na mesa de trabalho do aparelho de produção de PCB, tendo o cuidado de posicionar o instrumento o mais alinhado possível com os eixos cartesianos da máquina, com a intenção de que a movimentação do aparelho no eixo do y, fosse o mais linear possível com a medição da movimentação do veio do comparador. Mediante esta cautela, foi possível medir com máximo rigor, o real deslocamento do aparelho (Figura 51).

Neste teste, recorreu-se ao uso de um comparador (Figura 47), em que a sua resolução mínima era de $10\mu\text{m}$ e a resolução a ser comprovada era também de $10\mu\text{m}$ (valor referido nas especificações da máquina). Como não havia em laboratório um dispositivo de medição de deslocamentos com uma resolução superior a $10\mu\text{m}$ (valor a teste), utilizou-se esse comparador disponível.

Para este teste ser realizado utilizou-se o código G, de modo a executar movimentações de 0.01 mm e verificar se o comparador media esses mesmos incrementos.

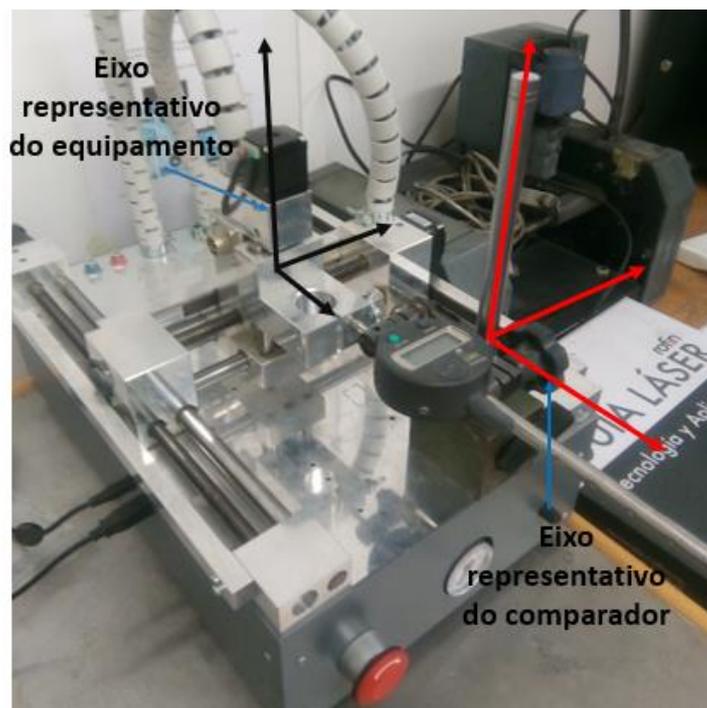


Figura 51 - Representação do posicionamento do comparador em relação ao equipamento, para o teste da resolução mecânica mínima.

O Gcode desenvolvido para este teste encontra-se a seguir [39] :

```
G0 X50 Y200  
G0 X50 Y199.99 %deslocamento de 0.01 mm
```

Durante todas as tentativas realizadas, foi possível confirmar a resolução mínima, de 0.01mm, descrita nas especificações do aparelho.

3.1.5 Deposição da pasta de solda

Neste subcapítulo relativo à deposição de solda, serão abordados os pontos de maior relevância, na execução de operações de deposição de solda sendo também demonstrado um exemplo do teste dessa operação.

Setup inicial de deposição de solda

Uma outra operação disponível neste aparelho, é a capacidade de deposição de pasta de solda nos circuitos elétricos, recorrendo ao uso de uma câmara de ar, previamente comprimido, que permite a expulsão da pasta de solda da seringa (Figura 52) (Figura 53). Este *setup* tem a necessidade de utilizar um dispositivo de bombeamento de ar, seja ele uma bomba mecânica de encher pneus (Figura 54) ou através de compressor, com intuito de pressurizar ar para o reservatório do dispositivo. O reservatório tem uma pressão máxima admissível de 2.5 bar, sendo a pressão de trabalho aconselhável entre 1.5 bar a 2 bar. A dimensão do orifício de saída da extensão de pasta de solda é de 0.22 mm.



Figura 52 - Acessório para deposição de pasta de solda.



Figura 53 - Acessório de deposição de pasta de solda acoplado na máquina.



Figura 54 - Bomba pneumática, utilizada na pressurização do ar para o reservatório do equipamento.

Exemplo testado

Para testar a deposição de cola, criou-se um pequeno circuito elétrico para colocação de um *led*, onde previamente, se procedeu à deposição de pasta de solda (Figura 55).

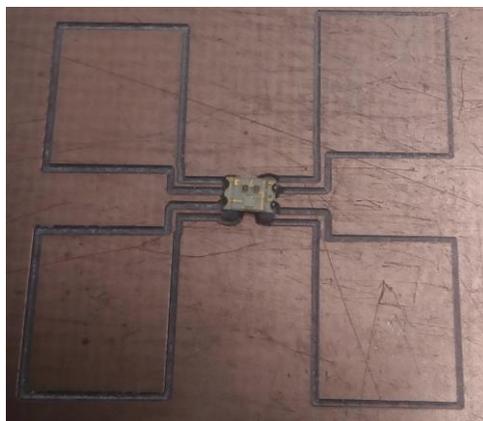


Figura 55 - Exemplo testado da colocação de pasta de solda num circuito elétrico.

3.1.6 Posicionamento dos componentes elétricos

Neste subcapítulo relativo ao posicionamento de componentes elétricos, serão abordados os pontos de maior relevância, na execução de operações de posicionamento, sendo também demonstrado um exemplo do teste dessa operação.

Setup de posicionamento de componentes elétricos

Para finalizar a operação de produção de uma placa de circuito, é necessário proceder à colocação de todos os componentes do circuito. Devido a essa operação, este aparelho inclui também uma bomba de vácuo que se interliga a uma pistola de vácuo, que permite através da depressão do ar, transportar os componentes até á placa de circuito (Figura 56) (Figura 57). As extensões de vácuo têm diâmetros compreendidos entre [0.31-1.78]mm e tendo depressão máxima (vácuo), aproximadamente de 0.1 bar.



Figura 56 - Acessório de vácuo

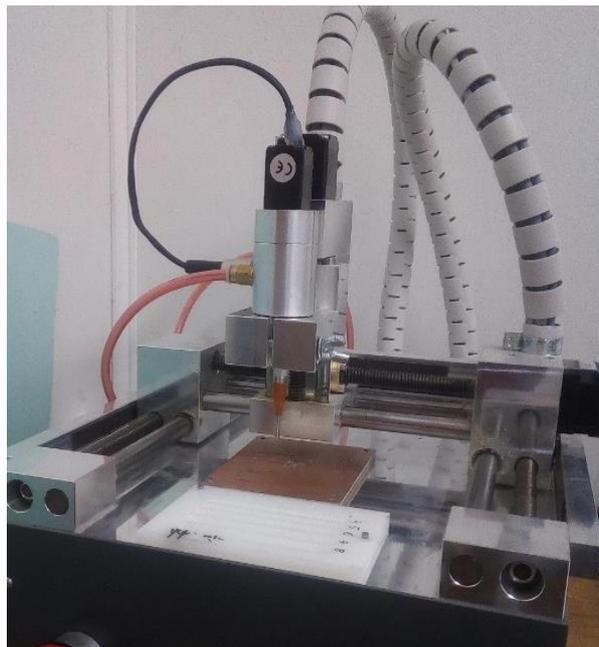


Figura 57 - Acessório de vácuo acoplado na máquina.

Exemplo testado

Com o intuito de testar o posicionamento dos componentes com o uso da pistola de vácuo, posicionou-se o *led* num circuito previamente desenvolvido (Figura 55).

3.2 Posicionamento de cristais num cabo de talher

De modo a projetar um acessório para o posicionamento de cristais num cabo de talher, aplicou-se a metodologia representado no fluxograma seguinte (Figura 59).

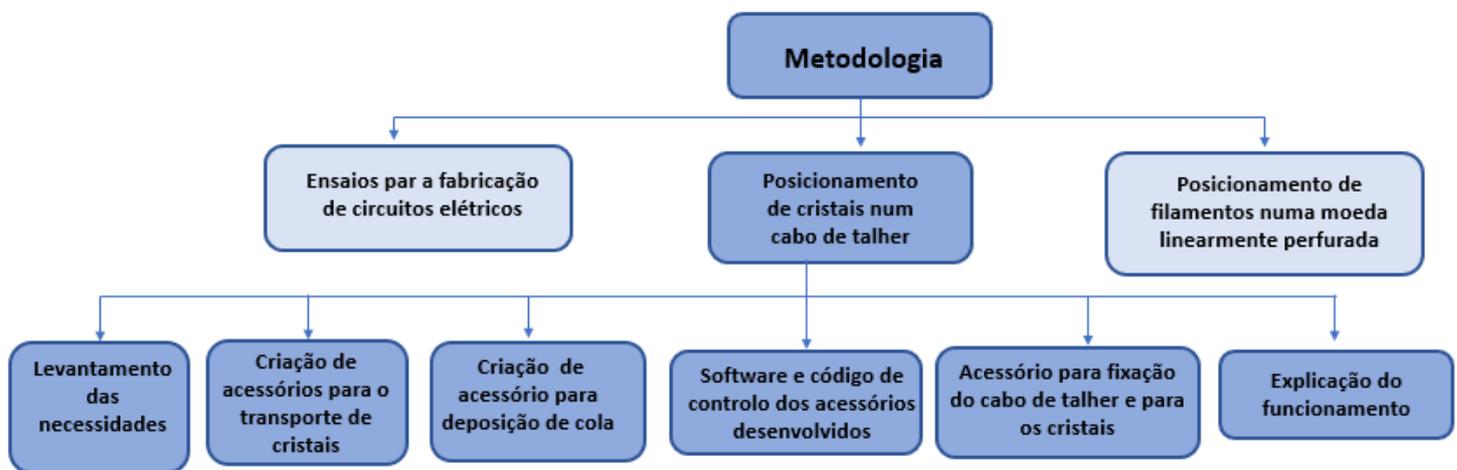


Figura 58 - Fluxograma da metodologia relativa ao posicionamento de cristais num cabo de talher.

3.2.1 Levantamento das necessidades

Para a realização deste objetivo será necessário a colocação de cristais nos furos de um cabo de talher (diâmetro 2.6mm e 1 mm de altura (Figura 60)). Na fixação dos cristais é necessário ter em conta que a cola, que fixa o cristal ao cabo de talher, não comprometa o efeito brilhante da pedra. Para isso, é necessário que a cola não seja colocada na parte inferior do cristal, sendo apenas colocada na parte metálica do cristal (parte lateral). Este cabo de talher analisado, devido ao seu design, os seus furos não estão todos no mesmo plano, havendo furos com inclinação de 0° (plano horizontal) e furos com inclinação de 25° (Figura 61).

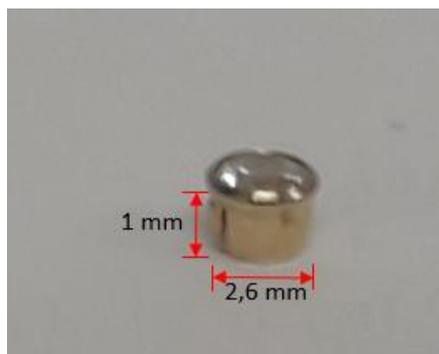


Figura 59 - Cristal utilizado durante o processo experimental.

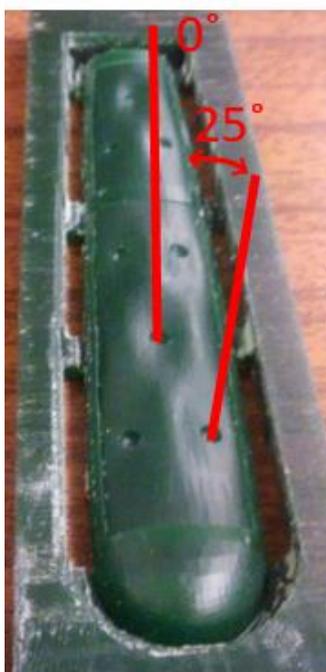


Figura 60 - Exemplo de um modelo de um cabo de talher representado com as diferentes angulações dos furos.

3.2.2 Criação de acessórios para o transporte de cristais

Para o transporte das peças optou-se por utilizar a pistola de vácuo, ferramenta do *setup* inicial da máquina, utilizada no transporte dos componentes eletrónicos, pois reunia as condições para a execução do transporte dos cristais.

Como foi referido anteriormente, devido a diferentes angulações dos furos, foi necessário desenvolver dois acessórios que permitissem a rotação da pistola de vácuo para acompanhar essa mesma angulação dos furos.

O primeiro acessório desenvolvido, figura 62 e figura 63 (Desenho Técnico nº 6), foi criado com o objetivo de acomodar o motor de passo e o fixar à estrutura da máquina, contendo numa das

suas faces quatro furos para a passagem dos parafusos que fixarão o motor de passo, e na outra face, a existência de uma saliência cilíndrica para a acomodação deste acessório à máquina (Figura 66).

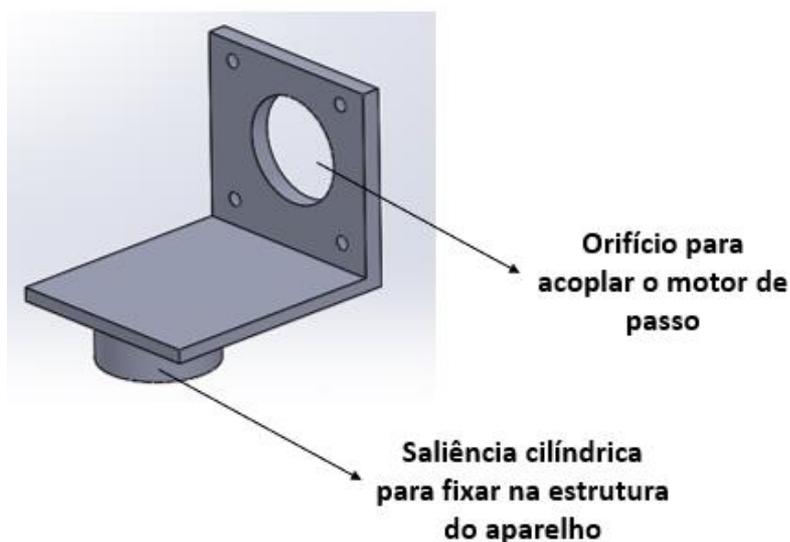


Figura 61 - Modelação em *Solidworks* do acessório responsável pela acomodação do motor de passo com representação do orifício e saliência.

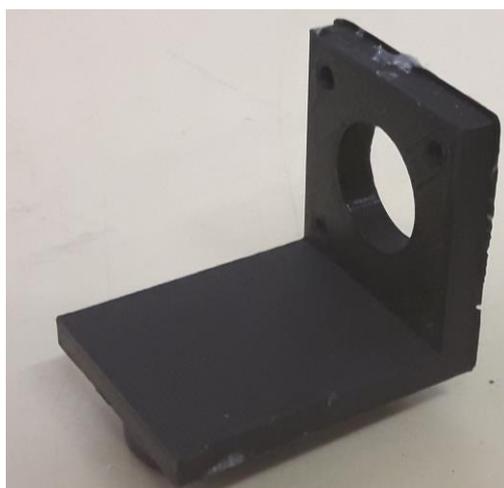
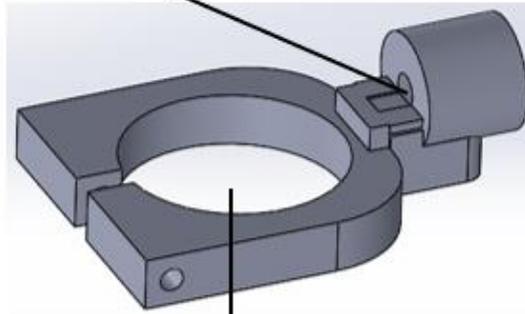


Figura 62 - Acessório 3D impresso em PLA, responsável pela acomodação do motor de passo.

O segundo acessório, figura 64 e figura 65 (Desenho Técnico nº 7), foi criado para promover a ligação entre o veio do motor de passo e a pistola de vácuo, sendo a parte cilíndrica do acessório, a parte responsável pela ligação entre ao veio do motor ao acessório através de um orifício existente (Figura 66). Existe também um furo inserido noutra plano do acessório responsável pela amarração da pistola de vácuo ao acessório.

**Orifício para
acoplar veio do
motor de passo**



**Orifício para
acoplar pistola de
vácuo**

Figura 63 - Modelação em Solidworks do acessório responsável pela acomodação da pistola de vácuo com representação dos orifícios.



Figura 64 - Acessório 3D impresso em PLA, responsável pela acomodação da pistola de vácuo.

O veio do motor de passo, tem uma particularidade, propositadamente inserida na sua extremidade. Trata-se do achatamento do veio, com o intuito de promover a tração mais eficaz do movimento de rotação da pistola de vácuo (Figura 67).

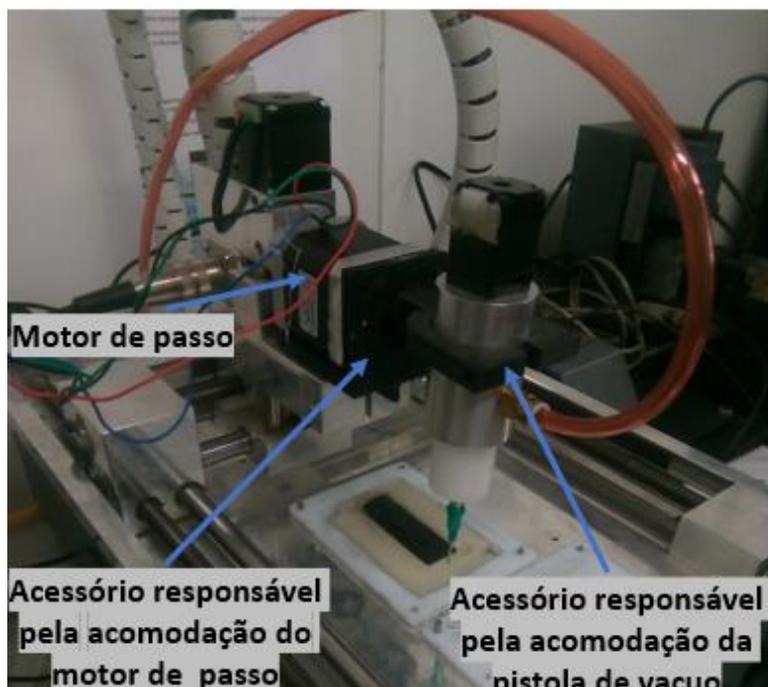


Figura 65 - Imagem do conjunto montado, relativo ao posicionamento dos cristais

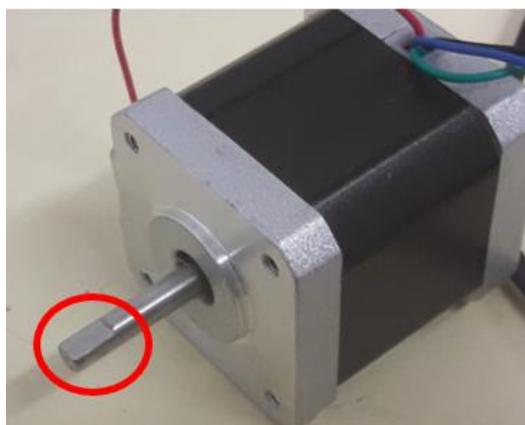


Figura 66 - Veio achatado na extremidade do motor de passo (representado com um círculo vermelho), com o intuito de promover a tração.

Nota: Dimensões do entalhe do veio do motor de passo encontram-se na parte de desenhos técnicos em anexo (Desenho Técnico nº 8).

Especificações do motor de passo:

Modelo: 42byghw609

Precisão da etapa: $\pm 5\%$

Faixa de temperatura ambiente: $20^\circ \text{C} \sim 50^\circ \text{C}$

Resistência de isolamento: $100\text{M}\Omega$ Min.50V DC

Força dielétrica: 500V AC por 1 minuto

Ângulo de passo: $1,8^\circ$

Classificação de tensão: 2,55 V

Classificação atual: 1.7 A
Resistência: 1.5 Ω por bobina
Indutância: 2.8mH
Tolerância de aumento de temperatura: 80 ° C
Torque de retenção: 40 N·cm
Torque de retenção: 2,2 N.cm
Inércia do rotor: 54 g·cm²
Número de ligações: 4
Comprimento de chumbo: 30 cm
Comprimento do motor: 4 cm
Peso: 260 g

3.2.3 Criação de acessório para deposição de cola

Devido à necessidade de colocação de cola nas partes laterais, condição referida anteriormente, optou-se por modelar o “bico” de deposição de solda já utilizado pela máquina (Figura 68). Para isso, aqueceu-se a ponta do “bico” de forma a fundir o material, com o propósito de tapar o furo já existente nele. A quantidade de material fundido do “bico” foi controlada de modo a que o diâmetro final da ponta do “bico” fosse ligeiramente inferior (diâmetro final 2.13mm) aos furos onde se colocaria os cristais, com o intuito que, o “bico” de deposição pudesse entrar dentro do furo e houvesse folga suficiente, para a cola sair sem obstrução.

