



Universidade de Aveiro  
2023

**Ricardo Filipe Ribeiro  
de Sousa**

**DESENVOLVIMENTO DE GARRA PARA BRAÇO  
ROBÓTICO DE BAIXA CARGA POR MANUFATURA  
ADITIVA**



Universidade de Aveiro  
2023

**Ricardo Filipe Ribeiro  
de Sousa**

## **DESENVOLVIMENTO DE GARRA PARA BRAÇO ROBÓTICO DE BAIXA CARGA POR MANUFATURA ADITIVA**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Produto e Tecnologia Digital, realizado sob a orientação científica do Doutor Paulo Agostinho Silva de Lima, professor adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias de Produção Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Daniel Filipe Oliveira Braga, cofundador da Spinner Dynamics.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutora Silvina Luísa Rodrigues Félix da Silva**  
Professora Adjunta da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias de Produção Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

vogais

**Prof. Doutor Nuno Ricardo Maia Peixinho**  
Professor Auxiliar da Universidade do Minho

**Prof. Doutor Paulo Agostinho Silva de Lima**  
Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias de Produção Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Agradeço,

Aos professores pelo conhecimento teórico e prático que me permitiram adquirir ao longo do mestrado.

Ao professor Paulo Lima pela orientação e pelas sugestões de melhoria durante o estágio.

À Escola Superior Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro pela utilização dos equipamentos essenciais ao trabalho de estágio, bem como ao colaborador Hélder Morais pelas indicações fornecidas durante o uso de alguns dos equipamentos.

Aos cofundadores da Spinner Dynamics Daniel Braga e Bruno Teixeira pelo acolhimento do estágio, bem como pela utilização dos equipamentos da empresa.

Ao engenheiro Carlos Costa pelo acompanhamento das tarefas práticas e pela transmissão de conhecimento na área da manufatura aditiva.

Ao meu pai Belmiro e à minha mãe Paula por me terem dado o apoio necessário em mais uma etapa do meu percurso académico.

Obrigado.

## palavras-chave

braço robótico, robô, garra, manufatura aditiva, impressão 3D, fabricação por filamento fundido, *design* generativo.

## resumo

A área da manufatura aditiva começa gradualmente a ser entendida como uma alternativa viável no fabrico de produtos industriais. Paralelamente a área da robótica evoluiu tecnologicamente nos últimos anos. Cada vez mais surge o interesse em aliar as duas áreas, seja no fabrico de elementos robóticos funcionais, como em protótipos de robôs de pequena escala.

A Spinner Dynamics é uma empresa que adota a manufatura aditiva nos seus processos de fabrico, tendo desenvolvido neste contexto um braço robótico de *open source*.

A primeira fase do presente trabalho incidiu na melhoria do funcionamento desse braço robótico e do desempenho mecânico dos seus componentes.

Numa segunda fase procedeu-se ao desenvolvimento de uma garra para esse braço robótico, assente na tecnologia de manufatura aditiva, fabricação por filamento fundido (FFF), e no método de *design* generativo para proceder ao *redesign* da sua geometria.

Neste processo definiram-se como pressupostos para o princípio de funcionamento da garra, uma preensão por impacto realizada por duas pinças paralelas, uma atuação elétrica por servomotor e uma minimização do número de peças e operações de montagem, bem como da sua massa.

Neste âmbito procedeu-se à caracterização mecânica de diferentes tipologias de peças da garra, bem como à caracterização dimensional de uma das suas peças. O custo da garra foi também determinado.

Neste trabalho concluiu-se que as ações de melhoria tiveram um impacto positivo nos movimentos realizados pelo braço robótico. O fabrico de uma garra pela tecnologia de FFF com a utilização do método de *design* generativo, mostrou que a manufatura aditiva tem o potencial para ser utilizada no contexto da robótica.

**keywords**

robotic arm, robot, gripper, additive manufacturing, 3D printing, fused filament fabrication, generative design.

**abstract**

Additive manufacturing is gradually beginning to be understood as a viable alternative for the manufacture of industrial products. At the same time, the area of robotics has evolved technologically in recent years. There is increasing interest in combining the two areas, whether in the manufacture of functional robotic elements, or in small-scale robot prototypes.

Spinner Dynamics is a company that adopts additive manufacturing in its manufacturing processes, having developed an open source robotic arm in this context.

The first phase of this work focused on improving functionality of this robotic arm and the mechanical performance of its components.

In a second phase, a gripper was developed for this robotic arm, based on an additive manufacturing technology, fused filament fabrication (FFF), and the generative design method to redesign its geometry.

In this process, the gripper operating principle was based on an impact grip, carried out by two parallel clamps, an electrical actuation by a servomotor and a minimization in the number of parts and assembly operations, as well as their mass.

In this context, the mechanical characterization of different parts of the gripper was carried out, as well as a dimensional characterization of one of its parts. The cost of the gripper was also determined.

The improvement actions implemented in this work had a positive impact on the movements performed by the robotic arm. The manufacture of a gripper using FFF technology and generative design method showed that additive manufacturing has the potential to be used in the context of robotics.

# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	A empresa.....	1
1.3	Objetivos do trabalho.....	1
1.4	Organização .....	2
2	Estado da arte .....	3
2.1	Manufatura aditiva.....	3
2.1.1	Introdução à manufatura aditiva .....	3
2.1.2	Classes da manufatura aditiva .....	4
2.2	Robótica.....	5
2.2.1	Introdução à robótica.....	5
2.2.2	Classes de robôs .....	6
2.2.3	Introdução às garras.....	7
2.2.4	Classes de garras.....	8
2.3	Aplicação da manufatura aditiva no campo da robótica .....	10
2.3.1	Contexto industrial .....	10
2.3.2	Contexto não industrial.....	12
3	Trabalho experimental.....	24
3.1	Caso de estudo .....	24
3.1.1	Braço robótico .....	24
3.1.2	Garra .....	28
3.2	Equipamentos, materiais e métodos.....	30
3.2.1	Manufatura aditiva.....	30
3.2.2	Caracterização mecânica e dimensional .....	36
3.3	Resultados e discussão – Braço robótico .....	37
3.3.1	Análise dos problemas mecânicos .....	37
3.3.2	Ações de melhoria .....	39
3.4	Resultados e discussão – Garra.....	51
3.4.1	Desenvolvimento técnico .....	51
3.4.2	Controlo dimensional e geométrico.....	81
3.4.3	Massa e custo do protótipo .....	83
4	Conclusões e trabalhos futuros.....	85
	Referências bibliográficas .....	87
	Anexos.....	91

# Lista de figuras

Figura 1 – As sete classes da MA representadas esquematicamente (Carew & Errickson, 2020).....	4
Figura 2 – Elementos de um sistema robótico (Ceccarelli, 2003) .....	5
Figura 3 – Cinco tipos de robôs fixos (Barrientos et al., 1997) .....	7
Figura 4 – Garra angular de duas pinças (Akme, 2023) .....	9
Figura 5 – Garra paralela de duas pinças (Festo, 2023b).....	9
Figura 6 – Garra de três pinças (Festo, 2023a) .....	9
Figura 7 – Garra feita por Kuhn-Stoff (EOS, 2023) .....	10
Figura 8 – Garra desenvolvida pelo IAM 3D Hub (AMFG, 2020) .....	11
Figura 9 – Garra da Carecos Kosmetik com a colaboração da Iigus (AMFG, 2020) .....	11
Figura 10 – Garra produzida pela ACEO (Saunders, 2018) .....	11
Figura 11 – Packaging gripper (Davies, 2022) .....	11
Figura 12 – Zortrax (Grames & Gharge, 2022) .....	12
Figura 13 – BCN3D Moveo (BCN3D, 2016).....	12
Figura 14 – Dexter (Markforged, 2023) .....	13
Figura 15 – Thor (Angel, 2023).....	13
Figura 16 – Garra paralela de duas pinças para o robô AX-18A (John, 2021) .....	14
Figura 17 – Garra paralela de duas pinças projetada por Moura (2020).....	15
Figura 18 – Mecanismo assente num sistema guiado (Fuster, 2015) .....	15
Figura 19 – Mecanismo assente em paralelogramos adaptado de Fuster (2015).....	16
Figura 20 – Garra paralela de duas pinças (Fuster, 2015) .....	16
Figura 21 – Garra articulada de duas pinças produzida por Santos (2019) .....	17
Figura 22 – Garra articulada de três pinças (Sadun et al., 2020) .....	17
Figura 23 – Garra articulada de três pinças acionada por tendão (Song et al., 2017).....	18
Figura 24 – Garra articulada de três pinças (Telegenov et al., 2015) .....	19
Figura 25 – Garra articulada de quatro pinças acionada por tendão (Gouveia & Advisor, 2017) .....	19
Figura 26 – Garra articulada acionada por tendão (Davidson & Mo, 2015) .....	20
Figura 27 – Garra flexível de quatro pinças (Aidan, 2017) .....	20
Figura 28 – Garra de três pinças deformáveis elasticamente (Yang et al., 2021) .....	21
Figura 29 – Princípio de funcionamento assente na técnica de origami (Liu et al., 2021) .....	21
Figura 30 – Garra de quatro pinças feita por Liu et al. (2021) .....	22
Figura 31 – Uma das garras passivas geradas no trabalho de Kodnongbua et al. (2022) .....	22
Figura 32 – Representação esquemática das etapas de elaboração de uma garra pelo algoritmo (Kodnongbua et al., 2022).....	22
Figura 33 – Driver A4988 (PTRobotics, 2023) .....	24
Figura 34 – Arduíno Mega 2560 (Arduino, 2021).....	24
Figura 35 – PCB do Thor (Angel, 2023) .....	25
Figura 36 – Articulações do Thor adaptado de Costa et al. (2020).....	26
Figura 37 – Braço robótico presente na Spinner Dynamics .....	26
Figura 38 – Comando enviado referente à primeira articulação no ambiente Arduino IDE.....	27
Figura 39 – Sequência de comandos enviados no ambiente UGS .....	27
Figura 40 – Servomotor de 25 kg/cm para a garra .....	29
Figura 41 – Conversor CC-CC utilizado .....	30
Figura 42 – Intamsys Pro 410.....	30
Figura 43 – Creality Ender-3 S1 Pro .....	30
Figura 44 – Anycubic Photon Mono X.....	31
Figura 45 – Anycubic Wash and Cure Plus .....	31
Figura 46 – Tipos de infill (Mitchell, 2023) .....	33
Figura 47 – Exemplos de ângulos de varredura (Zhang et al., 2019) .....	34
Figura 48 – Máquina de ensaios universal AUTOGRAPH AG-IS 10 kN .....	36
Figura 49 – Aquisição de forma no Scanner 3D Carl Zeiss Comet L3D 2 5M .....	36
Figura 50 – Articulações 5 e 6 adaptado de Angel (2023) .....	37
Figura 51 – Articulação 4 (Angel, 2023).....	38
Figura 52 – Peça circular com fenda adaptado de Angel (2023) .....	38



Figura 53 – Fixação da correia adaptado de Angel (2023).....	38
Figura 54 – Motores das articulações 2 e 3 (Angel, 2023).....	39
Figura 55 – Articulações 2 até 6 (Angel, 2023).....	39
Figura 56 – Articulação 1 (Angel, 2023).....	39
Figura 57 – CAD da peça limitadora de movimento.....	39
Figura 58 – Peças limitadoras (SLA).....	39
Figura 59 – Colocação das duas peças fabricadas.....	40
Figura 60 – Vista de topo da peça da base com deformações e rotura.....	41
Figura 61 – Vista de trás da peça da base com deformações e rotura.....	41
Figura 62 – Vista lateral da peça (CAD) com o aumento de 2 mm da espessura geral.....	41
Figura 63 – Vista de trás da peça (CAD) com o aumento de 2 mm da espessura das regiões onde os parafusos encostam.....	41
Figura 64 – Vista de topo da peça produzida.....	42
Figura 65 – Vista de trás da peça produzida.....	42
Figura 66 – Correia emendada-perspetiva A.....	42
Figura 67 – Correia emendada-perspetiva B.....	42
Figura 68 – Implementação dos motores e correias.....	43
Figura 69 – Orientação anterior dos motores de passo.....	43
Figura 70 – Articulações 5 e 6.....	44
Figura 71 – Resíduos na peça da articulação 4.....	44
Figura 72 – Pino.....	44
Figura 73 – Ligação aparafusada feita na articulação 4.....	45
Figura 74 – Peça de deteção de posição pelo sensor ótico.....	45
Figura 75 – Articulações 4 até 6.....	45
Figura 76 – Peça de alojamento dos motores- perspetiva A.....	46
Figura 77 – Peça de alojamento dos motores- perspetiva B.....	46
Figura 78 – Região com aumento de 2 mm de espessura.....	46
Figura 79 – Peça de alojamento dos motores (MA).....	46
Figura 80 – Peça circular da articulação 2 (vista de topo).....	47
Figura 81 – Peça circular da articulação 2 (vista de trás).....	47
Figura 82 – CAD da peça circular antes da melhoria efetuada.....	47
Figura 83 – CAD da peça circular após a melhoria realizada.....	47
Figura 84 – Peça circular produzida por FFF.....	48
Figura 85 – Montagem de elementos das articulações 2 e 3.....	48
Figura 86 – Articulações 2 e 3.....	48
Figura 87 – CAD da peça de união com a alteração geométrica.....	49
Figura 88 – Peça de união impressa.....	49
Figura 89 – Articulação 1.....	49
Figura 90 – Montagem do braço robótico.....	50
Figura 91 – Projeto das engrenagens.....	52
Figura 92 – Projeto das hastes e pinças assente no mecanismo de paralelogramos.....	53
Figura 93 – Pinça da garra.....	53
Figura 94 – Carcaça superior (perspetiva A).....	54
Figura 95 – Carcaça superior (perspetiva B).....	54
Figura 96 – Carcaça inferior.....	55
Figura 97 – Região de montagem da garra.....	55
Figura 98 – Elementos de conexão ao servomotor.....	55
Figura 99 – Vista em corte da montagem do servomotor com as restantes peças.....	56
Figura 100 – Montagem da garra.....	56
Figura 101 – Folgas de 0,5 mm observadas lateralmente.....	57
Figura 102 – Veios de 2,5 mm de diâmetro e furos de 3,5 mm de diâmetro associados.....	57
Figura 103 – Peça parametrizada no software Intamsuite.....	57
Figura 104 – Primeira impressão 3D de parte da garra.....	58
Figura 105 – Parte que se separou da restante peça.....	58
Figura 106 – Segunda impressão 3D de parte da garra (testada).....	58
Figura 107 – Terceira impressão 3D de parte da garra (testada).....	59
Figura 108 – a) Parte de um cubo b) Corpo cilíndrico com veio c) Corpo cilíndrico com folga interior.....	59
Figura 109 – Redesenho da garra.....	61

Figura 110 – Vista em corte de parte da garra redesenhada.....	61
Figura 111 – Garra com desvio de engrenagem para impressão 3D.....	62
Figura 112 – Garra impressa com material de suporte .....	62
Figura 113 – Veio que entrou em rotura total da garra .....	63
Figura 114 – Geometria inicial do veio .....	63
Figura 115 – Geometria do veio após o redesign .....	63
Figura 116 – Orientação dos corpos na plataforma de construção .....	64
Figura 117 – Ensaio da geometria inicial do veio impresso na horizontal (1° de 5 iguais) .....	64
Figura 118 – Ensaio de um dos veios com a geometria inicial (impresso na vertical) .....	65
Figura 119 – Ensaio de um dos veios redesenhados (impresso na vertical) .....	65
Figura 120 – Ensaio de um dos veios com a geometria inicial (impresso na horizontal).....	65
Figura 121 – Ensaio de um dos veios redesenhados (impresso na horizontal).....	65
Figura 122 – Dois veios da garra com a nova geometria (Section View SolidWorks 3D) .....	67
Figura 123 – Extremidade da pinça.....	67
Figura 124 – Corpo adicionado na pinça (vista em corte).....	68
Figura 125 – Corpo adicionado na pinça (vista sem corte) .....	68
Figura 126 – Redesign das engrenagens e das ligações estruturais .....	68
Figura 127 – Veio estrutural da carcaça com rotura total .....	69
Figura 128 – Veio estrutural da pinça com rotura total.....	69
Figura 129 – Geometria inicial.....	70
Figura 130 – Corpos de preservação .....	70
Figura 131 – Alguns dos corpos de obstáculo e a geometria inicial .....	70
Figura 132 – Geometria inicial com todos os corpos de obstáculo .....	70
Figura 133 – Força distribuída de 5 N aplicada na pinça .....	71
Figura 134 – Três planos de simetria e força gravítica .....	71
Figura 135 – Resultado do estudo (perspetiva A).....	71
Figura 136 – Resultado do estudo (perspetiva B).....	71
Figura 137 – Geometria inicial impressa.....	72
Figura 138 – Resultado do estudo de design generativo impresso .....	73
Figura 139 – Peça modelada para a maquinagem.....	73
Figura 140 – Ensaio da peça do resultado do estudo (vista de frente).....	73
Figura 141 – Ensaio da geometria inicial (vista de trás).....	73
Figura 142 – Ensaio da geometria inicial .....	74
Figura 143 – Ensaio do resultado do estudo de design generativo .....	74
Figura 144 – Rotura total na região circular.....	74
Figura 145 – Modelo (CAD) do protótipo final .....	76
Figura 146 – Parametrização da impressão 3D do protótipo final.....	76
Figura 147 – Mordente .....	76
Figura 148 – Cubo impresso com 86% de flow .....	77
Figura 149 – Cubo impresso com 95% de flow .....	77
Figura 150 – Face do mordente impresso que contacta com os objetos .....	77
Figura 151 – Região de encaixe na pinça .....	77
Figura 152 – Mordente da pinça com 20% de infill .....	77
Figura 153 – Montagem (CAD) da garra .....	78
Figura 154 – Garra com os mordentes encaixados .....	78
Figura 155 – Colocação da peça circular e dos quatro parafusos .....	78
Figura 156 – Colocação do servomotor e dos quatro parafusos .....	79
Figura 157 – Colocação do parafuso que liga a peça circular ao servomotor.....	79
Figura 158 – Pick and place de um objeto com faces planas.....	79
Figura 159 – Pick and place de um objeto circular.....	80
Figura 160 – Linhas de código escritas para o manuseamento do elemento circular .....	80
Figura 161 – Controlo dimensional e geométrico da haste com engrenagem .....	82

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Pressupostos para a garra .....	29
Tabela 2 – Parâmetros de fabrico utilizados para o PAHT-CF15 e PLA .....	33
Tabela 3 – Parâmetros de fabrico utilizados para a resina G217 tough resin clear .....	34
Tabela 4 – Parâmetros de fabrico utilizados para o PVA .....	34
Tabela 5 – Parâmetros de fabrico utilizados para o TPU .....	35
Tabela 6 – Tecnologia de fabrico e material para cada peça desenhada .....	49
Tabela 7 – Problemas mecânicos, causas e ações de melhoria/correção .....	50
Tabela 8 – Especificações e requisitos da garra.....	51
Tabela 9 – Parâmetros das engrenagens .....	51
Tabela 10 – Média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de flexão aos veios .....	66
Tabela 11 – Geometrias iniciais e geometrias do estudo de design generativo .....	72
Tabela 12 – Média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de flexão ao conjunto das hastes e pinça .....	75
Tabela 13 – Rácio da força máxima de flexão pela massa .....	75
Tabela 14 – Massa do protótipo.....	83
Tabela 15 – Custo do protótipo.....	84

# Lista de gráficos

Gráfico 1 – Módulo de Elasticidade (MPa) x Resistência à Tração (MPa) de Margerie (2022) .....	32
Gráfico 2 – Módulo de Flexão (MPa) x Resistência à Flexão (MPa) de Margerie (2022) .....	32
Gráfico 3 – Curvas dos ensaios de flexão para cada tipologia de veio .....	66
Gráfico 4 – Curvas dos ensaios de flexão para cada geometria de hastes e pinça .....	74

# Lista de abreviaturas e acrónimos

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

CAD – Desenho Assistido por Computador

CAE – Engenharia Assistida por Computador

CC – Corrente Contínua

CNC – Controlo Numérico Computorizado

FFF – Fabricação por Filamento Fundido

IDE – *Integrated Development Environment*

MA – Manufatura Aditiva

PAHT-CF15 – Poliamida de Alta Temperatura com 15% de Fibra de Carbono

PCB – Placa de Circuito Impresso

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

PLA – Ácido Polilático

PVA – Álcool Polivinílico

PWM – *Pulse-Width Modulation*

SCARA – *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

SLA – Estereolitografia

TPU – Poliuretano Termoplástico

UGS – *Universal G-code Sender*

USB – *Universal Serial Bus*

UV – Ultravioleta

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Interessado pela área do desenvolvimento de produto, foi no seu segundo ano de licenciatura em Tecnologia e Sistemas de Produção que o autor deste trabalho começou a utilizar as ferramentas digitais de desenho assistido por computador (CAD). A partir desse momento, a utilização de ferramentas CAD tornou-se frequente em várias unidades curriculares envolvendo diferentes projetos. Após o término da licenciatura, a entrada no mestrado em Produto e Tecnologia Digital da Escola Superior Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro permitiu a realização de diferentes projetos orientados para o fabrico digital, em particular através da manufatura aditiva (MA), sendo uma área cada vez mais explorada na indústria.

A Spinner Dynamics é uma empresa que baseia as suas atividades numa forte componente digital dos seus processos, em particular na área da MA. Um dos projetos em que a Spinner Dynamics esteve envolvida consistiu no desenvolvimento de um braço robótico de baixo *payload*. Foi então nesta perspetiva que surgiu a possibilidade de realização de um estágio nesta empresa. A elaboração de uma garra por MA para o braço robótico enquadrava-se perfeitamente nas áreas de interesse do autor e nas temáticas abordadas ao longo do mestrado.

## 1.2 A empresa

A Spinner Dynamics está localizada no Centro de Incubação e Inovação Industrial de Arouca. Este centro é um espaço que promove o empreendedorismo, acolhendo várias *start-ups* de base tecnológica. A Spinner Dynamics é uma *start-up* fundada em 2020 especializada em duas áreas principais: engenharia de produto e sistemas de desinfeção de espaços interiores. A empresa conta com equipamentos de MA, fornecendo soluções customizadas e personalizadas.

A Spinner Dynamics como *start-up* de engenharia dedica-se ao desenvolvimento de produto, projeto mecânico e de sistemas, e MA. Atualmente nas suas instalações realiza o fabrico nas tecnologias de FFF e estereolitografia (SLA), dependendo dos requisitos estéticos, funcionais e mecânicos dos projetos em mãos. A empresa também aplica as suas competências no desenvolvimento e comercialização de soluções de melhoria da qualidade do ar interior e que promovem a saúde pública. A empresa para além dos meios técnicos, tem uma equipa multidisciplinar com valências, em várias engenharias, gestão, investigação e ciências para abordar os desafios que lhes são propostos.

## 1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo geral do estágio é desenvolver e fabricar uma garra para um braço robótico por MA. Os objetivos específicos abrangem:

- Conceção para o fabrico pela tecnologia de FFF;
- Melhoria de um braço robótico feito por FFF;
- Projeto e fabrico de uma garra, aproveitando a flexibilidade de *design* proporcionada pelo processo de MA;
- Aplicação do método de *design* generativo no desenvolvimento da garra;

- Análise do desempenho mecânico da garra desenvolvida;
- Aferição da conformidade dimensional e geométrica de peças obtidas por FFF.

## 1.4 Organização

O presente relatório de estágio divide-se em quatro capítulos.

No primeiro capítulo aborda-se a motivação para o trabalho, enquadra-se a empresa que acolheu o estágio e indicam-se os objetivos.

No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte. No estado da arte aborda-se a MA e a robótica. Também são mostrados alguns casos de estudo em que a MA foi aplicada no campo da robótica.

O terceiro capítulo diz respeito ao trabalho experimental. Mostra-se o caso de estudo referente ao braço robótico e à garra. Também se abordam os equipamentos, materiais e métodos envolvidos no trabalho de estágio. Por fim, mostram-se e discutem-se os resultados alcançados.

O quarto capítulo é dedicado às conclusões e trabalhos futuros.

# 2 Estado da arte

## 2.1 Manufatura aditiva

### 2.1.1 Introdução à manufatura aditiva

A MA abrange as tecnologias de fabrico que produzem objetos tridimensionais (3D) por processos aditivos, camada a camada. A maneira como estas camadas são unidas depende dos materiais que são usados e do tipo de tecnologia utilizada (Jones, 2023). A MA é uma família de processos que permitem elaborar peças juntando secções transversais sucessivas de um modelo 3D. Os plásticos e os metais são os materiais mais utilizados na impressão 3D (Autodesk, 2023a).

Estas tecnologias surgiram por volta de 1980 num contexto de prototipagem rápida. Durante as duas décadas seguintes foram várias as evoluções ao nível da tecnologia e dos materiais que permitiram a sua consolidação e credibilização ao nível industrial, numa perspetiva de prototipagem. Por volta de 2010, as patentes para a maior parte das tecnologias de MA originais expiraram e surgiram novas funcionalidades associadas a estes processos, fazendo com que estes equipamentos ficassem mais acessíveis. Atualmente, os processos aditivos estão cada vez mais confiáveis, tornando-se tecnologias não só para a elaboração de protótipos, mas também para a produção de peças técnicas funcionais (Jones, 2023). As tecnologias de MA são dos processos produtivos mais eficientes energeticamente, sendo sustentáveis para o uso em contexto industrial (Jandyal et al., 2021).

Os processos aditivos possibilitam a criação de peças com maior variabilidade geométrica quando comparados com processos de fabrico convencionais como a moldação por injeção ou a fundição. Existe um leque muito alargado de materiais que podem ser usados nos equipamentos de MA. Há processos aditivos que possibilitam a combinação de diferentes materiais no mesmo objeto, permitindo a colocação de materiais com diferentes propriedades mecânicas onde estes são essenciais. Ao nível dos materiais, estes processos também podem produzir objetos a partir de compósitos reforçados com fibras, cerâmicos ou outros tipos de materiais. Nalguns casos as peças precisam de estruturas adicionais de suporte para sustentarem geometrias da peça que não têm nas camadas anteriores de construção elementos de construção necessários para o conseguir fazer. O material de suporte é uma estrutura de apoio que depois tem de ser removida normalmente por processos mecânicos ou químicos (Jones, 2023). As peças como os gabaris, acessórios e ferramentas de uso final são alguns dos exemplos de produtos possíveis de obter por estas tecnologias (Formlabs, 2023).

Por norma os processos aditivos seguem um conjunto de fases para ser possível obter uma peça. Em primeiro lugar é fulcral ter um modelo digital feito com recurso ao CAD ou através de digitalização 3D. A etapa que se segue compreende a preparação do objeto para a posterior impressão 3D. O modelo é dividido em diversas camadas de espessura reduzida e é gerado um código para dar as instruções ao equipamento de MA para criar a peça. Depois da preparação no *software* específico, o modelo é enviado para um equipamento que interpreta o código e elabora a peça. Após a conclusão da impressão, o objeto pode ser submetido a um pós-processamento, podendo incluir limpeza, cura, pintura ou a retirada do material de suporte (Carolo, 2023).

As vantagens dos processos aditivos são a flexibilidade ao nível do projeto, reduzido desperdício, fabricação de formas complexas, produção económica e prototipagem rápida. Estes processos são usados em vários setores como a medicina, arte, automóvel, aeroespacial e entre outros (Hüner et al., 2022).



A associação de ferramentas de *design* generativo à MA, enquanto ferramenta de desenvolvimento de produto, permite potenciar um maior leque de opções geométricas durante este processo, as quais estarão dependentes dos *inputs* definidos, como as tecnologias de fabrico, desempenho mecânico, materiais e entre outros. Enquanto um *designer* desenvolve uma ideia de projeto, o programa pode gerar dezenas ou até centenas de soluções de *design*. A utilização de *design* generativo possibilita a criação de formatos complexos, sendo muitas vezes geometrias impossíveis de serem produzidas através de processos de fabrico convencionais, mas possíveis de realizar por técnicas aditivas (Autodesk, 2023b).

O *design* generativo consiste numa ferramenta que, combinando o CAD com a engenharia assistida por computador (CAE), utiliza a inteligência artificial para a criação autónoma de geometrias a partir de um conjunto de condições definidas pelo utilizador (PTC, 2023).

### 2.1.2 Classes da manufatura aditiva

São sete as classes dos processos aditivos: Extrusão de Material (*Material Extrusion*), Fotopolimerização em Cuba (*Vat Photopolymerization*), Jato de Ligante (*Binder Jetting*), Jato de Material (*Material Jetting*), Fusão em Cama de Pó (*Powder Bed Fusion*), Laminação de Folha (*Sheet Lamination*) e Deposição Direta de Energia (*Directed Energy Deposition*) (Carew & Errickson, 2020) como mostrado na figura 1.

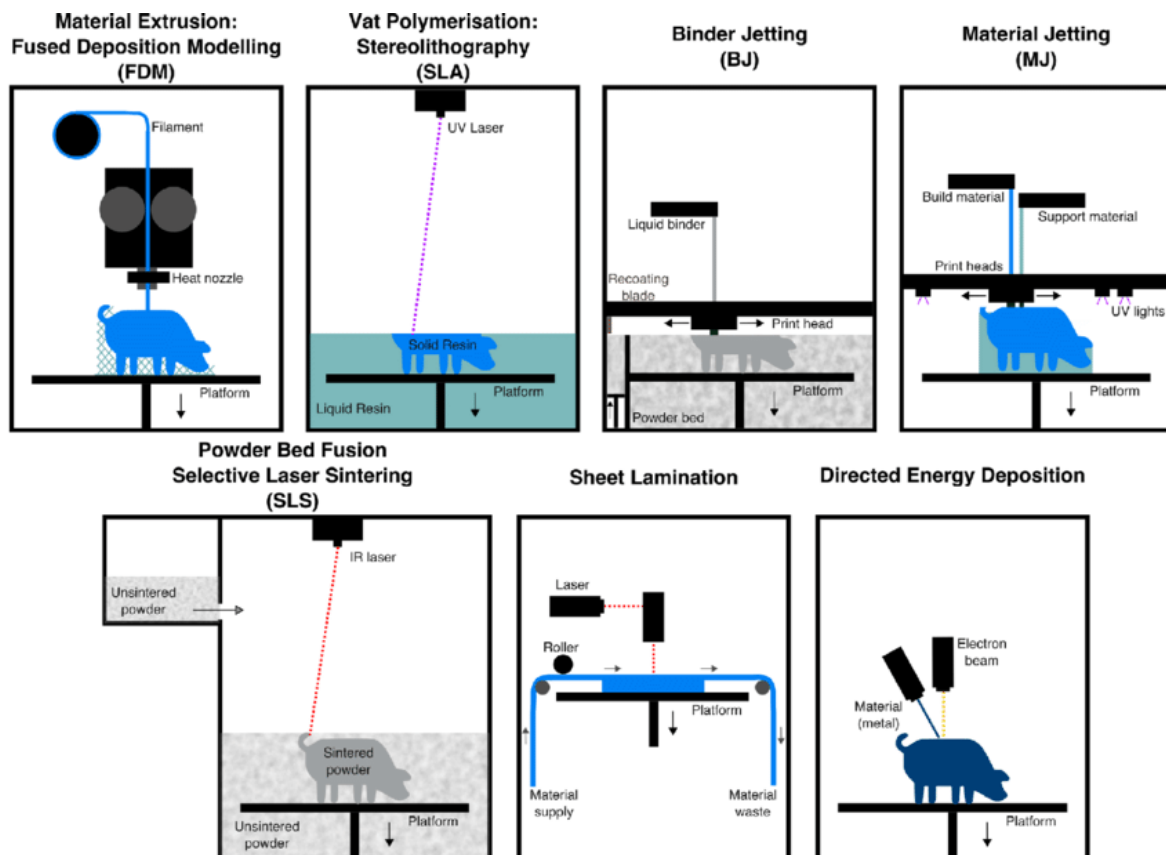


Figura 1 – As sete classes da MA representadas esquematicamente (Carew & Errickson, 2020)

Na Extrusão de Material, este é depositado através de um bocal que funde o filamento, sendo o objeto feito camada por camada numa plataforma que se move verticalmente após a conclusão de

cada camada. Na Fotopolimerização em Cuba o material, que se encontra no estado líquido, é exposto à radiação ultravioleta (UV), por exemplo através de um laser, fazendo com que esse mesmo material se transforme num sólido nas regiões onde o laser incide. O processo é feito numa cuba de resina, camada por camada. No Jato de Ligante são utilizados dois materiais, um material à base de pó e um ligante normalmente no estado líquido. A cabeça de impressão do equipamento deposita o ligante em camadas sucessivas de pó, agrupando as partículas de acordo com a geometria das secções impressas. No Jato de Material as gotículas são colocadas camada por camada e a radiação UV realiza a cura do material. A Fusão em Cama de Pó é um processo aditivo onde um laser ou um feixe de elétrons funde o pó. Neste processo é colocada uma camada reduzida de pó numa plataforma de construção e depois o laser irá sinterizar o material nas zonas necessárias para definir a secção pretendida. Na Laminação de Folha o material (folhas) é empilhado para criar o objeto. Este processo pode utilizar adesivos, soldadura ultrassónica ou brasagem. Depois de feita a peça, o excesso de material é cortado. Na Deposição Direta de Energia um bocal montado num braço robótico com vários eixos deposita o material fundido numa plataforma, onde solidifica com recurso a um laser ou a um feixe de elétrons (Jones, 2023; Cook, 2020).

## 2.2 Robótica

### 2.2.1 Introdução à robótica

Os robôs são equipamentos programados para efetuarem tarefas, de forma rápida e com uma elevada precisão de movimentos. Estes podem executar operações que envolvem manusear grandes cargas e cujos movimentos são repetitivos durante um longo intervalo de tempo. Um robô apresenta um conjunto de articulações, permitindo a execução das operações de trabalho, por exemplo na soldadura, pintura, aparafusamento, paletização de artigos num armazém e entre outras aplicações. As articulações são feitas para replicarem os elementos do corpo humano como o ombro, cotovelo, antebraço ou pulso. Os braços robóticos também aumentam a capacidade produtiva da indústria, fazendo tarefas que poderiam colocar em risco a saúde dos operários. Nos últimos anos o campo da robótica evoluiu e os custos associados à fabricação de componentes para os robôs desceram, aumentando o número de robôs no tecido industrial. Atualmente, existem vários tipos de robôs, cada um possuindo determinadas capacidades que os tornam adequados para efetuarem operações específicas no ambiente industrial. Normalmente os braços robóticos têm até seis articulações que podem operar com motores de passo e são controlados com recurso a um *software*. Um dos aspetos que permite distinguir os diversos formatos de robôs é o tipo de articulações que apresentam, possibilitando a execução de diferentes tarefas (RS, 2023). Tal como mostrado na figura 2, os robôs são constituídos por vários elementos (Ceccarelli, 2003).

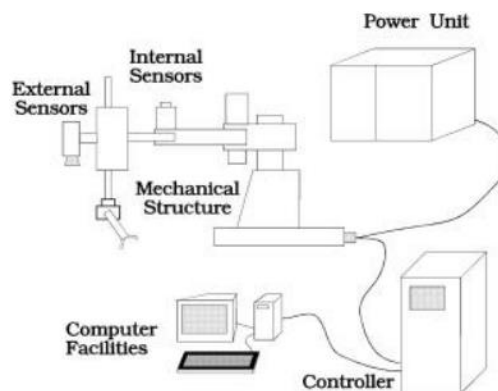


Figura 2 – Elementos de um sistema robótico (Ceccarelli, 2003)

No início, os robôs apenas conseguiam realizar tarefas programadas como por exemplo selecionar só um tipo de peça de uma determinada região com uma orientação específica. Não conseguiam identificar uma peça específica entre diversas nem localizar um objeto que se encontrava numa posição não especificada. Hoje, a integração de câmaras de elevada resolução na robótica permite a detecção de objetos, assente em inteligência artificial para efetuar as ações de reconhecimento de objetos. Os robôs inteligentes sendo dotados de visão artificial conseguem reconhecer as peças na sua envoltória, classificá-las por categorias e movimentá-las. Esta funcionalidade possibilita aos braços robóticos trabalharem com uma maior precisão e com uma maior segurança. Tal é possível através de uma troca constante de dados entre o ambiente industrial e o robô, fazendo com que seja possível conhecer o desempenho do robô de forma remota (Intel, 2020).

## 2.2.2 Classes de robôs

No campo da robótica existem os robôs fixos e os móveis. As diferenças entre estas duas classes de robôs é que operam em diferentes áreas de trabalho. Os robôs fixos correspondem aos manipuladores robóticos industriais que operam em locais específicos devidamente preparados para a instalação dos equipamentos robóticos. Com o desenvolvimento de sensores e de elementos para a interação homem-máquina, os manipuladores robóticos são usados em locais com um maior número de variáveis como por exemplo num bloco operatório onde são utilizados em procedimentos cirúrgicos. Os robôs móveis são projetados para se deslocarem e realizarem tarefas em locais maiores. Os robôs móveis deslocam-se seguindo uma trajetória pré-definida ou livre (Ben-Ari & Mondada, 2018). Os braços robóticos colaborativos apresentam as suas formas mais arredondadas. Estes robôs possuem um conjunto de sensores, possibilitando a interação com os operários. Estes sistemas robóticos podem operar com pessoas próximas sem a ocorrência de acidentes (Robots Done Right, 2023).

Entre os robôs fixos existentes destacam-se os cartesianos, cilíndricos, esféricos, *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA) e os angulares (Barrientos et al., 1997) como ilustra a figura 3. Além destes, por exemplo existem os robôs delta que também são conhecidos por “aranha”. Apresentam três a quatro eixos que se estendem de cima para baixo e alcançam movimentos com uma maior velocidade (Robots Done Right, 2023).

### **Cartesiano**

O robô cartesiano apresenta três juntas lineares. O espaço de trabalho deste robô é prismático.

### **Cilíndrico**

O robô cilíndrico tem no mínimo uma junta de revolução e duas juntas lineares. O espaço de trabalho é cilíndrico. Apresenta a junta de revolução na base. Este tipo de robô é vantajoso em operações de pegar e largar objetos.

### **Esférico ou polar**

O robô esférico possui duas juntas de revolução e uma junta linear. O espaço de trabalho deste robô corresponde a duas esferas concêntricas.

## SCARA

O robô SCARA é adequado para as operações de montagem, apresentando bastante rigidez no eixo vertical. Tem duas juntas de revolução e uma junta linear. Neste tipo de robô as primeiras articulações são paralelas entre si.

### Angular, antropomórfico ou articulado

No robô angular todas as articulações são de revolução. Este tipo de robô assemelha-se a um membro superior humano. Normalmente apresenta seis graus de liberdade (Jha, 2015).

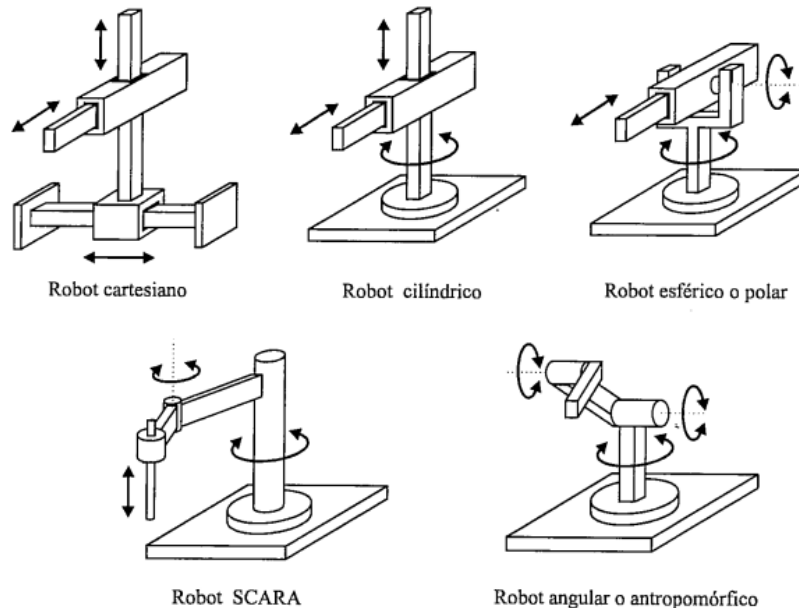


Figura 3 – Cinco tipos de robôs fixos (Barrientos et al., 1997)

### 2.2.3 Introdução às garras

Por norma os braços robóticos realizam operações que anteriormente eram feitas por mãos humanas, através de um efetor, que é uma interface entre o sistema robótico e o objeto. Isto causou a necessidade do desenvolvimento de elementos de manuseio eficientes, designadamente ferramentas de preensão normalmente chamadas de garras. As mãos humanas são os elementos que permitem a manipulação de objetos pelas pessoas e podem ser comparadas às garras robóticas, que são os únicos elementos que contactam com a peça de trabalho. As garras são as partes ativas entre o braço robótico e o objeto e também são chamadas de órgãos de preensão. Alguns exemplos de funções associadas às garras robóticas são segurar um elemento durante o transporte ou mudar a orientação dos objetos. As garras não se limitam só às ações de preensão, sendo o termo mais amplo designado por efetor final (Monkman et al., 2007).

Uma garra possibilita que o objeto seja recolhido, transferido e colocado pelo braço robótico. A garra é tipicamente montada na extremidade do robô. No desenvolvimento da geometria da garra é necessário ter em conta o espaço disponível no ambiente industrial para que segure um objeto sem a interferência de outros elementos à sua volta (GripShape, 2023).

É necessário também que uma garra robótica não danifique as peças que se pretende manusear, por isso é essencial selecionar o tipo adequado de garra atendendo à sua finalidade (TIE Industrial & Robots, 2017).

## 2.2.4 Classes de garras

As garras podem ser classificadas em diferentes pontos como o tipo de contacto entre a garra e a peça, número de pinças, método que permite manusear um objeto e tipo de atuação.

### **Tipo de contacto**

São três os formatos básicos de garras de acordo com o tipo de contacto.

#### **Contacto de ponto**

Nesta forma de prensão as pinças e a peça a ser manuseada entram em contacto em alguns pontos concretos. Existem no mínimo três a quatro pontos de contacto entre as pinças da garra e a peça.

#### **Contacto de linha**

Neste método o contacto entre a garra robótica e o objeto assume o formato de uma linha que depende da geometria da peça. Nesta forma de manusear os objetos é essencial que as linhas imaginárias que são feitas durante o contacto sejam paralelas.

#### **Contacto de área**

Nesta forma de manuseamento a área de superfície das pinças contacta com a peça. Esta forma de contacto normalmente é feita em duas áreas de superfície opostas para prender o objeto (Khurshid et al., 2011).

### **Número de pinças**

As garras podem ser agrupadas segundo o número de pinças que apresentam. As garras cujas pinças se assemelham a dedos humanos são designadas por antropomórficas, enquanto as garras normalmente observadas na indústria são designadas por convencionais, cujas pinças apresentam uma geometria prismática.

#### **Duas pinças**

As garras de duas pinças por norma apresentam o contacto de área por causa da geometria das pinças que geralmente não pode fornecer mais do que duas regiões de contacto.

#### **Três pinças**

As garras robóticas de três pinças podem apresentar o contacto de área. Contudo, uma garra com três pinças acrescenta uma maior dificuldade no projeto da mesma, bem como no sistema de controlo necessário.

### **Quatro pinças**

As garras de quatro pinças podem ser uma conjugação de garras de prensão de duas pinças e noutros casos um grupo de pinças independentes. Estas garras implicam custos mais elevados na sua conceção e são aplicadas em situações em que seja necessária uma maior precisão.

### **Cinco pinças**

As garras robóticas de cinco pinças são feitas maioritariamente no contexto de estudo para tornar a prensão mais eficiente, sendo um tipo de garra que é uma aproximação da prensão manual do Homem. Há garras com mais de cinco pinças (Khurshid et al., 2011).

As figuras 4, 5 e 6 mostram uma garra angular de duas pinças (Akme, 2023), uma garra paralela de duas pinças (Festo, 2023b) e uma garra de três pinças (Festo, 2023a).



Figura 4 – Garra angular de duas pinças (Akme, 2023)



Figura 5 – Garra paralela de duas pinças (Festo, 2023b)



Figura 6 – Garra de três pinças (Festo, 2023a)

## **Método de manuseamento**

A classificação das garras pode ser feita com base em quatro métodos de manuseamento.

