



DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO EM SOFT ROBOTICS

PEDRO JOSÉ PÁDUA DIAS PEREIRA

julho de 2021

DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO EM SOFT ROBOTICS

Pedro José Pádua Dias Pereira

1160576

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO EM SOFT ROBOTICS

Pedro José Pádua Dias Pereira

1160576

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre João Paulo Geraldês Touro Pereira

Diretor de Unidade, INEGI

Mestre Luís Carlos Ferreira Moreira

Engenheiro de Desenvolvimento do Produto, Automação e IIoT, INEGI

Arguente

Doutor Carlos Miguel da Costa Gomes Fernandes

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação, e com a mesma, o término do mestrado representa uma etapa de extrema importância da minha vida. Por isso gostaria de manifestar a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que fosse possível alcançar este objetivo.

Em primeiro lugar é importante agradecer à empresa acolhedora, INEGI, pela oportunidade dada para realizar o estágio curricular no âmbito da dissertação.

Aos coorientados na empresa, ao Diretor de Unidade, Mestre João Paulo Pereira, e ao Engenheiro de Desenvolvimento do Produto, Mestre Luís Carlos Moreira.

Ao administrador do grupo Pinto Brasil, Manuel Pinto Brasil, pelo apoio e pelas oportunidades dadas ao longo do meu percurso académico.

Ao orientador da dissertação, Doutor Raul Campilho, pelo constante apoio, pela dedicação e pela orientação irrepreensível.

À minha família, em especial ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão, pelo apoio fornecido e pela confiança demonstrada ao longo de todo o meu percurso académico.

Por fim aos meus amigos e colegas de curso, que acompanharam ao longo desta jornada.

PALAVRAS CHAVE

Indústria 4.0, *Soft robotics*, *Gripper*, Fabrico aditivo, Projeto mecânico.

RESUMO

A indústria é uma atividade económica que se mostra como um pilar e como uma força do desenvolvimento da sociedade. Aliada à sua competitividade interna, a necessidade de criar e adaptar soluções para todo o tipo de problemas vem trazer à indústria uma tendência de crescimento exponencial. Como resposta a esta necessidade e face à vontade de aumentar a automatização e a comunicação dos componentes englobados pela indústria, nasce a Indústria 4.0.

Percebendo que o campo da robótica desempenha um papel fundamental na indústria, pois é uma das grandes forças que faz progredir a mesma, é importante notar que as suas aplicações tradicionais padecem de certas limitações que vão contra os ideais da quarta revolução industrial, como flexibilidade, adaptabilidade e dinamismo.

Face aos problemas encontrados na robótica clássica, surge uma nova e inovadora abordagem, a *soft robotics*. Esta nova tecnologia apresenta-se como um novo caminho a adotar em diversas aplicações na indústria. A *soft robotics* consiste numa abordagem derivada da robótica, mas com a particularidade da utilização de materiais macios nos robôs.

É derivado deste contexto que surge o tema da presente dissertação. A abordagem a uma área relativamente recente, como é a *soft robotics*, apresenta bastantes oportunidades de criação ou inovação de conceitos. Assim, foi proposto o desenvolvimento de uma aplicação em *soft robotics*, em particular de um manipulador (*soft gripper*). Este é um mecanismo bastante importante nesta área, que permite o manuseamento de inúmeros objetos, garantindo assim uma alta fluidez, tanto em linhas de produção como noutros ambientes diferentes. Ao perceber que estas características essenciais vão de encontro aos princípios da disciplina da *soft robotics*, concluiu-se que seria o caminho indicado a seguir. Esta dissertação relata as etapas necessárias à criação e ao desenvolvimento do projeto de um *soft gripper* distinto e inovador, incorporado num robô antropomórfico colaborativo.

Os resultados deste trabalho foram bastante positivos, pois o projeto do equipamento foi concluído, atempadamente, com sucesso, assim como a sua prototipagem, cumprindo com os requisitos impostos.

KEYWORDS

Industry 4.0, Soft robotics, Gripper, Additive manufacturing, Mechanical design.

ABSTRACT

Industry is an economic activity that is shown as a pillar and as a force for the development of society. Combined with its internal competitiveness, the need to create and adapt solutions to all kinds of problems brings to the industry a trend of exponential growth. Answering to this need, and in view of the desire to increase the automation and communication of the components associated with the industry, Industry 4.0 is born.

Realizing that the field of robotics plays a fundamental role in the industry, as it is one of the great forces that enables its progression, it is important to note that its traditional applications suffer from certain limitations, which go against the ideals of the fourth industrial revolution, such as flexibility, adaptation, and dynamism.

Faced with the problems encountered in classical robotics, a new and innovative approach, soft robotics, emerges. This new technology presents itself as a new path to adopt in various applications in the industry. Soft robotics is an approach derived from robotics, but with the particularity of using soft materials in robots.

It is derived from this context that the subject of this dissertation emerges. The approach to a recent area, as it is soft robotics, presents a lot of opportunities for the creation or innovation of concepts. Thus, the development of an application in soft robotics was proposed, in particular of a soft gripper. This is a very important mechanism in this area, which allows the handling of numerous objects, thus ensuring a high fluidity, both in production lines and in other types of different environments. By understanding that these essential characteristics are within accordance with the principles of the discipline of soft robotics, it was concluded that it would be the right path. This dissertation reports all the necessary steps for the creation and development of the design of a distinct and innovative soft gripper.

The results of this work were very positive, because the design of the equipment was completed, in a timely manner, successfully, as well as its prototyping, complying with the requirements imposed.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

3D	Tridimensional
ADAI	Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial
AeroG	Grupo de Investigação em Aeronáutica e Astronáutica da Universidade da Beira Interior
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJT	<i>Binder Jetting</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIT	Centro de Interface Tecnológico
CPS	<i>Cyber-physical Systems</i>
CWS	<i>Collaborative Work Space</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DNN	<i>Deep Neural Network</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FFF	Fabricação de Filamento Fundido
IDMEC - IST	Instituto de Engenharia Mecânica - Pólo Instituto Superior Técnico
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IoE	<i>Internet of Everything</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAETA	Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica
LCE	<i>Liquid Crystal Elastomer</i>
MEF	Método de elementos finitos
MEX	<i>Material Extrusion</i>
MJT	<i>Material Jetting</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PLA	<i>Polylactic acid</i>
PN	<i>Pneumatic Network</i>
PUMA	<i>Programable Universal Manipulation Arm</i>
SHL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
SMP	<i>Shape Memory Polymer</i>
SRT	<i>Soft Robotics Toolkit</i>
SWOT	<i>Strengths Weaknesses Opportunities Threats</i>
TENG	<i>Triboelectric nanogenerator</i>
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i>
TS	<i>Technical Specification</i>
VPP	<i>Vat Photopolymerization</i>

Lista de Unidades

€	Euro
°	Grau
cm ²	Centímetro quadrado
g	Gramma
kg	Quilograma
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo

Lista de Símbolos

∅	Diâmetro
pH	Escala de ácido base

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - As quatro revoluções industriais [3].	9
Figura 2 – Robô PUMA 500 [13] (a) e KUKA KR 1000 Titan (adaptado de [14]) (b).	13
Figura 3 - Configuração geral de um robô industrial [16].	14
Figura 4 - Sensor de proximidade indutivo [20].	16
Figura 5 - Sensor ótico de deslocamento linear [21].	16
Figura 6 - Composição do <i>encoder</i> [22].	16
Figura 7 - <i>Encoder</i> incremental [23].	17
Figura 8 - <i>Encoder</i> absoluto [24].	17
Figura 9 – Paragem monitorizada em segurança (a), guia de mão (b), monitorização de velocidade (c) e limitação de força e de potência (d) [27].	18
Figura 10 - Robô colaborativo desempenhando funções com um operador [29].	19
Figura 11 – Sequência de atuação (A-H) de um <i>soft robot (multigait)</i> ao deslocar-se por baixo de uma fenda [33].	20
Figura 12 - Próteses de <i>soft robots</i> [34] – mão artificial com alta adaptabilidade e estabilidade (a), <i>soft gripper</i> de bloqueio granular (b), elastómero em forma de manga para restaurar a funcionalidade de um coração com insuficiência (c) e simulador físico de pregas vocais humanas (d).	21
Figura 13 - <i>Four fingers lip</i> [35] (a), <i>adaptive gripper</i> [36] (b), <i>centric soft gripper</i> [37] (c) e <i>dual belts</i> [38] (d).	22
Figura 14 – Aproximação dos módulos dinâmicos de armazenamento e perda em vários materiais orgânicos e inorgânicos (adaptado de [41]).	23
Figura 15 - Sequência de um <i>soft gripper</i> a agarrar um ovo [44].	24
Figura 16 - Robô inspirado num polvo [31] (<i>Octopus vulgaris</i>) a agarrar um dedo humano (a), robô de um braço de um polvo a agarrar um braço humano debaixo de água (b), detalhes do robô de um braço de um polvo (c) e detalhes dos atuadores de SMA'.	25
Figura 17 - Princípio de funcionamento dos TENG [46] – comparação entre um sensor tradicional e um TENG (a), mecanismo de funcionamento de um TENG (b), simulação da distribuição de potencial elétrico (c), sistema que inclui o TENG, uma bomba de ar e um manómetro (d), voltagem do circuito aberto (e), transferência de cargas (f), voltagem do circuito aberto medido durante 3 horas (g), voltagem de circuito aberto (h) e transferência de cargas em condições húmidas e secas (i).	27

Figura 18 - Princípios de funcionamento dos grupos de processos de fabrico aditivo utilizados em <i>soft robotics</i> – esquema de VPP (a), esquema de MEX (b) e esquema de MJT (c) (adaptado de [50]). ...	29
Figura 19 - Esquema do processo de produção do fabrico rápido de moldes (adaptado de [51]).	30
Figura 20 - Processo de produção do fabrico híbrido (adaptado de [52])......	30
Figura 21 - Kuka LBR iiwa [56].	38
Figura 22 - <i>Adaptive gripper finger DHAS</i> [57].	39
Figura 23 - Sequência de atuação do <i>gripper</i> (adaptado de [58]).	40
Figura 24 - <i>Soft robotic gripper for adaptable and effective grasping</i> [59] – posição aberta (a) e fechada (b).....	40
Figura 25 - Funcionamento do mecanismo do <i>gripper</i> [59].	41
Figura 26 - <i>Four fingers lip</i> [35].....	41
Figura 27 - Distribuição de deslocamentos no <i>four fingers lip</i> (adaptado de [35]).	42
Figura 28 - Solução A – Conjunto do <i>gripper</i> (a) e vista detalhada de uma garra (b).....	43
Figura 29 - Esquema representativo de funcionamento da solução A - vista frontal (a) e vista lateral (b).	44
Figura 30 - Solução B – vista isométrica do <i>gripper</i> (a) e representação do funcionamento em vista frontal (b).	45
Figura 31 - Ilustração do funcionamento do <i>gripper</i> B através de uma simulação no <i>SolidWorks</i> – aplicando uma carga ligeira (a), uma carga média (b) e uma carga elevada (c).	45
Figura 32 - Solução C – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do <i>gripper</i> aberto (b) e do conjunto do <i>gripper</i> fechado (c).	46
Figura 33 - Sequência de funcionamento do <i>gripper</i> C – <i>gripper</i> aberto (a), <i>gripper</i> ao atingir o objeto a manipular (b) e <i>gripper</i> agarrando o objeto (simulação do <i>SolidWorks</i>) (c).	47
Figura 34 - Solução D – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do <i>gripper</i> aberto (b) e do conjunto do <i>gripper</i> fechado (c).	48
Figura 35 - Sequência de funcionamento do <i>gripper</i> D – <i>gripper</i> aberto (a), <i>gripper</i> ao atingir o objeto a manipular (b) e <i>gripper</i> agarrando o objeto (simulação do <i>SolidWorks</i>) (c).	48
Figura 36 - Solução E – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do <i>gripper</i> aberto (b) e do conjunto do <i>gripper</i> fechado (c).	49
Figura 37 - Sequência de funcionamento do <i>gripper</i> E – <i>gripper</i> aberto (a), <i>gripper</i> ao atingir o objeto a manipular (b) e <i>gripper</i> agarrando o objeto (simulação do <i>SolidWorks</i>) (c).	49
Figura 38 - Vista isométrica do modelo E0.	51
Figura 39 - Vista isométrica do modelo E1.	52

Figura 40 - Vista isométrica do modelo E2.	52
Figura 41 - Vista isométrica do modelo E3.	52
Figura 42 - Vista isométrica do modelo E4.	53
Figura 43 - Vista isométrica do modelo E5.	53
Figura 44 - Vista isométrica do modelo E6.	53
Figura 45 - Vista isométrica do modelo E7.	54
Figura 46 - Vista do modelo E0 pronto para simular o estudo.	55
Figura 47 - Propriedades dos materiais – elastómero de silicone (a) e PLA (b).	56
Figura 48 – Representação da ligação <i>pin</i> entre o dedo e a base.	56
Figura 49 - Ilustração dos <i>contact set's</i> utilizados - entre o dedo e a esfera (a) e entre o dedo e a base (b).	56
Figura 50 – Restrição utilizada - na esfera (a) e na base (b).	57
Figura 51 - Representação da carga aplicada.	57
Figura 52 - Parâmetros de malha.	58
Figura 53 - Método de medição da área aproximada de contacto - vista superior em corte (a), vista lateral em corte (b) e representação geométrica da área de contacto através de uma elipse (c). ...	58
Figura 54 - Simulação de funcionamento - modelo E0 (vista superior em corte).	59
Figura 55 - Simulação de funcionamento - modelo E0 (vista lateral em corte).	59
Figura 56 - Simulação de funcionamento - modelo E2 (vista superior em corte).	59
Figura 57 - Simulação de funcionamento - modelo E2 (vista lateral em corte).	59
Figura 58 - Simulação de funcionamento - modelo E4 (vista superior em corte).	59
Figura 59 - Simulação de funcionamento - modelo E4 (vista lateral em corte).	59
Figura 60 - Simulação de funcionamento - modelo E5 (vista superior em corte).	60
Figura 61 - Simulação de funcionamento - modelo E5 (vista lateral em corte).	60
Figura 62 - Vista isométrica do modelo E2.2.	61
Figura 63 - Simulação de funcionamento - modelo E2.2 (vista superior em corte).	61
Figura 64 - Simulação de funcionamento - modelo E2.2 (vista lateral em corte).	61
Figura 65 - Ilustração do conceito inicial do mecanismo global.	62
Figura 66 - Ilustração da fase intermédia de desenvolvimento do mecanismo geral - adaptação ao atuador A (a), ao atuador B (b), ao atuador C (c) e ao atuador D (c).	62
Figura 67 - <i>Battery-less Absolute Encoder Type – LEY</i> [61].	63

Figura 68 - <i>Motorized Lead Screw Actuator</i> [62].	63
Figura 69 - <i>Motorized Lead Screw Actuator</i> [63].	63
Figura 70 - LGA281S10-B-THCA-038 - <i>captive linear actuator – nema 11</i> [64].	63
Figura 71 - Progressão da peça SG_P01_Base_Inferior - fase inicial (a), fase intermédia (b) e fase final (c).	64
Figura 72 - Ilustração do conceito final do mecanismo global.	64
Figura 73 - Renderização da solução final - montada no robô (a), em vista detalhada do conjunto em posição aberta (b) e fechada (c).	65
Figura 74 - Sequência de funcionamento do <i>gripper</i> - posição inicial aberta (a) e posição final (fechada).	66
Figura 75 - Apresentação dos componentes principais do <i>gripper</i> e lista de componentes.....	66
Figura 76 - Base inferior - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	67
Figura 77 - Vistas dos furos de ligação da peça (a) e em detalhe de um furo de ligação com a base superior (b).	67
Figura 78 - Base superior - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).....	68
Figura 79 - Representação das características de ligação da base superior - vista inferior (a), vista superior (b) e vista em detalhe das abas de ligação ao braço e do furo para as guias (c).	68
Figura 80 - Braço - vista do componente sozinho (a) e montado no conjunto (b).	69
Figura 81 - Vista em detalhe do componente braço montado no conjunto.	69
Figura 82 - Plataforma - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	70
Figura 83 - Parte inferior da plataforma.	70
Figura 84 - Adaptador - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	71
Figura 85 - Vista em detalhe dos raios de concordância do adaptador.	71
Figura 86 - Dedo - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	72
Figura 87 - Detalhes do dedo - nos tirantes (a) e na parede (b).	72
Figura 88 - Atuador - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	73
Figura 89 - LGA281S10-B-THCA-038 - <i>captive linear actuator – nema 11</i> [64].	73
Figura 90 – Braço robótico - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).	74
Figura 91 - Kuka LBR iiwa 14 R820 [56].	74
Figura 92 - Filamento de PLA – PLA Sandard White [66].	75
Figura 93 - Propriedades do PLA Standard White [66].	75
Figura 94 - Exemplo de aplicação em Grey Pro Resin [67].	76

Figura 95 - Propriedades do Grey Pro Resin (adaptado de [67]).....	76
Figura 96 - Ultrasint TPU 90A-01 [69].....	77
Figura 97 - Propriedades do Ultrasint TPU 90A-01 (adaptado de [68]).....	77
Figura 98 - Impressora 3D – FFF (adaptado de[70]).	78
Figura 99 - Impressora 3D – SLA (adaptado de [71]).	78
Figura 100 - Representação esquemática do processo de fabrico HP <i>Multi jet fusion</i> (adaptado de [72]) – colocação de uma camada de material (a), controlo térmico (b), aplicação de um agente de fusão (c), aplicação de um agente de detalhe (d), fusão (e) e final da etapa (f).	79
Figura 101 - Vista do conjunto pronto para simular o estudo.....	80
Figura 102 - Propriedades dos materiais – Ultrasint TPU 90A-01 (a) e PLA (b).	81
Figura 103 - Representação das ligações <i>pin</i> utilizadas.....	81
Figura 104 - Ilustração dos <i>contact set's</i> utilizados - entre o dedo e a esfera (a) e entre o braço e o adaptador (b).	82
Figura 105 - Fixação utilizada - na esfera (a) e na base inferior (b).	82
Figura 106 - Restrição utilizada no furo central da plataforma.	82
Figura 107 - Representação da carga aplicada - na plataforma (a) e na base superior (b).	83
Figura 108 - Parâmetros de malha.	83
Figura 109 - Resultados do estudo 1 - tensão equivalente de von Mises.	84
Figura 110 – Estudo 1 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).	84
Figura 111 - Resultados do estudo 2- tensão equivalente de von Mises.	85
Figura 112 - Estudo 2 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).	85
Figura 113 - Resultados do estudo 3- tensão equivalente de von Mises.	86
Figura 114 - Estudo 3 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).	86
Figura 115 - 1ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	88
Figura 116 - Pino alinhador.	88
Figura 117 - Parafuso M6.	88
Figura 118 - 2ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	89

Figura 119 - Inserto.	89
Figura 120 - Parafuso M2.5.	89
Figura 121 - 3ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	90
Figura 122 - Pino alinhador.	90
Figura 123 - Parafuso M5.	90
Figura 124 - 4ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	91
Figura 125 - Parafuso de ombro.	91
Figura 126 - Anilha.....	91
Figura 127 - Porca M2.5.	91
Figura 128 - 5ª parte da montagem - vista explodida da montagem.....	92
Figura 129 - Casquilho.	92
Figura 130 - 6ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	93
Figura 131 - Pino guia.	93
Figura 132 - Anilha.....	93
Figura 133 - Porca M4.	93
Figura 134 - 7ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	94
Figura 135 - Pino.....	94
Figura 136 - 8ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).....	95
Figura 137 - Parafuso de ombro.	95
Figura 138 - Parafuso de ombro.	95
Figura 139 - Anilha.....	95
Figura 140 - Porca M2.5.	95
Figura 141 - Conjunto dos componentes prototipados.....	97
Figura 142 - Protótipo da base inferior.	98
Figura 143 - Protótipo da base superior.....	98
Figura 144 - Protótipo do braço.	98
Figura 145 - Protótipo da plataforma.....	99

Figura 146 - Protótipo do adaptador.....	99
Figura 147 - Protótipo do dedo.	99
Figura 148 - Protótipo final após montagem.....	100
Figura 149 - Objetos de teste - maçã (a), laranja (b) e pera (c).	101
Figura 150 - Resultado da simulação (estudo 1).	101
Figura 151 - Resultado do ensaio prático 1.	102
Figura 152 - Resultado do ensaio prático 2.	102
Figura 153 - Resultado do ensaio prático 3.	102
Figura 154 - Protótipo completo validado.....	103

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Os fatores de desencadeamento e as vantagens da Indústria 4.0 (adaptado de [1-10])	12
Tabela 2 - Tipos de sensor de aplicação comum	16
Tabela 3 - Estado da arte - <i>Soft Robotics</i>	31
Tabela 4 - Análise SWOT das soluções concebidas	50
Tabela 5 - Modelos conceituais (E0 a E7)	51
Tabela 6 - Análise dos estudos feitos aos 4 modelos mais relevantes	59
Tabela 7 - Análise do estudo feito ao modelo E2.2	61
Tabela 8 - Comparação dos 4 modelos de atuador considerados.....	63
Tabela 9 - Resultados dos estudos realizados	87
Tabela 10 - Parâmetros limite do <i>gripper</i>	87
Tabela 11 - Componentes de ligação relativos à 1ª fase da montagem.....	88
Tabela 12 - Componentes de ligação relativos à 2ª fase da montagem.....	89
Tabela 13 - Componentes de ligação relativos à 3ª fase da montagem.....	90
Tabela 14 - Componentes de ligação relativos à 4ª fase da montagem.....	91
Tabela 15 - Componentes de ligação relativos à 5ª fase da montagem.....	92
Tabela 16 - Componentes de ligação relativos à 6ª fase da montagem.....	93
Tabela 17 - Componentes de ligação relativos à 7ª fase da montagem.....	94
Tabela 18 - Componentes de ligação relativos à 8ª fase da montagem.....	95
Tabela 19 - Lista de peças com análise de custos.....	96
Tabela 20 - Protótipos fabricados.....	98
Tabela 21 - Resultados dos ensaios realizados.....	101
Tabela 22 - Avaliação de cumprimento de objetivos iniciais.....	107

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
1.4	Entidade acolhedora	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Indústria 4.0	9
2.1.1	Conceitos fundamentais.....	10
2.1.2	Tecnologias associadas.....	11
2.1.2.1	Big data	11
2.1.2.2	Advanced analytics	11
2.1.2.3	Cloud computing.....	11
2.1.2.4	Internet das coisas	12
2.1.3	Vantagens na aplicação na indústria.....	12
2.2	Robótica	13
2.2.1	Contextualização	13
2.2.2	Robótica na indústria	14
2.2.3	Sensores e atuadores	15
2.2.3.1	Sensores.....	15
2.2.3.2	Atuadores	17
2.2.4	Robôs colaborativos	18
2.3	<i>Soft robotics</i>	20
2.3.1	Introdução e aplicações.....	20
2.3.2	Materiais	22

2.3.3	Atuadores	24
2.3.4	Sensorização	26
2.4	Fabrico aditivo direcionado à <i>soft robotics</i>	28
2.4.1	Conceito	28
2.4.2	Grupos de processo	28
2.4.3	Fabrico rápido de moldes	29
2.4.4	Fabrico híbrido	30
2.4.5	Fabrico totalmente aditivo	30
2.5	Estado da arte	31
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	Apresentação da entidade acolhedora	37
3.1.1	Natureza e Objetivo	37
3.1.2	Missão e Visão	37
3.1.3	Estrutura Organizativa	37
3.2	Objetivos do trabalho	38
3.2.1	Requisitos e condicionantes	38
3.3	Soluções disponíveis semelhantes	39
3.3.1	Adaptive gripper finger DHAS, FESTO	39
3.3.2	Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping	40
3.3.3	Four fingers lip	41
3.4	Anteprojeto	43
3.4.1	Diferentes soluções consideradas	43
3.4.1.1	Solução A	43
3.4.1.2	Solução B	45
3.4.1.3	Solução C	46
3.4.1.4	Solução D	47
3.4.1.5	Solução E	49
3.4.2	Análise SWOT	50

3.4.3	Discussão e seleção da solução a desenvolver	51
3.4.3.1	Dedo.....	51
3.4.3.2	Mecanismo global.....	62
3.5	Projeto.....	65
3.5.1	Solução final implementada	65
3.5.1.1	Base inferior	67
3.5.1.2	Base superior	68
3.5.1.3	Braço	69
3.5.1.4	Plataforma	70
3.5.1.5	Adaptador	71
3.5.1.6	Dedo.....	72
3.5.1.7	Atuador	73
3.5.1.8	Kuka LBR iiwa 14 R820	74
3.5.2	Escolha de materiais.....	75
3.5.3	Processos de fabrico.....	78
3.5.4	Análise de esforços e dimensionamento.....	80
3.5.5	Montagem	88
3.5.6	Análise de custos	96
3.6	Validação e protótipo.....	97
3.6.1	Impressão 3D do modelo	97
3.6.2	Testes realizados	101
3.6.3	Validação da solução	103
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	107
4.1	Conclusões	107
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	109
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	113
6	ANEXOS.....	121

6.1	Desenhos de montagem	121
6.2	Desenhos de conjunto	131
6.3	Desenhos de definição	135
6.4	Propriedades do PLA	143
6.5	Propriedades do Grey Pro Resin	147
6.6	Propriedades do Ultrasint TPU 90A-01	151

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação
- 1.4 Entidade acolhedora

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No contexto da atual revolução industrial que vivemos, urge uma necessidade em automatizar processos de forma a aumentar a dinâmica na indústria em si. À medida que são criadas novas soluções, vão aparecendo novos desafios. Com esta crescente necessidade, a aplicação da robótica para a manipulação de componentes nos ambientes produtivos é cada vez mais pertinente, visto que a robótica é um dos grandes pilares desta Indústria 4.0. É derivado desta necessidade corrente que nasce a robótica de corpos moles (*soft robotics*). Inspirada pela natureza, esta nova área destaca-se pela incorporação de materiais macios nas suas aplicações com o intuito de equipar robôs para necessidades imprevisíveis. Esta nova disciplina, ainda que recente, desempenha um papel importante para a flexibilização dos processos automáticos, destacando-se como uma das áreas da automação com maior potencial, podendo ser vista como o futuro da adaptabilidade na indústria, assim como em praticamente todos os seus subcampos (indústria alimentar, automóvel, entre outros).

1.2 Objetivos

O presente projeto tem como foco o desenvolvimento e prototipagem de uma aplicação de *soft robotics*, bem como a sua integração com um robô antropomórfico colaborativo, permitindo a este realizar operações de manipulação ou outras em ambiente colaborativo. Este tipo de equipamento deverá fazer uso intensivo de tecnologia de impressão tridimensional na sua construção. Por outro lado, este equipamento deve também integrar e comunicar numa rede de informação baseada nos novos conceitos da 4ª revolução industrial (indústria 4.0), disponibilizando os seus dados de controlo de processo e meio ambiente numa infraestrutura informática local.

Baseado em recente e inúmero conteúdo científico disponível, pretende-se que o projeto se inicie com um alargado trabalho de identificação do estado de arte. Seguidamente proceder-se-á à geração e teste de conceitos recorrendo a materializações simplificadas através de impressão tridimensional. A aplicação desenvolvida será posteriormente testada e integrada num robô antropomórfico colaborativo ligeiro já existente. Em seguida, será materializada uma prova do conceito, assente numa lógica de sistema simplificado, podendo executar operações

complexas que se identifiquem interessantes para um ambiente real de produção. Finalmente será realizada ou finalizada a redação da dissertação.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por quatro capítulos principais, que são:

1. Introdução – nesta primeira instância é apresentado um enquadramento geral do tema, assim como os objetivos da dissertação, a organização da mesma e a entidade acolhedora;
2. Revisão bibliográfica – este segundo capítulo apresenta uma resenha teórica sobre os temas diretamente relacionados com a presente dissertação, percorrendo uma linha lógica de encadeamento de ideias e matérias. A revisão bibliográfica inicia-se com uma breve contextualização da indústria, em particular, à atualidade da mesma, abordando a Indústria 4.0. Segue com a inserção do tema da robótica, assim como papel desta área na atual revolução industrial. Posteriormente é apresentado o tema fulcral desta dissertação, a *soft robotics*, assim como os seus subtemas mais relevantes para o projeto apresentado. De seguida é introduzido o conceito de fabrico aditivo e apresentadas as suas tecnologias direcionadas para a *soft robotics*. Por fim está apresentado um estado da arte, servindo este para condensar as ideias anteriormente expostas assim como mostrar alguns dos trabalhos mais relevantes na área;
3. Desenvolvimento – neste capítulo está detalhada a sequência lógica do projeto desenvolvido, explicando ao leitor todas as decisões e justificações das diversas etapas deste processo. Este capítulo inicia com um enquadramento do problema, a apresentação da entidade acolhedora e seguidamente os objetivos do trabalho. Segue uma exposição de várias soluções atualmente comercializadas que serviram de referência para a criação de novos conceitos. Após este trabalho de pesquisa é atingida uma das fases mais importantes desta dissertação, o anteprojecto, onde é descrito o processo criativo de desenvolvimento das soluções concebidas, assim como os critérios de aprovação ou rejeição das mesmas, e ainda vários estudos que suportam estas decisões. Terminada esta etapa, é então exibido o conceito final completo, acompanhado com a escolha de materiais, os processos de fabrico envolvidos, as análises de esforços, a montagem do conjunto e uma detalhada análise de custos. Este terceiro capítulo termina com os resultados finais do projeto referido, apresentando o modelo em protótipo;
4. Conclusões e propostas de trabalhos futuros – neste último capítulo são apresentadas as considerações finais resultantes do projeto, assim como oportunidades futuras derivadas do projeto apresentado.

1.4 Entidade acolhedora

O projeto apresentado nesta dissertação foi desenvolvido durante um estágio curricular realizado no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Indústria 4.0
- 2.2 Robótica
- 2.3 *Soft robotics*
- 2.4 Fabrico aditivo direcionado à *soft robotics*
- 2.5 Estado da arte

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria 4.0

Indústria é uma atividade económica bastante importante na sociedade de hoje em dia, que tem como finalidade produzir bens a partir de matérias-primas.

O início da história da indústria remonta aos séculos XVIII e XIX (algures entre 1760 e 1840), na Inglaterra, com a primeira revolução industrial. Esta revolução é caracterizada pela substituição progressiva dos métodos artesanais por máquinas e ferramentas, assim como pela exploração do carvão como fonte de energia e pelo aumento do uso da energia do vapor [1].

Nas seguintes décadas e sensivelmente até 1945 surgem as primeiras linhas de produção que vêm abrir as portas à produção em massa, baixando os custos totais, dando origem à segunda revolução industrial [1].

Surge, posteriormente, entre 1950 e 1970 a terceira revolução industrial, denominada por revolução digital. Foi assim denominada devido ao desenvolvimento e uso de semicondutores e computadores, à automação e robotização das linhas de produção, com o armazenamento da informação processada de forma digital, e com o desenvolvimento da internet [1].

Chegando ao início do século XXI, nasce a necessidade de converter as máquinas normais em máquinas inteligentes para aumentar a sua performance geral e a sua capacidade de manutenção autónoma. Com isto inicia-se a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, direcionada à construção de uma plataforma aberta e inteligente para a partilha de informação, *Industrial-Network* [2].

Na Figura 1 estão apresentadas por ordem cronológica as quatro revoluções industriais anteriormente descritas.



Figura 1 - As quatro revoluções industriais [3].

Chegou-se a uma época descrita como a “segunda idade da máquina”, que vem trazer a habilidade dos computadores e dos outros avanços digitais pensarem como cérebros. Isto é, está-se a conseguir ultrapassar certas limitações e estão a ser atingidos novos territórios de conhecimento [4].

2.1.1 *Conceitos fundamentais*

O termo Indústria 4.0 está normalmente associado a uma vasta gama de conceitos atuais que servem para caracterizar a visão desta revolução industrial [5]. Estes conceitos são:

- **Smart Factory** – fábricas equipadas de sensores, atuadores e sistemas autónomos, para que cada uma destas fábricas seja dotada de capacidade de perceção, intercomunicação e organização de dados [6];
- **Cyber-physical Systems (CPS)** – fusão dos níveis físico e digital. Se isto abranger o nível de produção, bem como o dos produtos, surgem sistemas cuja representação física e digital já não pode ser diferenciada de forma razoável. Um exemplo pode ser observado na área da manutenção preventiva: os parâmetros do processo (por exemplo tempo de produção) dos componentes mecânicos subjacentes a um desgaste (físico) são registados digitalmente. Assim o sistema resulta de um objeto físico com parâmetros digitais do processo [5];
- **Self-organization** – os sistemas de fabrico existentes estão a tornar-se cada vez mais descentralizados, o que leva a uma decomposição da hierarquia clássica de produção e uma mudança para a auto-organização descentralizada [5];
- **Sistemas novos de distribuição e compras** – estes sistemas serão cada vez mais individualizados;
- **Sistemas novos de desenvolvimento de produtos e serviços** – estes sistemas serão também individualizados. Neste contexto, abordagens de inovação aberta e inteligência de produtos, bem como memória de produto são de grande importância [5];
- **Adaptação às necessidades humanas** – os novos sistemas de produção serão desenhados para acompanhar ainda mais as necessidades humanas;
- **Responsabilidade social corporativa** – a sustentabilidade e a eficiência dos recursos são fatores cada vez mais ligados à conceção de processos de fabrico. Estes fatores constituem condições fundamentais para os produtos que são fabricados.

2.1.2 Tecnologias associadas

2.1.2.1 Big data

O termo *Big Data* relaciona-se com a necessidade crescente de armazenar e processar grandes quantidades de dados provenientes de milhões de sistemas atualmente ligados [1]. Esta recolha e processamento de dados, assim como a rápida troca de informação, tornar-se-ão bases normais de apoio à decisão [2].

É possível perceber melhor este conceito através da definição de Forrester [7], que diz que o conceito *Big Data* se divide em quatro dimensões:

- **Volume** – quantidade de informação;
- **Variedade** – variedade de informação;
- **Velocidade** – velocidade de geração e de análise de informação;
- **Valor** – valor da informação.

2.1.2.2 Advanced analytics

Advanced analytics é um termo utilizado para caracterizar um grupo de métodos e ferramentas de alto nível de desempenho no processamento de dados. Estes métodos e ferramentas são necessários para analisar e compreender totalmente o desempenho dos processos de fabrico, a qualidade dos produtos e a otimização da cadeia de abastecimento. São também uma maneira para identificar ineficiências do processo, baseando-se nos historiais de dados fornecidos, e permitindo assim a execução de ações de manutenção corretivas e preventivas [8].

As análises relacionadas com este tema podem-se dividir em dois tipos:

- Análises que podem ser executadas de forma *offline*, usando sistemas estatísticos bastante sofisticados;
- Análises cujas ações corretivas devem ser desencadeadas o mais rápido possível, até mesmo antes da informação ser armazenada (análises em tempo real).

2.1.2.3 Cloud computing

Outro conceito associado à Indústria 4.0 é o *Cloud Computing* [2]. Esta tecnologia refere-se ao fornecimento de serviços informáticos através da internet, incluindo servidores, bases de dados e outros serviços de armazenamento, e também programas de análise e processamento de dados. É uma alternativa a comprar e manter centros e servidores físicos de informação, pois é possível aceder a estes serviços tecnológicos, enumerados anteriormente, à medida que estes se mostrem necessários.

Para concluir, esta tecnologia revela-se como uma solução económica e eficiente de processamento e computação de informação.

2.1.2.4 Internet das coisas

A internet das coisas ou *Internet of Things* (IoT) traduz-se numa rede mundial de intercomunicação [2]. Neste momento a IoT começou a ser denominada por internet de tudo ou *Internet of Everything* (IoE), pois um sistema era criado não só de objetos mas também de processos, informação, pessoas e até animais ou fenómenos atmosféricos – tudo pode ser tratado como uma variável [7]. As três características distintivas da IoT são:

- **Contexto** – refere-se à possibilidade de interação de um objeto com o meio envolvente assim como a resposta imediata desse objeto à mudança do ambiente;
- **Omnipresença** – ilustra o facto de os objetos, atualmente, serem muito mais do que conexões para uma rede de utilizadores de operadores humanos. Num futuro próximo, estes objetos comunicarão entre si em grande escala;
- **Otimização** – é a expressão da funcionalidade que cada objeto possui.

2.1.3 Vantagens na aplicação na indústria

Para perceber melhor as vantagens da aplicação dos conceitos da indústria 4.0 na atualidade, é necessário perceber primeiro as razões e os fatores que levaram à sua criação. Conhecendo estas forças que levaram à Indústria 4.0, faz sentido agora abordar as vantagens da mesma. A principal arma que vem associada a esta revolução industrial é a capacidade que oferece de operar informação de maneira instantânea [9]. De forma sucinta, os fatores de desencadeamento e as vantagens de uma indústria tão poderosa como a que se relata, estão apresentados na Tabela 1 [1-10].

Tabela 1 - Os fatores de desencadeamento e as vantagens da Indústria 4.0 (adaptado de [1-10])

Fatores sociais, económicos e políticos	Fatores tecnológicos	Vantagens
Necessidade de encurtar os períodos de desenvolvimento;	Necessidade de aumentar ainda mais as áreas de mecanização e automação;	Redução de custos;
Necessidade de individualização de produtos;	O aumento da digitalização da produção e das suas ferramentas;	Economia energética (tecnologia atualizada e eficiente);
Necessária uma enorme flexibilidade;	Miniaturização de aparelhos digitais.	Conservação do ambiente;
Necessário reduzir as hierarquias organizacionais através da descentralização;		Diminuição drástica de erros;
Importância na eficiência dos recursos.		Aumento de segurança;
		Transparência nos negócios;
		Personalização de produtos;
		Aumento da qualidade de vida.