Com a finalidade de que a cola pudesse sair pela parte lateral da extensão desenvolvida, procedeu-se a furação na extremidade da extensão de deposição de solda. Para isso, foram efetuados quatro furos com uma broca de um milímetro. O resultado, depois de se ter procedido às duas operações de moldação do “bico”, pode ser observado nas figuras seguintes (Figura 68, Figura 69, Figura 70), (Desenho Técnico nº 11).



Figura 67 - Extensão responsável pela deposição da pasta de solda (forma básica).



Figura 68 - Extensão modelada para deposição de cola pela parte lateral.



Figura 69 - Imagem do conjunto montado, relativo a deposição de cola.

Nota: As dimensões da extensão modelada para deposição de cola encontram-se na parte de desenhos técnicos em anexo (Desenho Técnico nº 11).

Especificações da pasta de solda:

Produto: XGZ40

Liga: Sn63/Pb37

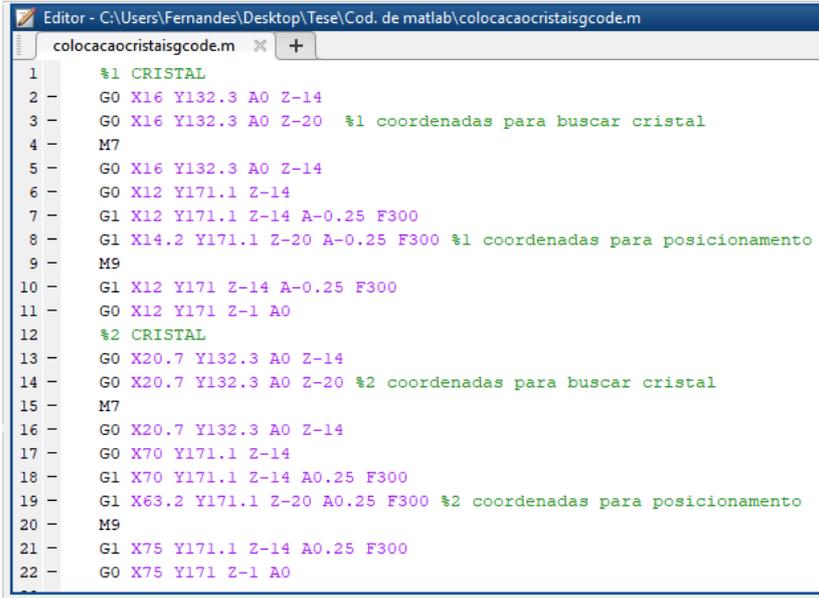
Diâmetros das partículas: 20-38µm

Temperatura de fusão: 183°C

Peso: 35g

3.2.4 Software e códigos de controlo do acessório desenvolvido

Para o controlo deste equipamento foram utilizadas as coordenadas dos furos. A partir delas desenvolve-se um código de controlo, *Gcode*, semelhante ao demonstrado na figura seguinte (Figura 72), que consiste em levar cada um dos três cristais ao tabuleiro de cristais, um de cada vez, posicionando-os nos respetivos furos do cabo de talher.



```
Editor - C:\Users\Fernandes\Desktop\Tese\Cod. de matlab\colocacaocristaisgcode.m
colocacaocristaisgcode.m x +
1 %1 CRISTAL
2 - G0 X16 Y132.3 A0 Z-14
3 - G0 X16 Y132.3 A0 Z-20 %1 coordenadas para buscar cristal
4 - M7
5 - G0 X16 Y132.3 A0 Z-14
6 - G0 X12 Y171.1 Z-14
7 - G1 X12 Y171.1 Z-14 A-0.25 F300
8 - G1 X14.2 Y171.1 Z-20 A-0.25 F300 %1 coordenadas para posicionamento
9 - M9
10 - G1 X12 Y171 Z-14 A-0.25 F300
11 - G0 X12 Y171 Z-1 A0
12 %2 CRISTAL
13 - G0 X20.7 Y132.3 A0 Z-14
14 - G0 X20.7 Y132.3 A0 Z-20 %2 coordenadas para buscar cristal
15 - M7
16 - G0 X20.7 Y132.3 A0 Z-14
17 - G0 X70 Y171.1 Z-14
18 - G1 X70 Y171.1 Z-14 A0.25 F300
19 - G1 X63.2 Y171.1 Z-20 A0.25 F300 %2 coordenadas para posicionamento
20 - M9
21 - G1 X75 Y171.1 Z-14 A0.25 F300
22 - G0 X75 Y171 Z-1 A0
```

Figura 70 - Exemplo do código de controlo, para posicionamento dos cristais.

3.2.5 Acessórios para fixação do cabo de talher e para os cristais

Foram produzidos dois acessórios para fixação do cabo de talher. Um dos acessórios (Figura 73) tem como objetivo acomodar o próprio cabo de talher e o outro é responsável por acomodar o

primeiro acessório, de modo a facilitar a troca dos moldes (Figura 74, Figura 75). Foi também desenvolvido um tabuleiro para acomodar os cristais durante as operações de posicionamento dos cristais num cabo de talher (Figura 76), (Desenho Técnico nº 10).

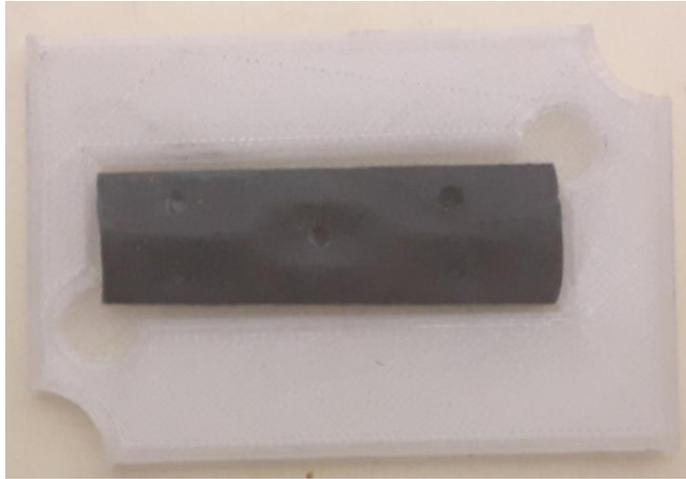


Figura 71 - Molde em PLA, responsável pela acomodação de cabo de talher.

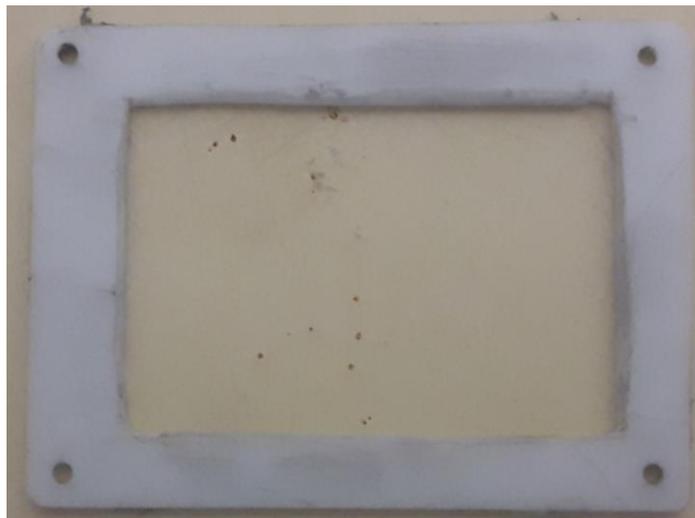


Figura 72 - Acessório responsável pela acomodação do molde do cabo de talher (“porta moldes”).

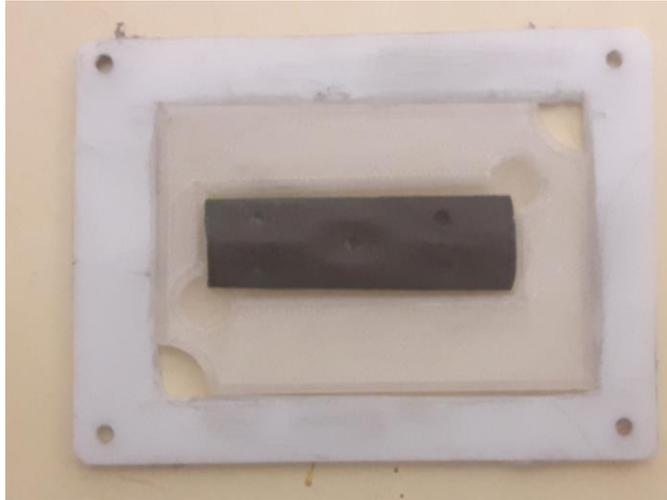


Figura 73 - Conjunto montado, molde e "porta-moldes".

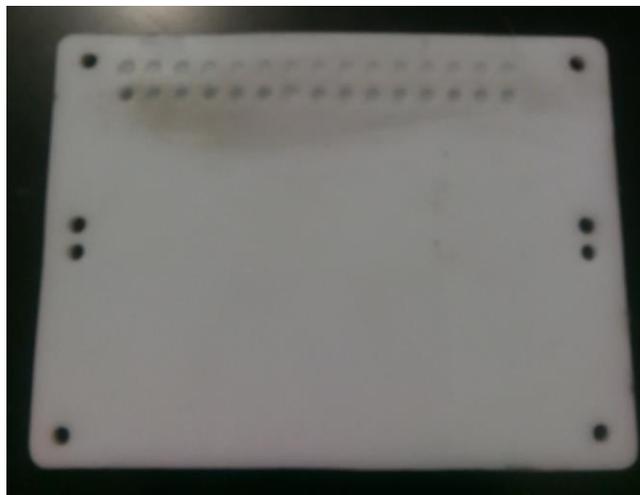


Figura 74 - Tabuleiro dos cristais

3.2.6 Explicação do funcionamento

O funcionamento do dispositivo passa, num primeiro momento, pela montagem do equipamento de deposição da cola com o "bico" de deposição moldado (já explicado anteriormente). De seguida, e após o equipamento estar propriamente montado, segue-se a deposição de cola em cada um dos furos. O passo seguinte passa por trocar o equipamento de deposição de cola pelo equipamento de vácuo (pistola de vácuo, motor de passo e seus acessórios). Depois do equipamento montado, este processo passa pelo deslocamento da pistola de vácuo para levar cada um dos cristais colocados no tabuleiro e posicioná-los no seu devido local (Figura77).

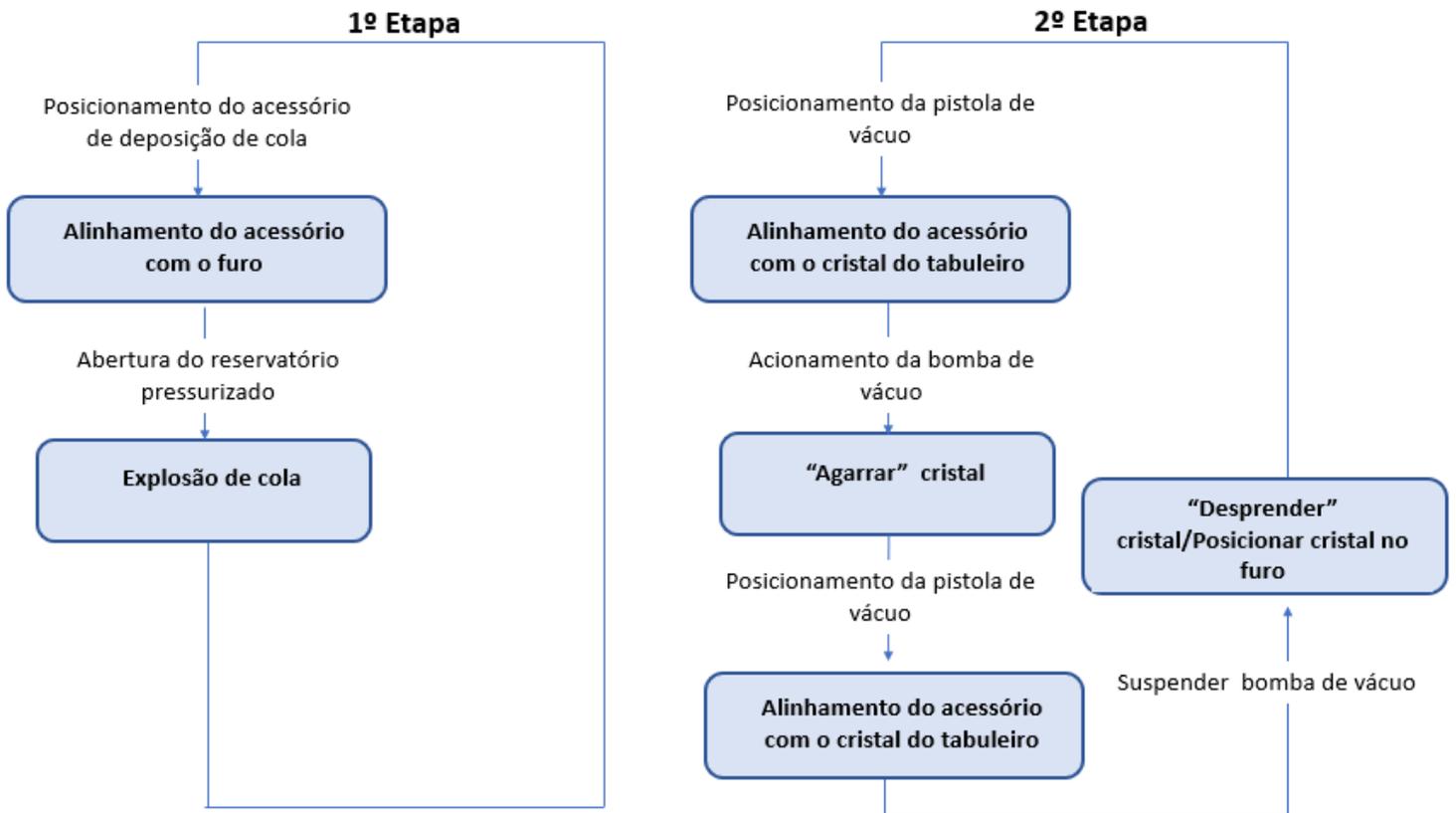


Figura 75 - Ciclo de posicionamento de cristais num cabo de talher.

3.3 Criação de uma imagem pixelizada

Com o intuito de desenvolver um dispositivo para o posicionamento de filamentos numa moeda linearmente perfurada, aplicou-se a metodologia seguinte (Figura 78).

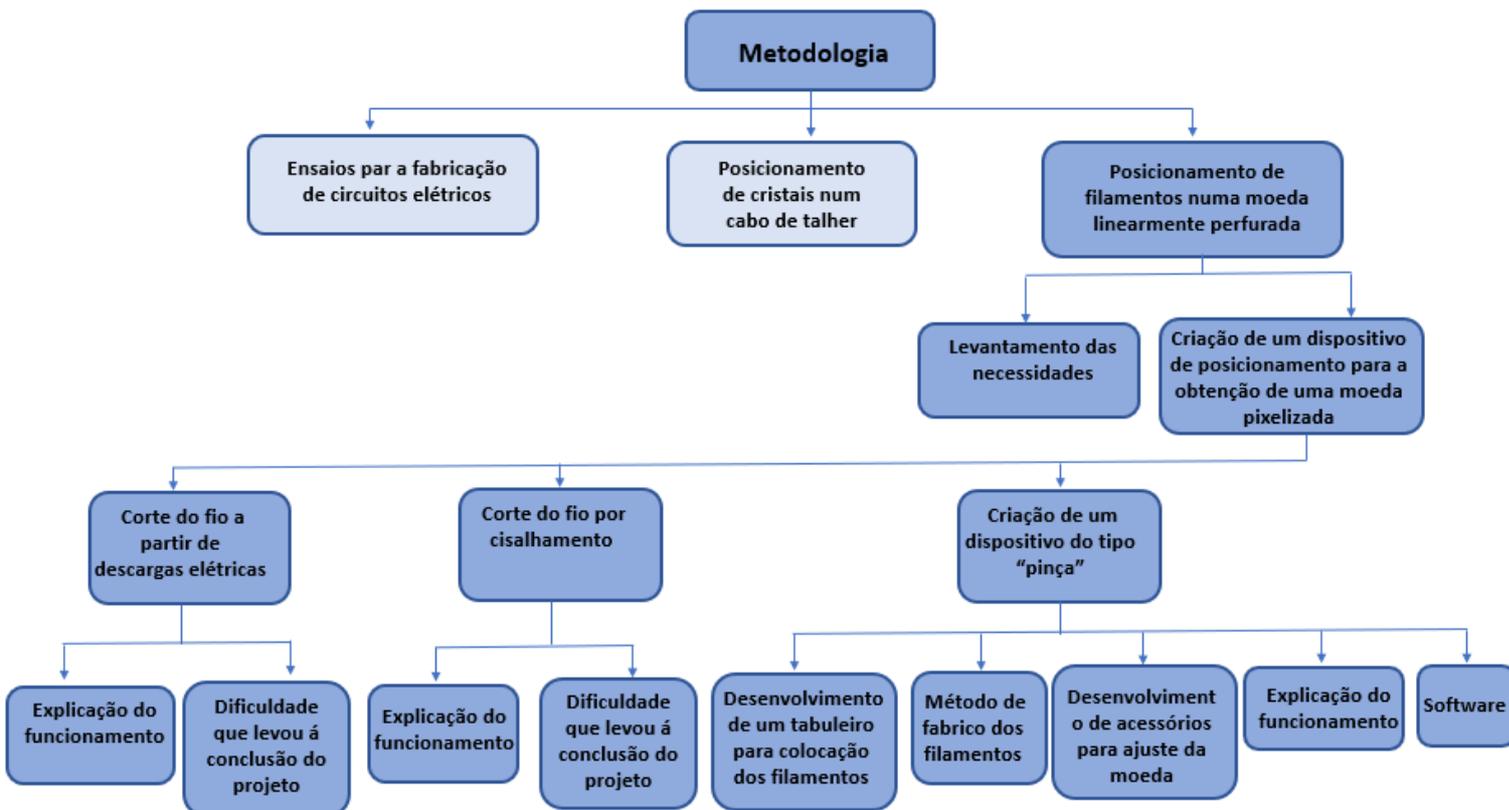


Figura 76 - Fluxograma da metodologia relativa ao posicionamento de filamento numa moeda linearmente perfurada.

3.3.1 Levantamento das necessidades

Colocação de pequenos filamentos de ouro em orifícios de uma moeda perfurada, sendo estes furos linearmente orientados em forma de uma matriz, de diâmetro 0.4mm. O posicionamento deste filamento ocorre de maneira a formar uma imagem através do contraste entre os furos preenchidos e os não preenchidos, obtendo-se assim, uma imagem pixelizada.

3.3.2 Criação de um dispositivo para o posicionamento de filamentos de modo obter uma moeda pixelizada

Corte do fio a partir de descargas elétricas

Para testar o corte do fio a ser implementado no acessório, começou-se por criar um dispositivo para proceder ao teste de corte.

Esse dispositivo consistia em dois pilares que fixavam o fio que se pretendia cortar, para além disso, havia também a existência de dois polos de cobre posicionando-se perpendicularmente em relação ao fio (Figura 79).

O objetivo do corte consistia em criar um diferencial de potencial suficiente, que resultaria num arco elétrico, de onde se gerasse calor suficiente para cortar o fio.

Depois de várias tentativas, tentando reduzir ao máximo possível a distância entre os dois polos, não foi possível a criação de um arco elétrico (diferença de potencial insuficiente), mesmo recorrendo a utilização de um aparelho de soldar comum para eletrodo revestido (24V).