### **Impacto**

Neste método as pinças realizam a prensão física através da ação direta sobre a peça, sendo também designadas garras convencionais.

### **Ingressivo**

No tipo ingressivo, por exemplo através de agulhas, estas penetram fisicamente a superfície dos elementos, sendo usadas para manusear têxteis ou outros materiais com características semelhantes.

### **Astritivo**

No método astritivo as peças são manipuladas na superfície através de sucção, vácuo, eletroadesão ou magnetismo caso sejam elementos ferrosos a manusear. Na forma de magnetismo podem ser utilizados eletroímãs ou ímãs permanentes.

## Continuidade

No tipo continuidade podem ser usadas colas ou a aplicação de uma tensão na superfície para fazer a adesão da peça na garra (BrainKart, 2023).

## Tipo de atuação

As garras robóticas podem ser atuadas de forma elétrica, pneumática ou hidráulica. Também existem garras que não necessitam de qualquer tipo de atuação, pois conseguem manipular objetos tirando partido dos graus de liberdade do braço robótico, sendo consideradas passivas (Kodnongbua et al., 2022).

### Atuação elétrica

As garras elétricas apresentam uma boa precisão, possuindo um ou mais motores elétricos que permitem a realização de movimentos de abertura/fecho por parte das pinças.

### Atuação pneumática

Este tipo de garra é mais usado para manusear uma variedade mais abrangente de peças do que as garras atuadas eletricamente. Estas garras funcionam através de ar comprimido que é empurrado através de um pistão e alcançam bastante velocidade. As garras com este tipo de atuação são frequentes nos subtipos paralelos e angulares. No primeiro subtipo as pinças estão sempre paralelas, uma em relação à outra, durante a execução dos movimentos, enquanto no subtipo de garras angulares, para agarrar uma peça, estas formam um ângulo (B2E Automation, 2022).

### Atuação hidráulica

Neste tipo de atuação um fluido hidráulico submetido a uma pressão movimenta um pistão que por sua vez permite a abertura/fecho das pinças através da força gerada por este. São garras menos frequentes do que as elétricas ou pneumáticas e têm uma maior força de preensão (Mobile Hydraulic Tips, 2013).

## 2.3 Aplicação da manufatura aditiva no campo da robótica

### 2.3.1 Contexto industrial

#### Kuhn-Stoff

Kuhn-Stoff elaborou uma garra pneumática com recurso à impressão 3D (figura 7), conseguindo diminuir a sua massa em 86% e os seus custos de produção até 50%. O tipo de tecnologia de MA usada foi a *Powder Bed Fusion* (equipamento EOS Formiga P100) para fazer uma garra leve e durável para a *Wittmann Robot System*. Anteriormente esta garra era feita de alumínio com elementos de borracha e de conexão, com custos acrescidos para a empresa. Esta garra ao ser impressa em 3D permitiu diminuir o número de componentes de 21 para 2, utilizando como material o *nylon*. A garra foi testada com sucesso durante cinco milhões de ciclos (EOS, 2023).

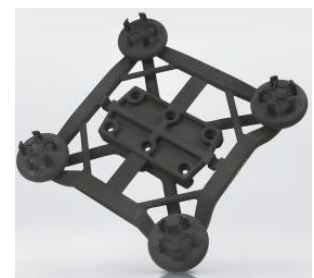


Figura 7 – Garra feita por Kuhn-Stoff (EOS, 2023)

### IAM 3D Hub

O *Digital Innovation Hub and Competence Center*, IAM 3D Hub, usou a MA para produzir uma garra pneumática (figura 8). Foi utilizada a tecnologia da Hewlett-Packard *MultiJet Fusion* para diminuir em mais de 80% a quantidade de elementos que constituíam a garra como por exemplo os conectores. O material é o 3D *high reusability* poliamida 12 da Hewlett-Packard. O redesenho da garra orientado para a produção por MA teve em consideração que as espirais tinham de funcionar como molas. O tempo de instalação da garra no robô diminuiu em 40%. A garra foi testada com êxito durante um milhão de ciclos (AMFG, 2020; Zelinski, 2018).



Figura 8 – Garra desenvolvida pelo IAM 3D Hub (AMFG, 2020)

### Carecos Kosmetik com a colaboração da Igus

Carecos Kosmetik é uma empresa alemã que investe na flexibilidade das suas linhas de produção no fabrico de produtos distintos. Quando ocorre mudanças dos produtos a serem fabricados, a empresa necessita de diferentes garras para as máquinas que colocam tampas em frascos. Anteriormente a empresa produzia as garras, em alumínio, através de técnicas de fabrico subtrativo, implicando um custo até 10000 euros por peça e eram necessárias seis semanas para serem fabricadas. A nova forma de produzir as garras (figura 9) é através de Extrusão de Material (usando o filamento iglidur i150), com tempos de manufatura entre 10 e 12 horas. Esta estratégia também permitiu reduzir em 85% o custo associado e em 70% o tempo de produção. Além disso, as novas garras são sete vezes mais leves que as anteriores. A empresa contou com a colaboração da Igus na elaboração desta garra (AMFG, 2020; Igus, 2023).



Figura 9 – Garra da Carecos Kosmetik com a colaboração da Igus (AMFG, 2020)

### ACEO

A empresa ACEO fez uma garra (figura 10) com recurso a uma tecnologia que tem como base a impressão a jato de tinta. A garra é flexível, sendo feita de fluorossilicone (Saunders, 2018).



Figura 10 – Garra produzida pela ACEO (Saunders, 2018)

### Saint-Gobain

A empresa Saint-Gobain faz a produção de vidro para diversos setores e a fábrica localizada em Barcelona, que faz vidro para automóveis, começou a usar a MA para fazer componentes para os sistemas robóticos. A fábrica produz 19 milhões de unidades de vidro por ano. Em 2019, a empresa adotou a MA (usando os equipamentos da série BCN50D Epsilon W3) depois de ter subcontratado durante vários anos a produção de acessórios feitos por métodos subtrativos. O novo método de produção possibilitou uma diminuição dos custos associados no desenvolvimento de diferentes acessórios e peças de posicionamento, em cerca de 170000 euros, bem como dos tempos de produção em 93% (TCA, 2023). Por exemplo no fabrico de *packaging grippers*

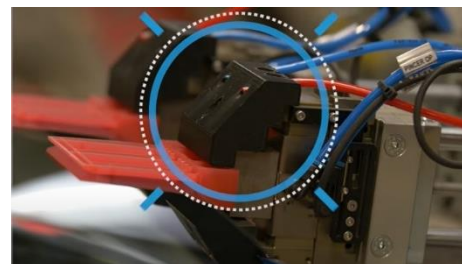


Figura 11 – *Packaging gripper* (Davies, 2022)



(figura 11), com quatro substituições por ano, a fábrica conseguiu diminuir o custo por componente de 230 para 2,5 euros, bem como o tempo de produção de uma semana para seis horas (Davies, 2022).

### 2.3.2 Contexto não industrial

Foram desenvolvidos vários braços robóticos de *open source* imprimíveis em 3D como o Zortrax, BCN3D Moveo, Dexter ou Thor.

#### Zortrax

Este braço robótico (figura 12) desenvolvido pela empresa Zortrax apresenta cinco graus de liberdade, conseguindo movimentar objetos até 100 g, contando com três motores elétricos (Grames & Gharge, 2022).



Figura 12 – Zortrax (Grames & Gharge, 2022)

#### BCN3D Moveo

O BCN3D Moveo é um braço robótico (figura 13) imprimível em 3D projetado pela BCN3D Technologies e com a parceria do *Departament d'Ensenyament da Generalitat de Catalunya*. Apresenta cinco graus de liberdade (BCN3D, 2016). O BCN3D Moveo suporta aproximadamente 500 g e tem um alcance de 400 mm (Ghizoni, 2018).



Figura 13 – BCN3D Moveo (BCN3D, 2016)

## Dexter

A empresa Haddington Dynamics sediada em Las Vegas fez um braço robótico (figura 14) de *open source* chamado de Dexter (Markforged, 2023), apresentando um alcance de 770 mm. Este braço robótico consegue movimentar até 3 kg de carga e tem cinco graus de liberdade (Shepherd, 2023).



Figura 14 – Dexter (Markforged, 2023)

## Thor

Thor é um braço robótico articulado (figura 15) com seis graus de liberdade imprimível em 3D e é de *open source*. Quando estendido verticalmente apresenta aproximadamente 625 mm de altura (excluindo o comprimento da ferramenta) e pode movimentar cargas até 750 g (incluindo a massa da ferramenta). O projeto teve início em 2015 como um trabalho académico intitulado de “*Design and implementation of an Open Source, 3D printed 6DOF robotic arm*”. Posteriormente este projeto teve várias melhorias. O principal objetivo da realização deste projeto consistiu em elaborar um braço robótico que pudesse ser utilizado em ambientes académicos de forma a ajudar no ensino de robótica. O tempo total que é necessário para imprimir todas as 51 peças é de cerca de 200 horas. O custo dos componentes para este braço robótico é cerca de 350 euros (excluindo o material de impressão). Foram feitas mais de 20 unidades em pelo menos 11 países. Este braço robótico foi elaborado utilizando apenas ferramentas de *open source* como o FreeCAD para a modelação 3D, KiCAD para o projeto da Placa de Circuito Impresso (PCB) e o *firmware* GRBL para o controlo (Angel, 2023; Costa et al., 2020).



Figura 15 – Thor (Angel, 2023)

Foram produzidos vários tipos de garras em contexto não industrial.

## Garras paralelas de duas pinças

O projeto de uma garra de duas pinças é um dos *designs* mais adotados por não ser de elevada complexidade e ser eficiente (Moura, 2020). Segundo alguns estudos estatísticos, 60 a 70% da habilidade humana de manusear objetos de formatos cilíndricos ou prismáticos é feita com dois dedos. É devido a esse aspeto que a utilização de duas pinças em garras robóticas torna-se frequente (Hugo, 2013).

A garra paralela de duas pinças alcança com sucesso a manipulação de vários elementos do quotidiano, sendo de realçar que o desenvolvimento de uma garra com mais graus de liberdade acrescenta uma maior complexidade na sua elaboração, deixando em aberto se as vantagens em produzir uma garra com mais graus de liberdade supera a complexidade de desenvolvimento (Fuster, 2015). Por norma o manuseamento de peças de pequena e média dimensão não necessita de garras com mais de duas pinças (Santos, 2019).

John (2021) desenvolveu uma garra com *feedback* de força para o braço robótico AX-18A da Crustcrawler no laboratório do Rijksuniversiteit Groningen. Tratou-se de uma garra paralela em que o programa de controlo PuTTY foi elaborado com base na leitura de carga do servomotor. O controlador utilizou a leitura e a velocidade de movimento para regular a força de fecho da garra. No projeto foi definido que a garra devia ter a capacidade de agarrar um ovo ou um copo descartável sem os danificar ou os deixar cair. A primeira etapa do desenvolvimento do projeto correspondeu à elaboração de especificações. O protótipo devia apresentar um curso de abertura/fecho de pelo menos 70 mm. A massa total do protótipo devia ser cerca de 150 g. A força que a garra devia ser capaz de suportar seria de 15 N. O custo total do desenvolvimento e implementação do projeto devia ser inferior a 140 euros. O processo de fabrico seria a tecnologia de FFF e o material ácido polilático (PLA).

A segunda etapa do projeto consistiu numa fase conceptual. Nessa fase foi elaborada uma tabela com diferentes possibilidades de projeto de garra. Foram listados diferentes tipos de funcionamento de garras e para cada tipo de funcionamento foram listadas diferentes soluções. Para o desenvolvimento da garra foi definido o uso de engrenagens, porque seria mais adequado para converter a rotação do servomotor em translação das pinças. Foram escolhidas as pinças paralelas, porque seriam capazes de agarrar e levantar objetos redondos e quadrados axialmente e radialmente. Devido ao movimento de fecho paralelo, as pinças maximizam os pontos que prendem o objeto a ser manuseado. Como o protótipo devia movimentar um ovo ou um copo descartável seria mais adequado este ser baseado no princípio de força aplicada em detrimento de outras soluções para segurar objetos.

A próxima etapa do projeto foi o desenho da garra no *software SolidWorks* como mostra a figura 16. A largura e o comprimento da garra foram baseados numa já existente. As pinças foram desenhadas de forma que permaneçam paralelas.

As engrenagens apresentam um módulo de 2 e 7 dentes apenas em metade de cada engrenagem, um ângulo de pressão de 20 graus e um entre-eixo de 28 mm.

A etapa que se seguiu foi o fabrico e a montagem do protótipo. As peças da garra foram impressas no equipamento Ultimaker 2+. Antes da montagem, as peças impressas foram sujeitas a um pós-processamento. O pós-processamento relacionou-se com o alargamento, através de uma furadeira manual, de todos os furos para a passagem dos componentes normalizados, pois no processo de MA o material pode contrair. Além disso, algumas regiões das peças foram lixadas. Tendo a garra montada, foi projetado o controlador de força e feita a respetiva programação. A última fase correspondeu aos testes e validação.

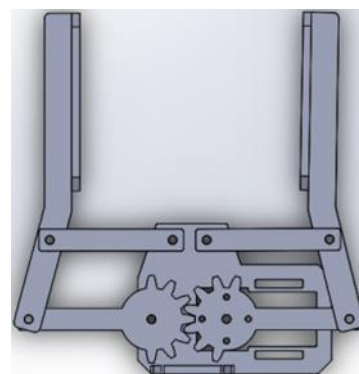


Figura 16 – Garra paralela de duas pinças para o robô AX-18A (John, 2021)

O autor constatou que a perfuração manual dos orifícios fez com que a garra, ao longo dos testes de funcionalidade, não fosse exatamente paralela durante a realização dos movimentos, pois o processo manual envolvido foi propício a erros dimensionais e geométricos. Isto fez com que os dois paralelogramos formados pelas hastes não tivessem a forma estipulada, perdendo-se a função paralela da garra. Nesse trabalho também é mencionado que os parafusos e porcas que estão presentes na montagem dos elementos da garra não puderam ser apertados como desejável para minimizar o atrito das peças durante os movimentos da garra, sendo também um fator que afetou a sua eficiência (John, 2021).

Moura (2020) realizou a modelação no *software SolidWorks* de uma garra acionada de forma elétrica. Foi produzido e montado um protótipo com recurso à tecnologia de FFF e desenvolvido um sistema de controlo que limitou a força aplicada pela garra. As especificações definidas foram um acionamento elétrico, uma força aplicada pelas pinças controlada e limitada e a garra devia ser projetada para agarrar objetos com uma força máxima de 0,5 kg·f. Traçadas as especificações, a etapa

que se seguiu foi o CAD da garra (figura 17). A partir de um modelo de garra já existente, este foi usado como base. Tendo este modelo, foram efetuadas várias alterações para ir ao encontro com as especificações definidas. A garra apresenta um conjunto de engrenagens, juntamente com as hastes que sustentam as estruturas das pinças, que foram redesenhadas para facilitar a produção. O modelo 3D foi redesenhado de acordo com o servomotor utilizado.

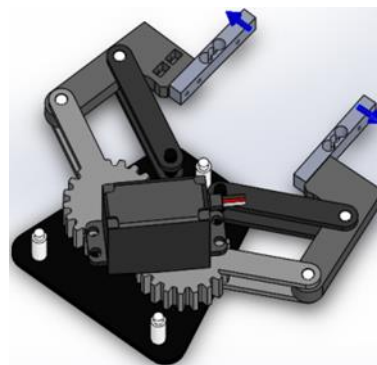


Figura 17 – Garra paralela de duas pinças projetada por Moura (2020)

Após o término da fase de redesenho, foi feito um estudo de movimento no mesmo *software* onde a garra foi elaborada. Esse estudo serviu para avaliar qual o torque que o servomotor devia ter para aplicar 0,5 kg·f no objeto. O estudo consistiu na configuração dos movimentos e forças envolvidas e na geração de um gráfico de torque. O valor de torque foi de 4,17 kg·f·cm. Seguidamente as peças foram impressas com 100% de *infill* de forma a obter a máxima resistência mecânica.

Após a impressão 3D, o autor verificou que os furos projetados para os elementos normalizados necessitavam de um pós-processamento, pois não se encontravam exatamente circulares. A etapa que se seguiu foi a montagem de todos os elementos do protótipo. O eixo do motor foi fixado de forma permanente na engrenagem com cola instantânea para evitar o escorregamento durante a aplicação da força. Por fim, foi colocada a célula de carga no protótipo para converter a deformação mecânica num sinal elétrico. A saída elétrica foi proporcional à força aplicada, sendo desenvolvida a respetiva programação. De seguida foram feitos os testes ao funcionamento do mecanismo que mostraram que a força aplicada pelo protótipo ficou abaixo do pretendido (Moura, 2020).

Fuster (2015) desenvolveu uma garra para um braço robótico de forma a movimentar objetos do quotidiano. A garra devia manusear elementos de geometrias esféricas, cilíndricas, prismáticas ou irregulares e de diferentes materiais como por exemplo plástico, metal ou cerâmica. As pinças da garra deviam apresentar uma distância máxima de 120 mm entre si e o protótipo ser impresso em 3D. Além disso, a garra devia segurar objetos em pelo menos dois pontos de contacto de forma a garantir a estabilidade de preensão.

O autor menciona que é possível que uma garra seja paralela através de um sistema guiado (figura 18) ou através de uma configuração geométrica em forma de paralelogramos das suas hastes (figura 19). Em qualquer dos mecanismos, as duas pinças encontram-se constantemente paralelas em qualquer movimento que seja realizado pela garra.

O autor também fez algumas simulações de torque, tendo chegado à conclusão que para agarrar uma lata de um refrigerante com aproximadamente 66 mm de diâmetro implicava um torque na garra de 3,38 N·cm com o mecanismo de paralelogramos, enquanto que para a garra com o mecanismo guiado o torque foi de 6,37 N·cm. Ou seja, o torque necessário para a manipulação da lata é menor no mecanismo na forma de paralelogramos, atingindo também uma menor necessidade de torque na preensão de pequenos objetos (Fuster, 2015).

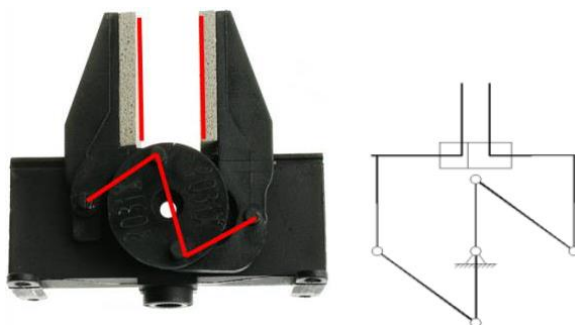


Figura 18 – Mecanismo assente num sistema guiado (Fuster, 2015)

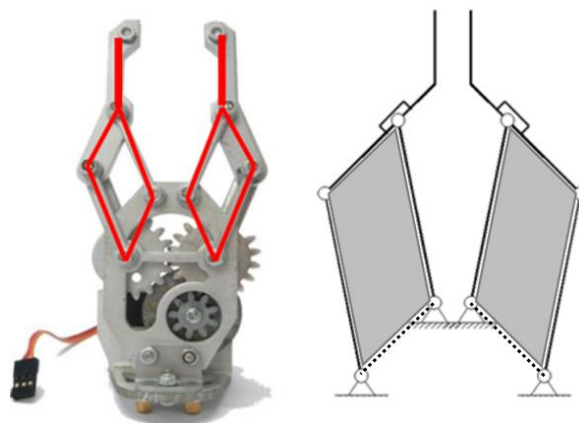


Figura 19 – Mecanismo assente em paralelogramos adaptado de Fuster (2015)

Com recurso ao *software SolidWorks*, a garra foi projetada com o mecanismo de abertura/fecho paralelo. A garra devia ser atuada de forma elétrica através de um servomotor Dynamixel.

O protótipo de duas pinças apresenta um conjunto de engrenagens, sendo uma delas acoplada ao servomotor. O mecanismo da garra foi o assente em paralelogramos. Para o servomotor situar-se o mais centrado possível foram projetadas quatro engrenagens, sendo o servomotor ligado a uma das internas. Para a garra alcançar uma maior amplitude angular do servomotor, as engrenagens internas são de menor dimensão. As engrenagens menores têm oito dentes e as engrenagens maiores têm doze dentes. Ambas apresentam um módulo de dois, sendo um módulo normalmente usado para a dimensão das engrenagens em questão. A garra apresenta duas peças que envolvem o servomotor e é controlada com Arduino.

Após a construção do protótipo (figura 20) este foi testado, atingindo o objetivo de segurar vários tipos de objetos com sucesso, contudo os parafusos e porcas presentes no mecanismo da garra deviam ser substituídos por uma melhor solução para reduzir o número de elementos do protótipo (Fuster, 2015).

A garra de John (2021) apresenta pelo menos 7 peças fabricadas e no mínimo 14 elementos normalizados (parafusos e porcas), precisando de cerca de 20 minutos para montar o conjunto. Enquanto a garra de Moura (2020) tem pelo menos 9 elementos fabricados. Já a garra de Fuster (2015) apresenta 18 peças fabricadas e 25 parafusos, demorando 40 minutos para fazer a montagem.

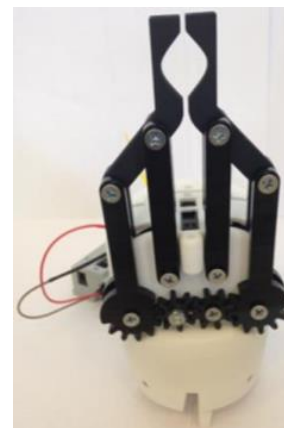


Figura 20 – Garra paralela de duas pinças (Fuster, 2015)

### Garras articuladas de duas ou mais pinças

Santos (2019) desenvolveu uma garra robótica *low cost* para manusear peças através da tecnologia de FFF. Foi usado um projeto já existente de uma garra de três pinças como base de trabalho.

O projeto foi redesenhado no *software SolidWorks* fazendo as modificações essenciais para reduzir os gastos de fabrico e otimizar as propriedades mecânicas. A primeira modificação consistiu na diminuição do número de pinças de três para duas, considerando que, para manipular objetos de pequena e média dimensão, não são necessárias mais do que duas pinças. O sistema foi acionado por engrenagem. A garra foi redimensionada e foram efetuadas simulações para prever os eventuais erros



no projeto. Foi selecionado o material, tendo em consideração os fatores baixo custo e o bom desempenho mecânico. A garra foi feita com PLA.

Depois das peças serem fabricadas por MA, estas foram montadas. Para efetuar a ligação dos elementos produzidos foram usados alguns pinos para a fixação. Tendo em conta que os pinos deviam apresentar dimensões específicas, estes também foram impressos. Também foram usadas porcas e anilhas na montagem. A figura 21 mostra a garra produzida. Foi elaborado o sistema elétrico com uma placa de Arduino e sensores para conseguir a movimentação da garra e a execução das tarefas a ela inerentes. O sistema foi composto por quatro partes: servomotor, placa de Arduino UNO, *software Arduino Integrated Development Environment* (IDE) e a fonte de alimentação (Santos, 2019).



Figura 21 – Garra articulada de duas pinças produzida por Santos (2019)

Sadun et al. (2020) desenvolveram uma garra de três pinças impressa com o material PLA. A garra (figura 22) foi elaborada usando atuadores elétricos e um sistema de transmissão de engrenagens para agarrar e soltar peças cilíndricas e esféricas. A tecnologia de FFF usada foi a Ultimaker 3 *Extended*. O *design* da garra foi projetado no *software SolidWorks* e depois exportado para o *software Ultimaker Cura*.

A garra é constituída pela base, servomotores, corpo, elos de engrenagem, interligações e pinças. A garra foi projetada para suportar a carga de 2 kg. O corpo apresenta três servomotores. Os servomotores foram conectados aos elos da engrenagem. Os elos da engrenagem podem girar livremente da direita para a esquerda e vice-versa. Para testar o protótipo desenvolvido foram usados o Arduino Mega e o *software* MATLAB. O protótipo apresentou pequenas folgas causadas pelo pequeno erro no movimento repetido das pinças. Através do projeto elaborado, os autores verificaram que o protótipo podia segurar objetos, embora estes seriam de baixo peso. No geral, o projeto foi elaborado com êxito, considerando o modelo produzido e o teste de funcionalidade efetuado (Sadun et al., 2020).

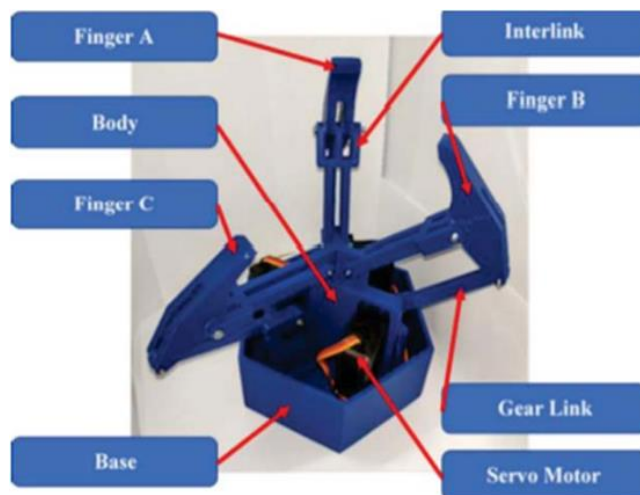


Figura 22 – Garra articulada de três pinças (Sadun et al., 2020)

Song et al. (2017) desenvolveram uma garra de três pinças composta pela estrutura da base, o sistema de transmissão e a atuação elétrica. A garra tinha como função a recolha de frutos. Os requisitos definidos foram a estabilidade da região do aperto, geometria simples, funcionamento eficiente da abertura/fecho e entre outros. Cada pinça apresenta duas articulações, sendo a proximal e a

distal. As três pinças encontram-se distribuídas em forma de Y na base. A transmissão de movimento em cada pinça ocorre através de uma polia movida por um motor e um tendão fixado na extremidade das pinças. Na articulação proximal e na distal, a mola de torção foi instalada para executar o movimento de acoplamento.

O projeto mostrado na figura 23 apresentou adaptabilidade à forma dos frutos e realizou o contacto flexível com a superfície para evitar danos nestes. Os resultados mostraram que o protótipo pode realizar a preensão não destrutiva, cumprindo com os requisitos definidos (Song et al., 2017).

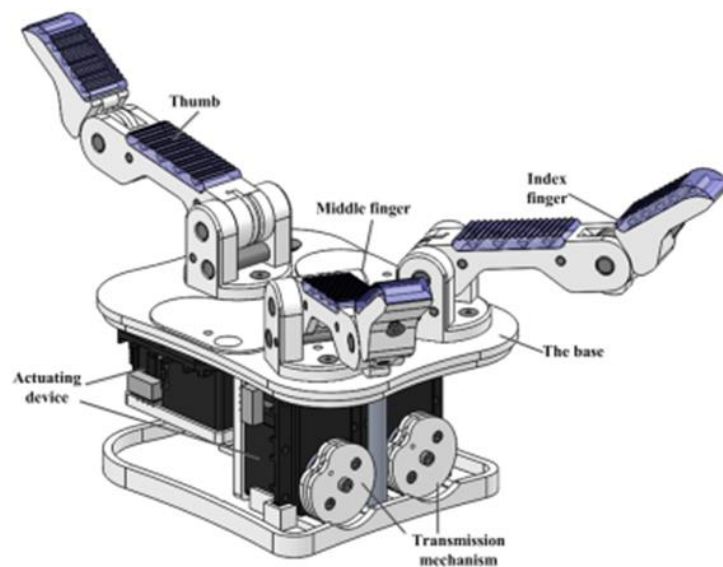


Figura 23 – Garra articulada de três pinças acionada por tendão (Song et al., 2017)

Telegenov et al. (2015) elaboraram uma garra de três pinças no *software SolidWorks*, sendo de *open source* e de baixo custo, cuja finalidade relacionou-se com educação e investigação. O modelo 3D da garra foi fabricado pela tecnologia de FFF e foi usado um servomotor. O requisito de *design* de baixo custo teve como consequência a minimização do número de atuadores e de componentes, o que levou à diminuição da massa da garra. Cada pinça da garra apresenta dois graus de liberdade, tendo dois elos e uma roda sem-fim. Foi usada uma mola de extensão entre a primeira e a segunda falange para realizar o acionamento do segundo grau de liberdade. A mola de extensão permitiu que cada pinça se comporte como um corpo rígido durante a rotação. Quando a primeira falange da pinça está em contacto com um objeto, a segunda falange inicia o movimento em torno de um ponto para completar o envolvimento completo da peça. Após o contacto com a primeira falange, a força exercida estende a mola que passa a transferir o movimento para a segunda falange.

Todas as articulações rotacionais de cada pinça foram conectadas através de veios com anéis de retenção em ambos os lados. As três pinças da garra foram acionadas por um único atuador elétrico, usando um sistema de transmissão de engrenagens. Um servomotor foi fixado na base e aciona a engrenagem helicoidal que por sua vez faz movimentar as pinças.

As pinças encontram-se dispersas de forma circular com um ângulo de 120 graus entre si. As estruturas principais do protótipo foram fabricadas usando a impressora UP *Plus* 3D com o material acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Também foi usado um material de impressão flexível para produzir as películas para as falanges e a palma. A garra apresentou uma massa de 500 g. A força máxima de preensão na extremidade do protótipo foi de 9 N. Depois da elaboração da garra de *open source* foram feitas alterações ao modelo 3D de forma a criar um mecanismo que permitisse a atuação individual de cada pinça. O sistema de transmissão individualizado consistiu em duas engrenagens

helicoidais e uma mola de compressão. Caso uma das pinças entre em contacto com um determinado objeto e o bloqueie, as outras pinças ainda se movem para completar o seu movimento de fecho. Isto é assegurado pela engrenagem helicoidal que é capaz de deslizar ao longo do seu eixo vertical enquanto roda, desconectando a pinça bloqueada da roda dentada helicoidal mandante. A figura 24 mostra o protótipo final (Telegenov et al., 2015).



Figura 24 – Garra articulada de três pinças (Telegenov et al., 2015)

Gouveia & Advisor (2017) produziram uma garra robótica em que o núcleo foi feito por uma impressora 3D, desempenhando um papel estrutural. A escolha de um material polimérico forneceu à garra a conformidade e a aderência necessária para garantir as condições adequadas de manuseamento. Apesar do projeto utilizar um motor, as juntas de flexão da garra atuam de forma independente, apresentando um bom desempenho funcional no momento de agarrar diferentes objetos. O projeto baseou-se em características de garras convencionais e em características de garras antropomórficas. Os requisitos definidos para o projeto foram uma boa aderência, baixo peso, resistente a colisões e de simples operação para segurar objetos. A garra foi projetada para possuir quatro pinças, utilizando apenas um motor.

O projeto baseou-se no modelo T de garra já existente da Yale *OpenHand*. Este modelo resultou de uma combinação de peças impressas em 3D, sendo uma garra robótica acionada por tendão (também designado por cabo) através do motor. O tendão passou pelos orifícios das pinças. Foram colocados pinos metálicos ao longo das pinças e da base para a passagem do tendão, evitando o desgaste e servindo de guiamento.

O sistema de fecho da garra utilizou a rotação do motor para puxar o cabo. Como é um sistema de simples efeito, para abrir a garra foi necessário usar outros componentes como molas de torção e de extensão colocadas na parte exterior das pinças. O modelo tem duas pinças de cada lado que se fecham perpendicularmente ao plano que as separam. O projeto apresenta uma polia posicionada no curso do tendão, entre o motor e as pinças, permitindo a estas funcionarem independentemente. Este mecanismo permite que as pinças cessem o movimento quando contactam com o objeto.

As peças foram impressas pela tecnologia de FFF com o material PLA com um *infill* de 30%, sendo necessárias estruturas de suporte nalguns casos. Depois das pinças estarem impressas foram banhadas em uretano e depois foram sujeitas a cura para fornecer adaptabilidade e flexibilidade. De seguida os elementos da garra foram montados. A figura 25 mostra o protótipo elaborado. Foi implementado o microcontrolador e elaborado o código *Python*. Por fim, foram feitos testes ao funcionamento, nos quais os autores verificaram que as quatro pinças da garra se articularam sobre o objeto, envolvendo-o totalmente. No entanto, existiram algumas falhas na reabertura das pinças devido ao mau funcionamento das molas de torção e do sistema de polias intermédias (Gouveia & Advisor, 2017).



Figura 25 – Garra articulada de quatro pinças acionada por tendão (Gouveia & Advisor, 2017)

Davidson & Mo (2015) fizeram a conceção de uma garra por MA para a recolha de frutos. A garra foi projetada para alcançar uma maior velocidade, baixa complexidade, adequação a um ambiente de campo altamente variável e a imitação da colheita manual para diminuir os danos nos frutos.

A garra apresenta um aperto esférico com uma distribuição de força normal e uma sequência de movimentos que replica a mão humana. A garra foi acionada por tendão com juntas de flexão para melhorar o desempenho do sistema na presença de erros de posição, bem como para aumentar a robustez do protótipo para diferentes tamanhos, formas e orientações dos frutos. Cada pinça tem dois elos conectados por juntas de flexão.



A garra possui três pinças iguais dispostas simetricamente ao longo de uma placa circular com inserção de um material flexível. O espaçamento das pinças foi definido de forma que durante o processo de agarrar um fruto de 80 mm de diâmetro, os elos proximais fizessem o contacto com o fruto. O comprimento total das pinças é equivalente ao comprimento de um dedo indicador. Cada um dos elos de uma pinça possui uma almofada de uretano na base para aumentar o atrito. Há também uma pinça colocada na garra que tem como função aplicar pressão contra o caule durante o desprendimento do fruto. Na posição aberta, o ângulo entre os elos da garra é 30 graus. Uma polia fornece a atuação entre os elos do protótipo. A pinça referente ao desprendimento do fruto do caule apresenta um atuador elétrico independente das restantes pinças.



Figura 26 – Garra articulada acionada por tendão (Davidson & Mo, 2015)

As pinças foram impressas pela tecnologia de FFF com o material ABS. De seguida o uretano foi vertido nas cavidades das almofadas das pinças e na base, e foi sujeito a cura. Os tendões usados no projeto são de *nylon*. Em cada pinça o tendão foi amarrado na ponta distal, seguindo um percurso oco e foi direcionado por dois pinos-guia no elo proximal. Acoplado ao atuador elétrico encontra-se uma polia que também foi impressa. O protótipo (figura 26) apresenta um controlo de malha aberta para melhorar a velocidade de seleção nas colheitas e tem um alcance máximo de 600 mm. A massa da garra é de 400 g (Davidson & Mo, 2015).

### Outras tipologias de garras

Aidan (2017) produziu uma garra com recurso à tecnologia de FFF, usando um filamento flexível para a impressão 3D. Depois da impressão foram colocados tendões de *nylon*, o servomotor e os parafusos. O projeto foi constituído por apenas uma peça impressa que representa toda a estrutura como mostrado na figura 27.



Figura 27 – Garra flexível de quatro pinças (Aidan, 2017)

O servomotor foi aparafusado na parte de trás da peça impressa. Foi colocado um tendão de *nylon* de maneira a passar pelo centro da pinça, sendo inserido de fora para dentro. O tendão seguiu até à base e foi alocado ao servomotor. O procedimento foi repetido para as restantes pinças da garra. De forma a testar o protótipo, o servomotor foi ligado ao microcontrolador Arduino (Aidan, 2017).

Yang et al. (2021) elaboraram uma garra com o intuito de ser capaz de manusear objetos de geometria variável. Foi colocado um sensor no interior da garra, permitindo medir a força de contacto necessária para segurar a peça, garantindo a preensão adequada. No estudo foi usada a MA para fabricar todo o corpo do protótipo, sendo este composto por uma única peça impressa. O princípio de funcionamento da garra projetada consiste na aplicação de uma força no centro para dobrar as três pinças (Yang et al., 2021). Este tipo de garra também é chamado *compliant gripper*. Na figura 28 observa-se o projeto de três pinças.

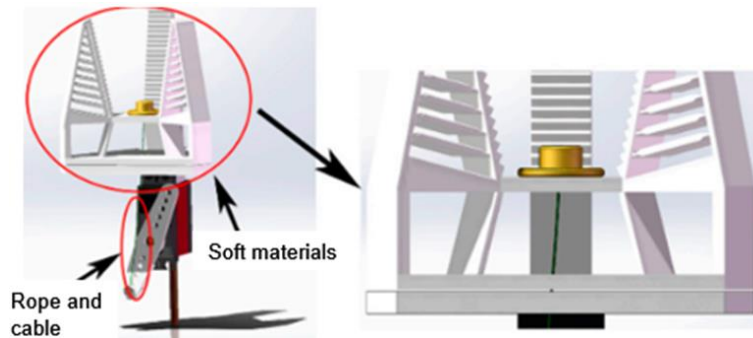


Figura 28 – Garra de três pinças deformáveis elasticamente (Yang et al., 2021)

Yang et al. (2021) usaram o equipamento ZRapid *Tech*, modelo iSLA 660, utilizando uma resina elástica da Formlabs. A massa da garra sem o servomotor acoplado é 68 g. As ligações interiores encontram-se distribuídas na diagonal e foram conectadas a uma estrutura elástica. As ligações interiores, que podem ser modificadas de forma flexível por ação de força externa, permitem que as pinças se adaptem ao objeto a ser manuseado, facilitando o envolvimento da peça a ser manipulada. No estado de repouso cada pinça encontra-se inclinada 30 graus e apresenta 50 mm de comprimento. A garra tem três pinças distribuídas de forma circular e o seu *design* foi inspirado numa barbatana de peixe. Quando não existe força aplicada, as pinças deformadas retornam à sua posição original devido à elasticidade do material que as compõe. A força externa é aplicada por um fio de tração, que conecta os encaixes rotativos do servomotor à parte central da garra. Quando o servomotor recebe um comando, este executa a ação correspondente para movimentar o fio, sendo usado o microcontrolador Arduino Uno.

No projeto foi encontrada a relação entre o deslocamento angular da extremidade de cada pinça e o comprimento do fio movimentado. Após ser efetuado um teste, os autores verificaram que a deflexão angular de cada pinça aumentou à medida que o deslocamento do fio puxado também aumentou. Após o teste do protótipo, os autores constataram que este se adaptou a um objeto cilíndrico, atingindo cerca de 2,4 N de força de prensão quando o fio de tração foi deslocado 13 mm. Também foi feito um teste em que a garra segurou uma fatia de bolo, sendo que o protótipo não a danificou e as pinças da garra adaptaram-se ao corpo a ser manuseado, demonstrando viabilidade funcional. A garra desenvolvida é adequada para a utilização na indústria alimentar e apresenta uma força de prensão de cerca de 0,1 a 3 N para alimentos de pequenas dimensões (Yang et al., 2021).

Liu et al. (2021) desenvolveram uma garra atuada de forma elétrica baseada na técnica de *origami* para ser colocada num braço robótico. O movimento da garra ocorre através de um conjunto de tendões ligados a um motor. Foram colocados quatro tendões em blocos em torno da base até ao centro onde se juntam numa única extremidade. As dobras que conectam os blocos foram projetadas para serem elásticas. Ao ser puxada a extremidade que junta os tendões, as pinças dobram-se. A ausência de força aplicada na extremidade dos tendões resulta num retorno progressivo ao estado de repouso (Liu et al., 2021). A figura 29 mostra o princípio de funcionamento da garra.

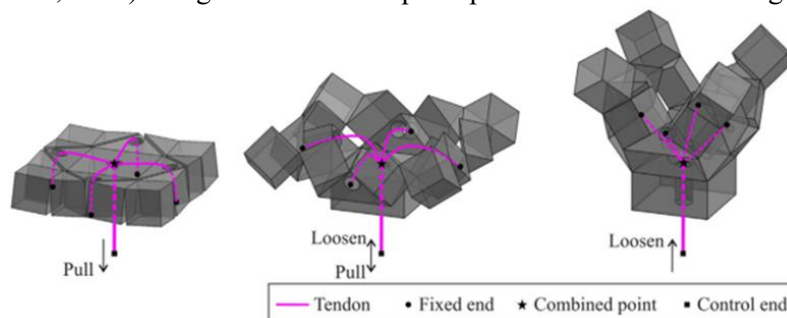


Figura 29 – Princípio de funcionamento assente na técnica de *origami* (Liu et al., 2021)

Liu et al. (2021) fabricaram a garra através da tecnologia de FFF Ultimaker 3 *Extended* usando o filamento de poliuretano termoplástico (TPU). Foram impressos na tecnologia de *PolyJet* (Stratasys J735) quatro revestimentos para as extremidades das pinças usando o material *Agilus 30 Clear*. De seguida os revestimentos foram colados nas extremidades, aumentando o atrito durante a preensão dos objetos. Foi utilizado *nylon* para os tendões. A massa da garra é 22 g sem o motor implementado. O protótipo foi montado numa estrutura de suporte e foi colocado um motor. A estrutura de suporte foi projetada com orifícios de conexão para ser aparafusada ao braço robótico. A extremidade do conjunto de tendões foi amarrada ao eixo do motor de passo. O microcontrolador Arduino UNO foi usado para realizar os acionamentos do motor. A dimensão máxima de preensão é 100 mm, sendo que a garra apresenta 90 mm de dimensão lateral. O protótipo foi submetido a vários testes experimentais (observa-se na figura 30 um dos testes efetuados) nos quais os autores verificaram que a garra foi capaz de agarrar objetos com formas simétricas e assimétricas (Liu et al., 2021).



Figura 30 – Garra de quatro pinças feita por Liu et al. (2021)

Kodnongbua et al. (2022) criaram um algoritmo que automatiza o projeto de garras robóticas passivas através da geometria da peça que se pretende manusear e da sua posição perante a estrutura cinemática do braço robótico. O algoritmo projeta simultaneamente o formato da garra, bem como estipula o trajeto sem haver colisões indesejáveis do protótipo ao pegar no objeto. No trabalho dos autores foi aplicada a ferramenta de *design* generativo nas garras passivas. Para o manuseamento de peças, a garra beneficia apenas dos graus de liberdade presentes no braço robótico para executar as ações de segurar e mover objetos.

Nesse trabalho o uso da MA aliada à otimização de *design* permitiu ampliar as possibilidades de garras passivas geradas para diferentes objetos, pois o algoritmo cria garras imprimíveis em 3D que podem manusear peças de forma estável. A figura 31 mostra um dos protótipos feitos pelos autores.



Figura 31 – Uma das garras passivas geradas no trabalho de Kodnongbua et al. (2022)

As etapas (figura 32) para a elaboração de uma garra através do algoritmo consistem em importar o objeto que o utilizador pretende que seja manuseado, gerar diversos resultados com potencial de garras passivas funcionais (onde os pontos azuis apontam para as regiões de contacto), otimizar a geometria e o percurso da garra (pontos e ramos vermelhos ligados) e por fim criar a geometria final através de *design* generativo, diminuindo a sua massa.

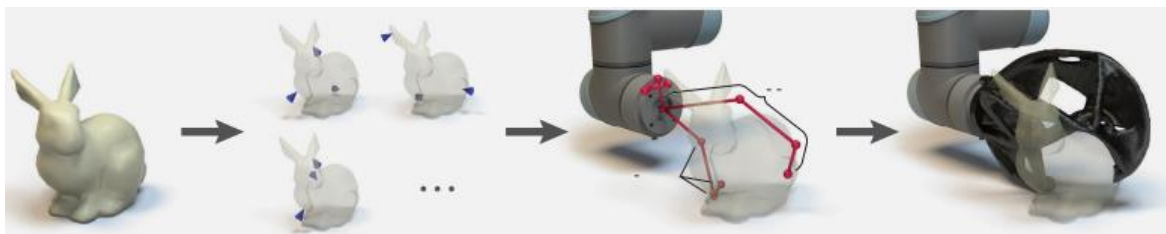


Figura 32 – Representação esquemática das etapas de elaboração de uma garra pelo algoritmo (Kodnongbua et al., 2022)

O algoritmo foi feito de forma que as garras geradas restrinjam o objeto em pelo menos três pontos de contacto. Estes três pontos de contacto são colocados automaticamente pelo algoritmo, onde são aplicadas forças em diferentes ângulos e direções. De seguida são gerados os resultados nos quais são descartados aqueles que não são estaticamente estáveis sob a ação da gravidade. Além disso, também são descartados os resultados que teriam colisões no percurso da garra até à peça para o seu manuseamento.