2.2 Robótica

2.2.1 Contextualização

Em geral é sempre importante, ao abordar um tema, tentar definir os seus conceitos no início, tanto é que muitos dos artigos e dos livros disponíveis sobre este tema iniciam-se com uma definição, retirada do dicionário, da palavra robot. No entanto não existe uma definição universal de robô que seja aceite pela comunidade, pois não consegue existir uma definição suficientemente específica sobre robôs que não exclua algum tipo de robô (exemplo: *um robô é uma máquina capaz de manipular objetos sólidos* – isto exclui alguns robôs, como robôs de soldadura) e é impensável usar uma definição mais abrangente, pois não é possível fazê-lo sem abranger outros tipos de tecnologia (exemplo: *o robô é uma máquina capaz de ser reprogramada* – esta definição não exclui computadores ou até máquinas de lavar, que não são robôs) [11].

Derivado da sua história, a robótica tornou-se numa disciplina vasta e eclética. O estudo de robôs abrange elementos, tanto de engenharia mecânica e engenharia eletrotécnica, como de teoria de controlo, programação e inteligência artificial [11].

Tem havido um interesse crescente em robôs, em aparelhos robóticos e sistemas inteligentes. Combinando estas tecnologias com os avanços em eletrónica, em controlos e em visão computacional com outras tecnologias de sensores e computação cria-se um enorme potencial de aplicação em possivelmente qualquer área em que existem máquinas na nossa sociedade [12]. E como foi referido no subcapítulo anterior, o desenvolvimento da robótica é uma das grandes forças que impulsionaram o arranque da quarta revolução industrial.

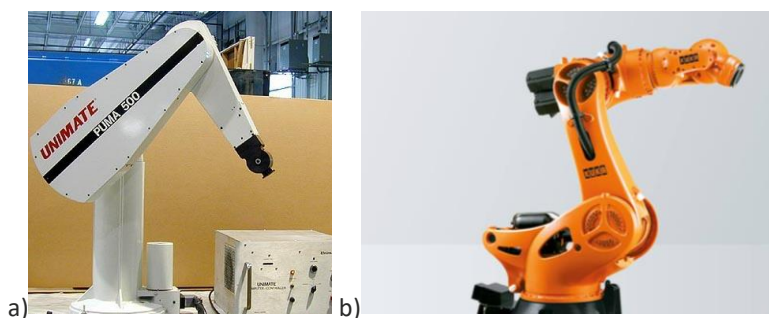


Figura 2 – Robô PUMA 500 [13] (a) e KUKA KR 1000 Titan (adaptado de [14]) (b).

Como na maioria das áreas, a inovação nasce da necessidade e a robótica não é exceção. Assim, em 1961 a empresa Unimation Inc. desenvolveu o primeiro robô industrial com seis graus de liberdade, o Unimate, para manusear eficientemente materiais fundidos e soldar, substituindo pessoas no trabalho. A influência do Unimate chegou ao setor automóvel, e o seu conceito de braço robótico atingiu a área de medicina com a invenção do *Programable Universal Manipulation Arm (PUMA)* que está apresentado na Figura 2 (a) [13].

Este tipo de mecanismo foi desenvolvido e aprimorado, obtendo-se nos dias de hoje soluções bastante melhores. Pode-se considerar como exemplo a KUKA, cujo modelo KR 1000 Titan se pode observar também na Figura 2 (b). Esta empresa fabrica braços robotizados com uma capacidade de carga até 1300 kg, com características como precisão e rapidez a distâncias de até 6,5 m.

Se não é fácil definir o que são robôs, também não é, de todo, fácil definir as categorias nas quais cada tipo de robô se insere. Cada robô tem as suas funcionalidades próprias, assim como as suas dimensões, formas e capacidades. Desde soluções adaptadas para auxiliar as tarefas do dia a dia, até aplicações militares, o campo da robótica apresenta-se vasto e abrangente.

2.2.2 Robótica na indústria

Após a breve introdução do tema robótica apresentada anteriormente é importante aprofundar o conhecimento da aplicação desta área na indústria, no âmbito deste projeto. Desta forma, é possível definir melhor o conceito de robô, como robô industrial que, segundo a norma ISO 8373, é um manipulador controlado em posição, reprogramável e multifuncional, que tem um ou vários graus de liberdade, capaz de manipular materiais, peças, ferramentas, ou dispositivos especializados através de movimentos programados para o desempenho de variadas funções [15].

A configuração geral dos robôs industriais inclui um manipulador, um controlador e ainda uma interface com o utilizador, conforme apresentado na Figura 3.

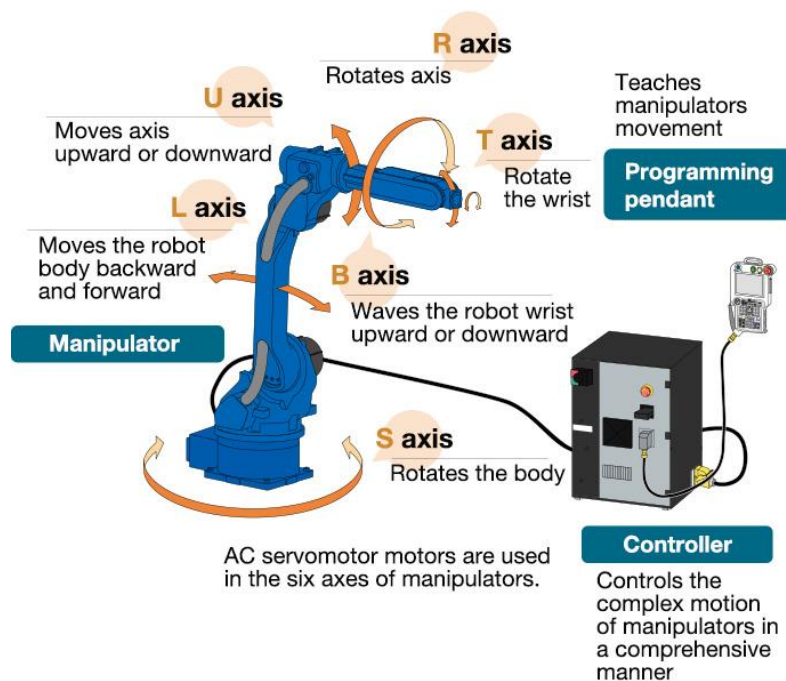


Figura 3 - Configuração geral de um robô industrial [16].

Hoje em dia, aos robôs industriais atribui-se um papel fundamental nas linhas de produção na indústria. A utilização de aplicações de robôs tem sido uma forte aposta ao longo dos últimos anos, uma vez que a robotização permite a montagem de diferentes componentes na mesma linha de montagem, o que possibilita uma redução de custos de produção em pequenas e médias produções, quando comparada com a utilização de linhas de montagem com recurso a automação dedicada ou de mão de obra humana [17].

2.2.3 Sensores e atuadores

Como foi possível verificar anteriormente, a robótica é uma disciplina fundamental para a indústria 4.0. Neste seguimento de raciocínio é importante conhecer e perceber a tecnologia dos sensores e dos atuadores presentes em sistemas robóticos, assim como a maneira como estes comunicam entre si. Desta forma, e também no âmbito do trabalho desta dissertação, este subcapítulo aborda estes tipos de tecnologia.

2.2.3.1 Sensores

Sendo um sensor um dispositivo capaz de detetar e responder de forma eficiente a um estímulo, seja este na forma de calor, pressão, luz ou movimento, este tipo de tecnologia permite que um robô possa interagir com o meio ambiente que o rodeia, introduzindo assim um maior nível de inteligência na máquina [18].

Existem inúmeros tipos de sensores, como sensores acústicos (ex.: sonar), sensores elétricos (para deteção de alterações de corrente ou de tensão), sensores mecânicos (para deteção de presença de objetos), sensores óticos ou fotoelétricos (ex.: sensor usado nos ratos de computador), sensores térmicos, sensores magnéticos (ex.: alarmes de fecho de portas e janelas) e dentro deste tipo de sensores existem também sensores indutivos (capazes de detetar a presença de materiais metálicos).

Relacionando os sensores com a sua aplicação em robôs, é possível afirmar que os sensores estão divididos em dois tipos [18]:

- Sensores internos que servem para medir parâmetros internos do robot;
- Sensores externos que avaliam o ambiente exterior no qual o robô se encontra inserido.



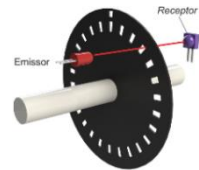
Quanto aos sensores internos, estes podem ser acelerómetros (que servem para medir a própria aceleração do sistema), giroscópios (que servem para verificar a direção de um sistema), potenciómetros (que servem para controlar a intensidade de corrente elétrica num circuito), entres outros.

No âmbito deste trabalho os sensores externos mostram-se mais relevantes, e por isso, serão mais aprofundados seguidamente.

Existem bastantes aplicações na área da robótica que procuram igualar a sensibilidade humana ao toque. Ao contrário de sensores de força e de momento que medem as forças aplicadas num objeto, os sensores tácteis permitem efetuar medições de parâmetros que definem o contacto entre o sensor e o objeto (interação localizada). O reconhecimento da forma do objeto e da rugosidade da superfície só são possíveis se os sistemas sensoriais e motores forem usados de modo a fornecer percepção háptica. A percepção tátil não depende apenas de *hardware*, mas também depende bastante de *software*, ou seja, o desempenho de um sistema háptico é altamente determinado pelo processamento de sinal e algoritmos implementados por fusão de dados dos sensores [19].

Existe no mercado uma vasta gama de sensores que são usados nos sistemas automáticos na indústria. Na Tabela 2 estão apresentados alguns tipos de sensores utilizados.

Tabela 2 - Tipos de sensor de aplicação comum

Sensor	Descrição	Imagem
Sensor de proximidade	<ul style="list-style-type: none"> • Indutivos: baseiam-se na variação da indutância, ou seja, só são acionados por metais ferrosos; • Capacitivos: baseiam-se na variação da capacitância, isto é, são acionados por qualquer material. 	 <p>Figura 4 - Sensor de proximidade indutivo [20].</p>
Sensor linear ótico	<p>Baseiam-se na aplicação de emissores e recetores de luz na parte móvel de uma régua graduada, que por sua vez permite a passagem ou reflexão de apenas alguns feixes de luz emitidos. Estes são detetados pelos recetores e indicam a posição da parte móvel em relação à fixa.</p>	 <p>Figura 5 - Sensor ótico de deslocamento linear [21].</p>
Sensor rotativo ótico (encoder)	<p>Possuem funcionamento semelhante ao dos sensores lineares óticos, mas a régua móvel é substituída por um disco.</p>	 <p>Figura 6 - Composição do encoder [22].</p>

Sensor	Descrição	Imagem
Encoder incremental	Fornecem informações sobre o movimento e a direção de rotação de um motor. Geram um determinado número de impulsos, e cada impulso representa a medida da distância movida (angular ou linear).	 <p>Figura 7 - Encoder incremental [23].</p>
Encoder absoluto	Permitem informações mais rigorosas que os incrementais, uma vez que possuem a capacidade de determinar a posição física de um dado elemento, sem a necessidade de fixar a posição inicial, isto porque o <i>encoder</i> transmite ao controlador um sinal diferente em cada posição.	 <p>Figura 8 - Encoder absoluto [24].</p>

2.2.3.2 Atuadores

Os atuadores, ou sistemas de acionamento, são dispositivos, que ao contrário dos sensores, a sua função passa por converter um sinal elétrico, num parâmetro físico. Segundo Groover [25], os atuadores estão essencialmente divididos em três categorias:

- **Atuadores elétricos** – Dos três tipos de sistemas convencionais de atuadores, os motores elétricos têm a maior variedade de dispositivos possíveis, tais como motores de corrente contínua (CC) e suas variantes (com e sem escova, baixa inércia, condução orientada e direta, ímã permanente), motores de corrente alternada (CA), motores de indução e motores passo a passo. Por definição, o princípio por trás de um motor elétrico é simples, consiste na aplicação de campos magnéticos a um núcleo ferroso, induzindo assim movimento [26];
- **Atuadores hidráulicos** – este tipo de atuadores funciona devido a mudanças de pressão. É capaz de desempenhar funções lineares e rotativas, sendo que o mecanismo linear pode ser de simples ou duplo efeito. Este mecanismo linear geral consiste num pistão presente dentro de uma câmara com uma haste ligada ao mesmo. A haste serve como a ligação da transmissão de energia entre o pistão e o exterior [26];
- **Atuadores pneumáticos** – atuadores que são considerados descendentes diretos de sistemas hidráulicos. A principal diferença entre este tipo de atuadores e os atuadores hidráulicos é que estes atuadores utilizam gás compressível como forma de transmissão de energia [26].

2.2.4 Robôs colaborativos

Ainda dentro do tema da robótica, um conceito importante para abordar, é o robô colaborativo. Este conceito tem sido usado cada vez mais para indicar um robô que trabalha lado a lado com seres humanos. Segundo a norma ISO/TS 15066 o robô colaborativo, a operação de colaboração e o espaço de colaboração são definidos da seguinte maneira [27] :

- Um robô colaborativo é um robô que pode ser usado numa operação colaborativa;
- Uma operação colaborativa consiste numa operação desenhada propositadamente para a cooperação entre o trabalho de robôs com seres humanos, num espaço definido de colaboração;
- Um espaço de colaboração é um espaço de trabalho num ambiente seguro, no qual um robô e um ser humano possam trabalhar em simultâneo durante uma operação de produção.

Visto que os operadores humanos e os robôs partilham o mesmo espaço, *collaborative work space* (CWS), para reduzir o número de riscos associados, a operação de colaboração, segundo a norma ISO/TS 15066, tem de seguir uma das seguintes tecnologias apresentadas na Figura 9 [27]:

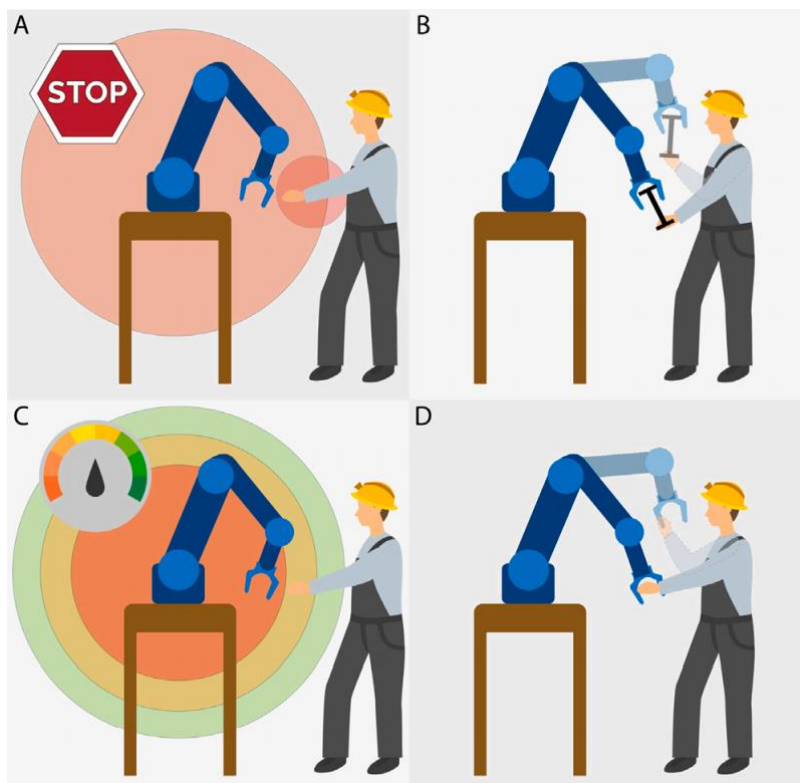


Figura 9 – Paragem monitorizada em segurança (a), guia de mão (b), monitorização de velocidade (c) e limitação de força e de potência (d) [27].

Atualmente, a maioria dos robôs industriais existentes ainda são bastante limitados pelo meio ambiente e na interação com seres humanos. Desta forma, o desenvolvimento de vários sistemas de robôs colaborativos, nos quais um ser humano pode executar tarefas simultaneamente com o robô, é de grande interesse [28]. Em concordância com os pontos anteriormente apresentados, este percurso que o planeta está a caminhar no sentido da quarta revolução industrial vai de encontro a um futuro no qual, cada vez mais, robôs e seres humanos têm de partilhar os mesmos espaços, enquanto desempenham tarefas diferentes, em simultâneo e de maneira colaborativa. Na Figura 10 é possível observar um exemplo de um robô e um ser humano a executar tarefas distintas em simultâneo.



Figura 10 - Robô colaborativo desempenhando funções com um operador [29].

A capacidade de reconhecimento destas máquinas, assim como as suas técnicas de aprendizagem tornam os robôs capazes de desempenhar funções complexas em variadas situações e ambientes. A disponibilidade de grandes conjuntos de dados e de algoritmos aprimorados, junto com uma capacidade computacional avançada contribuem para avanços de aplicações de *deep neural networks* (DNN). Estes avanços alargam as capacidades de aprendizagem automática em áreas como visão computacional, processamento de linguagem e reconhecimento de vídeo. Ainda que seja um fator fundamental para o desenvolvimento de robôs colaborativos, estas aplicações de DNN, por necessitarem de uma grande capacidade computacional e de um grande espaço para o armazenamento de dados, apresentam um grande desafio, que é satisfazer estas necessidades, sendo necessário recorrer às tecnologias da Indústria 4.0 [30].

2.3 Soft robotics

2.3.1 Introdução e aplicações

A definição de robótica abordada até este capítulo apresenta robôs desenhados em corpos rígidos de maneira a desempenhar tarefas de forma rápida, precisa, repetitiva e para serem capazes de suportar cargas bastante pesadas [31]. No entanto, analisando a natureza, é possível observar que, geralmente, os animais utilizam materiais macios, elásticos e flexíveis para sobreviver em ambientes complexos e não estruturados. Os corpos dos animais são compostos por peles maleáveis e cabelos, músculos elásticos e tendões, e vários órgãos vacilantes.

Tendo em conta estas diferenças entre materiais constituintes de sistemas autônomos artificiais e naturais, tem havido um interesse crescente no estudo de "softness" no contexto de investigação na incorporação da inteligência, para a qual está a emergir o campo da robótica de corpos moles ou *soft robotics* [32].

A área de *soft robotics* visa equipar robôs para necessidades imprevisíveis [31], dotando-os de capacidades que se baseiam não em sistemas de controlo, mas nas propriedades dos materiais e na morfologia dos seus corpos, como é possível ver pelo exemplo apresentado na Figura 11, onde é apresentada uma sequência de movimento de um *soft robot* ao deslocar-se por baixo de uma fenda.

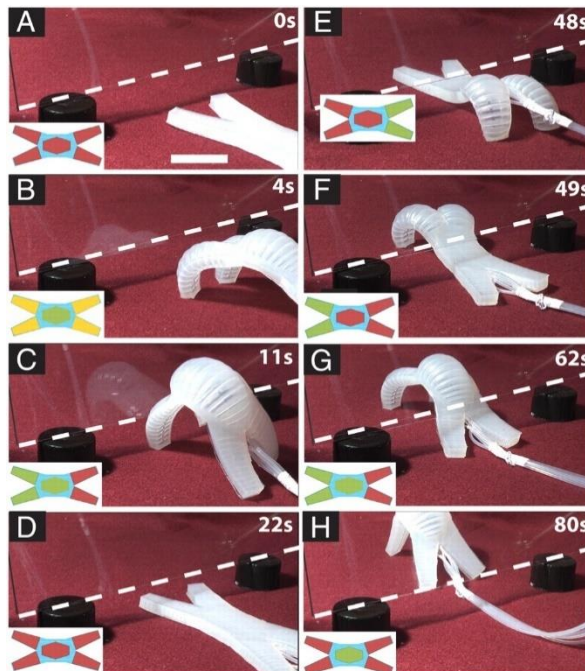


Figura 11 – Sequência de atuação (A-H) de um *soft robot* (*multigait*) ao deslocar-se por baixo de uma fenda [33].

A engenharia por detrás do processo de desenvolvimento de aplicações em *soft robotics* levou a um crescimento enorme na área.

Soft robotics é um campo de investigação que investiga materiais não convencionais e morfologias de sistemas autónomos. Explica a relação entre morfologias e funcionalidades dos corpos constituintes de robôs, aborda os problemas desafiantes da auto-organização, da auto-estabilidade e da auto-montagem dos robôs, com termos concretos de engenharia [32].

Sendo que a sua maior vantagem é a adaptabilidade, é possível encontrar aplicações desta tecnologia em praticamente todas as áreas subjacentes à robótica. Estas aplicações visam ultrapassar certas barreiras e dificuldades que se mostravam impossíveis sem a tecnologia dos *soft robots*.

O campo da biomedicina é um excelente exemplo de tal, pois faz uso das capacidades mecânicas e da versatilidade destes robôs, tanto no desenvolvimento de máquinas e robôs de operação como no desenvolvimento de próteses [34]. Nesta área consideram-se como fatores essenciais a biocompatibilidade e biomimética, isto é, os materiais utilizados têm de ser compatíveis com uma certa extensão do ser humano ou com um certo tecido para garantir o funcionamento e a aceitação do organismo. O uso de *soft robots* neste campo mostra-se revolucionário, pois estes garantem a funcionalidade de uma prótese e a aceitação da mesma, notavelmente melhor do que as soluções antecedentes. A Figura 12 mostra algumas aplicações prostéticas de *soft robots*.

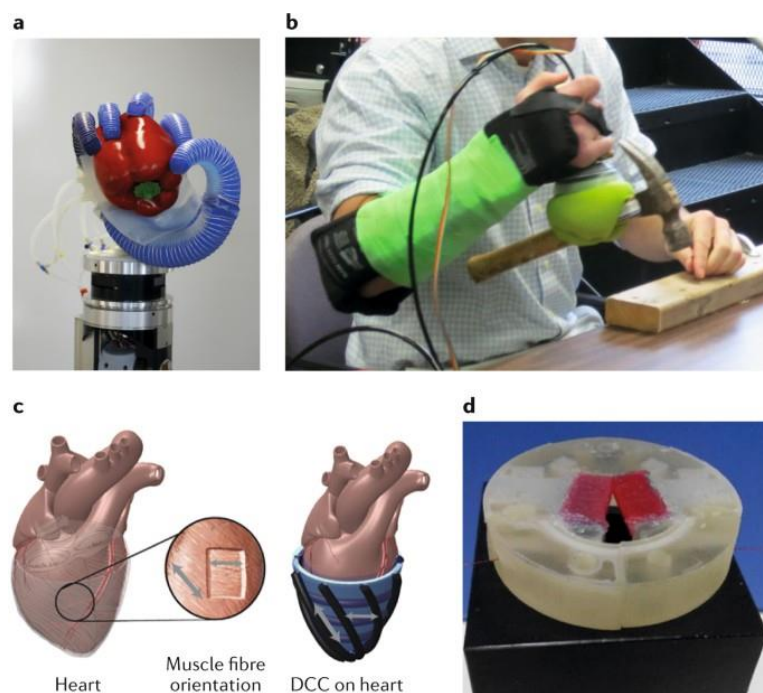


Figura 12 - Próteses de *soft robots* [34] – mão artificial com alta adaptabilidade e estabilidade (a), *soft gripper* de bloqueio granular (b), elastómero em forma de manga para restaurar a funcionalidade de um coração com insuficiência (c) e simulador físico de pregas vocais humanas (d).

Existem ainda inúmeras outras áreas de aplicação que podem ser associados a esta tecnologia. No entanto, uma das áreas que se destaca mais é a indústria, em todas as suas vertentes. Devido à sua competitividade e ao seu crescimento rápido, a indústria tanto faz uso das novas descobertas, assim como a própria traz à comunidade científica inúmeros avanços. Relacionando novamente com a chegada da quarta revolução industrial [2], o conceito de *soft robotics* vem trazer e reforçar conceitos, como a adaptabilidade e facilidade, às linhas de produção das empresas, que cada vez são mais importantes nos dias de hoje. Um dos grandes exemplos disto são os *soft grippers*. Na Figura 13 estão apresentados quatro diferentes *grippers*.

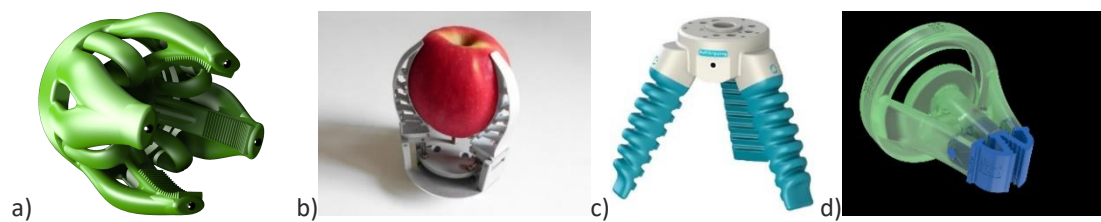


Figura 13 - *Four fingers lip* [35] (a), *adaptive gripper* [36] (b), *centric soft gripper* [37] (c) e *dual belts* [38] (d).

É importante perceber que, para manter uma interligação flexível e dinâmica dentro das séries de produção, no seguimento dos princípios da Indústria 4.0 [2], a implementação de sistemas de manuseamento flexíveis e adaptáveis torna-se um fator essencial.

Uma forma adequada de integrar mais flexibilidade na produção é a utilização de sistemas de *grippers* de *soft robotic* compatíveis, que se caracterizam por uma elevada adaptabilidade em termos de forma, tamanho e estrutura das peças de trabalho em comparação com os *grippers* de última geração [39].

2.3.2 *Materiais*

Atualmente, já existem vários materiais adotados para fabricar *soft robots*. Em comparação com os robôs de corpo rígido, os *soft robots* são feitos de materiais intrinsecamente macios e extensíveis, como o elastômero de silicone ou o hidrogel de alginato, que geralmente possuem um módulo de Young inferior aos materiais rígidos convencionais [40].

Para adaptar a versatilidade mecânica e a multifuncionalidade intrínseca dos organismos naturais, as propriedades elásticas e viscoelásticas mostram-se considerações essenciais para a seleção dos materiais dos componentes dos *soft robots* [41].

Os componentes *soft*, normalmente usados nesta tecnologia, incluem elastômeros de silicone, uretanos, hidrogéis, tecidos entrelaçados, fluidos hidráulicos e gases. Os elastômeros são particularmente populares pois permitem a utilização de uma gama abrangente de propriedades elásticas e viscoelásticas, compactuando com a

arquitetura dos dispositivos dos *soft robots*. Estes tipos de materiais mostram-se também vantajosos quando é considerada a sua segurança em aplicações de interação com organismos biológicos [41].

Convencionalmente, os materiais usados na robótica (metais e plásticos duros) apresentam um módulo de elasticidade entre $10^9 - 10^{12}$ Pa, enquanto a maioria dos materiais de organismos naturais (pele, tecido muscular, entre outros) apresentam um módulo de elasticidade entre $10^2 - 10^9$ Pa [42].

É importante notar que a maioria dos materiais “*soft*” se apresentam como viscoelásticos. A relação entre as propriedades viscoelásticas com o tempo pode ser descrita com os módulos dinâmicos de armazenamento e de perda (*storage and lost modulus*), que representam a elasticidade e a viscoelasticidade, respetivamente, como apresentado na Figura 14 [41]. Os materiais puramente elásticos não dissipam energia quando lhes é aplicada uma carga, uma vez que o seu módulo dinâmico de perda é bastante baixo. Ao contrário, os materiais viscoelásticos apresentam propriedades elásticas e viscosas. Logicamente, na escolha de um material para um *soft robot* é pretendido seleccionar propriedades viscoelásticas ótimas.

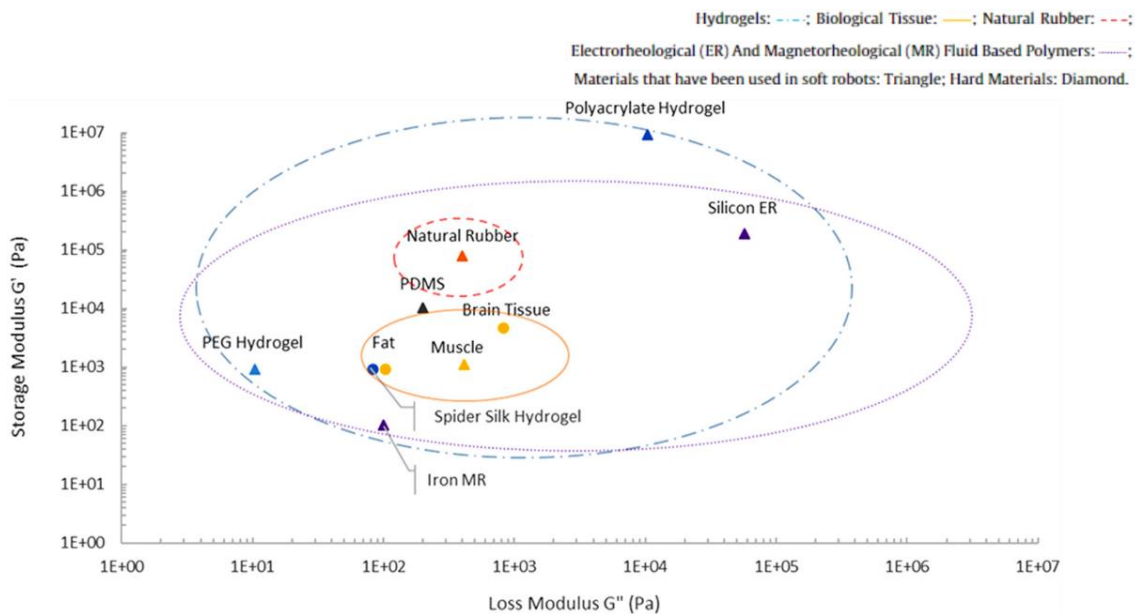


Figura 14 – Aproximação dos módulos dinâmicos de armazenamento e perda em vários materiais orgânicos e inorgânicos (adaptado de [41]).

2.3.3 Atuadores

Uma das partes mais importante na área de *soft robots* é a atuação. Existem diversos mecanismos atuadores, como os apresentados de seguida [43]:

- **Atuadores de pressão:**
 - Atuadores pneumáticos – em atuadores pneumáticos o *soft robot* faz uso de *pneumatic networks* (*PneuNets* ou PN) de canais de elastómeros que se expandem como balões quando é exercida pressão. Quando são pressurizados, os canais expandem nas regiões com menor rigidez. Uma arquitetura bem estruturada permite um controlo total do robot, como por exemplo agarrar um ovo (Figura 15) [44];
 - Atuadores hidráulicos – neste caso, o princípio de atuação é semelhante ao princípio de atuação pneumática. Considerando um sistema de apenas um grau de liberdade, o mecanismo de atuação consiste no movimento da água entre duas cavidades, através da ação de uma bomba hidráulica, que resulta no movimento do corpo [45].

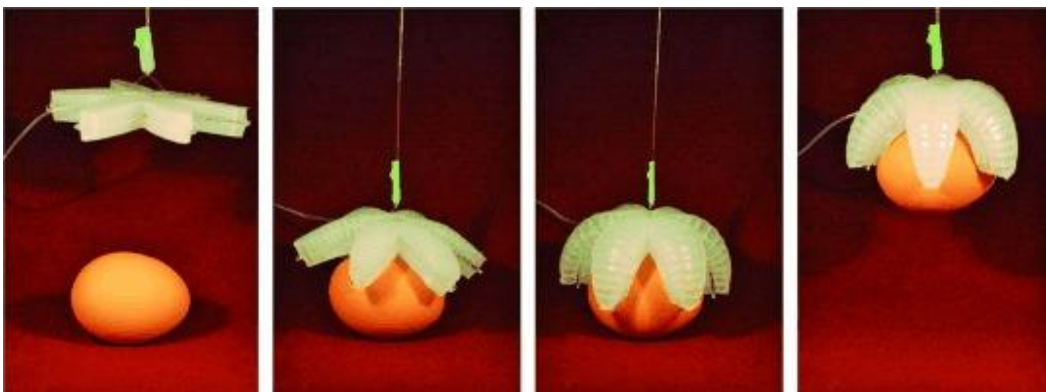


Figura 15 - Sequência de um *soft gripper* a agarrar um ovo [44].

- **Atuadores elétricos [43]:**
 - Atuadores de elastómeros dielétricos – o princípio de atuação é baseado na atração entre dois eletrodos com um potencial diferente, localizados numa membrana flexível;
 - Atuadores piezoelétricos – a piezoelectricidade é uma propriedade do material onde uma tensão ou carga elétrica é produzida pela aplicação de forças mecânicas ou vibracionais e, da mesma maneira, onde uma deformação mecânica é obtida ao aplicar um campo elétrico;
 - Atuadores de servomotores elétricos – apresenta-se como uma solução mais direta e mais fácil, pois consiste no uso de um motor elétrico como meio de atuação.

- **Atuadores térmicos [43]:**

- Shape Memory Alloys (SMA) – estas ligas são consideradas uma classe de material que pode ser deformada e recuperar a forma "memorizada" original em ciclos de carga e em ciclos térmicos, devido à capacidade inata de sofrer alterações reversíveis na sua estrutura cristalina. A sua aplicação é simples e o princípio de operação é baseado na indução de calor na liga, feita de acordo com a lei de Joule. Na Figura 16 é apresentado um exemplo de uma aplicação deste mecanismo atuador;
- Shape Memory Polymers (SMP) – o princípio de funcionamento é semelhante às SMA, mas estes polímeros apresentam uma maior deformação elástica, uma baixa densidade, um custo baixo e grande facilidade de manutenção. Neste caso os estímulos necessários para desencadear uma deformação são a temperatura e a luz;
- Liquid Crystal Elastomers (LCE) – a combinação da elasticidade de borracha com a orientação dos cristais líquidos, leva a uma classe única de materiais, chamados LCE, que são promissores para aplicações que requerem resposta a um estímulo. O compósito é composto por bicamadas de LCE com direção ortogonal e com diferentes temperaturas de transição. As aplicações LCE impressas são capazes de uma resposta de flexão grande e reversível, ao serem aquecidas para além das suas temperaturas de atuação;
- Hidrogéis sintéticos – os hidrogéis consistem numa rede tridimensional de sub-redes de um polímero, com uma larga percentagem de água. Devido a esta característica, são capazes de encolher (mais do que dez vezes em volume) quando a percentagem de água nos mesmos varia, o que pode acontecer por estímulo de luz, temperatura, pH, entre outros.

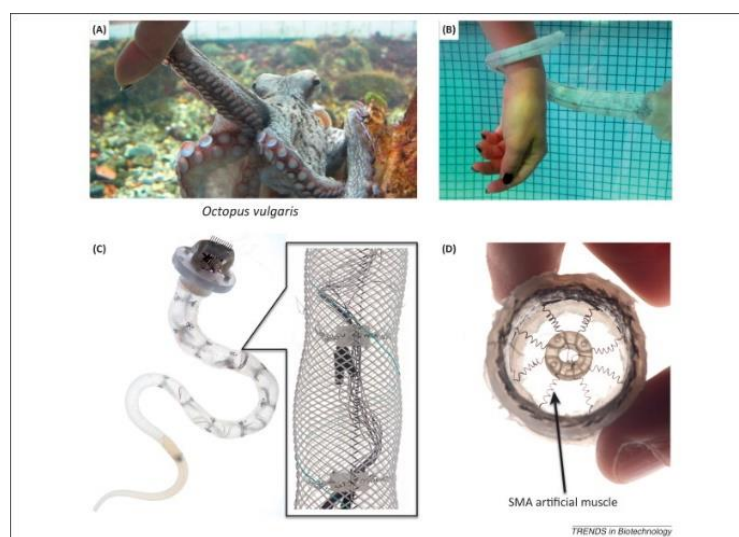


Figura 16 - Robô inspirado num polvo [31] (*Octopus vulgaris*) a agarrar um dedo humano (a), robô de um braço de um polvo a agarrar um braço humano debaixo de água (b), detalhes do robô de um braço de um polvo (c) e detalhes dos atuadores de SMA'.

- **Atuadores magnéticos [43]:**
 - A estimulação magnética é considerada interessante, especialmente devido à facilidade em controlar rapidamente e com precisão a direção e a magnitude do campo magnético, além da sua capacidade de penetrar a maioria dos materiais. Polímeros, géis, papéis e fluidos são usados como meio para incorporar partículas magnéticas, para poderem ser acionados quando é aplicado um campo magnético externo. A inserção de partículas magnéticas, de forma discreta, em *soft bodies* resulta numa magnetização do corpo, com magnitude e direção variáveis.

2.3.4 Sensorização

A área de *soft robotics* tem evoluído a um passo acelerado nos últimos anos. Devido à sua maleabilidade, estes robôs apresentam infinitos graus de liberdade, o que leva a grandes dificuldades no controlo e sensorização dos mesmos. Têm sido desenvolvidos vários esquemas de sensorização como o sensor de tensão por resistência, o sensor de efeito de Hall e o sensor de tensão ótico [46]. No entanto, ainda existem muitos desafios nos aspetos do custo, consumo de energia, sensibilidade, materiais e compatibilidade de processos.

Em comparação com os sensores montados na superfície, os sensores embebidos, que consistem em sensores incorporados nos materiais, têm como vantagem uma proteção exterior a danos causados pelo ambiente em que se inserem. No entanto, isto vem com considerações adicionais de *design* no processo de fabrico da estrutura hospedeira para incorporar o sensor [47]. A incorporação dos sensores utilizados em aplicações de *soft robotics* passa pela colocação do sensor, por exemplo um sensor de tensão por resistência, na parte não flexível do robot.

Baseado no efeito de acoplamento de eletrificação de contato e indução eletrostática, nasce um novo tipo de sensores, os nanogeradores triboelétricos (*Triboelectric nanogenerators* – TENG). Estes conseguem responder ativamente a vários estímulos mecânicos e mostram-se vantajosos com o seu peso e custo baixos, com uma alta responsividade e com uma vasta gama de escolha de materiais. São considerados sensores autossustentados e são bastante comuns em aplicações que requerem sensores de pressão, toque e movimento.