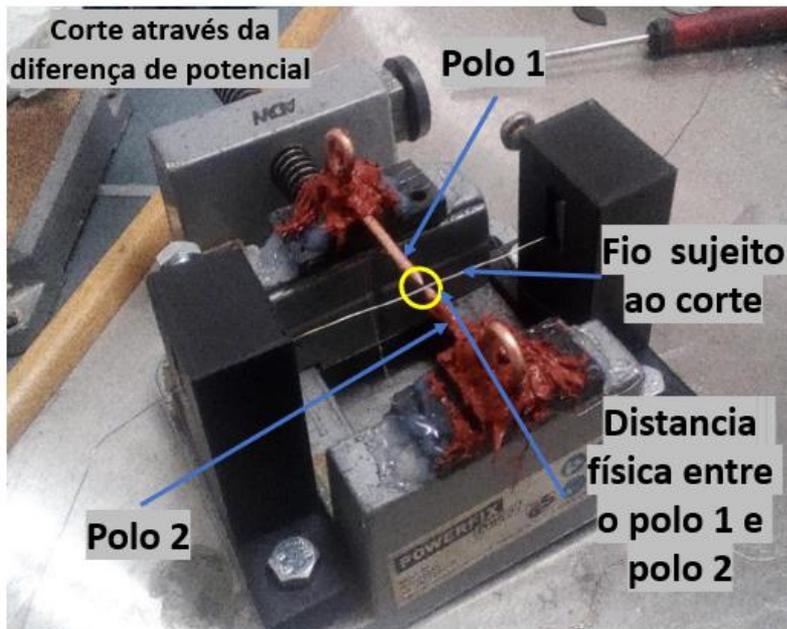


Figura 77 - Estrutura desenvolvida para os testes de corte do fio, através da diferença de potencial.

Tendo em conta o resultado desta experiência decidiu-se mudar os polos, de modo a testar a passagem de corrente mediante o contacto físico entre os dois polos. Mais concretamente, fez-se a ligação a um dos polos de cobre e o outro polo, à extremidade do fio, utilizando a mesma fonte de energia que havia sido utilizada na experiência anterior, isto é, utilizou-se o aparelho de soldar (Figura 80). Nesta experiência, houve a ligação física entre o polo de cobre e o fio, de modo a provocar um curto circuito. Contudo, devido à grande amperagem do aparelho, o resultado desta experiência resultou na carbonização do fio por completo.

Com este resultado, decidiu-se utilizar uma outra fonte com uma amperagem muito mais baixa e por isso, optou se por escolher uma pilha de 1.5 V. Com a repetição da experiência anterior, ligou-se igualmente um polo à parte de cobre e outro polo à extremidade do fio, mas o resultado neste caso foi a incandescência do fio.

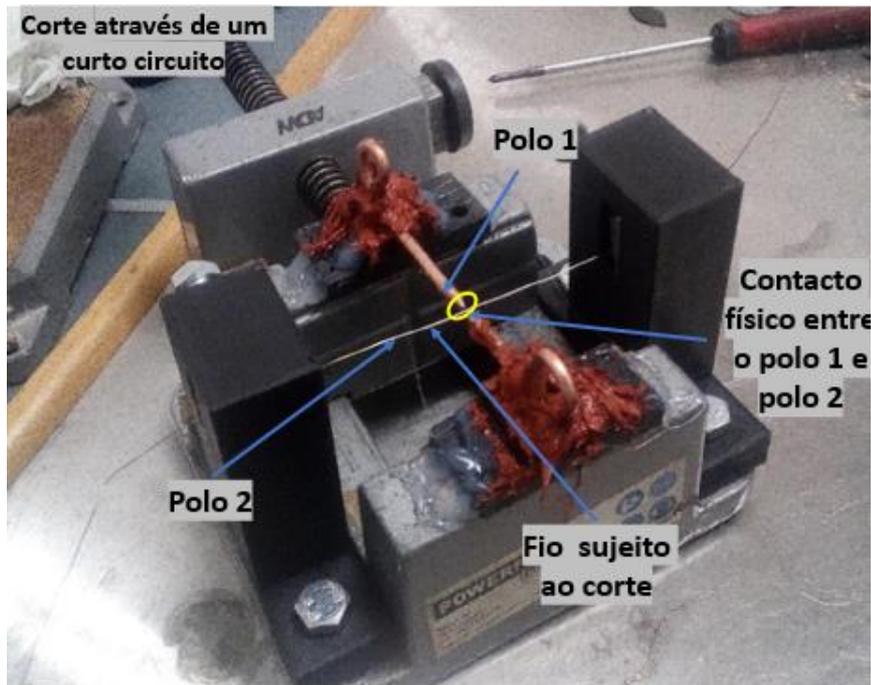


Figura 78 - Estrutura desenvolvida para os testes de corte do fio, através de um curto-circuito.

Depois dos dados desta experiência decidiu-se testar o curto-circuito para utilizar no corte do fio, tendo-se criado um dispositivo para testar esta nova solução (Figura 81).



Figura 79 - Dispositivo desenvolvido para testar o corte do fio através de um curto circuito.

Este dispositivo consistia em fazer o corte através de um curto circuito propositado, à semelhança do que ocorre nos fusíveis.

Este processo, passa pela passagem de uma corrente elétrica entre um polo, o fio, e o outro polo, através do contacto físico entre eles. Graças à existência de uma resistência (o fio) à passagem

de corrente, gera-se uma quantidade de calor suficiente para cortar o próprio fio, sistema de curto circuito utilizado nos fusíveis (Figura 82).

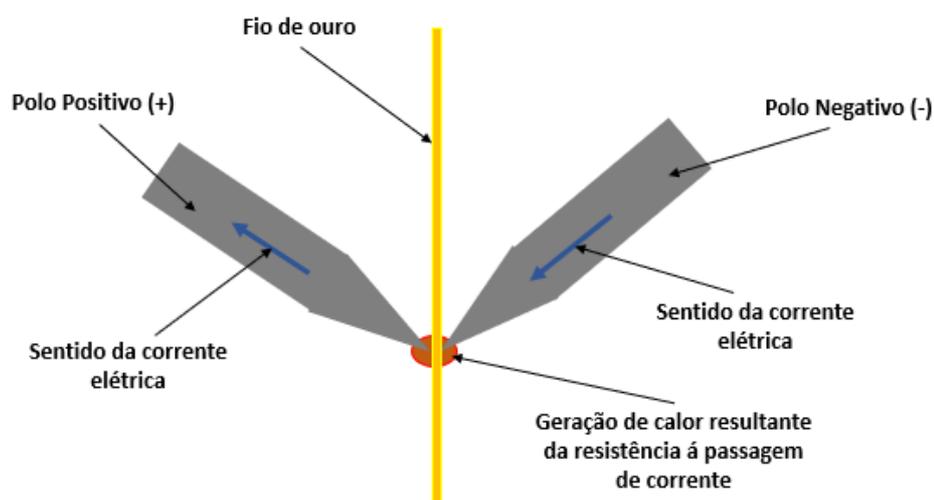


Figura 80 - Representação esquemática da técnica de corte do fio, através de um curto-circuito propositado.

Explicação do funcionamento

Este processo desenrola-se através do posicionamento do dispositivo, onde ocorre o alinhamento do fio, que é extraído pelo dispositivo com o furo a ser preenchido. Depois desse alinhamento, é acionado o motor de passo responsável pelo desenrolamento da bobine, que contém o fio. Este fio passa pela parte de corte e entra nos furos com o objetivo de o preencher. De seguida, dá-se a descarga elétrica de modo a cortar o fio, o que resulta no preenchimento de um filamento no furo desejado. Por último, reposiciona-se novamente o dispositivo para a colocação de um novo filamento noutra furo e repete-se este procedimento. Após a repetição dos processos anteriores obtém-se uma imagem pixelizada (Figura 83).

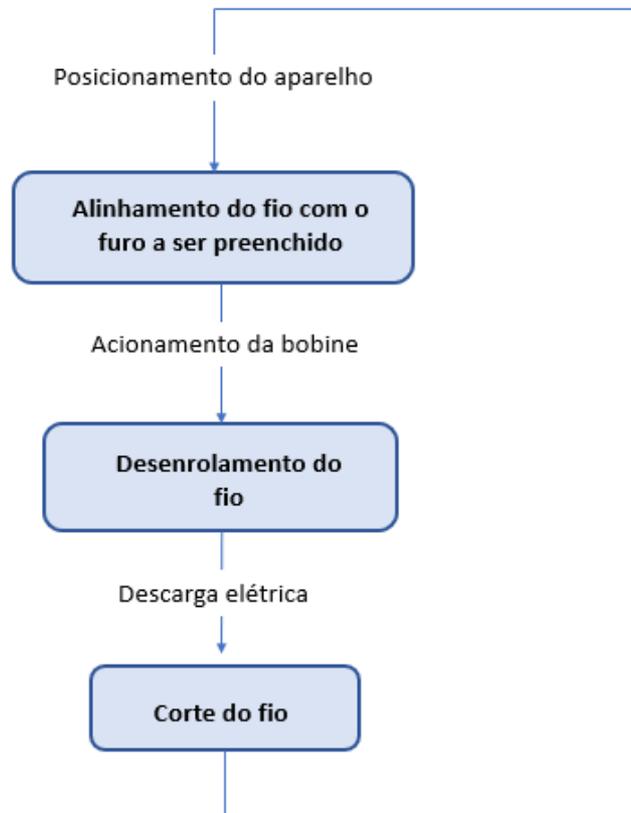


Figura 81 - Ciclo referente à execução de moedas pixelizadas, utilizando descargas elétricas para o corte do fio

Dificuldade existentes que levou à conclusão do projeto

Este processo não foi possível concluir, uma vez que ao proceder ao corte do fio através de um processo do tipo “curto circuito”, ocorreu a formação de uma saliência esférica, nas extremidades do fio cortado, causada pela existência de tensão superficial quando o fio atinge o ponto de fusão (estado líquido) [40,41]. A presença deste fenómeno, tem como consequência o alargamento do diâmetro na ponta do fio, impossibilitando de o colocar novamente no furo.

Nas experiências desenvolvidas em laboratório, foi possível observar outros acontecimentos que dificultaram a concretização do projeto, como por exemplo, o salpico de fragmentos do fio ao redor, durante o processo de curto circuito. Fenómeno semelhante ao que acontece durante uma soldagem com excesso de corrente, produzindo grande quantidade de salpicos nas partes laterais do cordão de solda [42].

Graças a todos estes acontecimentos e a uma projeção de dificuldades futuras na regulação da amperagem correta, para promover uma fusão controlada, no sentido de não existirem deformações de forma do fio indesejáveis à resolução do projeto, decidiu-se mudar de estratégia relativamente ao corte do fio.

Corte do fio por cisalhamento

Por causa dos problemas já relatados a decidiu-se utilizar o sistema de corte por cisalhamento (Figura 85) (Figura 86) (Figura 87) (Figura 88) (Figura 89)[43].

Na projeção deste dispositivo era necessário que o mesmo cumprisse alguns parâmetros de qualidade, nomeadamente, que o dispositivo executasse um corte “limpo”, isto é, que não houvesse saliência de rebarbas que comprometessem a colocação do fio no próximo furo.

Outro cuidado a ter neste processo, seria o toleranciamento entre as duas superfícies cortantes, pois poderia ocorrer um fenómeno de sobreposição, ou seja, pelo facto do diâmetro do fio ser muito pequeno poderia levar a uma fácil deformação do mesmo, resultando no deslize do fio entre as duas superfícies cortantes, ao invés de ser cortado, como se pretendia (Figura 84).

Assim, devido a fácil deformação do fio, foi necessário ter outro aspeto em conta, já que esta característica do fio, obrigaria a um guiamento completo do mesmo, através da passagem do fio por um tubo mais rígido, durante todo o seu trajeto, pois qualquer obstrução à passagem do fio seria suficiente para ele se deformar e assim não dar continuidade ao processo de corte.

Este dispositivo seria constituído por dois motores de passo, onde um seria responsável pelo corte do fio e outro responsável pelo desenrolamento da bobine.

Para este teste foi utilizado fio de cobre por ser economicamente mais acessível que o ouro e conter propriedades mecânicas semelhantes a este [30] [31].

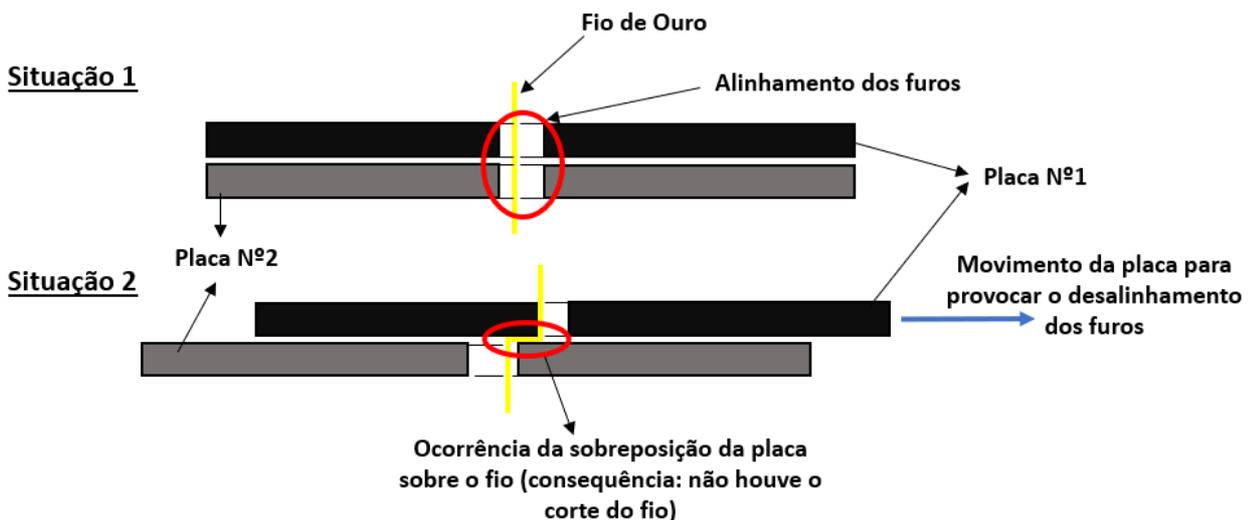


Figura 82 - Representação esquemática do fenómeno de sobreposição, que acontece quando o fio passa por entre as duas superfícies cortantes.

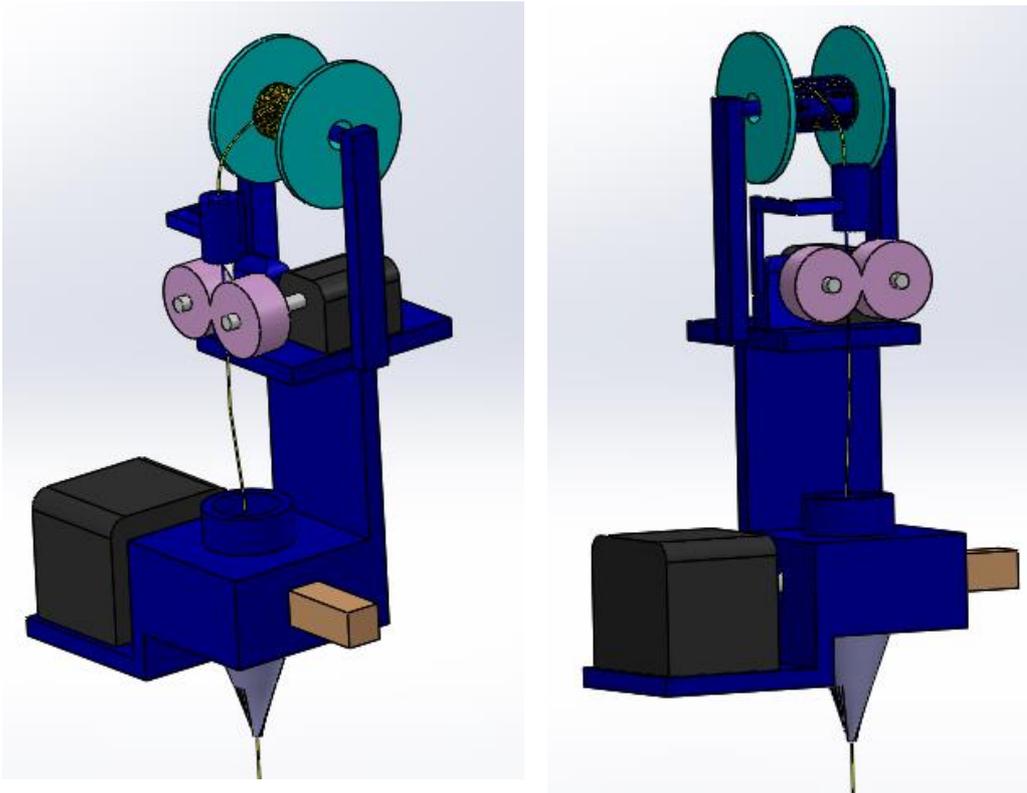


Figura 83 - Moldação de Solidwoks do dispositivo completo para o posicionamento de corte de filamentos através do desfasamento de 2 furos.

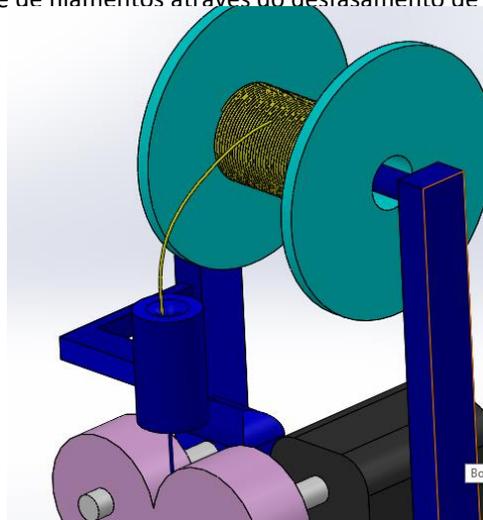


Figura 84 - Moldação em *Solidworks* do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte da bobine onde se encontra do fio.

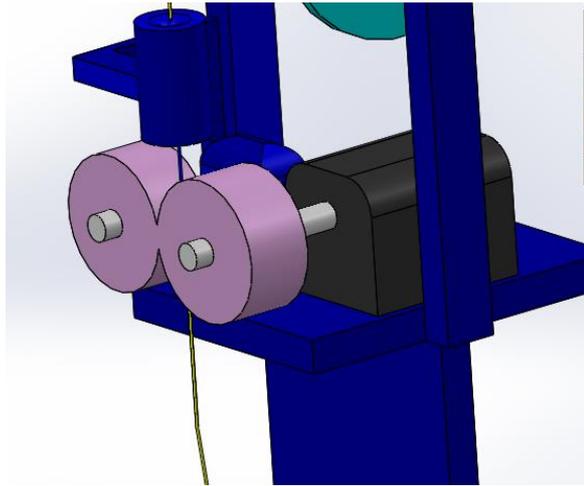


Figura 85 - Moldação em *Solidworks* do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte responsável pelo desenrolamento do fio.

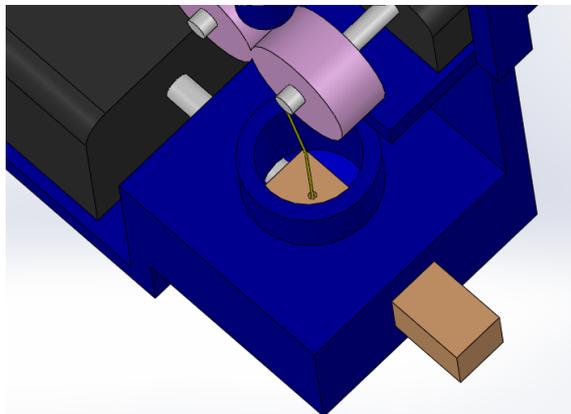


Figura 86 - Moldação em *Solidworks* do dispositivo responsável pelo posicionamento e corte de filamentos, focada apenas na parte responsável pelo corte do fio.



Figura 87 - Parte responsável pelo corte do fio, fabricada toda ela em aço (representada em duas vistas diferentes).

Explicação do funcionamento

Este processo é praticamente igual ao processo acima descrito (relativo ao corte por dispositivo elétrico) diferenciando-se apenas pelo modo de corte. Este processo desenrola-se através do posicionamento do dispositivo, com o intuito de alinhar o fio com o furo a ser preenchido. Após

esse alinhamento, é acionado o motor de passo responsável pelo desenrolamento da bobine, obrigando o fio a preencher o furo.

De seguida, é acionado outro motor de passo responsável pelo movimento transversal punção, provocando o desalinhamento dos furos e promovendo o corte do fio.