Os autores imprimiram as garras utilizando dois materiais. Um material com um elevado coeficiente de atrito para as zonas de contacto (TangoBlackPlus) e um material com uma boa rigidez e um baixo custo (ABS) para a restante garra. Foi utilizado o equipamento de MA Stratasys J750 *Digital Anatomy* para as zonas de contacto e os Stratasys FFF 3D *Printers* (Fortus 250mc, F120 e F170) para a restante parte do protótipo. Depois as partes de cada garra foram montadas e testadas no braço robótico UR5 com o percurso definido pelo algoritmo. Através dos testes efetuados os autores concluíram que o algoritmo elaborado alcançou uma boa confiabilidade (Kodnongbua et al., 2022).

# 3 Trabalho experimental

O trabalho experimental é dividido em duas partes. A primeira parte apresenta a análise dos problemas mecânicos de um braço robótico de *open source* existente na Spinner Dynamics, bem como as ações de melhoria/correção efetuadas. Enquanto a segunda parte apresenta o processo de desenvolvimento de uma garra produzida por MA para esse braço robótico.

## 3.1 Caso de estudo

### 3.1.1 Braço robótico

O braço robótico presente na Spinner Dynamics é o Thor. Segundo o *website* do autor os materiais que são necessários para produzir este braço robótico são 3 a 4 kg de PLA ou polietileno tereftalato glicol (PETG) e 0,5 kg de ABS para as peças que são submetidas a uma maior solicitação mecânica como as que estão em contacto com os motores. Este projeto incorpora sete motores de passo e um servomotor para a garra (Angel, 2023).

O criador do Thor, Ángel, projetou uma PCB para a ligação elétrica dos elementos. A PCB é ligada ao Arduino através dos pinos digitais. Esta PCB permite controlar até 8 motores de passo (sendo precisos 7 neste projeto), tem um sinal de *pulse-width modulation* (PWM) de saída para o controlo da garra e pinos extra de 12 V e 5 V. No projeto também se encontram 6 ventoinhas, um micro *endstop*, 4 *optical endstops* e um botão *on/off*. É necessário colocar na PCB um *driver* A4988 (figura 33) por cada motor (Angel, 2023). Este *driver* (PTRobotics, 2023) é um componente muito usado em motores de passo bipolares, apresentando um *chip* A4988, servindo para o controlo destes através do *software* de programação como o Arduino. Quando este recebe um pulso é realizado um passo pelo motor (RepRap, 2023).

O projeto eletrónico do Thor foi desenvolvido com o microcontrolador Arduino Mega 2560 (figura 34). Esta placa apresenta 54 pinos digitais de entrada/saída, sendo que 15 podem ser utilizados como saídas de PWM, tem 16 entradas analógicas, uma ligação *Universal Serial Bus* (USB), uma entrada para um adaptador de energia e um botão de *reset*. Caso o Arduino seja alimentado através da porta USB de um computador irá receber a tensão de 5 V, contudo o recomendado é de 7 a 12 V, que é conseguido através da ligação de um adaptador de energia (Arduino, 2021). Na figura 35 observa-se a PCB do Thor com a indicação onde devem ser conectados os componentes.



Figura 33 – *Driver* A4988 (PTRobotics, 2023)

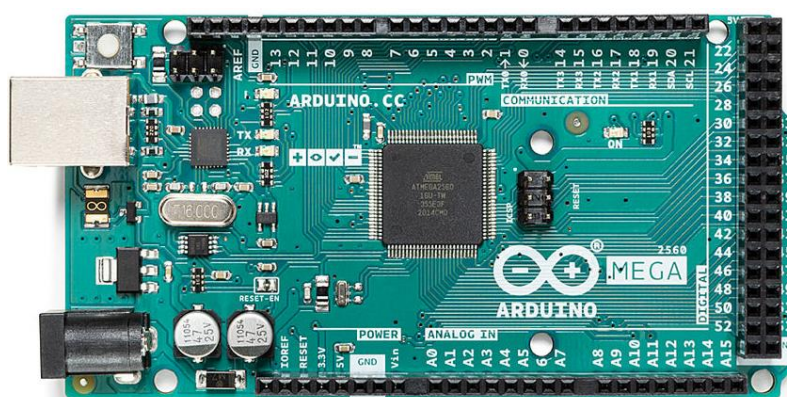


Figura 34 – Arduino Mega 2560 (Arduino, 2021)



## Thor ControlPCB v1.0 - Wiring Diagram

Made by AngeILM

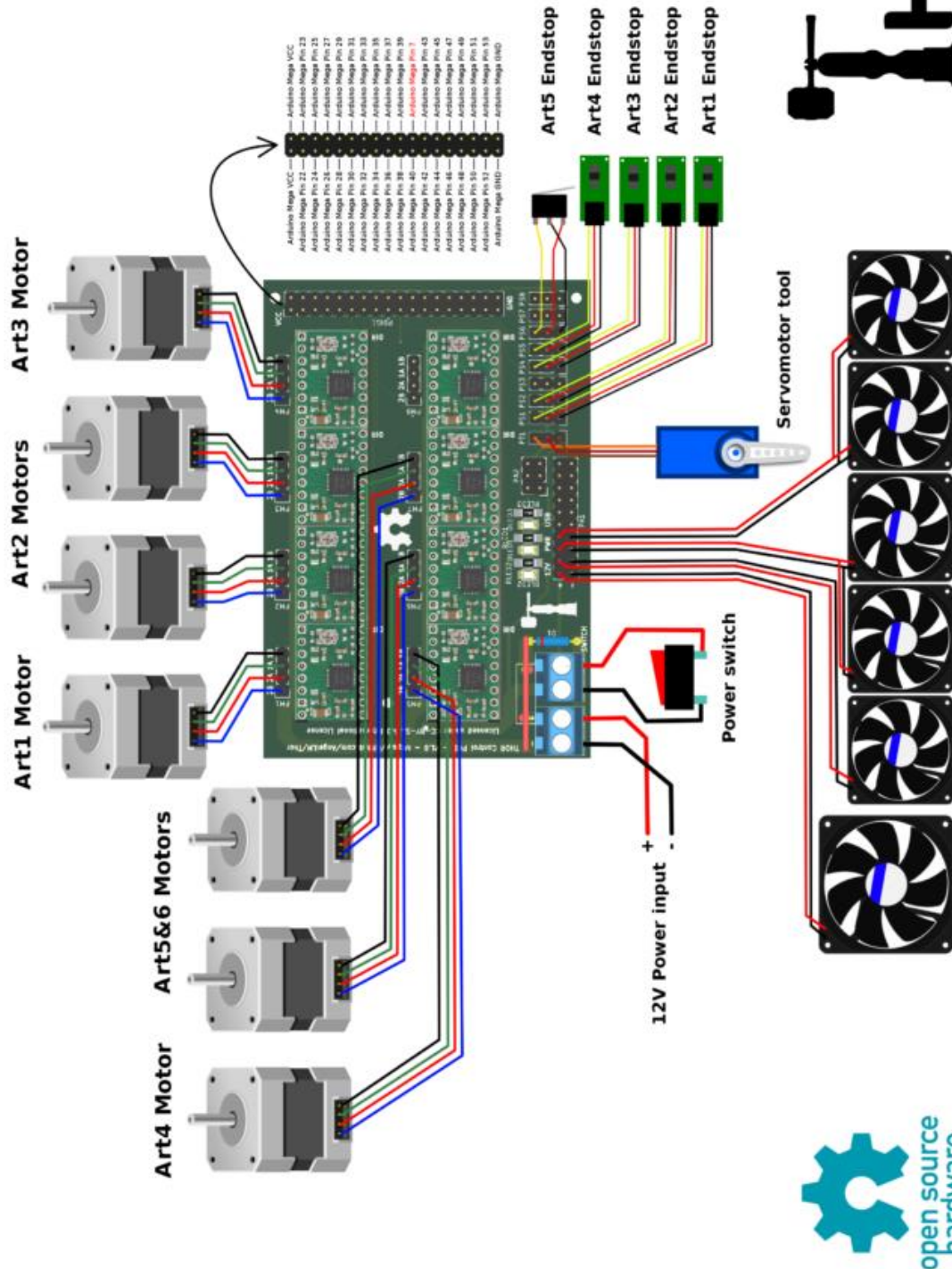


Figura 35 – PCB do Thor (Angel, 2023)

Para ser possível a realização de movimentos pelo Thor pode ser usado o programa de *open source* Arduino IDE que possibilita aos utilizadores escreverem e carregarem diversos códigos para o microcontrolador (Buggs, 2023). Além disso, para este braço robótico também é preciso instalar o

*firmware* GRBL. O GRBL possibilita a operação de equipamentos de controlo numérico computadorizado (CNC) e também de braços robóticos. Este *firmware* permite escrever e enviar comandos na forma de código G para o microcontrolador, desencadeando por exemplo a operação de motores de passo (Dejan, 2023).

Relativamente aos comandos que devem ser escritos para colocar o Thor em funcionamento é usado o “G0” no início de cada linha de código para desencadear o movimento. Na mesma linha seguidamente ao “G0” deve ser escrito mais um comando referente ao motor de passo específico que se pretende mover. Os primeiros quatro motores de passo têm associadas as letras A, B, C e D, enquanto os restantes três motores têm associadas as letras X, Y e Z. Atendendo que cada articulação possui um motor, com a exceção da segunda articulação que apresenta dois motores (figura 36), se for preciso por exemplo mover a segunda articulação, o código que deve ser enviado para o microcontrolador é o “G0 Bx Cx”, sendo que “x” é o valor do ângulo pretendido para a articulação. Para operar o servomotor da garra deve ser enviado o comando “M3”, sendo que para definir o grau de abertura/fecho deve ser escrito na mesma linha de código o comando “Sy”, sendo que “y” é o valor para a abertura/fecho da garra. O código “M3 S0” fecha a garra totalmente (Angel, 2023).

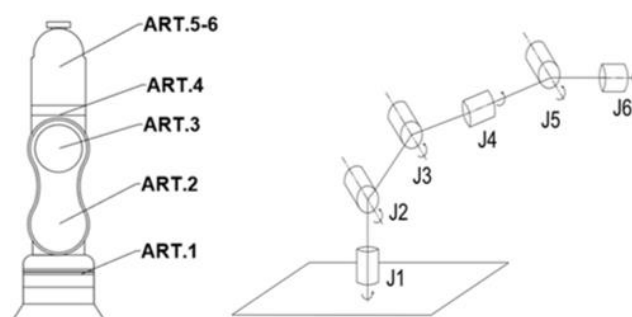


Figura 36 – Articulações do Thor adaptado de Costa et al. (2020)

Relativamente aos ângulos de rotação das articulações é de destacar que nem todas apresentam os mesmos valores. A primeira, quarta e sexta articulação apresentam um intervalo angular de movimento de  $+180^\circ$  a  $-180^\circ$ . Enquanto a segunda e quinta articulação têm um intervalo de ângulo de movimento de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$ . Por fim, a terceira articulação desloca-se entre  $+135^\circ$  a  $-135^\circ$  (Costa et al., 2020), tendo um alcance de 300 mm (Ghizoni, 2018). As velocidades dos movimentos para cada articulação definidas pelo criador do Thor são as seguintes: articulações 1 e 4 são 2000 mm/min, articulações 2 e 3 são 800 mm/min e articulações 5 e 6 são 500 mm/min (Angel, 2023).

O braço robótico presente na Spinner Dynamics foi um projeto iniciado por um estudante que frequenta o ensino superior francês e que realizou um estágio curricular na empresa (figura 37). Por limitações de tempo o estudante não produziu a garra para esse braço robótico.

Numa primeira fase do presente trabalho foi necessário colocar em funcionamento o Thor de forma a executar os movimentos de todas as articulações para encontrar os problemas mecânicos que o projeto apresentava para depois efetuar as respetivas melhorias mecânicas.

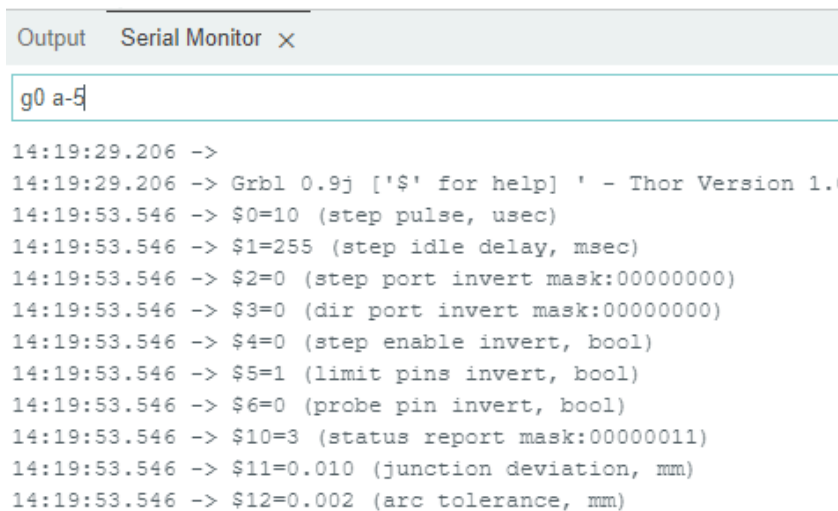
Utilizou-se o *software* Arduino IDE e também o GRBL para enviar os comandos para o Thor no *serial monitor*. A figura 38 mostra um dos comandos enviados para o Thor referente a um dos movimentos da primeira articulação. Neste programa quando se escreve e se envia uma linha de código para o braço robótico



Figura 37 – Braço robótico presente na Spinner Dynamics

este procede ao respetivo movimento da articulação solicitada, contudo o que se pretendeu numa fase seguinte foi que o Thor realizasse uma sequência de movimentos de forma contínua, após ser enviado de uma só vez um conjunto de linhas de código.

O passo que se seguiu foi utilizar o *software Universal G-code Sender* (UGS) para enviar uma sequência de comandos para o Thor (figura 39). Este programa permite controlar máquinas com motores de passo, tendo compatibilidade com o *firmware* GRBL. Este programa possibilita a comunicação entre o computador e o equipamento (Fuentes, 2023).



```
Output Serial Monitor x
g0 a-5

14:19:29.206 ->
14:19:29.206 -> Grbl 0.9j ['$' for help] ' - Thor Version 1.0
14:19:53.546 -> $0=10 (step pulse, usec)
14:19:53.546 -> $1=255 (step idle delay, msec)
14:19:53.546 -> $2=0 (step port invert mask:00000000)
14:19:53.546 -> $3=0 (dir port invert mask:00000000)
14:19:53.546 -> $4=0 (step enable invert, bool)
14:19:53.546 -> $5=1 (limit pins invert, bool)
14:19:53.546 -> $6=0 (probe pin invert, bool)
14:19:53.546 -> $10=3 (status report mask:00000011)
14:19:53.546 -> $11=0.010 (junction deviation, mm)
14:19:53.546 -> $12=0.002 (arc tolerance, mm)
```

Figura 38 – Comando enviado referente à primeira articulação no ambiente *Arduino IDE*

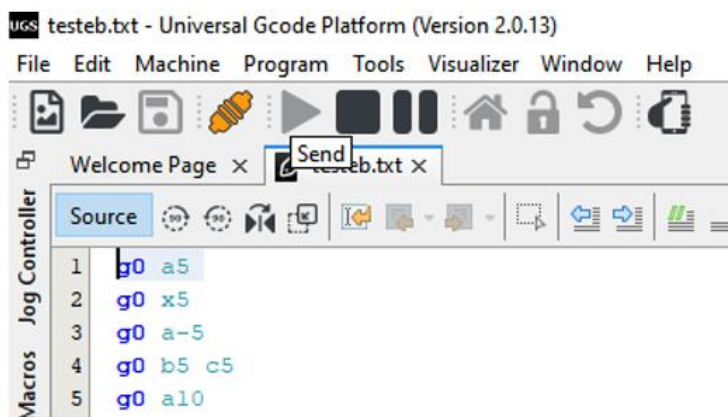


Figura 39 – Sequência de comandos enviados no ambiente UGS

Após o Thor executar diversos movimentos verificou-se que havia articulações com movimentos anómalos. Todas as articulações apresentaram problemas ao nível dos movimentos, excetuando a primeira articulação que se moveu devidamente. Enquanto a primeira articulação realizou movimentos uniformes, as restantes não apresentaram essa uniformidade.



### 3.1.2 Garra

A garra deve manusear diferentes objetos como elementos com forma circular ou prismática e de diferentes materiais e não apenas uma tipologia específica de objetos. A garra montada no braço robótico é para fins demonstrativos, estando inserida num ambiente laboratorial.

A escolha de uma garra paralela apresenta mais vantagens do que uma garra angular, porque a garra angular é mais útil para manusear axialmente peças com geometria circular. Enquanto uma garra paralela permite agarrar mais eficazmente peças com forma circular ou prismática radialmente e axialmente (Guelker, 2011). No desenvolvimento de pinças paralelas torna-se mais apropriado segurar os elementos através da aplicação da força provocada pelo movimento de fecho das pinças (Monkman et al., 2007). O movimento paralelo permite às pinças a maximização da região de contacto de prensão na peça. Este tipo de garra é eficiente na prensão de objetos de vários formatos (John, 2021).

Relativamente ao tipo de contacto entre uma garra paralela e os objetos a segurar é de destacar que este varia consoante o tipo de peça a manusear, pois a prensão de uma esfera resulta num contacto de ponto, de um cilindro leva a um contacto de linha e de um cubo resulta num contacto de área, sendo que as garras de duas pinças normalmente têm o contacto de área para vários objetos (Khurshid et al., 2011).

Atendendo ao tipo de atuação, a garra deve ser elétrica, considerando que a Spinner Dynamics tem um servomotor previamente escolhido para esse efeito e quando o estágio iniciou estava disponível na empresa. É de realçar que o circuito eletrónico do Thor foi idealizado pelo seu criador para que a garra seja atuada por um servomotor. A solução pneumática ou a hidráulica elevam os custos de fabrico da garra. Também se descarta a atuação pneumática, pois implica a produção de ar comprimido para o funcionamento da garra. Rejeita-se a atuação hidráulica, porque o braço robótico apenas tem de movimentar uma carga até 750 g, contando com a massa da ferramenta, sendo assim uma baixa carga.

Relativamente ao método de manuseamento, uma garra paralela atuada de forma elétrica para manusear vários tipos de peças resulta no método de impacto. Exclui-se o ingressivo, porque este método é mais indicado para têxteis. Descarta-se o astringente, porque não se pretende agarrar os elementos através de soluções de sucção ou de vácuo que são soluções diretamente ligadas à atuação pneumática. O manuseamento de objetos através de magnetismo não seria adequado, uma vez que as peças a manipular podem não ser feitas de ferro na sua constituição. Por fim, não seria viável a adoção do tipo continuidade, porque envolveria que a garra segurasse os elementos com recurso a colas ou tensões superficiais (BrainKart, 2023).

O objetivo do presente trabalho é justamente usufruir da liberdade de conceção de produto que a MA permite no desenvolvimento da garra, diminuindo o número de peças, incluindo ter o menor número de elementos normalizados no protótipo. A minimização do número de peças leva a uma diminuição do número de operações de montagem e, conseqüentemente, ao decréscimo do tempo de montagem da garra.

É de realçar que desenvolver uma garra tendo um menor número de etapas de montagem e menos componentes normalizados pode apresentar a desvantagem de não ser possível repará-la em caso de falha mecânica. A garra a elaborar estará enquadrada num braço robótico para fins demonstrativos, ao invés de um contexto industrial em que são realizados centenas ou milhares de ciclos de produção, diminuindo a durabilidade neste último caso. Posto isto, optou-se por fazer a garra tendo em vista o decréscimo do número de elementos normalizados e do número de operações de montagem, considerando que o contexto a que estará sujeita é para fins de demonstração, estando num ambiente laboratorial, onde a probabilidade de falha mecânica é residual. Além disso, pretende-se

explorar o desenvolvimento de produto orientado para o fabrico por MA presente na Spinner Dynamics, sendo necessário desenvolver a garra em que o próprio *design* seja o fator de redução de peças.

Na tabela 1 estão listados os pressupostos para a garra.

Tabela 1 – Pressupostos para a garra

Paralela de duas pinças
Atuação elétrica (Servomotor)
Método de manuseamento - Impacto
Manufatura aditiva
Minimização do número de peças

### Atuação elétrica

O servomotor que estava na Spinner Dynamics para a garra é mostrado na figura 40.



Figura 40 – Servomotor de 25 kg/cm para a garra

Corresponde a um servomotor (DIY *More* ZH52149) de torque máximo de 25 kg/cm com uma faixa de tensão de operação de 4,8 a 7,4 V. A amplitude angular é de 0 a 270°. A velocidade de operação é de 0,13 a 0,15 s para completar 60°. Relativamente aos três fios que possui, o vermelho corresponde ao polo positivo, o castanho ao polo negativo e o laranja ao terminal de sinal de PWM.

No sentido de verificar o funcionamento do servomotor conectado na PCB, fez-se a conexão dos três fios de acordo com a figura 35. Seguidamente enviou-se alguns comandos para o servomotor no *software Arduino IDE*, mas sem sucesso.

Fez-se a verificação das ligações elétricas e estas estavam corretas, contudo o servomotor não acionava após serem enviadas algumas linhas de código. O passo que se seguiu foi utilizar um multímetro para a medição do valor de tensão nos pinos da PCB onde o componente estava conectado, observando-se que o valor de tensão era de 4,3 V. É de realçar que o valor mínimo de tensão cujo servomotor opera é 4,8 V.

O criador do projeto Thor recomenda que o servomotor deve receber 7 V para o funcionamento correto da garra (Angel, 2023). Para que o componente receba 7 V, ao invés de 4,3 V foi necessário seleccionar um conversor de corrente contínua para corrente contínua (CC-CC). A figura 41 mostra o conversor seleccionado e utilizado.

Este conversor tem um potenciômetro que possibilita receber uma tensão específica e fazer a regulação para uma determinada tensão de saída. Tendo em conta que a PCB foi projetada com pinos extra de 12 V, é precisamente esses 12 V que se fornece aos terminais de tensão de entrada do conversor. O conversor CC-CC do fabricante MenQind (XL4015 1007J) pode receber uma tensão de entrada de 4 a 38 V e possibilita a regulação para uma tensão de saída de 1,25 a 36 V. Ou seja, tendo em consideração que se pretende fornecer ao conversor 12 V e regulá-lo para 7 V, este componente eletrónico satisfaz essa condição.

Em suma, os dois terminais de tensão de entrada do conversor ligam-se a dois pinos extra de 12 V da PCB, os dois terminais de tensão de saída do conversor ligam-se a dois fios do servomotor e o fio laranja do servomotor é ligado ao pino da PCB de sinal de PWM, onde já era inicialmente ligado. Tendo as ligações elétricas feitas observou-se que o servomotor se ativou depois de serem enviadas algumas linhas de código.

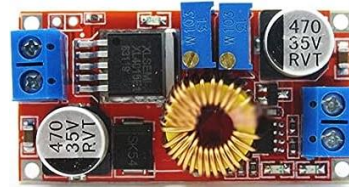


Figura 41 – Conversor CC-CC utilizado

## 3.2 Equipamentos, materiais e métodos

### 3.2.1 Manufatura aditiva

Há uma tendência na utilização da tecnologia de FFF para a impressão de peças, porque no geral os filamentos para a FFF envolvem um menor custo quando comparados com as resinas líquidas para a SLA. Contudo, a SLA alcança um melhor acabamento superficial (Formlabs, 2023). Além disso, na FFF é possível configurar no *software* de impressão 3D um maior número de parâmetros de fabrico, independentemente do material a utilizar, como por exemplo a percentagem de *infill* que tem influência na massa das peças, bem como na resistência mecânica. Posto isto, seleccionou-se a FFF em detrimento da SLA para a maioria das impressões 3D.

Entre os equipamentos de FFF existentes na Spinner Dynamics, escolheu-se o Intamsys Pro 410 (figura 42), tendo em consideração que é a única tecnologia de FFF na empresa que apresenta dois bocais de extrusão, possibilitando o uso de dois materiais distintos numa impressão 3D, permitindo a utilização de um determinado material para o corpo da peça e de outro para o suporte da mesma durante a impressão caso seja necessário. Também se utilizou a Creality Ender-3 S1 Pro (figura 43) para o fabrico de algumas peças, atendendo que este equipamento era adequado e o Intamsys Pro 410 se encontrava ocupado com outros projetos da empresa. Ambos pertencem à classe da MA da Extrusão de Material.



Figura 42 – Intamsys Pro 410



Figura 43 – Creality Ender-3 S1 Pro

Foram produzidas peças no equipamento de SLA Anycubic *Photon Mono X* (figura 44) que pertence à classe da MA da Fotopolimerização em Cuba.

Por vezes as peças produzidas por SLA precisam de ser submetidas a um banho térmico para a remoção de pingos de material na superfície que eventualmente podem existir durante o processo de impressão. No caso das peças que foram produzidas nesta tecnologia no presente trabalho, como não apresentaram qualquer excesso de material na superfície, não foi preciso efetuar o banho térmico.

As peças foram submetidas a um processo de cura durante 3 minutos, que é o tempo especificado para o tipo de resina utilizada na máquina observada na figura 45.

Todos os equipamentos de MA utilizados encontram-se na Spinner Dynamics.



Figura 44 – Anycubic *Photon Mono X*



Figura 45 – Anycubic *Wash and Cure Plus*

A empresa utiliza diferentes materiais para as suas impressões 3D como o PLA, PETG, ABS ou PAHT-CF15. Entre os materiais referidos aquele que apresenta uma maior resistência à tração e à flexão é o PAHT-CF15. O PAHT-CF15 é poliamida de alta temperatura com 15% de fibra de carbono. O PAHT-CF15 existente na empresa (ficha técnica no Anexo II) é preto e do fabricante Ultrafuse® (BASF).

O estudante que iniciou o projeto Thor na Spinner Dynamics fez as impressões 3D com PLA, com exceção das engrenagens que são de ABS. No presente trabalho imprimir os elementos com um material com melhores propriedades mecânicas pode garantir ao robô uma maior durabilidade.

O gráfico 1 mostra, que entre todos os materiais aí ilustrados, o PAHT-CF15 é o que apresenta um maior módulo de elasticidade e uma maior resistência à tração (Margerie, 2022).

O gráfico 2 ilustra, que entre todos os materiais aí referidos, o PAHT-CF15 é o que apresenta um maior módulo de flexão e uma maior resistência à flexão (Margerie, 2022).

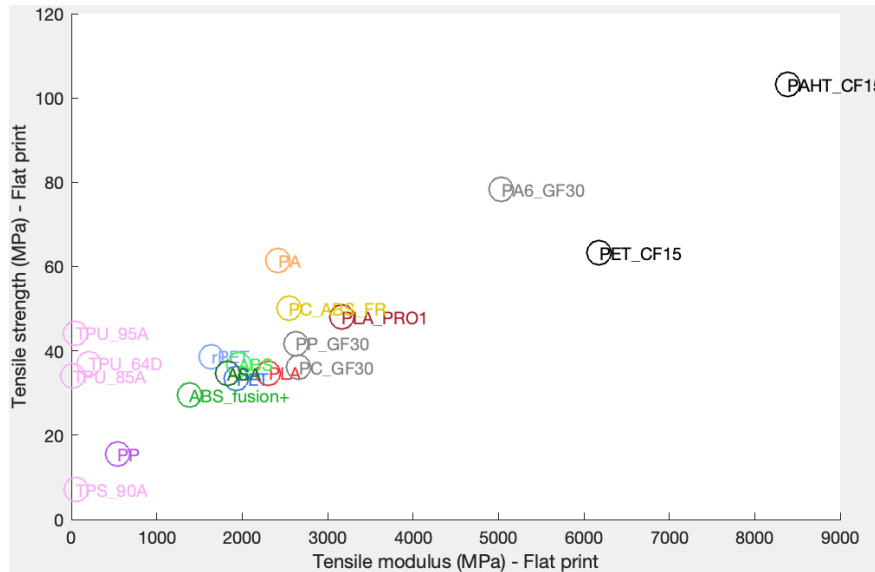


Gráfico 1 – Módulo de Elasticidade (MPa) x Resistência à Tração (MPa) de Margerie (2022)

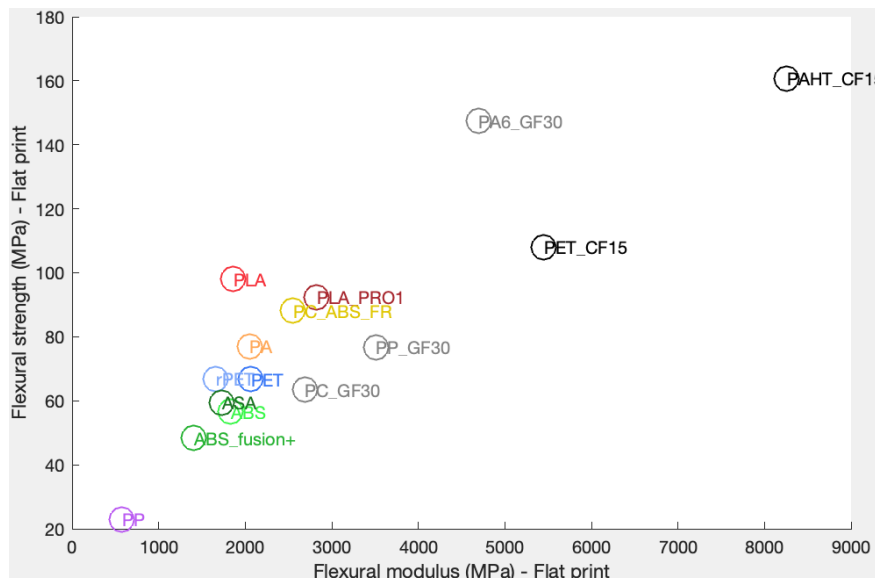


Gráfico 2 – Módulo de Flexão (MPa) x Resistência à Flexão (MPa) de Margerie (2022)

Também se utilizou o PAHT-CF15, porque é um material que suporta uma elevada temperatura. Durante o funcionamento do Thor os motores de passo aquecem, desencadeando também aquecimento em peças vizinhas. A adoção de um material que suporta uma temperatura mais elevada torna-se adequado.

Usou-se este material para a produção por MA de peças para o braço robótico, bem como para o fabrico do corpo da garra. Também se usou o PLA para a produção de uma peça para o braço robótico, que foi redesenhada apenas por questões dimensionais, dado que o equipamento na qual se imprimiu com o PAHT-CF15 se encontrava ocupado com outro trabalho da Spinner Dynamics. O PLA é de fácil impressão e tem um baixo ponto de fusão (O'Connell, 2023). O PLA preto é o Pro 1 do fabricante Ultrafuse® (BASF).

Na tabela 2 observam-se os parâmetros de fabrico usados na produção de peças feitas de PAHT-CF15 (Intamsys Pro 410) e PLA (Crealty Ender-3 S1 Pro).

Tabela 2 – Parâmetros de fabrico utilizados para o PAHT-CF15 e PLA

Parâmetros x Material	PAHT-CF15	PLA
Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,6 mm	0,4 mm
Altura de camada	0,3 mm	0,2 mm
Número de paredes	2	2
Número de camadas de base/topo	5	5
Tipo de <i>infill</i>	<i>Gyroid</i>	<i>Gyroid</i>
Percentagem de <i>infill</i>	50%	50%
Ângulo de varredura	45°	45°
Temperatura do <i>nozzle</i>	260° C	210° C
Temperatura da cama	110° C	60° C
Velocidade de impressão	60 mm/s	70 mm/s

Para a impressão de PAHT-CF15 torna-se adequado utilizar um *nozzle* de maior diâmetro (0,6 mm). Tendo em consideração que é um material com fibras, existe uma maior probabilidade de ocorrer entupimentos durante a sua deposição. Enquanto para o PLA usou-se um *nozzle* de 0,4 mm, atendendo que é um material de fácil processamento.

A altura de camada definiu-se como 0,3 mm para o PAHT-CF15, tendo em conta que o fabricante Ultrafuse® (BASF) recomenda uma altura de camada entre 0,2 e 0,4 mm, tendo-se escolhido o valor intermédio. O fabricante sugere a adoção de uma altura de camada de 0,08 a 0,2 mm para o PLA, tendo-se definido o valor de 0,2 mm, porque quanto maior é o valor da altura de camada, menor é o tempo de impressão das peças, apesar de existir uma relação entre a diminuição da altura de camada e o aumento de rigidez (Martins, 2017). Para colmatar uma possível diminuição de rigidez procedeu-se a alterações geométricas identificadas à frente no presente trabalho.

Configurou-se o número de paredes para 2 e o número de camadas de base/topo para 5. O tipo de *infill* selecionado foi o *gyroid*. Este tipo de padrão de preenchimento é visualmente ondulado, dando às peças uma boa resistência mecânica em diferentes direções, sendo um dos padrões mais adequados para os elementos submetidos a algum tipo de solicitação mecânica e não apenas para o fabrico de modelos ou de peças decorativas (Goldschmidt, 2023). Na figura 46 são mostrados diferentes tipos de padrões de preenchimento (Mitchell, 2023).

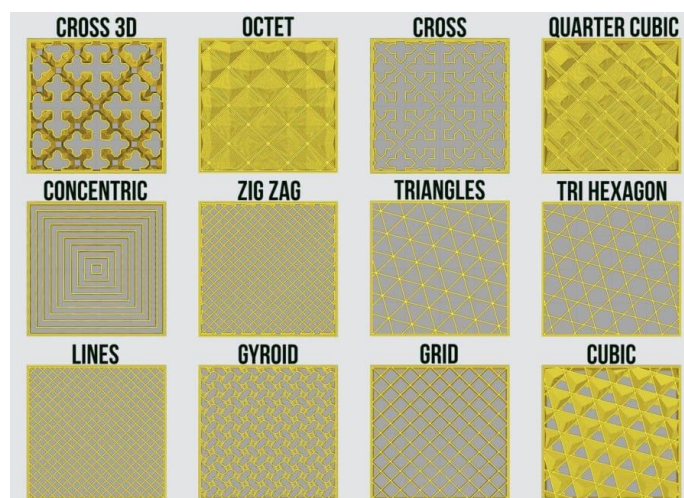


Figura 46 – Tipos de *infill* (Mitchell, 2023)

A percentagem de *infill* escolhida foi de 50%, uma vez que para os componentes sujeitos a esforços mecânicos existe uma recomendação de pelo menos de 50% (Goldschmidt, 2023). Adotou-se o ângulo de varredura *standard* de 45°. A figura 47 mostra três exemplos de ângulos de varredura (Zhang et al., 2019). Por fim, as temperaturas de impressão, bem como as velocidades foram definidas tendo em consideração as recomendações da BASF. O fabricante sugere a utilização dos parâmetros para o PAHT-CF15 entre o intervalo de 260 a 280° C (*nozzle*), 100 a 120° C (cama) e 30 a 80 mm/s. Antes do processo de MA, o PAHT-CF15 foi submetido a secagem durante 18 h a 90° C para a retirada de humidade, evitando a ocorrência de erros de impressão. Enquanto para o PLA a BASF recomenda os parâmetros entre o intervalo de 200 a 220° C e 40 a 150 mm/s. A sugestão para a temperatura da cama é de 60° C.

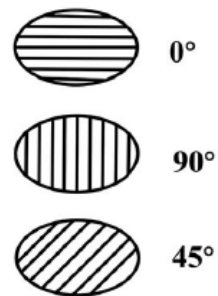


Figura 47 – Exemplos de ângulos de varredura (Zhang et al., 2019)

Na primeira parte do trabalho experimental foi necessário utilizar a SLA para a produção de duas peças, tendo em consideração que essa tecnologia garante uma maior precisão dimensional e uma melhor qualidade superficial (Castelão, 2018). Foi usado como material a *resione G217 tough resin clear*. Esta resina tinha sido utilizada na empresa no fabrico de outros projetos, por isso tinha na sua composição a adição de um pigmento vermelho do fabricante Formfutura. Este material foi adequado para a produção dos elementos necessários para o presente trabalho, porque é uma resina rígida. A empresa adota os parâmetros listados na tabela 3 para o material em questão, tendo em consideração que assegura uma qualidade adequada às impressões 3D. O tempo de exposição das camadas de base à UV é maior do que das camadas restantes para haver uma ligação adequada entre a peça a produzir e a plataforma de construção.

Tabela 3 – Parâmetros de fabrico utilizados para a *resione G217 tough resin clear*

Altura de camada	0,05 mm
Número de camadas de base	4
Tempo de exposição das camadas à UV	2,4 s
Tempo de exposição das camadas de base à UV	34 s
Velocidade de elevação da plataforma de construção	120 mm/min

Na segunda parte do trabalho experimental utilizaram-se mais dois materiais. O álcool polivinílico (PVA) como material de suporte e o TPU como material de construção. O PVA do fabricante SMARTFIL (*Smart Materials 3D*) é solúvel em água. Antes do processo de MA, o PVA foi sujeito a secagem para a remoção de humidade durante 18 h a 40° C. O TPU branco 95A Ultrafuse® é fornecido pela BASF (ficha técnica no Anexo II). Na tabela 4 encontram-se listados os parâmetros para o PVA (Intamsys Pro 410).

Tabela 4 – Parâmetros de fabrico utilizados para o PVA

Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,4 mm
Tipo de <i>infill</i>	<i>Grid</i>
Percentagem de <i>infill</i>	12%
Percentagem de <i>infill</i> na interface	100%
Espessura da interface	1 mm
Ângulo de varredura	45°
Temperatura do <i>nozzle</i>	200° C
Temperatura da cama	40° C
Velocidade de impressão	40 mm/s

O diâmetro do *nozzle* para a deposição de PVA foi de 0,4 mm. O tipo de *infill* foi o *grid*, porque é um dos tipos de preenchimento *standard*. Definiu-se a percentagem de *infill* de 12%. Tendo em consideração que este material é apenas para o suporte não é necessário definir uma maior percentagem, pois seria um maior gasto de material e aumentava o tempo de impressão. Contudo, nas regiões em que o material de suporte contacta com a superfície da peça estabeleceu-se que a percentagem de *infill* para o PVA seria de 100%. Ou seja, junto à superfície da peça em que é necessário o suporte há 1 mm de espessura de PVA a 100%, enquanto nas zonas em que é preciso o suporte, mas estão a mais de 1 mm de contactar com a peça, a percentagem de *infill* foi de 12%. O ângulo de varredura utilizado foi de 45°.

Relativamente às temperaturas de impressão o fabricante do PVA recomenda a adoção de uma temperatura para o *nozzle* de 190 a 210° C e para a cama de 25 a 60° C. A velocidade de impressão sugerida é de 30 a 45 mm/s. Posto isto, escolheu-se os valores para estes parâmetros em função dos intervalos sugeridos pelo fabricante: 200° C (*nozzle*), 40° C (cama) e 40 mm/s.

Nas impressões 3D com PAHT-CF15 e PVA incluiu-se uma *prime tower*. A *prime tower* consiste na criação de um elemento extra próximo do elemento principal a imprimir, servindo para limpar os bocais de extrusão durante o processo de MA, evitando a ocorrência de escorrimento de material na superfície do elemento principal (Deneve & Hart, 2023).

Nas peças impressas em que foi necessário usar o PVA adicionou-se o *raft*. O *raft* são camadas de material depositadas junto à plataforma onde a peça é impressa. A peça é produzida por cima do *raft*, ao invés de diretamente na face da plataforma, aumentando a aderência do protótipo na plataforma de construção (3D Lab, 2019). Neste caso o *raft* foi feito de PVA, sendo fácil a sua remoção.

Os parâmetros escolhidos para a impressão de TPU (Creality Ender-3 S1 Pro) são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de fabrico utilizados para o TPU

Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,6 mm
Altura de camada	0,2 mm
Número de paredes	3
Número de camadas de topo	3
Tipo de <i>infill</i>	<i>Zig Zag</i>
Percentagem de <i>infill</i>	20%
Ângulo de varredura	45°
Temperatura do <i>nozzle</i>	230° C
Temperatura da cama	60° C
Velocidade de impressão	30 mm/s

Foi usado um *nozzle* de 0,6 mm de diâmetro para a impressão de TPU. Considerando que se trata de um material flexível, utilizou-se este diâmetro, ao invés de 0,4 mm, para evitar a ocorrência de entupimentos no bocal de extrusão. Escolheu-se a altura de camada de 0,2 mm, sendo que o *software* de impressão 3D considera que esta garante uma *standard quality*. Definiu-se o número de paredes igual a 3 e o número de camadas de topo também igual a 3.

Escolheu-se o tipo de *infill zig zag*, sendo considerado um tipo de preenchimento *standard*. Inicialmente definiu-se a percentagem de *infill* de 30%, sendo que as peças finais foram fabricadas com 20%, porque garantiram uma maior flexibilidade. O ângulo de varredura foi de 45°.

Relativamente à temperatura do *nozzle*, temperatura da cama e velocidade de impressão o fabricante do material sugere a utilização dos intervalos: 210 a 230° C (*nozzle*), 40 a 60° C (cama) e



15 a 40 mm/s respetivamente. Posto isto, definiu-se para estes parâmetros os seguintes valores: 230° C (*nozzle*), 60° C (cama) e 30 mm/s.

As peças para impressão no equipamento Intamsys Pro 410 foram parametrizadas no *software Intamsuite*, enquanto para o equipamento Creality Ender-3 S1 Pro procedeu-se à parametrização no *software Ultimaker Cura*. Todos os filamentos utilizados apresentam 1,75 mm de diâmetro.

### 3.2.2 Caracterização mecânica e dimensional

Na segunda parte do trabalho experimental realizaram-se ensaios de flexão às geometrias das peças da garra em desenvolvimento. A determinação das propriedades de flexão foi feita com base em ensaios de flexão de cinco corpos iguais (no mínimo) para a obtenção de resultados estatisticamente válidos (ISO 178).

Os ensaios foram configurados no *software Trapezium 2*. Numa primeira fase fizeram-se ensaios de flexão de 3 pontos quando a geometria alvo de estudo era adequada para o efeito. Os pontos de contacto na máquina de ensaios (figura 48) encontraram-se a uma distância de 20 mm entre si. Numa segunda fase para ensaiar os corpos foi necessário criar uma estrutura adicional, fixando-a na máquina. Todos os ensaios foram executados a uma velocidade de 1 mm/min.

Atendendo a que as geometrias de ensaio não foram corpos normalizados, não foi possível aplicar as fórmulas matemáticas que constam na norma ISO 178 para determinar os valores de tensão e deformação dos respetivos corpos testados. A fim de comparar o desempenho mecânico das diferentes peças foram usados os valores de força e deslocamento. A máquina de ensaios universal encontra-se na Escola Superior Aveiro-Norte.

Na segunda parte do trabalho experimental também foi feito controlo dimensional e geométrico, utilizando o *Scanner 3D Carl Zeiss Comet L3D 2 5M* (lente de 100 mm) com luz estruturada (figura 49). Para realizar a aquisição de forma também foi usada a plataforma rotativa da Zeiss. O sistema que permite a realização de engenharia inversa e controlo dimensional e geométrico está disponível na Escola Superior Aveiro-Norte, tendo uma elevada precisão.

Foi utilizado o *software Zeiss Colin 3D* no qual foi necessário inserir o CAD da peça alvo de controlo dimensional e geométrico. Tendo esta digitalizada, a sua malha foi comparada com o modelo digital nominal para aferir a conformidade dimensional e geométrica da peça impressa com o material PAHT-CF15 no equipamento Intamsys Pro 410.