Ao contrário de outros sensores, um TENG é incorporado na câmara de expansão, como um elétrodo em forma de esponja, como ilustrado na Figura 17 [46]. A parede interna da câmara e o elétrodo de esponja juntos formam um único elétrodo. De acordo com o princípio de funcionamento dos TENG, a câmara de silicone é mais eletronegativa do que o elétrodo de esponja. No estado de contacto, a borracha de silicone ganha eletrões do elétrodo enquanto o elétrodo contém igual carga positiva. No estado de inflação, o corpo do robô é forçado pela pressão do ar. A câmara de

silicone carregada negativamente expande-se e geralmente separa-se do eléctrodo. A carga positiva sai do eléctrodo para equilibrar a diferença de potencial. No estado de deflação, a câmara contrai-se lentamente de volta à sua forma original, o silicone carregado volta a contactar o eléctrodo e a carga positiva flui para o eléctrodo devido à indução eletrostática [46].

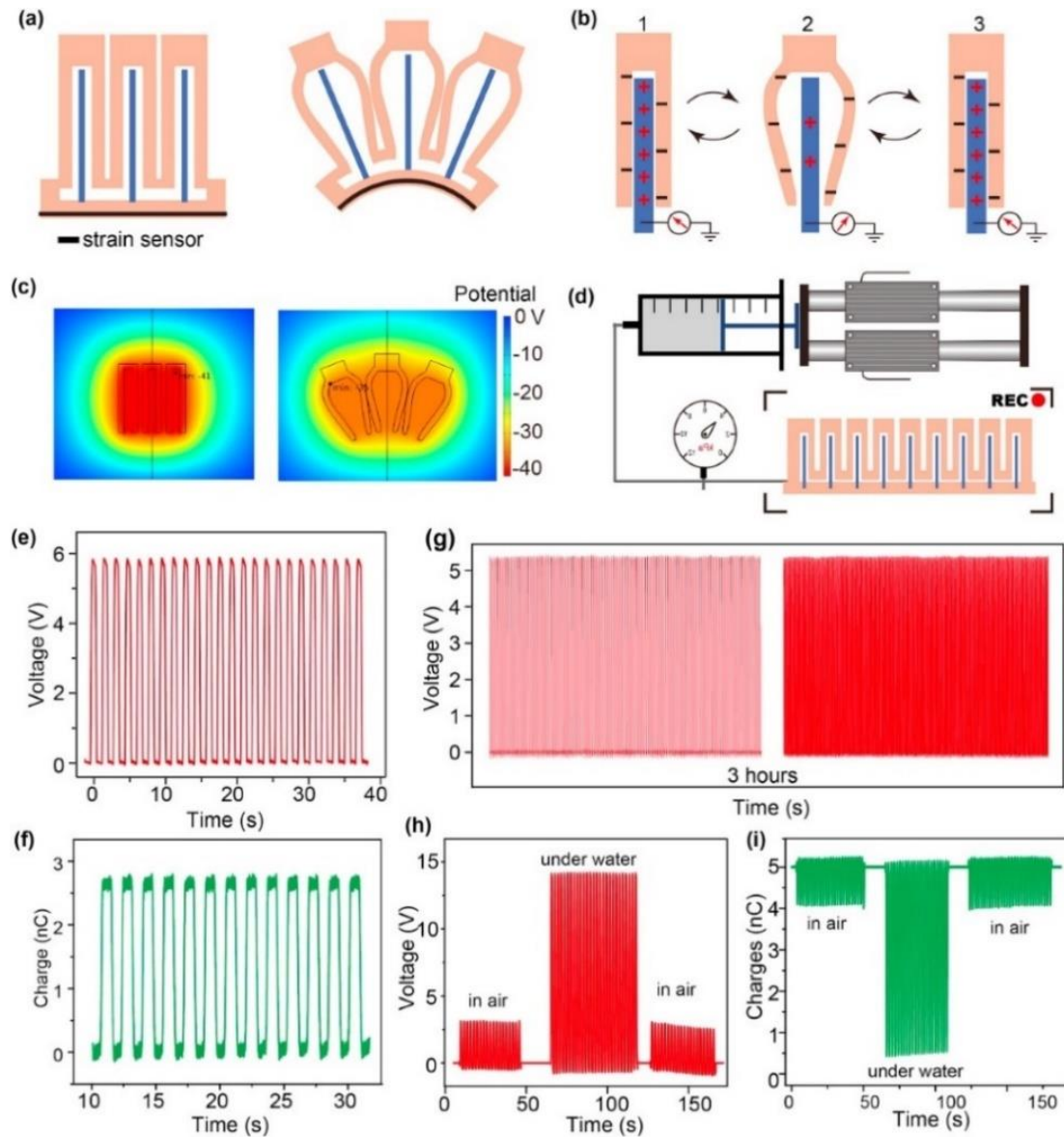


Figura 17 - Princípio de funcionamento dos TENG [46] – comparação entre um sensor tradicional e um TENG (a), mecanismo de funcionamento de um TENG (b), simulação da distribuição de potencial elétrico (c), sistema que inclui o TENG, uma bomba de ar e um manómetro (d), voltagem do circuito aberto (e), transferência de cargas (f), voltagem de circuito aberto medido durante 3 horas (g), voltagem de circuito aberto (h) e transferência de cargas em condições húmidas e secas (i).

2.4 Fabrico aditivo direcionado à *soft robotics*

Após ser abordada a origem da *soft robotics*, assim como os seus princípios de funcionamento, é relevante abordar o fabrico deste tipo de robôs. Em particular, será analisada a tecnologia de fabrico aditivo, também conhecida como impressão tridimensional (ou impressão 3D), sendo uma tecnologia de produção emergente nesta área.

2.4.1 Conceito

O fabrico aditivo consiste em várias tecnologias de produção baseadas no mesmo princípio: produção tridimensional de objetos, por adição de material, camada a camada [48]. Devido aos vários atributos de tal processo de fabrico, como a capacidade de produção de objetos com geometrias complexas e a habilidade de usar vários tipos de materiais na mesma impressão, esta abordagem apresenta-se bastante adequada para a produção de *soft robots*.

2.4.2 Grupos de processo

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015 [49], podem ser definidos sete grupos de processos de fabrico aditivo: polimerização de cuba, extrusão material, jato de material, fusão de camadas de pó, deposição direta de energia, jato de aglutinante e laminação de chapas. Cada grupo de processos, por sua vez, inclui várias tecnologias de impressão 3D.

Em seguida está apresentada uma breve descrição dos princípios de funcionamento de cada grupo de processos de fabrico aditivo [48]:

- **Polimerização de cuba, ou *vat photopolymerization (VPP)*** – processo no qual um líquido fotopolimérico é curado numa cuba por polimerização ativa de luz;
- **Extrusão material, ou *material extrusion (MEX)*** – processo no qual o material é dispensado por uma fenda ou orifício;
- **Jato de material, ou *material jetting (MJT)*** – processo no qual gotículas de matéria-prima são depositadas seletivamente;
- **Fusão de camadas de pó, ou *powder bed fusion (PBF)*** – processo no qual a energia térmica funde regiões de uma camada de pó;
- **Deposição direta de energia, ou *direct energy deposition (DED)*** – processo no qual a energia térmica é focada e usada para fundir materiais ao derreter os mesmos enquanto são depositados;
- **Jato de aglutinante, ou *binder jetting (BJT)*** – processo no qual um agente líquido de colagem é seletivamente depositado para unir materiais em pó;
- **Laminação de chapas, ou *sheet lamination (SHL)*** – processo no qual as folhas de material são ligadas para formar uma peça.

Basicamente, para a fabricação de *soft robots*, os três primeiros grupos de processo referidos, também representados na Figura 18, são particularmente utilizados [48].

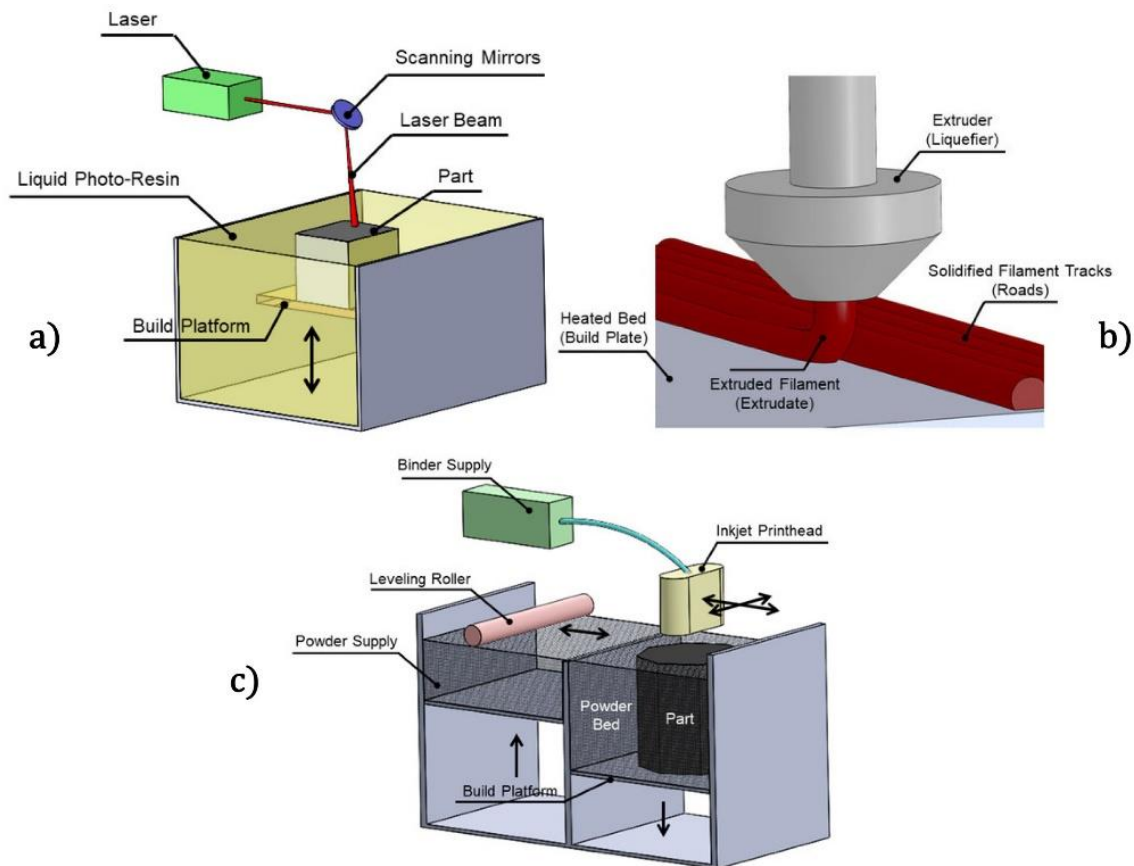


Figura 18 - Princípios de funcionamento dos grupos de processos de fabricação aditiva utilizados em *soft robotics*—esquema de VPP (a), esquema de MEX (b) e esquema de MJT (c) (adaptado de [50]).

2.4.3 Fabrico rápido de moldes

Nesta abordagem, o fabrico aditivo desempenha um papel passivo. A única tecnologia de impressão 3D utilizada neste método é a fabricação de filamento fundido (FFF), uma tecnologia baseada no MEX, usada para fabricar rapidamente os moldes em que os materiais elastómeros (muitas vezes de silicone) serão derramados [48]. Na Figura 19 está representado o processo de produção desta abordagem.

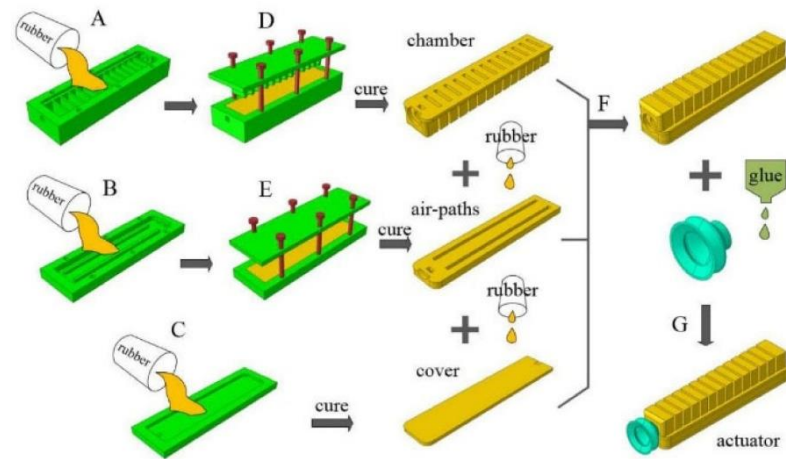


Figura 19 - Esquema do processo de produção do fabrico rápido de moldes (adaptado de [51]).

2.4.4 Fabrico híbrido

A ideia base subjacente à abordagem híbrida é utilizar uma das várias tecnologias de fabrico aditivo para produzir alguns elementos do *soft robot*. Isto significa que a tecnologia de fabrico aditivo não é utilizada de forma passiva apenas para a fabricação de moldes, mas outras tecnologias de fabrico são utilizadas em todo o processo de fabrico ao mesmo tempo. Por conseguinte, o papel da impressão 3D nesta abordagem é maior do que na abordagem de fabrico rápido de molde. Ainda assim, é menor do que na abordagem de fabrico totalmente aditivo [48]. Na Figura 20 pode-se observar o princípio de produção desta abordagem.

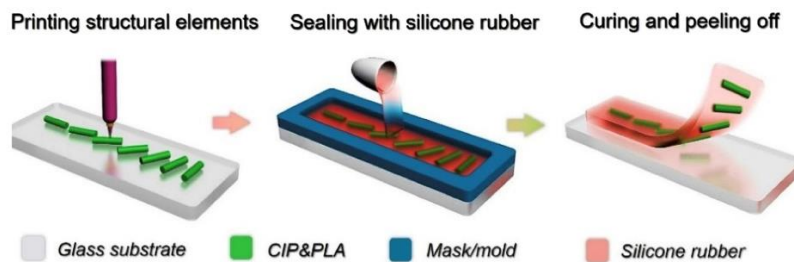


Figura 20 - Processo de produção do fabrico híbrido (adaptado de [52]).

2.4.5 Fabrico totalmente aditivo

Este último método consiste na utilização única de fabrico aditivo nos ciclos de produção de *soft robots*. Existem duas subclasses relativamente ao fabrico totalmente aditivo, baseadas na presença/ausência de tarefas de montagem [48]:

- Fabrico totalmente aditivo modular – baseado na necessidade de se juntarem a outros elementos *soft*, fabricados através de tecnologias de fabrico aditivo;
- Fabrico totalmente aditivo monolítico – se todo o *soft robot* for fabricado num único ciclo de impressão.

2.5 Estado da arte

Na Tabela 3 estão apresentados alguns dos estudos atuais mais relevantes na matéria da *soft robotics*, considerados de extrema importância na contextualização do referido tema e dos seus conceitos fundamentais.

Tabela 3 - Estado da arte - *Soft Robotics*

Artigo	Descrição
Holland et al. [53]	<p>Este artigo descreve o desenvolvimento do <i>Soft Robotics Toolkit</i> (SRT) e os esforços feitos para resolver problemas comuns enfrentados por projetos mecânicos abertos em robótica. Para garantir que a documentação do projeto foi suficientemente detalhada, esta foi desenvolvida para atender às necessidades dos alunos. Esta abordagem permitiu identificar as informações essenciais que devem ser partilhadas, o que muitas vezes não é intuitivo, mesmo para os especialistas neste domínio. O SRT foca-se no <i>design</i> de nível de componentes e separando o <i>hardware</i> geral das peças para aplicações específicas. É concluído que o surgimento de tecnologias de prototipagem rápida e de baixo custo tem o potencial de acelerar o crescimento de projetos mecânicos abertos, mas deve reconhecer-se que estas tecnologias ainda estão fora do alcance de muitos potenciais utilizadores. O desenvolvimento de métodos alternativos de conceção e fabrico que não dependam de equipamentos ou materiais especializados pode permitir que projetos abertos aumentem o seu impacto e expandam as suas comunidades.</p>
Coyle et al. [41]	<p>Este artigo apresenta a revisão dos três elementos-chave dos <i>soft robots</i> bio inspirados de um ponto de vista mecânico, nomeadamente, a seleção de materiais, a atuação e o <i>design</i>. As propriedades intrínsecas dos materiais em <i>soft robots</i> permitem uma "inteligência incorporada" que pode potencialmente reduzir a complexidade mecânica e algorítmica de formas não possíveis com robôs de corpos rígidos. Conclui-se que há muito trabalho a fazer para alcançar todo o potencial dos <i>soft robots</i>, assim como enfrentar os inúmeros desafios-chave que se avizinham. O cerne destes desafios gira em torno da compreensão das relações estruturais dos componentes robóticos "soft" que ajudam a alcançar os objetivos dos robôs através da adaptação da arquitetura dos mesmos.</p>

Artigo	Descrição
Whitesides [54]	<p>Este artigo apresenta uma descrição de <i>soft robotics</i>, sendo que esta não é feita com o intuito de ser uma revisão convencional do tema, no sentido de compreender tecnicamente este campo em desenvolvimento. O trabalho de Whitesides tem como objetivo descrever a <i>soft robotics</i> como um novo campo de estudo, uma área que cria oportunidades para cientistas químicos e de materiais. Conclui-se que área <i>soft robotics</i> traz a "colaboração" necessária para uma integração suave dos sistemas biológicos, físicos e informáticos. Além disso, a robótica, aliada à inteligência artificial, está a tornar-se uma tecnologia com a capacidade de gerar "máquinas inteligentes" que podem competir com (ou complementar) humanos para empregos e trabalho ("concorrente de pares").</p>
Majidi [55]	<p>Neste artigo destacam-se os recentes avanços neste campo na perspectiva dos materiais e da mecânica. Apesar dos sucessos recentes com <i>soft robots</i>, há espaço significativo para melhorias. Em geral, a criação de sistemas robóticos completamente desprotegidos é um desafio devido a problemas com a compatibilidade e integração dos materiais. Isto porque, os materiais <i>soft</i> utilizados para a atuação, deteção e cablagem de circuitos não são suficientes para a funcionalidade autónoma. A integração melhorada dos materiais pode ser realizada através de avanços em materiais com transições suaves na rigidez, o que pode conseguir eliminar o excesso de tensão causador de danos, o que muitas vezes surgem na ligação entre materiais rígidos e "soft".</p>
Müller et al. [39]	<p>Neste trabalho foi demonstrado o potencial de uma nova abordagem de simulação, para auxiliar na conceção de <i>soft robotic grippers</i> para aplicações pesadas. Devido à simulação de aperto, o <i>gripper</i> pode ser adaptado antecipadamente ao produto a manusear e às suas variações, conseguindo ser produzido a tempo por um processo de fabrico indicado. Esta abordagem permite que os futuros utilizadores desenhem um manipulador sem pré-ensaios físicos e iterativos dispendiosos, proporcionando uma vantagem económica sobre a tecnologia convencional de <i>gripper</i> rígido e inflexível. A abordagem de projeto permite que novas variações de <i>gripper</i> sejam validadas muito facilmente e adaptadas de forma económica, conforme necessário. No contexto da cadeia flexível dos processos da Indústria 4.0, tais manipuladores pesados, flexíveis e adaptáveis podem lidar com o portfólio de produtos em rápido crescimento de uma instalação de fabrico ágil, que enfrenta o desafio de diminuir as dimensões dos lotes e uma utilização eficiente dos recursos.</p>

Artigo	Descrição
El-Atab et al. [43]	<p>Este artigo de revisão visa fornecer, a investigadores interessados no campo da <i>soft robotics</i>, um guia de referência sobre as várias metodologias de atuação “<i>soft</i>” de última geração que são desenvolvidas com uma ampla gama de estímulos, incluindo luz, calor, campos elétricos e magnéticos, com foco nas suas várias aplicações em <i>soft robotics</i>. Os princípios subjacentes aos atuadores de <i>soft robots</i> são discutidos com base nas complexidades de movimento resultantes, deformações e multifuncionalidades. Os resultados mais recentes ou mais notáveis foram relatados com direção aos princípios subjacentes por trás dos movimentos alcançados nos <i>soft robots</i>. Foi revista uma vasta gama de materiais que podem ser estimulados de forma elétrica, magnética, pneumática, hidráulica ou térmica. Os atuadores <i>soft</i> discutidos baseavam-se em polímeros, fluídos, papéis, materiais inorgânicos ou mesmo materiais híbridos que integram células biológicas e matéria. Até à data, a maioria dos <i>soft robots</i> consistem em redes pneumáticas integradas em materiais poliméricos para alcançar a atuação ou propulsão. No entanto, a maioria dos <i>soft robots</i> que utilizam a atuação pneumática precisam de ser fixados a uma fonte de energia rígida e sistemas de controlo para fornecer forças adequadas para os movimentos desejados. Materiais auto atuantes que respondem a um estímulo externo, como a luz, a temperatura ou o campo elétrico, têm demonstrado potencial em aplicações de <i>soft robotics</i> sem fios, no entanto, têm limitações que ainda precisam de ser ultrapassadas. Conclui-se que, devido à ampla gama de materiais de atuação e estímulos, ainda não existe um protocolo padrão a seguir ou parâmetros padrões a relatar ao caracterizar os atuadores <i>soft</i>.</p>
Chen et al. [46]	<p>Face ao desafio da sensorização de <i>soft robots</i>, devido à sua maleabilidade, que leva a um número infinito de graus de liberdade, este artigo mostra-se bastante relevante pois, após uma breve introdução sobre sensores ordinários, apresenta a tecnologia associada dos TENG. Foram integrados TENG nas câmaras para servir como os sensores de propriocepção da configuração. Ligada paralelamente, a saída total de tensão dos TENG estava linearmente relacionada com o ângulo total de flexão do atuador pneumático. Independentemente, os TENG serviram como sensores distribuídos para detetar o ângulo de flexão de todos os segmentos do atuador. Verificando os resultados, nota-se que o atuador sensorizado podia perceber a sua própria forma, que foi testada em diferentes condições. Como demonstração, o atuador sensorizado foi montado num <i>soft gripper</i> universal e em dedos humanoides, respetivamente. Concluiu-se que com a propriocepção, estes são mais inteligentes e seguros quando interagem com diferentes ambientes.</p>

Artigo	Descrição
Stano e Percoco [48]	<p>O presente artigo visa fazer uma revisão da utilização atual de métodos de fabrico aditivo para o fabrico de <i>soft robots</i>. Os autores, depois de fornecerem um resumo dos sistemas de atuação mais utilizados em <i>soft robotics</i>, classificam o uso de tecnologias de fabrico aditivo em <i>soft robotics</i>, investigando os trabalhos mais importantes e recentes neste campo, em função da forma como estas tecnologias são utilizadas em todo o ciclo de fabrico de <i>soft robots</i>. Com isto em mente, os autores encontraram três abordagens para explorar a tecnologia de fabrico aditivo em <i>soft robotics</i>: fabricação rápida de moldes (no qual a impressão 3D desempenha um papel passivo), híbrido (o processo de fabrico aditivo desempenha um papel ativo, mas são também usadas outras tecnologias de produção para além do fabrico aditivo), e fabrico aditivo total (apenas as tecnologias de impressão 3D são usadas). Apenas esta última abordagem tira o máximo partido da tecnologia referida, embora os outros dois também forneçam benefícios.</p>

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Apresentação da entidade acolhedora
- 3.2 Objetivos do trabalho
- 3.3 Soluções disponíveis semelhantes
- 3.4 Anteprojeto
- 3.5 Projeto
- 3.6 Validação e protótipo

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Apresentação da entidade acolhedora

3.1.1 *Natureza e Objetivo*

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Centro de Interface Tecnológico (CIT), criado em 1986, vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral. É uma instituição de utilidade pública, privada e sem fins lucrativos.

3.1.2 *Missão e Visão*

Contribuir para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral, através da inovação de base científica e tecnológica, garantindo ao mesmo tempo o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores e o enriquecimento do ensino superior. Crescer, ser o melhor a converter conhecimento em valor e confirmar a forte identidade institucional como parceiro tecnológico das empresas.

3.1.3 *Estrutura Organizativa*

A estrutura organizativa assenta em três pilares de especialização da atividade:

- Investigação e desenvolvimento;
- Inovação e transferência de tecnologia;
- Consultoria e serviços.

Tem na sua base um conjunto de unidades especializadas por área científica e tecnológica, suportando a atividade de investigação. Transversalmente a estas funcionam as atividades de Inovação, Consultoria e Serviços dedicadas ao desenvolvimento de soluções para as empresas.

O INEGI é membro do LAETA - Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica, de dimensão nacional, que agrega também algumas áreas de investigação do Instituto de Engenharia Mecânica - Pólo Instituto Superior Técnico (IDMEC – IST), da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) da Universidade de Coimbra e do Grupo de Investigação em Aeronáutica e Astronáutica da Universidade da Beira Interior (AeroG).

3.2 Objetivos do trabalho

O projeto apresentado na presente dissertação surge no âmbito da criação de uma aplicação de *soft robotics*, mais concretamente um *soft gripper*. É pretendido o desenvolvimento de um conceito original de um manipulador de material macio (*soft gripper*), capaz de desempenhar as funções de manuseamento estipuladas, através de certos mecanismos de atuação, indo de encontro aos requisitos e condicionantes apresentados em seguida. Pretende-se que a solução final seja apresentada com todas as justificações necessárias para sustentar as escolhas tomadas, seja quanto à escolha de um material, à geometria de um componente, entre outras.

3.2.1 Requisitos e condicionantes

Os vários conceitos desenvolvidos e apresentados foram idealizados para ir de encontro aos vários parâmetros definidos, neste caso não por um cliente, mas pela própria empresa. Para tal foi necessário ter em consideração todos esses parâmetros, e conseqüentemente as suas influências diretas no sistema, ao criar as propostas de soluções. Em seguida, estão apresentados os requisitos e condicionantes deste projeto:

- Foi estipulado que o mecanismo seria desenvolvido com a finalidade de ser um *gripper* direcionado ao manuseamento de peças de fruta. É importante notar que este requisito condiciona o projeto do modelo do *gripper*, devido às várias geometrias e pesos dos diferentes tipos de fruta;
- O *soft gripper* desenvolvido seria adaptado num robô KUKA LBR iiwa 14 R820 (apresentado na Figura 21) com pontos de ligação unicamente elétricos. Para melhor aproveitar todas as funcionalidades deste braço mecânico, foi definido que o mecanismo de atuação a adotar no projeto do *gripper* seria um mecanismo de atuação elétrica;
- Seria necessário fazer uso de processos de fabrico aditivo, para a produção de um protótipo da solução final do *soft gripper*. Este condicionante iria afetar os conceitos idealizados, tanto na geometria como nos materiais, pois estes dois parâmetros teriam de ser compatíveis com o processo de fabrico aditivo.



Figura 21 - Kuka LBR iiwa [56].

3.3 Soluções disponíveis semelhantes

Nesta fase do projeto foi feita uma pesquisa de soluções atualmente existentes de *soft grippers*. Foi uma fase bastante importante neste projeto, pois permitiu ao aluno compreender melhor os mecanismos de *soft grippers*, assim como conhecer as várias e diferentes soluções que existem hoje em dia, e também as suas vantagens e desvantagens.

Durante esta fase de pesquisa foram tidos em conta os vários requisitos e condicionantes anteriormente estipulados. As soluções existentes apresentadas são em parte, ou na sua totalidade, soluções que vão de encontro a esses mesmos parâmetros.

3.3.1 *Adaptive gripper finger DHAS, FESTO*

Uma das maiores vantagens desta tecnologia, a *soft robotics*, e por consequência dos *soft grippers*, passa pela sua adaptabilidade. Ou seja, um *soft gripper* vem trazer uma alta competitividade ao mercado face aos outros tipos de *grippers* existentes, pela facilidade que mostra ao ser compatível com vários objetos e várias funções.

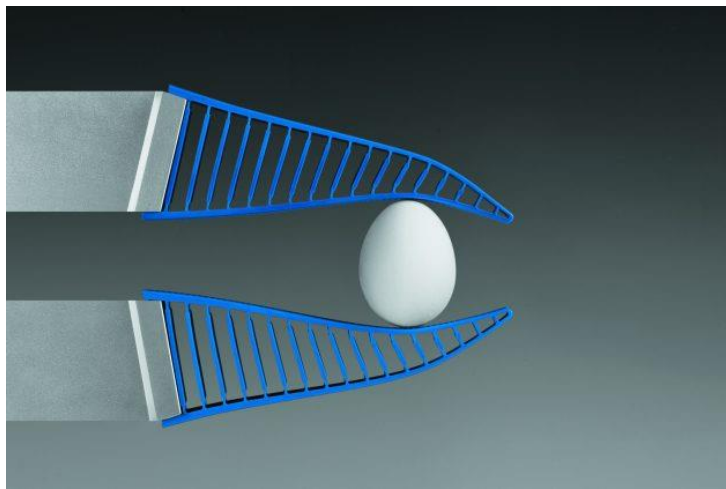


Figura 22 - *Adaptive gripper finger DHAS* [57].

A solução apresentada pela FESTO, denominada de *adaptive gripper finger DHAS* e ilustrada na Figura 22, é uma solução bastante inteligente uma vez que, como até o nome indica, tira vantagem desta característica fulcral dos *soft grippers*, a adaptabilidade. A inovação está presente na geometria dos *fingers* de poliuretano termoplástico. Como é possível observar, estes são constituídos por duas paredes exteriores de contacto, uma base e várias barras de ligação entres as duas paredes. Esta arquitetura geométrica permite ao *finger*, quando entra em contacto com um dado objeto, transmitir as forças de reação pelas barras de ligação, criando tensões na parede oposta ao objeto, e fazendo assim com que o *finger* contorne e fixe o objeto.

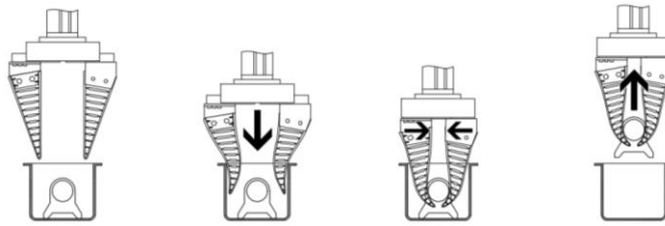


Figura 23 - Sequência de atuação do *gripper* (adaptado de [58]).

O funcionamento deste mecanismo está apresentado na Figura 23, sendo semelhante ao funcionamento de outras soluções da FESTO, e até de outras entidades que apresentam estes tipos de *finger*. Este princípio de atuação consiste na aproximação do sistema *gripper* de um objeto e de seguida, por ação de um mecanismo atuador, inicia-se um movimento de aproximação dos *fingers*, levando ao contacto com o objeto. Devido à geometria dos próprios *fingers*, é causado um movimento de inclusão do objeto, podendo então manuseá-lo da forma pretendida.

3.3.2 *Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping*

Uma outra solução existente, desenvolvida por Manti et al. [59], está apresentada na Figura 24, que difere das demais soluções existentes essencialmente no mecanismo de atuação, e consiste no controlo de um único cabo tensionado.

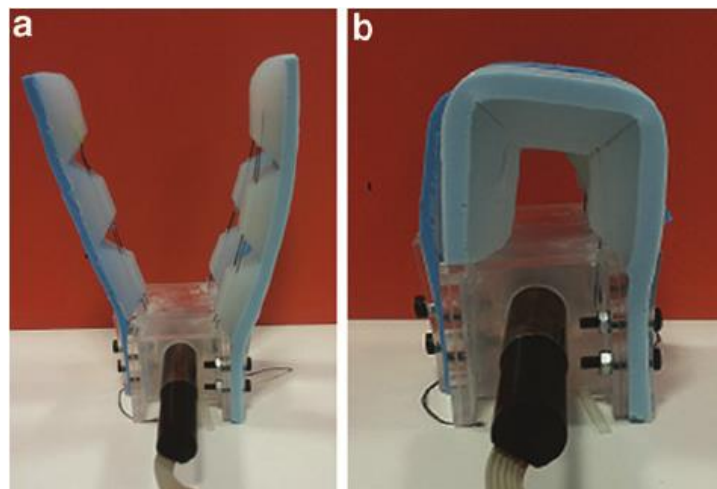


Figura 24 - *Soft robotic gripper for adaptable and effective grasping* [59] – posição aberta (a) e fechada (b)..

Este modelo de *soft gripper* consiste em três *soft fingers* idênticos, unidos por uma estrutura rígida (como uma palma da mão une os dedos), cujo funcionamento consiste em tracionar um cabo, contido num percurso de pequenos tubos, através de um motor elétrico de CC, que faz os dedos dobrar (Figura 25), sendo possível assim manusear objetos [59]. Os materiais que constituem os dedos são Smooth-Sil 950 silicone e Dragon Skin 30 silicone, para a parte traseira e para a parte das falanges interiores, respetivamente.

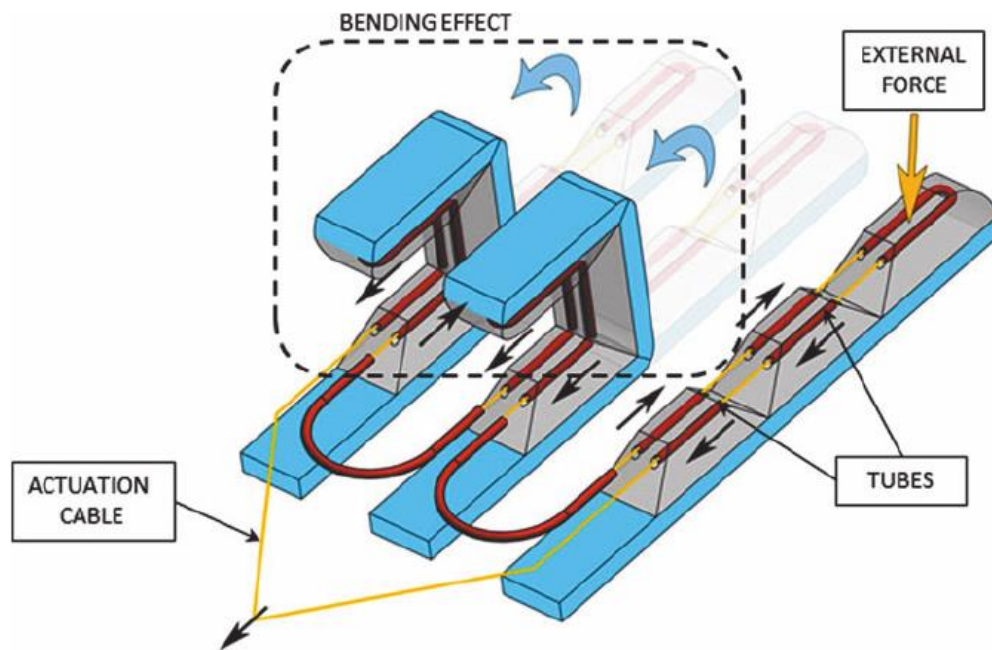


Figura 25 - Funcionamento do mecanismo do gripper [59].

Ao contrário de um dedo biológico, que serviu de inspiração para este modelo, o dedo deste *gripper* não apresenta um esqueleto rígido, mas tira proveito das propriedades mecânicas dos materiais *soft*, assim como da sua própria morfologia.

3.3.3 *Four fingers lip*

A próxima solução estudada é o *four fingers lip*, apresentado na Figura 26, que se distingue de outras aplicações nesta área pela sua geometria complexa e invulgar, e também por ser dos poucos modelos de *grippers* que se apresentam numa só peça.

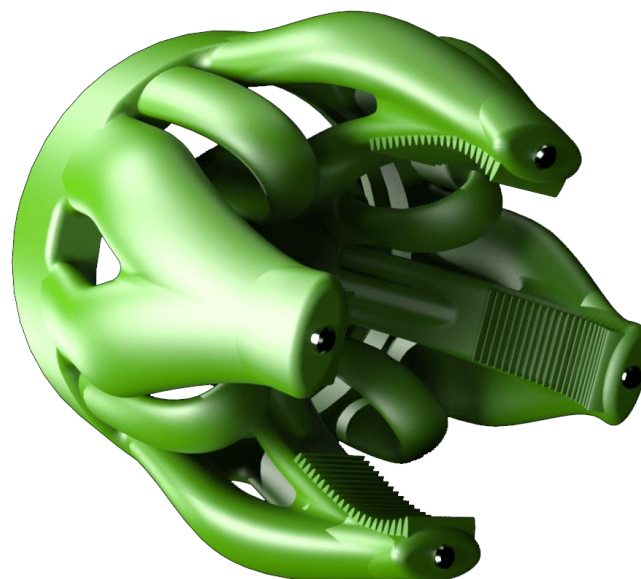


Figura 26 - *Four fingers lip* [35].

O *four fingers lip* é feito de um material *soft* e tem uma estrutura de manipulação de quatro pontos. Os dedos podem ser sólidos ou com reforços metálicos, permitindo-lhes adaptar-se às peças de trabalho. Este modelo apresenta ondulações finas na ponta dos dedos, que aumenta a aderência ao gerar atrito no contacto.

O princípio de funcionamento deste modelo é mais bem compreendido ao observar os deslocamentos presentes na peça (Figura 27). Ao ser aplicado uma força na base central, seja por um cilindro pneumático ou elétrico, esta base desloca-se para cima. Consequentemente, os dedos do *gripper* fecham-se e permitem ao sistema realizar o movimento de agarrar o objeto de trabalho. Este funcionamento deve-se à morfologia atípica do *gripper*.

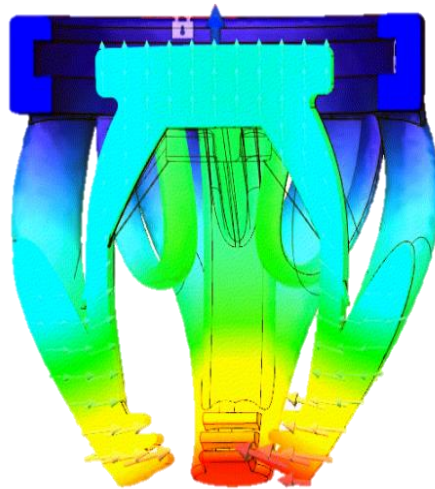


Figura 27 - Distribuição de deslocamentos no *four fingers lip* (adaptado de [35]).