Posteriormente, é acionado novamente o motor de passo no sentido inverso, com o intuito de colocar a punção na posição de partida e, com esta ação, obter novamente o alinhamento dos furos do sistema de corte. Depois dos furos alinhados, seria acionado o motor de passo responsável pelo desenrolar da bobine, para que o fio desenrolado empurre o filamento cortado, caso este não entre no furo pela ação da força gravítica. O passo seguinte passa por acionar novamente o motor de passo da bobine que reverte o movimento para que o fio volte à posição anterior.

Finalmente, é reposicionado novamente o dispositivo num novo furo “alvo”, onde o fio esteja alinhado com o mesmo. Este processo é repetido o número de vezes necessário até se obter a imagem pixelizada pretendida (Figura 90).

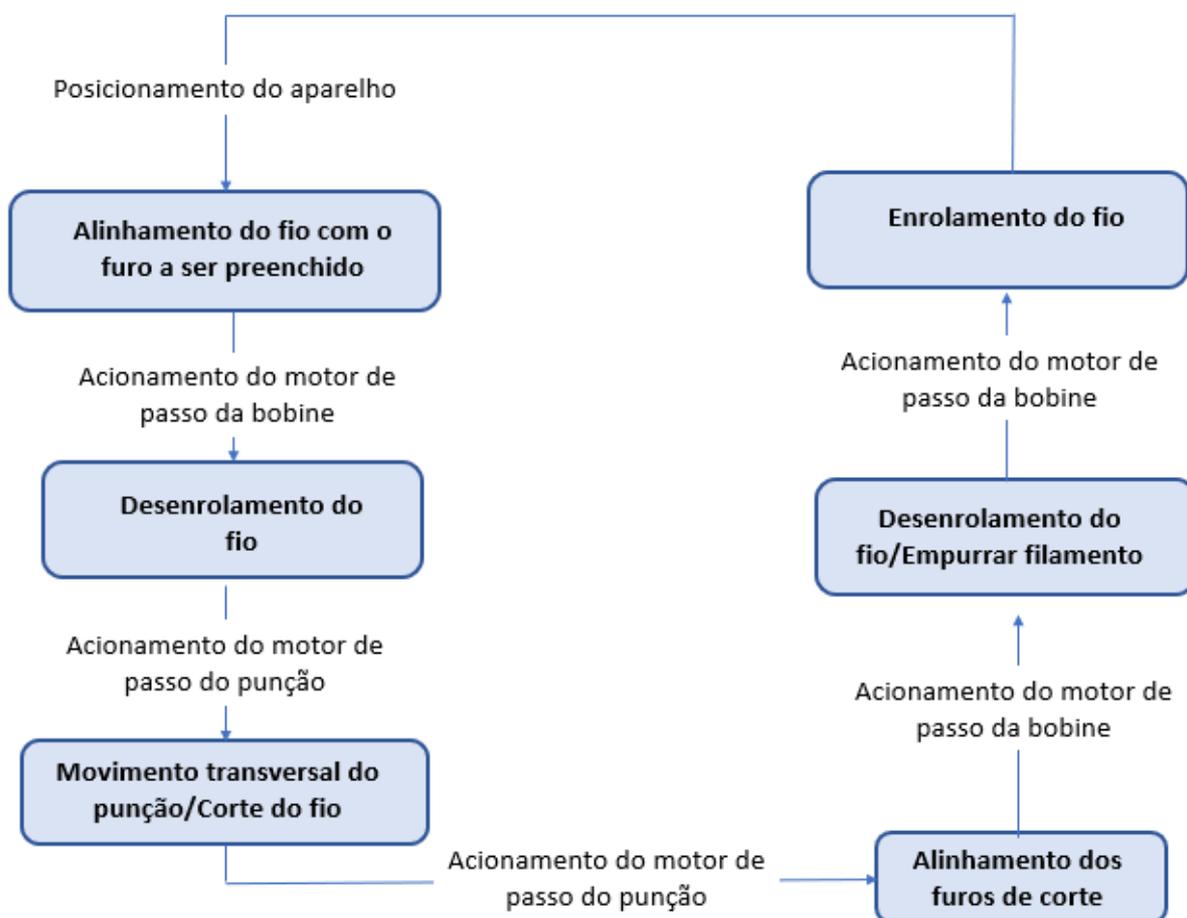


Figura 88 - Ciclo referente à execução de moedas pixelizadas, utilizando o corte por cisalhamento.

Dificuldade existentes que levou á conclusão do projeto

O diâmetro reduzido do fio (0.4mm) foi uma das razões pelas quais este projeto não foi concluído, devido a alguns acontecimentos experienciados durante a execução do projeto. Esses acontecimentos foram os seguintes:

O diâmetro reduzido do fio levou a que durante o processo de corte do fio, ocorresse a possibilidade de o fio passar entre as duas faces cortantes devido à sua fácil deformação (fenómeno da sobreposição explicado anteriormente), evitando assim que fosse cortado.

A segunda dificuldade foi relativa ao filamento cortado ser muito leve e de pequenas dimensões. Isto fez com que, fenómenos como eletricidade estática e presença de gorduras ou humidades nas superfícies do dispositivo, fossem condições suficientes para que os filamentos ficassem agarrados aos componentes do mesmo, impedindo que ele caísse para dentro do furo.

E por último, um outro acontecimento que impediu que o projeto não fosse terminado, deveu-se à necessidade de guiamento por causa da fácil deformação do fio. Problema este que já foi devidamente explicado.

Criação de um dispositivo posicionamento do tipo “pinça”

Devido às tentativa falhadas nas experiências relatadas anteriormente, decidiu-se projetar um dispositivo do tipo pinça, que consiste em duas hastes, onde uma delas se encontra fixa à base, sem qualquer movimento (Desenho Técnico nº 1), enquanto a outra haste tem movimento de rotação em relação a um pino (Figura 91)(Figura 92)(Figura 93) (Desenho Técnico nº 3) (Desenho Técnico nº 4). Este movimento é conseguido através do acionamento de um motor de passo, onde a sua rotação promove a rotação de um veio roscado (Desenho Técnico nº 12), fixado ao veio do motor através de um ligador (Desenho Técnico nº 2). A rotação do veio roscado promove o movimento vertical da porca (M6) (Desenho Técnico nº 13) (Desenho Técnico nº 14). Como a porca se encontra acoplada a uma extremidade da haste móvel, ocorre a rotação da haste.

Foi também necessário produzir um acessório que permitisse acomodar o motor de passo fixando, ao mesmo tempo, este conjunto à estrutura do aparelho (Figura 94) (Figura 95) (Desenho Técnico nº 15).

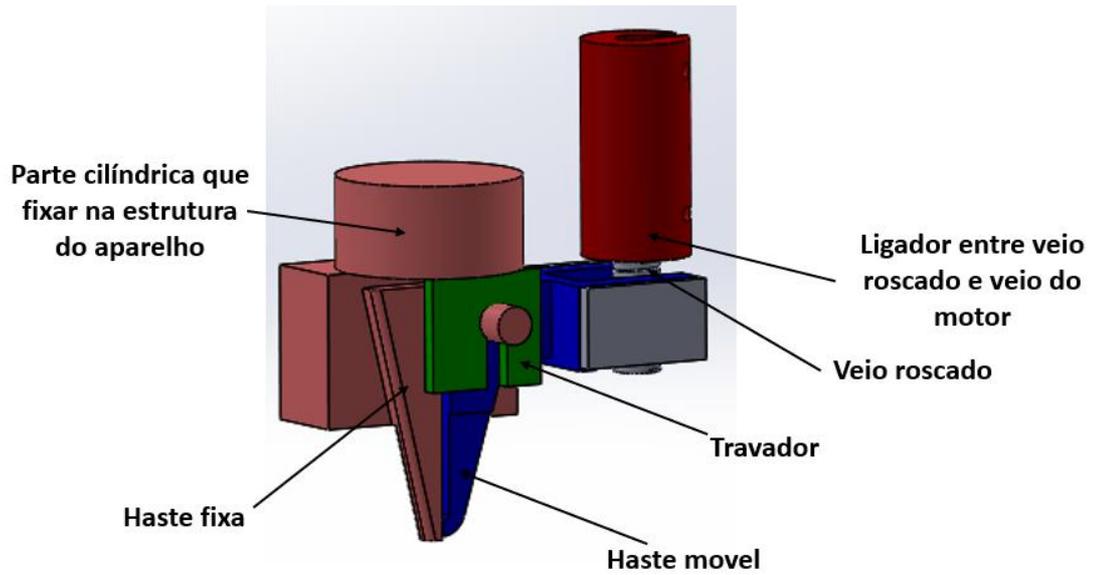


Figura 89 - Moldação em *Solidworks* da pinça mecânica, onde se encontram representados alguns componentes da estrutura, responsáveis pelo posicionamento dos filamentos.

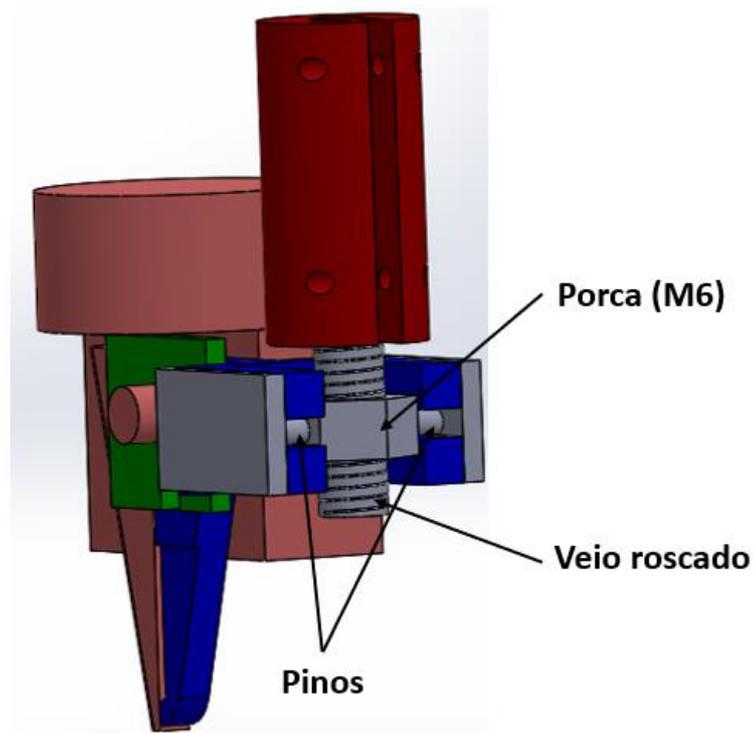


Figura 90 - Moldação em *Solidworks* da pinça mecânica, onde se encontram representados alguns componentes da estrutura, responsáveis pelo posicionamento dos filamentos.

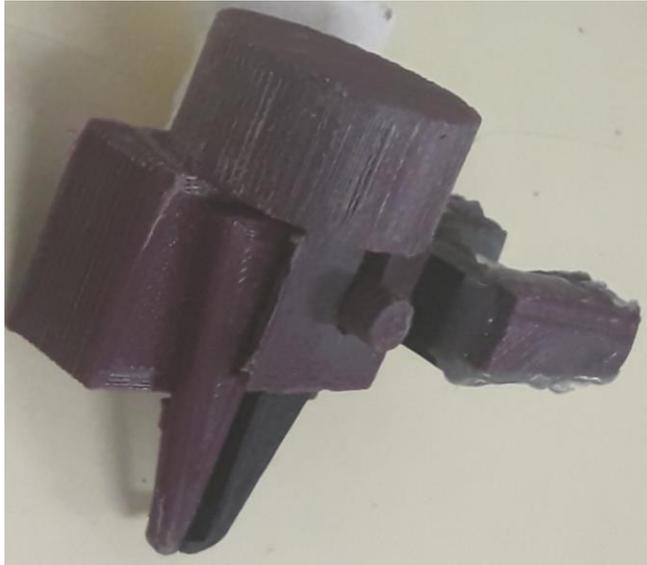


Figura 91 - Pinça mecânica impressa, para movimentar filamentos (fabricado em PLA).

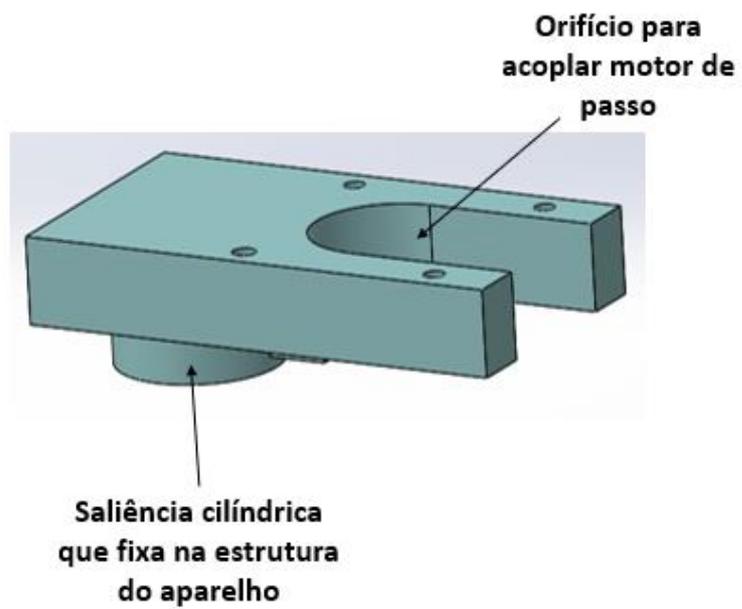


Figura 92 - Moldação em *Soliworks* da estrutura responsável pela acomodação do motor de passo.



Figura 93 - Acessório impresso em PLA para acomodar o motor de passo.

Produção de um tabuleiro para colocação dos fios

O tabuleiro consiste numa placa com furos igualmente distanciados formado por linhas (Figura 96) (Desenho Técnico nº 9). Para a furação é necessário respeitar algumas condições.

A profundidade do furo deve ser inferior, de modo a que o filamento fique com um comprimento suficientemente exposto à superfície, e assim, seja possível a pinça o agarrar.

As distâncias entre as linhas devem ter a distância suficiente para que a parte fixa e parte móvel da pinça não embarrem nos outros filamentos dispostos.

Quanto mais justa for a relação entre o diâmetro dos furos e o diâmetro do filamento menor será a probabilidade de ocorrer erros no posicionamento dos filamentos no local pretendido.



Figura 94 - Tabuleiro perfurado para a colocação de filamentos

Método de fabrico dos filamentos

Os filamentos produzidos foram processados de forma artesanal, recorrendo a um alicate, paquímetro digital, aparelho de abrasão de tribologia e um arame de cobre (0.33mm de diâmetro). O processo de fabricação dos filamentos consiste em rebarbar a extremidade do arame, recorrendo ao uso do aparelho de abração de tribologia, tendo por objetivo tornar a extremidade do fio pontiaguda, com um ângulo de cerca de 45° (Figura 97), e com isto facilitar a entrada do filamento no furo pretendido. Depois de concluída a etapa, o passo seguinte passa por cortar o filamento, recorrendo a um paquímetro digital e a um alicate, com um comprimento de aproximadamente 3mm.



Figura 95 - Filamento com a extremidade "afiada" com um ângulo de aproximadamente de 45°.

Produção de acessórios para ajuste da moeda

Os acessórios são uma placa com furo de diâmetro superior a 2 milímetros (Figura 100) relativamente ao diâmetro da moeda pixelizada pretendida (Figura 101), e também um acessório que permite o posicionamento da moeda dentro do furo desse tabuleiro, com a forma física semelhante a um pente (Figura 102). A placa contém furos a toda volta da borda do furo interno, tendo o conjunto destes furos o formato de um quadrado.

O acessório de posicionamento foi construído a partir de um pedaço de madeira com furos linearmente espaçados (de espaçamento igual aos furos da moeda pixelizada).

O comprimento da parte perfurada deste acessório é igual ao comprimento da parte perfurada do tabuleiro (Figura 103).

Os furos deste acessório serão preenchidos com filamentos de aço, devido à sua resistência à flexão. O comprimento destes filamentos é diferente em todos os acessórios, sendo os das extremidades mais curtas e o do centro um pouco mais longo, de forma a que se consiga alinhar e

posicionar primeiro os filamentos do centro do acessório com os furos da moeda pixelizada, e de seguida posicionar a moeda no furo interno do tabuleiro (Figura 103).

Depois de posicionado, procede-se ao uso de cola quente nas duas extremidades para se fixar a moeda para que em seguida se possa posicionar os filamentos.

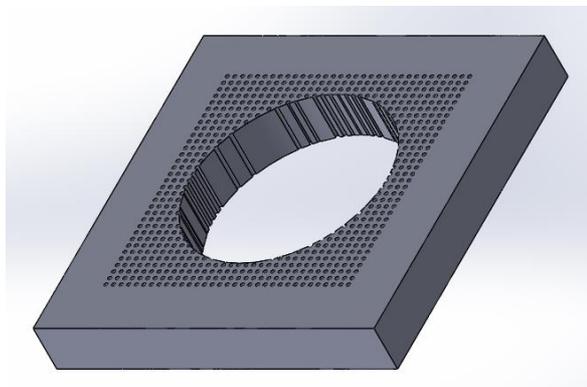


Figura 96 - Modulação em *Solidworks* da placa perfurada e com um furo interno para alojar a moeda perfurada.

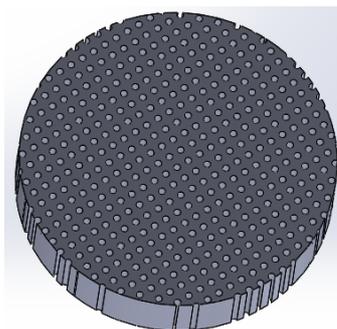


Figura 97 - Modulação em *Solidworks* da moeda perfurada.

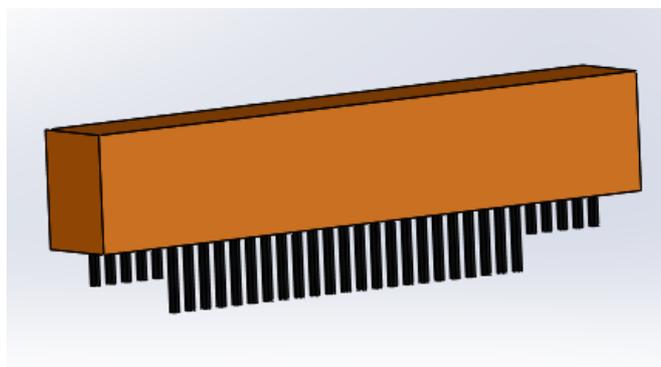


Figura 98 - Modulação em *Solidworks* do posicionador responsável pela centralização da moeda.

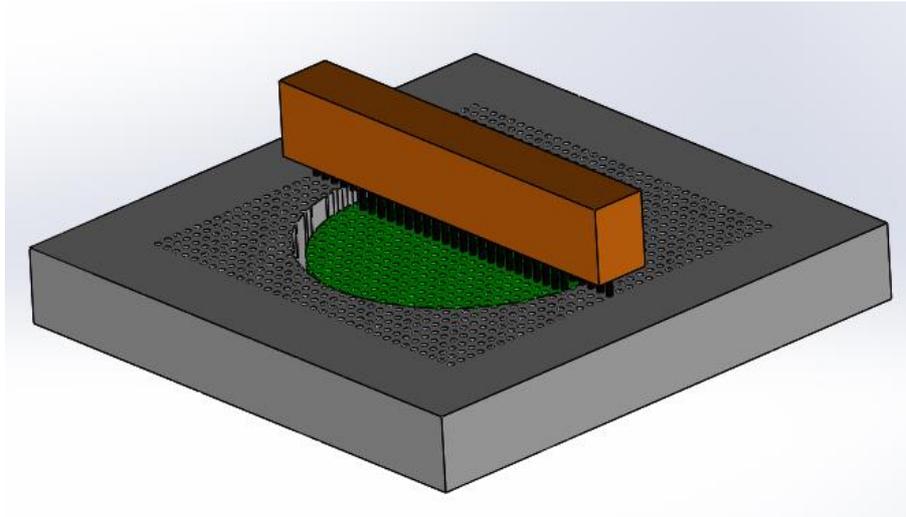


Figura 99 - Modulação em *Solidworks* do conjunto completo, representando a forma como é procedido a centralização da moeda.