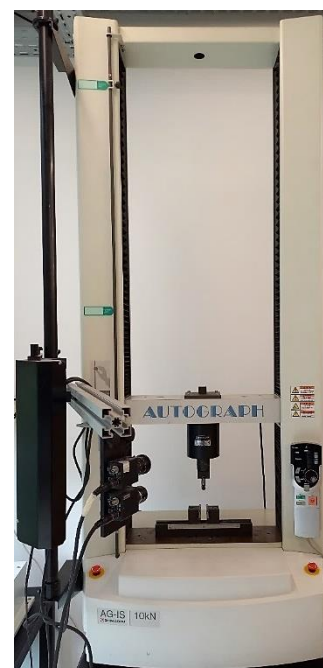


Figura 48 – Máquina de ensaios universal AUTOGRAPH AG-IS 10 kN

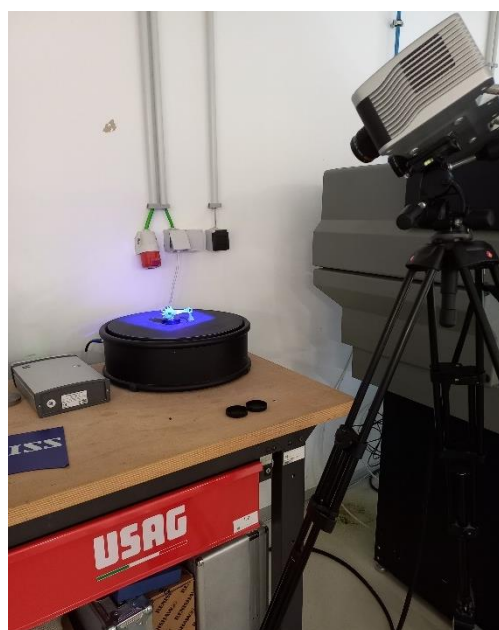


Figura 49 – Aquisição de forma no *Scanner 3D Carl Zeiss Comet L3D 2 5M*

## 3.3 Resultados e discussão – Braço robótico

### 3.3.1 Análise dos problemas mecânicos

Procedeu-se à desmontagem do braço robótico para detetar as causas dos movimentos anómalos e efetuar as melhorias mecânicas. O processo de desmontar o Thor começa pela articulação 1 até à 6, tendo em consideração que os fios elétricos seguem esse caminho. Para montá-lo novamente o processo inicia-se pela articulação 6 até à 1, por isso optou-se por iniciar este trabalho pela ordem decrescente das articulações. Seguidamente são descritos os problemas mecânicos encontrados em cada articulação depois de se ter desmontado o Thor.

#### Articulações 5 e 6

As articulações 5 e 6 apresentam dois motores de passo e a forma como estes funcionam está relacionada. Por exemplo se for necessário mover a articulação 5, a linha de código que tem de ser enviada é “G0 Yx Z-x” ou “G0 Y-x Zx”, sendo que “x” é o valor correspondente ao movimento angular pretendido e resulta dos motores de passo se encontrarem dispostos em sentidos diferentes (figura 50). Para mover a articulação 6 a linha de código que tem de ser enviada é “G0 Yx Zx” ou “G0 Y-x Z-x”, fazendo com que a extremidade rode. Acoplado a cada motor encontra-se uma polia dentada que transmite o movimento à polia superior através de uma correia dentada. Esta parte do braço robótico tem duas correias iguais. As duas polias superiores paralelas transmitem o movimento à polia de topo. A articulação 5 move a extremidade para a direita e esquerda, enquanto a articulação 6 permite rodá-la em torno do seu eixo.

Detetaram-se vários problemas mecânicos neste subconjunto após a desmontagem. Verificaram-se que as polias superiores (que estão dispostas paralelamente) podiam mover-se de forma axial ao longo do veio, sendo indesejável. Outro problema mecânico encontrado foi na peça que se encontrava na base do subconjunto que tinha deformações plásticas e roturas (peça mostrada no subcapítulo 3.3.2). O estudante que iniciou o projeto na Spinner Dynamics colocou duas correias dentadas emendadas nesta parte, porque nessa altura apenas havia na empresa uma correia dentada aberta. As correias dentadas fechadas foram obtidas através do corte, colagem e da respetiva emenda da correia aberta. Verificaram-se que as correias dentadas na região da emenda apresentavam irregularidades físicas, provocando movimentos anómalos, considerando o processo manual envolvido.

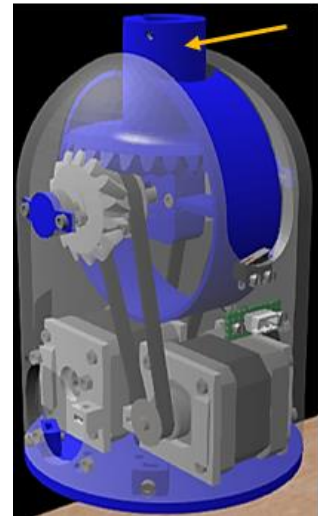


Figura 50 – Articulações 5 e 6 adaptado de Angel (2023)

#### Articulação 4

Para a operação da articulação 4 existe um motor de passo com uma engrenagem acoplada que transmite o movimento à peça mostrada na figura 51, tendo em conta que esta apresenta uma região dentada na parte inferior. O princípio de funcionamento deste subconjunto é análogo ao de um rolamento de esferas. Nesta parte encontraram-se diferentes problemas mecânicos. Na zona onde as esferas se encontram alojadas e deslizam existiam resíduos de material de suporte. Este subconjunto foi projetado de forma que depois de se terminar de inserir as esferas pelo orifício seja colocado um pino que fica preso por pressão de forma a impedir que as esferas saiam do interior. Notou-se que a solução de fixação do pino não era adequada, dado o seu posicionamento incerto. Na figura 52 é

indicado o orifício para a colocação do pino referido. No subconjunto encontra-se aparafusada uma peça circular (peça preta da figura 52) que tem uma fenda para o sensor ótico conhecer a posição quando esta articulação atinge o seu limite. Como esta peça apresenta uma espessura de parede de 1 mm, observou-se uma rotura numa zona da peça, provavelmente devido à área reduzida de cada camada de impressão.

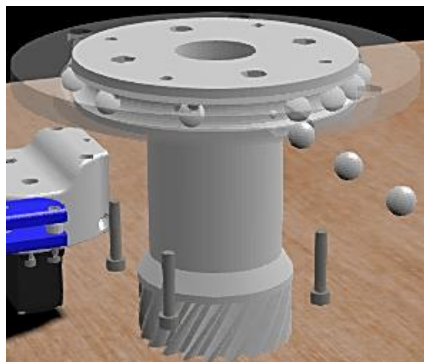


Figura 51 – Articulação 4 (Angel, 2023)

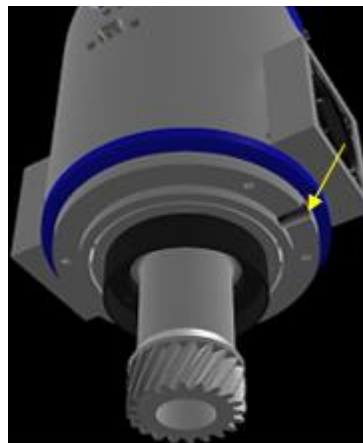


Figura 52 – Peça circular com fenda adaptado de Angel (2023)

### Articulações 2 e 3

Para o funcionamento da articulação 3 o Thor conta com uma correia (figura 53). O projeto foi desenvolvido com uma correia dentada aberta que é cortada para a dimensão pretendida. Ao contrário do subconjunto da figura 50, neste subconjunto existe uma região por onde a correia passa e tem um parafuso que prende as duas extremidades. Na figura 54 observa-se uma estrutura que aloja três motores. O motor de passo superior transmite o movimento para a correia, enquanto os restantes dois motores são responsáveis pelo movimento da articulação 2. Os dois motores inferiores da segunda articulação têm uma engrenagem cada um que transmite o movimento para uma peça que apresenta uma região dentada. O subconjunto mostrado na figura 52 é aparafusado ao subconjunto da figura 53. Na figura 53 também se observa um dos sensores óticos do Thor.



Figura 53 – Fixação da correia adaptado de Angel (2023)

A estrutura (figura 54) apresentou deformações plásticas nas regiões onde os parafusos fixam os motores de passo, fazendo com que estes não ficassem corretamente alinhados. Neste componente também se observaram roturas. Além disso, a peça circular observada na figura 54 também apresentava deformações plásticas e roturas nas zonas dos furos (peças mostradas no subcapítulo 3.3.2). A figura 55 mostra as articulações 2 até 6.

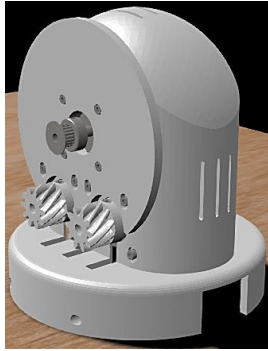


Figura 54 – Motores das articulações 2 e 3 (Angel, 2023)

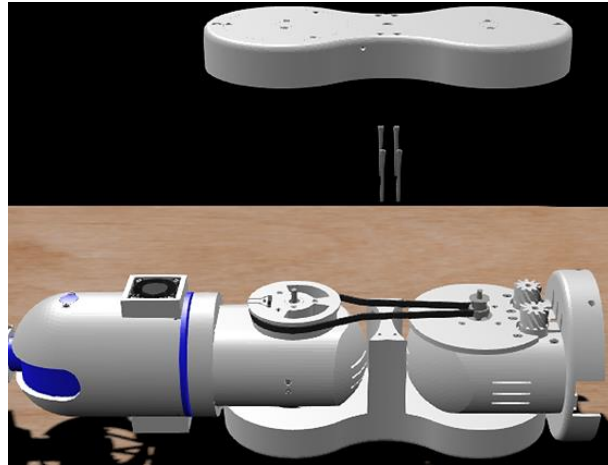


Figura 55 – Articulações 2 até 6 (Angel, 2023)

### Articulação 1

A articulação 1 (figura 56) também apresenta uma engrenagem acoplada a um motor de passo e transmite o movimento para uma peça circular com uma região dentada. Esta articulação conta com um rolamento de esferas. Não se detectaram quaisquer deformações ou outras anomalias nas peças desta articulação, até porque apresentava movimentos uniformes.

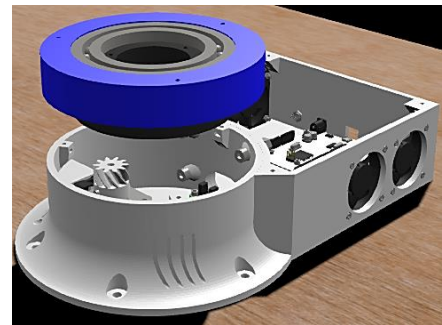


Figura 56 – Articulação 1 (Angel, 2023)

## 3.3.2 Ações de melhoria

### Articulações 5 e 6

A primeira ação de melhoria foi a redução do movimento axial das polias superiores paralelas. Para esse efeito projetou-se uma peça cilíndrica limitadora de movimento axial. A figura 57 mostra o CAD da peça elaborada e a figura 58 apresenta as peças produzidas por SLA para esse fim.

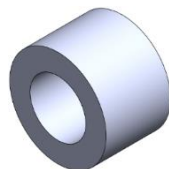


Figura 57 – CAD da peça limitadora de movimento



Figura 58 – Peças limitadoras (SLA)



Os dois elementos cilíndricos ocos tiveram um impacto significativo na movimentação das articulações 5 e 6. Isto porque da forma como a montagem se encontrava as duas polias podiam realizar o movimento de rotação e também o referido movimento axial ao longo do veio. Isso fazia com que a área de superfície dos dentes das polias paralelas que contacta com a área de superfície dentada da polia de topo variasse durante os vários movimentos do Thor, dado que estas poderiam afastar-se e aproximar-se durante a rotação, havendo perdas de potência. A figura 59 mostra os dois componentes colocados na estrutura do braço robótico.

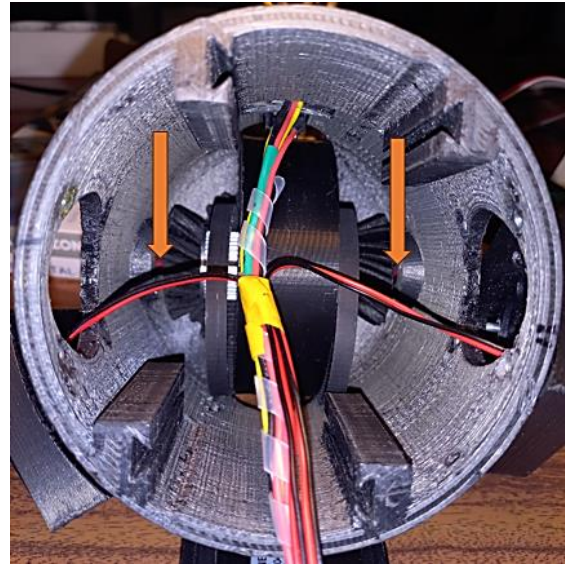


Figura 59 – Colocação das duas peças fabricadas

As peças foram projetadas tendo em consideração que no seu interior passa um veio de 5 mm de diâmetro. Tendo presente este ponto definiu-se no CAD que os elementos cilíndricos deviam apresentar um orifício de 5,2 mm de diâmetro para criar uma pequena folga e facilitar a sua colocação. Por opção do autor do presente trabalho o diâmetro exterior é de 9 mm, pois outro valor de diâmetro próximo também seria solução. O comprimento é de 6 mm, fazendo com que a implementação destes dois componentes diminua em 6 mm o movimento axial de cada polia dentada.

Outra melhoria efetuada envolveu a peça da base do subconjunto da figura 50 (item azul). Como observado nas figuras 60 e 61, quando se desmontou esta parte notaram-se deformações plásticas nas zonas dos furos, sendo que houve uma região que entrou em rotura total, pelo que existe uma falta de material num dos orifícios observados na figura 61.

O sistema para esticar as duas correias dentadas mostradas na figura 50 é através de quatro parafusos, dois para cada motor de passo, que ao serem apertados ou desapertados, permitem o avanço ou o recuo dos dois motores presentes nesta região. As faces das cabeças dos quatro parafusos encostam nos quatro alojamentos existentes na base do subconjunto referido. O aparafusamento é feito pela parte de trás dos motores. Ao fim de algum tempo desta peça estar instalada no Thor e com os quatro parafusos inseridos, esta acabou por se deformar nas regiões de encosto das cabeças das ligações aparafusadas. Isto fez com que o ajuste das correias dentadas não fosse o mesmo que tinha sido feito quando o Thor foi inicialmente montado. Estes problemas surgiram, porque os parafusos aplicam uma determinada força constante nos alojamentos quando o Thor está montado, provocando as deformações e roturas referidas na peça. O aumento da espessura desta peça e a escolha de um material de impressão com melhores propriedades mecânicas (PAHT-CF15) resultou num componente mais resistente e durável.



Figura 60 – Vista de topo da peça da base com deformações e rotura



Figura 61 – Vista de trás da peça da base com deformações e rotura

A espessura da parede da peça onde os quatro parafusos encostavam tinha 1,5 mm. A ação de melhoria foi primeiramente aumentar em 2 mm a espessura geral da peça como observado na figura 62. De seguida aumentou-se em 2 mm a espessura das zonas onde os parafusos encostam (figura 63). Estes procedimentos aumentam a rigidez da peça. Depois da realização do CAD produziram-se as peças por FFF. As figuras 64 e 65 mostram o objeto produzido.

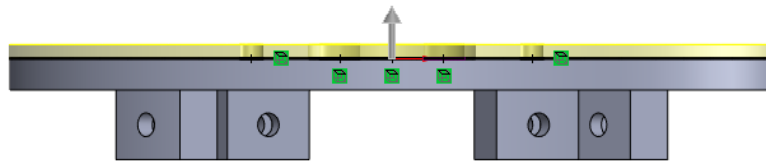


Figura 62 – Vista lateral da peça (CAD) com o aumento de 2 mm da espessura geral

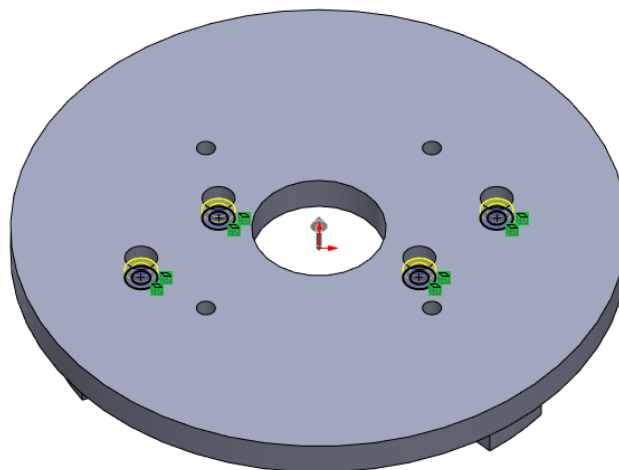


Figura 63 – Vista de trás da peça (CAD) com o aumento de 2 mm da espessura das regiões onde os parafusos encostam

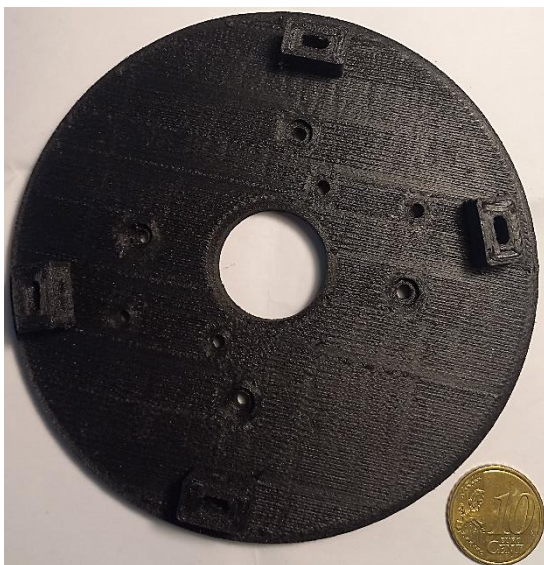


Figura 64 – Vista de topo da peça produzida



Figura 65 – Vista de trás da peça produzida

As figuras 66 e 67 mostram uma das duas correias dentadas que se encontravam no braço robótico e que estavam emendadas.

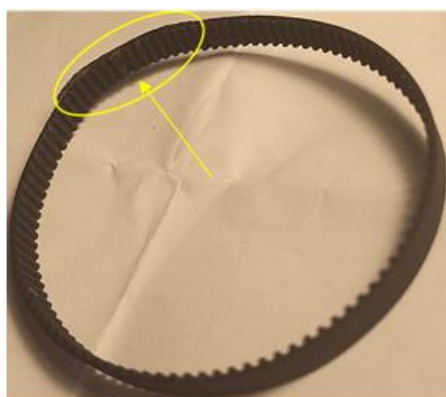


Figura 66 – Correia emendada-perspetiva A

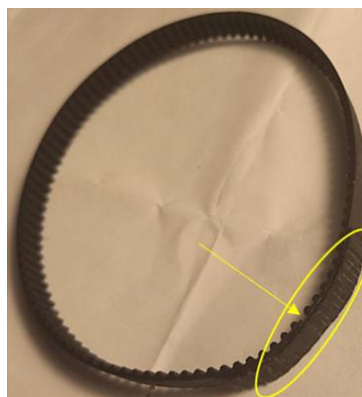


Figura 67 – Correia emendada-perspetiva B

Por causa do processo manual de emenda, as duas correias dentadas não tinham a mesma distância entre dentes na região da colagem, quando comparada com a parte restante. Além disso, havia irregularidades físicas na zona de união resultante do processo de corte e colagem. De facto, estes problemas nas correias anteriores provocavam debilidades nos movimentos das articulações 5 e 6. A distância entre dentes ao ser superior a 2 mm na região da emenda, sendo que devia ser de 2 mm entre eles fazia com que, quando os dentes das duas polias acopladas aos motores de passo transmitiam o movimento para as correias dentadas que provocavam o acionamento das polias superiores paralelas, houvesse uma transmissão incorreta. Os movimentos das polias e correias não se encontravam sincronizados em todo o momento.

O Thor foi projetado com duas correias dentadas com as seguintes características: 208 mm de comprimento, 104 dentes, 6 mm de espessura e 2 mm de *pitch*. Tendo em consideração que as correias emendadas presentes no braço robótico da Spinner Dynamics eram um fator causador de movimentos incorretos, seleccionou-se, via *online*, correias dentadas com as características referidas para serem adquiridas e implementadas. As duas correias seleccionadas foram do fabricante Turmberg3D com a referência Turmberg3D-LL-2GT-0208. Além dos problemas nos movimentos, outra



desvantagem da utilização das correias emendadas é haver uma elevada probabilidade destas se romperem durante o funcionamento do Thor. A implementação das duas correias normalizadas devidamente seleccionadas contribuiu de forma relevante para eliminar erros de movimento. A figura 68 mostra as correias colocadas, bem como os motores.

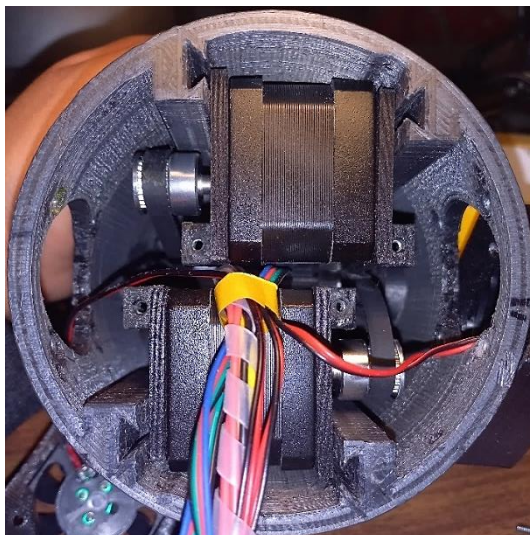


Figura 68 – Implementação dos motores e correias

A figura 69 mostra a forma como os motores de passo se encontravam colocados quando se desmontou o Thor. Após a análise decidiu-se colocá-los numa diferente orientação (rodando-os em 180 graus em relação aos seus eixos) para haver mais espaço para a afinação das correias. A figura 68 também mostra a instalação dos motores segundo a nova orientação.

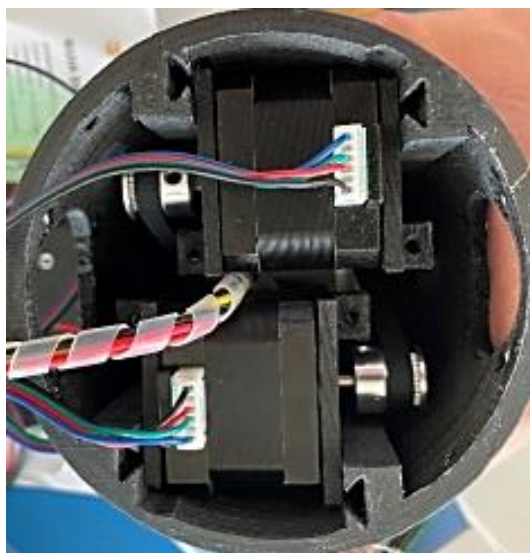


Figura 69 – Orientação anterior dos motores de passo

Os fios eléctricos apresentam uma peça branca na extremidade para fazer a ligação com os motores. Esta peça apresenta cerca de 6 mm de altura. De forma a aumentar o espaço entre estes motores (contando com a dimensão da peça branca referida) e a peça observada nas figuras 64 e 65, rodaram-se os motores em 180 graus para posicionar a peça branca do outro lado. Este passo não interferiu com nenhum componente e permitiu criar mais espaço (6 mm) para realizar o procedimento necessário para esticar as correias, o qual consiste na deslocação dos motores quando os quatro parafusos são apertados ou desapertados, fazendo o tensionamento.



Após a implementação das melhorias nas articulações 5 e 6 (figura 70) fez-se testes de funcionamento a estas articulações, enviando vários comandos, tendo-se verificado melhorias notórias nos movimentos.



Figura 70 – Articulações 5 e 6

#### Articulação 4

A primeira ação de melhoria na articulação 4 foi remover os resíduos de material de suporte remanescentes na peça da figura 71. Na figura 71 observa-se uma das regiões que apresentavam esses resíduos. Desta forma quando as esferas deslizavam ao longo da superfície, estas não tinham um percurso totalmente isento de obstruções, havendo atrito, o que provocava problemas nos movimentos. Fez-se uma lixagem ao longo da superfície circular deste componente para a remoção dos resíduos.

Outro aspeto melhorado foi no pino de pressão. A figura 72 mostra o pino antes da correção. Este pino apresenta cerca de 7 mm de comprimento. Na figura 72 observa-se uma superfície côncava na extremidade esquerda. Quando o pino está inserido no furo, as esferas podem contactar com esta superfície côncava quando deslizam. Por isso foi essencial realizar o processo de lixagem nesta superfície para melhorar o seu acabamento.



Figura 71 – Resíduos na peça da articulação 4

O criador desenhou o braço robótico com um conjunto de duas peças (figura 73) que se encaixam, sendo as esferas inseridas pelo canal. A ligação aparafusada entre o pino e a peça circular da figura 73 faz com que fique definido o posicionamento do pino perante a peça circular. Anteriormente o pino era inserido por pressão, contudo a inserção do pino com uma maior profundidade causava interferências com as esferas que se encontram por dentro. Enquanto a colocação do pino de forma menos profunda podia fazer com que este se soltasse. O aparafusamento do pino impede que saia da sua posição durante a operação do Thor.

Por fim, fez-se a colagem na região em que a peça (60 mm de diâmetro) estava com a rotura, permitindo ao sensor ótico conhecer a posição desta articulação quando atinge o seu limite. A figura 74 mostra esta peça depois do processo de colagem.



Figura 72 – Pino



Figura 73 – Ligação aparafusada feita na articulação 4



Figura 74 – Peça de detecção de posição pelo sensor ótico

É de realçar que o funcionamento da quarta articulação teve melhorias com as alterações produzidas, contudo esta ainda apresenta pequenos erros de movimento. Estes erros de movimento devem-se do facto das esferas não se encontrarem dispostas sempre à mesma distância umas em relação às outras, havendo mesmo colisões entre elas. O criador do Thor desenhou este subconjunto (figura 51) para desempenhar a função de um rolamento de esferas, contudo um rolamento de esferas possui uma estrutura chamada gaiola que separa as esferas metálicas, diminuindo o atrito entre elas, mantendo-as uniformemente distribuídas.

Procedeu-se à montagem dos restantes elementos desta articulação juntando as articulações 5 e 6 (figura 75) e seguidamente enviou-se instruções através do *Arduino IDE* para testar este subconjunto, sendo que as ações de melhoria tornaram os movimentos mais uniformes.



Figura 75 – Articulações 4 até 6

### Articulações 2 e 3

Detetaram-se deformações plásticas, roturas parciais e totais em duas peças presentes nas articulações 2 e 3 (a figura 54 mostra esses dois componentes), contribuindo para a não uniformidade de movimentos pelo braço robótico, pois os motores não se encontravam perfeitamente alinhados devido à superfície deformada. Nas figuras 76 e 77 observam-se esses problemas.

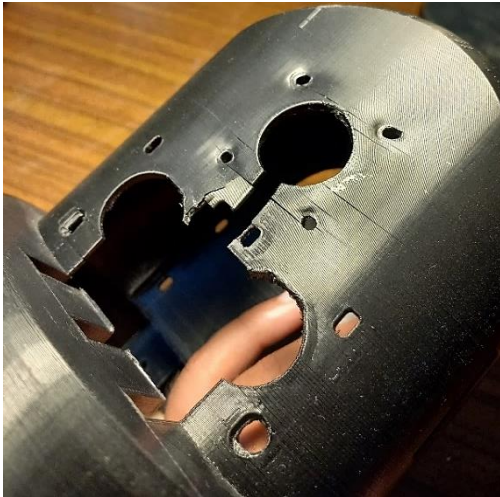


Figura 76 – Peça de alojamento dos motores-  
perspetiva A

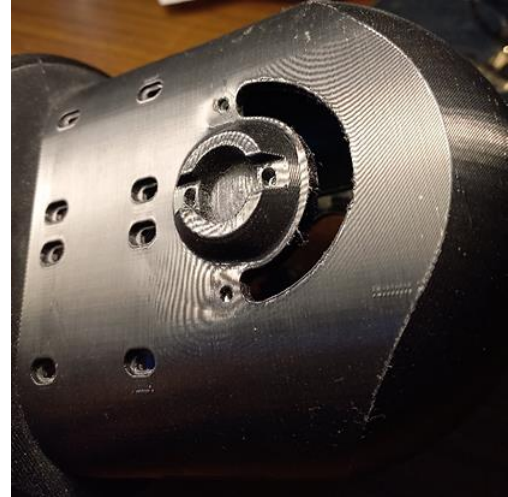


Figura 77 – Peça de alojamento dos motores-  
perspetiva B

Nas regiões onde as cabeças dos parafusos estavam encostadas depois destes estarem apertados, fixando os motores, identificaram-se deformações plásticas. Além disso, na superfície da peça existiam fissuras. No processo de desmontagem deste subconjunto, durante a remoção dos três motores do interior da peça, uma parte da parede entrou em rotura total, devido ao facto de já se encontrar em rotura parcial. Neste caso, estes problemas surgiram depois dos vários elementos estarem montados e com o passar do tempo ocorreram essas deformações e roturas.

A ação de melhoria consistiu no aumento da espessura da parede da peça de 2 para 4 mm. Na figura 78 observa-se a azul essa região. Seguidamente produziu-se através de MA esta geometria (figura 79).

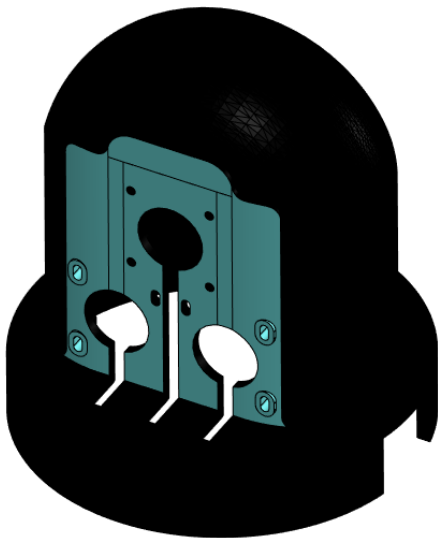


Figura 78 – Região com aumento de 2  
mm de espessura



Figura 79 – Peça de alojamento dos  
motores (MA)

As figuras 80 e 81 apresentam a peça que se encontrava aparafusada ao componente mostrado nas figuras 76 e 77.



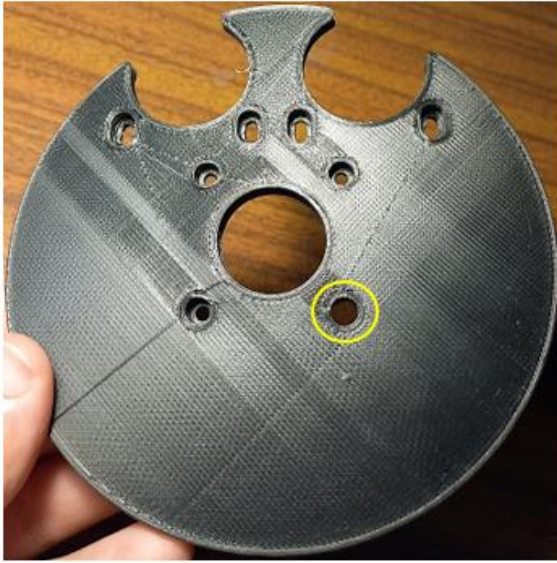


Figura 80 – Peça circular da articulação 2 (vista de topo)

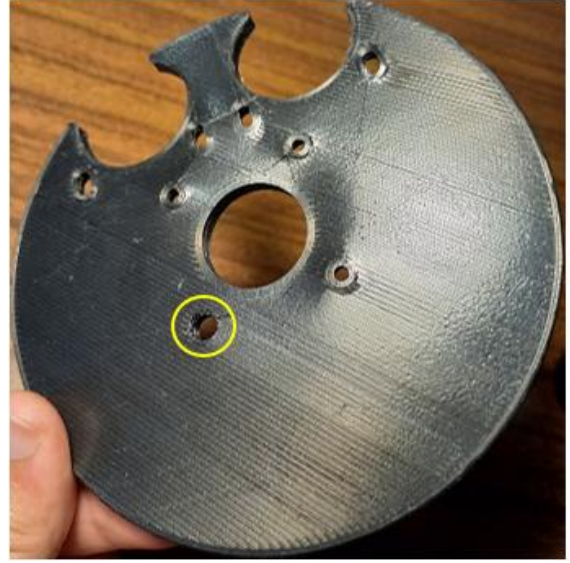


Figura 81 – Peça circular da articulação 2 (vista de trás)

A peça circular, figuras 80 e 81, apresentou uma rotura total na região de um dos furos por onde passa um dos parafusos para apertar o motor. Os restantes três furos análogos estavam com roturas parciais. Além disso, a superfície da peça apresentou deformações plásticas nalgumas regiões próximas dos furos. Estas deformações e roturas deveram-se à força constante que os parafusos exerceram quando estavam apertados e, ao fim de algum tempo, deformaram a superfície dos componentes, dada a reduzida espessura da parede onde as cabeças dos parafusos encostavam.

A ação de melhoria consistiu em eliminar os furos de alojamento das cabeças dos parafusos, deixando o espaço necessário para a sua passagem, ou seja, desta forma as cabeças dos parafusos ficam exteriorizadas. Esta opção garante uma maior rigidez à peça, porque anteriormente os parafusos assentavam numa cavidade que tinha uma espessura de parede de 2 mm e após a melhoria efetuada assentam na espessura de 5 mm da peça. Nas figuras 82 e 83 observa-se o CAD do componente antes e após a melhoria efetuada. Seguidamente fez-se por FFF o componente (figura 84).

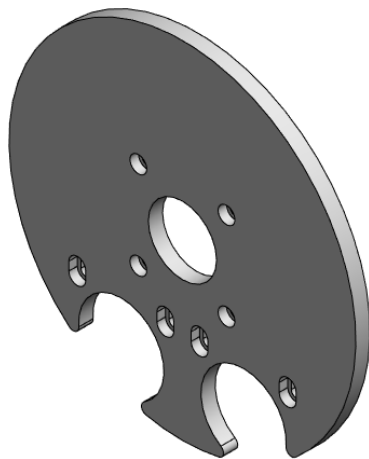


Figura 82 – CAD da peça circular antes da melhoria efetuada

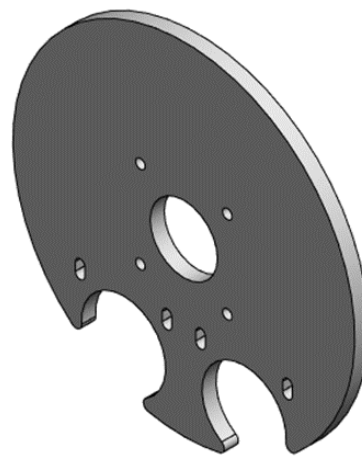


Figura 83 – CAD da peça circular após a melhoria realizada



Figura 84 – Peça circular produzida por FFF

A tarefa que se seguiu foi montar as duas peças produzidas por MA destas articulações, bem como os motores e restantes elementos (figura 85). Na fase seguinte realizaram-se testes de funcionamento à articulação 2, enviando comandos para este subconjunto, observando-se uma uniformidade de movimentos (figura 86).



Figura 85 – Montagem de elementos das articulações 2 e 3



Figura 86 – Articulações 2 e 3

O aumento da espessura em 2 mm de parede do componente da figura 79 teve como consequência também aumentar em 2 mm a espessura de uma peça de união presente no Thor. A figura 55 enquadra o componente no braço robótico. No CAD aumentou-se 1 mm para cada um dos lados para a peça se manter simétrica em relação ao seu plano central, ficando com 75 mm. Na figura 87 observa-se um dos dois aumentos de 1 mm no componente. De seguida imprimiu-se a peça (figura 88).

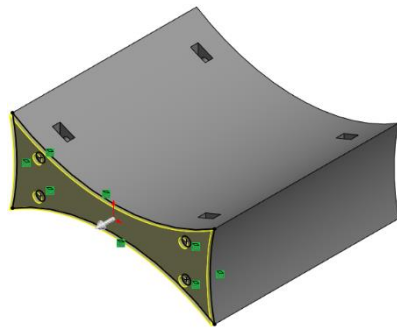


Figura 87 – CAD da peça de união com a alteração geométrica

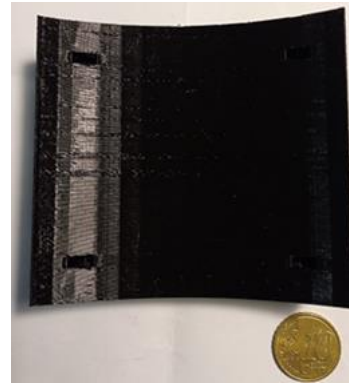


Figura 88 – Peça de união impressa

### Articulação 1

Todos os elementos da articulação 1 encontraram-se em conformidade após a desmontagem e a análise visual. A figura 89 mostra a articulação 1 montada. A base tem 200 mm de diâmetro.



Figura 89 – Articulação 1

A tabela 6 mostra a tecnologia de fabrico e o material para cada peça desenhada.

Tabela 6 – Tecnologia de fabrico e material para cada peça desenhada

Art.	Peça	Tecnologia de fabrico	Material
5 e 6	Peça limitadora de movimento axial (x2)	Anycubic <i>Photon Mono X</i>	<i>Resione G217 Tough Resin Clear</i>
	Peça da base do sub-conjunto	Intamsys Pro 410	PAHT-CF15
2 e 3	Peça de alojamento dos motores	Intamsys Pro 410	PAHT-CF15
	Peça circular	Intamsys Pro 410	PAHT-CF15
	Peça de união	Creality Ender-3 S1 Pro	PLA

Na tabela 7 encontram-se listados os problemas mecânicos detetados, causas e ações de melhoria/correção implementadas no braço robótico.

Tabela 7 – Problemas mecânicos, causas e ações de melhoria/correção

Art.	Problemas mecânicos	Causas dos problemas mecânicos	Melhoria/Correção
5 e 6	Movimento axial das polias superiores paralelas	Projeto do subconjunto sem a restrição deste movimento	Desenho e fabrico de duas peças limitadoras de movimento axial
	Deformações e roturas na peça da base do subconjunto, alterando a afinação das correias dentadas	Força constante exercida pelos parafusos nas regiões de encosto	Redesenho e fabrico de peça com aumento de 2 mm de espessura
	Correias dentadas com irregularidades físicas e uma distância desigual entre dentes	Processo manual de emenda da correia aberta	Seleção e implementação de duas correias fechadas normalizadas
	Espaço reduzido para a afinação das correias dentadas	Projeto do subconjunto tendo um espaço reduzido para o processo de afinação	Rotação em 180 graus dos motores, aumentando em 6 mm o espaço referido
4	Resíduos de material de suporte na peça na qual as esferas contactam	O estudante que iniciou o projeto Thor na empresa não procedeu à remoção destes resíduos	Lixagem
	Pino com um acabamento superficial rugoso, interferindo com as esferas. Pino com um posicionamento incerto	Processo de MA. Criador do Thor projetou o pino sendo colocado por pressão	Lixagem e aparafusamento
	Rotura parcial na peça de deteção de posição	Peça com uma parede reduzida de 1 mm	Colagem
2 e 3	Deformações e roturas na peça de alojamento dos motores e na peça circular, provocando um desalinhamento nos motores	Força constante exercida pelos parafusos nas regiões de encosto	Redesenho e fabrico de peças com um aumento geométrico
	Peça de união com um comprimento reduzido	Aumento da espessura da peça de alojamento dos motores	Redesenho e fabrico de peça com aumento de 2 mm de espessura

Em suma, implementou-se um conjunto de melhorias mecânicas com um impacto direto no funcionamento do braço robótico Thor no sentido da uniformidade de movimentos, excetuando a quarta articulação que, apesar de apresentar melhorias na sua movimentação, ainda apresenta erros de movimento oriundos do facto deste subconjunto não ter uma estrutura que separe as esferas metálicas. Na figura 90 observa-se a montagem do braço robótico após a realização das ações de melhoria.



Figura 90 – Montagem do braço robótico

## 3.4 Resultados e discussão – Garra

### 3.4.1 Desenvolvimento técnico

Para a elaboração da garra definiram-se as especificações e requisitos listados na tabela 8.

Tabela 8 – Especificações e requisitos da garra

Número de pinças	2
Tipo de abertura/fecho	Paralelo (Mecanismo de paralelogramos)
Método de manuseamento	Impacto
Tipo de objetos de manuseamento	Elementos com forma circular ou prismática e de diferentes materiais
Ambiente de uso	Laboratorial
Finalidade de uso	Demonstração
Dimensão do curso de abertura/fecho	$\geq 70$ mm
Massa	$\leq 250$ g
Peso máximo de manuseamento	5 N
Processo de fabrico	MA (FFF) – Intamsys Pro 410
Material	Ultrafuse® (BASF) PAHT-CF15
Tensão de operação	7 V

Como referido no subcapítulo 2.3.2, o criador do Thor projetou-o para suportar a carga máxima de 750 g (contando com a massa da ferramenta) durante a sua operação. Por isso, no presente trabalho definiu-se que a massa máxima da garra devia ser 250 g. Ou seja, a massa máxima dos objetos a manipular devia ser 500 g, sendo aproximadamente 5 N.

### Engrenagens

Com o objetivo de converter o movimento de rotação da extremidade do servomotor em movimento de translação das duas pinças foram projetadas duas engrenagens para a garra. Na tabela 9 observam-se os parâmetros definidos para as engrenagens de dentado reto.

Tabela 9 – Parâmetros das engrenagens

Módulo	2
Número de dentes	14
Ângulo de pressão	20°
Entre-eixo	28 mm
Espessura	8 mm

Utilizou-se o mesmo módulo, número de dentes e ângulo de pressão que John (2021) definiu para a sua garra, tendo em consideração que esta foi desenvolvida para manipular objetos do dia-a-dia. Fuster (2015) também usou o módulo 2 para as suas engrenagens, pois menciona que é um módulo tipicamente definido para o tamanho das engrenagens de uma garra. No presente trabalho o autor definiu a espessura de 8 mm para cada engrenagem por considerar que garante uma resistência mecânica adequada durante a transmissão de movimento. O valor do entre-eixo foi obtido através da aplicação da fórmula seguinte:



$$E = \frac{(Z_A + Z_B)}{2} \times M$$

Onde,

$Z_A$  = Número de dentes da engrenagem A = 14

$Z_B$  = Número de dentes da engrenagem B = 14

M = Módulo = 2

E = Entre-eixo = 28 mm

Para elaborar o CAD das duas engrenagens recorreu-se à *Toolbox* do *software SolidWorks*, que permite obter o desenho 3D de vários componentes normalizados. Apenas foi necessário configurar os parâmetros do componente que se pretendeu, resultando na obtenção de um modelo (CAD) do componente configurado. A figura 91 mostra os modelos 3D das engrenagens de dentado reto, bem como a sua montagem. É de notar que foram adicionadas duas hastes em duas regiões dentadas do conjunto.

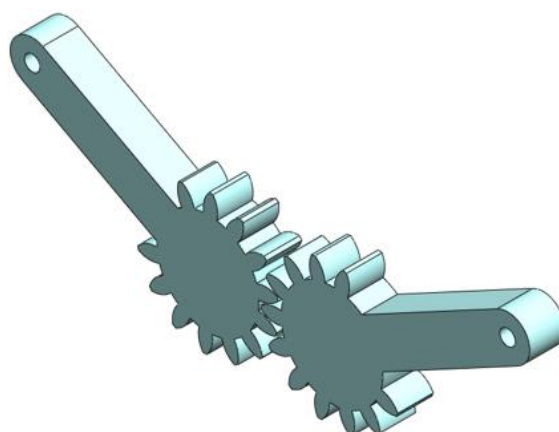


Figura 91 – Projeto das engrenagens

### **Mecanismo paralelo**

A figura 92 mostra o projeto das hastes e pinças respeitando o princípio dos paralelogramos referido no subcapítulo 2.3.2.

Os círculos pretos na figura 92 unidos com traços interrompidos formam dois paralelogramos, garantindo o paralelismo das duas faces (uma em relação à outra) da garra que contactam com o objeto no momento da apreensão.

Atendendo que o curso de abertura/fecho devia ser de pelo menos 70 mm, a definição das dimensões dos lados dos paralelogramos torna-se um fator crucial de projeto, pois influencia a dimensão do curso.