O *four fingers lip* é inerentemente adequado para objetos orgânicos e tem uma ampla capacidade de adaptação. Com a configuração certa, este manipulador consegue manusear diferentes peças de trabalho que variam de esferas macias, bases cilíndricas de plantas ou até mesmo peças de fruta de forma irregular.

3.4 Anteprojeto

O projeto relatado neste documento consiste essencialmente num trabalho de investigação, pois está inserido numa área relativamente nova, e aborda a mesma ao desenvolver um conceito completamente novo.

Nesta parte da dissertação é apresentada uma das mais importantes fases do trabalho, o anteprojeto. Este capítulo apresenta, após um estudo do mercado, as etapas de desenvolvimento da aplicação trabalhada. Estas etapas mostram o trabalho realizado e o processo complexo de criação e desenvolvimento de conceito.

3.4.1 Diferentes soluções consideradas

Em seguida estão apresentadas todas as soluções desenvolvidas, numa primeira fase do projeto, dando maior relevância à parte dos dedos do *gripper*.

As simulações apresentadas neste subcapítulo são meramente ilustrativas, ou seja, foram realizadas com o intuito de melhor compreender e representar o comportamento das soluções desenvolvidas, logo não estão indicados valores de resultados nem os materiais utilizados ou as forças aplicadas.

3.4.1.1 Solução A

O primeiro conceito desenvolvido, apresentado na Figura 28, inspirado no *soft robotic gripper for adaptable and effective grasping* [59], consiste num conjunto de três dedos predispostos numa base circular, em que cada dedo se encontra distanciados 120° de cada um dos outros dedos, para uma eficaz distribuição de tensões ao realizar os movimentos de manuseamento pretendidos.

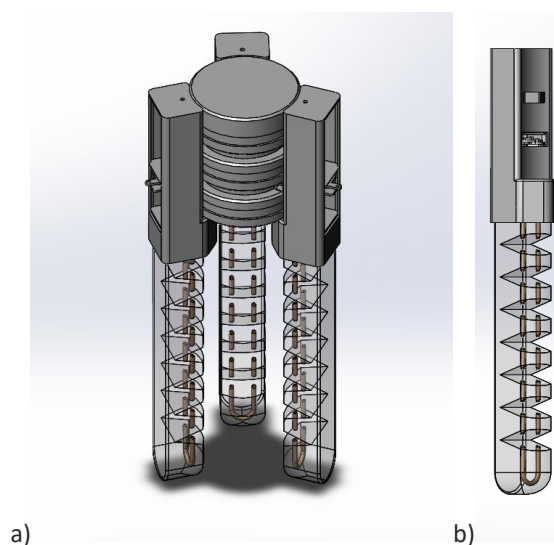


Figura 28 - Solução A – Conjunto do *gripper* (a) e vista detalhada de uma garra (b).

O mecanismo de funcionamento, semelhante ao conceito a partir do qual esta solução foi inspirada, consiste no acionamento de um motor elétrico presente na base cilíndrica do *gripper*, que cria tensão no cabo inserido nos dedos (essa tensão está representada através de setas vermelhas na Figura 29). A tração deste mesmo cabo, contido em canais de materiais rígidos, cria um movimento de encurvadura do dedo (representado por setas verdes na Figura 29 (b)), permitindo assim ao *gripper* desempenhar a função pretendida.

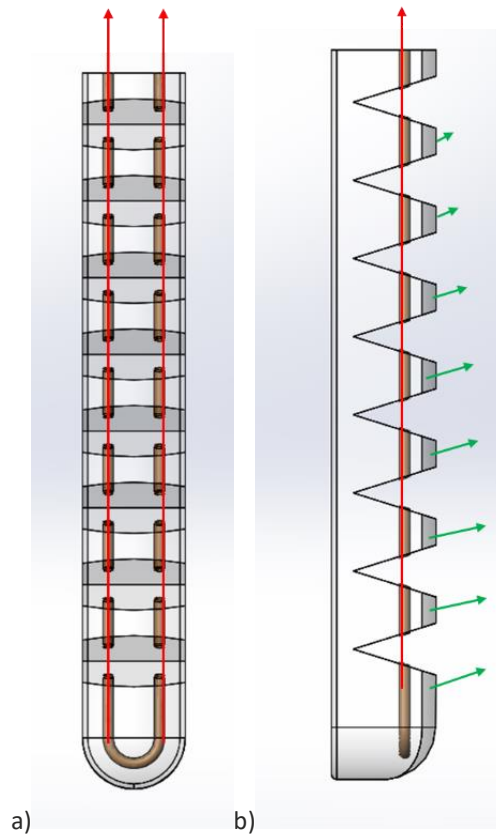


Figura 29 - Esquema representativo de funcionamento da solução A - vista frontal (a) e vista lateral (b).

A principal vantagem da base cilíndrica desta solução é a possibilidade de integrar um mecanismo em cada dedo, de rotação em torno da base, para uma maior adaptabilidade aos objetos de trabalho do *gripper*.

Para a criação deste conceito, através de métodos de fabrico aditivo, os materiais necessários são:

- Ácido polilático (*polylactic acid* – PLA) – Fabrico totalmente aditivo – base cilíndrica e adaptadores dos dedos;
- Silicone – Fabrico rápido de moldes/Fabrico híbrido (com PLA) – dedos com os canais de passagem de cabo.

3.4.1.2 Solução B

O modelo apresentado na Figura 30 (a) é a única solução em que os dedos estão todos ligados entre si numa única peça. Esta solução foi baseada em desenhos como o *four fingers lip* [35] e o *flexible food-grade robot gripper* [60], entre outros semelhantes.

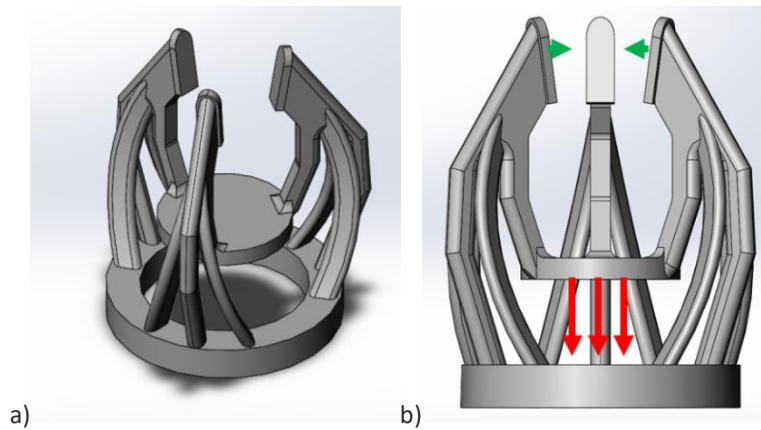


Figura 30 - Solução B – vista isométrica do *gripper* (a) e representação do funcionamento em vista frontal (b).

O funcionamento desta solução consiste no deslocamento da base central do *gripper*, por ação de um atuador elétrico (montado na base de ligação do gripper ao braço robótico), como se pode observar pelas setas vermelhas na Figura 30 (b). Este deslocamento cria tensões ao longo dos dedos do *gripper* e, devido à sua geometria, causa um deslocamento em cada dedo, como se observa pelas setas verdes na mesma figura.

Na Figura 31 é possível compreender melhor este funcionamento, pois estão apresentadas 3 simulações realizadas no *SolidWorks*, recorrendo ao método de elementos finitos (MEF), nos quais se pode facilmente observar a relação direta de uma carga aplicada na base central do *gripper* com os deslocamentos dos dedos.

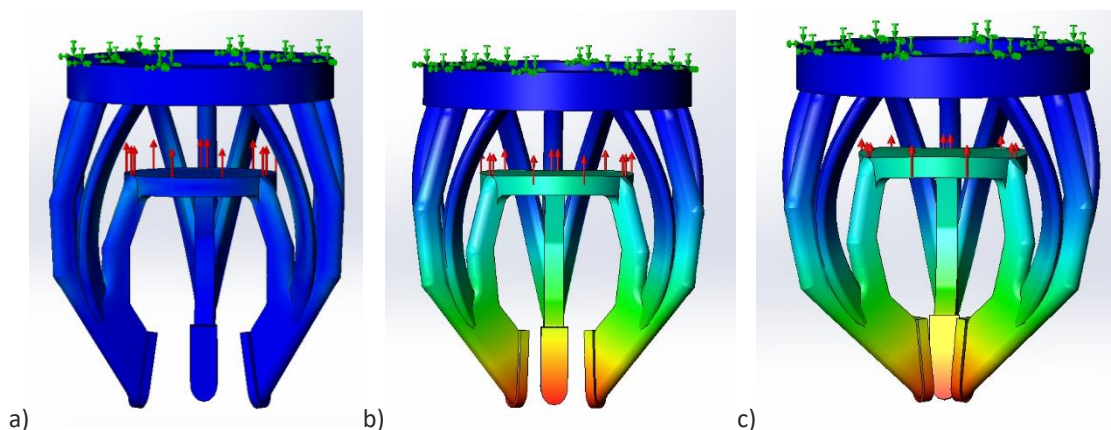


Figura 31 - Ilustração do funcionamento do *gripper* B através de uma simulação no *SolidWorks* – aplicando uma carga ligeira (a), uma carga média (b) e uma carga elevada (c).

Para uma maior eficiência no desempenho da sua função principal, o *gripper*, e mais particularmente os dedos, podem ser desenhados com alguma rugosidade nas faces de contacto com o objeto de estudo. Nos dedos podem ainda ser integrados materiais rígidos para uma maior resistência mecânica.

Para a criação deste conceito, através de métodos de fabrico aditivo, os materiais necessários são:

- PLA – Fabrico totalmente aditivo – base de ligação do *gripper* ao braço robótico;
- Silicone – Fabrico rápido de moldes/Fabrico híbrido (com PLA) – conjunto dos dedos.

3.4.1.3 Solução C

Foi ainda considerada a solução da FESTO, os *adaptive gripper finger DHAS* [58], assim como os semelhantes conceitos existentes, que derivaram deste mesmo *gripper*, e criada a solução apresentada na Figura 32.

Após a conceção deste modelo, foram pensadas alternativas semelhantes, como a D e a F, apresentadas em seguida, variando essencialmente o desenho dos dedos. Por isto, foi idealizada uma base, assim como o mecanismo da mesma, simples e adaptável a essas várias e diferentes soluções.

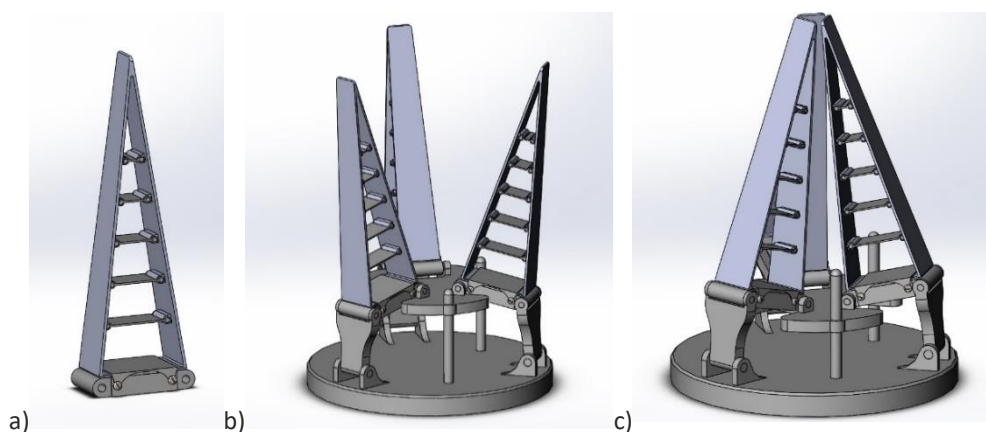


Figura 32 - Solução C – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do *gripper* aberto (b) e do conjunto do *gripper* fechado (c).

O mecanismo de funcionamento, que pode ser mais bem compreendido com a ajuda da sequência de funcionamento apresentada na Figura 33, é conseguido pelo deslocamento da base central, realizado por ação de um atuador elétrico.

Os dedos estão fixos a uma base, que por sua vez está articulada por um pino à base central e articulada também por um pino a um braço. Este braço está também acoplado por um pino à base fixa ao braço robótico. É também nesta base fixa que está seguro o atuador.

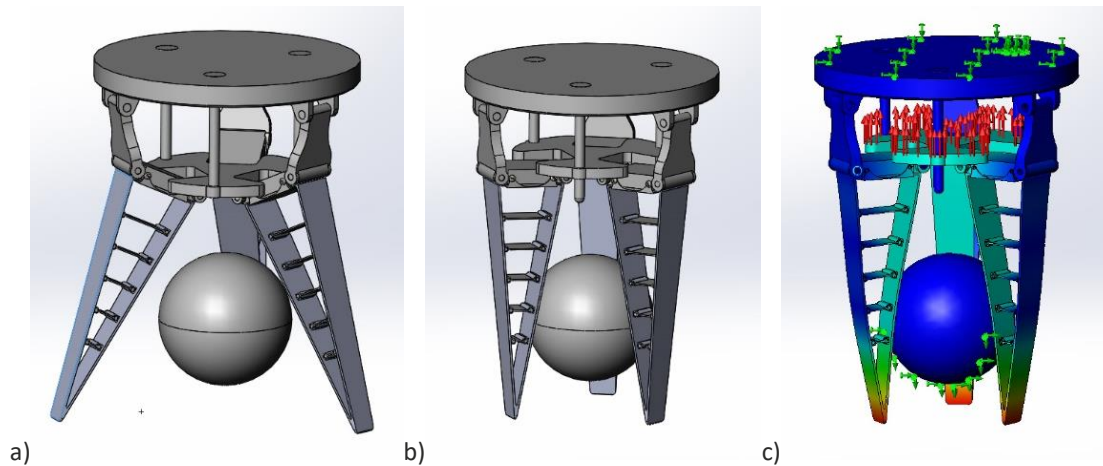


Figura 33 - Sequência de funcionamento do *gripper C* – *gripper* aberto (a), *gripper* ao atingir o objeto a manipular (b) e *gripper* agarrando o objeto (simulação do SolidWorks) (c).

O princípio de funcionamento do dedo é baseado na rotação do mesmo, o que leva à aproximação com o objeto de trabalho. Devido à geometria do dedo, o mesmo contorna o objeto na direção transversal, conseguindo segurar o mesmo com segurança. Este movimento de enclausura é possível devido à arquitetura do dedo, que permite transmitir as forças de reação pelas barras de ligação, criando tensões na parede oposta ao objeto.

Este conceito pode ainda ser melhorado, aplicando alguma rugosidade nas superfícies exteriores dos dedos para garantir um melhor contacto. Este processo será tão eficaz nas paredes de dentro como nas paredes da parte exterior, pois este *gripper* é versátil ao ponto de permitir o manuseamento de objetos que tenham de ser agarrados pela parte interior dos mesmos, como por exemplo um copo de vidro.

Para a criação deste conceito, através de métodos de fabrico aditivo, os materiais necessários são:

- PLA – Fabrico totalmente aditivo – base do *gripper* e base dos dedos;
- Silicone – Fabrico rápido de moldes/Fabrico híbrido (com PLA) – dedos.

3.4.1.4 Solução D

Como anteriormente referido este modelo, o modelo D, apresentado na Figura 34, é uma versão posterior do modelo C, na qual foram repensados os dedos do *gripper*.

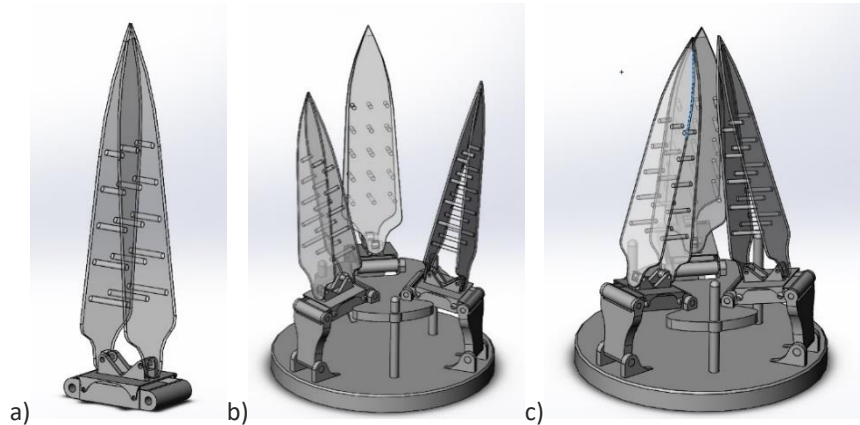


Figura 34 - Solução D – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do *gripper* aberto (b) e do conjunto do *gripper* fechado (c).

O mecanismo de funcionamento da base, ilustrado na Figura 35, é exatamente o mesmo do modelo anterior. Como já referido, a principal diferença está no *design* do dedo. Em vez de as duas paredes do dedo estarem ligadas entre si por barras de ligação e fixas entre si nas arestas superiores, este novo conceito apresenta pontos de ligação por pequenos perfis circulares, e uma conexão superior através de apenas um vértice. Esta ideia nasce na ambição de inovar e querer aumentar as capacidades do *gripper*. As ligações entre as superfícies do dedo do modelo anterior são assim desenhadas para garantir um movimento de inclusão do objeto na direção transversal. Esta nova geometria surge no sentido de, para além de conseguir esta inclusão transversal do objeto, conseguir também um movimento semelhante na direção longitudinal. Assim, é possível obter um *gripper* mais eficiente.

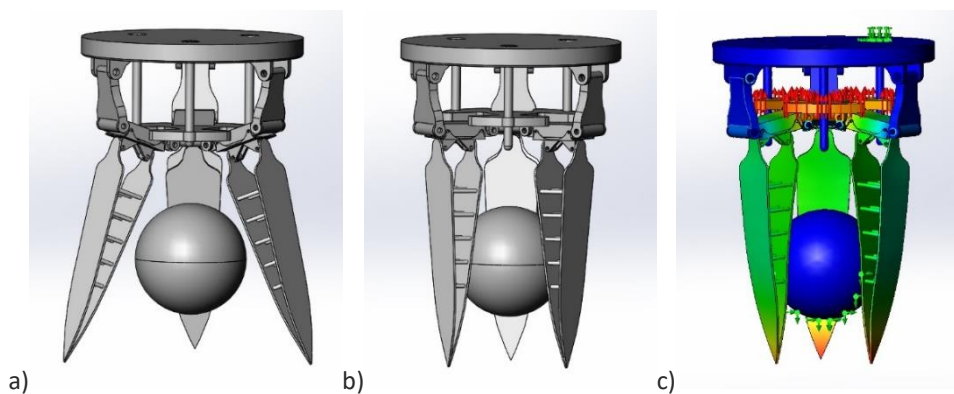


Figura 35 - Sequência de funcionamento do *gripper* D – *gripper* aberto (a), *gripper* ao atingir o objeto a manipular (b) e *gripper* agarrando o objeto (simulação do SolidWorks) (c).

Assim como o seu modelo antecessor, para a criação deste conceito, através de métodos de fabrico aditivo, os materiais necessários são:

- PLA – Fabrico totalmente aditivo – base do *gripper* e base dos dedos;
- Silicone – Fabrico rápido de moldes/Fabrico híbrido (com PLA) – dedos.

3.4.1.5 Solução E

A última solução a apresentar, a solução E, proveniente do seu modelo antecessor, o modelo C e também do modelo mais recente, D, é um conceito também inovador e ambicioso. Este modelo está apresentado na Figura 36.

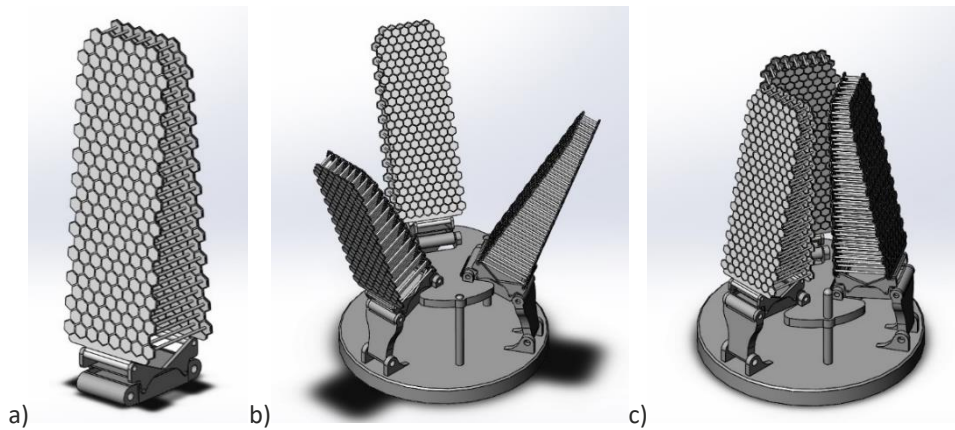


Figura 36 - Solução E – vistas dimétricas do conjunto de uma garra (a), do conjunto do *gripper* aberto (b) e do conjunto do *gripper* fechado (c).

O sistema de funcionamento, ilustrado na Figura 37, é o mesmo das duas últimas soluções.

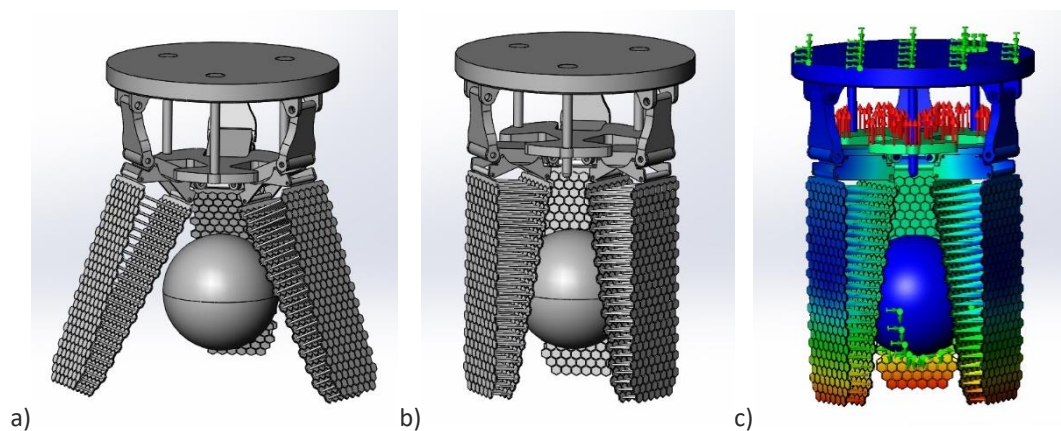


Figura 37 - Sequência de funcionamento do *gripper* E – *gripper* aberto (a), *gripper* ao atingir o objeto a manipular (b) e *gripper* agarrando o objeto (simulação do SolidWorks) (c).

Como o modelo D surgiu para permitir movimentos de deformação longitudinal em torno do objeto, este novo conceito mostra-se ainda mais eficaz na facilidade em conseguir executar os movimentos de contorno do objeto em qualquer direção. O novo desenho dos dedos consiste essencialmente em duas paredes desenhadas com polígonos hexagonais ligados entre si por membranas finas. Esta ligação entre paredes é feita por perfis circulares que ligam pares de hexágonos. Este *design* complexo acrescenta uma enorme versatilidade de movimento aos dedos do *gripper*, que é basicamente o fator mais importante quando se fala de *soft robotics*.

É ainda importante referir que o desenho dos dedos é adaptável, ou seja, para a mesma área útil, podem ser utilizados desenhos de hexágonos maiores (logo um número mais baixo de hexágonos e pontes de ligação) como desenhos de hexágonos mais pequenos (e um número de hexágonos maior, assim como de pontes de ligação) dependendo dos parâmetros requisitados ao *gripper*.

Como os modelos anteriormente apresentados, para a criação deste conceito, através de métodos de fabrico aditivo, os materiais necessários são:

- PLA – Fabrico totalmente aditivo – base do *gripper* e base dos dedos;
- Silicone – Fabrico rápido de moldes/Fabrico híbrido (com PLA) – dedos.

3.4.2 Análise SWOT

De maneira a facilitar o processo de discussão dos modelos e a sua aprovação, foi desenvolvida uma análise SWOT para os mesmos, apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise SWOT das soluções concebidas

Solução	Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
A	Simplicidade geométrica.	Modelo semelhante a outros já existentes; Fiabilidade do sistema de acionamento; Limitação de movimento.	Possibilidade de rotação dos dedos em torno da base.	Competitividade de mercado.
B	Capacidade de manipulação de grandes massas.	Modelo semelhante a outros já existentes; Complexidade de geometria.	Possibilidade de incorporação de materiais rígidos.	Competitividade de mercado.
C	Simplicidade geométrica.	Modelo semelhante a outros já existentes.	Facilidade de produção.	Competitividade de mercado.
D	Deformação longitudinal em torno do objeto.	Complexidade geométrica.	Desenho inovador – oportunidade de mercado.	Dificuldade de fabrico.
E	Deformação longitudinal em torno do objeto.	Complexidade geométrica.	Desenho inovador – oportunidade de mercado.	Dificuldade de fabrico.

Esta análise é uma ferramenta bastante útil na idealização e conceção de novas soluções, pois avalia as mesmas nos seus pontos fortes, pontos fracos, e nas oportunidades e ameaças a que cada uma está sujeita.

3.4.3 Discussão e seleção da solução a desenvolver

Após a apresentação dos conceitos desenvolvidos, com o auxílio da análise SWOT anteriormente apresentada (Capítulo 3.4.2), em conjunto com a empresa acolhedora, foi decidido que o modelo E seria o modelo de dedo mais interessante de desenvolver e consequentemente conceber, principalmente por se mostrar um conceito inovador. Neste capítulo estão apresentadas as fases sucessivas de aprimoramento do conceito. Em primeiro lugar é abordado o dedo, pois é a parte mais relevante do projeto. Quanto ao mecanismo de atuação, a base e todos os restantes componentes integrais do conjunto final, foram considerados posteriormente a esta parte do projeto, pois são peças e mecanismos de menor relevância.

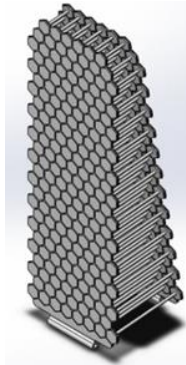
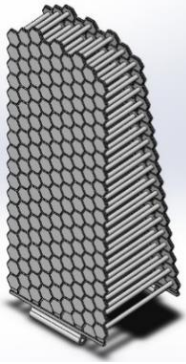
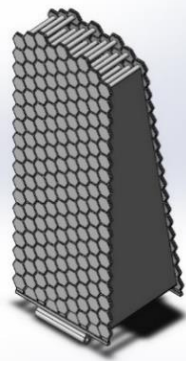
3.4.3.1 Dedo

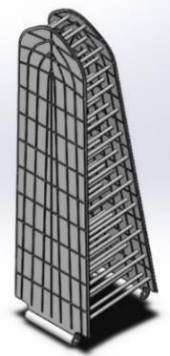
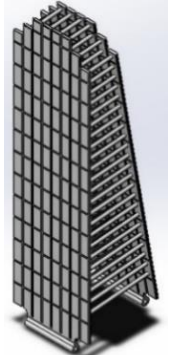
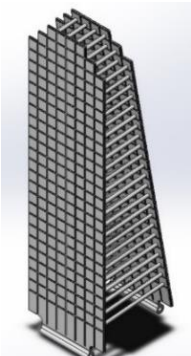
Nesta fase do projeto, foram explorados vários modelos semelhantes ao modelo E para tentar maximizar a eficiência do *grripper*, ao melhorar a forma de contacto com o objeto de estudo. De seguida estão apresentados, na Tabela 5, os vários modelos idealizados, assim como a descrição das suas particularidades.

Tabela 5 - Modelos conceptuais (E0 a E7)

Modelo	Ilustração	Descrição
Modelo E0		Modelo original (modelo E).

Figura 38 - Vista isométrica do modelo E0.

Modelo	Ilustração	Descrição
Modelo E1		Diminuição da espessura na ligação entre hexágonos.
<p>Figura 39 - Vista isométrica do modelo E1.</p>		
Modelo E2		Alteração da disposição dos hexágonos do modelo original. No modelo E0 os hexágonos estavam alinhados horizontalmente e neste modelo passam a estar alinhados verticalmente para facilitar a deformação longitudinal; Diminuição da espessura da ligação longitudinal dos elementos da superfície, para fragilizar as linhas verticais que separam os hexágonos.
<p>Posteriormente, foram retirados alguns tirantes de ligação, para permitir uma maior deformação no centro.</p>		
Modelo E3		Modelo E2 com a integração de paredes nas laterais.
<p>Figura 41 - Vista isométrica do modelo E3.</p>		

Modelo	Ilustração	Descrição
Modelo E4		Alteração dos elementos da superfície. Enquanto o modelo E0 apresentava hexágonos, este novo modelo apresenta várias fendas ao longo das suas faces criando a geometria que se observa na figura.
	<p>Figura 42 - Vista isométrica do modelo E4.</p>	
Modelo E5		Uso de retângulos como elementos de superfície; Diminuição da espessura da ligação longitudinal dos elementos da superfície, ou seja, fragilização das faces do dedo por linhas verticais paralelas.
	<p>Figura 43 - Vista isométrica do modelo E5.</p>	
Modelo E6		Alteração dos elementos da superfície para quadrados.
	<p>Figura 44 - Vista isométrica do modelo E6.</p>	

Modelo	Ilustração	Descrição
Modelo E7		Modelo E6 com uma diminuição da espessura da ligação horizontal dos elementos da superfície.

Figura 45 - Vista isométrica do modelo E7.

Posteriormente, após uma breve análise dos conceitos anteriormente descritos, acompanhados de simulações no SolidWorks, foram descartados alguns dos mesmos, de forma a manter os modelos mais singulares:

- **Modelo E0** – este modelo foi selecionado para o estudo, como base de comparação;
- **Modelo E1** – esta aplicação foi descartada por ser uma solução idêntica à original, sendo que a única alteração está também aplicada, de forma mais eficiente, no modelo E2;
- **Modelo E2** – este modelo também foi selecionado para o estudo devido à sua singularidade. De maneira a melhorar este modelo e tentar adaptar as vantagens do modelo E3, foi ainda alterado o seu desenho, retirando alguns elementos tirantes do dedo. A seleção dos elementos tirantes foi realizada para criar uma maior adaptabilidade de movimento no centro da face do dedo, e para tal foi retirado um maior número de elementos no centro, deixando os contornos do dedo com uma maior rigidez. O processo foi cuidadoso no sentido de deixar a peça simétrica;
- **Modelo E3** – a introdução das paredes laterais no dedo levou a um aumento de rigidez da estrutura. Por um lado, a deformação longitudinal da parede no contacto aproximava-se da deformação transversal (o que era o pretendido), no entanto ambas as deformações eram bastante reduzidas;
- **Modelo E4** – este modelo avançou para a próxima fase devido à singularidade da sua forma;
- **Modelo E5** – este conceito foi também escolhido, entre os últimos três modelos, por apresentar uma maior eficiência de funcionamento nas primeiras simulações;
- **Modelo E6 e E7** – estes modelos foram descartados por se apresentarem muito semelhantes ao modelo E5 e com piores resultados.

Foi então realizada uma análise mais cuidada dos quatro modelos mais relevantes. Este estudo estático (*static*) foi feito com a finalidade de comparar os resultados das simulações nos diferentes modelos. As simulações foram realizadas todas com os mesmos parâmetros (carga e aplicação da mesma, pontos de fixação, entre outros) para melhor comparar os resultados. Em seguida são apresentados os dados de pré-processamento relevantes para a simulação realizada com o modelo E0, para mostrar os parâmetros utilizados em todas as simulações:

- **Componentes** – os componentes utilizados nas simulações realizadas são sempre os mesmos, à exceção do dedo que, logicamente, é diferente em cada simulação. Como se pode observar na Figura 46, o conjunto utilizado na simulação apresenta uma base (constituída por duas peças), o dedo e meia esfera (objeto de estudo escolhido para simular a manipulação);

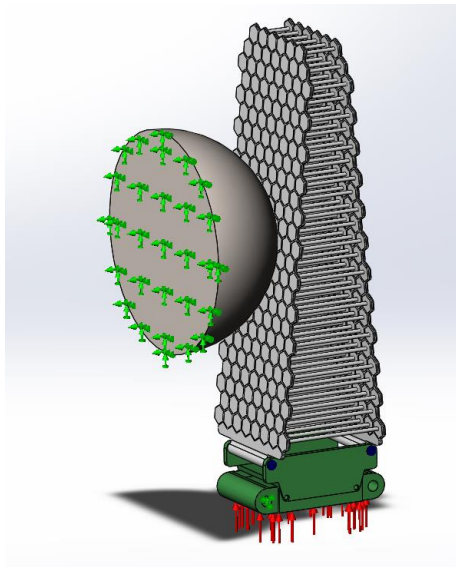


Figura 46 - Vista do modelo E0 pronto para simular o estudo.

- **Materiais** – para o dedo foi escolhido como material um elastómero de silicone, pois foi o material considerado para o projeto até esta fase. Para a base foi escolhido o PLA com vista a produzir este componente por fabrico aditivo. Para a semi-esfera foi escolhido um aço ligado por apresentar propriedades mecânicas muito superiores aos restantes materiais, conseguindo assim manter-se indeformável durante o estudo. Na Figura 47 estão apresentadas as propriedades utilizadas para os dois primeiros materiais referidos. O aço ligado foi escolhido diretamente da biblioteca de materiais do SolidWorks;

Property	Value	Units	Property	Value	Units
Elastic Modulus	50000000	N/m ²	Elastic Modulus	3500000000	N/m ²
Poisson's Ratio	0.28	N/A	Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus	4.9e+10	N/m ²	Shear Modulus	2400000000	N/m ²
Mass Density	2330	kg/m ³	Mass Density	1250	kg/m ³
Tensile Strength	6000000	N/m ²	Tensile Strength	46800000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²	Compressive Strength	17900000	N/m ²
Yield Strength	2400000	N/m ²	Yield Strength	93000000	N/m ²

Figura 47 - Propriedades dos materiais – elastómero de silicone (a) e PLA (b).

- **Ligações** – a ligação entre a base e o dedo foi feita por pinos (contacto *pin*), como se pode observar na Figura 48. No contacto da esfera com o dedo foi utilizado um contacto sem penetração (contacto *no penetration*), assim como nas faces de contacto do dedo com a base, como ilustrado na Figura 49;

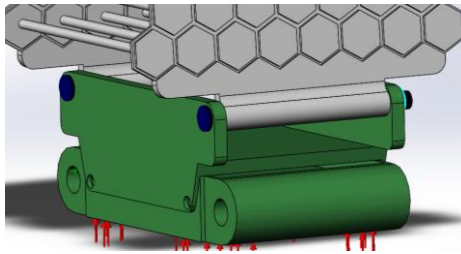


Figura 48 – Representação da ligação *pin* entre o dedo e a base.

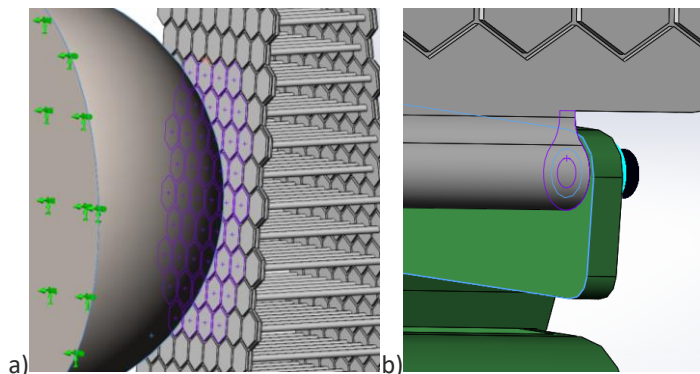


Figura 49 - Ilustração dos *contact set's* utilizados - entre o dedo e a esfera (a) e entre o dedo e a base (b).

- **Condições fronteira** – como referido anteriormente, a semi-esfera serve como uma condição de fronteira, e como tal a face da mesma foi fixa (restrição *fixture*). Para permitir ao dedo um movimento de contorno da esfera, o furo interior da base foi fixo, permitindo a rotação, como uma dobradiça (restrição *fixed hinge*). Esta restrição permite criar um movimento rotativo com uma carga aplicada na base, como descrito no próximo ponto. Na Figura 50 está apresentada esta fixação referida;

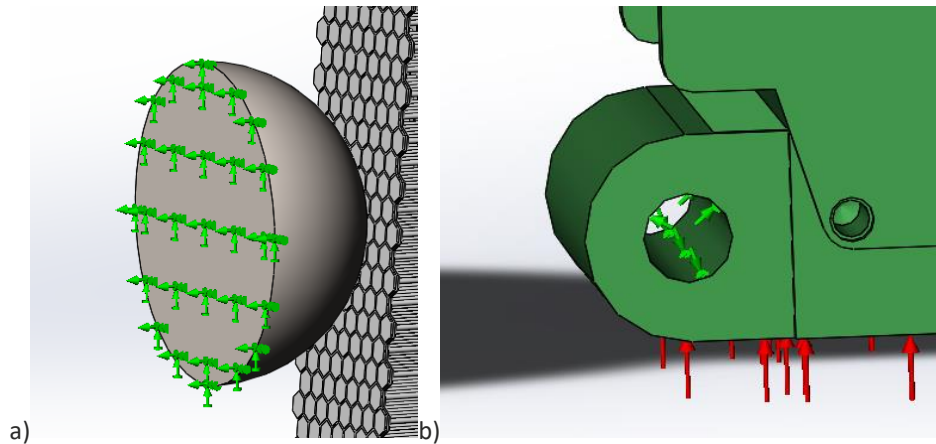


Figura 50 – Restrição utilizada - na esfera (a) e na base (b).