Explicação do funcionamento

Este dispositivo começa por se posicionar no primeiro furo do tabuleiro de filamentos, com objetivo de transportar o primeiro filamento. Depois de levar o primeiro filamento da pinça mecânica, posiciona-se alinhada com furo que se pretende preencher. De seguida, coloca-se o filamento dentro do furo e abre-se as hastes da pinça. Posteriormente, após as hastes da pinça estarem abertas, ocorrem dois movimentos transversais, um na orientação do eixo do x e o outro na orientação do eixo do y, com o propósito de desprender o filamento das hastes da pinça devido aos fenómenos de eletricidade estática e presença de gorduras ou humidade nas superfícies da pinça. Por fim, depois de completo os movimentos transversais, a pinça volta para o tabuleiro dos filamentos para ir transportar o filamento seguinte. Este processo decorre até se preencher os furos pretendidos e até se obter a moeda pixelizada (Figura 104).

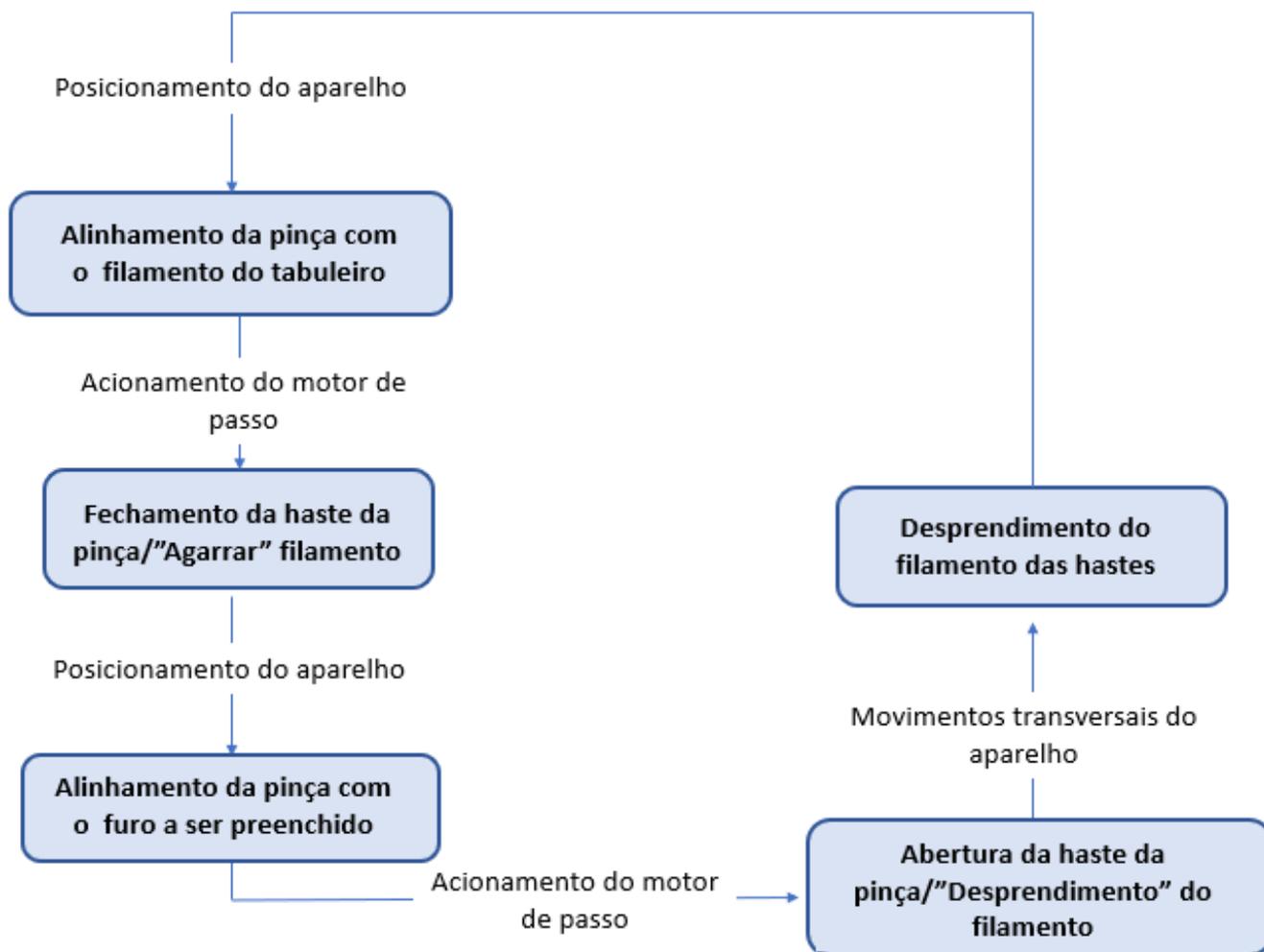


Figura 100 - Ciclo referente á execução de moedas pixelizadas, recorrendo a uma pinça

Software

De modo a obter um código de controlo do aparelho foi necessário passar pelos seguintes passos:

1º Passo: Passa pela escolha da imagem pretendida. No caso estudado como exemplo usou-se a imagem seguinte (Figura 105).



Figura 101 - Imagem original utilizada para a execução de uma moeda pixelizada.

2º Passo: Utilizando o programa de edição de imagem (*Coreldraw 2018*) para converter o tamanho da imagem original (pixel) num número de pixéis pretendido, neste caso usou-se a dimensão de 33x33 pixéis, é necessário que a imagem que se pretende desenhar na moeda, não ultrapasse os 23 pixéis, já que para um diâmetro de uma moeda de 2 € o número máximo de furos que se consegue colocar nessa mesma moeda são 23, sendo os furos de 0.4mm e 0.8mm de espaçamento (distancia entre centro de furos). Esta escolha tem como objetivo colocar uma imagem, com um tamanho máximo de 23 pixéis, numa matriz quadrada de 33 furos, fazendo com que sobre cinco furos em todo o contorno da imagem, sendo esses furos necessários para centralização da moeda.

3º Passo: Utilizando o mesmo programa, mas agora com intuito de converter a imagem alterada numa imagem com apenas duas cores (preto e branco), uma vez que um teste com apenas duas cores é mais simples. De notar que é possível desenvolver e criar um código para uma imagem pixelizada com mais cores. A imagem obtida através do passo dois e três é a imagem seguinte (Figura 106).



Figura 102 - Imagem modelada em Coreldraw 2018 de tamanho 33*33 pixéis e apenas 2 cores (preto e branco).

4º Passo: Passa por desenvolver um código em *MATLAB* que leia a imagem e a converta numa matriz quadrada de 33x33, de 0 e 1 ou em linguagem gráfica “true” ou “false”. O código desenvolvido é apresentado a seguir [39]:

```
L = imread('88.png'); % leitura da imagem alterada para um formato de 43pixeis x
43 pixeis e apenas 2 cores (preto e branco)
W = logical(L); %conversao da imagem num formato de uma matriz logica ("true" ou
"false"/"1" ou "0")

c=1;
d=1;
n=1
j=0
i=0

fileID = fopen('fl.txt','w');
for d=1:1:33
```

```

for c=1:1:33
    if W(c,d)1;

        %local de posicionamento do filamentos
        a=(c-1)*0.8;
        b=(d-1)*0.8;
        t=a+27      %valor 27.2  representa as coordenadas em x do 1°
furo(canto inferior esquerdo) ;

        r=b+94.8  %valor 94.6  representa as coordenadas em y do 1° furo(canto
inferior esquerdo) ;

        %local de deposição do filamento,movimentações transversais para o
        %filamento nao agarrar a pinça
        s=r+0.7
        n=t-1
        f=r-1.5

if j==33;

        i=1
        j=0

        b=40.3-i*10
end
        if j==33;

                i=2
                j=0
        end
        %levantamento dos filamentos
        v=j*2+18 %valor 12.3  representa as coordenadas em x do 1° filamentos(
tabuleiro de filamentos) ;
        b=51.9-i*10 %valor 51.7  representa as coordenadas em x do 1° filamentos(
tabuleiro de filamentos) ;
        z=b+0.9
        %levantamento dos filamentos
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-10 A-7.2\r\n',v,z);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.3 A-7.2\r\n',v,z);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.3 A-7.2\r\n',v,b);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.3 A7.2\r\n',v,b);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-10 A7.2\r\n',v,b);
        %local de posicionamento dos filamentos
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-10 A7.2\r\n',t,r);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.5 A7.2\r\n',t,r);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',t,r);
        fprintf(fileID,'G1 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',t,s);
        fprintf(fileID,'G1 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',t,r);
        fprintf(fileID,'G1 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',n,r);
        fprintf(fileID,'G1 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',t,r);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-15 A-7.2\r\n',t,r);%empurrar filamento
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-15 A-7.2\r\n',t,f);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-24.5 A-7.2\r\n',t,f);
        fprintf(fileID,'G0 X%f Y%f Z-10 A-7.2\r\n',t,f);

```

```

j=j+1
end

end

end

fclose(fileID);

```

O resultado da matriz extraída em *MATLAB* é apresentada a seguir (Figura 107):

Figura 103 - Exemplo da matriz lógica extraída, recorrendo ao programa de *Matlab*, da imagem moldada em *software Coreldraw* (true = branco, false=preto).

4. VALIDAÇÃO E RESULTADOS

4.1 Validação do posicionamento de cristais

4.1.1 Deposição de cola

Hardware

O teste de validação passou pela colocação de cola nos três furos de um cabo de talher, de modo a que, posteriormente, fosse aplicado o posicionamento dos cristais. As dimensões desses apresentavam um diâmetro de 3.1 mm e 2.8 mm de profundidade. A cola aplicada neste teste foi uma pasta de solda, utilizou-se na produção de circuitos elétricos (Figura 108). Nesta experiência foi aplicada uma pressão de 2 bar necessária para pressionar a saída de cola da seringa. O tempo de espera, mantendo a pressão para pasta de solda sair em cada furo, foi de três segundos.

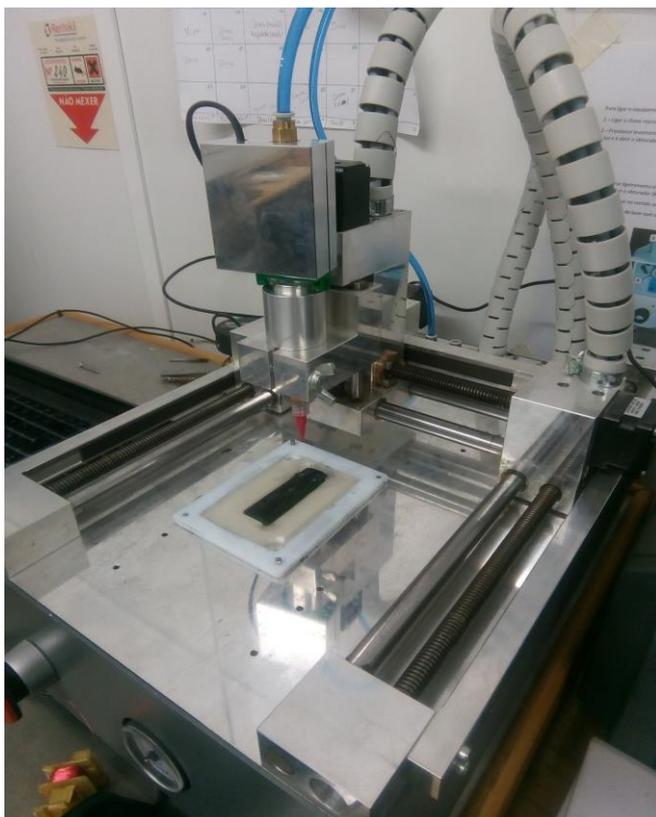


Figura 104 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder a deposição de cola.

Software

Para controlar o acessório de deposição da pasta de solda foram apenas utilizadas as coordenadas dos furos. Neste processo de deposição de cola foi igualmente realizada uma espera de três segundos, de forma a permitir que a cola saísse nesse período.

Resultados

Depois da experiência efetuada, foi possível verificar a extrema dificuldade da saída de pasta de solda pela extensão de saída, devido à alta viscosidade da pasta de solda e também ao percurso que o fluido percorre. De lembrar que, nesta extensão de saída o fluido é extraído a partir da parte lateral do bico de saída, o que promove uma dificuldade extra na expulsão do fluido da seringa, e provoca uma pequena quantidade de cola depositada em cada furo (Figura 109).



Figura 105 - Resultado obtido da deposição de cola nos furos.

4.1.2 Colocação dos cristais

Hardware

O teste de aprovação passou pela colocação de três cristais (Figura 110) numa parte da amostra de um cabo de talher. Os três cristais foram posicionados em diferentes angulações, um dos cristais com angulação de 25°, outro com angulação de 0° e o último com angulação de -25°.

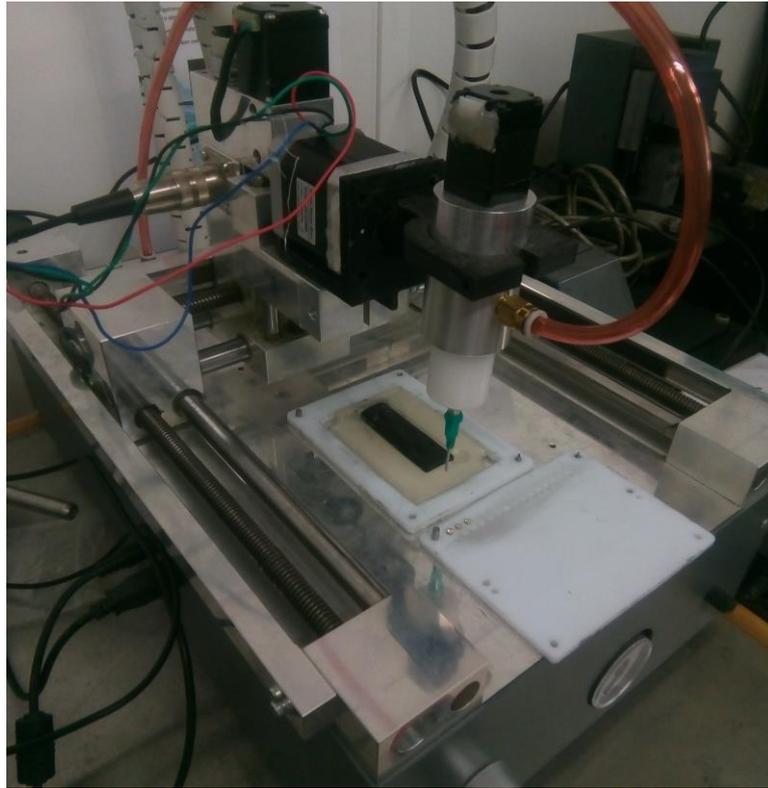


Figura 106 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder ao posicionamento dos cristais.

Software

Relativamente ao software, escreveu-se um código de controlo em *Gcode*, que permitiu a colocação dos três cristais no seu devido local.

Resultados

Desta validação foi possível verificar que todos os três cristais foram posicionados de forma correta nos seus respetivos furos, sem qualquer problema e de forma rápida e precisa (Figura 111).

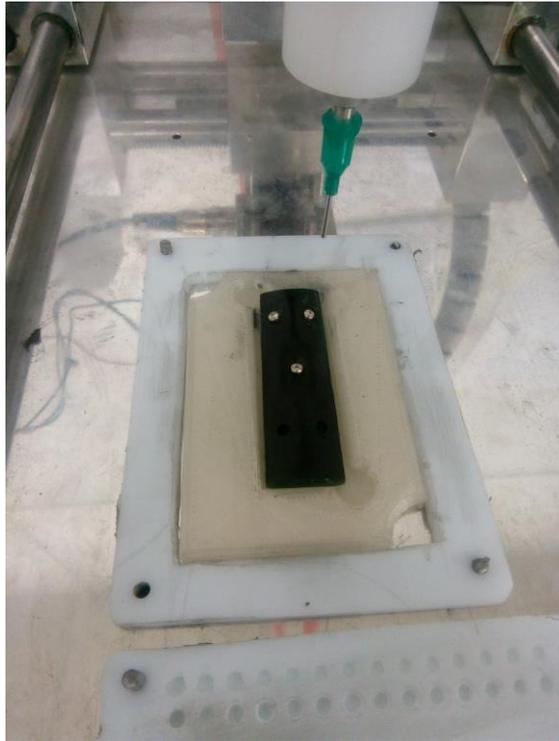


Figura 107 - Resultado obtido do posicionamento dos 3 cristais.

4.2 Teste de produção de uma moeda pixelizada

4.2.1 Teste do dispositivo de corte através do desfasamento de furos

Neste dispositivo foi possível projetar parte da sua estrutura, onde foi possível validar o corte do fio. Mediante isto, em seguida encontram-se os resultados do teste de validação do corte desta parte do sistema. Neste teste foi utilizado fio de corte de 0.33 mm, tendo com objetivo avaliar o estado do corte deste dispositivo, isto é, se existe algum tipo de rebarba ou não. Nesta validação a movimentação da punção foi feita manualmente, tendo sido projetado o uso de um motor de passo.

Resultados

Através desta experiência foi possível verificar que o corte efetuado pelo dispositivo projetado, não produz nenhuma rebarba ou saliência na superfície cortada, como se pode verificar na figura 112. Durante este teste não ocorreu nenhum fenómeno relacionado com a passagem do fio entre as superfícies cortantes, impedido o corte do próprio fio.



Figura 108 - Apresentação de um exemplo de teste do corte do fio de cobre, através do dispositivo projetado, sem aparência de qualquer rebarba nas suas extremidades (imagem obtida através de um microscópio ótico apresentado na figura seguinte (Figura 113)).

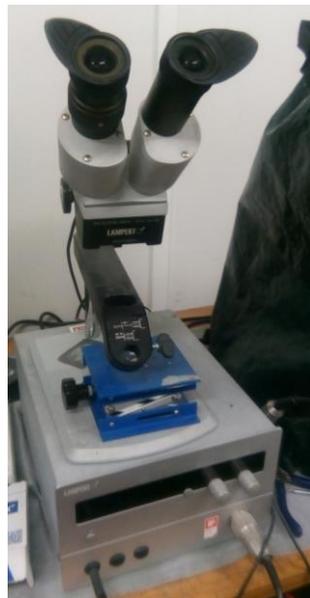


Figura 109 - Microscópio ótico *Lamport*.

4.2.2 Teste da pinça mecânica

Hardware

O teste de validação passou pela colocação de seis filamentos nos furos, linearmente distribuídos em forma de uma matriz quadrada, numa placa de madeira (Figura 114). Estes seis filamentos, linearmente espaçados em linha, encontram-se dispostos num tabuleiro.

Estes filamentos apresentam um diâmetro de 0.33 mm e um comprimento de aproximadamente 2.65 mm, tendo atingido estes valores após um processo de desgaste por abrasão,

realizado com o intuito de tornar uma das extremidades do filamento pontiaguda através da eliminação das arestas de uma extremidade.

As partes pontiagudas dos filamentos foram colocadas nas partes inferiores dos furos do tabuleiro dos filamentos, de modo a que quando fosse posicionada pelo dispositivo desenvolvido, essa extremidade pontiaguda fosse a primeiro a entrar dentro do furo. Assim, devido à redução da área através da eliminação da aresta, existe uma maior probabilidade de o posicionamento do filamento ser executado com êxito. Antes de iniciar o processo de posicionamento foi necessário calibrar a máquina.

A parte do posicionamento da moeda não foi possível testar devido a problemas com a alfândega portuguesa, levando a que não houvessem as ferramentas necessárias para a fabricação da mesma, tendo sido por isso, apenas projetada esta parte em Solidworks.

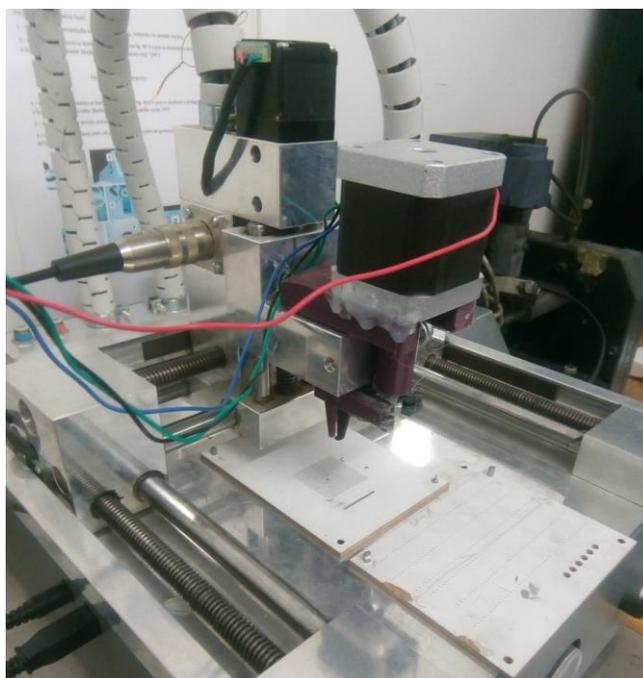


Figura 110 - Conjunto de todos os acessórios acoplados para se proceder ao posicionamento dos filamentos.