A figura 92 representa a garra aberta com 70 mm de curso, sendo que as dimensões dos lados dos paralelogramos, para se conseguir o curso pretendido, são 45 mm de lado maior e 23 mm de lado menor. O paralelogramo da direita é simétrico em relação ao da esquerda. A haste acoplada a cada uma das duas engrenagens tem 50 mm de comprimento, contando do centro da engrenagem até ao seu limite horizontal. Enquanto as duas hastes superiores da figura 92 têm 53 mm de comprimento máximo. Os comprimentos das hastes tiveram em consideração os valores que os lados maiores dos paralelogramos tinham de apresentar. As duas hastes acopladas às engrenagens têm 10 mm de largura (L2), enquanto as duas hastes superiores têm 8 mm (L1). A razão das hastes superiores apresentarem

menos 2 mm de largura do que as hastes inferiores foi para existir um espaço maior entre as regiões dentadas e as hastes superiores. Todas as hastes apresentam a mesma espessura que as engrenagens (8 mm).

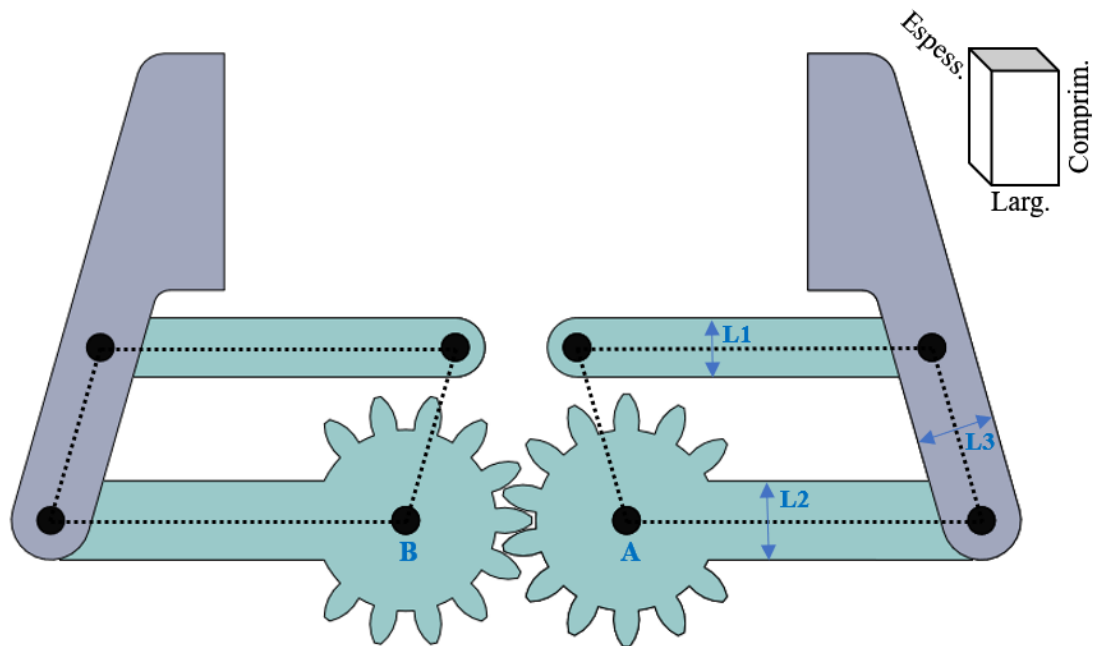


Figura 92 – Projeto das hastes e pinças assente no mecanismo de paralelogramos

A garra apresenta duas pinças com igual geometria. Na figura 93 observa-se o desenho de dois veios na pinça de 2,5 mm de diâmetro que substituem os elementos normalizados que os projetos de garras deste tipo apresentam. As hastes foram conectadas aos veios. A distância entre os centros dos veios corresponde à distância que o lado menor do paralelogramo devia apresentar que são 23 mm. A pinça tem 17 mm de espessura (E1) e apresenta um espaço interior de 9 mm (E2) para o alojamento das extremidades das hastes, tendo presente que devem existir duas folgas entre as extremidades das hastes e a pinça para o bom funcionamento do mecanismo. A largura da extremidade da pinça (L3), 10 mm, é igual à largura das hastes com engrenagens (L2). O comprimento da região que contacta com os elementos a manusear é 30 mm, sendo adequado para a manipulação de pequenos objetos. Essa região contará com um mordente de forma a aumentar o atrito entre a garra e os elementos a segurar.

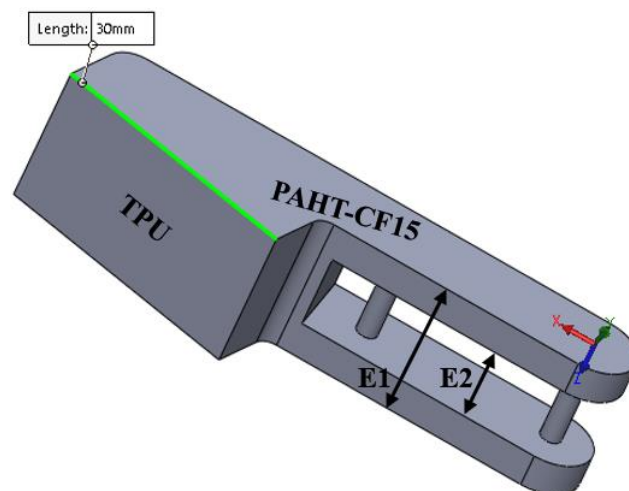


Figura 93 – Pinça da garra

Verificou-se no estado da arte que era necessário proceder a melhorias na articulação entre peças. A estratégia adotada no presente trabalho é modelar e fabricar a garra de forma integral, minimizando o número de operações e elementos de montagem. Desta forma procedeu-se ao desenho de elementos (veios) nas próprias peças que servem de articulação. A única operação de montagem envolvida diz respeito à instalação do servomotor com elementos normalizados. Para a montagem do servomotor são utilizados parafusos e não para as ligações das hastes.

Os vários elementos normalizados que noutros trabalhos ligam as extremidades das hastes (normalmente são parafusos e porcas) serão assim substituídos pela própria geometria da garra. Para que este desenho integral funcione é necessário obter uma conformidade dimensional e geométrica adequada, pelo que o processo de MA deve ser devidamente controlado. A definição correta dos parâmetros no *software* de impressão 3D será um aspeto importante para conseguir a precisão dimensional e geométrica do protótipo. Isto faz com que o mecanismo de paralelogramos mantenha a garra paralela em todo o momento, sem precisar de qualquer retrabalho potencialmente causador de problemas no mecanismo, como aconteceu no trabalho de John (2021).

Desta forma também não se irá verificar no presente trabalho o problema reportado por John (2021) relativo à dificuldade de apertar os elementos normalizados adequadamente para que o mecanismo funcione corretamente, devido às hastes serem impressas inseridas no espaço interior das pinças com os veios a fixá-las, permitindo apenas o movimento de rotação.

### Carcaça

As figuras 94 e 95 mostram a carcaça superior da garra. Esta peça tem 5 mm de espessura (eixo Z). Na figura 94 observam-se três veios de 2,5 mm de diâmetro que permitem a fixação das extremidades das hastes e de uma engrenagem, possibilitando a rotação. Também existem dois veios de 5 mm de diâmetro para garantir uma maior resistência mecânica à carcaça, porque fazem a ligação da carcaça superior com a carcaça inferior.

A carcaça superior tem dois batentes que impedem que a garra seja aberta mais do que o pretendido durante o seu movimento. Na figura 95 mostra-se que os batentes têm 9 mm (eixo Z), sendo este o espaço destinado para as engrenagens e hastes, e sabendo que devem existir folgas para que o mecanismo seja funcional. Também se escreveu o nome da empresa “Spinner Dynamics” na carcaça superior.

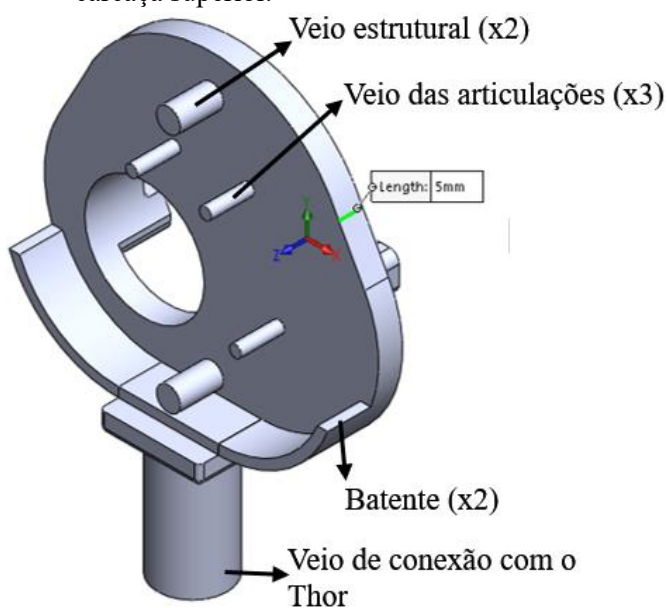


Figura 94 – Carcaça superior (perspetiva A)

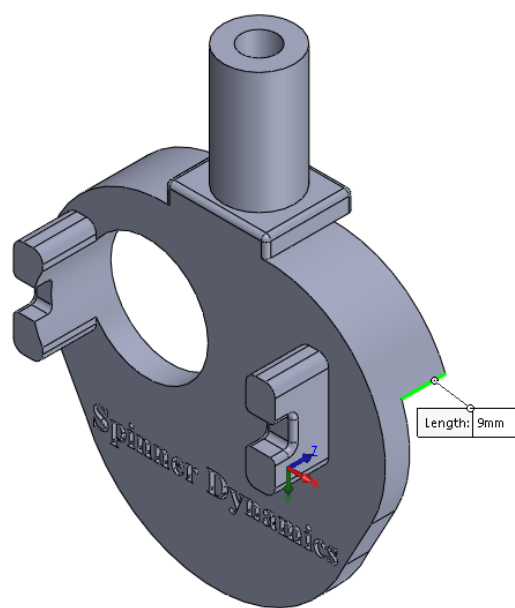


Figura 95 – Carcaça superior (perspetiva B)

A figura 96 mostra a carcaça inferior da garra. Esta peça apresenta 4 mm de espessura, permitindo que, no momento da impressão 3D de todo o protótipo, as faces das pinças, que contactam com a plataforma de construção, estejam ao mesmo nível da face da carcaça inferior, ficando ambas as faces em contacto com a plataforma. Caso as faces não ficassem ao mesmo nível, haveria um maior gasto de material de suporte, uma vez que se pretende imprimir o protótipo na orientação horizontal.

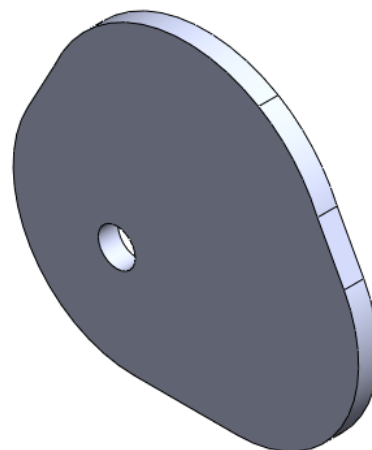


Figura 96 – Carcaça inferior

### Ligação com o braço robótico Thor

Para a garra ser montada no braço robótico foi desenhado um veio na carcaça que irá ser inserido num orifício presente na extremidade do Thor e apertado com três parafusos existentes nessa extremidade para esse efeito (figura 97). Nas figuras 94 e 95 é possível observar o veio de 15 mm de diâmetro e 25 mm de altura. O veio projetado não é totalmente maciço para reduzir o gasto de material e, conseqüentemente, a massa do protótipo.



Figura 97 – Região de montagem da garra

### Instalação do servomotor

O servomotor adquirido continha vários elementos de conexão, dependendo da aplicação pretendida (figura 98). Para a garra do presente trabalho, o elemento mais adequado para se conectar à extremidade do servomotor é a peça circular da figura 98. A peça circular será aparafusada na engrenagem A, sendo o elemento que mais se aproxima da geometria das engrenagens. Quando se projetou as engrenagens já se tinha em conta que este elemento de 20 mm de diâmetro era o mais apropriado.



Figura 98 – Elementos de conexão ao servomotor

Desenhou-se o servomotor presente na Spinner Dynamics, bem como a peça circular. Para a instalação do servomotor projetaram-se dois corpos na carcaça superior (figura 95). Esses dois corpos foram modelados para albergar e fixar por aparafusamento o servomotor. A figura 99 mostra uma vista em corte da montagem do servomotor com as restantes peças. Entre o servomotor e os dois corpos existe uma folga de 0,5 mm para facilitar a sua colocação. Projetou-se a garra para que sejam utilizados quatro parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,2 x 9,5 mm, que vinham juntamente com o servomotor, para o apertar aos dois corpos. Para fazer a ligação da peça circular à engrenagem

recorreu-se a quatro parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,9 x 13 mm. Por fim, para fazer a ligação da peça circular com o servomotor utilizou-se um parafuso de cabeça sextavada interior DIN 912 M3 x 8 mm. A carcaça superior apresenta um furo de 25 mm de diâmetro para a colocação da peça circular e a carcaça inferior tem um furo de 7,5 mm de diâmetro para a passagem do parafuso M3. Pelo centro da engrenagem B (figura 99) passa um veio de 2,5 mm de diâmetro que serve para a fixar, possibilitando a rotação.

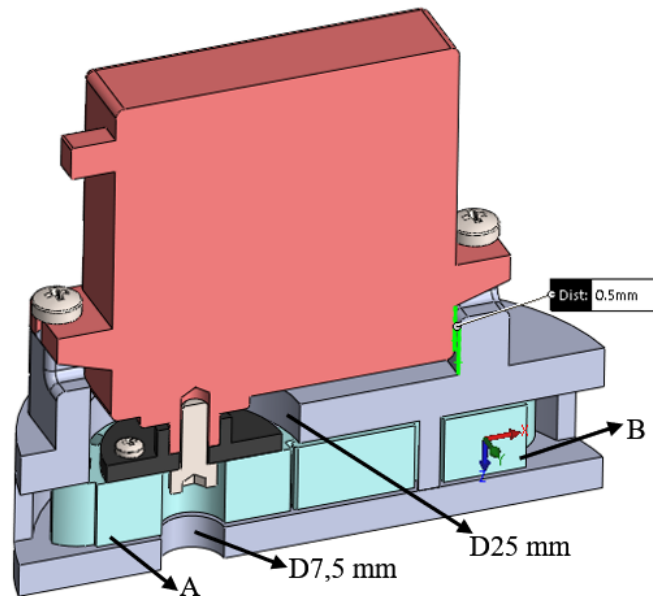


Figura 99 – Vista em corte da montagem do servomotor com as restantes peças

### Mordentes

De forma a aumentar o atrito entre a garra e os elementos a manipular projetaram-se dois corpos que serão impressos com TPU, uma vez que irá aumentar a aderência entre as pinças e os objetos a agarrar. Desenharam-se esses dois corpos com uma geometria ondulada, fazendo com que a aderência seja maior para um correto manuseamento dos objetos, evitando a sua queda.

### Montagem da garra

Na figura 100 observa-se a montagem da garra.

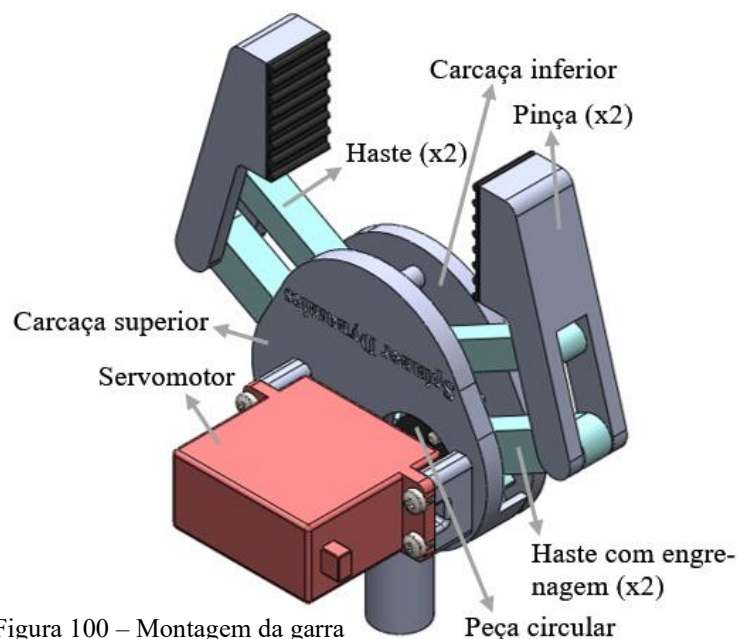


Figura 100 – Montagem da garra

É de realçar que a garra será fabricada numa só impressão 3D e depois será feita a montagem do servomotor, peça circular e ligações aparafusadas. Os únicos parafusos que o conjunto apresenta são para fazer a ligação do servomotor e da peça circular com a garra desenhada.

Uma vez que o equipamento de MA Intamsys Pro 410 tem dois bocais de extrusão, um dos bocais depositará o PAHT-CF15 para o corpo da garra e o outro bocal depositará o TPU para as extremidades das pinças. Desta forma faz-se apenas uma impressão 3D (multimaterial).

Dois aspetos a destacar no projeto do corpo da garra são as dimensões das folgas entre as hastes/engrenagens e a carcaça que as envolve, assim como as folgas entre os sete veios de 2,5 mm de diâmetro e os furos das hastes/engrenagem associados aos veios. Como a garra será impressa numa só vez, e para o bom funcionamento do mecanismo, torna-se essencial uma definição correta desses aspetos. Tal como mostrado nas figuras 101 e 102, primeiramente escolheu-se uma dimensão de 0,5 mm para as folgas observadas lateralmente e para as folgas entre furos e veios.

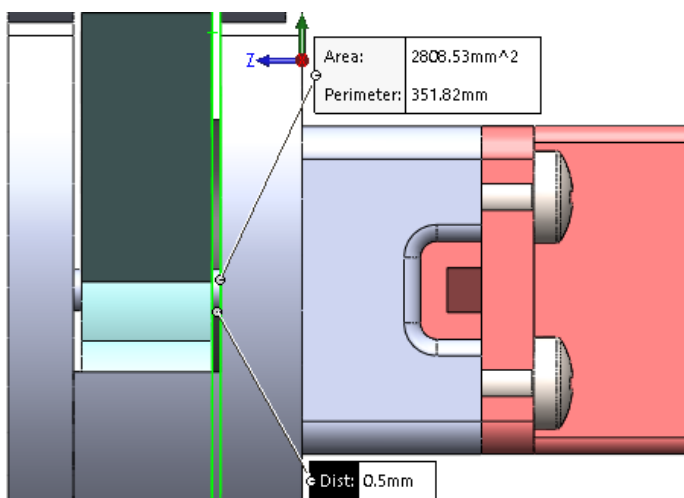


Figura 101 – Folgas de 0,5 mm observadas lateralmente

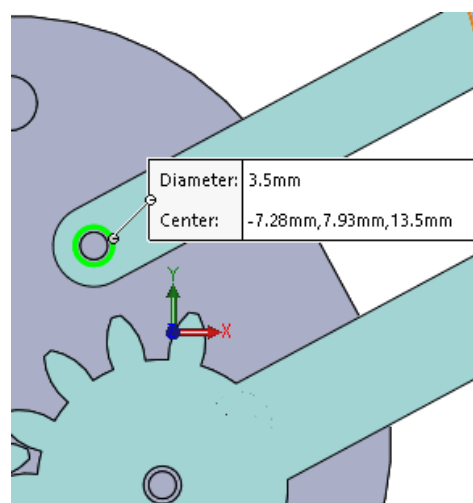


Figura 102 – Veios de 2,5 mm de diâmetro e furos de 3,5 mm de diâmetro associados

### 1ª iteração – Teste da geometria inicial

De forma a testar os movimentos rotativos dos elementos da garra fez-se numa primeira fase a impressão 3D de uma parte e não da sua totalidade, porque poderiam ser necessários ajustes dimensionais ou geométricos, diminuindo-se assim o gasto de material. A figura 103 mostra a peça parametrizada no *software Intamsuite* (utilizaram-se os parâmetros de impressão 3D referidos no subcapítulo 3.2.1). Definiu-se como material de suporte o PAHT-CF15, para averiguar a viabilidade de removê-lo manualmente após o fabrico, uma vez que se pretende utilizar posteriormente o segundo bocal de extrusão para a deposição de TPU.

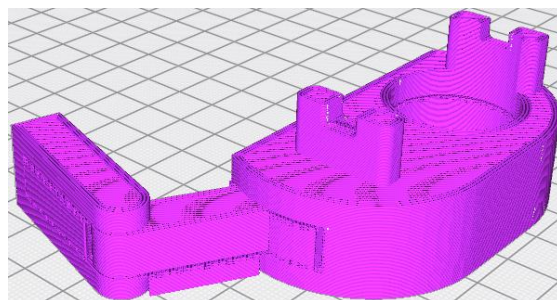


Figura 103 – Peça parametrizada no *software Intamsuite*



Tendo a peça impressa (figura 104) removeu-se manualmente uma parte do material de suporte na região da articulação, no entanto quando se tentou mover esta articulação, o veio entrou em rotura total, separando uma parte do restante elemento fabricado (figura 105).



Figura 104 – Primeira impressão 3D de parte da garra



Figura 105 – Parte que se separou da restante peça

### **2ª iteração – Aumento da dimensão dos veios**

Com o objetivo de melhorar a resistência mecânica dos veios aumentou-se o seu diâmetro de 2,5 para 3,5 mm, tendo-se também aumentado o diâmetro dos furos associados a estes veios para 4,5 mm, mantendo-se assim a dimensão da folga. Imprimiu-se novamente uma parte do protótipo para o teste de funcionalidade das articulações. Verificou-se a ocorrência de roturas totais nos dois veios, separando a pinça das hastes (figura 106).

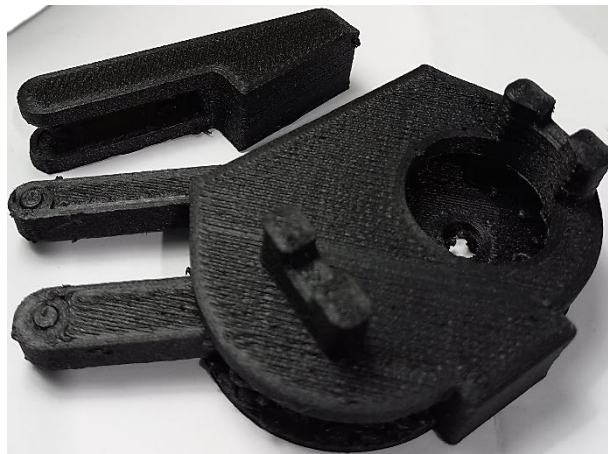


Figura 106 – Segunda impressão 3D de parte da garra (testada)

### **3ª iteração – Aumento da dimensão da folga entre veio e furo**

A folga entre veio e furo foi preenchida com algum material de PAHT-CF15 de forma inde-sejável durante a impressão 3D. Acreditou-se que, ao mover manualmente esta articulação, o material em excesso na folga (fazendo a ligação entre veio e furo) desprendesse da parede do veio, possibilitando o movimento rotativo. Contudo, o aumento do diâmetro do veio (2ª iteração), tornando-o mais resistente mecanicamente, não fez com que o material, que une o veio ao furo, desprendesse da

parede do veio durante a rotação, fazendo com que o veio entrasse em rotura precocemente por estar conectado ao furo. Por isso nesta iteração aumentou-se a dimensão da folga para 1 mm, entre veio e furo, para que o excesso de material não ligasse estes dois elementos.

Nesta iteração o diâmetro do veio foi de 3,5 mm e o diâmetro do furo foi de 5,5 mm. Na figura 107 observa-se esta iteração depois de testadas manualmente as articulações, onde se verificou que existe um espaço entre os veios e os furos, mas não ao longo da totalidade do perímetro, sendo que os veios voltaram a entrar em rotura total, existindo uma região onde há ligação entre veios e furos.



Figura 107 – Terceira impressão 3D de parte da garra (testada)

### Ajuste de parâmetros de impressão 3D

Na terceira iteração observou-se de forma notória que durante a impressão 3D de parte da garra continuou a existir um excesso de material depositado, fazendo com que numa zona os veios da pinça ficassem conectados aos furos das hastes, enquanto na região próxima este facto já não ocorreu, havendo uma folga. Posto isto, tornou-se claro que realizar uma próxima iteração alterando apenas aspetos dimensionais não seria o passo a seguir e que devia ser ajustada a parametrização do processo de MA.

*Flow* corresponde à quantidade em que o material é extrudido pelo bocal, sendo que quando configurado incorretamente nota-se nas peças impressas a ocorrência de extrusão excessiva ou de sub-extrusão (O’Connell, 2022). A *retraction distance* corresponde à quantidade de material puxado para trás pelo bocal de extrusão durante o seu movimento. O aumento do valor da *retraction distance* pode evitar a ocorrência de *stringing* (O’Neill, 2022). Na FFF quando o bocal de extrusão se move de um local para o outro para construir a peça pode ocorrer um escorrimento de material (*stringing*) que solidifica na peça (Obudho, 2023).

A etapa seguinte do presente trabalho consistiu em definir o parâmetro de impressão *flow* que garantisse a qualidade de impressão 3D adequada ao protótipo em questão, pois foi evidente na terceira iteração que este parâmetro tinha de ser ajustado. No caso da impressão 3D da garra, o rigor dimensional nas regiões dos veios, furos e noutras zonas é essencial para o bom desempenho do mecanismo, assegurando a existência das dimensões das folgas projetadas, tendo presente que o corpo da garra é fabricado numa impressão 3D com os elementos montados.

Com o objetivo de controlar este parâmetro recorreu-se à impressão 3D de geometrias de ensaio para ser mais fácil afinar o *flow* através destes corpos. Imprimiu-se uma parte de um cubo e duas peças cilíndricas (figura 108).



Figura 108 – a) Parte de um cubo b) Corpo cilíndrico com veio c) Corpo cilíndrico com folga interior



A parte do cubo foi produzida com 0% de *infill* e com 3 paredes em cada lado (0,6 mm por parede). Como o cubo é oco e com uma espessura de 1,8 mm é mais simples fazer a medição da espessura da peça desta forma.

Como os veios das partes impressas da garra entraram em rotura precocemente, produziu-se o corpo cilíndrico com veio para constatar se este suporta o esforço quando testado manualmente. Aumentou-se o diâmetro do veio para 7,8 mm para melhorar a sua resistência mecânica.

Por fim, a peça cilíndrica com folga interior serviu para analisar visualmente se o elemento impresso apresentava de facto uma folga circular bem definida, sendo que não poderia existir excesso de material no espaço vazio. Neste corpo o furo interior apresenta 9 mm de diâmetro, tendo um veio inserido no seu interior de 7,8 mm de diâmetro. Assim sendo, o autor do presente trabalho definiu que a dimensão da folga circular corresponde à largura de extrusão que é de 0,6 mm.

Inicialmente as partes da garra foram impressas com um *flow* de 95%. Neste estudo testaram-se valores de *flow* inferiores, tendo em conta que o problema existente consistia no excesso de material presente nos elementos impressos. Produziram-se os três corpos da figura 108 com 92%, 89% e 86% de *flow*. Um *flow* de 86% foi o que resultou numa precisão dimensional adequada, não apresentando excesso de material (figura 108). Por fim, é de destacar que se aplicou manualmente um esforço na peça cilíndrica com veio e este não entrou em rotura, ao invés dos veios das partes da garra que entraram em rotura com um baixo esforço aplicado.

Outro parâmetro que se alterou após a produção das partes do protótipo foi a *retraction distance* para evitar o efeito de *stringing* indesejável nas impressões 3D. Nas partes do protótipo utilizou-se uma *retraction distance* de 3 mm, mudando para 5 mm quando se iniciou o fabrico dos três corpos da figura 108. Com estes parâmetros conseguiu-se obter uma impressão 3D sem ocorrer extrusão excessiva.

#### **4ª iteração – Aumento da dimensão da garra e ajustes geométricos**

Tendo-se definido os parâmetros *flow* e *retraction distance* de forma a evitar a deposição em excesso de material na impressão 3D, avançou-se para a produção de toda a garra. Tinha-se projetado a garra de forma a apresentar um curso de abertura/fecho de 70 mm, mas, quando se imprimiu as partes da garra, constatou-se em contexto real que se deveria aumentar a dimensão do protótipo e, consequentemente, a dimensão do curso. Aplicou-se uma escala de 1,5 em toda a garra.

Nesta fase o curso de abertura/fecho da garra passou para 90 mm. Para diminuir o gasto de material, removeu-se uma parte da carcaça, ficando esta com uma face plana (face azul da figura 109). Na carcaça existem dois veios interiores cuja função é apenas para fazer a união entre a carcaça superior e a carcaça inferior. Nesta iteração mudou-se o posicionamento de um dos veios de forma a ficar facejado com a região plana referida. Também se diminuiu a geometria dos dois batentes para reduzir o gasto de material e, consequentemente, a massa da garra (figura 110). Aumentou-se a largura das duas hastes superiores de forma a ficarem com a mesma largura das hastes inferiores, uma vez que o espaço entre as hastes da garra é maior.

Apesar do servomotor e da peça circular serem apertados com parafusos autorroscantes, fez-se os furos na modelação. Tendo em consideração que a garra será impressa com 50% de *infill*, haverá espaços vazios no interior da geometria da garra. Os furos caso não tivessem sido feitos, quando se colocasse os parafusos autorroscantes, estes poderiam encontrar espaços vazios durante a criação da rosca pelo próprio parafuso. Para evitar que isto ocorra, desenhou-se a garra com os furos destinados à instalação do servomotor e da peça circular. Desta forma são criadas paredes circulares em torno dos furos durante o processo de MA, garantindo que os parafusos não perfuram algum dos espaços vazios.

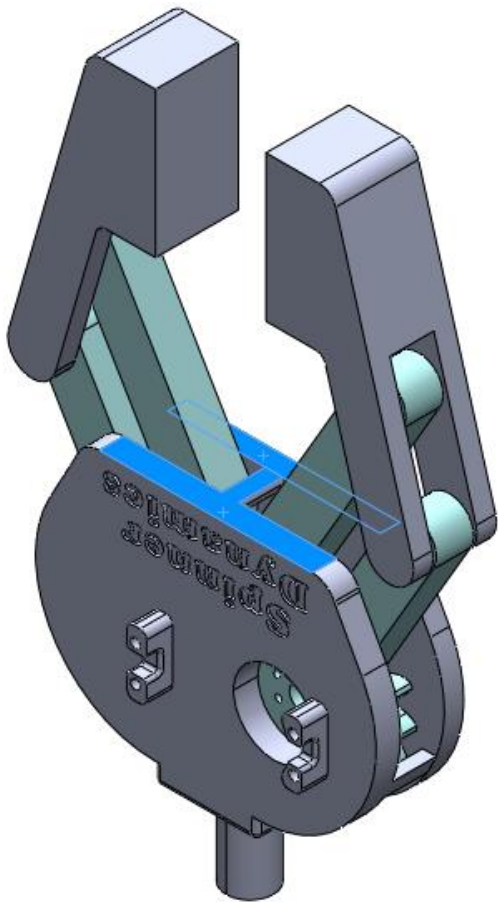


Figura 109 – Redesenho da garra

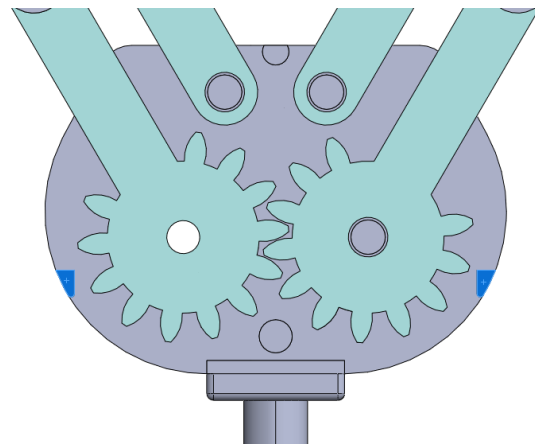


Figura 110 – Vista em corte de parte da garra redesenhada

Também se redesenharam os furos das hastes/engrenagem para apresentarem 9 mm de diâmetro e os veios, que estão localizados no interior destes, têm nesta fase 7,8 mm de diâmetro (os corpos da figura 108 apresentam estes diâmetros). Nesta iteração a dimensão da folga entre as hastes/engrenagens e a carcaça envolvente foi de 0,3 mm, sendo igual à espessura de uma camada de material depositada.

Anteriormente optou-se por utilizar um bocal de extrusão para a deposição de PAHT-CF15 (para o corpo da garra e para o material de suporte) e o outro bocal de extrusão para a deposição de TPU (para os mordentes que serão produzidos numa fase posterior). Contudo, notaram-se nas iterações anteriores que a remoção manual do material definido como material de suporte não era um processo rápido, ficando nas superfícies algum material de suporte que exigia um retrabalho minucioso, afetando o funcionamento do mecanismo no caso do material de suporte remanescente não ser retirado na sua totalidade. Optou-se então por produzir o corpo da garra com o material referido, escolhendo-se como material de suporte o PVA. Devido a esta opção, os dois mordentes para as extremidades da garra serão produzidos numa segunda impressão 3D.

Tendo em consideração que nesta fase será utilizado um material de suporte solúvel em água, porque o processo de remoção deste é simples depois de finalizada a impressão 3D, optou-se por ter uma menor dimensão de folga entre as hastes/engrenagens e a carcaça (redução de 0,5 para 0,3 mm). Deste modo, não foi necessário utilizar algum acessório para retirar o material de suporte em locais de difícil remoção como no caso das folgas.

É de notar que ao ser aplicada uma escala de 1,5 no protótipo, as regiões onde o servomotor é instalado, bem como a parte que permite a ligação com o braço robótico aumentaram a sua geometria. Posto isto, foi necessário reajustar a geometria de forma que as zonas onde o servomotor é fixado

e o veio de ligação da garra com o braço robótico mantenham as dimensões anteriores à aplicação da escala na garra. Outra alteração feita foi nas duas palavras “Spinner Dynamics” em que se ajustou o seu posicionamento para uma melhor legibilidade na garra impressa. As letras apresentam 0,75 mm de profundidade.

A próxima etapa correspondeu à MA da garra. Tal como mostrado na figura 111, afastou-se uma engrenagem da outra para existir uma maior distância entre si. Havendo superfícies de dentes muito próximas das superfícies de dentes da engrenagem vizinha, podia resultar numa união entre essas superfícies durante a deposição de material na impressão 3D, apesar de se ter controlado os parâmetros *flow* e *retraction distance*.

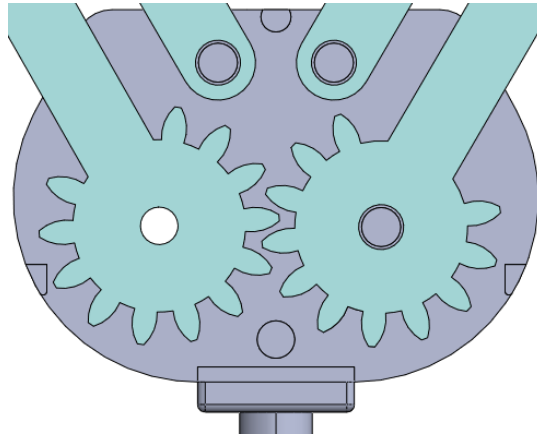


Figura 111 – Garra com desvio de engrenagem para impressão 3D

A figura 112 mostra a garra, que foi impressa na orientação horizontal, com material de suporte.

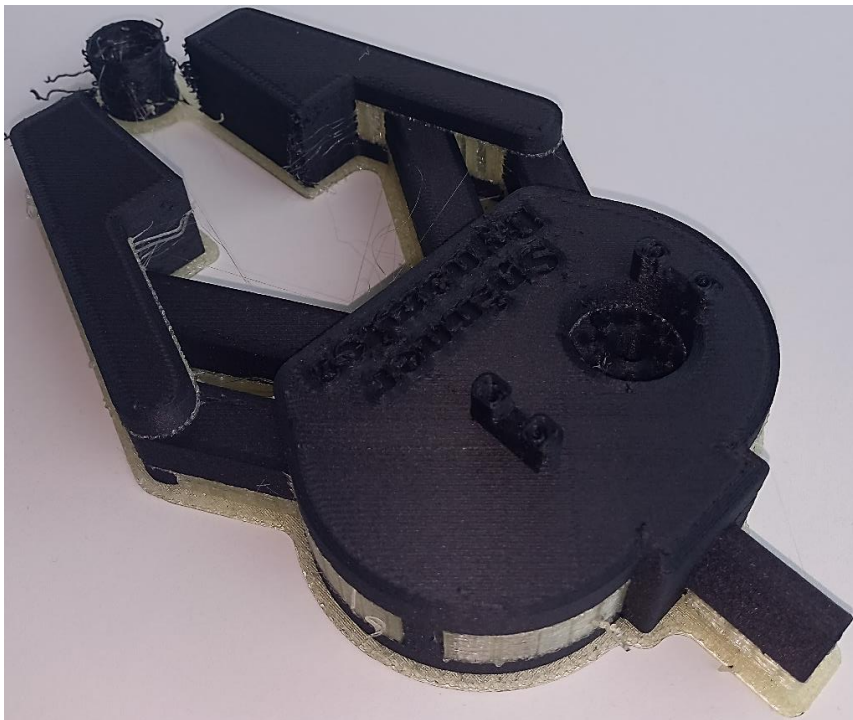


Figura 112 – Garra impressa com material de suporte

Tendo o processo de MA concluído removeu-se o material de suporte e o *raft* dissolvendo-os em água. Movimentaram-se manualmente todas as articulações da garra e ocorreu uma rotura total num dos veios (figura 113).



Figura 113 – Veio que entrou em rotura total da garra

### **Redesign dos veios e ensaios de flexão**

Como os veios são regiões críticas do protótipo, ocorrendo uma rotura total num deles (figura 113), optou-se por modificar a sua geometria. A geometria inicial do veio consistia num cilindro de 7,8 mm de diâmetro e com 13,5 mm de comprimento (figura 114). Na nova geometria do veio acrescentou-se material nas extremidades em forma de dois cones, cujo diâmetro maior é de 11,8 mm na zona que contacta com os apoios (figura 115).

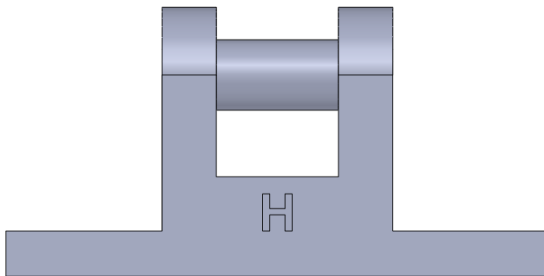


Figura 114 – Geometria inicial do veio

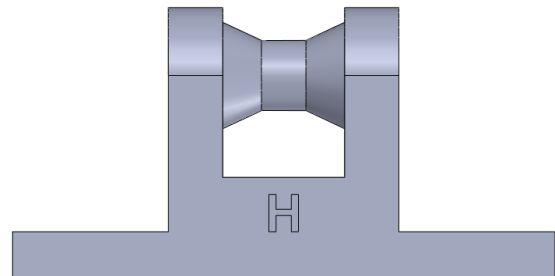


Figura 115 – Geometria do veio após o *redesign*

Com o objetivo de validar que a nova geometria do veio suporta um maior esforço mecânico do que a geometria inicial foram feitos ensaios de flexão. Projetou-se a estrutura que envolve o veio (figuras 114 e 115) de forma a serem realizados os ensaios mecânicos referidos. Outro aspeto que se considerou foi a orientação na qual os veios seriam impressos na plataforma de construção. Como as peças impressas não são isotrópicas, sendo feitas camada por camada, há uma direção que apresenta um pior desempenho mecânico que, neste caso, é a orientação vertical. Assim sendo, o corpo da figura 114 será impresso nas orientações horizontal e vertical na plataforma de construção, repetindo-se o mesmo processo para o corpo da figura 115. Isto permite comparar o desempenho mecânico de ambas as geometrias do veio e de ambas as orientações de impressão 3D. A figura 116 mostra os elementos dispostos na plataforma de construção, sendo necessário usar o material de suporte PVA para a sustentação dos elementos. Os corpos foram impressos com o material e com os parâmetros de impressão 3D que são utilizados para o fabrico da garra.

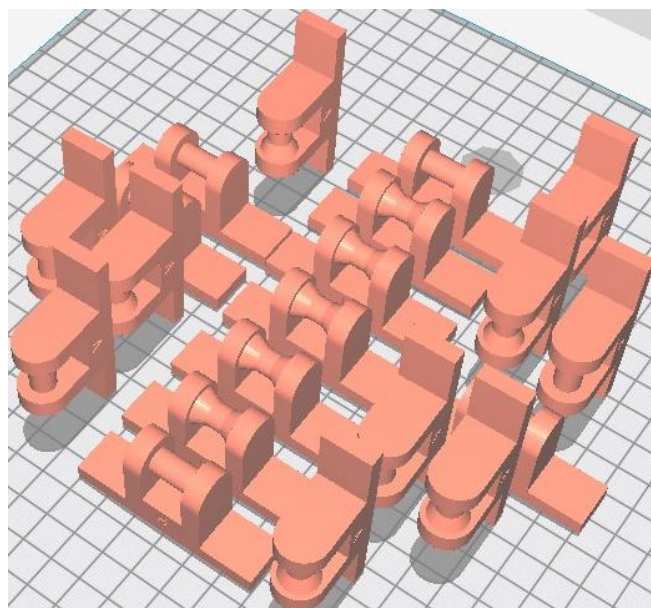


Figura 116 – Orientação dos corpos na plataforma de construção

Imprimiram-se cinco corpos com a geometria inicial do veio impressos na horizontal, cinco com a geometria após o *redesign* impressos também na horizontal e os restantes dez corpos fabricados na vertical (cinco para cada geometria do veio). Todos os vinte corpos foram impressos apenas numa impressão 3D. Na figura 117 mostra-se um dos cinco corpos impressos na horizontal referente à geometria inicial do veio na fase inicial de ensaio.

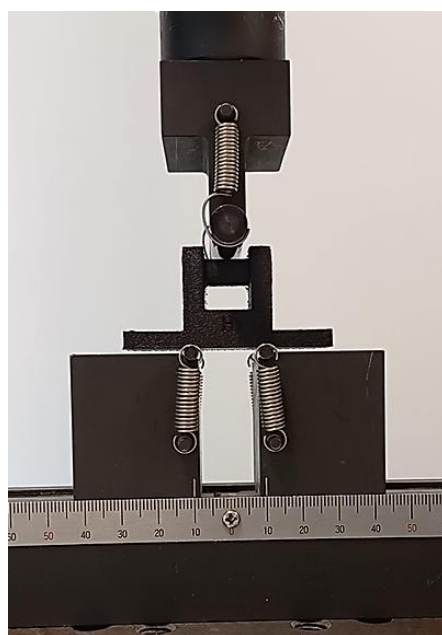


Figura 117 – Ensaio da geometria inicial do veio impresso na horizontal (1º de 5 iguais)

Fazendo a comparação entre as duas geometrias do veio, aquela que suportou a maior força à flexão foi o veio redesenhado. Este resultado era esperado, considerando que o veio redesenhado apresenta a adição de material nas extremidades, tendo um formato cónico em cada uma delas. Comparando as duas orientações de impressão, aquela que suportou a maior força à flexão foi a horizontal.



Também foi um resultado previsível, tendo em conta que as peças impressas não são isotrópicas, havendo uma direção em que apresentam um desempenho mecânico mais baixo. Os elementos ao serem impressos na orientação vertical e depois sujeitos à flexão resultou em roturas totais em zonas que uma camada foi depositada sobre a outra (figuras 118 e 119).