- **Carga aplicada** – o estudo em si foi feito apenas com um dedo e não com a estrutura completa para reduzir o esforço computacional, e também porque a estrutura global só seria finalizada posteriormente a esta fase. Desta forma a atuação simulada, porém semelhante, não é exatamente a atuação real. No entanto nesta fase o foco passa pela comparação do comportamento de cada solução. Para efeitos de simulação, a carga foi aplicada como uma pressão uniformemente distribuída na face inferior da base, como ilustra a Figura 51;

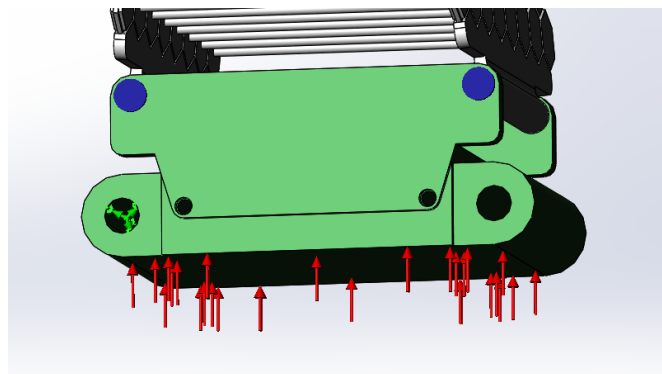


Figura 51 - Representação da carga aplicada.

- **Malha** – a malha foi definida através do comando *curvature-based mesh*. Este tipo de refinamento utiliza uma malha mais aprimorada em zonas com grandes variações geométricas e uma malha mais grosseira em zonas lineares. Foi utilizada uma malha grosseira para diminuir o esforço computacional, pois os dedos apresentavam geometrias complexas. Apenas foram usados controlos de malha (*mesh control*) em alguns dedos, quando estes apresentavam geometrias de tal complexidade que seria impossível realizar a simulação sem este mesmo comando. Os parâmetros referidos encontram-se apresentados na Figura 52. Estes parâmetros levaram a que os estudos se realizassem com aproximadamente 90 mil elementos e 150 mil nós;

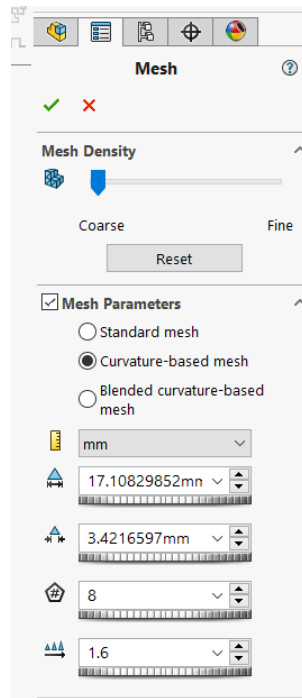


Figura 52 - Parâmetros de malha.

- **Resultados** – os resultados apresentados de tensões foram retirados diretamente do SolidWorks. Os resultados de área de contacto foram obtidos através da medição dos ângulos de contacto do dedo com a esfera, em dois planos ortogonais, num paralelo e outro perpendicular ao eixo principal do *gripper*, ambos contendo o centro da esfera de teste. De seguida foram usadas essas medidas para calcular dois diferentes diâmetros e conseqüentemente a área de uma elipse. Este processo está ilustrado em seguida, na Figura 53. Na Tabela 6 estão apresentados os resultados provenientes deste estudo.

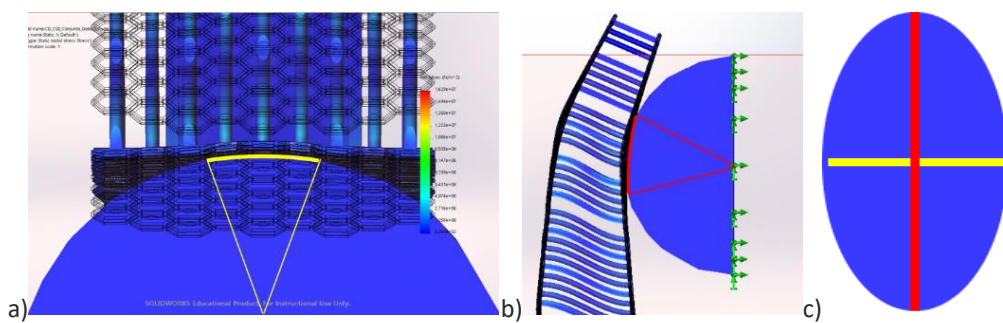
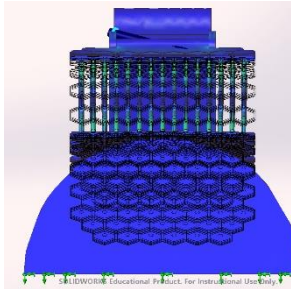
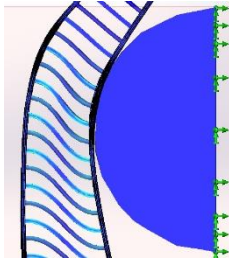
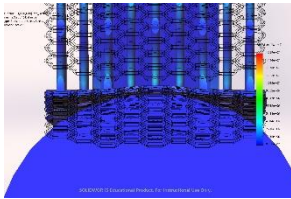
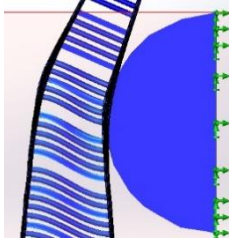
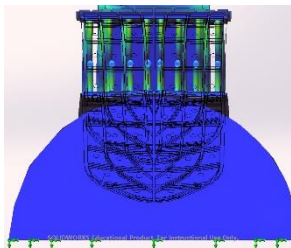
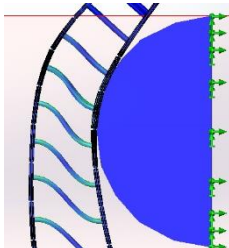
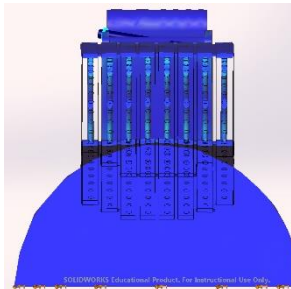
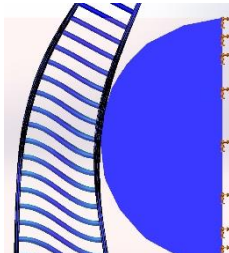


Figura 53 - Método de medição da área aproximada de contacto - vista superior em corte (a), vista lateral em corte (b) e representação geométrica da área de contacto através de uma elipse (c).

Tabela 6 - Análise dos estudos feitos aos 4 modelos mais relevantes

Modelo	Deslocamento longitudinal	Deslocamento transversal	Tensão de von Mises máxima nos tirantes (aproximada)	Área aproximada de contacto
E0			5,8 MPa	1,29 cm ²
E2			5,4 MPa	3,46 cm ²
E4			5,0 MPa	0,97 cm ²

Modelo	Deslocamento longitudinal	Deslocamento transversal	Tensão de von Mises máxima nos tirantes (aproximada)	Área aproximada de contacto
E5			6,3 MPa	1,08 cm ²
	Figura 60 - Simulação de funcionamento - modelo E5 (vista superior em corte).	Figura 61 - Simulação de funcionamento - modelo E5 (vista lateral em corte).		

Interpretando os dados acima apresentados, a diferença entre as tensões nos elementos tirantes não é significativa, mas a diferença da área de contacto já se mostra relevante. Como o modelo E2 exibe melhores resultados, pois apresenta uma maior deformação em torno do objeto de teste, foi o modelo escolhido para ser desenvolvido.

Numa fase posterior foram ainda realizados alguns redimensionamentos geométricos ao modelo selecionado (modelo E2), para possibilitar a produção do componente segundo o método selecionado. Este método de produção, que será revisto posteriormente nesta dissertação, condicionou a geometria da peça em dois pontos principais:

- Espessura mínima de parede – 0,5 mm;
- Espessura mínima de detalhes numa superfície – 0,25 mm.

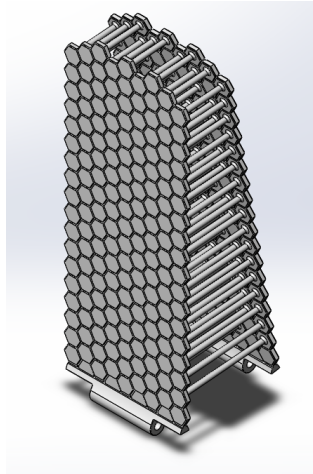


Figura 62 - Vista isométrica do modelo E2.2.

Na Figura 62 está apresentado o modelo final, adaptado ao processo de fabrico, tendo sido alterada a espessura da parede e as espessuras dos detalhes. Foi ainda realizado um novo estudo, apresentado na Tabela 7, com os mesmos parâmetros dos estudos anteriores, para comparar este novo modelo.

Tabela 7 - Análise do estudo feito ao modelo E2.2

Modelo	Deslocamento longitudinal	Deslocamento transversal	Tensão de von Mises máxima nos tirantes (aproximada)	Área aproximada de contacto
E2.2			4,2 MPa	1,51 cm ²

Figura 63 - Simulação de funcionamento - modelo E2.2 (vista superior em corte).

Figura 64 - Simulação de funcionamento - modelo E2.2 (vista lateral em corte).

Como é possível verificar, a área aproximada de contacto diminui para menos de metade da solução E2, embora se mantenha superior aos valores obtidos pelos restantes modelos.

3.4.3.2 Mecanismo global

O mecanismo global consiste no conjunto de todos os outros componentes, para além dos dedos, que contribuem para o funcionamento do *gripper*.

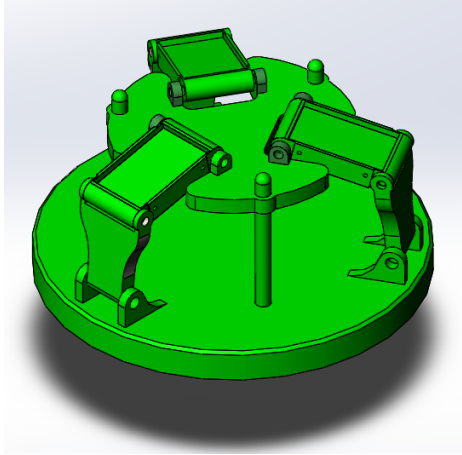


Figura 65 - Ilustração do conceito inicial do mecanismo global.

Numa fase inicial, foi desenhada uma versão simples, como se pode observar na Figura 65, com o foco no funcionamento do mecanismo. Ao longo do projeto, a estrutura foi sofrendo diversas alterações, tanto para otimizar o seu funcionamento, como para integrar novos componentes, como por exemplo o atuador, que não foi considerado inicialmente.

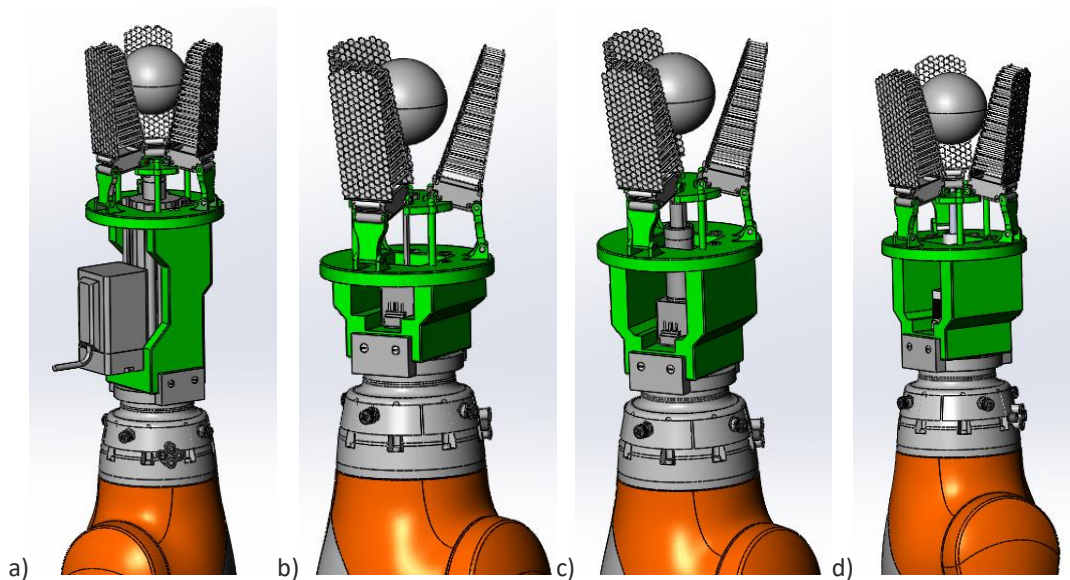



Figura 66 - Ilustração da fase intermédia de desenvolvimento do mecanismo geral - adaptação ao atuador A (a), ao atuador B (b), ao atuador C (c) e ao atuador D (c).

Uma das fases em que se nota uma maior alteração do mecanismo geral é na adaptação do atuador, como se nota ao comparar a Figura 65 com a Figura 66. Nesta fase foram comparados 4 atuadores diferentes, através das suas características, cujas geometrias foram modeladas e incluídas nos modelos 3D, para melhor compreender as respetivas geometrias de cada adaptador. Em seguida, na Tabela 8, estão apresentados os 4 modelos considerados, dos quais três são atuadores lineares elétricos (A, C e D) e um é um atuador elétrico de fuso (B).

Tabela 8 - Comparação dos 4 modelos de atuador considerados

Atuador	Designação	Curso	Força máxima	Figura
A	<i>Battery-less Absolute Encoder Type - LEY</i>	30 mm	60 N	 <p>Figura 67 - <i>Battery-less Absolute Encoder Type – LEY</i> [61].</p>
B	<i>Motorized Lead Screw Actuator - MLS11A10-M04010S10160N-A000-RH1</i>	101,6 mm	89 N	 <p>Figura 68 - <i>Motorized Lead Screw Actuator</i> [62].</p>
C	<i>Motorized Lead Screw Actuator - MLA11A10-0039S0100-E5-S02</i>	25,4 mm	89 N	 <p>Figura 69 - <i>Motorized Lead Screw Actuator</i> [63].</p>
D	<i>LGA281S10-B-THCA-038 - captive linear actuator – nema 11</i>	38,1 mm	130,7 N	 <p>Figura 70 - <i>LGA281S10-B-THCA-038 - captive linear actuator – nema 11</i> [64].</p>

Os parâmetros considerados, pretendidos para o modelo, eram um curso mínimo de 15 mm e uma força de atuação superior a 60 N. Parâmetros que foram obtidos através da análise dos modelos 3D e das simulações anteriormente apresentadas. Todos os atuadores apresentados excedem estes parâmetros limite. No entanto, foi escolhido o atuador D, não só devido à sua elevada força e curso, para garantir segurança no funcionamento, como também à simplicidade geométrica da sua estrutura.

Posteriormente, após a adaptação do atuador e do dedo, foram feitos alguns ajustes ao modelo até chegar ao modelo final, como por exemplo na ligação do *gripper* ao braço robótico, que inicialmente seria feita por parafusos alinhados transversalmente, e posteriormente todo o desenho da base foi repensado para obter uma ligação mais eficaz com uma disposição longitudinal dos parafusos, como se pode observar na Figura 71.

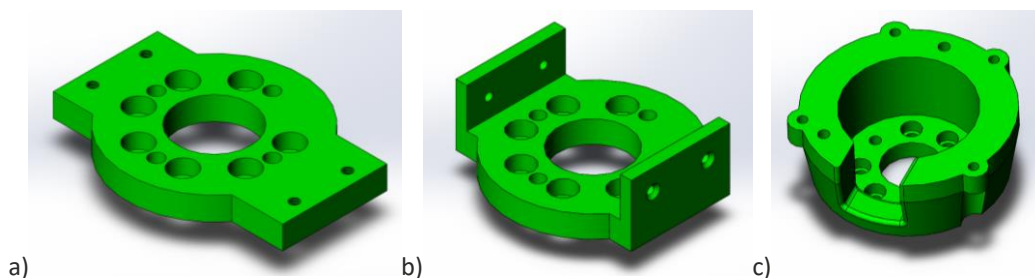


Figura 71 - Progressão da peça SG_P01_Base_Inferior - fase inicial (a), fase intermédia (b) e fase final (c).

O modelo inicial sofreu bastantes alterações até chegar ao modelo final, como se pode observar na Figura 72, na qual é possível visualizar o modelo final.

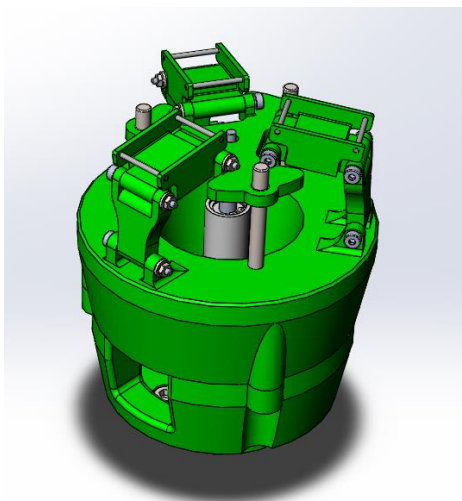


Figura 72 - Ilustração do conceito final do mecanismo global.

3.5 Projeto

Finalizada a fase do anteprojeto, é agora, neste capítulo, apresentada a solução final com todas as justificações tomadas no desenvolvimento da mesma.

3.5.1 Solução final implementada

Passando agora por descrever a solução final, apresentada na Figura 73, esta consiste num conceito inovador de *soft gripper*. Este novo conceito destaca-se pela arquitetura arrojada dos dedos, associada à utilização de um material pouco rígido, que permite que os mesmos se adaptem à geometria de um dado objeto, independentemente da sua forma geométrica.

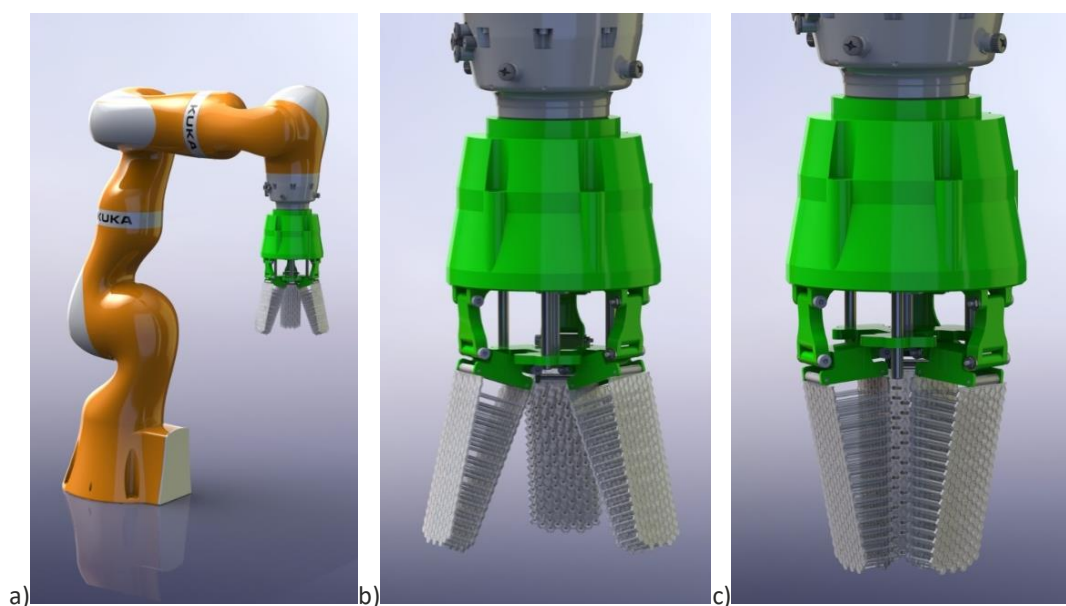


Figura 73 - Renderização da solução final - montada no robô (a), em vista detalhada do conjunto em posição aberta (b) e fechada (c).

O *gripper* está fixo no robô e funciona por acionamento do atuador elétrico presente na base do conjunto. Este atuador exerce uma força vertical de tração na base, como se pode ver na Figura 74 (a). A base é então deslocada em direção ao atuador, fazendo com que os dedos se aproximem do objeto a manipular (Figura 74 (b)), por ação do momento criado pela base.

Como anteriormente mencionado, a geometria dos dedos é uma geometria completamente nova e permite ao *gripper* segurar e manipular um dado objeto. Sendo que se trata de um *soft gripper*, como é habitualmente uma característica dos mesmos, este modelo é capaz de se adaptar a objetos diferentes. As limitações deste modelo, cuja massa própria é de aproximadamente 1 kg, são:

- Diâmetro máximo de uma esfera que consiga inscrever o objeto – 80 mm;
- Massa limite do objeto – 400 g.

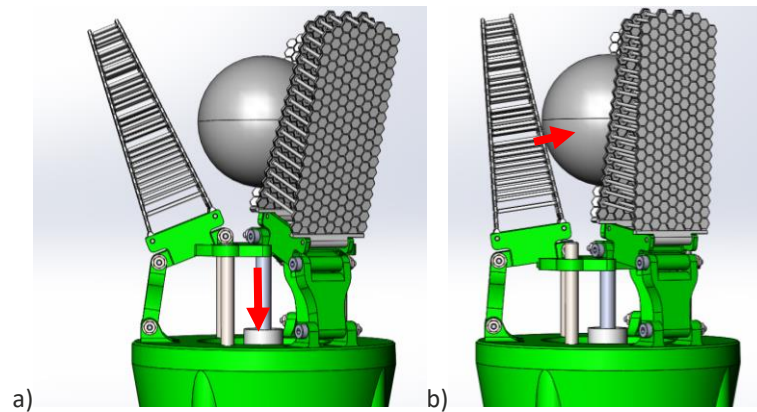
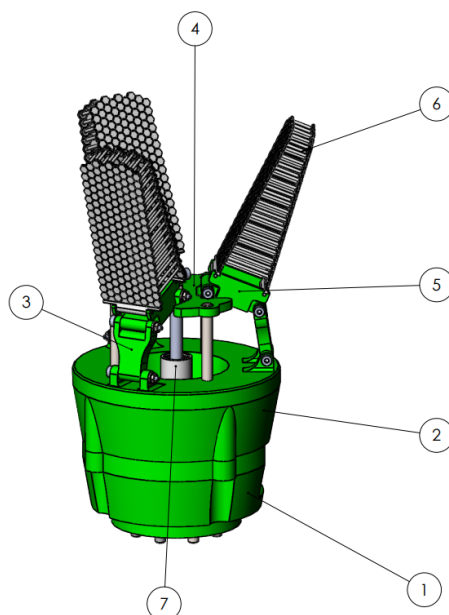


Figura 74 - Sequência de funcionamento do *gripper* - posição inicial aberta (a) e posição final (fechada).

Na Figura 75 estão apresentados os componentes principais do modelo concebido, que serão de seguida apresentados de forma mais detalhada. Em comum com todos estes componentes existe a presença de uma ou mais superfícies lisas que servem para facilitar a produção dos mesmos através de fabrico aditivo. No Anexo 6.3 é possível observar os desenhos de definição dos componentes desenhados. A nomenclatura utilizada, visível na lista de peças, está estruturada da seguinte maneira:

- Primeiras duas letras – conjunto ao qual uma peça pertence ou, no caso de um conjunto, designação do próprio (exemplo: Conjunto Dedo - CD);
- PXX ou C00 – no caso de ser uma peça é utilizado o “P” e em seguida o número da mesma dentro do conjunto em que se insere, no caso de ser um conjunto é utilizado o “C00” (exemplo: peça nº 1 – P01);
- Denominação da peça ou conjunto por extenso (exemplo: Dedo);
- Letra que indica a versão da peça ou do conjunto (exemplo: CD_P01_Dedo_A).



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	SG_P01_Base_Inferior_A	1
2	SG_P02_Base_Superior_A	1
3	SG_P03_Braço_A	3
4	SG_P04_Plataforma_A	1
5	CD_P02_Adaptador_A	3
6	CD_P01_Dedo_A	3
7	Atuador	6

Figura 75 - Apresentação dos componentes principais do *gripper* e lista de componentes.

3.5.1.1 Base inferior

A base inferior é o componente que faz a ligação do conjunto *soft gripper* com o braço robótico, como se pode observar na Figura 76.

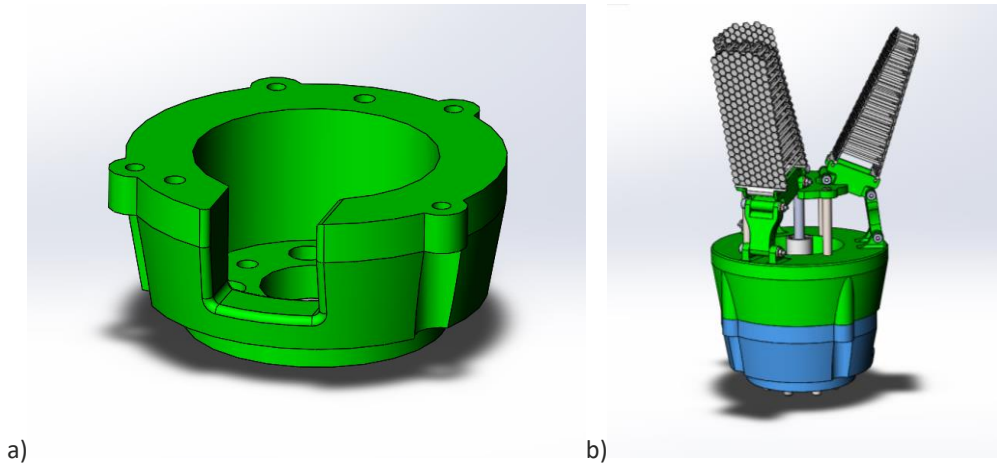


Figura 76 - Base inferior - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

Como se observa também na Figura 76 (a), esta base apresenta uma geometria não muito complexa, destacando-se pelo perfil circular, com espaço no centro para alojar o atuador e por uma fenda necessária para permitir passar os cabos de alimentação do mesmo.

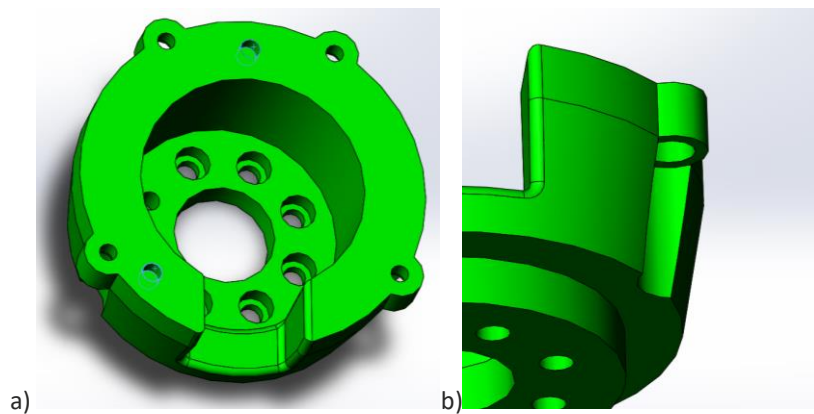


Figura 77 - Vistas dos furos de ligação da peça (a) e em detalhe de um furo de ligação com a base superior (b).

Na Figura 77 estão apresentados os furos para as respetivas ligações do componente. Para a ligação da base inferior com o braço robótico, a base apresenta 8 furos, igualmente distanciados entre si, sendo que 7 são furos para um parafuso M6 e o outro é um furo de diâmetro 6.2 mm para inserir um pino. Para a ligação com a base superior, esta é feita por 4 parafusos M5, como se pode ver pelos seus respetivos furos, igualmente distanciados ao centro da face onde se inserem, e com dois pinos guia a colocar nos dois furos mais próximos da extremidade interior.

3.5.1.2 Base superior

A base superior, apresentada na Figura 78, é um componente também de ligação, pois é a peça que fixa o atuador ao conjunto, assim como os braços que ligam aos dedos.

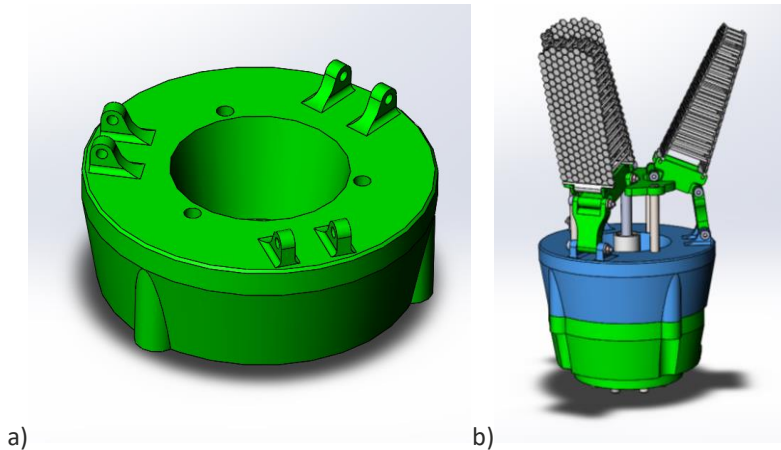


Figura 78 - Base superior - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

A geometria geral desta peça é semelhante à geometria da peça anteriormente descrita, ou seja, apresenta também um perfil circular oco, embora de paredes espessas para não comprometer a estabilidade da estrutura.

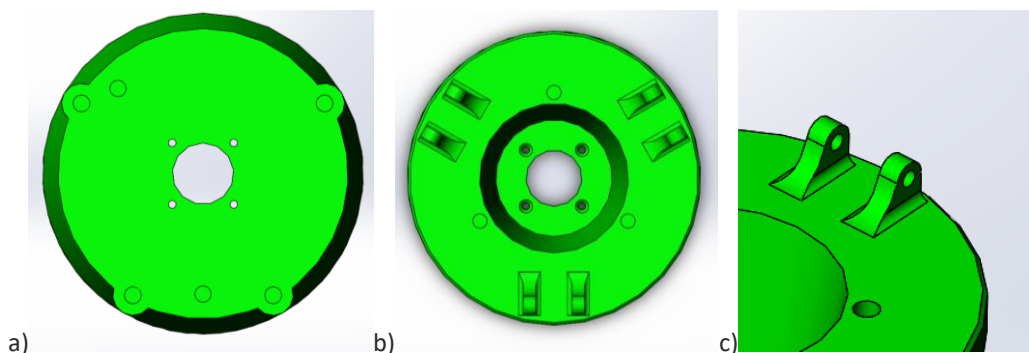


Figura 79 - Representação das características de ligação da base superior - vista inferior (a), vista superior (b) e vista em detalhe das abas de ligação ao braço e do furo para as guias (c).

A Figura 79 (a) mostra os furos de ligação desta peça com a base inferior, nomeadamente quatro furos concêntricos com os furos da base inferior, para alojar insertos para apertar parafusos M5, e furos de diâmetro 6.2 mm para os pinos. Na Figura 79 (b) observa-se um furo centrado na peça para permitir colocar o cilindro que envolve a haste do atuador, assim como 4 furos M2,5 para apertar o mesmo. Para a fixação dos braços é utilizado um sistema de duas abas, como se vê na Figura 79 (c), que apresentam raios de concordância para eliminar as arestas vivas e reduzir os pontos de concentração de tensões. Por último, este componente também apresenta 3 furos na parte superior para conterem pinos que vão servir como guias ao movimento vertical da plataforma.

3.5.1.3 Braço

O braço é um componente de ligação entre a base inferior e o adaptador, e é um componente de uma geometria bastante simples. Na Figura 80 está apresentado este componente, assim como a sua localização no conjunto.

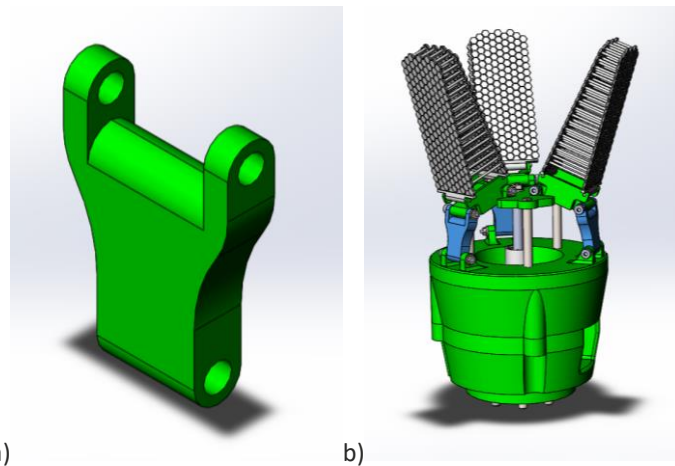


Figura 80 - Braço - vista do componente sozinho (a) e montado no conjunto (b).

Como referido anteriormente, a geometria desta peça é bastante simples. No entanto é importante notar que a os cotovelos da peça, presentes nas suas laterais, têm um raio de concordância, como se observa na Figura 81, para evitar a concentração de tensões e por consequência, a quebra do componente quando em serviço.

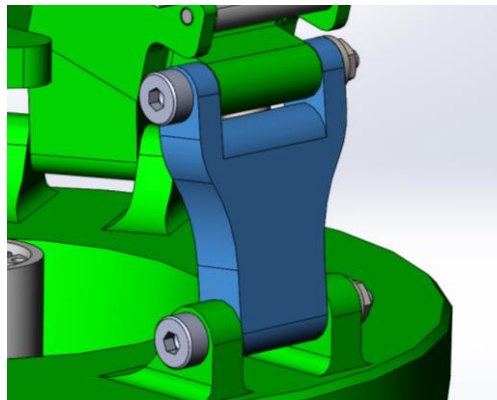


Figura 81 - Vista em detalhe do componente braço montado no conjunto.

3.5.1.4 Plataforma

Na Figura 82 está apresentada a plataforma. Este é o componente que acompanha o deslocamento da haste do atuador, mantém o próprio deslocamento puramente longitudinal por ação do deslizamento entre os casquilhos da plataforma e os pinos guia, e causa uma rotação no adaptador, possibilitando ao dedo um movimento de aproximação a um dado objeto.

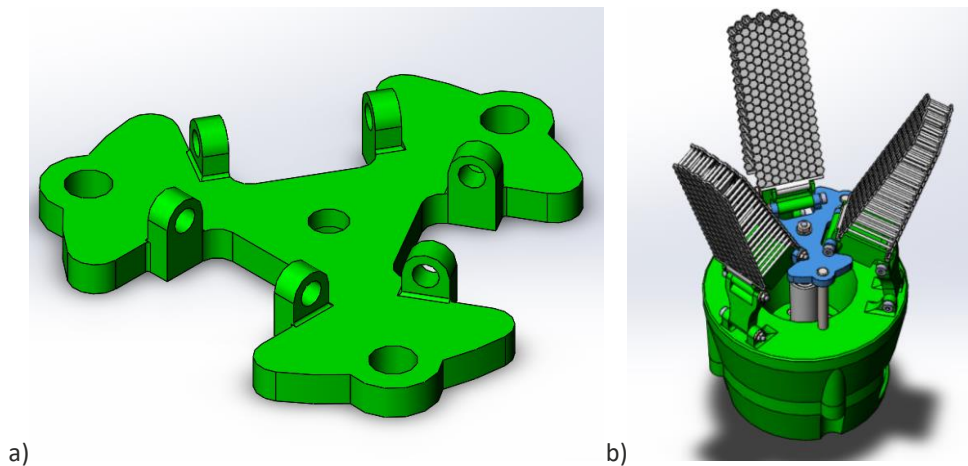


Figura 82 - Plataforma - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

Ainda na Figura 82 (a) podem-se observar 3 furos igualmente distanciados do centro, cujo propósito é de alojar os casquilhos que permitem o deslizamento da plataforma ao longo dos pinos guia. As 3 aberturas possíveis de observar entre esses 3 furos permitem ao adaptador uma rotação sem limitação e as abas presentes nestas fendas servem como ligação ao adaptador por meio de parafusos de ombro. Também se podem observar raios de concordância em certas arestas, cuja justificação se mantém igual às outras utilizações.

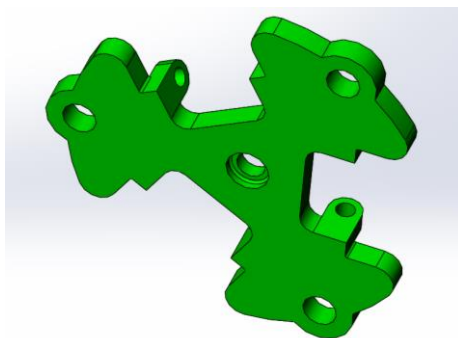


Figura 83 - Parte inferior da plataforma.

Na Figura 83 é possível observar, no furo central, uma diminuição da espessura. Esta alteração geométrica pretende fornecer o espaço ao atuador para passar o fuso e ser possível apertar este na face contrária.

3.5.1.5 Adaptador

O componente que faz a ligação do conjunto com cada dedo é o adaptador. Esta peça, apresentada na Figura 84, apresenta uma base ampla e lisa, para facilitar o fabrico da mesma, e apresenta também dois furos perto desta face e mais quatro furos, dois em cada uma das paredes laterais. Os furos presentes na base deste componente servem para as ligações entre os braços e a plataforma, enquanto os furos presentes nas faces laterais têm o propósito de fixarem os dedos.

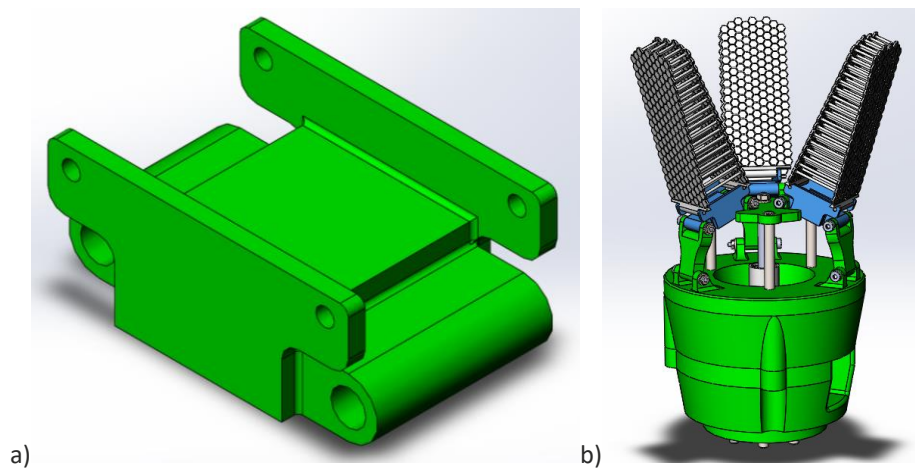


Figura 84 - Adaptador - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

Este componente apresenta também raios de concordância que eliminam arestas vivas, mais uma vez pela razão anteriormente enunciada. Na Figura 85 é possível visualizar alguns desses raios como exemplo.