Software

Para o desenvolvimento do controlo do dispositivo desenvolvido, foi criado um código G, igual ao demonstrado na parte do “Metodologia-Criação de uma imagem pixelizada-*Software*” (no ponto 3.3 do índice desta dissertação) para este dispositivo (inclusive a mesma imagem).

Antes de iniciar o processo de posicionamento foi necessário calibrar a máquina. Este processo de calibração passou por posicionar o primeiro filamento no furo do canto inferior esquerdo da matriz da placa perfurada. A partir desse posicionamento foi possível retirar tanto as coordenadas do primeiro filamento do tabuleiro de filamentos, como também as coordenadas do primeiro furo

do canto inferior esquerdo da matriz da placa. Posteriormente, são colocadas no código G desenvolvido, de forma a obter com estes dados as posições iniciais de cada uma das placas (placa perfurada em forma de matriz e tabuleiros de filamentos).

Resultados

Desta experiência foi possível observar que todos os filamentos foram posicionados nas suas coordenadas respectivas corretamente. Foi possível também observar que alguns filamentos não conseguiram entrar na totalidade nos furos, mesmo utilizando durante este método de posicionamento, uma etapa específica para “empurrar” o filamento depois de ele estar parcialmente inserido no furo. Deste processo de forçamento da entrada do filamento, resultou o empeno de alguns destes filamentos testados. Estes acidentes ocorridos devem-se à fácil deformação dos próprios filamentos e à relação entre os diâmetros dos furos e filamentos ser baixa (0.4 e 0.33 respetivamente) o que promove um atrito elevado entre as superfícies dos furos e o filamento, criando uma resistência a sua entrada (Figura 115). Em alguns filamentos a força exercida para o “empurrar” decorreu sem causar qualquer dano no filamento.

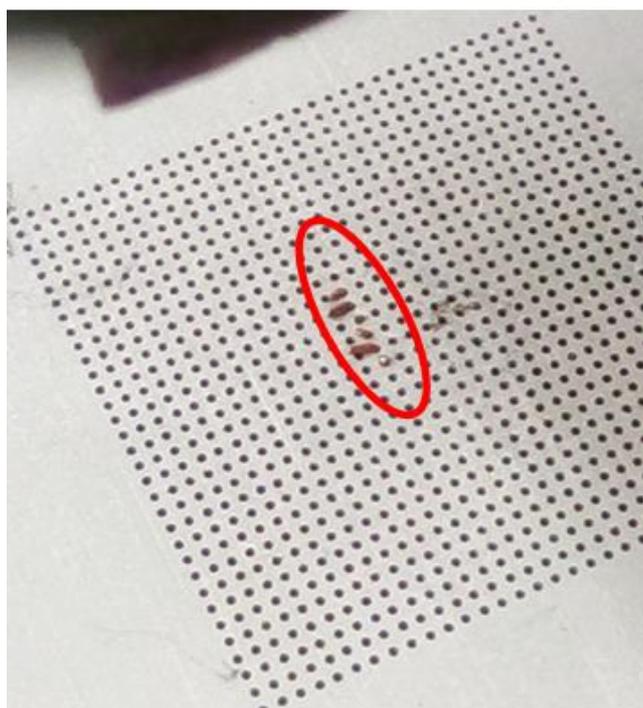


Figura 111 - Resultado obtido depois de realizado o ensaio de posicionamento dos filamentos.

5. CONCLUSÃO

Depois de todas as experiências realizadas foi possível retirar algumas conclusões acerca de cada objetivo predefinido inicialmente no projeto. As conclusões serão apresentadas tendo em conta a sua ocorrência cronológica.

Em primeiro lugar, nos ensaios para a fabricação de circuitos elétricos foi colocado um *led* num pequeno circuito, não apresentando qualquer problema durante todas as operações da sua produção e reconhecimento do aparelho (maquinagem, deposição de cola, posicionamento do led).

Quanto à parte de avaliação dos toleranciamentos do aparelho, foram efetuados três testes diferentes. O teste de repetibilidade, o teste da resolução mecânica mínima e teste do toleranciamento dimensional do aparelho. Relativamente ao teste da repetibilidade, foi avaliado o desfasamento entre três deslocamentos, para as mesmas coordenadas de posição, quando comparadas com uma posição inicialmente pré-definida, nos três eixos de liberdade do equipamento. Desta experiência, concluiu-se que não existe qualquer desfasamento nos três eixos quando comparados com a posição inicial definida, isto utilizando um comparador com uma resolução a máxima de 0.01mm. Para a realização do teste com mais rigor, seria necessário o uso de um comparador com uma resolução máxima pelo menos 10 vezes superior (0.001mm), oferecendo assim uma avaliação mais real do desfasamento entre posicionamentos para um mesmo ponto do equipamento. Não se fez pela indisponibilidade dessa máquina nos laboratórios onde se realizou este projeto.

Quanto ao teste da resolução mecânica mínima foi possível apenas confirmar os valores apresentados nas especificações do aparelho, já que houve limitações de instrumentação na mediação da resolução mecânica mínima, uma vez que o valor máximo medido pelo instrumento era de 10 micrómetros e o valor a confirmar também era de 10 micrómetros. Em condições de real avaliação, era necessário um instrumento com uma grandeza de resolução maior (pelo menos de 1 micrómetro), e por isso, foi apenas possível confirmar o valor.

No que diz respeito ao teste de tolerância, realizado a partir da medição de diferentes comprimentos de rasgos realizados pelo aparelho, concluiu-se mediante os ensaios que o aparelho apresenta uma tolerância máxima de 149.3 micrómetros, uma tolerância mínima de 7.2 micrómetros e uma tolerância dimensional média de 51.0 micrómetros com um desvio padrão de 12.06 micrómetros. Assume-se que neste valor existe a possibilidade de existirem alguns erros, nomeadamente na medição digital através do *software Image J*.

Em relação ao acessório idealizado para a colocação de cola e, posteriormente, a colocação de perdas incrustadas, foi idealizado em duas etapas diferentes. Primeiramente a colocação de cola e de seguida a colocação de cristais. Com base nos ensaios realizados, relativamente à colocação de cola, não foi possível retirar nenhum resultado explícito referente às condições de trabalho durante a deposição de cola, como por exemplo, a pressão de saída e o tempo de espera, visto que, o fluido utilizado como cola tinha elevada viscosidade, não permitindo que este flui-se pelas partes laterais da extensão de saída. É de referir que esta extensão de saída de cola só permite colocar cola em furos com inclinação inferior a 25° e com um diâmetro aproximadamente igual a 2.6mm, para que a cola seja minimamente espalhada pela superfície lateral do furo. Quanto à etapa de colocação dos cristais, ocorreu de uma forma correta durante o posicionamento dos mesmos, nas suas diferentes angulações, posicionando-os com exatidão no seu devido lugar. Este acessório permite a colocação de cristais em furos com uma angulação inferior a 45°.

Relativamente ao ensaio no posicionamento dos filamentos, a execução do acessório, pinça mecânica, foi validada com sucesso para desempenho do seu objetivo, pois durante todo o ensaio, na colocação dos seis filamentos, posicionou-os todos no seu respetivo lugar. É de salientar também que apesar de os filamentos terem sido posicionados nos seus respetivos furos, estes não entraram completamente, graça à relação entre diâmetro do furo e o diâmetro do fio ser um pouco justa, levando à flexão dos filamentos causada pelo elevado atrito entre as superfícies. Assim, seria necessário realizar um reajuste nesta relação de diâmetros. O acessório impresso, encontra-se adequado para diferentes diâmetros de filamentos e para diferentes comprimentos. É também possível diversificar um pouco a complexidade na pixelização de uma moeda, recorrendo ao uso de diferentes colorações dos filamentos, apenas havendo a necessidade de alterar o código de controlo. Um dos maiores entraves na utilização deste acessório é a colocação dos filamentos no tabuleiro, visto que é uma tarefa bastante demorada e de alguma dificuldade, já que requer a colocação dos filamentos no tabuleiro, um por um, de forma manual. Como é referido neste ponto, não foi possível concretizar um acessório responsável pelo alinhamento/posicionamento da moeda devido a problemas na alfândega.

É importante também mencionar as principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste projeto. A primeira deve-se ao facto de ter sido a primeira vez que se criou um projeto desde a fase criativa até à fase de ensaios, o que ocasionou a ocorrência de alguns erros quanto aos métodos de trabalho. Por exemplo, a idealização de um projeto ser muito diferente da sua concretização, o que levou a que houvesse bastante tentativa erro durante todo o processo. A

segunda dificuldade encontrada deveu-se à escala de valores que este projeto exigia, uma vez que no cotidiano, trabalha-se com objetos de grandeza macrométrica (metro, centímetro) e este projeto exigia uma escala inferior (micrométrico). Esta diferença de escalas obrigava a uma maior exigência no rigor dos processamentos dos materiais, um toleranciamento mais preciso, entre outros.

Em suma, esta dissertação concretizou de forma geral todos os objetivos definidos inicialmente.

6. TRABALHOS FUTUROS

6.1 Rotação do cabo de talher

Depois da experiência no projeto de posicionamento dos cristais, considera-se que será possível melhorar as capacidades de desempenho da máquina para a mesma função, relativamente à colocação de cola e ao posicionamento dos cristais. Mediante a experiência obtida, acredita-se que um projeto futuro poderia focar-se na criação de um dispositivo que promova a rotação do talher e não a rotação da pistola de vácuo. Isto permitiria a colocação de cristais em todo o cabo, sem o tirar da mesma posição. Permitiria também uma melhor estabilidade em relação ao sistema desenvolvido, uma vez que a rotação do cabo do talher tem muito menos inércia que a rotação da pistola de vácuo, o que tornaria o sistema desenvolvido mais estável.

6.2 Tapete rotativo

De forma a automatizar mais os processos de fabrico desta máquina, refletiu-se que um projeto futuro poderia concentrar-se em adaptar ao aparelho um tapete rolante movido por motores de passo, onde seria possível implementar um processo contínuo, seja ele no posicionamento de cristais em cabos de talheres, no posicionamento de filamentos em moeda perfuradas linearmente ou também na produção de PCB em série, tornando qualquer processo de posicionamento num processo contínuo na fabricação de vários exemplares.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. C. Technology, "Applied Control Technology."
- [2] W. Gao *et al.*, "CIRP Annals - Manufacturing Technology Measurement technologies for precision positioning," 2015.
- [3] D. Myszka, *Machines and mechanisms: Applied Kinematic Analysis*. 2004.
- [4] T. H. B. Hashim, A. Y. and N. A., "Identification of Friction Models for Precise Positioning System in Machine Tools," *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 569–578, 2013.
- [5] R. M. MAHBUBUR, "POSITIONING ACCURACY IMPROVEMENT IN FIVE-AXIS MILLING BY POST PROCESSING," vol. 37, no. 2, 1995.
- [6] H. Gong, L. Cao, and J. Liu, "Improved positioning of cylindrical cutter for flank milling ruled surfaces," vol. 37, pp. 1205–1213, 2005.
- [7] Y. S. K Hiruma, S Suzuki, R Miyazawa, *Scara robot*. 2001.
- [8] D. Milutinovic and M. Glavonjic, "Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner," pp. 1217–1229, 2011.
- [9] F. Gar, "TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL," 2013.
- [10] KUKA, "Braço robótico de 7 graus de liberdade," 2020. [Online]. Available: <https://www.thinkrobotics.co.nz/kuka-robots.html>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [11] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom," 1966.
- [12] K. S. Instrumente), "hexapod texto," 2020. [Online]. Available: <https://www.pi-usa.us/en/products/6-axis-hexapods-parallel-positioners/>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [13] E. H. Anderson, M. F. Cash, J. L. Hall, and G. W. Pettit, "HEXAPODS FOR PRECISION MOTION AND VIBRATION CONTROL," no. April, pp. 1–5, 2004.
- [14] K. S. Instrumente), "estrutura hexapod," 2020. [Online]. Available: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/parallel-kinematic-hexapods/h-820-6-axis-positioner-with-controller-700825/>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [15] ABB, "Technical guide No. 9 Guide to Motion Control Drives," no. 9, pp. 1–64, 2011.
- [16] M. Scarpino, *MOTORS for MAKERS: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*. 2015.
- [17] aliexpress, "Motor DC (imagem)," 2020. [Online]. Available: <https://pt.aliexpress.com/item/32814556057.html>. [Accessed: 20-Feb-2020].
- [18] R. Condit, "Stepping Motors Fundamentals," *Microchip Technol.*, vol. AN907, pp. 1–22, 2004.

- [19] R. and Electronics(Pololu), “Motor de passo parte interna,” 2020. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1200>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [20] U. robot parts (Jsumo), “servomotor completo,” 2020. [Online]. Available: <https://www.jsumo.com/mg996r-servo-motor-digital>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [21] H. J. Van De Straete, P. Degezelle, J. De Schutter, and R. J. M. Belmans, “Servo motor selection criterion for mechatronic applications,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 3, no. 1, pp. 43–50, 1998.
- [22] (How To Mechatronics)(Youtube), “parte interna servomotor,” 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=LXURLvga8bQ>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [23] K. S. (Physik Instrumente), “posicionador piezoelétrico,” 2020. [Online]. Available: https://www.pi-usa.us/en/products/piezo-flexure-nanopositioners/6-axis-piezo-nanopositioning-stages/p-587-6-axis-precision-piezo-stage-201600/#imagegallery_grid-1. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [24] Sintef(Sintef), “Processo piezoelétrico,” 2020. [Online]. Available: <https://www.sintef.no/en/piezoelectric-materials-for-sensors-actuators-and-ultrasound-transducers/>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [25] M. Moallem, M. R. Kermani, R. V Patel, and M. Ostojic, “Flexure Control of a Positioning System Using Piezoelectric Transducers,” vol. 12, no. 5, pp. 757–762, 2004.
- [26] M. Kalmar, A. Boese, I. Maldonado, R. Landes, and M. Friebe, “NITINOL-based actuator for device control even in high-field MRI environment,” *Med. Devices Evid. Res.*, vol. 12, pp. 285–296, 2019.
- [27] K. Mølhave, T. Wich, A. Kortschack, and P. Bøggild, “Pick-and-place nanomanipulation using microfabricated grippers,” vol. 2434.
- [28] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, “Soft Robotic Grippers,” vol. 1707035, no. May, 2018.
- [29] H. S. Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Ralf Steinmann, *Robot Grippers*. 2006.
- [30] Shopee(shopee), “Garra mecânica de 2 haste,” 2020. [Online]. Available: <https://shopee.com.my/Mechanical-gripper-for-robot-arm-MG996-arduino-i.31554727.1003525405>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [31] Dreamstime(dreamstime), “garra autocentrante,” 2020. [Online]. Available: <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-metallic-industrial-mechanical-claw-junkyard-isolated-white-background-d-illustration-image83171648>. [Accessed: 15-Jan-2020].

- [32] A. distribution(automation Distribution), “estrutura pneumática de 4 ventosas,” 2020. [Online]. Available: <https://automationdistribution.com/robotiq-epick-vacuum-gripper-for-universal-robots/>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [33] tricorder project(tricorder Project), “Extensão pequena pneumática,” 2020. .
- [34] Schmalz(schmalz), “Magneto pequeno,” 2020. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/special-grippers/magnetic-gripper/magnetic-grippers-sgm>. [Accessed: 15-Jan-2020].
- [35] Solostocks, “Imã permanente,” 2020. [Online]. Available: <https://www.solostocks.com.br/venda-produtos/maquinaria-equipamentos-tratamento-residuos/telas-giratorias/ima-permanente-9885976>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [36] I. À, E. Mecânica, and J. A. Almacinha, “Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica INTRODUÇÃO À METROLOGIA DIMENSIONAL,” 2016.
- [37] A. Şirinterlikçi, M. Tiryakioğlu, A. Bird, A. Harris, and K. Kweder, “Repeatability and Accuracy of an Industrial Robot: Laboratory Experience for a Design of Experiments Course,” *Technol. Interface Journal/Spring*, no. i, 2009.
- [38] E. Manuela and G. P. Fernandes, “Estatística aplicada,” 1999.
- [39] S. Shin, S. Suh, and I. Stroud, “Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications,” vol. 39, pp. 1–16, 2007.
- [40] T. R. Anthony and H. E. Cline, “Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying,” *J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 9, pp. 3888–3894, 1977.
- [41] J. G. Kirkwood and F. P. Buff, “The statistical mechanical theory of surface tension,” *J. Chem. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 338–343, 1949.
- [42] F. Silva, *Tecnologia da Soldadura. Uma Abordagem Técnico-Didática*. Publindústria, 2014.
- [43] E. Bresciani Filho, I. B. Da Silva, G. F. Batalha, and S. T. Button, *Conformação Plástica dos Metais*. 2011.
- [44] Matweb, “Propriedade físicas do ouro,” 2020. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=AMEAu00&ckck=1>. [Accessed: 02-Feb-2020].
- [45] M. (matweb), “Propriedades físicas do cobre,” 2020. [Online]. Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=9aeb83845c04c1db5126fada6f76f7e. [Accessed: 02-Feb-2020].