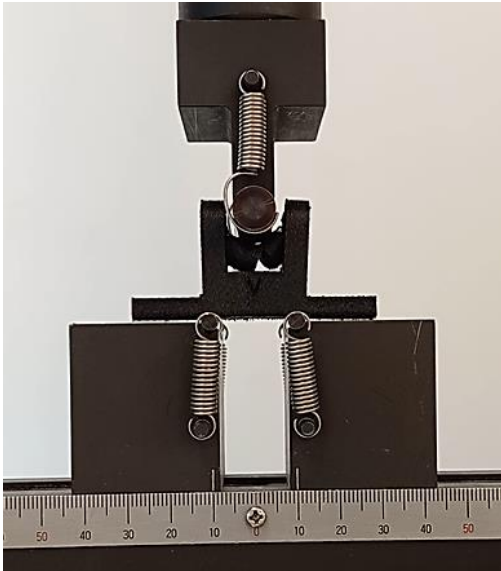


Figura 118 – Ensaio de um dos veios com a geometria inicial (impresso na vertical)

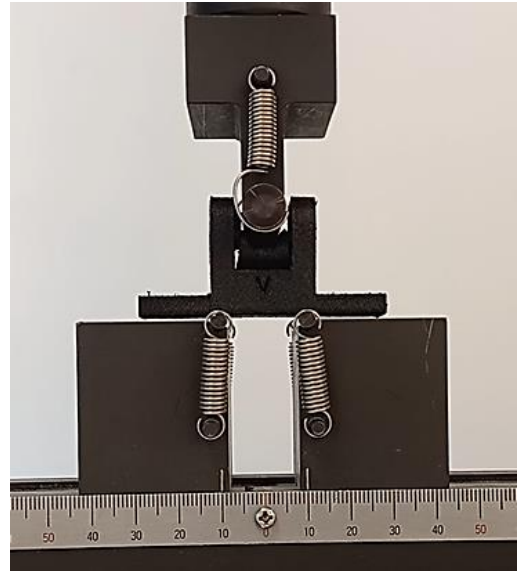


Figura 119 – Ensaio de um dos veios redesenhados (impresso na vertical)

Nas peças impressas na orientação horizontal notaram-se roturas parciais e totais durante os ensaios de flexão efetuados. Estes elementos suportaram uma maior força à flexão do que os corpos impressos na orientação vertical, fazendo com que a estrutura envolvente aos veios também entrasse em flexão (figuras 120 e 121).

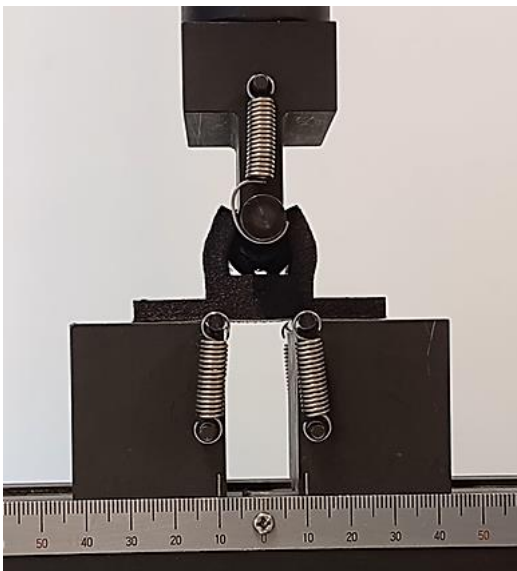


Figura 120 – Ensaio de um dos veios com a geometria inicial (impresso na horizontal)

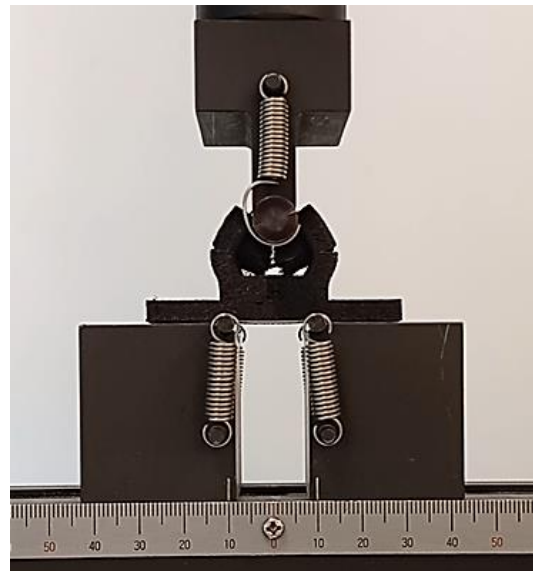


Figura 121 – Ensaio de um dos veios redesenhados (impresso na horizontal)

O gráfico 3 mostra as curvas dos ensaios de flexão para cada tipologia de veio.

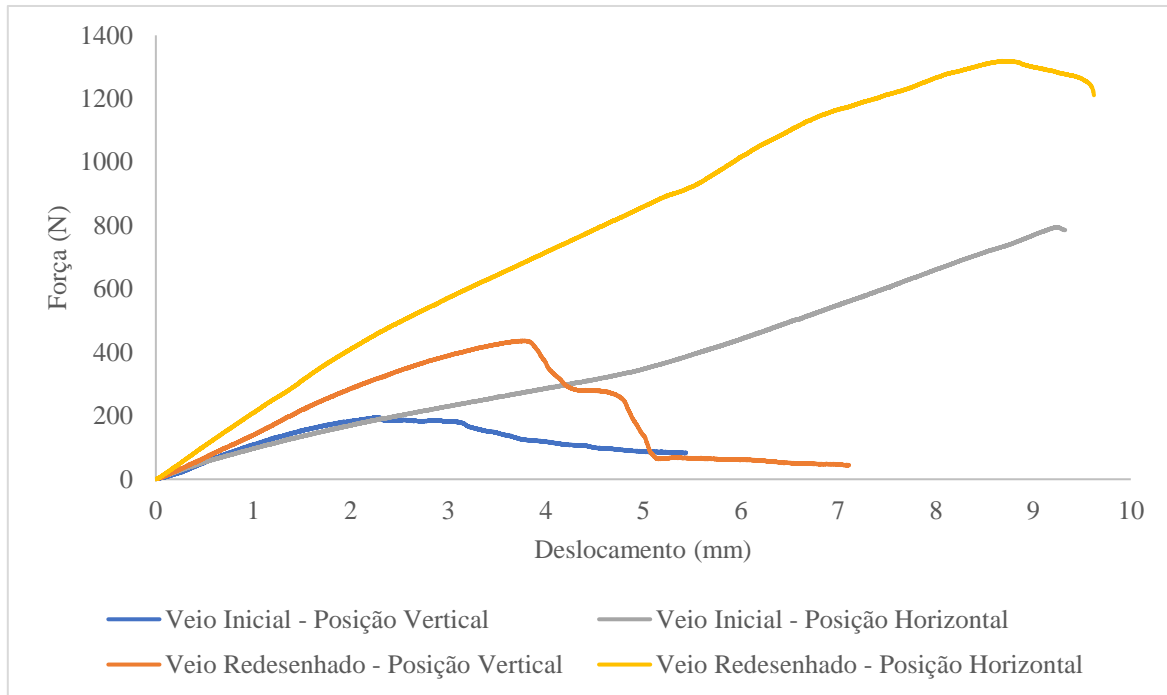


Gráfico 3 – Curvas dos ensaios de flexão para cada tipologia de veio

Na tabela 10 estão listados os valores da média e desvio padrão da força máxima de flexão, bem como do deslocamento na força máxima de flexão.

Tabela 10 – Média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de flexão aos veios

	Inicial - Vertical	Redesenhado - Vertical	Inicial - Horizontal	Redesenhado - Horizontal
Força máxima de flexão (N)	194,1	432,0	790,4	1303,1
Desvio padrão	9,2	10,4	73,8	98,7
Deslocamento na força máxima de flexão (mm)	2,7	3,7	9,5	8,9
Desvio padrão	0,3	0,1	1,1	0,2

Mantendo-se a geometria inicial, modificando-se apenas a orientação de impressão de vertical para horizontal, conseguiu-se um aumento de 596,3 N, conseqüentemente o deslocamento também aumentou 6,8 mm em relação à geometria inicial (orientação vertical). Relativamente aos veios redesenhados verificou-se um aumento de 871,1 N (5,2 mm) através da mudança de orientação de impressão dos corpos.

Mantendo-se a orientação de impressão vertical, alterando-se apenas a geometria, conseguiu-se um aumento de 237,9 N, conseqüentemente o deslocamento também aumentou 1 mm. Enquanto manter-se a orientação de impressão horizontal, modificando-se apenas a geometria resultou num aumento de 512,7 N e numa redução de deslocamento de 0,6 mm.

Através dos resultados dos ensaios de flexão constatou-se que a alteração da orientação de impressão apresentou um impacto mais significativo no desempenho mecânico dos veios do que a alteração da geometria para os corpos ensaiados.

Apesar da impressão 3D do protótipo na orientação vertical (consequentemente os veios encontram-se na orientação horizontal) aumentar a resistência mecânica da garra, também implica um maior gasto de material de suporte durante o seu processo de fabrico, elevando o tempo de impressão 3D. Por este motivo, optou-se por aumentar o desempenho mecânico da garra através da adoção da nova geometria do veio, mantendo-se a orientação horizontal da garra na plataforma de construção, o que implica que o eixo dos veios terá uma orientação vertical.

### 5ª iteração – *Redesign* dos veios na garra e ajustes geométricos

A próxima etapa consistiu em substituir na garra os sete veios cilíndricos pelos veios após o *redesign*. A figura 122 mostra dois dos sete veios com a nova geometria (vista em corte). Adicionou-se uma geometria em cada extremidade das pinças (figura 123) de forma a ser colocado um mordente fabricado em TPU. Numa fase posterior o mordente será projetado de forma a explorar a flexibilidade da geometria e a solução de encaixe no protótipo, ao invés da utilização de ligações aparafusadas ou de ligações permanentes como por exemplo o uso de colas. Os dois mordentes ficarão restringidos segundo os eixos X, Y e Z devido à geometria projetada (figura 123).

A escala de 1,5 aplicada na garra fez com que as extremidades das pinças apresentassem 45 mm de comprimento. Tendo a garra impressa (figura 112) constatou-se que se devia diminuir este comprimento. Posto isto, reduziu-se esta dimensão para 35 mm conforme mostrado na figura 123.

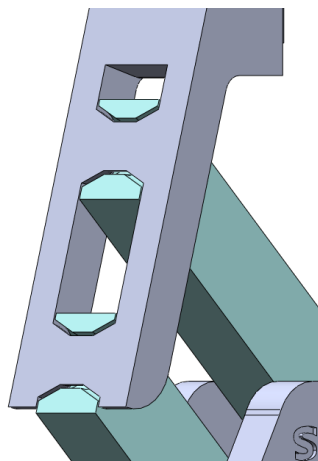


Figura 122 – Dois veios da garra com a nova geometria (Section View SolidWorks 3D)

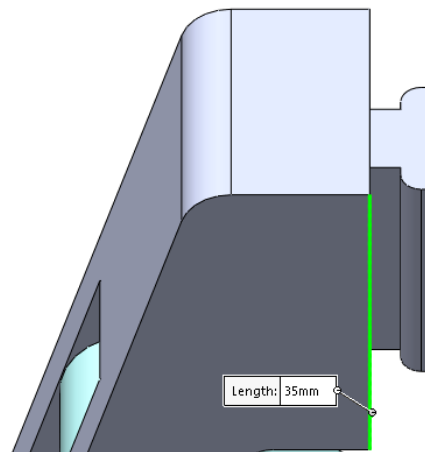


Figura 123 – Extremidade da pinça

Acrescentou-se um corpo em cada pinça de forma a aumentar a resistência mecânica desta parte, fazendo uma ligação interior (figuras 124 e 125).



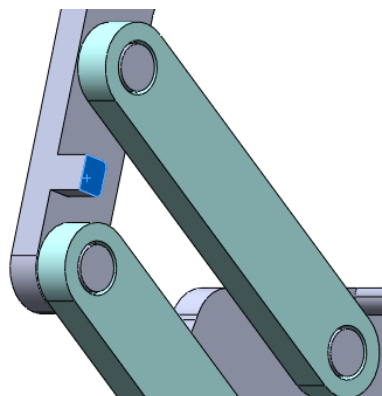


Figura 124 – Corpo adicionado na pinça (vista em corte)

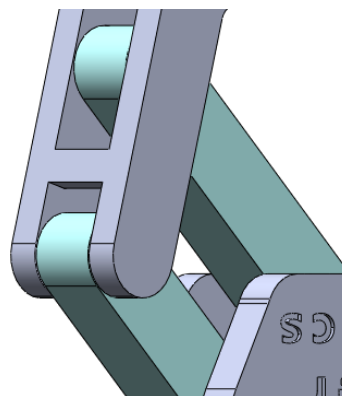


Figura 125 – Corpo adicionado na pinça (vista sem corte)

Como as engrenagens tinham dentes que não eram utilizados durante o funcionamento do mecanismo, procedeu-se à sua remoção. Acrescentou-se material de forma a aumentar geometricamente as ligações estruturais entre a carcaça superior e a carcaça inferior, melhorando o desempenho mecânico da garra (regiões azuis da figura 126).

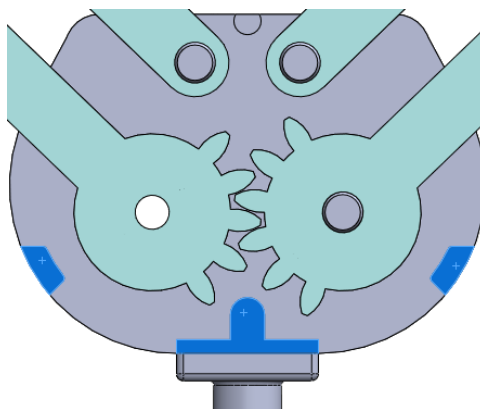


Figura 126 – Redesign das engrenagens e das ligações estruturais

Aplicaram-se raios nas arestas dos dois elementos onde o servomotor é instalado, dando uma maior resistência mecânica na zona que contacta com a face da carcaça superior, sendo que os restantes raios nestes dois corpos foram feitos por razões estéticas. Alterou-se o tipo de letra e aumentou-se o espaço entre cada letra em “Spinner Dynamics” para obter uma maior legibilidade no protótipo impresso.

Procedeu-se à produção da garra com os mesmos parâmetros de impressão 3D da iteração anterior, excetuando a *retraction distance* do PVA que foi ajustada de 2 para 4 mm para evitar a ocorrência do *stringing* notado na figura 112 (4ª iteração). Tendo o protótipo produzido e feito o ensaio manual ao mecanismo, observaram-se roturas totais nos veios cuja função é apenas estrutural (figuras 127 e 128). Relativamente aos sete veios redesenhados, que se situam no interior dos furos das hastes/engrenagem, não foi possível analisá-los visualmente para constatar a ocorrência de roturas, apesar das articulações da garra terem sido testadas manualmente e terem funcionado. A rotura total observada na figura 113 (4ª iteração), e que fez com que uma haste se separasse da pinça, não se verificou.

Nesta iteração constatou-se, após a análise visual, que as roturas ocorreram na direção da deposição das camadas (paralelamente à plataforma de construção) na qual o modelo foi fabricado. Por isso, a impressão 3D da próxima iteração da garra segundo a orientação vertical será inevitável,

porque eleva o desempenho mecânico de todos os veios do protótipo, tal como constatado nos ensaios de flexão realizados e apesar desta orientação resultar num maior gasto de material de suporte para o modelo em questão. Deste modo, a melhoria da resistência mecânica ocorrerá tanto nos sete veios das articulações como nos veios estruturais (figuras 127 e 128).



Figura 127 – Veio estrutural da carcaça com rotura total



Figura 128 – Veio estrutural da pinça com rotura total

### **Aplicação de *design* generativo na garra**

A próxima etapa do presente trabalho correspondeu à aplicação de *design* generativo na garra. Este recurso permite diminuir a massa do protótipo. Foi usado o recurso de *design* generativo do *Fusion 360* da *Autodesk*.

Considerando que as hastes e a extremidade da pinça apresentam uma geometria com potencial para a redução de massa, procedeu-se à aplicação de *design* generativo nestes três elementos.

Numa primeira fase é necessário no *software* definir a função que os corpos vão ter no projeto estrutural. A geometria inicial representa o corpo na qual o programa deve atuar. Os corpos de preservação são as regiões do modelo 3D que não devem sofrer qualquer alteração geométrica. Os corpos de obstáculo são elementos que impedem que seja acrescentado material além das fronteiras definidas pela sua geometria. Numa segunda fase do processo definiram-se as restrições e cargas estruturais necessárias para a simulação como os apoios e a carga a aplicar. Numa terceira fase definiu-se o objetivo do estudo.

A geometria inicial são as hastes e pinça (figura 129). A engrenagem, o elemento cilíndrico da haste na qual passa o veio pelo seu interior, as articulações da pinça, bem como a zona onde será encaixado o mordente devem manter a sua geometria, sendo definidos no programa como os corpos de preservação (figura 130). É de destacar que a geometria inicial e os corpos de preservação ficam sobrepostos no *software*.

Em toda a área envolvente da geometria inicial foram colocados corpos de obstáculo. A figura 131 mostra a inclusão de alguns dos corpos de obstáculo no programa, enquanto na figura 132 observa-se a geometria inicial envolvida por todos os corpos de obstáculo.

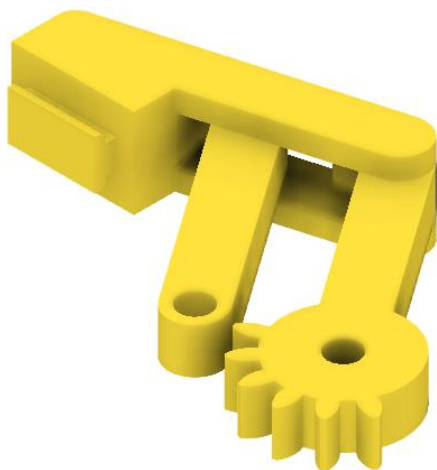


Figura 129 – Geometria inicial

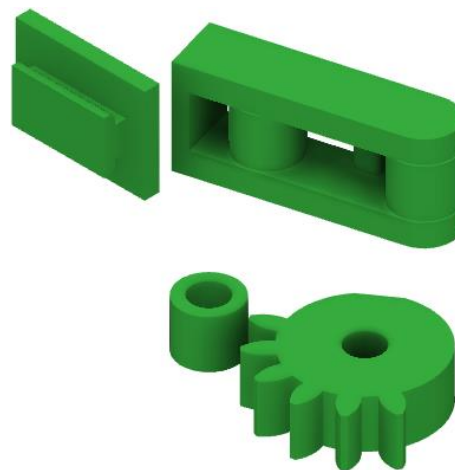


Figura 130 – Corpos de preservação

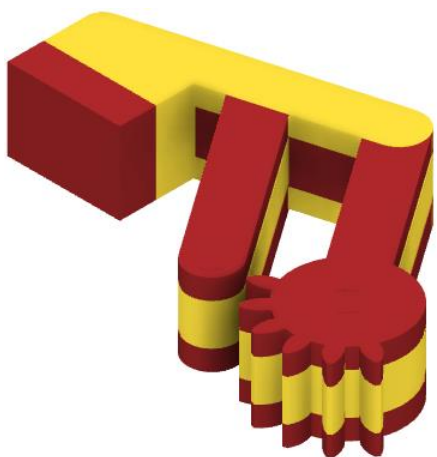


Figura 131 – Alguns dos corpos de obstáculo e a geometria inicial

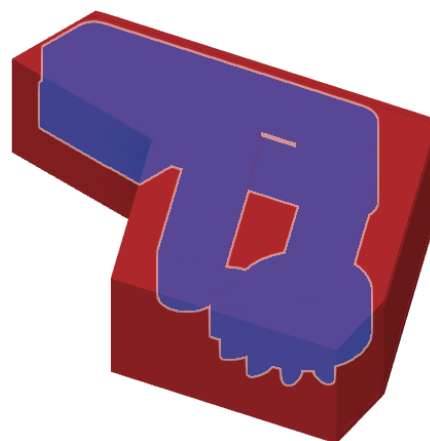


Figura 132 – Geometria inicial com todos os corpos de obstáculo

Definiram-se como apoios fixos o furo da engrenagem e o furo do elemento cilíndrico da haste. Aplicou-se uma força distribuída de 5 N na extremidade da pinça (figura 133). No estudo de *design* generativo configurou-se o material com as propriedades mecânicas do PAHT-CF15. Escolheu-se no *software* o processo de MA, bem como a orientação, uma vez que o modelo será produzido na vertical na plataforma de construção.

O objetivo do estudo correspondeu à minimização da massa do modelo, estabelecendo-se um fator de segurança de 1,25. Com o objetivo de criar geometrias simétricas relativamente ao seu plano médio colocaram-se três planos de simetria. Desta forma as novas geometrias resultantes da simulação, haste com engrenagem, haste e pinça, são simétricas relativamente a esses planos.

É de realçar que, quando a garra estiver implementada no braço robótico, a orientação desta altera-se em função dos movimentos pretendidos. Contudo, definiu-se a orientação da força gravítica conforme mostrada na figura 134 (seta amarela).

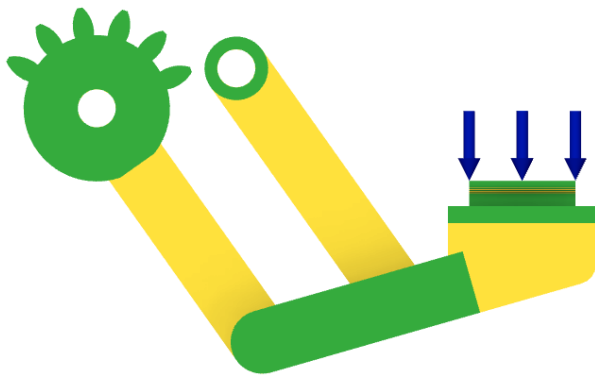


Figura 133 – Força distribuída de 5 N aplicada na pinça

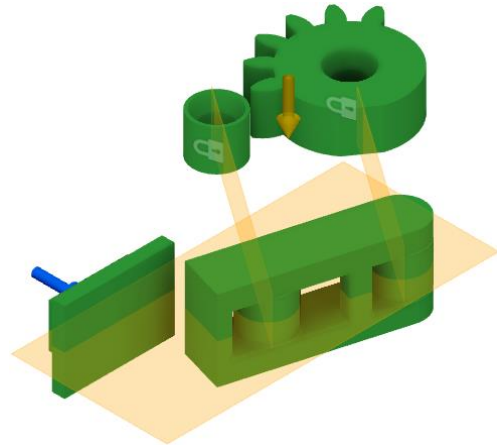


Figura 134 – Três planos de simetria e força gravítica

De seguida seleccionou-se a opção *generate* para dar início ao processo de criação da geometria pelo programa. As figuras 135 e 136 mostram o resultado do estudo.

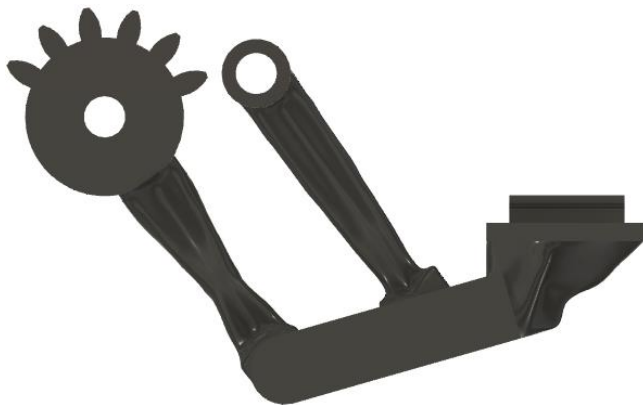


Figura 135 – Resultado do estudo (perspetiva A)

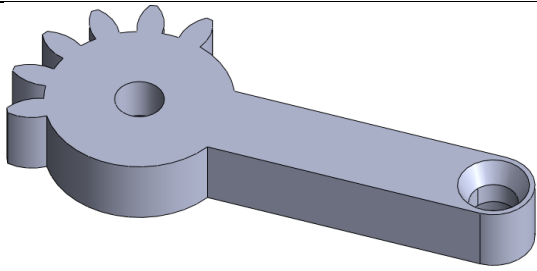
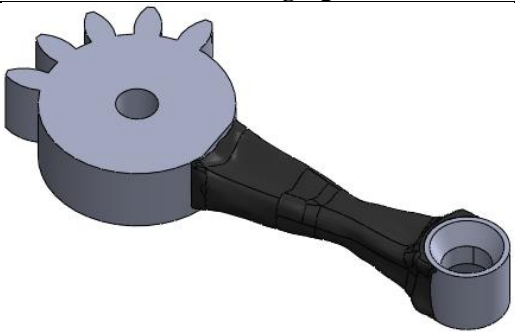
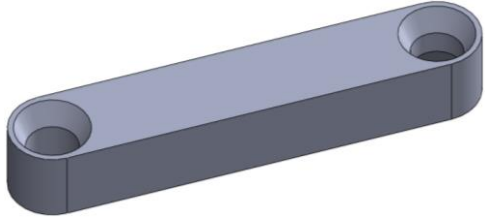
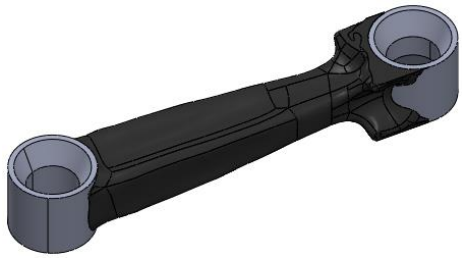
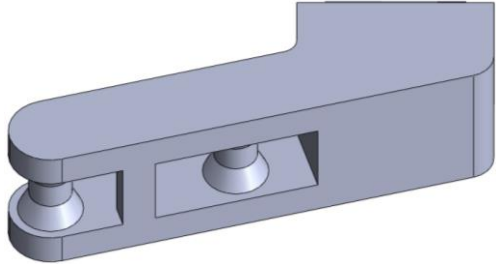
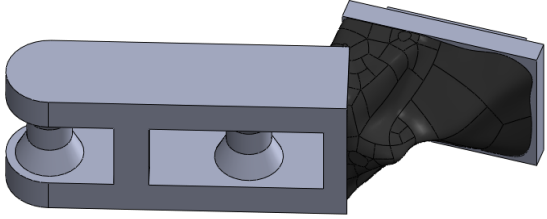


Figura 136 – Resultado do estudo (perspetiva B)

É de notar que, apesar de se ter escolhido o processo de MA, no *software* não é possível definir vários dos parâmetros inerentes ao processo de fabrico em questão. Por exemplo, apesar de se pretender imprimir a peça com um *infill* de 50%, os resultados do estudo foram baseados numa impressão 3D com 100% de *infill* (peça maciça). Posto isto, serão feitos ensaios de flexão para conhecer a carga suportada pelo modelo criado pela ferramenta de *design* generativo, a qual deverá suportar no mínimo uma carga de 5 N. A massa da geometria inicial é 50 g, enquanto a massa do resultado do estudo é 38 g.

Na tabela 11 mostram-se as geometrias iniciais, bem como as geometrias do estudo de *design* generativo.

Tabela 11 – Geometrias iniciais e geometrias do estudo de *design* generativo

Haste com engrenagem, haste e pinça	
Geometria inicial	Estudo de <i>design</i> generativo
	
	
	

**Impressão 3D da geometria inicial, do resultado do estudo de *design* generativo e ensaios de flexão**

Além de se pretender conhecer a carga suportada pela peça feita no estudo, também se pretende comparar este valor com a carga suportada pela geometria inicial. Imprimiram-se cinco corpos iguais para cada geometria (figuras 137 e 138). As peças foram impressas segundo a orientação vertical (com os veios na horizontal), sendo necessário utilizar o PVA como material de suporte.



Figura 137 – Geometria inicial impressa





Figura 138 – Resultado do estudo de *design* generativo impresso

Quando a garra segura um determinado objeto, tal equivale à aplicação de uma força na extremidade de cada pinça (figura 133), estando sujeitas à solicitação mecânica de flexão. Devido a este tipo de solicitação foram realizados ensaios de flexão de forma a analisar e comparar o desempenho mecânico da geometria inicial e do resultado do estudo de *design* generativo.

Para serem realizados os ensaios mencionados no equipamento, foi necessário elaborar uma estrutura adicional para posicionar e fixar as peças alvo de ensaio mecânico. Essa estrutura foi aparafusada ao equipamento. Modelou-se uma peça que teve como base a carcaça superior da garra para ser maquinada (figura 139). Esse elemento foi fabricado no equipamento Deckel Maho Dmu 50, sendo feito de alumínio.

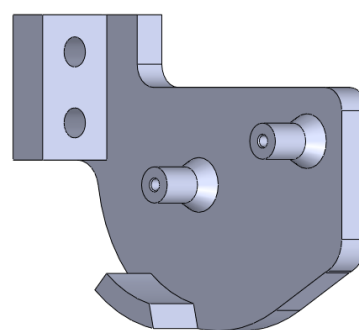


Figura 139 – Peça modelada para a maquinagem

Elaborou-se uma estrutura que é constituída por duas barras de aço perpendiculares com ligações aparafusadas. A peça mostrada na figura 139 foi colocada nessa estrutura, sendo feitas as respectivas ligações aparafusadas. A figura 140 mostra o sistema de fixação na máquina com uma das peças do resultado do estudo de *design* generativo para o ensaio (vista de frente). Na figura 141 observa-se a geometria inicial colocada na estrutura para o ensaio (vista de trás).

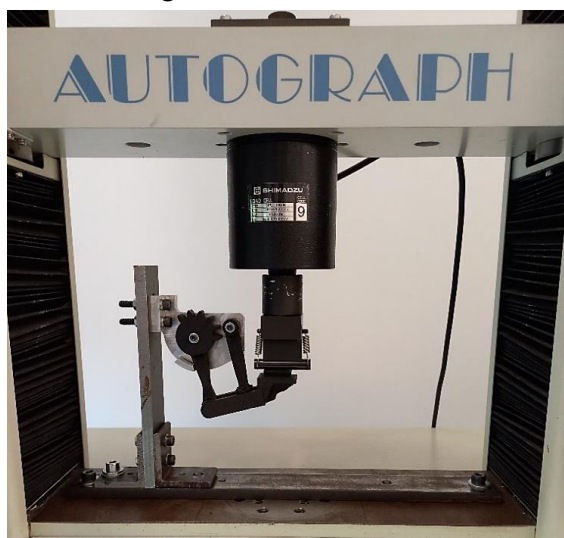


Figura 140 – Ensaio da peça do resultado do estudo (vista de frente)

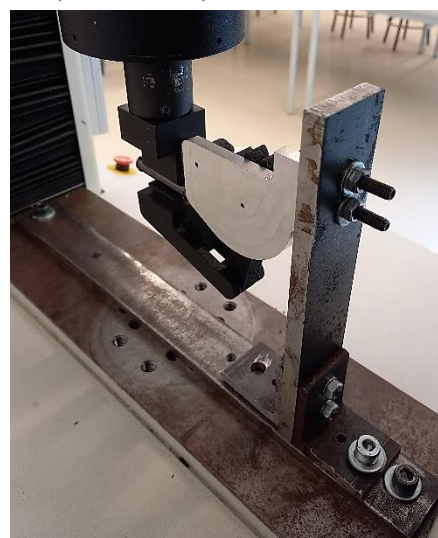


Figura 141 – Ensaio da geometria inicial (vista de trás)



Fazendo a comparação entre os dois tipos de corpos ensaiados, verificou-se que a geometria inicial suportou uma maior força à flexão, considerando que apresenta uma maior quantidade de material. Ambas as geometrias suportaram mais de 5 N, que é o valor mínimo que devem aguentar.

As figuras 142 e 143 mostram os ensaios de flexão realizados em cada geometria, notando-se uma rotura total na região cilíndrica da haste. Em ambas as geometrias a rotura ocorreu na mesma zona, no sentido da deposição das camadas de impressão na plataforma de construção (figura 144). No gráfico 4 observa-se as curvas dos ensaios de flexão para cada conjunto de hastes e pinça.

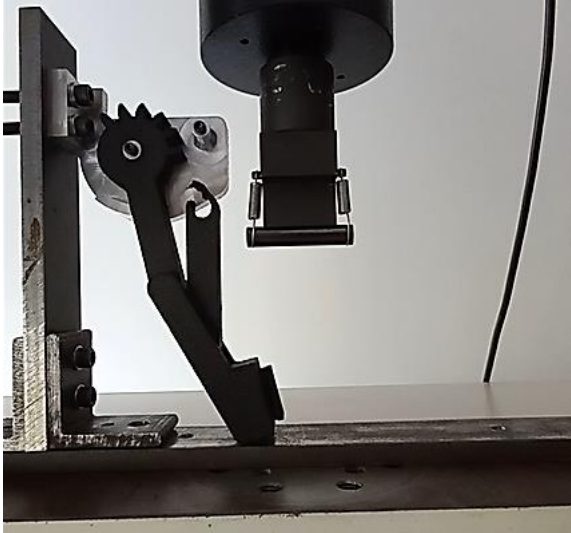


Figura 142 – Ensaio da geometria inicial

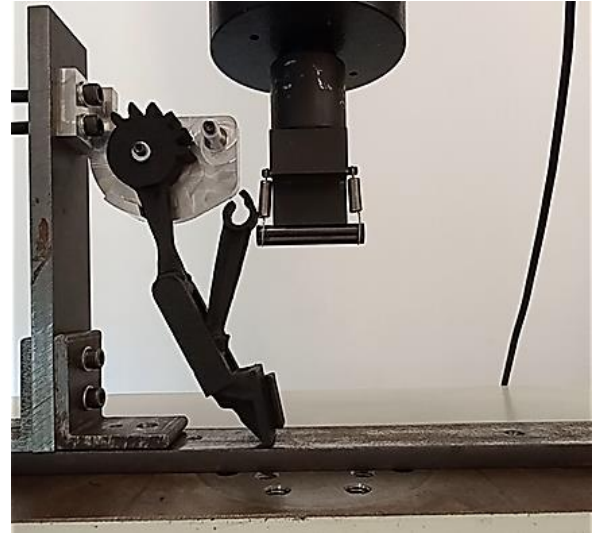


Figura 143 – Ensaio do resultado do estudo de *design generativo*



Figura 144 – Rotura total na região circular

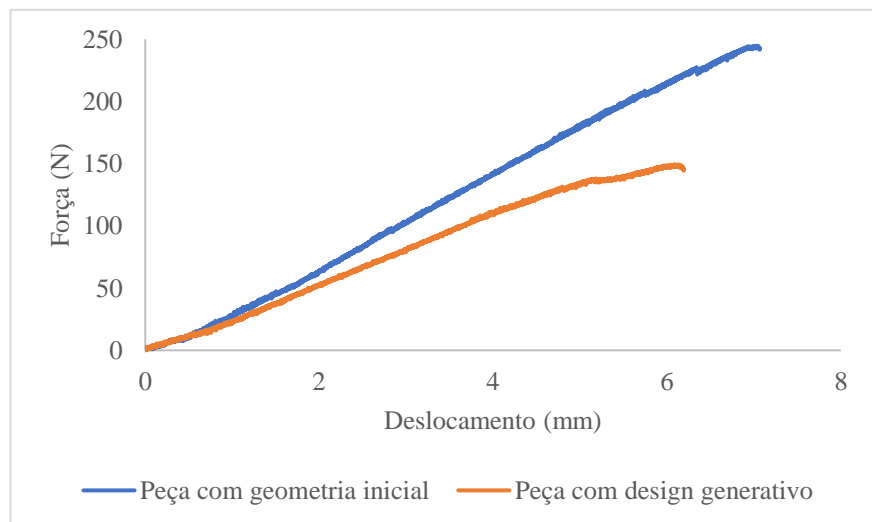


Gráfico 4 – Curvas dos ensaios de flexão para cada geometria de hastes e pinça

Na tabela 12 encontram-se listados os valores da média e desvio padrão da força máxima de flexão, deslocamento na força máxima de flexão e deslocamento para a força de 5 N, que é o valor mínimo que o conjunto deve suportar.

Tabela 12 – Média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de flexão ao conjunto das hastes e pinça

	Peça com geometria inicial	Peça com <i>design</i> generativo
Força máxima de flexão (N)	253,1	162,1
Desvio padrão	21,8	24,9
Deslocamento na força máxima de flexão (mm)	8,4	7,3
Desvio padrão	1,5	1,8
Deslocamento na força à flexão de 5 N (mm)	0,2	0,2
Desvio padrão	0,1	0,1

A peça com o *design* generativo suportou 162,1 N, enquanto a peça com a geometria inicial (253,1 N) suportou mais 91 N. Relativamente ao deslocamento na força máxima de flexão verificou-se uma proximidade nos valores, sendo 7,3 e 8,4 mm (diferença de 1,1 mm). Analisando o deslocamento na força máxima à flexão de 5 N, verificou-se uma igualdade nos valores (0,2 mm), permitindo concluir que, para a força de 5 N, a mudança da geometria não teve influência no desempenho à flexão do conjunto, sendo que a peça com o *design* generativo implica um menor gasto de material.

A tabela 13 mostra o rácio da força máxima de flexão pela massa correspondente.

Tabela 13 – Rácio da força máxima de flexão pela massa

	Força máxima de flexão (N)	Massa (g)	N/g
Peça com geometria inicial	253,1	50	5,1
Peça com <i>design</i> generativo	162,1	38	4,3

As duas peças suportaram o valor alvo definido no projeto de 5 N. Estabelecendo uma relação entre a força máxima com a massa das peças, verificou-se que têm um comportamento similar. Por estes motivos e tendo em consideração que tem menos peso, que se gasta menos material e que é possível de concretizar por MA, optou-se por seleccionar a peça do estudo de *design* generativo.

### 6ª iteração – Aplicação do resultado do estudo no protótipo final

Na garra substituiu-se a geometria inicial pelo resultado do estudo de *design* generativo. Por fim, aplicaram-se raios (ilustrados a azul na figura 145) nalgumas arestas do modelo, que se optou por não colocar na geometria (CAD) inicial para simplificar a simulação estrutural. A figura 146 mostra o protótipo parametrizado para a impressão 3D.

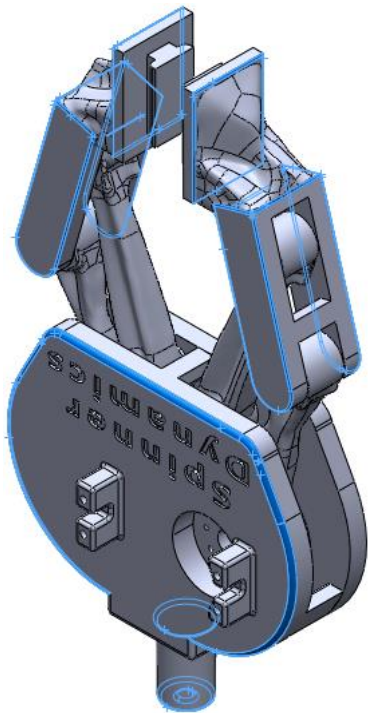


Figura 145 – Modelo (CAD) do protótipo final

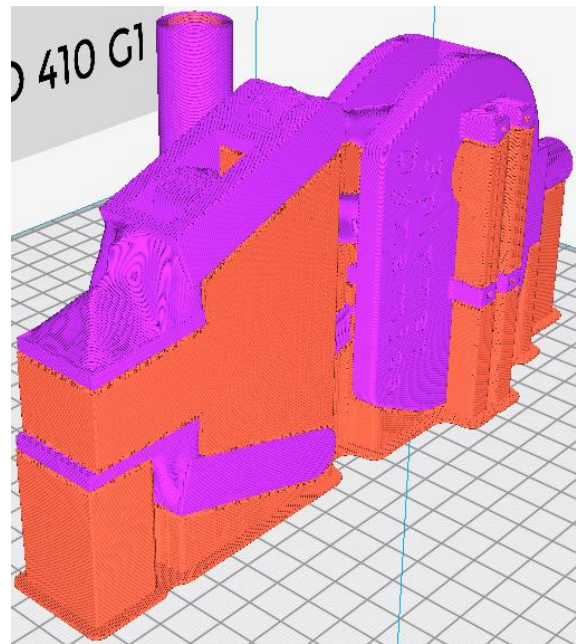


Figura 146 – Parametrização da impressão 3D do protótipo final

A cor mais escura na figura 146 representa o corpo da garra impresso com o PAHT-CF15, enquanto a cor mais clara representa o material de suporte PVA. A impressão 3D do modelo ocorreu segundo a orientação vertical, com o eixo dos veios paralelo à plataforma de construção.

### Projeto e impressão 3D dos mordentes para as pinças

Modelou-se o mordente conforme mostrado na figura 147 para cada pinça. Aplicaram-se raios em quatro arestas na face de encaixe de forma a facilitar a colocação do corpo na garra, aproveitando a sua flexibilidade.

Antes de avançar para a MA dos corpos, foi necessário imprimir um cubo para confirmar se os parâmetros de impressão 3D usados produziam peças com qualidade adequada e com precisão dimensional, tendo em consideração que, dada a flexibilidade do material em questão, há uma maior propensão para a ocorrência de problemas de deposição durante a impressão 3D. Além disso, foi necessário encontrar o valor para o parâmetro *flow* que assegurasse a deposição de material na quantidade adequada.

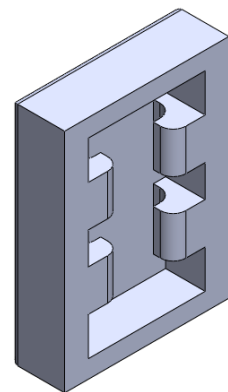


Figura 147 – Mordente

Para o primeiro cubo (com 20 mm de aresta) definiu-se um *flow* de 86% (valor anterior de referência), tendo presente que este valor poderia ser alterado em função do resultado da impressão 3D. Tal como mostrado na figura 148, ocorreu sub-extrusão no cubo, notando-se espaços entre as paredes verticais. De seguida aumentou-se o *flow* para 95% e fabricou-se um novo cubo. Conforme observado na figura 149 não ocorreu sub-extrusão. Da primeira para a segunda impressão 3D também se diminuiu a *retraction distance* de 3 para 1 mm.

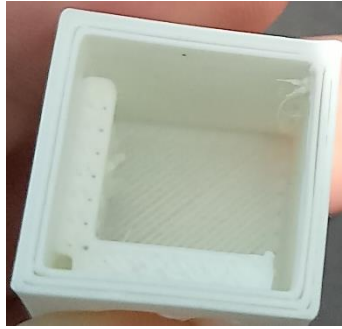


Figura 148 – Cubo impresso com 86% de *flow*



Figura 149 – Cubo impresso com 95% de *flow*

De forma a melhorar a aderência dos mordentes quando contactam com os objetos, reduziu-se para 0 o número de camadas de base na face de encosto. Tendo em conta que se removeu no *software* de impressão 3D as 3 camadas de base, nota-se na face do mordente o tipo de *infill* escolhido. Como a percentagem de *infill* definida foi de 30%, existem os espaços vazios mostrados na figura 150, elevando a flexibilidade nesta zona. Na figura 151 observa-se a região de encaixe da peça impressa.

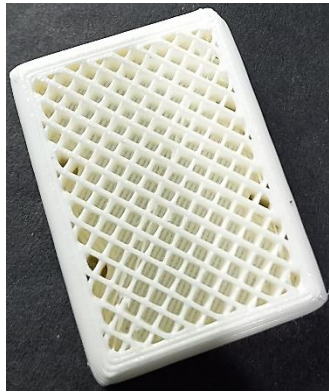


Figura 150 – Face do mordente impresso que contacta com os objetos



Figura 151 – Região de encaixe na pinça

Os mordentes conseguiram-se encaixar na garra com facilidade. No sentido de elevar a flexibilidade da face que contacta com os objetos, diminuiu-se a percentagem de *infill* de 30 para 20% e fez-se uma nova impressão 3D. Esta alteração provocou o aumento dos espaços vazios da face, aumentando a sua flexibilidade quando testada manualmente (figura 152).

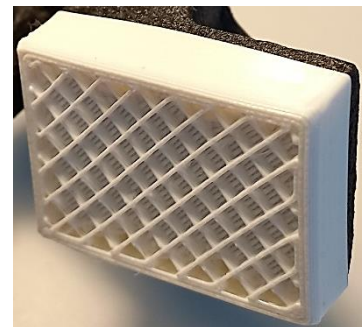


Figura 152 – Mordente da pinça com 20% de *infill*



### Montagem da garra

A fase seguinte consistiu na montagem dos elementos da garra consoante o seu CAD mostrado na figura 153. Depois da MA do protótipo, bem dos mordentes, procedeu-se ao encaixe dos mesmos (figura 154). De seguida colocou-se a peça circular junto à face superior da engrenagem esquerda, apertando-a com quatro parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,9 x 13 mm (figura 155).