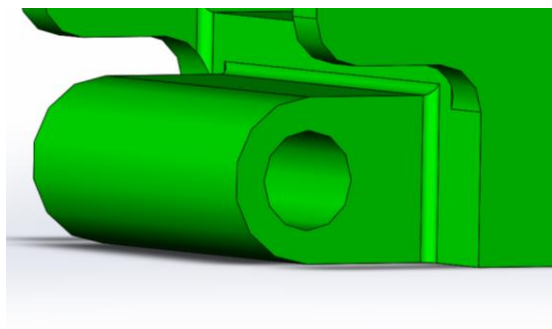


Figura 85 - Vista em detalhe dos raios de concordância do adaptador.

3.5.1.6 Dedo

O dedo é o componente principal deste projeto, pois foi centrado no mesmo que se desenvolveram as outras peças. Como é possível observar na Figura 86, o dedo apresenta uma geometria atípica para este tipo de aplicação, que é a base do seu funcionamento.

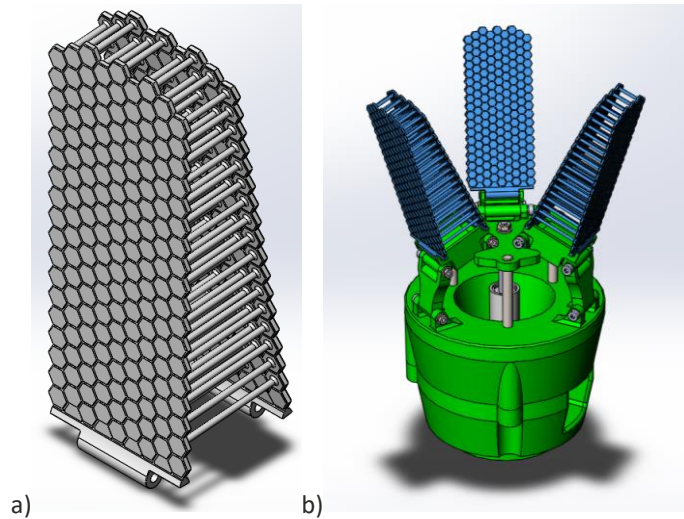


Figura 86 - Dedo - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

As suas paredes são constituídas por elementos hexagonais e esses mesmos elementos estão unidos longitudinalmente por uma membrana de 1 mm e transversalmente por uma membrana de 0,5 mm, para aumentar a deformação do dedo na zona de contacto com a peça e assim aumentar a área de contacto. Os elementos hexagonais homólogos de ambas as faces estão ligados entre si por tirantes de perfil circular, para transmitirem os deslocamentos de uma parede para a outra, causando assim um movimento de contorno de um dado objeto. No contacto entre os tirantes e as paredes existem também raios de concordância para homogeneizar a distribuição de tensões. Nem todos os elementos hexagonais estão ligados por tirantes, notando-se falta dessas ligações na zona central do dedo, para aumentar a conformabilidade das faces aos componentes. Na Figura 87 é possível observar os detalhes anteriormente descritos.

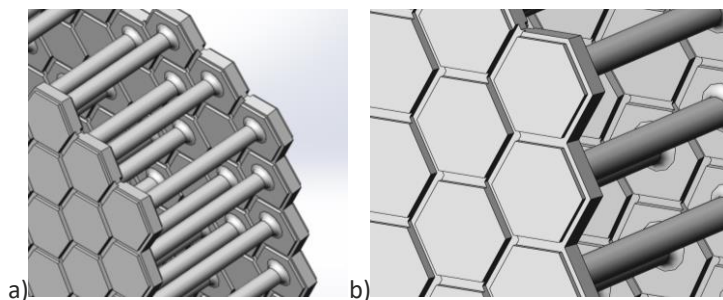


Figura 87 - Detalhes do dedo - nos tirantes (a) e na parede (b).

3.5.1.7 Atuador

O atuador é o componente responsável pelo movimento do *gripper*. Este encontra-se fixo à base superior e protegido pelo conjunto das duas bases que envolvem o mesmo, como anteriormente mencionado. Na Figura 88 está apresentado o modelo utilizado no desenho em SolidWorks.

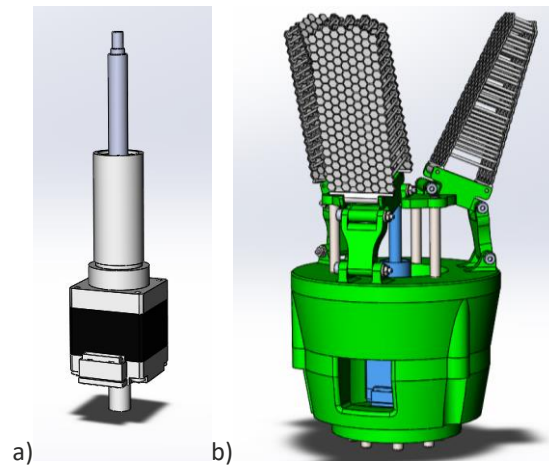


Figura 88 - Atuador - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

Na Figura 89 está apresentado o atuador escolhido, que tem como características principais:

- Força máxima – 130,7 N;
- Velocidade – 40 mm/s;
- Curso – 38,1 mm.



Figura 89 - LGA281S10-B-THCA-038 - captive linear actuator – nema 11 [64].

3.5.1.8 Kuka LBR iiwa 14 R820

O *soft gripper* é responsável por manusear um certo objeto. No entanto, é necessário um braço robótico para aproximar o *gripper* ao objeto e poder movimentar o mesmo consoante requisitado pelo operador. Na Figura 90 está apresentado o modelo utilizado no desenho em SolidWorks.

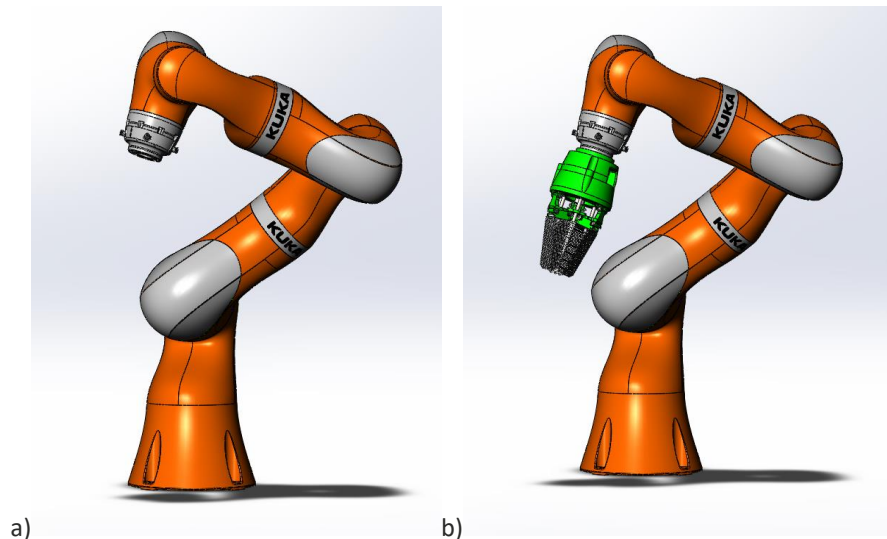


Figura 90 – Braço robótico - vista do componente (a) e montagem no conjunto (b).

Na Figura 91 está apresentado o robô antropomórfico colaborativo escolhido para este projeto, que apresenta como características principais:

- Capacidade de carga – 14 kg;
- Alcance máximo – 820 mm;
- 7 eixos de rotação.



Figura 91 - Kuka LBR iiwa 14 R820 [56].

3.5.2 Escolha de materiais

Neste subcapítulo estão apresentados os materiais utilizados na produção do *gripper* e em que componentes foram utilizados e a sua justificação:

- **Ácido Polilático (*polylactic acid* – PLA) [65]:**

O PLA, a escolha mais comum em processos de impressão 3D, é um poliéster biodegradável derivado do ácido láctico. Tem propriedades semelhantes ao polietileno tereftalato, mas tem uma temperatura de utilização contínua significativamente mais baixa. Os produtos de PLA podem ser reciclados após a utilização, seja ao fundir de novo o material, transformando-o uma segunda vez, ou através da hidrolisação ao ácido láctico, o produto químico base. Na Figura 92 é possível observar um rolo de filamento de PLA.



Figura 92 - Filamento de PLA – PLA Standard White [66].

Na Figura 93 estão apresentadas as propriedades do PLA utilizado, e encontram-se no anexo 6.4 de forma mais completa. Este material foi escolhido para o fabrico dos seguintes componentes do *gripper* devido à sua rapidez e qualidade de impressão e compatibilidade com o processo de fabrico (abordado posteriormente):

- Base inferior;
- Base superior;
- Plataforma.

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES			
Physical properties	Unit	Value	Method
Density	g/cm ³	1,24	ISO 1183
Modulus of elasticity	MPa	2960	ISO 527
Tensile strength	MPa	61,5	ISO 527
Tensile strain at tensile strength	%	5,3	ISO 527
Tensile stress at break	MPa	38	ISO 527
Tensile strain at break	%	10,5	ISO 527
Flexural modulus	MPa	3295	ISO 178
Flexural strain at break	%	NB	ISO 178
Flexural stress at 3.5% strain	MPa	88,8	ISO 178
Notched impact strength (Charpy), RT	kJ/m ²	2,8	ISO 179-1/1 eA
Impact strength (Charpy), RT	kJ/m ²	30,8	ISO 179-1/1 eU
Melting temperature	°C	>155	ISO 3146-C

Figura 93 - Propriedades do PLA Standard White [66].

- **Grey Pro Resin [67]:**

Grey Pro Resin é uma resina de alta precisão dimensional, alongamento moderado e boa resistência à deformação ao longo do tempo, características que a tornam versátil e adequada para uma ampla gama de aplicações de engenharia. Na Figura 94 está apresentada uma aplicação neste material.



Figura 94 - Exemplo de aplicação em Grey Pro Resin [67].

Na Figura 95 estão apresentadas as propriedades mais relevantes do Grey Pro Resin, e encontram-se no anexo 6.5 de forma mais completa. Este material foi escolhido nos componentes que apresentam detalhes de baixas dimensões, para garantir segurança no funcionamento do mecanismo. Os componentes referidos são:

- Braço;
- Adaptador.

GREY PRO RESIN	
Flexural Modulus (GPa)	2.0 GPa
Tensile Modulus (GPa)	2.6 GPa
Elongation (%)	13.0%
Technical Data	

Figura 95 - Propriedades do Grey Pro Resin (adaptado de [67]).

- **Ultrasint TPU 90A-01 [68]:**

O Ultrasint TPU 90A-01, um poliuretano termoplástico (*Thermoplastic polyurethane* – TPU), é um material totalmente funcional e flexível com elevada deformação até à rotura. O Ultrasint TPU 90A-01 combina uma elasticidade que se mantém ao longo de bastantes utilizações com uma boa resistência ao desgaste à abrasão, tornando-se um material ideal para prototipagem e fabrico de aplicações que requerem uma boa absorção de choques e elasticidade semelhante à borracha para uma ampla gama de

temperaturas. Produzido com tecnologia Multi Jet Fusion, Ultrasint TPU 90A-01 exibe superfícies lisas e alto detalhe. Na Figura 96 pode-se observar um exemplo de uma peça feita deste material.



Figura 96 - Ultrasint TPU 90A-01 [69].

Na Figura 97 estão apresentadas as propriedades do Ultrasint TPU 90A-01, e encontram-se no anexo 6.6 de forma mais completa. Este material foi escolhido para a produção dos dedos, devido à sua baixa rigidez e alta resistência, assim como pela compatibilidade com o processo de fabrico, que será apresentado de seguida.

MEASUREMENT	VALUE X Y	VALUE Z	STANDARD
Density	1.1	1.1	g/cm ³
Hardness Shore A	88	88	DIN ISO 7619-1
Tensile Strength	9	7	MPa DIN 53504, S2
Tensile Elongation at break	220	120	% DIN 53504, S2
Tensile Modulus	75	85	MPa ISO 527-2, 1A
Flexural Modulus	75	75	MPa DIN EN ISO 178
Tear resistance (Trouser)	20	16	kN/m DIN ISO 34-1, A
Tear resistance (Graves)	36	32	kN/m DIN ISO 34-1, B
Compression set B (23°C, 72h)	20	20	% DIN ISO 815-1
Rebound resilience	63	63	% DIN 53512
Abrasion resistance	140	100	mm ³ DIN ISO 4649
Charpy Impact Strength (notched, 23°C)	Partial Break	No Break	DIN EN ISO 179-1
Charpy Impact Strength (notched, -10°C)	21	29	kJ/m ² DIN EN ISO 179-1
Rosflex testing (100k cycles, 23°C)	No Cut Growth		ASTM D1052
Rosflex testing (100k cycles, -10°C)	No Cut Growth		ASTM D1052
Vicat/ A (10N)	84	96	°C DIN EN ISO 306
Melting temperature	120 – 150	120 – 150	°C ISO 11357 (20K/min)

Actual values may vary with build condition

Figura 97 - Propriedades do Ultrasint TPU 90A-01 (adaptado de [68]).

3.5.3 Processos de fabrico

Os processos de fabrico foram escolhidos em concordância com os materiais selecionados, e estão apresentados de seguida:

- **Fabricação de filamento fundido (FFF) [48]:**

O FFF, pertencente ao grupo de processo MEX, consiste na extrusão de um filamento de matéria-prima, através de um orifício aquecido, que se encontra montado num sistema que permite movimentos lineares ao longo da área de impressão. Este tipo de processo é uma escolha bastante comum entre as restantes tecnologias de fabrico aditivo, devido à sua facilidade de utilização e ao seu preço reduzido. Na Figura 98 está apresentada uma impressora FFF.



Figura 98 - Impressora 3D – FFF (adaptado de[70]).

Este processo de fabrico foi realizado com PLA, para os componentes selecionados para este material, indicados anteriormente (Capítulo 3.5.2).

- **Estereolitografia (Stereolithography – SLA) [71]:**

A SLA pertence a uma família de tecnologias de fabrico VPP, vulgarmente conhecida como impressão 3D de resina. Estas máquinas são todas construídas em torno do mesmo princípio, usando uma fonte de luz (um laser ou projetor) para curar a resina líquida, transformando-a em plástico endurecido. A principal diferenciação relativamente às outras tecnologias VPP reside no arranjo dos componentes do núcleo, como a fonte de luz, a plataforma de construção e o tanque de resina. Na Figura 99 está apresentada uma impressora SLA.



Figura 99 - Impressora 3D – SLA (adaptado de [71]).

Este processo de fabrico foi realizado com Grey Pro Resin, para os componentes selecionados para este material, indicados anteriormente (Capítulo 3.5.2).

- **HP *Multi jet fusion* [72]:**

A tecnologia HP *Multi Jet Fusion* baseia-se na impressão de jato de tinta, com materiais *jett*, caracterizado por um processo mecânico de precisão e de baixo custo. Esta tecnologia destaca-se principalmente pela capacidade de personalização de materiais e pela grande área disponível para a produção de vários componentes em simultâneo. Este tipo de fabrico oferece vantagens na velocidade de construção e controlo sobre as propriedades de peças e materiais que estão além das capacidades de outros processos de impressão 3D.

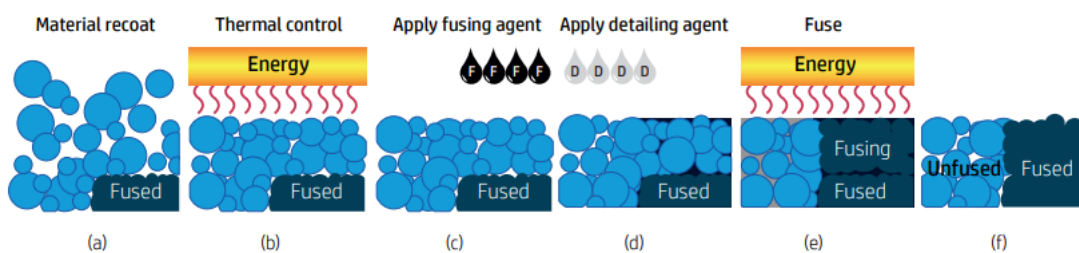


Figura 100 - Representação esquemática do processo de fabrico HP *Multi jet fusion* (adaptado de [72]) – colocação de uma camada de material (a), controlo térmico (b), aplicação de um agente de fusão (c), aplicação de um agente de detalhe (d), fusão (e) e final da etapa (f).

O processo de fabrico consiste na repetição da sequência apresentada na Figura 100. Esta sequência inicia-se pelo depósito de uma camada de material ao longo da superfície de trabalho (Figura 100 (a)). De seguida, é feito um controlo de temperatura à camada depositada (Figura 100 (b)), para ser possível depositar, com segurança, um agente de fusão na área destinada à fusão de material (Figura 100 (c)) e um agente de detalhe aplicado às extremidades da peça para um acabamento final de maior qualidade (Figura 100 (d)). Por fim, é fornecida energia de fusão ao material, para fundir as partes pretendidas do mesmo (Figura 100 (e)). Na Figura 100 (f) é possível observar a etapa final desta sequência que será repetida até completar o fabrico da peça ou das peças a produzir.

Este processo de fabrico foi realizado com Ultrasint TPU 90A-01, para os componentes selecionados para este material, indicados anteriormente (Capítulo 3.5.2).

3.5.4 Análise de esforços e dimensionamento

Para garantir o correto desempenho do conjunto concebido foram executados três estudos estáticos de funcionamento, definindo e verificando os parâmetros limite do *gripper*. O intuito destes estudos foi verificar a resistência da estrutura para uma força máxima arbitrada, assim como garantir que o mecanismo funciona corretamente, variando a geometria e a posição do objeto a manipular, num intervalo de valores estipulado. Em seguida são apresentados os dados de pré-processamento relevantes para o estudo 1, para mostrar os parâmetros utilizados em todas as simulações:

- **Componentes** – os componentes utilizados nas simulações realizadas são sempre os mesmos, à exceção da esfera que é utilizada para definir e verificar os parâmetros geométricos limitadores do objeto a ser manipulado. Como se pode observar na Figura 101, o conjunto utilizado nas simulações é constituído pelos componentes principais do manipulador, tendo apenas sido substituídos os pinos de ligação por funcionalidades equivalentes no SolidWorks;

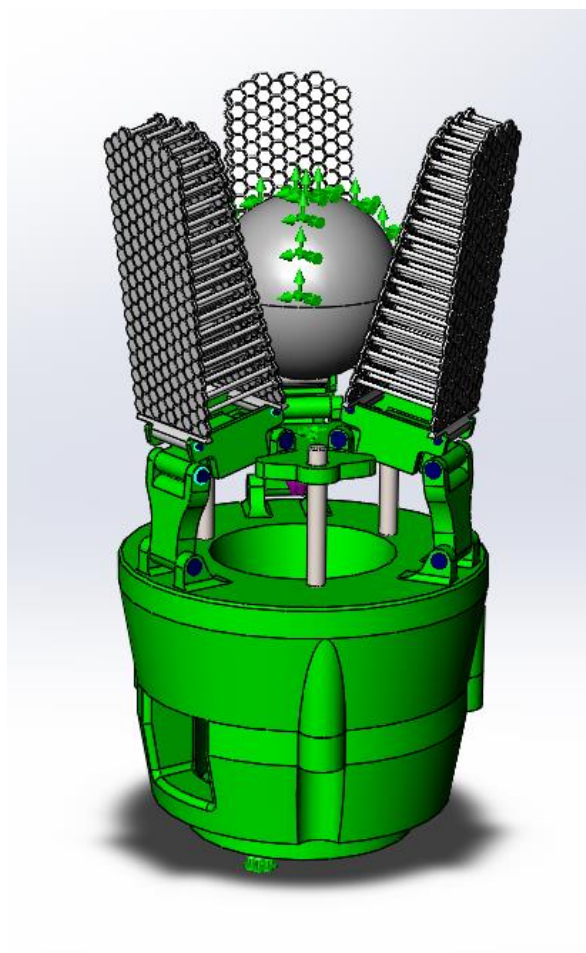


Figura 101 - Vista do conjunto pronto para simular o estudo.

- **Materiais** – para os dedos foi escolhido o material definido para o projeto, o Ultrasint TPU 90A-01. Para os restantes componentes principais do *gripper* foi mantido o PLA. Para a esfera foi escolhido novamente um aço ligado por apresentar propriedades mecânicas muito superiores aos restantes materiais, conseguindo assim manter-se indeformável durante o estudo. Para os pinos guia foi também escolhido um aço ligado pois é o material pretendido a adquirir nos mesmos. Na Figura 102 estão apresentadas as propriedades utilizadas para os dois primeiros materiais referidos. O aço ligado foi escolhido diretamente da biblioteca de materiais do SolidWorks;

Property	Value	Units	Property	Value	Units
Elastic Modulus	75000000	N/m ²	Elastic Modulus	3500000000	N/m ²
Poisson's Ratio	0.394	N/A	Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus		N/m ²	Shear Modulus	2400000000	N/m ²
Mass Density	1100	kg/m ³	Mass Density	1250	kg/m ³
Tensile Strength	8000000	N/m ²	Tensile Strength	46800000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²	Compressive Strength	17900000	N/m ²
Yield Strength	8000000	N/m ²	Yield Strength	93000000	N/m ²

Figura 102 - Propriedades dos materiais – Ultrasint TPU 90A-01 (a) e PLA (b).

- **Ligações** – as ligações entre os adaptadores, os dedos, os braços e a plataforma, assim como as ligações entre os braços e a base superior foram feitas por pinos (contacto *pin*), como se pode observar na Figura 103. No contacto da esfera com os dedos foi utilizado um contacto sem penetração (contacto *no penetration*), assim como nas faces de possível contacto entre os braços e os adaptadores, como ilustrado na Figura 104;

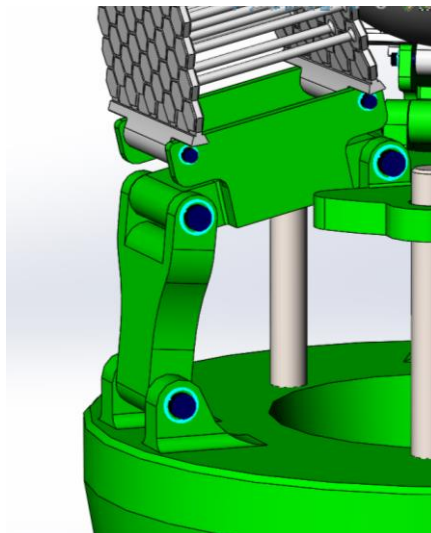


Figura 103 - Representação das ligações *pin* utilizadas.

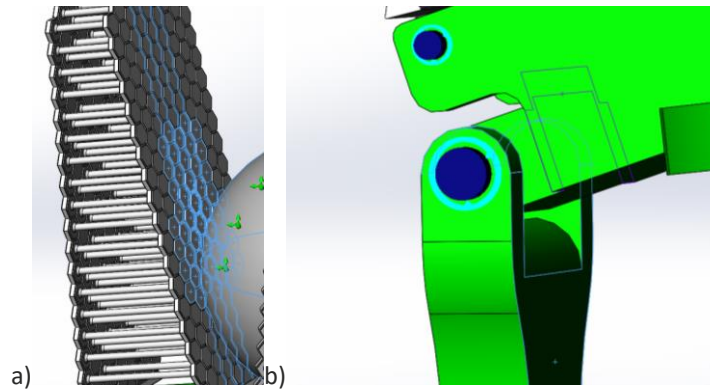


Figura 104 - Ilustração dos *contact set's* utilizados - entre o dedo e a esfera (a) e entre o braço e o adaptador (b).

- **Condições fronteira** – como o dimensionamento do mecanismo não teve em conta o peso do objeto a manipular, pois este é suposto ser uma peça de fruta, com uma massa mínima que praticamente não condiciona o funcionamento do sistema global, a esfera foi fixa. A base inferior foi também fixa na superfície inferior, representando a fixação do *gripper* ao braço robótico. Na Figura 105 está apresentada esta fixação referida;

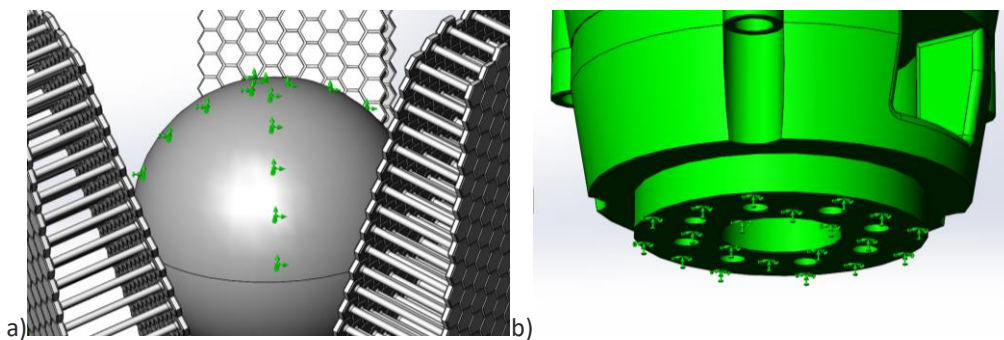


Figura 105 - Fixação utilizada - na esfera (a) e na base inferior (b).

Foi também utilizada uma restrição no furo central da plataforma, como se pode observar na Figura 106. Esta fixação apenas impede os deslocamentos nos eixos xx e yy , e o deslocamento angular em torno do eixo zz , embora permita deslocamento em zz ;

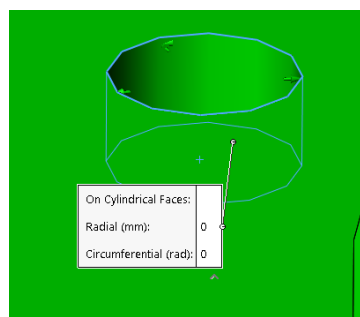


Figura 106 - Restrição utilizada no furo central da plataforma.

- **Carga aplicada** – nestes estudos a carga foi aplicada como uma força na plataforma e na base superior, como indica a Figura 107. As forças substituem a ação do atuador, tendo sido considerado o valor de 100 N como valor máximo de trabalho, para não atingir o valor limite do atuador e para certificar um coeficiente de segurança confortável;

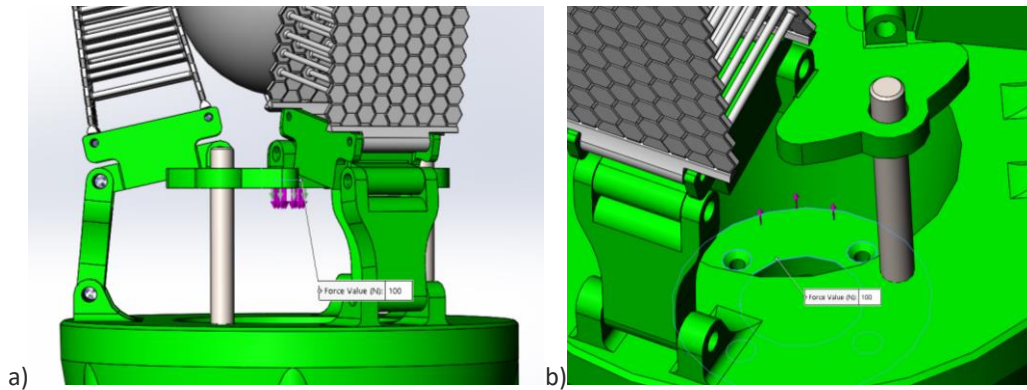


Figura 107 - Representação da carga aplicada - na plataforma (a) e na base superior (b).

- **Malha** – a malha foi definida através do comando *curvature-based mesh*, por utilizar uma malha mais aprimorada em zonas com grandes variações geométricas e uma malha mais grosseira em zonas lineares. Foi utilizada uma malha grosseira para diminuir o esforço computacional, pois os dedos apresentavam geometrias complexas. Os parâmetros referidos encontram-se apresentados na Figura 108. Estes parâmetros levaram a que os estudos se realizassem com aproximadamente 210 mil elementos e 380 mil nós;

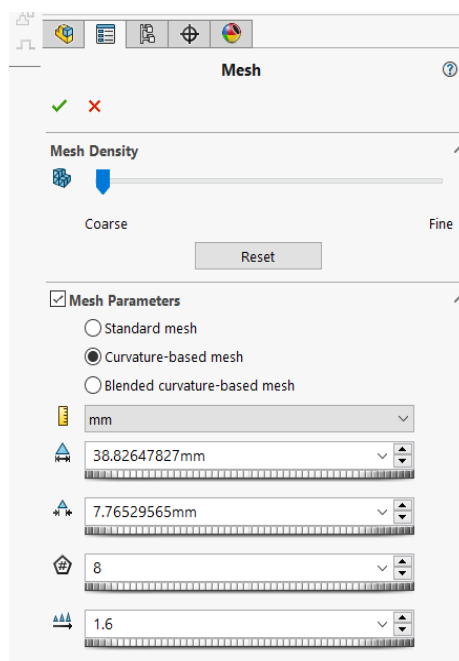


Figura 108 - Parâmetros de malha.

- **Resultados** – de seguida estão apresentados os resultados dos três diferentes estudos:
 - **Estudo 1** – neste estudo o objeto de teste é uma esfera de 60 mm de diâmetro, manipulada pelo *gripper* numa posição perto da plataforma. Os resultados de tensões equivalentes de von Mises deste estudo estão apresentados na Figura 109.

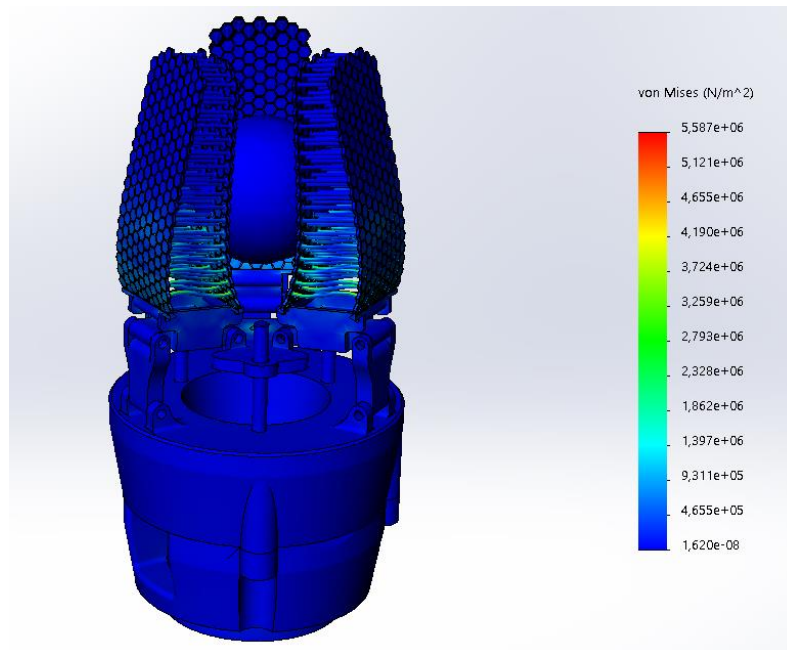


Figura 109 - Resultados do estudo 1 - tensão equivalente de von Mises.

Os deslocamentos dos dedos encontram-se em concordância com os estudos anteriormente apresentados, portanto não foram considerados nesta fase, que tem como foco os componentes de PLA. Os pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises, como indica a Figura 110 são no adaptador e na plataforma.

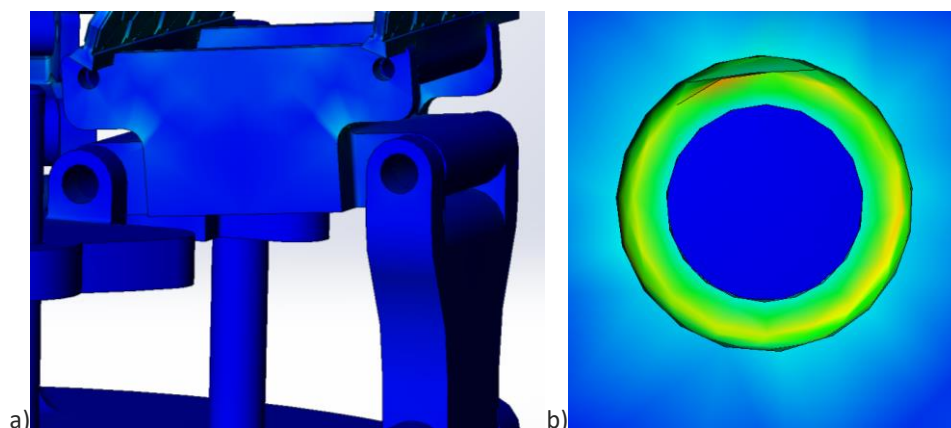


Figura 110 – Estudo 1 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).

- **Estudo 2** – neste estudo o objeto de teste é a mesma esfera de 60 mm de diâmetro. No entanto, está manipulada pelo *gripper* numa posição limite do dedo. Os resultados de tensões equivalentes de von Mises deste estudo estão apresentados de seguida na Figura 111.

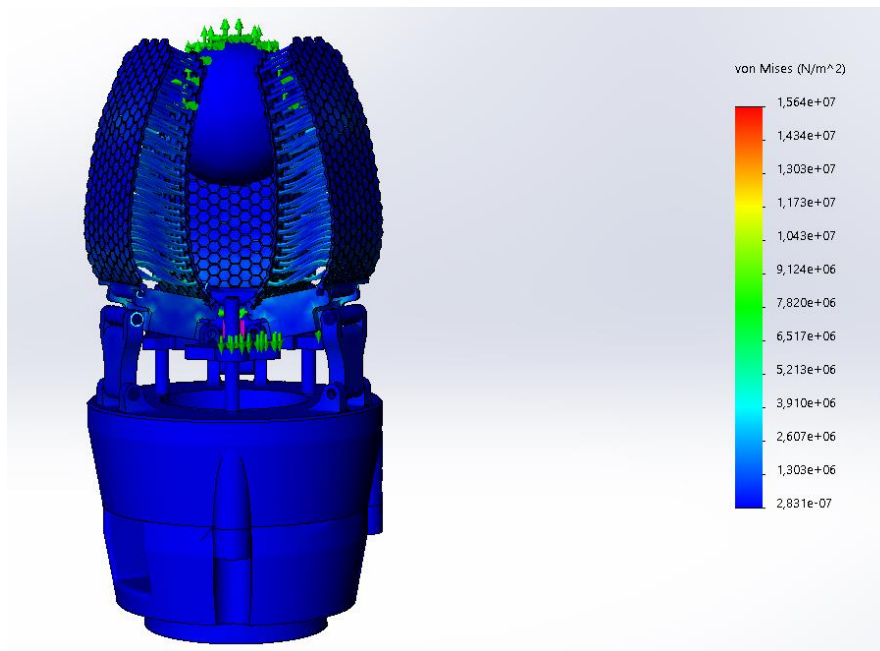


Figura 111 - Resultados do estudo 2- tensão equivalente de von Mises.

Os deslocamentos dos dedos encontram-se em concordância com os estudos anteriormente apresentados, portanto não foram considerados nesta fase, que tem como foco os componentes de PLA. Os pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises, como indica a Figura 112 são no adaptador e na plataforma.

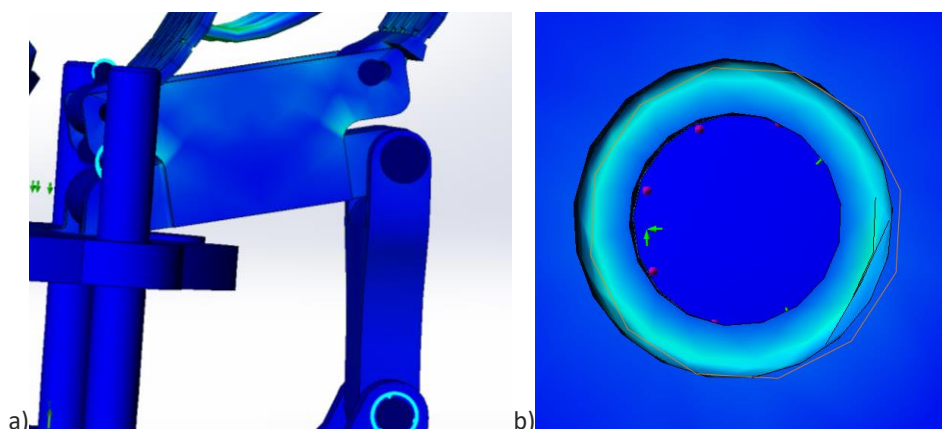


Figura 112 - Estudo 2 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).

- **Estudo 3** – neste estudo o objeto de teste é uma esfera de 80 mm de diâmetro, manipulada pelo *gripper* numa posição limite do dedo. Os resultados de tensões equivalentes de von Mises deste estudo estão apresentados na Figura 113.