8. ANEXOS

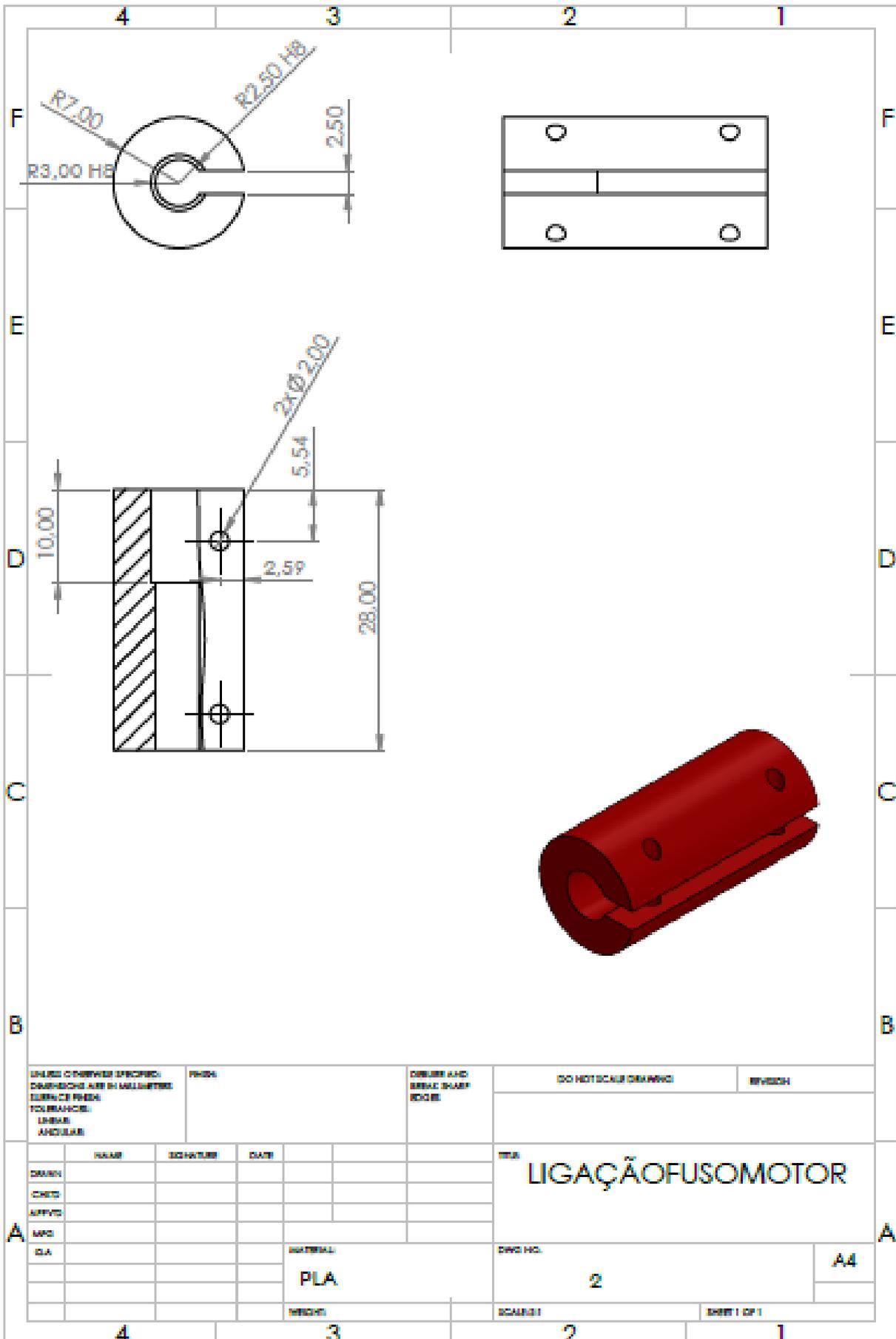
8.1. Anexo I

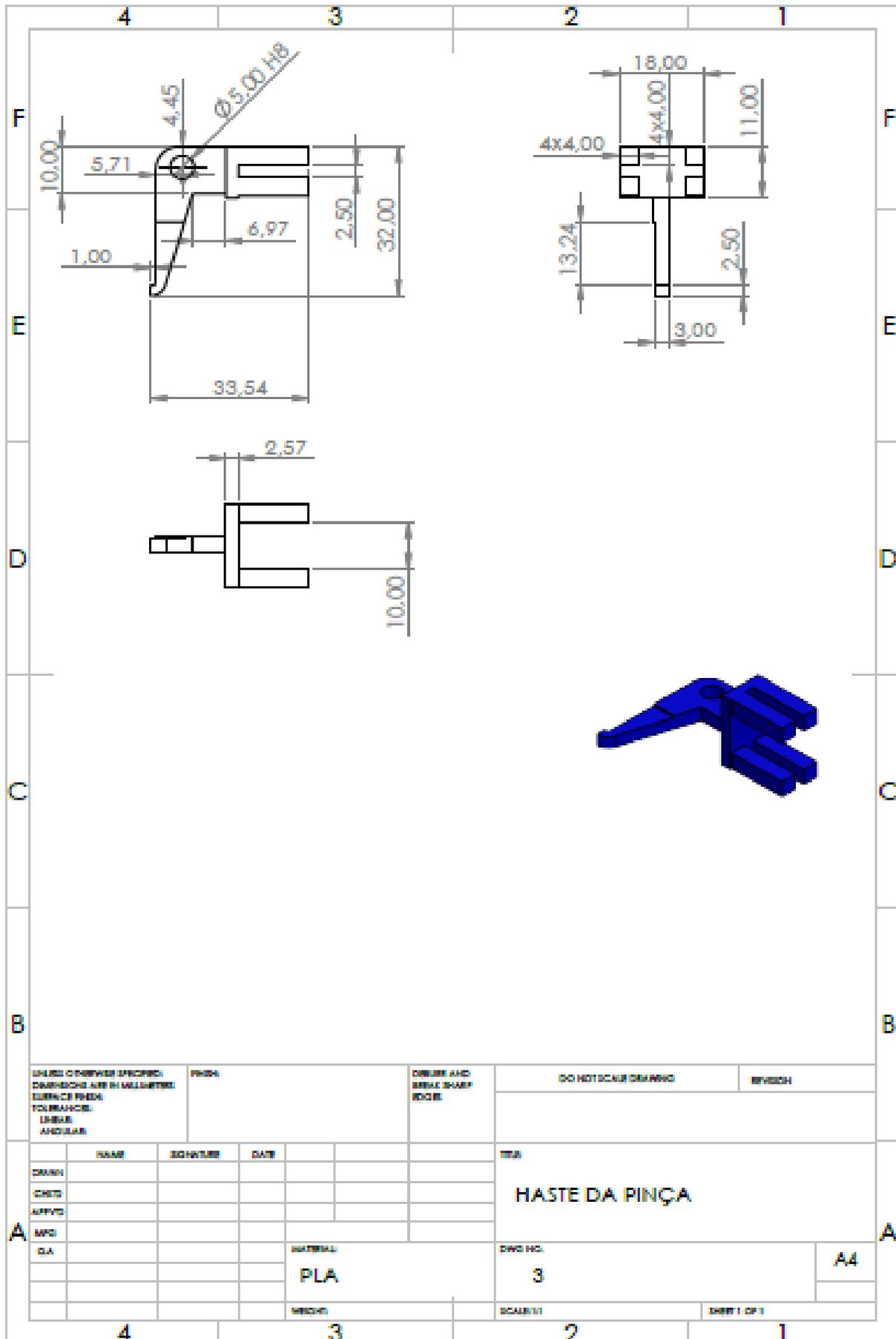
Manual da máquina disponível em anexo á mesma (Propriedade do fabricante do aparelho).

8.2 Anexo II

Anexo II disponível através do requerimento do mesmo anexo ao aluno que realizou esta dissertação de mestrado.

8.3 Desenhos técnicos





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH
TOLERANCES:
LINEAR
ANGULAR

FINISH

CHAMFER AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRWN					
CHKD					
APPVD					
MFG					
QA					
				MATERIAL	
				PLA	
				WEIGHT	

TITLE

HASTE DA PINÇA

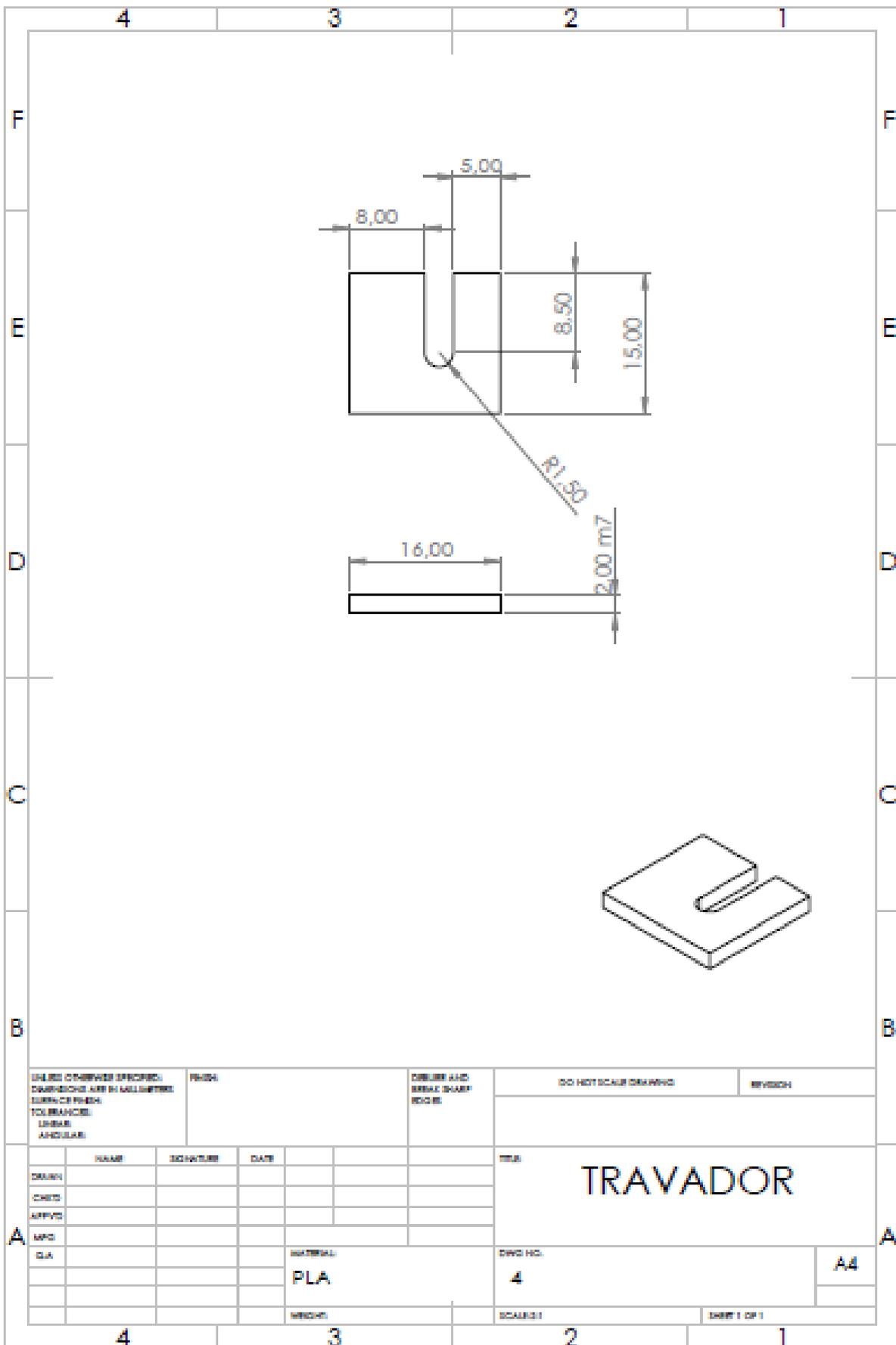
DWG NO.

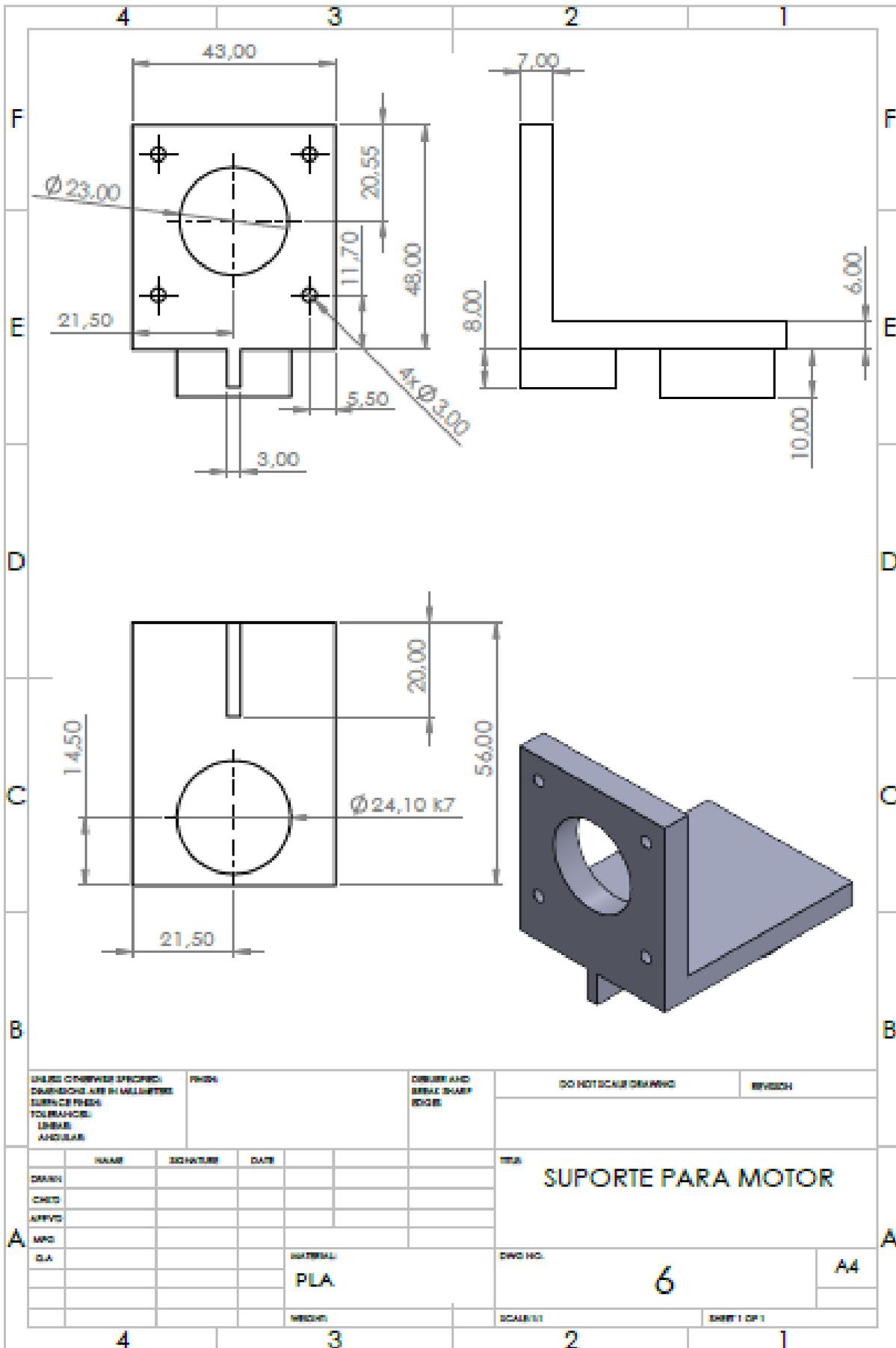
3

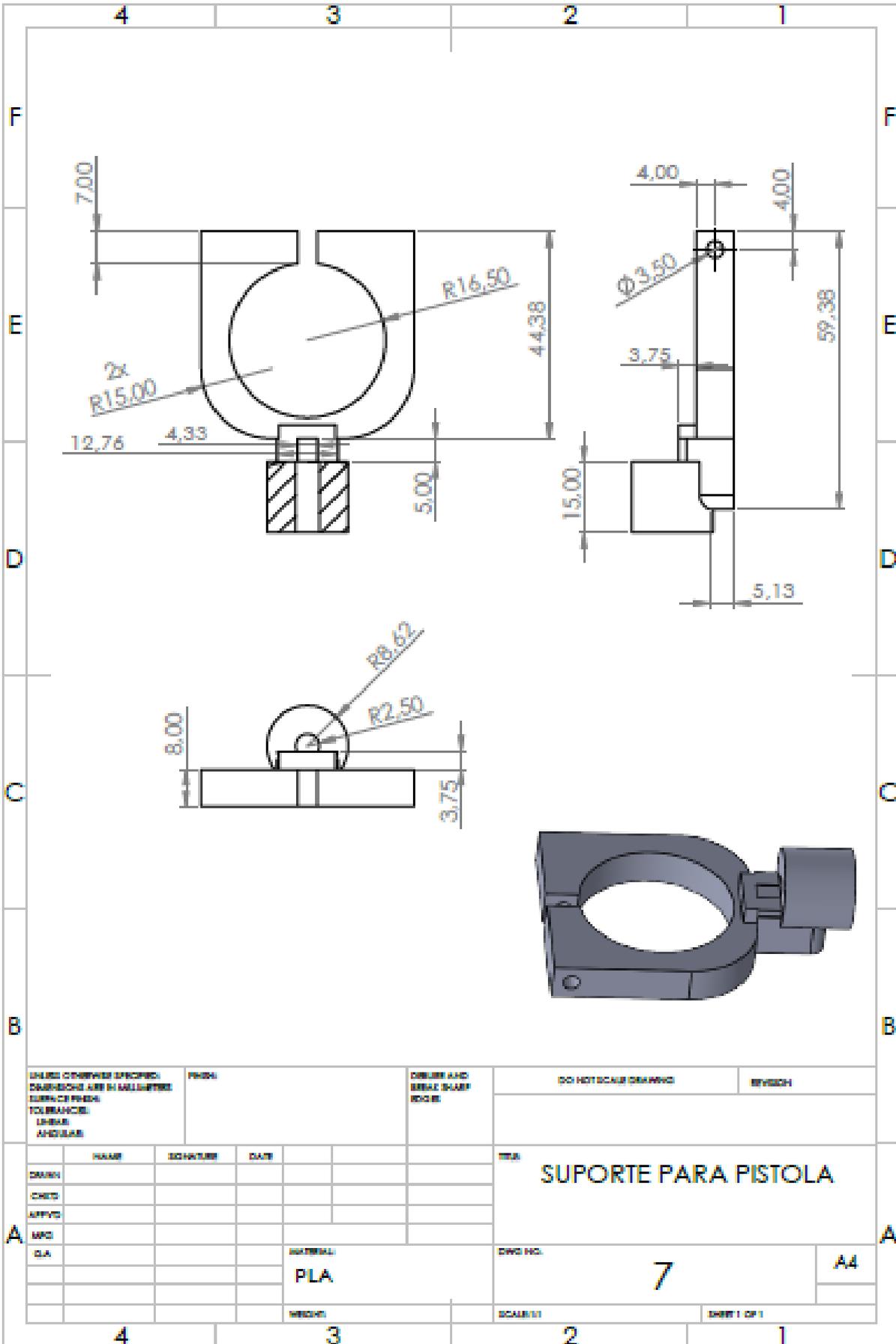
A4

SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 1







UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR
ANGULAR

FINISH

CHILDED AND
BROKE SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRWN				
CHKD				
APPVD				
MFG				
QA				

TITLE	
SUPORTE PARA PISTOLA	
DWG NO.	7
SCALE	A4
DATE	SHEET 1 OF 1

MATERIAL
PLA

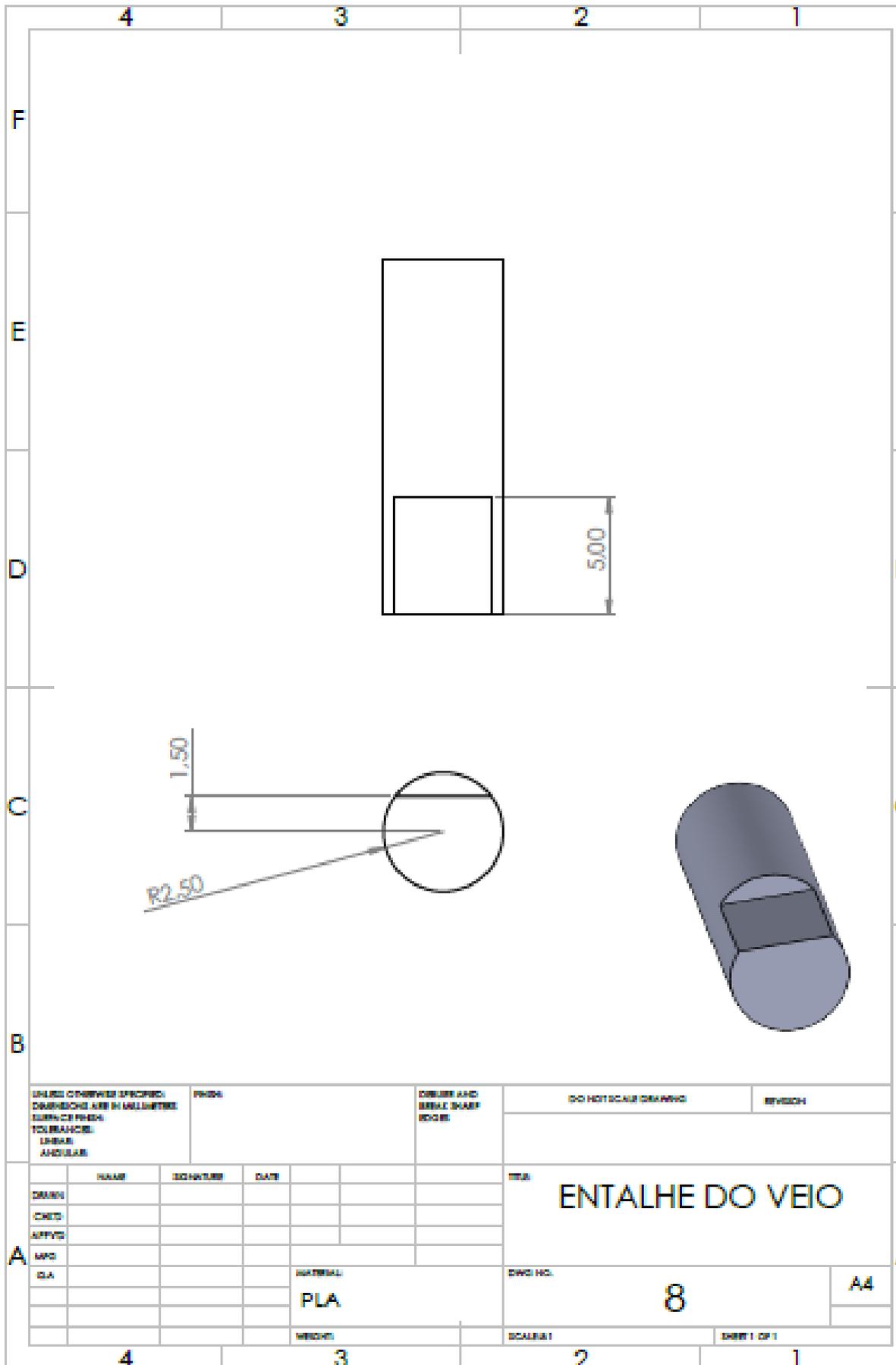
DWG NO.