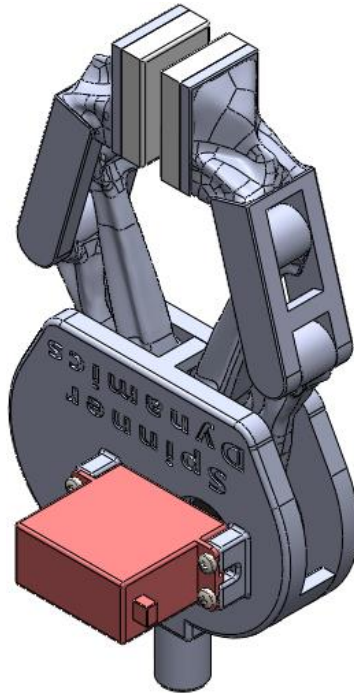


Figura 153 – Montagem (CAD) da garra



Figura 154 – Garra com os mordentes encaixados



Figura 155 – Colocação da peça circular e dos quatro parafusos

Depois encaixou-se a extremidade do servomotor, que apresenta uma região dentada, no orifício da peça circular que também tem uma zona dentada. O servomotor foi apertado nos topos da carcaça superior com quatro parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,2 x 9,5 mm (figura 156). Por fim, foi colocado, através do furo existente na carcaça inferior, o parafuso de cabeça sextavada interior DIN 912 M3 x 8 mm que aperta a peça circular à extremidade do servomotor (figura 157).

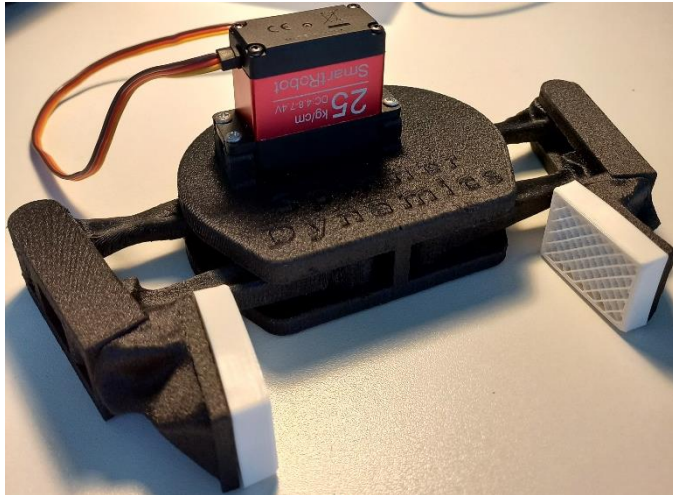


Figura 156 – Colocação do servomotor e dos quatro parafusos



Figura 157 – Colocação do parafuso que liga a peça circular ao servomotor

### Teste de funcionalidade à garra com o braço robótico

Tendo a garra produzida, procedeu-se à realização de tarefas de *pick and place* com o intuito de visualizar em contexto de uso real o funcionamento do protótipo (figuras 158 e 159). Verificou-se que a garra foi capaz de manipular objetos com faces planas ou circular de forma eficiente, sendo que, ao longo do movimento de abertura/fecho, as pinças encontraram-se constantemente paralelas conforme o pretendido, garantindo à garra a qualidade funcional (desenho de conjunto, subconjunto e peças da garra no Anexo I).



Figura 158 – *Pick and place* de um objeto com faces planas





Figura 159 – *Pick and place* de um objeto circular

Na figura 160 observam-se as linhas de código escritas para a realização da tarefa de *pick and place* do elemento circular. É de realçar que, dependendo do tamanho do objeto a agarrar, é possível abrir ou fechar a garra consoante a dimensão pretendida através do *software*.

```
1 m3 s270
2 g0 y-5.5 z5.5
3 g0 a40
4 g0 d15
5 g0 b5 c5
6 m3 s25
7 g0 d15
8 g0 y0 z0
9 g0 y15 z15
10 g0 a-80
11 g0 y0 z0
12 g0 d20
13 g0 y-4 z4
14 g0 s270
15 g0 y0 z0
16 a0 b0 c0 d0 x0
```

Figura 160 – Linhas de código escritas para o manuseamento do elemento circular

### 3.4.2 Controlo dimensional e geométrico

Selecionou-se uma peça da garra para a realização do controlo dimensional e geométrico. A parte escolhida corresponde à haste com engrenagem para determinar os desvios dimensionais na região dentada, furos, bem como noutras zonas de interesse. Posto isto, procedeu-se à MA de apenas esta parte do protótipo com os mesmos parâmetros, material e equipamento de impressão 3D na qual a garra foi produzida. Atendendo que a peça foi fabricada com o material PAHT-CF15 que é preto, foi necessário aplicar o produto Magnaflux Spotcheck SKD-S2 em toda a superfície da haste com engrenagem de forma a esta aparentar ser de tonalidade clara para ser possível digitalizá-la.

Tendo a peça da garra digitalizada, obteve-se um gráfico de cores, onde se marcou alguns pontos de prova. Através do gráfico de cores da figura 161 verificaram-se as regiões da peça que apresentaram um excesso ou um défice de material na impressão 3D. Na maior parte da peça ocorreram desvios na ordem das centésimas de milímetro, sendo que todos os desvios se encontraram abaixo de 1 mm. Os desvios dimensionais mostrados a vermelho correspondem aos desvios máximos positivos, enquanto o azul ilustra os desvios máximos negativos.

O desvio dimensional máximo positivo foi de 0,8 mm. O desvio dimensional máximo negativo também foi de 0,8 mm. Na zona do furo do elemento cilíndrico da haste ocorreu um excesso de material (0,7 mm), contudo na zona circular oposta ocorreu um défice de material (0,5 mm), fazendo com que não comprometa o mecanismo da garra, atendendo que se projetou com uma folga de 0,6 mm ao longo de todo o perímetro do veio que passa no interior do furo. A região onde ocorreu o desvio dimensional máximo positivo não afeta funcionalmente o protótipo.

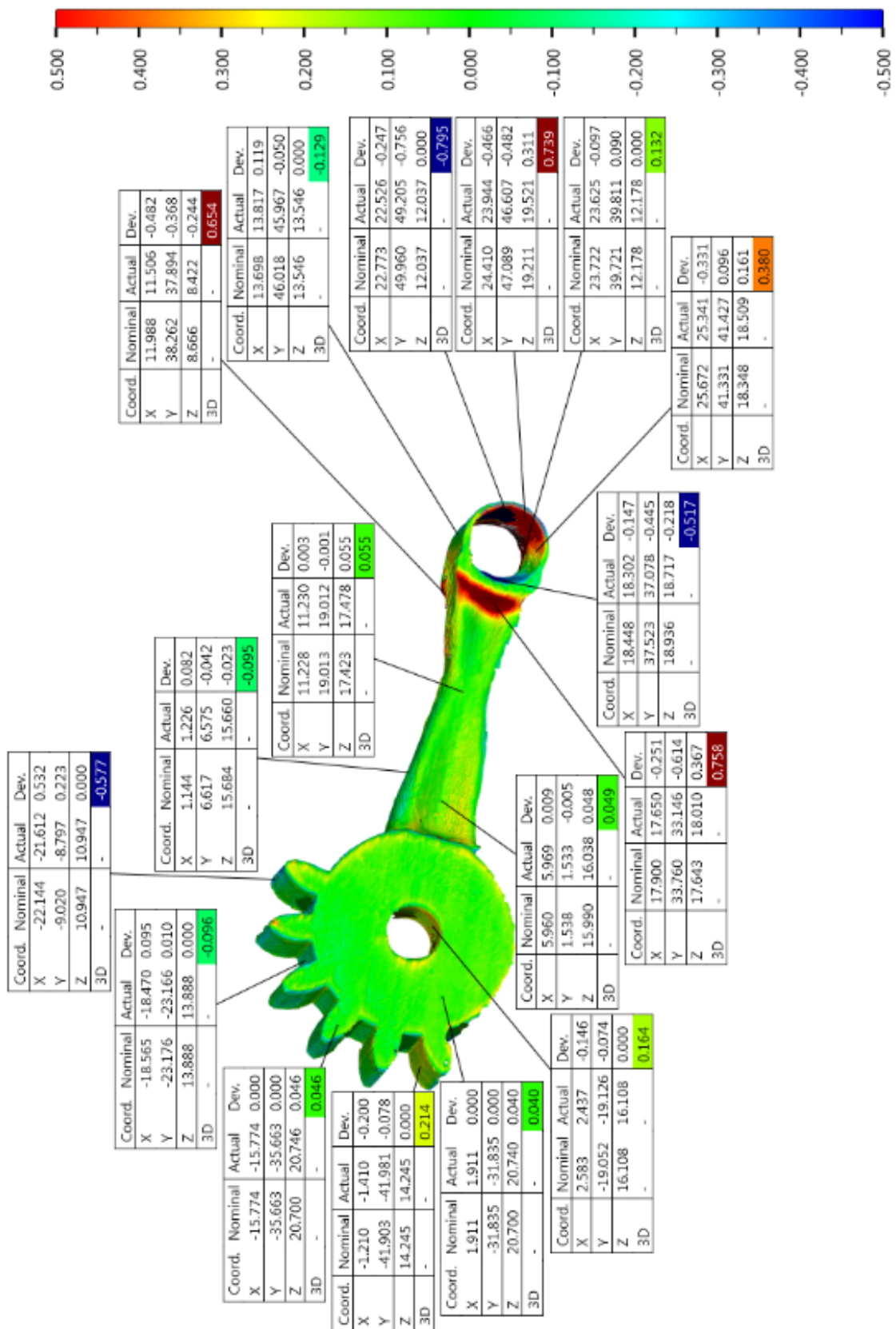


Figura 161 – Controlo dimensional e geométrico da haste com engrenagem

### 3.4.3 Massa e custo do protótipo

Na tabela 14 estão listados os vários elementos que constituem a garra com a massa correspondente para cada um, sendo possível obter o valor da massa do protótipo que é 236 g, estando dentro do valor alvo estipulado no início do trabalho.

Tabela 14 – Massa do protótipo

Materiais e componentes	Massa (g)
Corpo de PAHT-CF15	156
Corpo de TPU (x2)	8
Servomotor 25 kg/cm	68
Peça circular do servomotor	1
Parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,2 x 9,5 mm	3
Parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,9 x 13 mm	
Parafuso de cabeça sextavada interior DIN 912 M3 x 8 mm	
Total	236

Na tabela 15 é efetuado o cálculo do custo da garra que é de cerca de 61 euros. É de destacar que para o cálculo da massa da garra não foi considerada a massa da *prime tower*, sendo que esta contém 17 g de PAHT-CF15, bem como a massa do material de suporte (PVA), pois estes foram removidos após a MA. Enquanto para o cálculo dos custos já se teve em consideração esses gastos de material.

Tabela 15 – Custo do protótipo

Componentes, materiais e consumo energético	Referência	Observações	Quantidade	Custo (€)
Servomotor 25 kg/cm	DIY More (ZH52149)	26,01 €/unid.	1	26,01
Peça circular do servomotor				
Parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,2 x 9,5 mm	FADIX (10921119)	2,18 €/35 unid.	4	0,25
Parafusos autorroscantes DIN 7981 ST 2,9 x 13 mm				
Parafuso de cabeça sextavada interior DIN 912 M3 x 8 mm	RepRap	0,20 €/unid.	1	0,2
PAHT-CF15	Ultrafuse® (BASF) PAHT-CF15 Black	91,99 €/750 g	173 g	21,22
PVA	SMARTFIL (Smart Materials 3D) PVA Natural	37,03 €/750 g	92 g	4,54
TPU	Ultrafuse® (BASF) TPU 95A White	53,49 €/750 g	8 g	0,57
Intamsys Pro 410 (3000 W)		18 h 15 min.		8,57*
Creality Ender-3 S1 Pro (350 W)		01 h 02 min.		0,06*
				*0,1566 €/kWh
				61,42
				Total

## 4 Conclusões e trabalhos futuros

A manufatura aditiva é atualmente uma solução cada vez mais credível para as indústrias produzirem os seus produtos de uma forma rápida, com menores custos e com uma liberdade geométrica relevante, quando comparada com os processos convencionais.

Com o crescimento do campo da robótica, com robôs a trabalhar intensivamente num sistema de produção, existe a necessidade de produzir peças de substituição a custos e tempo de fabrico reduzidos. Neste âmbito, a MA configura-se como uma opção vantajosa face a outras tecnologias de fabrico, pelo que as empresas têm vindo a investir nesta área procurando rentabilizar a sua utilização com o pressuposto de maximização do seu desempenho funcional e financeiro.

A Spinner Dynamics é uma empresa que aposta nas tecnologias de MA para o desenvolvimento de novos produtos. Neste âmbito, produziu com a tecnologia de FFF um braço robótico de *open source*, que serviu de referência para o desenvolvimento deste estágio. Numa primeira fase procedeu-se a um estudo de diagnóstico do funcionamento desse braço, tendo-se verificado que os problemas ocorriam nas suas articulações. Os principais problemas identificados eram de origem mecânica, nomeadamente peças com deformações ou roturas, ou derivadas do processo construtivo, como o acabamento das peças, os quais condicionavam os movimentos do robô.

Neste trabalho foram implementadas ações de melhoria, que envolveram o redesenho de peças e de soluções de fixação, bem como a seleção de um material de construção com um desempenho mecânico mais apropriado para a aplicação. As alterações realizadas promoveram melhorias nos movimentos de todas as articulações.

Na segunda parte do trabalho experimental fez-se o desenvolvimento de uma garra para o braço robótico fabricada por MA. A garra produzida foi de duas pinças paralelas atuada por um servomotor. O processo de desenvolvimento envolveu várias iterações para ajustar geometricamente a garra e os parâmetros de fabrico. Foi preciso também ajustar as dimensões das folgas da garra para a obtenção de um protótipo funcional. A MA, neste contexto específico da robótica, possibilitou o desenvolvimento de uma garra com um número mais reduzido de peças face a processos de fabrico convencionais, assim como uma diminuição do seu tempo de montagem.

Numa perspetiva de desempenho mecânico, as soluções encontradas para alguns elementos geométricos da garra, assim como opções relativas à orientação das peças no processo de fabrico permitiram melhorar a resistência à flexão. Especificamente, o desenho de geometrias de natureza cilíndrica variável para os veios da garra e a fabricação desses veios com o eixo numa posição horizontal paralela à plataforma de construção.

A utilização do método de *design* generativo no processo de desenvolvimento de produto e no contexto da MA permitiu gerar uma peça com um desempenho mecânico adequado à utilização, com vantagens ao nível da redução de peso, tempo de fabrico e custos finais de produção.

Os testes de funcionalidade realizados com o braço robótico melhorado e com a garra desenvolvida neste trabalho decorreram com sucesso, evidenciando assim a viabilidade da produção de peças por MA e da aplicação do método de *design* generativo no contexto da robótica.

Este trabalho permitiu melhorar mecanicamente o braço robótico que a Spinner Dynamics tem para efeitos de demonstração, bem como produzir uma garra funcional para o mesmo.



## Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros no contexto do processo de melhoria do robô Thor sugerem-se os seguintes desenvolvimentos:

- *Redesign* da quarta articulação de forma a melhorar a solução construtiva de montagem do rolamento;
- Sensorização da garra, com o objetivo de realizar a detecção automática de objetos e, consequentemente, desencadear o seu manuseamento;
- Realização de ensaios de tração em geometrias da garra para conhecer a influência das alterações geométricas e da orientação de impressão no seu desempenho mecânico;
- Estudo de outras tecnologias de MA e outros materiais com o objetivo de diminuir o custo de produção e reduzir o atrito entre componentes das articulações.

# Referências bibliográficas

- 3D Lab. (2019, October 8). *Raft 3D, brim ou skirt*. <https://3dlab.com.br/diferencas-entre-raft-3d-brim-e-skirt/>
- Aidan. (2017, May 8). *Print-in-place robotic gripper*. Instructables. <https://www.instructables.com/Print-in-Place-Robotic-Gripper/>
- Akme. (2023). *Soluções em automação*. <https://akmenet.com.br/produto/garra-angular/>
- AMFG. (2020, August 31). *3D printing for robotic grippers*. <https://amfg.ai/2020/08/31/application-spotlight-3d-printing-for-robotic-grippers/#>
- Angel. (2023). *An open source 3D printable 6 DOF robotic arm*. <http://thor.angel-lm.com/>
- Arduino. (2021). *Arduino mega 2560 rev3*. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Autodesk. (2023a). *What is 3D printing?* <https://www.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- Autodesk. (2023b). *What is generative design?* <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>
- B2E Automation. (2022, December 2). *15 robot end effector types and selection criteria*. <https://www.b2eautomation.com/insights/15-robot-end-effector-types-and-selection-criteria>
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robótica* (2nd ed.). WordPress. <https://eltrasteroloco.wordpress.com/>
- BCN3D. (2016, July 28). *BCN3D Moveo: A fully open source 3D printed robot arm*. <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning-robotic-arm/>
- Ben-Ari, M., & Mondada, F. (2018). *Elements of robotics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1>
- BrainKart. (2023). *Grippers*. [https://www.brainkart.com/article/Grippers\\_5135/](https://www.brainkart.com/article/Grippers_5135/)
- Buggs, C. (2023). *Arduino IDE*. Softonic. <https://arduino-ide.en.softonic.com/>
- Carew, R. M., & Errickson, D. (2020). An overview of 3D printing in forensic science: The tangible third-dimension. *Forensic Sciences*, 65(5), 1752–1760. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14442>
- Carolo, L. (2023, February 11). *What is 3D printing?* All3DP. <https://all3dp.com/2/what-is-3d-printing/>
- Castelão, A. (2018). *Estudo do acabamento superficial e dos desvios dimensionais em provetes produzidos por manufatura aditiva* [Master's thesis, Universidade Nova de Lisboa]. <https://run.unl.pt/handle/10362/61282>
- Ceccarelli, M. (2003, January). Low-cost robots for research and teaching activities. *IEEE Robotics & Automation*. [https://www.researchgate.net/publication/250748129\\_Low-Cost\\_Robots\\_for\\_Research\\_and\\_Teaching\\_Activities](https://www.researchgate.net/publication/250748129_Low-Cost_Robots_for_Research_and_Teaching_Activities)
- Cook, E. (2020, September 2). *The 7 categories of additive manufacturing*. Manufacturing Digital. <https://manufacturingdigital.com/smart-manufacturing/7-categories-additive-manufacturing>
- Costa, J., Machado, T., & Carneiro, M. (2020). Implementation and validation of thor 3D printed open source robotic arm. *ResearchGate*, 18(5), 907–913. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082919>
- Davidson, J. R., & Mo, C. (2015). Mechanical design and initial performance testing of an apple-picking end-effector. *ASME - International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, 4A-2015. [https://www.researchgate.net/publication/288840441\\_Mechanical\\_Design\\_and\\_Initial\\_Performance\\_Testing\\_of\\_an\\_Apple-Picking\\_End-Effector](https://www.researchgate.net/publication/288840441_Mechanical_Design_and_Initial_Performance_Testing_of_an_Apple-Picking_End-Effector)

- Davies, S. (2022, May 25). *Saint-Gobain Sekurit business saves estimated €170k with 3D printed tooling*. Tct. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/polymer-additive-manufacturing-news/saint-gobain-sekurit-business-saves-estimated-170k-with-3d/>
- Dejan. (2023). *How to setup GRBL and control CNC machine with arduino?* How To Mechatronics. [https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/?utm\\_content=cmp-true](https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/?utm_content=cmp-true)
- Deneve, D., & Hart, K. (2023, October 15). *Dual extruder (3D printing)*. [https://all3dp.com/2/dual-extruder-extrusion-3d-printer-simply-explained/#google\\_vignette](https://all3dp.com/2/dual-extruder-extrusion-3d-printer-simply-explained/#google_vignette)
- EOS. (2023). *3D printing of robotics parts*. [https://www.eos.info/en/innovations/all-3d-printing-applications/production-and-industry/automation-robotics-gripping-systems#video\\_70520](https://www.eos.info/en/innovations/all-3d-printing-applications/production-and-industry/automation-robotics-gripping-systems#video_70520)
- Festo. (2023a). *Garra de três pinças DHDS*. [https://www.festo.com/pt/pt/p/garra-de-tres-pontos-id\\_DHDS/?page=0&q=~%3AfestoSortOrderScored](https://www.festo.com/pt/pt/p/garra-de-tres-pontos-id_DHDS/?page=0&q=~%3AfestoSortOrderScored)
- Festo. (2023b). *Garra paralela DHPS*. [https://www.festo.com/pt/pt/p/garra-paralela-id\\_DHPS/?page=0](https://www.festo.com/pt/pt/p/garra-paralela-id_DHPS/?page=0)
- Formlabs. (2023). *3D printing technology comparison: FDM vs SLA vs SLS*. <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- Fuentes, L. (2023, January 15). *Universal G-code Sender: The basics simply explained*. All3DP. <https://all3dp.com/2/universal-gcode-sender/>
- Fuster, A. (2015). *Gripper design and development for a modular robot* [Bachelor's thesis, Technical University of Denmark]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Gripper-design-and-development-for-a-modular-robot-Fuster-Maria/74022984ee43eef8d2af3a6c0b76171d00755230>
- Ghizoni, H. (2018). *Desenvolvimento de manipulador robótico didático open source fabricado por manufatura aditiva* [Bachelor's thesis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina]. <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/330?show=full>
- Goldschmidt, B. (2023, April 29). *Cura guide to the best infill patterns*. All3DP. <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- Gouveia, R. B., & Advisor, M. (2017). *Flexible robot grasping tools controlled by EMG signals* [Master's thesis, Universidade de Coimbra]. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/83235?mode=simple>
- Grames, E., & Gharge, P. (2022, March 11). *The best DIY and 3D printed robot arms of 2022*. All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printed-robot-arm-diy-robotic/>
- GripShape. (2023). *Introduction to robot grippers*. <https://www.gripshape.com/introduction-to-robot-grippers/>
- Guelker, M. (2011, September 1). *The difference between robotic grippers with parallel, three-finger, and angled designs*. Machine Design. <https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/21833348/the-difference-between-robotic-grippers-with-parallel-threefinger-and-angled-designs>
- Hugo, P. (2013). *Industrial grippers: State-of-the-art and main design characteristics*. In G. Carbone (Ed.), *Mechanisms and machine science* (Vol. 10, pp. 107–131). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4664-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4664-3_5)
- Hüner, B., Klstl, M., Uysal, S., Uzgören, İ. N., Özdoğan, E., Süzen, Y. O., Demir, N., & Kaya, M. F. (2022). *An overview of various additive manufacturing technologies and materials for electrochemical energy conversion applications*. *ACS Omega*, 7(45), 40638–40658. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05096>
- Igus. (2023). *Solving Carecos Kosmetik's problems with 3D-printed grippers*. <https://www.igus.com/info/grippers-for-carecos-kosmetik>
- Intel. (2020, March). *Industrial robotic arm overview*. <https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/robotic-arm.html>

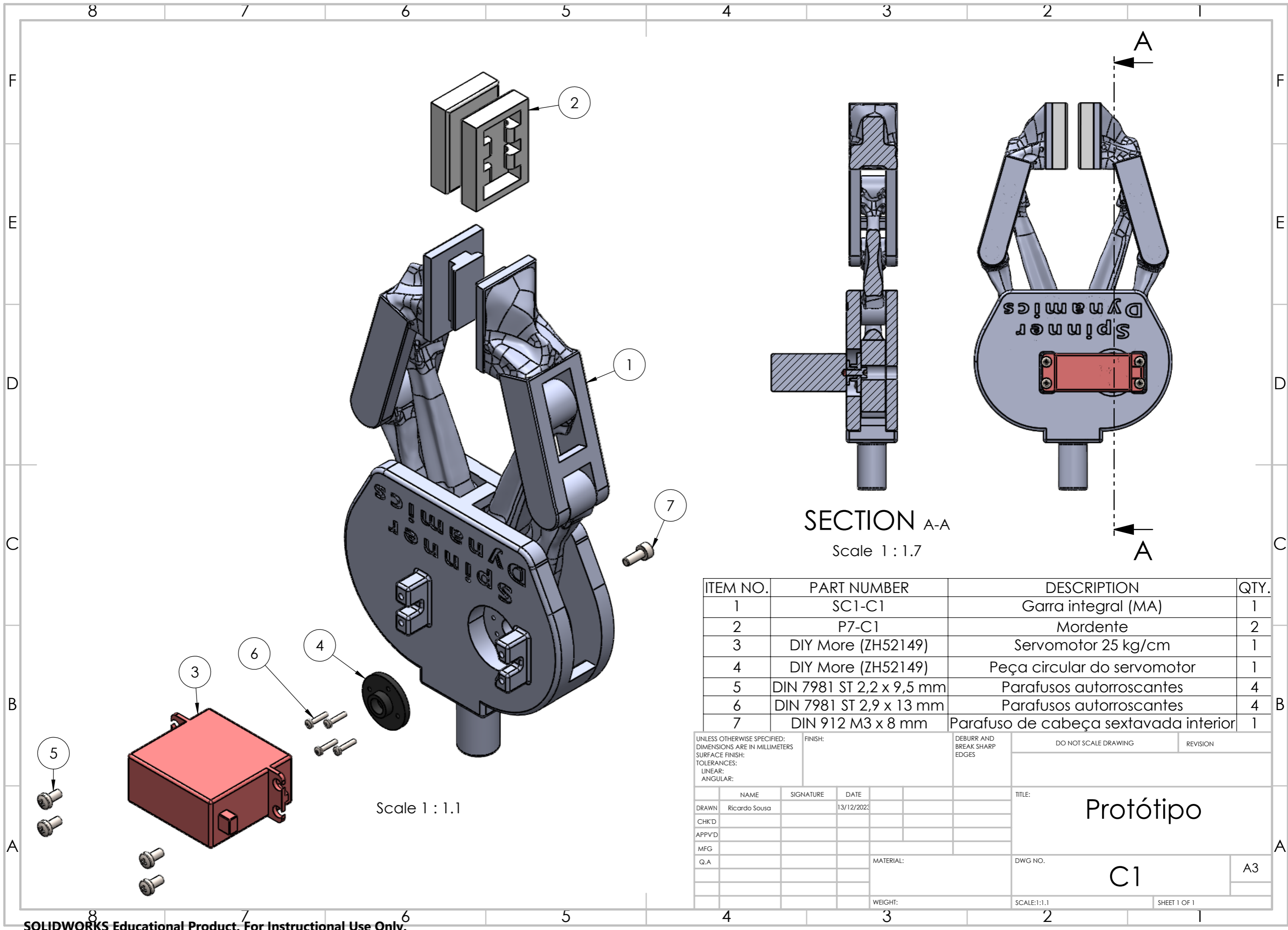
- Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Ul Haq, M. I. (2021). 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *KeAi*, 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- Jha, P. (2015). *Inverse kinematic analysis of robot manipulators* [Doctoral dissertation, National Institute of Technology]. <https://core.ac.uk/works/39631552>
- John, D. (2021). *Designing a cost-effective robot gripper with force-feedback* [Thesis (Integration Project), University of Groningen]. <https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/25362/>
- Jones, J. (2023). *An introduction to additive manufacturing*. Additive Manufacturing. <https://additivemanufacturing.com/basics/>
- Khurshid, A., Ghafoor, A., & Afzaal, M. (2011). Robotic grasping and fine manipulation using soft fingertip. In H. Alfaro (Ed.), *Advances in mechatronics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/23697>
- Kodnongbua, M., Good, I., Lou, Y., Lipton, J., & Schulz, A. (2022). Computational design of passive grippers. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), 2–12. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530162>
- Liu, C., Maiolino, P., & You, Z. (2021). A 3D-printable robotic gripper based on thick panel origami. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.730227>
- Margerie, E. (2022, November 16). *Visualizing the mechanical properties of 3D-printing filaments (BASF Ultrafuse data)*. Hackaday. <https://hackaday.io/page/13741-visualizing-the-mechanical-properties-of-3d-printing-filaments-basf-ultrafuse-data>
- Markforged. (2023). *Haddington Dynamics: 7 axis robotic arm*. <https://markforged.com/resources/application-spotlights/7-axis-robotic-arm>
- Martins, T. (2017). *Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material* [Master's thesis, Instituto Superior Técnico]. <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/-ogBDYb3qdiq1jLDq2Ulw8RXxWb6JLLxClLZ>
- Mitchell, O. (2023, February 15). *Cura infill patterns*. How To Use 3D Print. <https://howtouse3dprint.com/cura-infill-patterns-13-types-of-fill-patterns/>
- Mobile Hydraulic Tips. (2013, September 24). *Hydraulic grippers*. <https://www.mobilehydraulictips.com/hydraulic-grippers/>
- Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot grippers*. Wiley-VCH. [https://books.google.pt/books?hl=ptPT&lr=&id=mJyOOe2ohq8C&oi=fnd&pg=PR5&dq=Gareth+J.Monkman,+Stefan+Hesse,Ralf+Steinmann,+Henrik+SchunkRobot+Grippers&ots=uCb40xqWE6&sig=p6PCGZXt6KNGEoZEmDgRH990f6Y&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Gareth%20J.Monkman%2C%20Stefan%20Hesse%2CRalf%20Steinmann%2C%20Henrik%20SchunkRobot%20Grippers&f=false](https://books.google.pt/books?hl=ptPT&lr=&id=mJyOOe2ohq8C&oi=fnd&pg=PR5&dq=Gareth+J.Monkman,+Stefan+Hesse,Ralf+Steinmann,+Henrik+SchunkRobot+Grippers&ots=uCb40xqWE6&sig=p6PCGZXt6KNGEoZEmDgRH990f6Y&redir_esc=y#v=onepage&q=Gareth%20J.Monkman%2C%20Stefan%20Hesse%2CRalf%20Steinmann%2C%20Henrik%20SchunkRobot%20Grippers&f=false)
- Moura, Y. (2020). *Prototyping and control of a robotic gripper* [Master's thesis, Instituto Politécnico de Bragança & Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/24068>
- Obudho, B. (2023, August 23). *Stringing na impressão 3D*. All3DP. <https://all3dp.com/pt/2/stringing-impressao-3d-solucoes-simples/>
- O'Connell, J. (2022, July 7). *The best 3D printer settings for perfect prints*. All3DP. [https://all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/#google\\_vignette](https://all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/#google_vignette)
- O'Connell, J. (2023, September 15). *Filamento PLA vs PETG (impressão 3D)*. All3DP. <https://all3dp.com/pt/2/petg-vs-pla-impressao-3d-diferencas-comparacao/>
- O'Neill, B. (2022, May 3). *Cura retraction settings explained*. Wevolver. <https://www.wevolver.com/article/cura-retraction-settings-explained>
- PTC. (2023). *What is generative design?* <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/generative-design>

- PTRobotics. (2023). *A4988 stepper motor driver module with heatsink*. <https://www.ptrobotics.com/impressao-3d/5829-a4988-stepper-motor-driver-module-with-heatsink-for-3d-printer-impressora-3d.html>
- RepRap. (2023). *A4988 stepper driver c/dissipador*. <https://www.reprap.pt/pecas/electronica/stepper-driver/stepper-driver>
- Robots Done Right. (2023). *Cobots vs Delta Robots*. <https://robotsoneright.com/Articles/cobots-vs-delta-robots.html>
- RS. (2023, August 29). *A complete guide to robotic arms*. <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/robotic-arms-guide>
- Sadun, A. S., Jalani, J., Sukor, J. A., Yaacob, M. S. Z., Katimon, M. N., Ayob, M. A., & Ahmad, S. (2020). Development of isometrical 3-finger underactuated robot gripper. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, R10-HTC, 2020-December*. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC49770.2020.9356989>
- Santos, J. (2019). *Desenvolvimento de gripper low cost para manipulador robótico baseado em impressão 3D* [Master's thesis, Instituto Politécnico de Bragança & Associação Educativa Evangélica - UniEvangélica]. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/21048>
- Saunders, S. (2018, May 9). *ACEO highlights silicone 3D printing for soft robotic grippers*. 3DPrint. <https://3dprint.com/212963/silicone-soft-robotic-grippers/>
- Shepherd, S. (2023, July 5). *The 10 coolest DIY 3D printable robotic arm projects*. 3DSourced. <https://www.3dsourced.com/guides/3d-printed-robotic-arms/>
- Song, X., Shan, H., Liu, H., & Guo, J. (2017, January 23). An underactuated end-effector design for fruit picking. *23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2016.7827262>
- TCA. (2023). *Saint-Gobain: Redução de custos com recurso a impressão 3D*. <https://tca.pt/impressoras-3d/saint-gobain-reducao-de-custos-com-recurso-a-impressao-3d/>
- Telegenov, K., Tlegenov, Y., & Shintemirov, A. (2015). A low-cost open-source 3-D-printed three-finger gripper platform for research and educational purposes. *IEEE Access*, 3, 638–647. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2433937>
- TIE Industrial & Robots. (2017, August 22). *Grippers for robots*. <https://www.robots.com/articles/grippers-for-robots>
- Yang, Y., Jin, K., Zhu, H., Song, G., Lu, H., & Kang, L. (2021). A 3D-printed fin ray effect inspired soft robotic gripper with force feedback. *Micromachines*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/mi12101141>
- Zelinski, P. (2018, June 7). *One-piece robot gripper actuated by shop air*. Additive Manufacturing. <https://www.additivemanufacturing.media/articles/one-piece-robot-gripper-actuated-by-shop-air>
- Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., & Osswald, T. A. (2019). Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(8), 2122–2135. <https://doi.org/10.1002/pat.4645>

# Anexos

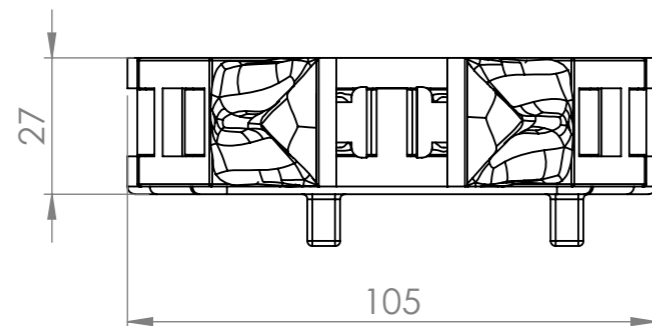
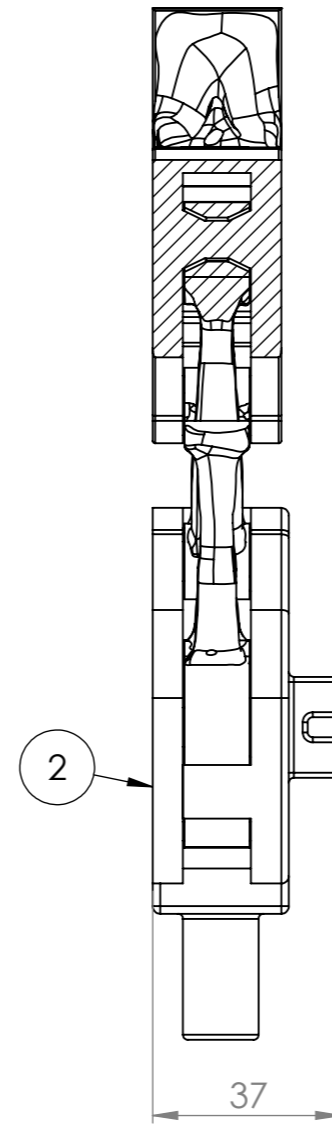
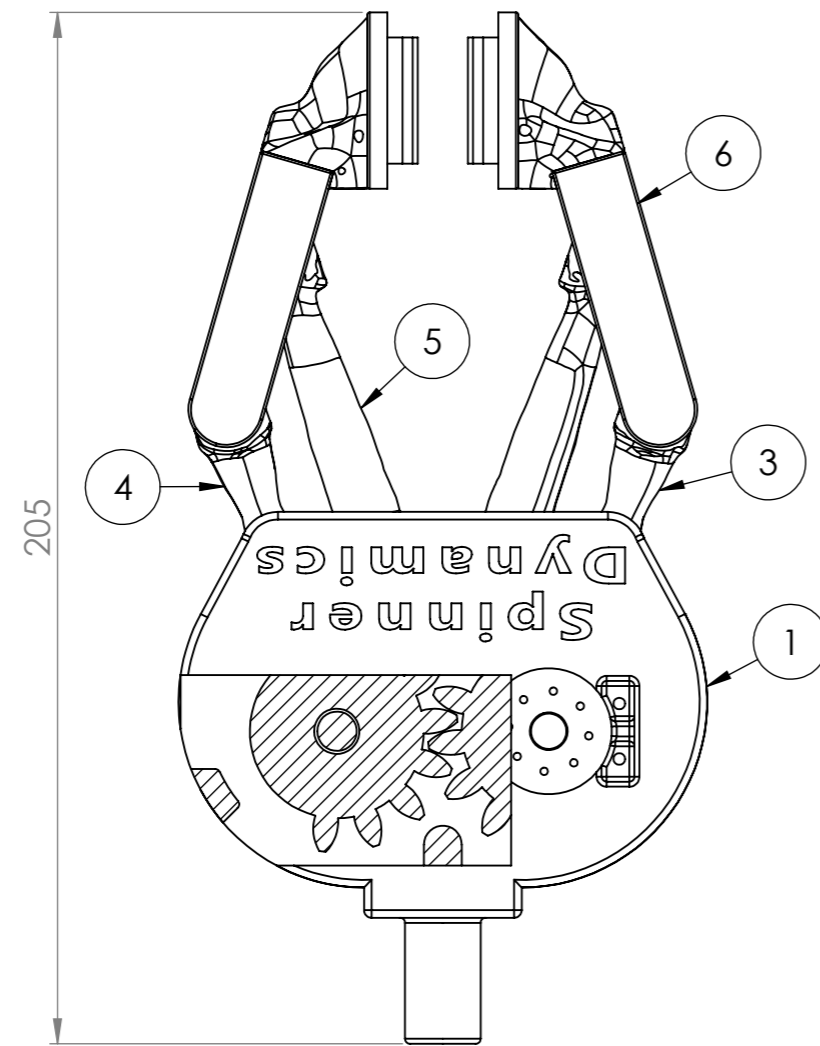


## Anexo I – Desenhos técnicos da garra

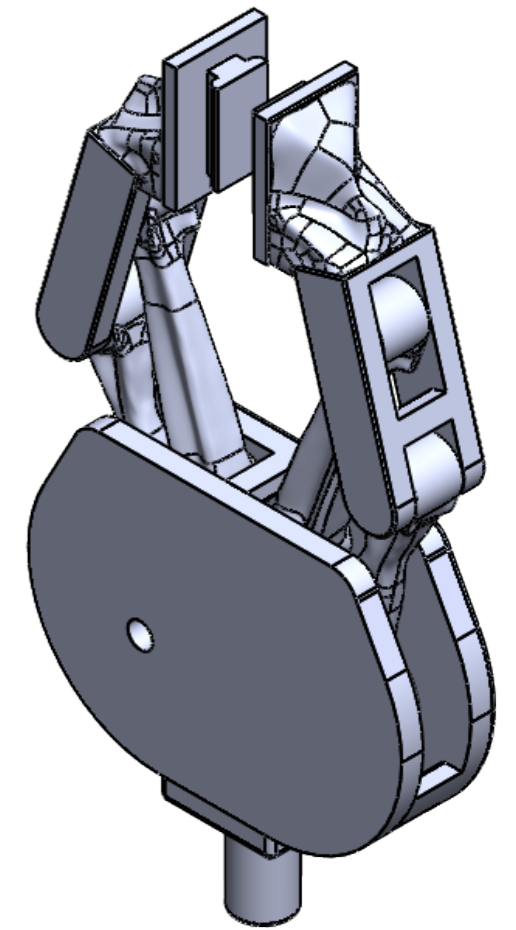


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SC1-C1	Garra integral (MA)	1
2	P7-C1	Mordente	2
3	DIY More (ZH52149)	Servomotor 25 kg/cm	1
4	DIY More (ZH52149)	Peça circular do servomotor	1
5	DIN 7981 ST 2,2 x 9,5 mm	Parafusos autorroscantes	4
6	DIN 7981 ST 2,9 x 13 mm	Parafusos autorroscantes	4
7	DIN 912 M3 x 8 mm	Parafuso de cabeça sextavada interior	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		
DRAWN Ricardo Sousa		13/12/2023	Protótipo		
CHK'D			DWG NO. C1		
APPV'D			A3		
MFG			SCALE:1:1.1		
Q.A			SHEET 1 OF 1		
WEIGHT:		SCALE:1:1.1			

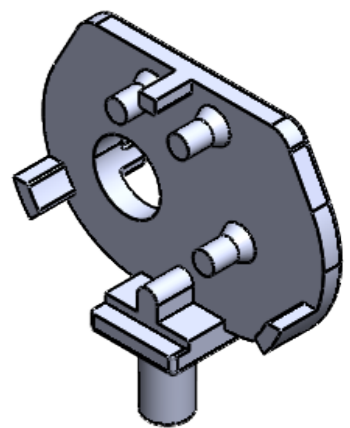
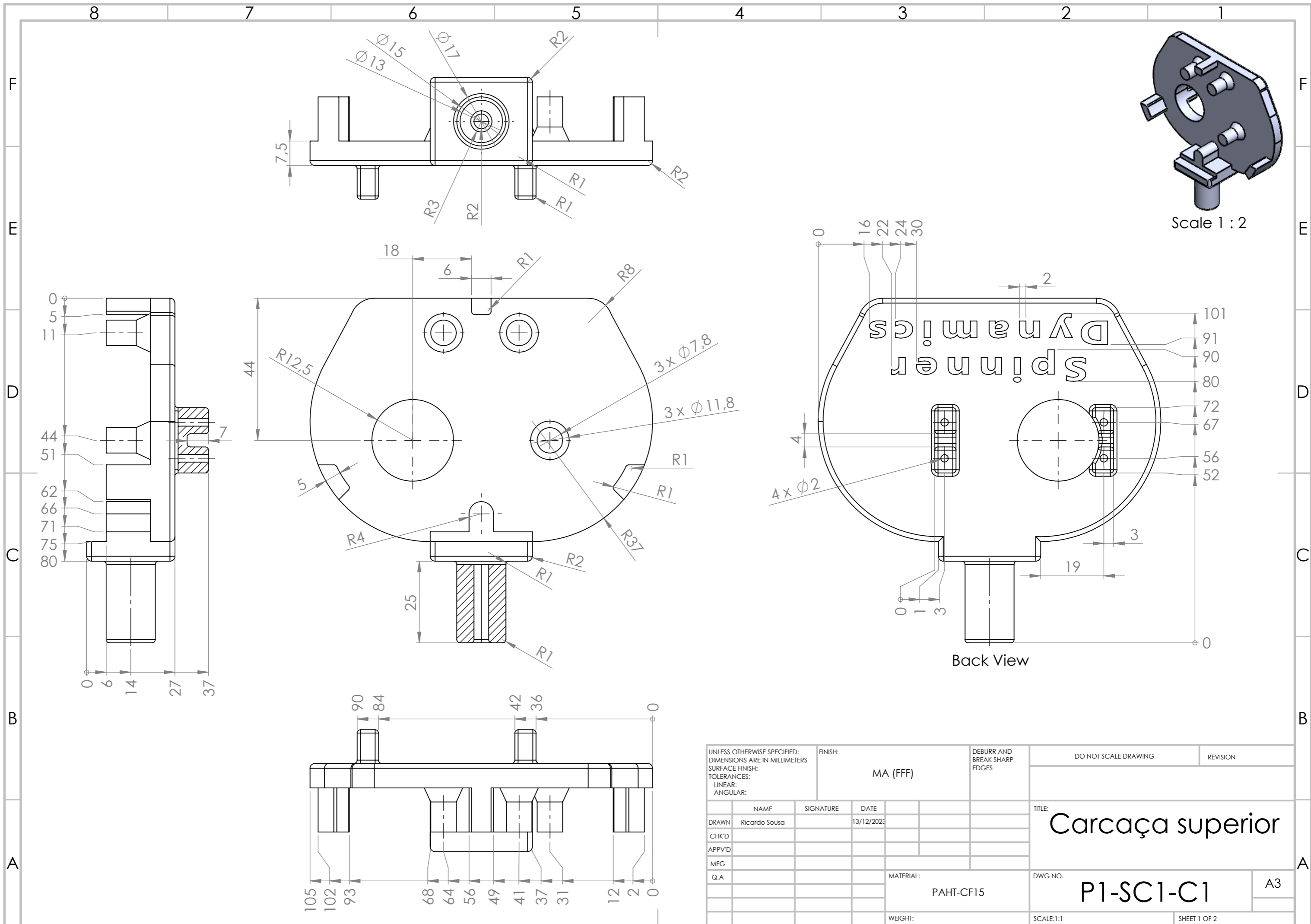