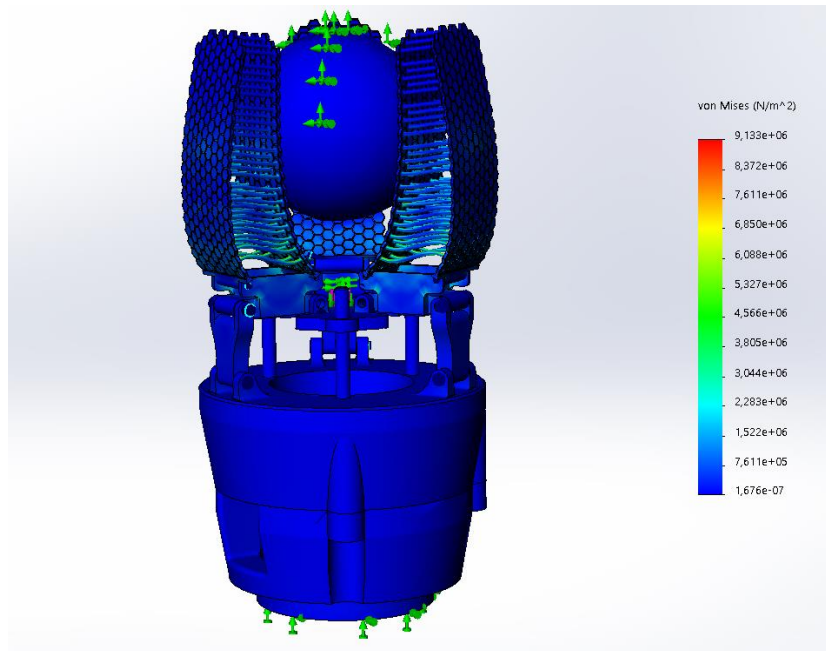


Figura 113 - Resultados do estudo 3- tensão equivalente de von Mises.

Os deslocamentos dos dedos encontram-se em concordância com os estudos anteriormente apresentados, portanto não foram considerados nesta fase, que tem como foco os componentes de PLA. Os pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises, como indica a Figura 114 são no adaptador e na plataforma.

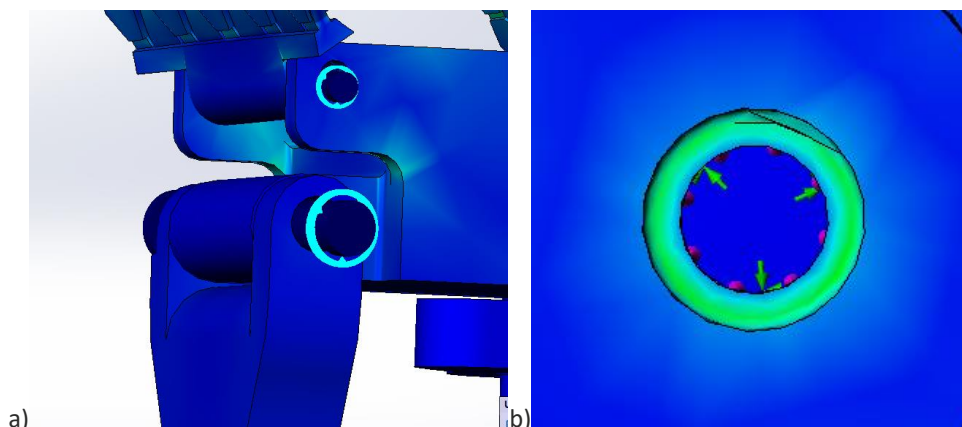


Figura 114 - Estudo 3 - vista dos pontos de acumulação de tensões equivalentes de von Mises - no adaptador (a) e na plataforma (b).

- **Análise dos esforços** – os resultados das simulações efetuadas estão apresentados na Tabela 9, com os resultados de tensões equivalentes de von Mises obtidos diretamente do SolidWorks e com os coeficientes de segurança calculados para um valor de tensão de cedência do PLA de 61,5 MPa. Os esforços referidos, como presumível pelo valor desta tensão de cedência, são referentes apenas aos componentes constituídos por PLA, pois este é o material mais provável de ceder.

Tabela 9 - Resultados dos estudos realizados

Estudo	Tensão equivalentes de von Mises máxima (aproximada)	Coefficiente de segurança
Estudo 1	4,5 MPa	13,7
Estudo 2	4,0 MPa	15,4
Estudo 3	4,3 MPa	14,3

Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros limite do *gripper*, de acordo com os estudos realizados, com um coeficiente de segurança de 13,7.

Tabela 10 - Parâmetros limite do *gripper*

Parâmetro	Valor máximo
Força Aplicável	100 N
Diâmetro do objeto	80 mm
Massa do objeto	400 g

Como o *gripper* foi desenhado para a manipulação de uma peça de fruta, o peso da mesma não foi considerado nas simulações, pois não apresenta um valor significativo capaz de causar alterações de deformações ou de tensões no conjunto significativas. Para efeitos de limitação de valores foi estipulado a massa máxima de 400 g (equivalente ao dobro do peso médio de uma maçã).

Foi também utilizada a ferramenta *mass properties* do SolidWorks para determinar a massa do conjunto do *gripper*, com todos os componentes anteriormente apresentados, à exceção do braço robótico, obtendo o valor aproximado de 1 kg.

3.5.5 Montagem

A montagem do conjunto apresentado é simples e encontra-se dividida em 8 etapas de rápida execução, apresentadas de seguida e no Anexo 6.1.

- **1ª parte**

Em primeiro lugar é utilizado o pino para alinhar a base inferior com o braço robótico. Em seguida são apertados os 7 parafusos M6, ficando assim a base inferior fixa ao braço robótico. Na Figura 115 pode-se ver esta parte da montagem, em vista explodida e após terminada.

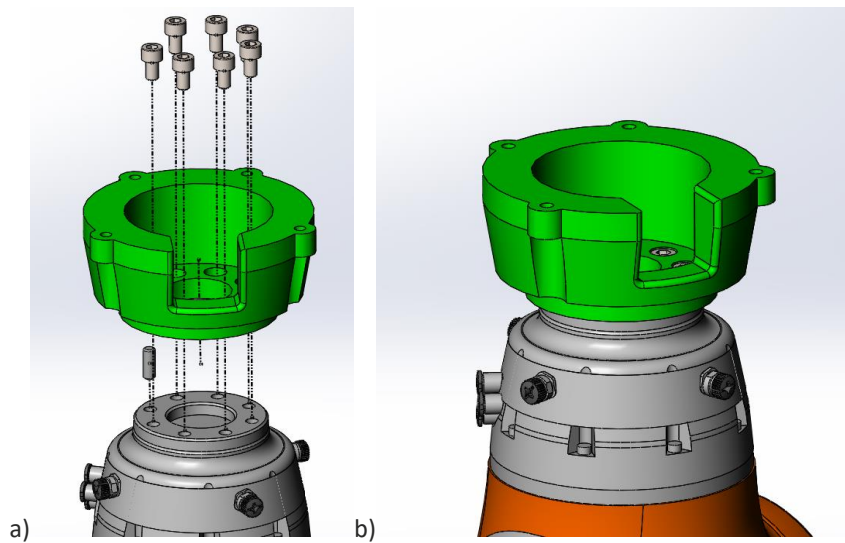


Figura 115 - 1ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 11.

Tabela 11 - Componentes de ligação relativos à 1ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Pino alinhador (ISO 2338)	1x	 Figura 116 - Pino alinhador.	Alinhamento – braço robótico com base inferior.
Parafuso M6 (ISO 4762 M6 x 10)	7x	 Figura 117 - Parafuso M6.	Aperto – braço robótico com base inferior.

- **2ª parte**

Nesta fase é apertado o atuador com 4 parafusos M2,5 à base superior. São também colocados insertos nos furos respectivos ao aperto deste componente com a base inferior. Na Figura 118 pode-se ver esta parte da montagem, em vista explodida e após terminada.

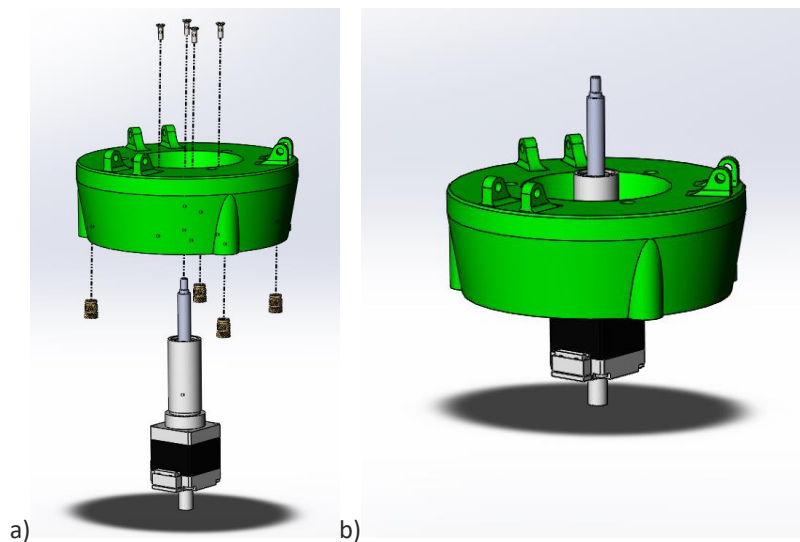


Figura 118 - 2ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes de ligação relativos à 2ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Inserto (ruthex_RX_M5x9,5)	4x	 Figura 119 - Inserto.	Aperto – base inferior com base superior.
Parafuso M2.5 (ISO 7046-1-M2.5x8-Z)	4x	 Figura 120 - Parafuso M2.5.	Aperto – atuador com base superior.

- **3ª parte**

Na 3ª parte da montagem são montadas as duas bases, uma à outra. Esta fixação é feita, em primeiro lugar, por 2 pinos alinhadores, e em seguida por 4 parafusos M5. Na Figura 121, pode-se ver esta parte da montagem, em vista explodida e após terminada.

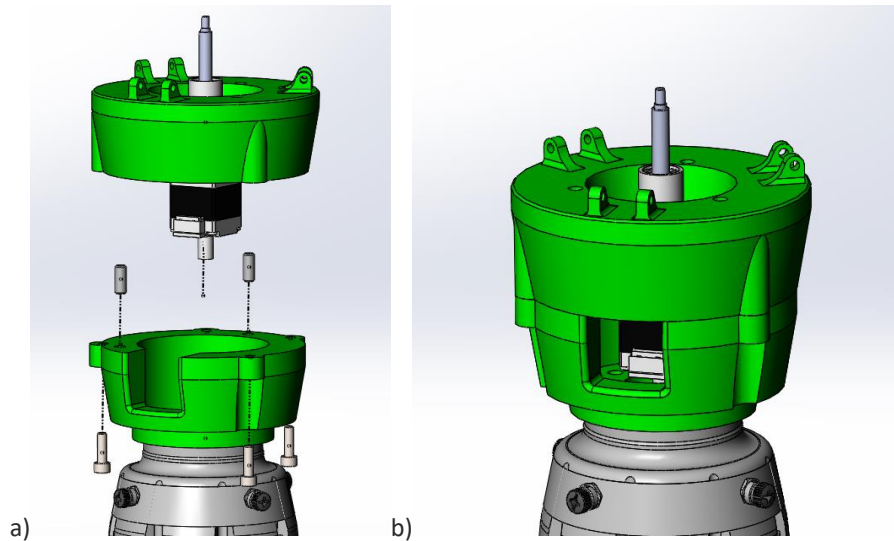


Figura 121 - 3ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 13.

Tabela 13 - Componentes de ligação relativos à 3ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Pino alinhador (ISO 2338)	2x	 Figura 122 - Pino alinhador.	Alinhamento – base inferior com base superior.
Parafuso M5 (ISO 4762 M5 x 16)	4x	 Figura 123 - Parafuso M5.	Aperto – base inferior com base superior.

- **4ª parte**

Durante esta parte da montagem, são fixos os braços à base superior, através de parafusos de ombro (para permitir a rotação dos mesmos), e apertados com anilhas e porcas. Na Figura 124 pode-se ver esta parte da montagem, em vista explodida e após terminada.

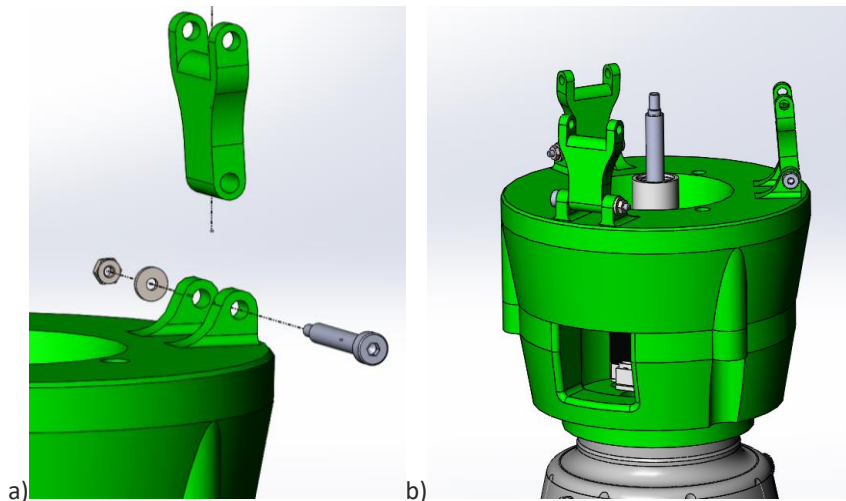



Figura 124 - 4ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 14.

Tabela 14 - Componentes de ligação relativos à 4ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Parafuso de ombro (MSB4-25)	3x	 Figura 125 - Parafuso de ombro.	Fixação tipo dobradiça – braço com base inferior.
Anilha (ISO 10669-2.5-N)	3x	 Figura 126 - Anilha.	Fixação tipo dobradiça – braço com base inferior.
Porca M2.5 (ISO 4032-M2.5-W-N)	3x	 Figura 127 - Porca M2.5.	Fixação tipo dobradiça – braço com base inferior.

- **5ª parte**

A 5ª parte da montagem pode ser considerada uma fase intermédia, pois serve de preparação para uma fase posterior. É nesta fase que são montados os casquilhos à plataforma. Esta ligação é feita com um adesivo estrutural, para fixar os casquilhos. Na Figura 128 é possível visualizar esta parte da montagem, em vista explodida.

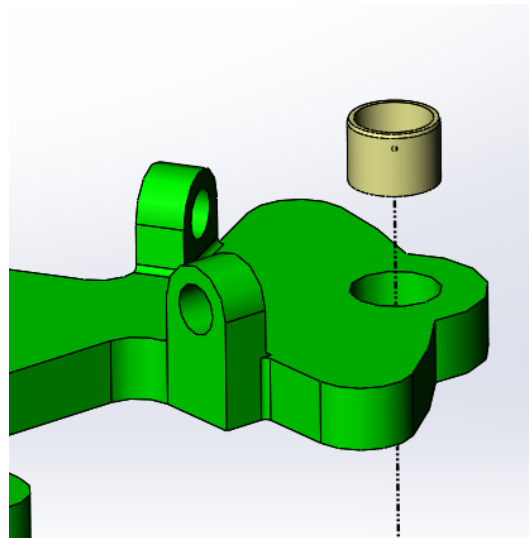


Figura 128 - 5ª parte da montagem - vista explodida da montagem.

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 15.

Tabela 15 - Componentes de ligação relativos à 5ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Casquilho (JSM-0607-05-1)	3x	 Figura 129 - Casquilho.	Guia de movimento – Plataforma com base superior.

- **6ª parte**

Nesta fase da montagem, os pinos guia são fixos à base superior, com um adesivo estrutural, atravessando os respectivos casquilhos, enquanto são colocadas uma anilha e uma porca no fuso da haste do atuador. Esta parte está apresentada na Figura 130.

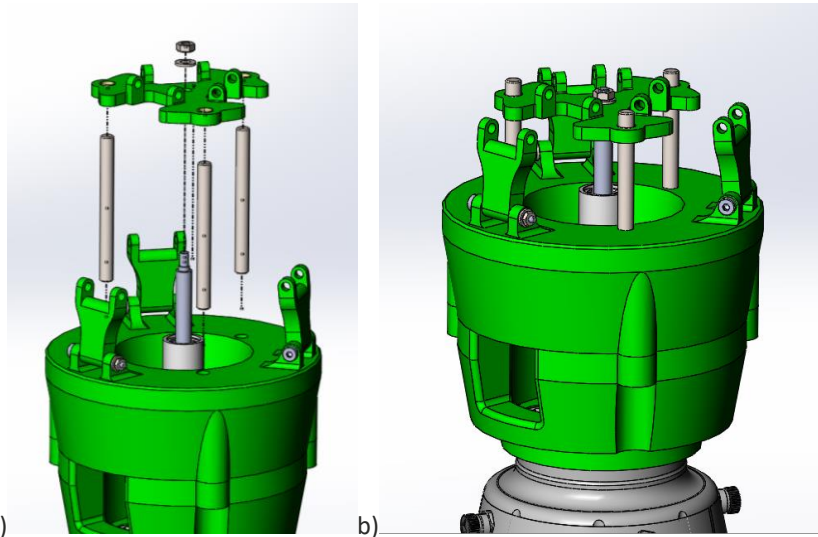


Figura 130 - 6ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 16.

Tabela 16 - Componentes de ligação relativos à 6ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Pino guia (1.4034, AISI 420)	3x	 Figura 131 - Pino guia.	Guia de movimento – Plataforma com base superior.
Anilha (ISO 10673-4.55-S)	1x	 Figura 132 - Anilha.	Aperto – atuador com base superior.
Porca M4 (ISO 4032-M4-W-N)	1x	 Figura 133 - Porca M4.	Aperto – atuador com base superior.

- **7ª parte**

A parte 7 desta montagem, assim como a parte 5, representa também uma fase intermédia de montagem. Como representado na Figura 134, o dedo é alinhado com o adaptador, e são colocados os pinos, que ao atravessarem o primeiro furo, do adaptador. De seguida é aplicado um adesivo estrutural para fixar os pinos ao dedo, permitindo rotação apenas entre os pinos e o adaptador.

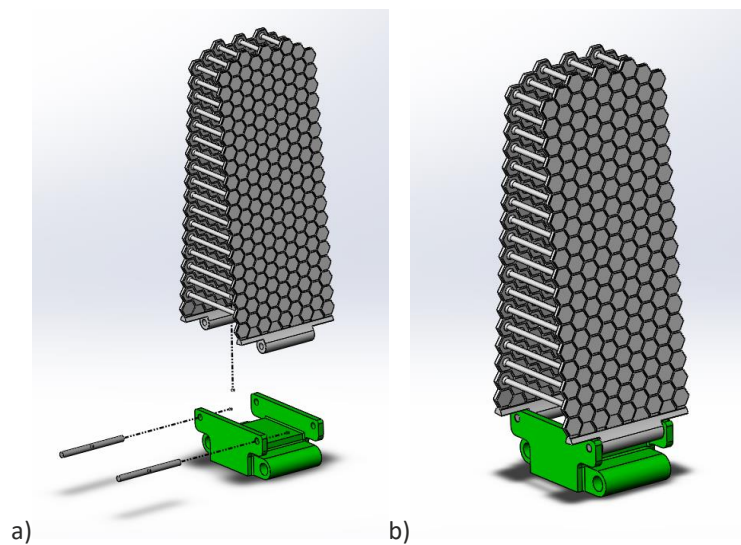


Figura 134 - 7ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 17.

Tabela 17 - Componentes de ligação relativos à 7ª fase da montagem

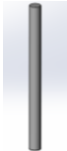
Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Pino ISO 8734 2M6 X 25-St	6x		Fixação tipo dobradiça – adaptador com dedo.

Figura 135 - Pino.

- **8ª parte**

Por fim são colocados os conjuntos dos dedos, e são fixos como dobradiças aos braços e à plataforma. São utilizados novamente parafusos de ombro para permitir esta fixação tipo dobradiça, e consequentemente permitir à estrutura a funcionalidade requerida. Na Figura 136 pode-se ver a esta parte da montagem, em vista explodida e após terminada.

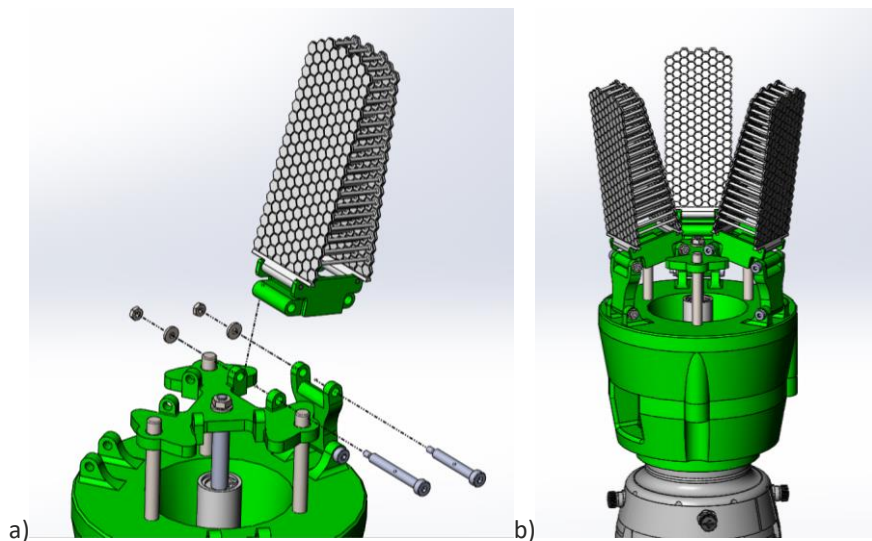


Figura 136 - 8ª parte da montagem - vista explodida da montagem (a) e parte da montagem completa (b).

De seguida estão apresentados os componentes de ligação utilizados nesta fase de montagem, na Tabela 18.

Tabela 18 - Componentes de ligação relativos à 8ª fase da montagem

Componente	Quantidade	Figura	Ligação
Parafuso de ombro (MSB4-25)	3x	 Figura 137 - Parafuso de ombro.	Fixação tipo dobradiça – adaptador com braço.
Parafuso de ombro (MSB4-30)	3x	 Figura 138 - Parafuso de ombro.	Fixação tipo dobradiça – adaptador com plataforma.
Anilha (ISO 10669-2.5-N)	6x	 Figura 139 - Anilha.	Fixação tipo dobradiça – adaptador com braço ou plataforma.
Porca M2.5 (ISO 4032-M2.5-W-N)	6x	 Figura 140 - Porca M2.5.	Fixação tipo dobradiça – adaptador com braço ou plataforma.

3.5.6 Análise de custos

O orçamento necessário para o desenvolvimento do projeto apresentado na presente dissertação é de aproximadamente 480€, para além do robô colaborativo que custa cerca de 60 000€. Na Tabela 19 está discriminado o custo por item.

Tabela 19 - Lista de peças com análise de custos

Nº Item	Designação	Quantidade	Fabrico/Compra	Custo
1	SG_P01_Base_Inferior_A	1	Fabrico	
2	SG_P02_Base_Superior_A	1	Fabrico	
3	SG_P03_Braço_A	3	Fabrico	175€
4	SG_P04_Plataforma_A	1	Fabrico	
5	CD_P02_Adaptador_A	3	Fabrico	
6	CD_P01_Dedo_A	3	Fabrico	3 x 18,98€
7	SG_P04_Pino_A	6	Compra	6 x 0,23€
8	Atuador - LGA281S10-B-THCA-038_1	1	Compra	109,50€
9	JSM_0607_05_1	3	Compra	3 x 2,98€
10	SG_P05_Pino_Guia_A	3	Compra	3 x 11,49€
11	ISO 7046-1 - M2.5 x 8 - Z - 8N	4	Compra	4 x 2,26€
12	ISO 4762 M6 x 10 - 10N	7	Compra	7 x 7,44€
13	MSB4-30	3	Compra	3 x 0,56€
14	MSB4-25	6	Compra	6 x 0,56€
15	ISO - 4032 - M2.5 - W - N	9	Compra	9 x 0,55€
16	ISO 10669-2.5-N	9	Compra	9 x 0,85€
17	ISO 4762 M5 x 16	4	Compra	4 x 3,40€
18	ruthex RX-M5x9,5	4	Compra	4 x 0,19€

Nº Item	Designação	Quantidade	Fabrico/Compra	Custo
19	SG_P04_Pino_Alinhador_A	3	Compra	3 x 0,08€
20	ISO 10673-4.55-S	1	Compra	0,55€
21	ISO - 4032 - M4 - W - N	1	Compra	5,33€

3.6 Validação e protótipo

Após a conclusão do projeto, tendo todas as peças desenhadas, os seus processos de fabrico definidos e todos os componentes de ligação escolhidos, foi então iniciada a fase de prototipagem, com o intuito de testar todo este conceito desenvolvido.

3.6.1 Impressão 3D do modelo

De seguida, na Figura 141, estão apresentados os componentes fabricados pelos processos de fabrico e materiais descritos anteriormente. Posteriormente, na Tabela 20, estão novamente apresentados os componentes, embora de forma individual.

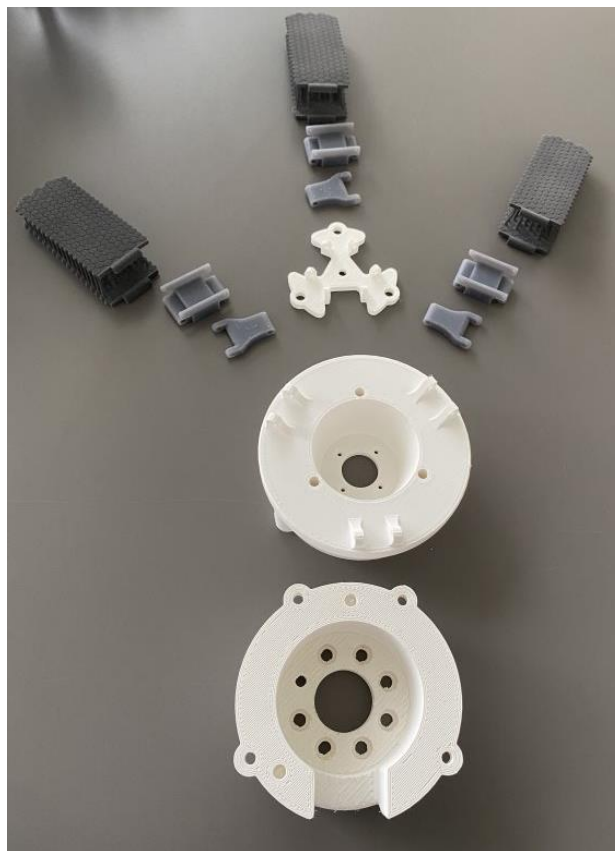


Figura 141 - Conjunto dos componentes prototipados.

Tabela 20 - Protótipos fabricados

Componentes	Material	Processo de fabrico	Imagem
Base inferior	PLA	FFF	
Base superior	PLA	FFF	
Braço	Grey Pro Resin	SLA	

Figura 142 - Protótipo da base inferior.

Figura 143 - Protótipo da base superior.

Figura 144 - Protótipo do braço.

Componentes	Material	Processo de fabrico	Imagem
Plataforma	PLA	FFF	
Figura 145 - Protótipo da plataforma.			
Adaptador	Grey Pro Resin	SLA	
Figura 146 - Protótipo do adaptador.			
Dedo	Ultrasint TPU 90A-01	HP Multi jet fusion	
Figura 147 - Protótipo do dedo.			

Após o fabrico das peças desenhadas, e a aquisição dos componentes de ligação, procedeu-se então à montagem do conjunto do *gripper*. Como se pode observar na Figura 148, o resultado da montagem foi um sucesso pois todos os componentes se encontram bem dimensionados. Isto é evidenciado pelas corretas ligações e consequentemente pelo movimento de trabalho fluído.



Figura 148 - Protótipo final após montagem.

3.6.2 Testes realizados

Foram realizados testes para cumprir com um dos objetivos mais importantes da presente dissertação, a prova de conceito, e assim verificar o correto funcionamento da solução desenvolvida.

Para efeitos de teste, indo de encontro ao requisito inicial do *gripper*, os ensaios foram realizados com 3 objetos de teste, sendo eles uma maçã, uma laranja e uma pera, apresentados na Figura 149. Estas 3 peças de fruta, que diferem na forma, no peso e na textura superficial, servem para comprovar a adaptabilidade do conceito.

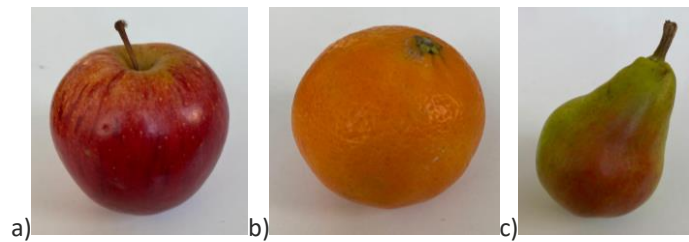


Figura 149 - Objetos de teste - maçã (a), laranja (b) e pera (c).

Os ensaios foram concretizados com os mesmos parâmetros das simulações realizadas, de modo a ser possível comparar ambos os resultados, e assim verificar o funcionamento do *gripper*. Para tal, as peças de fruta foram manipuladas numa posição central dos dedos.

Na Tabela 21 estão apresentados os resultados dos testes realizados para os parâmetros referidos, assim como o resultado do Estudo 1 (Capítulo 3.5.4) para comparação.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios realizados

Ensaio	Resultado
Teórico (simulação)	

Figura 150 - Resultado da simulação (estudo 1).

Ensaio	Resultado
<p data-bbox="231 571 430 604">Prático 1 (maçã)</p>	 <p data-bbox="874 801 1297 835">Figura 151 - Resultado do ensaio prático 1.</p>
<p data-bbox="231 1124 454 1158">Prático 2 (laranja)</p>	 <p data-bbox="874 1355 1297 1388">Figura 152 - Resultado do ensaio prático 2.</p>
<p data-bbox="231 1677 422 1711">Prático 3 (pera)</p>	 <p data-bbox="874 1908 1297 1942">Figura 153 - Resultado do ensaio prático 3.</p>

Os resultados obtidos foram os esperados, pois o comportamento do protótipo foi semelhante aos ensaios simulados. O *gripper* mostra-se capaz de se conformar, de forma eficiente, aos diversos objetos de trabalho. A forma invulgar dos dedos garante uma manipulação segura, infalível e adaptável.

3.6.3 Validação da solução

Após a realização dos testes anteriormente apresentados, e uma vez que os mesmos foram bem-sucedidos, foi então possível validar o protótipo e consequentemente a solução desenvolvida. Na Figura 154 pode-se observar o protótipo completo validado.



Figura 154 - Protótipo completo validado.

CONCLUSÕES

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

No contexto da atual revolução industrial em que nos encontramos, a *soft robotics* apresenta-se como uma área cheia de desafios e oportunidades. Este projeto apresenta uma solução de um *soft gripper* inovador, capaz de operar em ambiente colaborativo. O seu *design* revolucionário consegue garantir uma maior confiança no processo de manuseamento de um dado objeto, pois a geometria atípica dos seus dedos otimiza o movimento de contorno desse objeto.

A produção do modelo projetado é mais uma prova da utilidade do fabrico aditivo na rápida e fácil prototipagem de novos conceitos.

Como se pode observar pela Tabela 22 os objetivos iniciais foram todos cumpridos na íntegra.

Tabela 22 - Avaliação de cumprimento de objetivos iniciais

Objetivo	Conclusão
Estudo sobre a área e alargado trabalho de identificação do estado da arte.	O desenvolvimento do projeto apresentado nesta dissertação, não seria de todo possível sem que este objetivo fosse cumprido. Não só o aluno adquiriu bastante conhecimento na área, como também ficou a conhecer quais são as aplicações utilizadas atualmente.
Idealização e apresentação de várias soluções possíveis de executar.	Após o levantamento de informação e de soluções atuais, foi então possível idealizar e criar vários conceitos diferentes.
Desenvolver um conceito original de um manipulador de material macio (<i>soft gripper</i>).	O resultado final do projeto apresentado nesta dissertação apresenta um conceito original e inovador de um <i>soft gripper</i> que vem abrir bastantes portas nesta área da indústria.
Integração com um robô antropomórfico colaborativo.	O modelo projetado possui uma base desenhada para a montagem no braço robótico escolhido para o projeto. Nesta base encontra-se também uma abertura que permite ao atuador conectar os seus cabos de alimentação ao robot.

Objetivo	Conclusão
Utilização de um mecanismo atuador elétrico.	Este objetivo foi concluído e é importante notar que o mesmo condicionou o próprio desenvolvimento do <i>gripper</i> .
Fazer uso intensivo de tecnologia de impressão 3D na sua construção.	Todos os componentes desenhados foram sujeitos a processos de impressão 3D no seu fabrico.
Comunicar numa rede de informação baseada nos novos conceitos da 4ª revolução industrial (indústria 4.0), disponibilizando os seus dados de controlo de processo e meio ambiente numa infraestrutura informática local.	Este objetivo ficou ao encargo da empresa acolhedora, podendo por esta razão considerar-se cumprido.
Materialização de uma prova de conceito, assente numa lógica de sistema simplificado, podendo executar operações complexas que se identifiquem interessantes para um ambiente real de produção.	Foi executado um protótipo do modelo e de seguida foram executados testes ao conceito, para comprovar o seu funcionamento. Estes testes foram bem-sucedidos mostrando o projeto como interessante para um ambiente real de produção.

A investigação, a criação e o desenvolvimento de um equipamento de grande complexidade, num campo relativamente recente, mostrou-se uma mais-valia em termos profissionais. Com este projeto, foi possível uma evolução em conhecimentos referentes a inúmeras etapas de projeto, nas áreas de investigação e de projeto mecânico.

Num aspeto mais pessoal, este projeto mostrou-se bastante desafiante e ao mesmo tempo motivante. O sentido de responsabilidade e a ambição profissional foram os pilares de motivação, apesar de todas as dificuldades passadas, em particular a situação pandémica atual, que condicionou o próprio estágio.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Em todo o tipo de projetos mecânicos, após a sua conclusão, existe sempre espaço para melhorias. Na criação de um conceito novo é normal esperar que existam ainda mais potenciais melhorias a implementar após o término do projeto. Os possíveis trabalhos futuros, descendentes do projeto apresentado na dissertação atual são:

- Estudo do número e da posição dos tirantes de perfil circular que fazem a ligação das duas paredes de cada dedo;
- Estudo de diferentes geometrias dos elementos que constituem as paredes dos dedos;
- Estudo da variação da distância de ligação entre os elementos de superfície dos dedos, assim como a otimização da espessura da própria membrana;
- Incorporação de sensorização avançada para a tipologia de dispositivos, e otimização da geometria da estrutura para tal;
- Escolha de um processo de fabrico capaz de produzir peças com mais precisão geométrica;
- Estudo da utilização de diferentes materiais.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Coelho, P.M.N., *Rumo à indústria 4.0*. 2016, Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia: Coimbra, Portugal.
2. Vaidya, S., P. Ambad, e S. Bhosle, *Industry 4.0—a glimpse*. *Procedia Manufacturing*, 2018. **20**: p. 233-238.
3. MEDIALAB. *Bem-vindos à Quarta Revolução Industrial*. 2019 [cited 2020 3 de novembro]; Available from: <http://especiais.estadao.com.br/mundodigital/olamundo/>.
4. Brynjolfsson, E. e A. McAfee, *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. 2014, Nova Iorque, Estados Unidos: WW Norton & Company. 306.
5. Lasi, H., P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, e M. Hoffmann, *Industry 4.0*. *Business & Information Systems Engineering*, 2014. **6**(4): p. 239-242.
6. Chen, B., J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, e B. Yin, *Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges*. *IEEE Access*, 2017. **6**: p. 6505-6519.
7. Witkowski, K., *Internet of things, big data, industry 4.0—innovative solutions in logistics and supply chains management*. *Procedia Engineering*, 2017. **182**: p. 763-769.
8. Almada-Lobo, F., *The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES)*. *Journal of Innovation Management*, 2015. **3**(4): p. 16-21.
9. Borlido, D.J.A., *Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção*. 2017, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia: Porto, Portugal.
10. Geisberger, E. e M. Broy, *AgendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Vol. 1. 2012, Berlim, Alemanha Springer-Verlag.
11. Selig, J.M., *Introductory robotics*. 1992, Londres, Reino Unido: Prentice Hall.
12. Ghosal, A., *Robotics: fundamental concepts and analysis*. 2006, Oxford, Reino Unido: Oxford University press.
13. Kalan, S., S. Chauhan, R.F. Coelho, M.A. Orvieto, I.R. Camacho, K.J. Palmer, e V.R. Patel, *History of robotic surgery*. *Journal of Robotic Surgery*, 2010. **4**(3): p. 141-147.
14. KUKA. *KR 1000 titan*. 2020 dezembro 2020]; Available from: <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4/rob%C3%B4s-industriais/kr-1000-titan>.
15. Oliveira, L.C.P.L., *Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico*. 2013, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica - Opção de Automação. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia: Porto, Portugal.