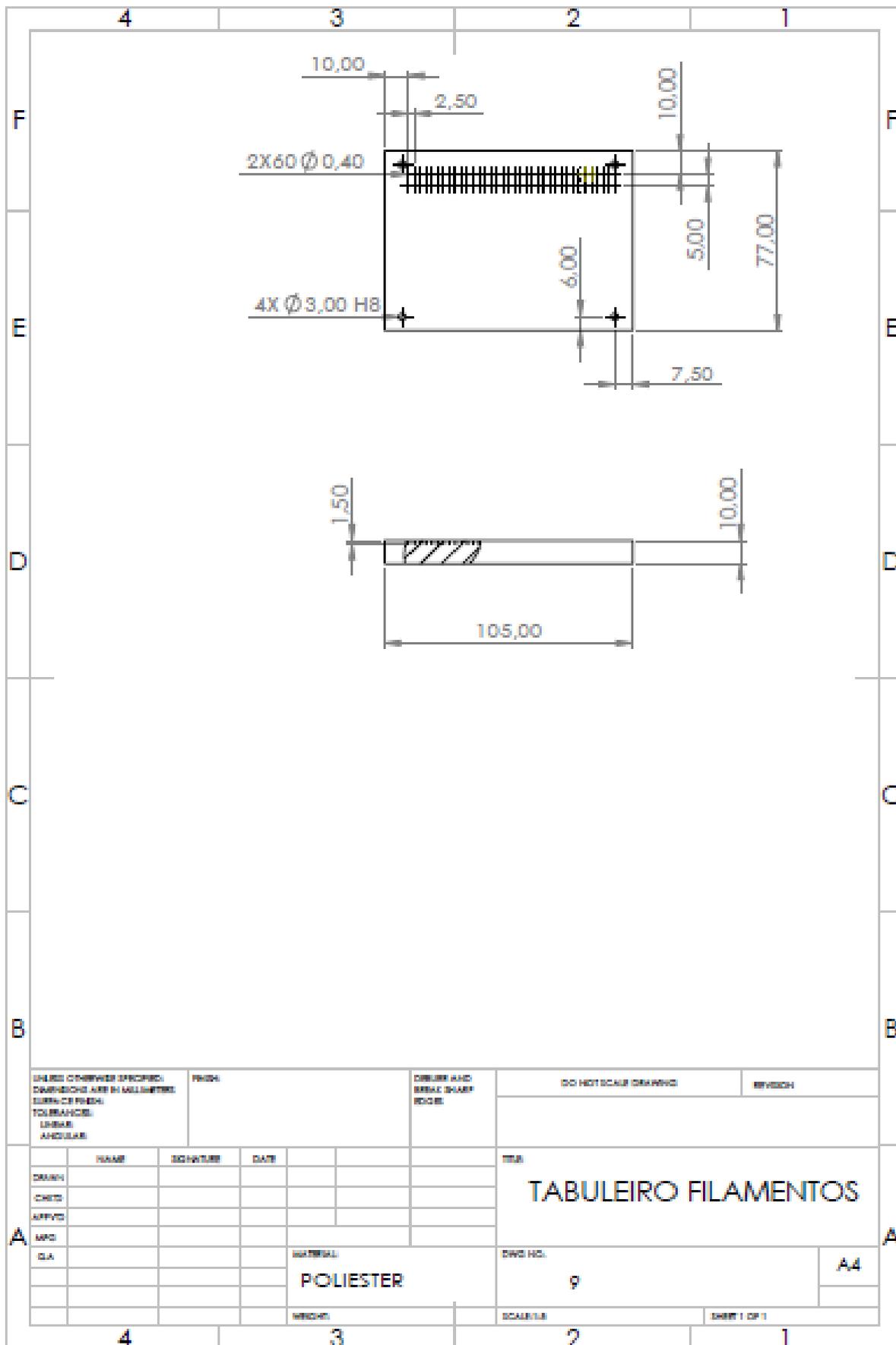
7

A4

SCALE

SHEET 1 OF 1





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
TOLERANCES:
LINEAR
ANGULAR

FINISH

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE			

TITULO
TABULEIRO FILAMENTOS

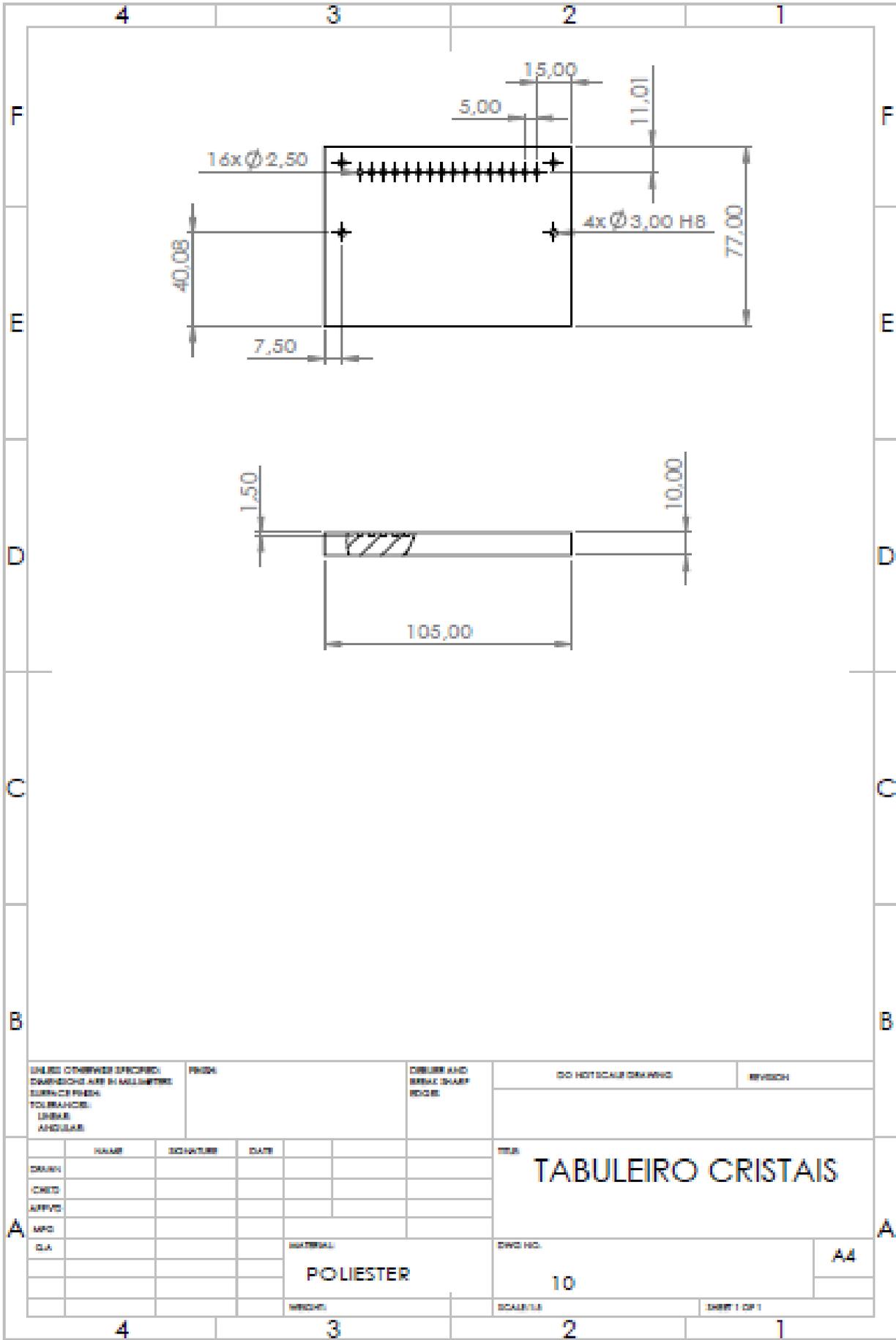
MATERIAL:
POLIESTER

DWG. NO.
9

A4

SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR
ANGULAR

PROJ:

DRAWER AND
BENCH MARK
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DESIGN			
CHECK			
APPROV			
MFG			
QA			

TITULO
TABULEIRO CRISTAIS

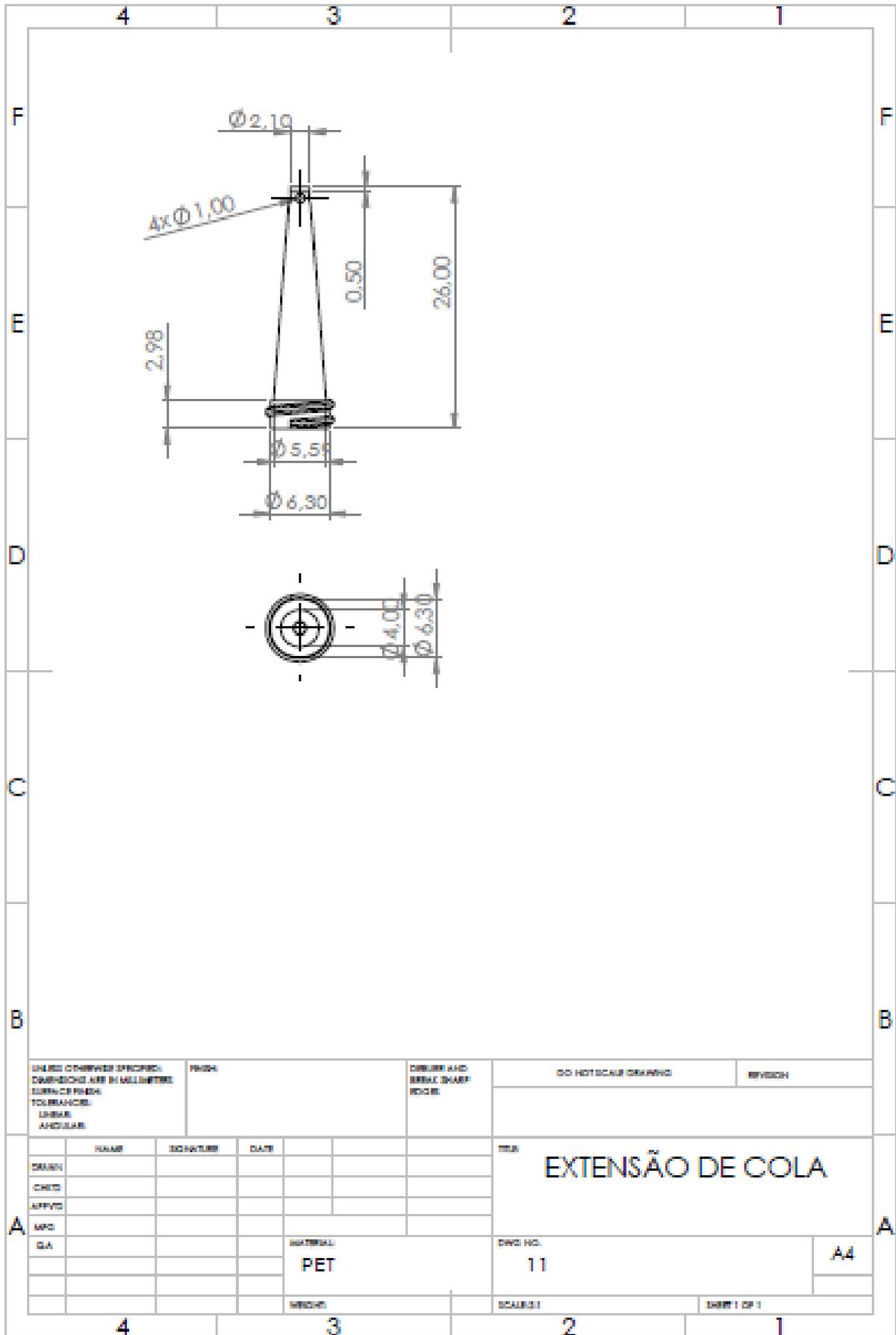
DWG NO.
10

SCALE: 1:1

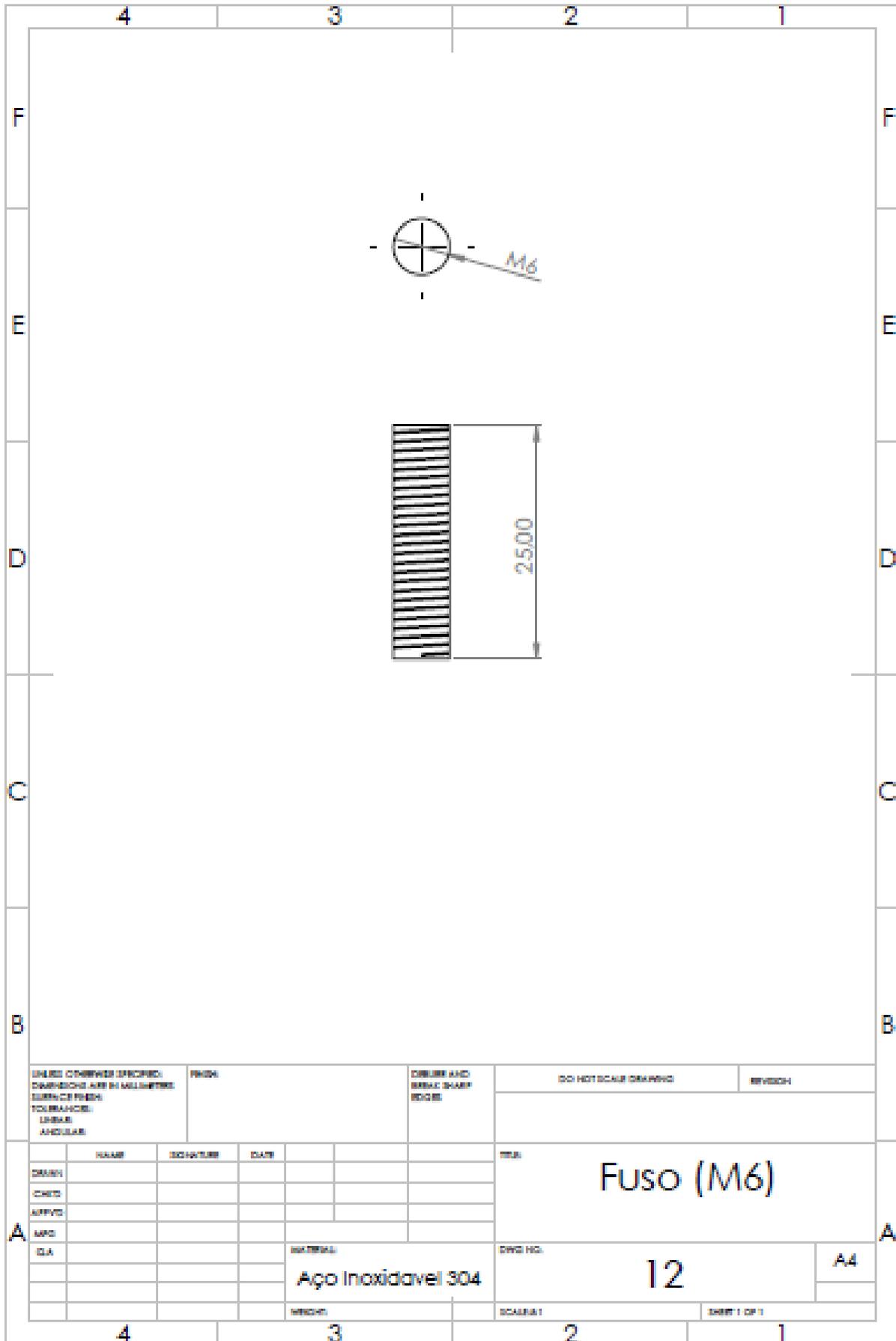
SHEET 1 OF 1

MATERIAL:
POLIESTER

A4



DIMENSIONS UNLESS SPECIFIED DIMENSIONES A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE DIMENSIONS UNLESS SPECIFIED DIMENSIONS UNLESS SPECIFIED DIMENSIONS UNLESS SPECIFIED			FINISH		DESIGN AND SERIAL NUMBER		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN CHECKED APPROVED MFG QA			NAME SURNAMES DATE		TITLE		EXTENSÃO DE COLA		DWG NO. 11	
MATERIAL PET			WEIGHT		SCALE(S)		SHEET 1 OF 1		A4	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH
TO BE AS FOLLOWS:
LINEAR
ANGULAR

FINISH

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DESIGN					
CHECK					
APPROV					
MFG					
QA					

TITLE

Fuso (M6)

DWG NO.

12

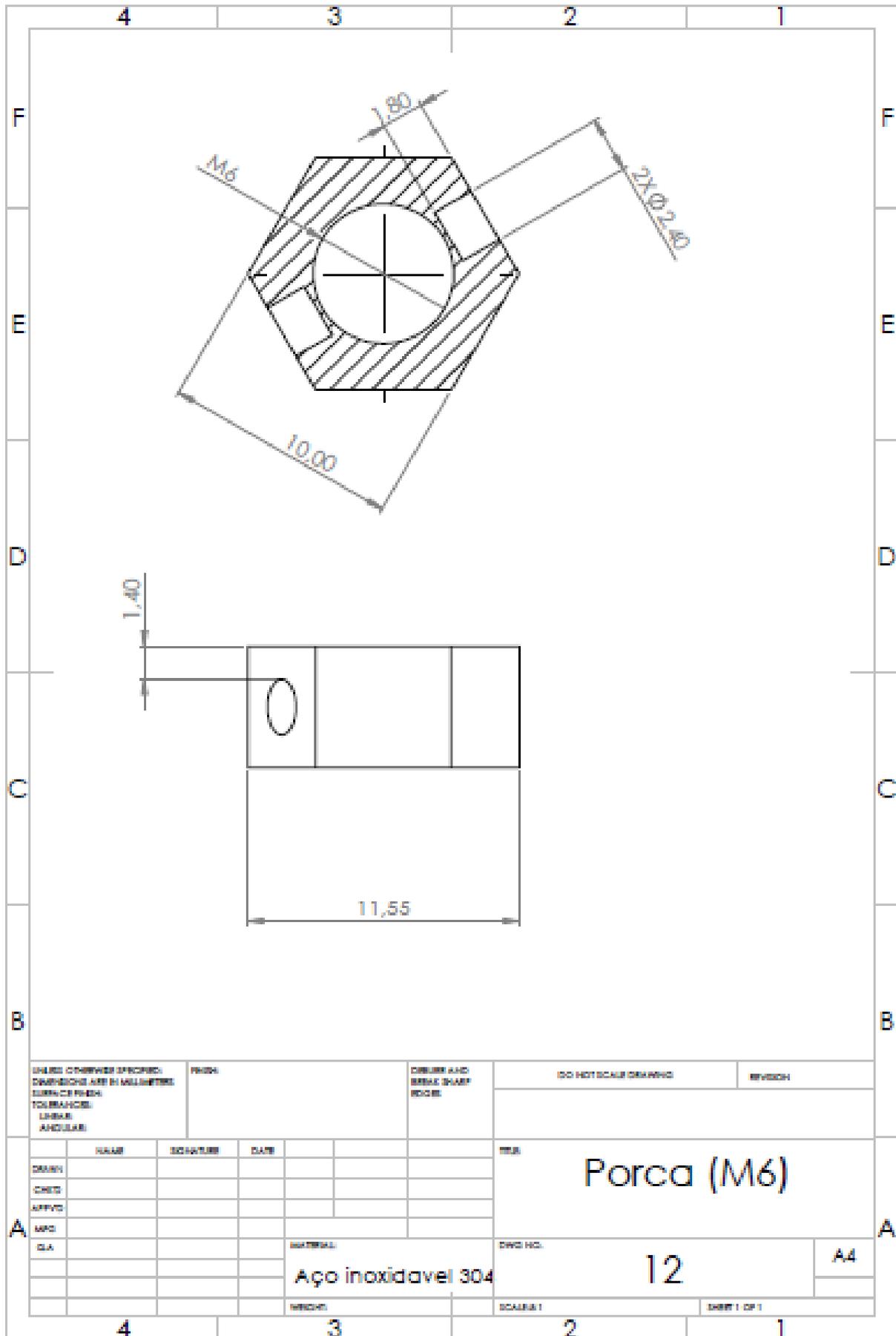
SCALE: 1

SHEET 1 OF 1

MATERIAL

Aço Inoxidável 304

A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		CORNERS AND EDGES SHARP		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH TO BE AS SPECIFIED									
LINES AND ANGLES									
NAME	SIGNATURE	DATE				<p style="text-align: center;">Porca (M6)</p>			
DRAWN									
CHECKED									
APPROVED									
MFG									
Q.A.						MATERIAL		DWG NO.	
						Aço inoxidável 304		12	
						WEIGHT		SCALE: 1	
								SHEET 1 OF 1	