Scale 1 : 1.5



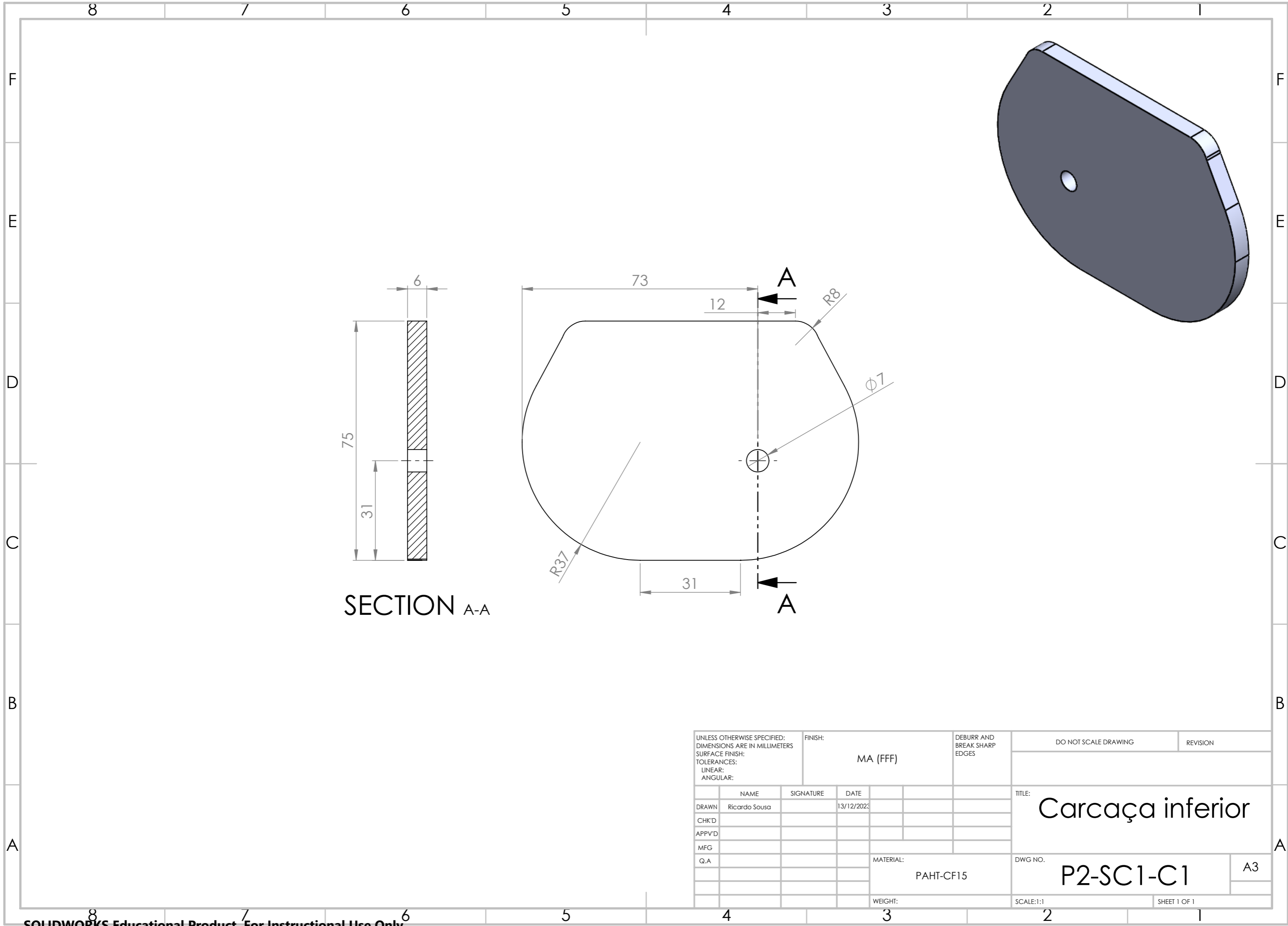
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	P1-SC1-C1	Carcaça superior	1
2	P2-SC1-C1	Carcaça inferior	1
3	P3-SC1-C1	Haste com engrenagem A	1
4	P4-SC1-C1	Haste com engrenagem B	1
5	P5-SC1-C1	Haste	2
6	P6-SC1-C1	Pinça	2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:  MA (FFF)	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME Ricardo Sousa	SIGNATURE	DATE 13/12/2023	TITLE: <b>Garra integral (MA)</b>	
CHK'D				DWG NO. <b>SC1-C1</b>	
APPV'D				A3	
MFG			MATERIAL: PAHT-CF15	SCALE:1:1.5	
Q.A			WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	



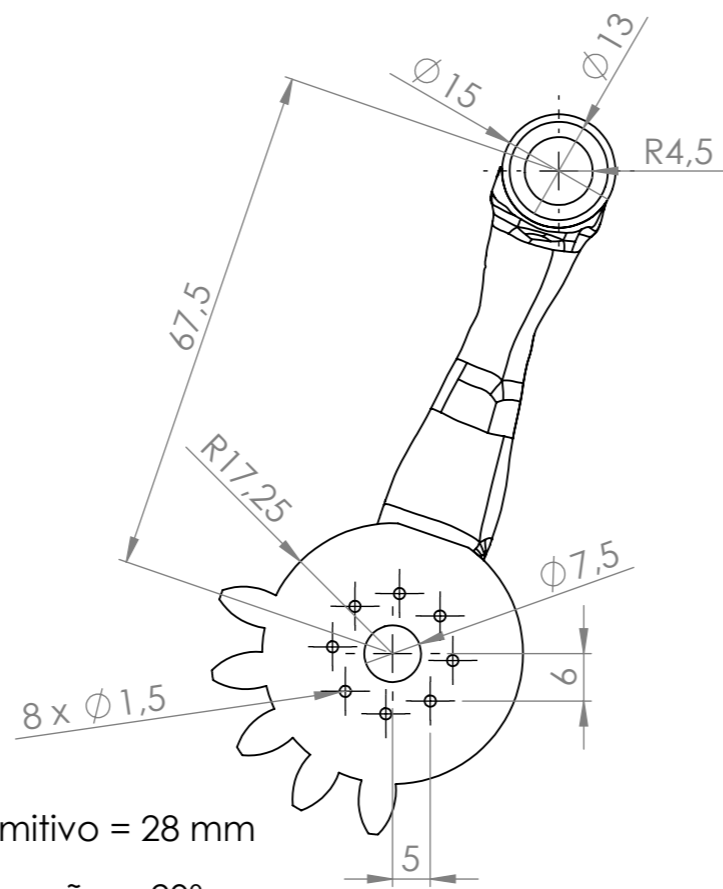
Scale 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:  MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN Ricardo Sousa		SIGNATURE		DATE 13/12/2023		TITLE: <b>Carcaça superior</b>			
CHK'D		APPV'D		MFG		Q.A		MATERIAL:  PAHT-CF15	
105		102		93		68		64	
56		49		41		37		31	
12		2		0		101		91	
90		84		42		36		80	
72		67		56		52		19	
3		4		0		1		3	
0		16		22		24		30	
0		2		101		91		90	
80		72		67		56		52	
0		1		3		0		0	
0		6		14		27		37	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		66		71		75		80	
0		5		11		44		51	
62		6							

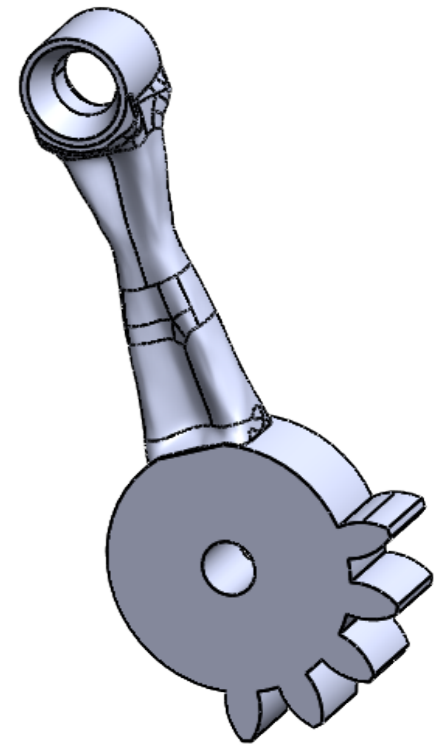
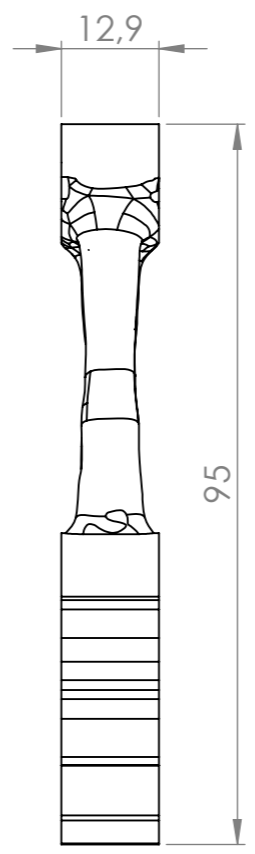


SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:  MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
									TITLE: <b>Carcaça inferior</b>	
DRAWN Ricardo Sousa			SIGNATURE		DATE 13/12/2023				DWG NO. <b>P2-SC1-C1</b>	
CHK'D									A3	
APPV'D										
MFG							MATERIAL: PAHT-CF15		SCALE:1:1	
Q.A							WEIGHT:		SHEET 1 OF 1	

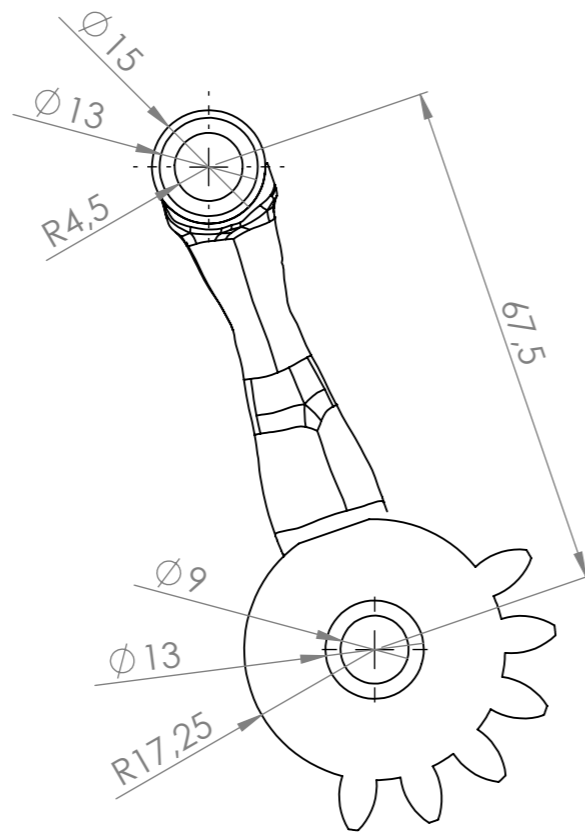


Diâmetro primitivo = 28 mm  
 Módulo = 2  
 Ângulo de pressão = 20°

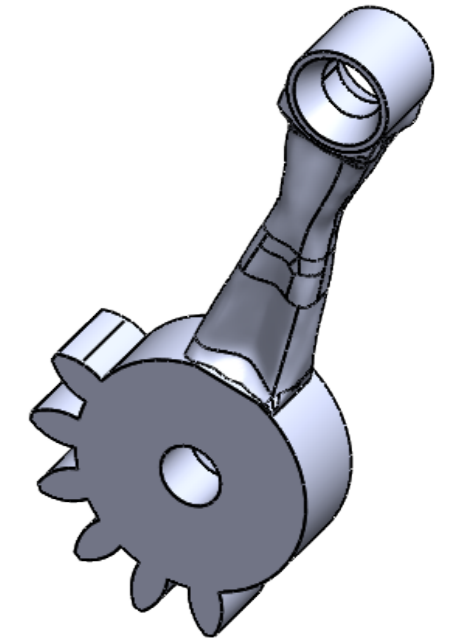
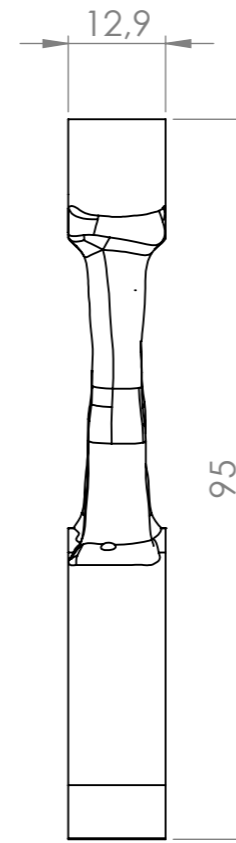


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:  MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION				
DRAWN Ricardo Sousa			SIGNATURE		DATE 13/12/2023		TITLE: <b>Haste com engrenagem A</b>						
CHK'D			APPV'D		MFG		Q.A		MATERIAL:  PAHT-CF15		DWG NO. <b>P3-SC1-C1</b>		A3
WEIGHT:			SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1								

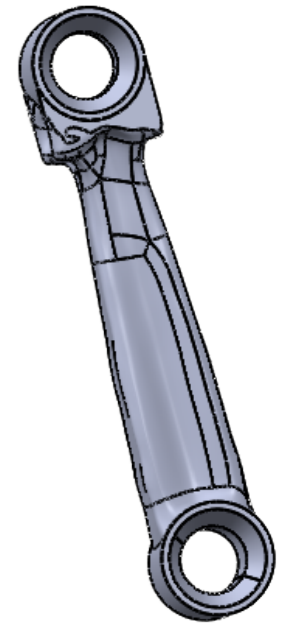
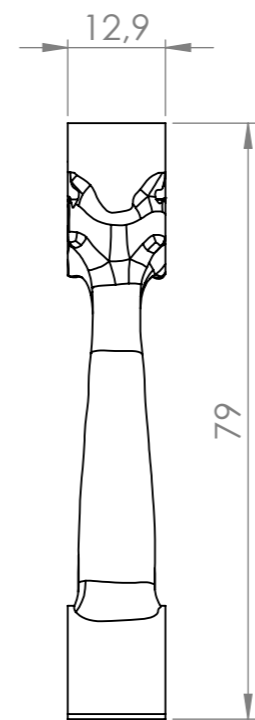
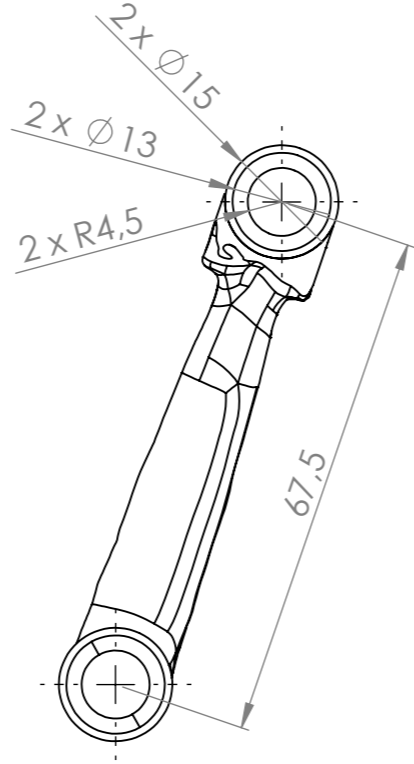
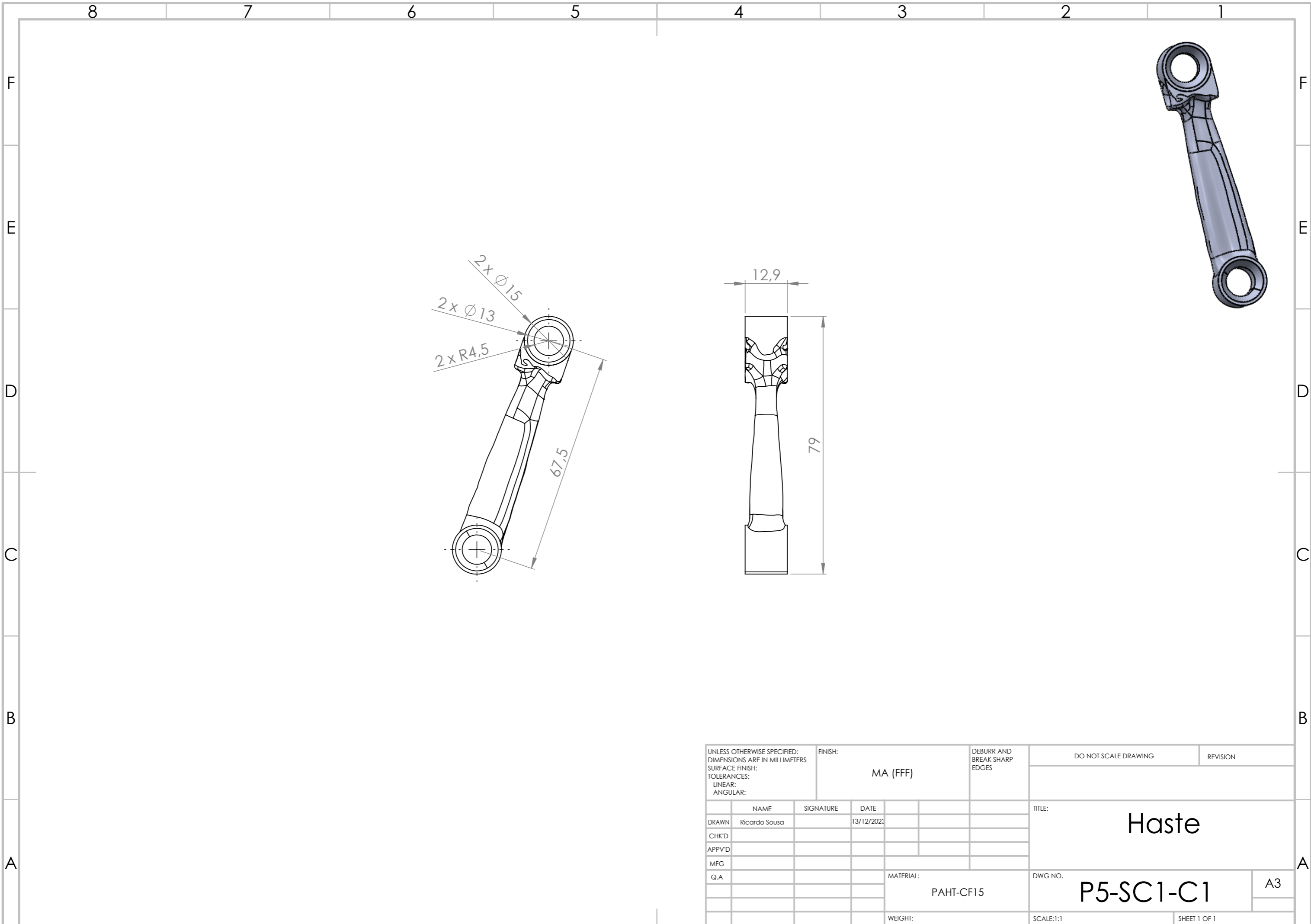




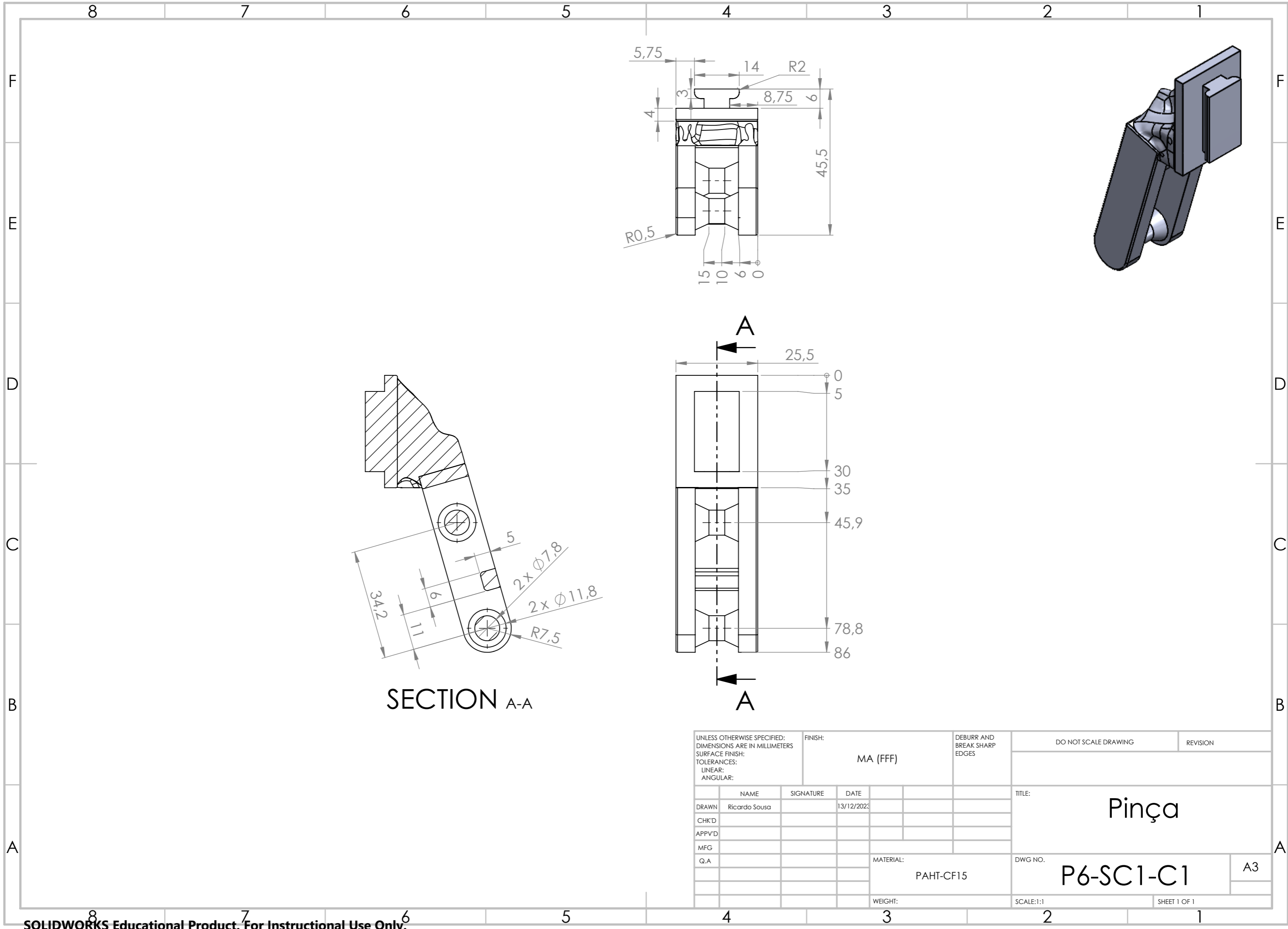
Diâmetro primitivo = 28 mm  
 Módulo = 2  
 Ângulo de pressão = 20°



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH: MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:				MA (FFF)							
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:					
DRAWN Ricardo Sousa				13/12/2023		Haste com engrenagem B					
CHK'D						DWG NO.		P4-SC1-C1		A3	
APPV'D						MATERIAL:		PAHT-CF15		SCALE:1:1	
MFG						WEIGHT:				SHEET 1 OF 1	
Q.A											

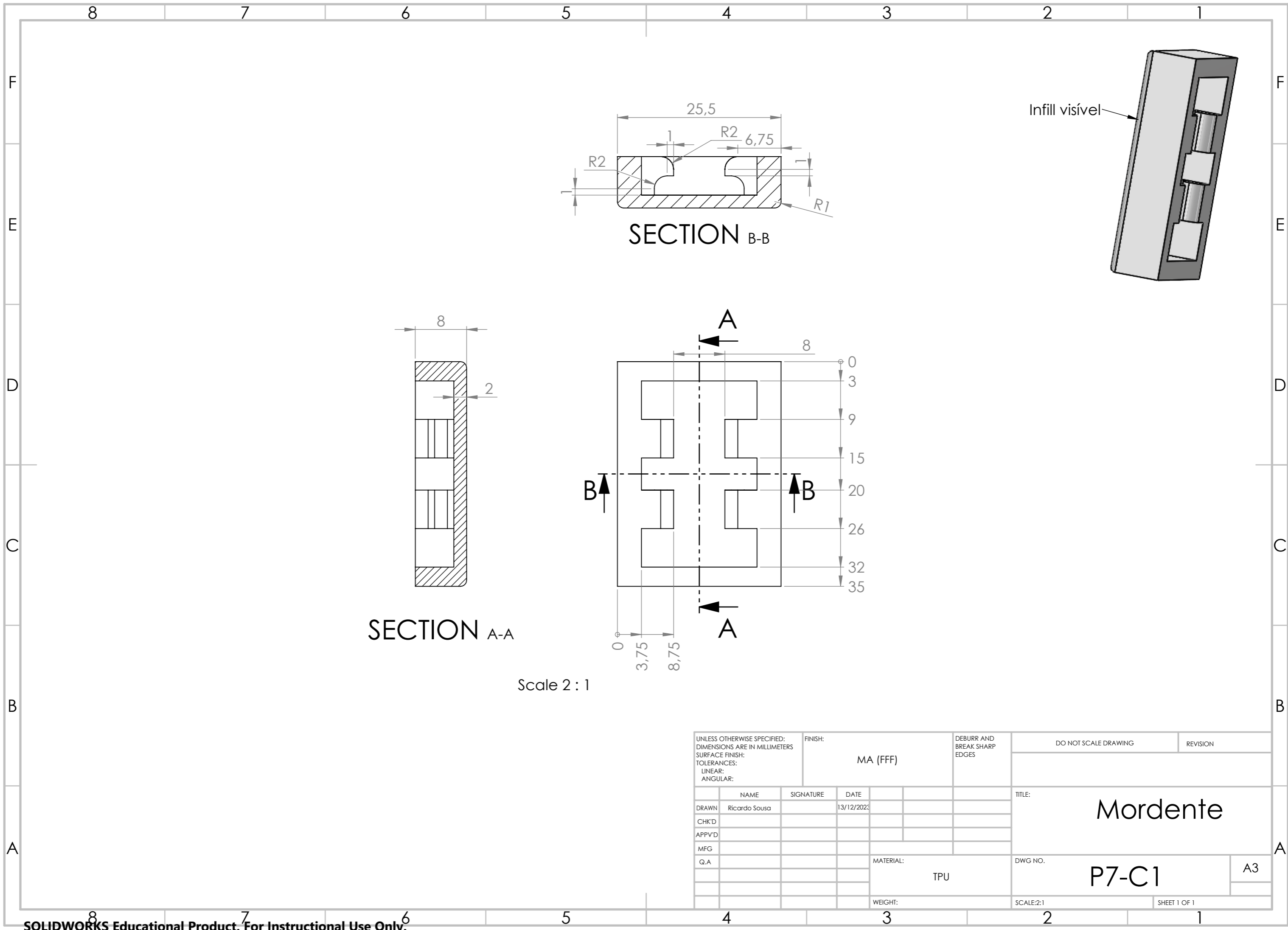


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH: MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:								TITLE: <b>Haste</b>			
TOLERANCES:											
LINEAR:								DWG NO. <b>P5-SC1-C1</b>			
ANGULAR:											
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		MATERIAL: PAHT-CF15			
CHK'D						13/12/2023					
APPV'D								SCALE:1:1			
MFG											
Q.A								SHEET 1 OF 1			



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH: MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN Ricardo Sousa		SIGNATURE		DATE 13/12/2023		TITLE:		Pinça	
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		PAHT-CF15	
						DWG NO.:		P6-SC1-C1	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A

SECTION B-B

Scale 2 : 1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:  MA (FFF)		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN Ricardo Sousa		SIGNATURE		DATE 13/12/2023		TITLE:  Mordente			
CHK'D						DWG NO. P7-C1			
APPV'D						A3			
MFG						SHEET 1 OF 1			
Q.A				MATERIAL:  TPU		SCALE:2:1			
				WEIGHT:					

Anexo II – Fichas técnicas do PAHT-  
CF15 e TPU

# Technical Data Sheet

# Ultrafuse® PAHT CF15

Date / Revised: 09.05.2023

Version No.: 4.0

## General information

### Components

High temperature Polyamide based filament filled with 15% carbon fibers for Fused Filament Fabrication.

### Product Description

Ultrafuse® PAHT CF15 is a high-performance 3D printing filament that opens new application fields in FFF printing. In parallel to its advanced mechanical properties, dimensional stability, and chemical resistance, it has very good processability. It works in any FFF printer with a hardened nozzle. In addition to that, it is compatible with water-soluble support material and HiPS, which allow printing complex geometries that work in challenging environments. Ultrafuse® PAHT CF15 offers high temperature resistance, low moisture absorption and is also suitable for ESD SAFE (surface resistivity  $10^5$ - $10^{11}$   $\Omega$ ) applications.

### Delivery form and warehousing

Ultrafuse® PAHT CF15 filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

### Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

### Disclaimer

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.



Filament Properties		
Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Diameter Tolerance	±0.050 mm	±0.075 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.075 mm
Available Spool size	750 g	750 g
Available colors	black	

Spool Properties	
Available Spool size	750 g
Outer diameter	200 mm
Inner diameter	50.5 mm
width	55 mm

Recommended 3D-Print processing parameters	Used for test specimens
Printer	FFF printer
Nozzle Temperature	260 – 280 °C / 500 – 536 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	100 – 120 °C / 212 – 248 °F
Bed Material	PEI or Glass
Nozzle Diameter	≥ 0,6 mm, Ruby or hardened
Print Speed	30 - 80 mm/s

Please check your print profile availability for an easy start at [www.forward-am.com](http://www.forward-am.com).

Further Recommendations	
Drying recommendations to ensure printability and best mechanical properties	80 °C in a hot air dryer or vacuum oven for at least 4 to 16 hours. Please note: To ensure constant material properties the material should always be kept dry.
Support material compatibility	Single material breakaway, Ultrafuse® BVOH, Ultrafuse® HIPS

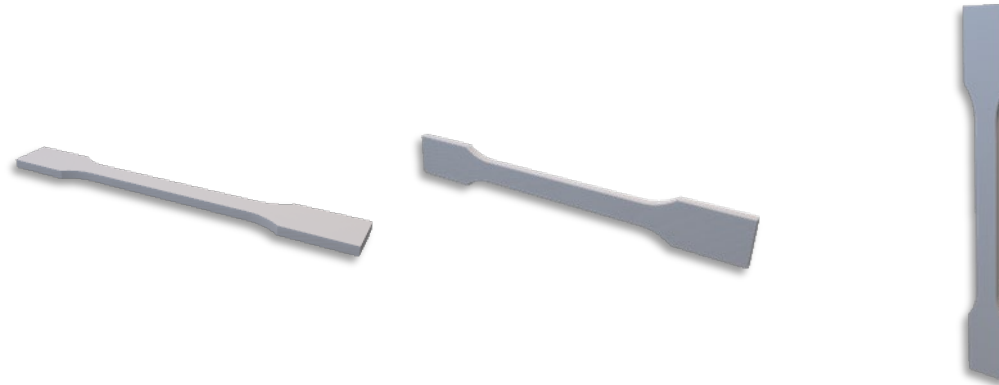
General Properties		Standard
Filament Density* (conditioned <sup>1</sup> )	1203 kg/m <sup>3</sup> / 75.1 lb/ft <sup>3</sup>	ISO 1183-1
Shore Hardness D, 15s / A, 30s	72	ISO 7619-1
Poisson-Number (dry)	0,44	ISO 527
Poisson-Number (conditioned <sup>1</sup> )	0,51	ISO 527

\*measured on filament

<sup>1</sup>Conditioning of the specimens: Standard climate (23°C, 50% RH 72h)

Thermal Properties		Standard
HDT at 1.8 MPa (dry)	92 °C / 198 °F	ISO 75-2
HDT at 0.45 MPa (dry)	145 °C / 293 °F	ISO 75-2
HDT at 1.8 MPa (conditioned <sup>1</sup> )	91 °C / 196 °F	ISO 75-2
HDT at 0.45 MPa (conditioned <sup>1</sup> )	128 °C / 262 °F	ISO 75-2
Vicat softening point @ 50 N (dry)	205 °C / 401 °F	ISO 306
Vicat softening point @ 10 N (dry)	221 °C / 429.8 °F	ISO 306
Vicat softening point @ 50 N (conditioned <sup>1</sup> )	192 °C / 377.6 °F	ISO 306
Vicat softening point @ 10 N (conditioned <sup>1</sup> )	217 °C / 422.6 °F	ISO 306
Glass Transition Temperature	70 °C / 158 °F	ISO 11357-2
Crystallization Temperature	180 °C / 356 °F	ISO 11357-3
Melting Temperature	234 °C / 453 °F	ISO 11357-3
Melt Volume Flow Rate	42.2 cm <sup>3</sup> /10min / 2.6 in <sup>3</sup> /10min (275°C/5kg)	ISO 1133

**Mechanical Properties | Dried Specimen**



Print direction	Standard	XY	XZ	ZX
		Flat	On its edge	Upright
Tensile strength <sup>2</sup>	ISO 527	103.2 MPa / 15.0 ksi	-	18.2 MPa / 2.6 ksi
Elongation at Break <sup>2</sup>	ISO 527	1.8 %	-	0.5 %
Young's Modulus <sup>3</sup>	ISO 527	8386 MPa / 1216 ksi	-	3532 MPa / 512 ksi
Flexural Strength <sup>4</sup>	ISO 178	160.7 MPa / 23.3 ksi	171.8 MPa / 24.9 ksi	50.8 MPa / 7.4 ksi
Flexural Modulus <sup>4</sup>	ISO 178	8258 MPa / 1198 ksi	7669 MPa / 1112 ksi	2715 MPa / 394 ksi
Flexural Elongation at Break <sup>4</sup>	ISO 178	2.4 %	2.8 %	1.8 %
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	4.8 kJ/m <sup>2</sup>	3.9 kJ/m <sup>2</sup>	1.3 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Charpy (unnotched)	ISO 179-2	20.6 kJ/m <sup>2</sup>	19.3 kJ/m <sup>2</sup>	2.9 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	4.9 kJ/m <sup>2</sup>	5.1 kJ/m <sup>2</sup>	-
Impact Strength Izod (unnotched)	ISO 180	16.4 kJ/m <sup>2</sup>	18.1 kJ/m <sup>2</sup>	2.9 kJ/m <sup>2</sup>

**Electrical Properties**

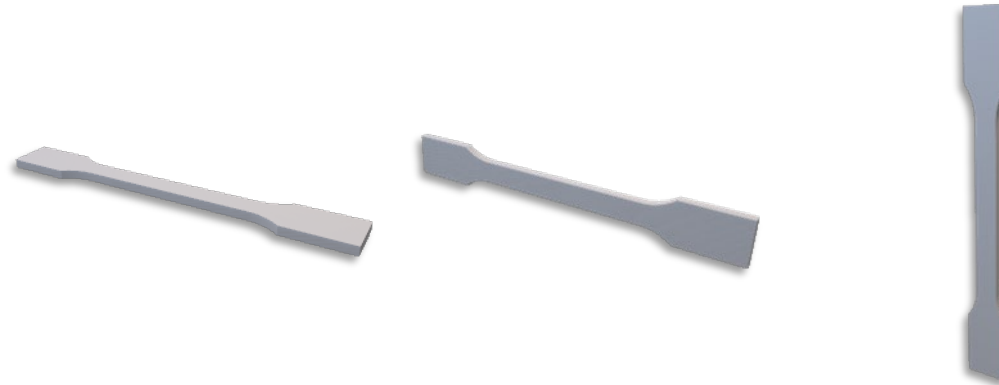
Volume resistivity	IEC 62631-3-1	3.2E+07 Ωcm	-	1.6E+05 Ωcm
Surface resistivity	IEC 62631-3-2	9.7E+05 Ω	-	1.8E+06 Ω

<sup>2</sup>testing speed: 5 mm/min

<sup>3</sup>testing speed: 1 mm/min

<sup>4</sup>testing speed: 2 mm/min

**Mechanical Properties | Conditioned Specimen<sup>1</sup>**



Print direction	Standard	XY	XZ	ZX
		Flat	On its edge	Upright
Tensile strength <sup>2</sup>	ISO 527	62.9 MPa / 9.1 ksi	-	19.1 MPa / 2.8 ksi
Elongation at Break <sup>2</sup>	ISO 527	2.9 %	-	0.8 %
Young's Modulus <sup>3</sup>	ISO 527	5052 MPa / 733 ksi	-	2455 MPa / 356 ksi
Flexural Strength <sup>4</sup>	ISO 178	125.1 MPa / 18.1 ksi	121.9 MPa / 17.7 ksi	56.0 MPa / 8.1 ksi
Flexural Modulus <sup>4</sup>	ISO 178	6063 MPa / 879 ksi	6260 MPa / 908 ksi	2190 MPa / 318 ksi
Flexural Elongation at Break <sup>4</sup>	ISO 178	No break	3.6 %	4.0 %
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	5.1 kJ/m <sup>2</sup>	5.3 kJ/m <sup>2</sup>	1.6 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Charpy (unnotched)	ISO 179-2	21.9 kJ/m <sup>2</sup>	20.4 kJ/m <sup>2</sup>	2.8 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	6.5 kJ/m <sup>2</sup>	5.8 kJ/m <sup>2</sup>	-
Impact Strength Izod (unnotched)	ISO 180	16.3 kJ/m <sup>2</sup>	15.1 kJ/m <sup>2</sup>	4.1 kJ/m <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Conditioning of the specimens: Standard climate (23°C, 50% RH 72h)

<sup>2</sup>testing speed: 5 mm/min

<sup>3</sup>testing speed: 1 mm/min

<sup>4</sup>testing speed: 2 mm/min

# Technical Data Sheet

# Ultrafuse® TPU 95A

Date / Revised: 22.08.2022

Version No.: 2.0

## General information

### Components

BASF ether based thermoplastic polyurethane (TPU) based filament for Fused Filament Fabrication.

### Product Description

Ultrafuse® TPU 95A comes with a well-balanced profile of flexibility and durability. On top of that, it allows for easier and faster printing than softer TPU grades. Parts printed with Ultrafuse® TPU 95A show a high elongation, good impact resistance, excellent layer adhesion and a good resistance to oils and common industrially used chemicals.

Due to its good printing behavior, Ultrafuse® TPU 95A is a good choice for starting printing flexible materials on both direct drive and bowden style printers.

### Delivery form and warehousing

Ultrafuse® TPU 95A filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

### Product safety

Please process materials in a well ventilated room, or use professional air extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

### Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

Values in this document are average values, measured and calculated according to the instructions in the listed standards. The used specimens are produced with the Fused Filament Fabrication method.

Measured values can vary depending on used print orientation and print parameters.

Please contact us for further product information, like for example REACH, RoHS, FCS.

Filament Properties		
Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Diameter Tolerance	±0.050 mm	±0.1 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.05 mm
Available Spool size	750 g; 2.5 kg	750 g; 2.5 kg
Available colors	white and black	

Spool Properties		
Available Spool size	750 g	2.5 kg
Outer diameter	200 mm	300 mm
Inner diameter	50.5 mm	51.5 mm
width	55 mm	103 mm

Recommended 3D-Print processing parameters	Used for test specimens	
Printer	FFF printer	Prusa i3 MK3
Nozzle Temperature	210 – 230 °C / 410 – 446 °F	220 °C / 428 °F
Build Chamber Temperature	-	-
Bed Temperature	40 °C / 104 °F	40 °C / 104 °F
Bed Material	Glass	PEI coated spring sheet
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm	0.4 mm
Print Speed	15 – 40 mm/s	25 mm/s

Please check your print profile availability for an easy start at [www.forward-am.com](http://www.forward-am.com).

Further Recommendations	
Drying recommendations to ensure printability and best mechanical properties	70 °C in a hot air dryer or vacuum oven for at least 5 hours Please note: To ensure constant material properties the material should always be kept dry.
Support material compatibility	Ultrafuse® BVOH

General Properties		Standard
Filament Density*	1149 kg/m <sup>3</sup> / 72 lb/ft <sup>3</sup>	ISO 1183-1

\*measured on filament

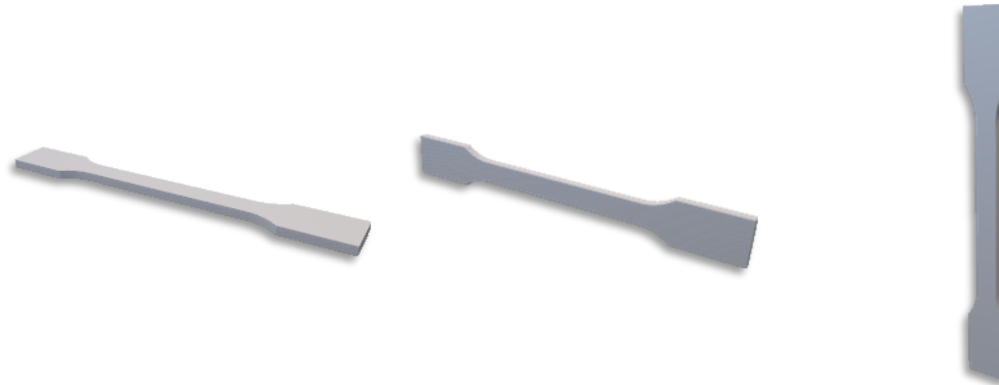
Classification and Certification		Standard
<b>Biocompatibility</b>		
Cytotoxicity XTT neutral red	Passed	ISO 10993-5
Skin irritation	Passed	ISO10993-10
Skin sensitization LLNA KretinoSens	Passed	ISO10993-10

Thermal Properties		Standard
Vicat softening point @ 50 N	<27 °C / <81 °F	ISO 306
Vicat softening point @ 10 N	75 °C / 167 °F	ISO 306
Glass Transition Temperature	-25 °C / -13 °F	ISO 11357-2
Melting Temperature	144 °C / 291 °F	ISO 11357-3
Melt Volume Rate	30.7 cm <sup>3</sup> /10 min / 1.87 in <sup>3</sup> /10 min (210 °C, 5 kg)	ISO 1133

General Mechanical Properties		Standard
Compression Set at 23°C, 72 h	38 %	ISO 815
Compression Set at 70°C, 24 h	90 %	ISO 815
Abrasion Resistance	64 mm <sup>3</sup> / 0.004 in <sup>3</sup>	ISO 4649
Shore A Hardness (3 s)	92	ISO 7619-1
Shore D Hardness (15 s)	45	ISO 7619-1



## Mechanical Properties<sup>1</sup>



Print direction	Standard	XY Flat	XZ On its edge	ZX Upright
Stress at 50 % Elongation <sup>2</sup>	ISO 527	8.3 MPa / 1.20 ksi	-	7.9 MPa / 1.15 ksi
Stress at 100% Elongation <sup>2</sup>	ISO 527	10.5 Mpa / 1.52 ksi	-	9.9 Mpa / 1.44 ksi
Stress at 300% Elongation <sup>2</sup>	ISO 527	20.3 Mpa / 2.94 ksi	-	-
Stress at Break, TPE <sup>2</sup>	ISO 527	44.2 MPa / 6.41 ksi	-	12.2 MPa / 1.77 ksi
Elongation at Break, TPE <sup>2</sup>	ISO 527	661 %	-	192 %
Young's Modulus <sup>3</sup>	ISO 527	48.4 MPa / 7.0 ksi	-	46.7 MPa / 6.8 ksi
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	No break	No break	16.8 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Charpy (notched) @ -30°C	ISO 179-2	128 kJ/m <sup>2</sup>	120 kJ/m <sup>2</sup>	14.9 kJ/m <sup>2</sup>
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	No break	No break	No break
Tensile Notched Impact Strength	ISO 8256/1	No break	No Break	No break
Tear Strength	ISO 34-1,A	90 kN/m	8 kN/m	14 kN/m

<sup>1</sup>Conditioning of the specimens: Tempering (100°C, 20h) Standard climate (23°C, 50% RH, 72h)

<sup>2</sup>testing speed: 200 mm/min

<sup>3</sup>testing speed: 1 mm/min