16. YASAKA. *What is a Robot?* 2019 [cited 2020 2 de dezembro]; Available from: <https://www.yaskawa-global.com/product/robotics/about>.
17. Pires, J.N., *Os Desafios da Robótica Industrial*. Robótica-Revista Técnico-Científica, 2003(83).
18. de Oliveira, B.Q., J.L. Farias, R.K.P. Ferreira, T.A.d.O.L. Costa, I.N. de Oliveira, e A. Cardozo Filho, *Tipos e aplicações de sensores na robótica*. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, 2017. **4**(1): p. 223.
19. Girão, P.S., P.M.P. Ramos, O. Postolache, e J.M.D. Pereira, *Tactile sensors for robotic applications*. Measurement, 2013. **46**(3): p. 1257-1271.
20. FFONSECA. *Sensor de proximidade indutivo IMA - Sick*. 2020 [cited 2020 13 de dezembro]; Available from: <https://www.ffonseca.com/pt/prod-sensor-de-proximidade-indutivo-ima-sick>.
21. MICRO-EPSILON. *sensor de deslocamento linear*. 2020 [cited 2020 21 de novembro]; Available from: <https://www.directindustry.com/pt/prod/micro-epsilon/product-5788-1705410.html>.
22. Almeida, F. *O que é Encoder?* 2017 [cited 2020 20 de novembro]; Available from: <https://www.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>.
23. SICK. *Encoder incremental DFS60*. 2020 [cited 2020 13 de dezembro]; Available from: <https://www.sick.com/br/pt/encoders/encoder-incremental/dfs60/c/g244428>.
24. Automation, R. *Encoders absolutos*. 2020 [cited 2020 11 de dezembro]; Available from: <https://www.rockwellautomation.com/pt-br/products/hardware/allen-bradley/motion-control/encoders/absolute-encoders.html>.
25. Groover, M.P., *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. 2016, India: Pearson Education India.
26. Mavroidis, C., C. Pfeiffer, e M. Mosley, *5.1 conventional actuators, shape memory alloys, and electrorheological fluids*. Automation, miniature robotics, sensors for nondestructive testing evaluation, 2000. **4**: p. 189.
27. De Pace, F., F. Manuri, A. Sanna, e C. Fornaro, *A systematic review of Augmented Reality interfaces for collaborative industrial robots*. Computers Industrial Engineering, 2020. **149**: p. 106806.
28. Kragic, D., J. Gustafson, H. Karaoguz, P. Jensfelt, e R. Krug. *Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities*. in *IJCAI*. 2018.
29. Neto, P. *O Tempo da Robótica Colaborativa*. 2017 [cited 2021 12 de janeiro]; Available from: <https://flowtech.pt/pt/blog/tempo-robotica-colaborativa/>.
30. Hadidi, R., J. Cao, M. Woodward, M.S. Ryoo, e H. Kim, *Distributed perception by collaborative robots*. IEEE Robotics Automation Letters, 2018. **3**(4): p. 3709-3716.
31. Kim, S., C. Laschi, e B. Trimmer, *Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics*. Trends in biotechnology, 2013. **31**(5): p. 287-294.
32. Iida, F. e C. Laschi, *Soft robotics: Challenges and perspectives*. Procedia Computer Science, 2011. **7**: p. 99-102.
33. Shepherd, R.F., F. Ilievski, W. Choi, S.A. Morin, A.A. Stokes, A.D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang, e G.M. Whitesides, *Multigait soft robot*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011. **108**(51): p. 20400-20403.

34. Cianchetti, M., C. Laschi, A. Menciassi, e P. Dario, *Biomedical applications of soft robotics*. *Nature Reviews Materials*, 2018. **3**(6): p. 143-153.
35. COMPANY, T.G. *FOUR FINGERS LIP*. 2020 [cited 2020 28 de novembro]; Available from: <https://thegrippercompany.com/product/four-fingers-lip/>.
36. Alfreddi, M. *Adaptive gripper*. 2011 [cited 2020 23 de novembro]; Available from: <https://www.mauroalfieri.it/elettronica/adaptive-gripper.html>.
37. SoftGripping. *CENTRIC SOFTGRIPPER*. 2020 [cited 2020 30 de novembro]; Available from: <https://soft-gripping.com/3FC-60Deg.html>.
38. Company, T.G. *Dual Belts - Individuals*. 2020 [cited 2020 15 de dezembro]; Available from: <https://thegrippercompany.com/product/dual-belt-individuals/>.
39. Müller, A., M. Aydemir, A. Glodde, e F. Dietrich, *Design Approach for Heavy-Duty Soft-Robotic-Gripper*. *Procedia CIRP*, 2020. **91**: p. 301-305.
40. Wang, X., R. Guo, e J. Liu, *Liquid metal based soft robotics: materials, designs, and applications*. *Advanced Materials Technologies*, 2019. **4**(2): p. 1800549.
41. Coyle, S., C. Majidi, P. LeDuc, e K.J. Hsia, *Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design*. *Extreme Mechanics Letters*, 2018. **22**: p. 51-59.
42. Majidi, C., *Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future*. *Soft Robotics*, 2014. **1**(1): p. 5-11.
43. El-Atab, N., R.B. Mishra, F. Al-Modaf, L. Joharji, A.A. Alsharif, H. Alamoudi, M. Diaz, N. Qaiser, e M.M. Hussain, *Soft Actuators for Soft Robotic Applications: A Review*. *Advanced Intelligent Systems*, 2020. **2**(10): p. 2000128.
44. Ilievski, F., A.D. Mazzeo, R.F. Shepherd, X. Chen, e G.M. Whitesides, *Soft robotics for chemists*. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011. **123**(8): p. 1930-1935.
45. Katzschmann, R.K., A. de Maille, D.L. Dorhout, e D. Rus. *Cyclic hydraulic actuation for soft robotic devices*. in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016. Daejeon, Korea (South): IEEE.
46. Chen, J., K. Han, J. Luo, L. Xu, W. Tang, e Z.L. Wang, *Soft robots with self-powered configurational sensing*. *Nano Energy*, 2020. **77**: p. 105171.
47. Veidt, M. e C. Liew, *Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: structural health monitoring of aerospace structures using guided wave ultrasonics*, in *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. 2013, Elsevier. p. 449-479.
48. Stano, G. e G. Percoco, *Additive manufacturing aimed to soft robots fabrication: A review*. *Extreme Mechanics Letters*, 2020: p. 101079.
49. Standardization, I.O.f., *Additive Manufacturing: General: Principles: Terminology*. 2015, Genebra, Suíça: ISO/ASTM.
50. Razavykia, A., E. Brusa, C. Delprete, e R. Yavari, *An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting*. *Materials*, 2020. **13**(17): p. 3895.
51. Wang, Z., K. Or, e S. Hirai, *A dual-mode soft gripper for food packaging*. *Robotics Autonomous Systems*, 2020. **125**: p. 103427.
52. Qi, S., H. Guo, J. Fu, Y. Xie, M. Zhu, e M. Yu, *3D printed shape-programmable magneto-active soft matter for biomimetic applications*. *Composites Science Technology*, 2020. **188**: p. 107973.

53. Holland, D.P., E.J. Park, P. Polygerinos, G.J. Bennett, e C.J. Walsh, *The soft robotics toolkit: Shared resources for research and design*. Soft Robotics, 2014. **1**(3): p. 224-230.
54. Whitesides, G.M., *Soft robotics*. Angewandte Chemie International Edition, 2018. **57**(16): p. 4258-4273.
55. Majidi, C., *Soft-Matter Engineering for Soft Robotics*. Advanced Materials Technologies, 2019. **4**(2): p. 1800477.
56. KUKA. *Kuka LBR iiwa*. 2021 [cited 2021 13 de maio]; Available from: <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4/rob%C3%B4s-industriais/lbr-iiwa>.
57. ENGINEERING, D. *Adaptive Gripper Fingers*. 2017 [cited 2021 19 de maio]; Available from: <https://www.design-engineering.com/products/gripper-finger-1004026235/>.
58. FESTO, *Adaptive gripper fingers DHAS*. 2017, FESTO: Esslingen, Alemanha.
59. ROBOTICS, S., *A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping*. SOFT ROBOTICS, 2015. **2**.
60. robot, O. *SOFT GRIPPER - FLEXIBLE FOOD-GRADE ROBOT GRIPPER*. 2021 [cited 2021 01 de abril]; Available from: https://onrobot.com/en/products/soft-gripper? gl=1*p42s2u* ga*NTgzMzA0MDE4LjE2MTcyODc2NzM.* up*MQ..
61. SMC. *Battery-less Absolute Encoder Type - LEY*. 2021 [cited 2021 20 de maio]; Available from: https://www.smc.eu/pt-pt/produtos/battery-less-absolute-encoder-type-ley~165539~cfg? hn%3Aref=r170_r11&openMainCad=true&seriesProductId=undefined&productId=undefined&partNumber=LEY25EC-30C-R3CP18&seriesPartNumber=LEY25EC-30C-R3CP18&seriesCadOrigin=pc&seriesSelectedGroup=&seriesCadPartNumber=.
62. Thomson. *MLS11A10-M04010S10160N-A000-RH1*. 2021 [cited 2021 20 de maio]; Available from: <https://www.thomsonlinear.com/en/product/MLS11A10-M04010S10160N-A000-RH1#performance>.
63. Thomson. *MLA11A10-0039S0100-E5-S02*. 2021 [cited 2021 20 de maio]; Available from: <https://www.thomsonlinear.com/en/product/MLA11A10-0039S0100-E5-S02#performance>.
64. Nanotec. *LGA281S10-B-THCA-038 – CAPTIVE LINEAR ACTUATOR – NEMA 11*. 2021 [cited 2021 20 de maio]; Available from: <https://en.nanotec.com/products/2716-lga281s10-b-thca-038>.
65. Pang, X., X. Zhuang, Z. Tang, e X. Chen, *Polylactic acid (PLA): research, development and industrialization*. Biotechnology Journal, 2010. **5**(11): p. 1125-1136.
66. colorFabb. *PLA/PHA STANDARD WHITE*. 2021 [cited 2021 23 de maio]; Available from: <https://colorfabb.com/standard-white>.
67. formlabs. *3D Printing Materials for Engineering, Manufacturing, and Product Design*. 2021 [cited 2021 18 de maio]; Available from: <https://formlabs.com/materials/engineering/#grey-pro-resin>.
68. Materialise. *Ultrasint TPU 90A-01*. 2021 [cited 2021 21 de maio]; Available from: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/ultrasint-tpu-90a-01>.

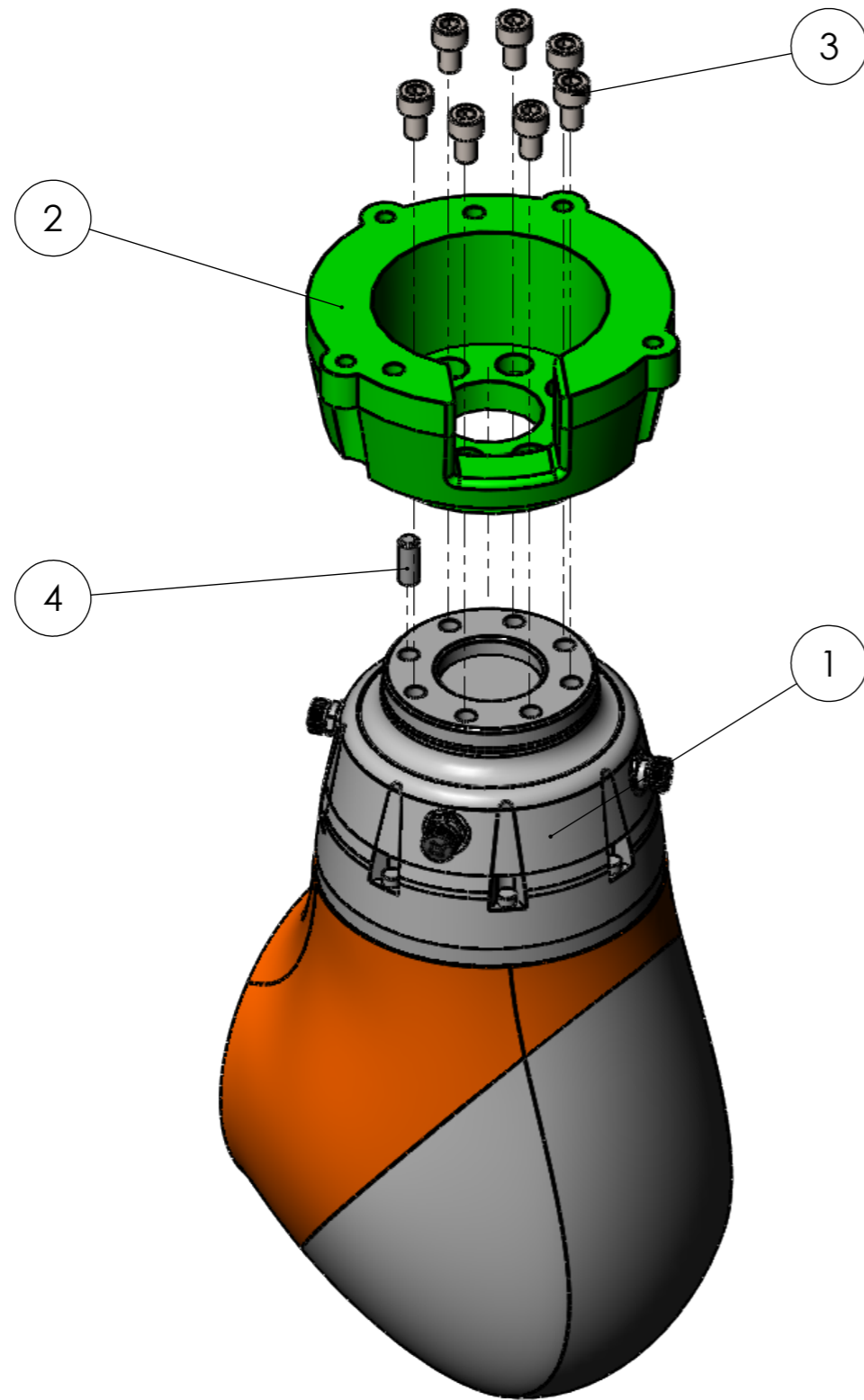
69. materialise. *3D Printing Materials*. 2021 [cited 2021 21 de maio]; Available from: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials>.
70. technologies, W. *COMPARANDO TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D FFF, SLA E SLS*. 2021 [cited 2021 22 de abril]; Available from: <https://www.wishbox.net.br/blog/fff-sla-e-sls-comparando-tecnologias/>.
71. formlabs. *Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*. 2021 [cited 2021 18 de maio]; Available from: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>.
72. HP Development Company, L.P., *Technical white paper HP Multi Jet Fusion technology*, L.P. HP Development Company, Editor. 2018, HP Development Company, L.P.: Califórnia, EUA.

ANEXOS

- 6.1 Desenhos de montagem
- 6.2 Desenhos de conjunto
- 6.3 Desenhos de definição
- 6.4 Propriedades do PLA
- 6.5 Propriedades do Grey Pro Resin
- 6.6 Propriedades do Ultrasint TPU 90A-01

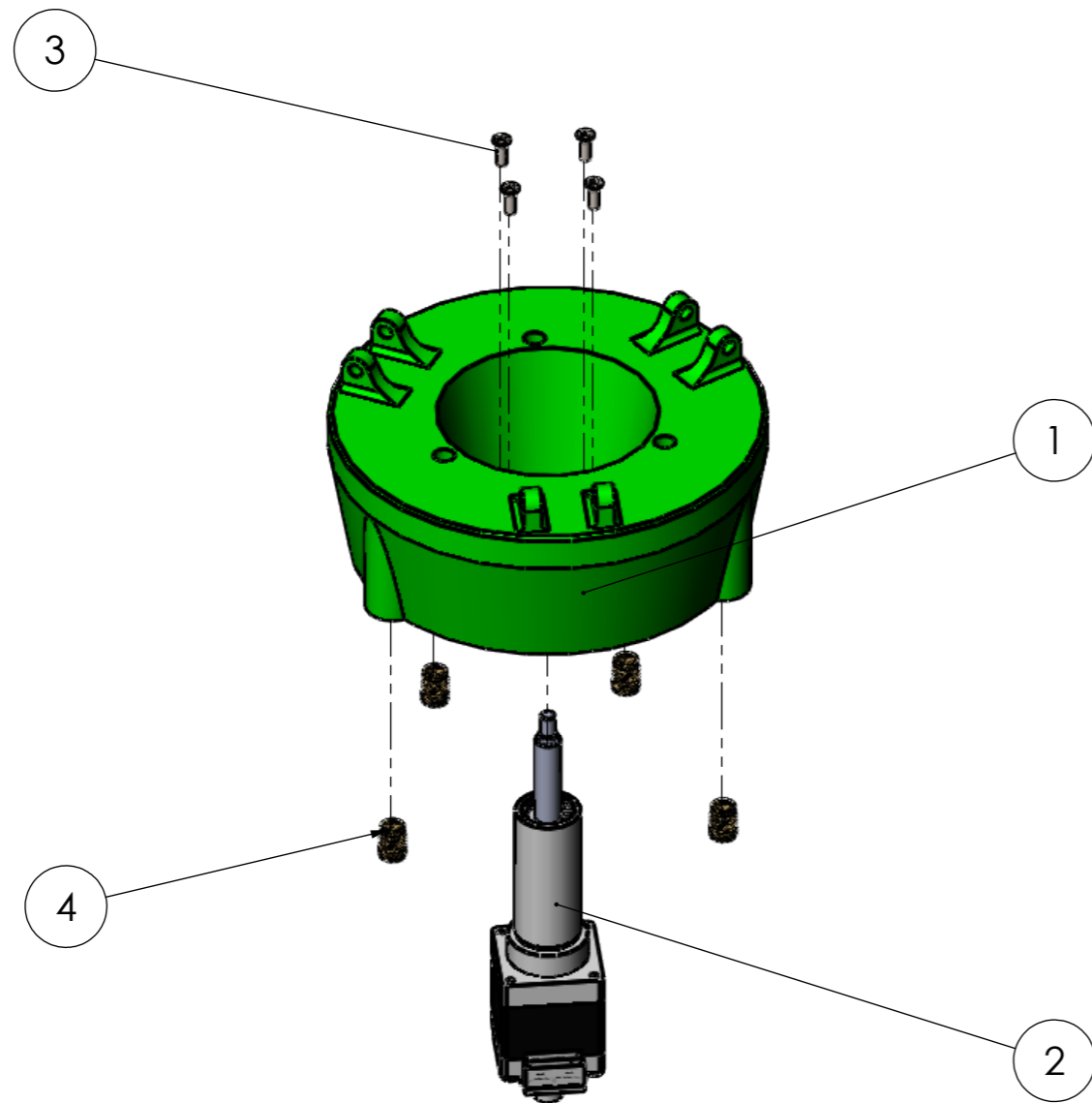
6 ANEXOS

6.1 Desenhos de montagem



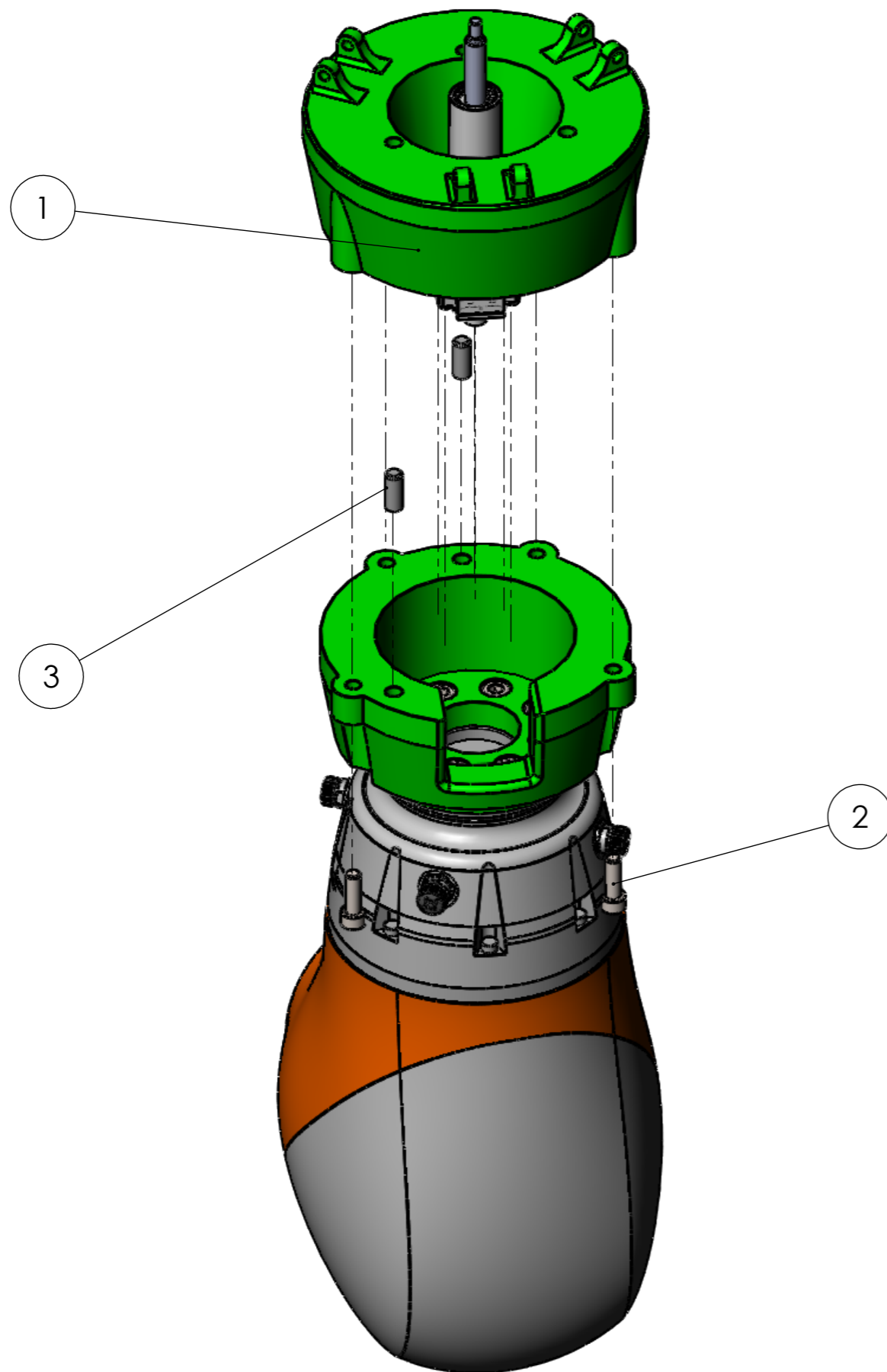
ITEM NO.	NAME	DESCRIPTION	QTY.
1	<i>Kuka LBR iiwa 14 R820</i>		1
2	SG_P01_Base_Inferior_A		1
3	ISO 4762 M6 x 10 - 10N		7
4	SG_P04_Pino_2		1

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 1ª Parte da Montagem		REV.	FOLHA 1/8
		ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	



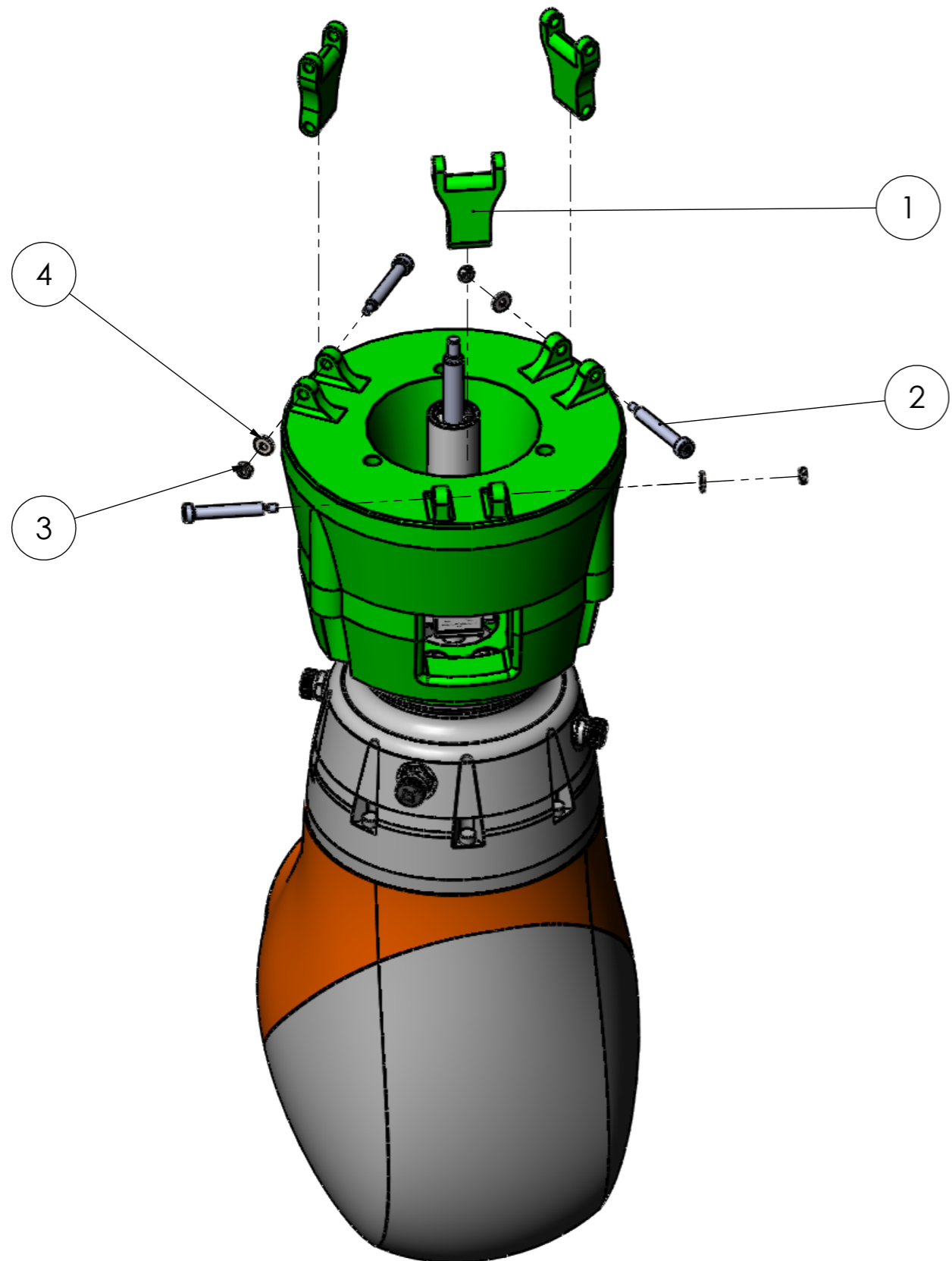
ITEM NO.	NAME	DESCRIPTION	QTY.
1	SG_P02_Base_Superior_A		1
2	Atuador		1
3	ISO 7046-1 - M2.5 x 8 - Z - 8N		4
4	ruthex RX-M5x9,5.step		4

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira					
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		Soft Gripper		LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 2ª Parte da Montagem		REV.	REV.	ESCALA 1/2	FOLHA 2/8
			ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	



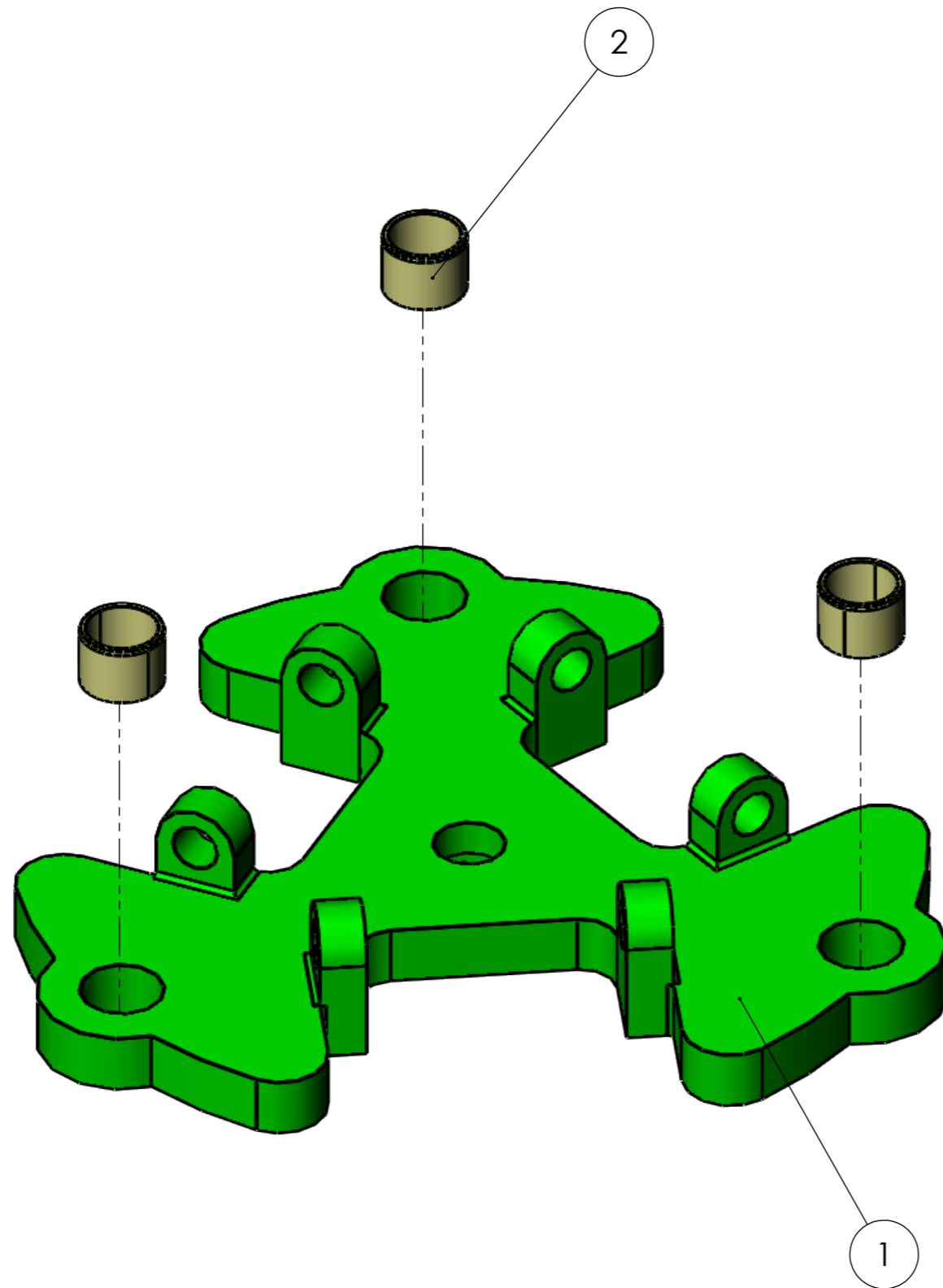
ITEM NO.	NAME	DESCRIPTION	QTY.
1	SG_P02_Base_Superior_A		1
2	socket head cap screw_iso54		4
3	SG_P04_Pino_2		2

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem	Soft Gripper		LÍNGUA PT
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 3ª Parte da Montagem	REV.	REV.	ESCALA 1/2
			ESTADO Concluído		FOLHA 3/8
			DATA DE EMISSÃO 6/05/2021		



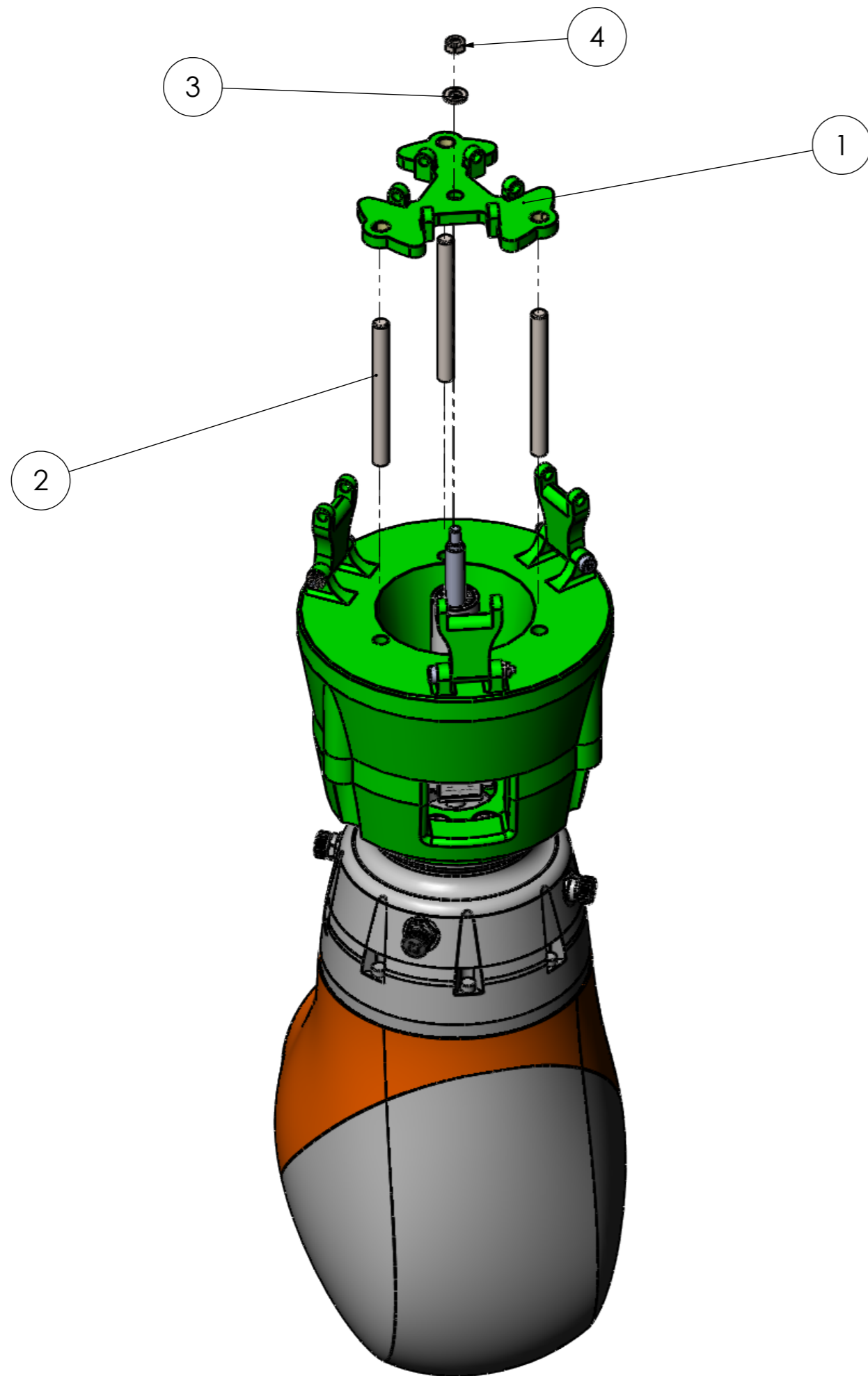
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SG_P03_Braço_A		3
2	MSB4-25		3
3	ISO - 4032 - M2.5 - W - N		3
4	ISO 10669-2.5-N		3

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		Soft Gripper LÍNGUA PT	
TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 4ª Parte da Montagem		REV.	REV.	ESCALA 1/2	FOLHA 4/8
		ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	



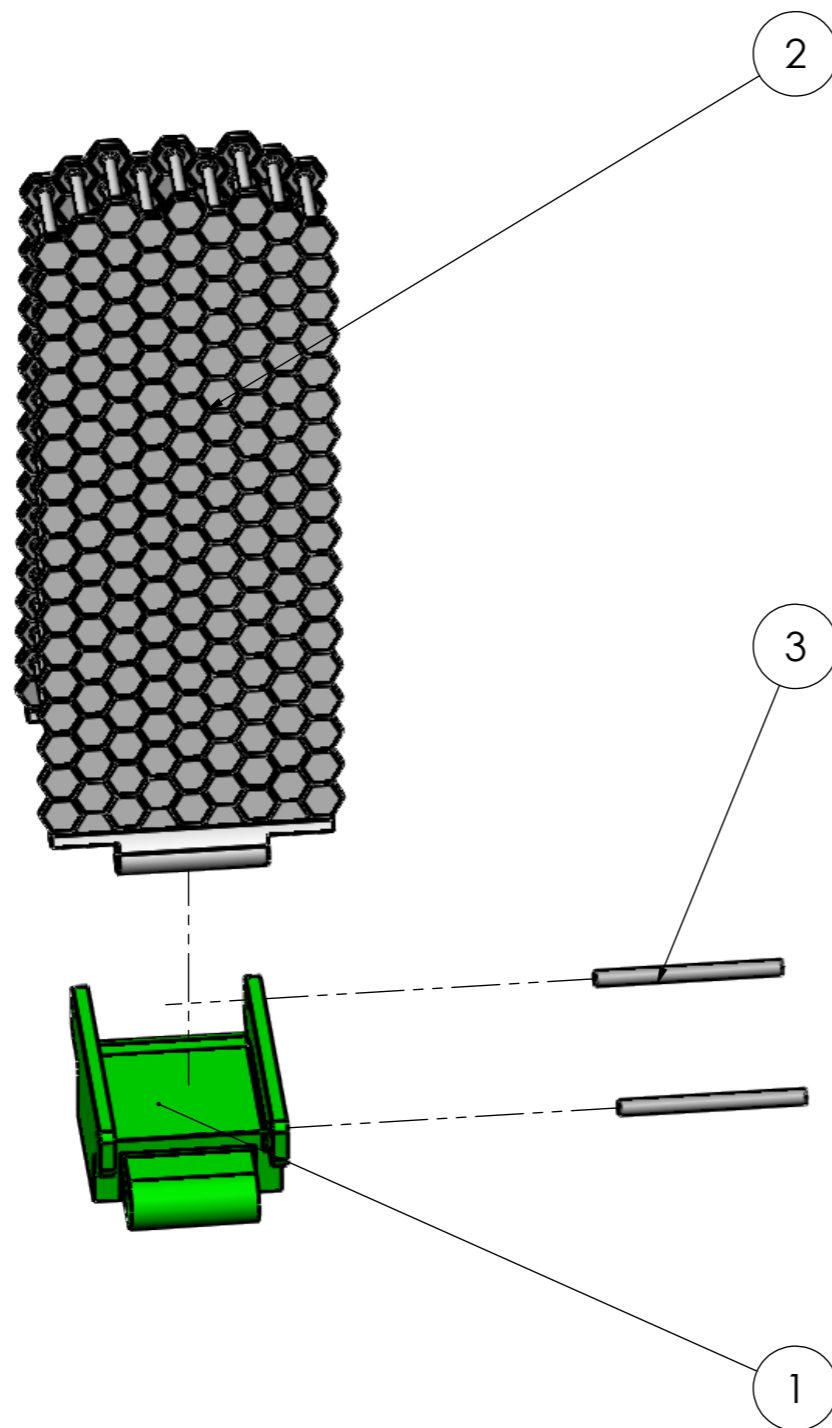
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SG_P04_Plataforma_A		1
2	JSM_0607_05_1	PART-JSM-0607-05-DESC	3

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem	Soft Gripper		LÍNGUA PT
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 5ª Parte da Montagem	REV.	REV.	ESCALA 2/1
			ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021
					FOLHA 5/8



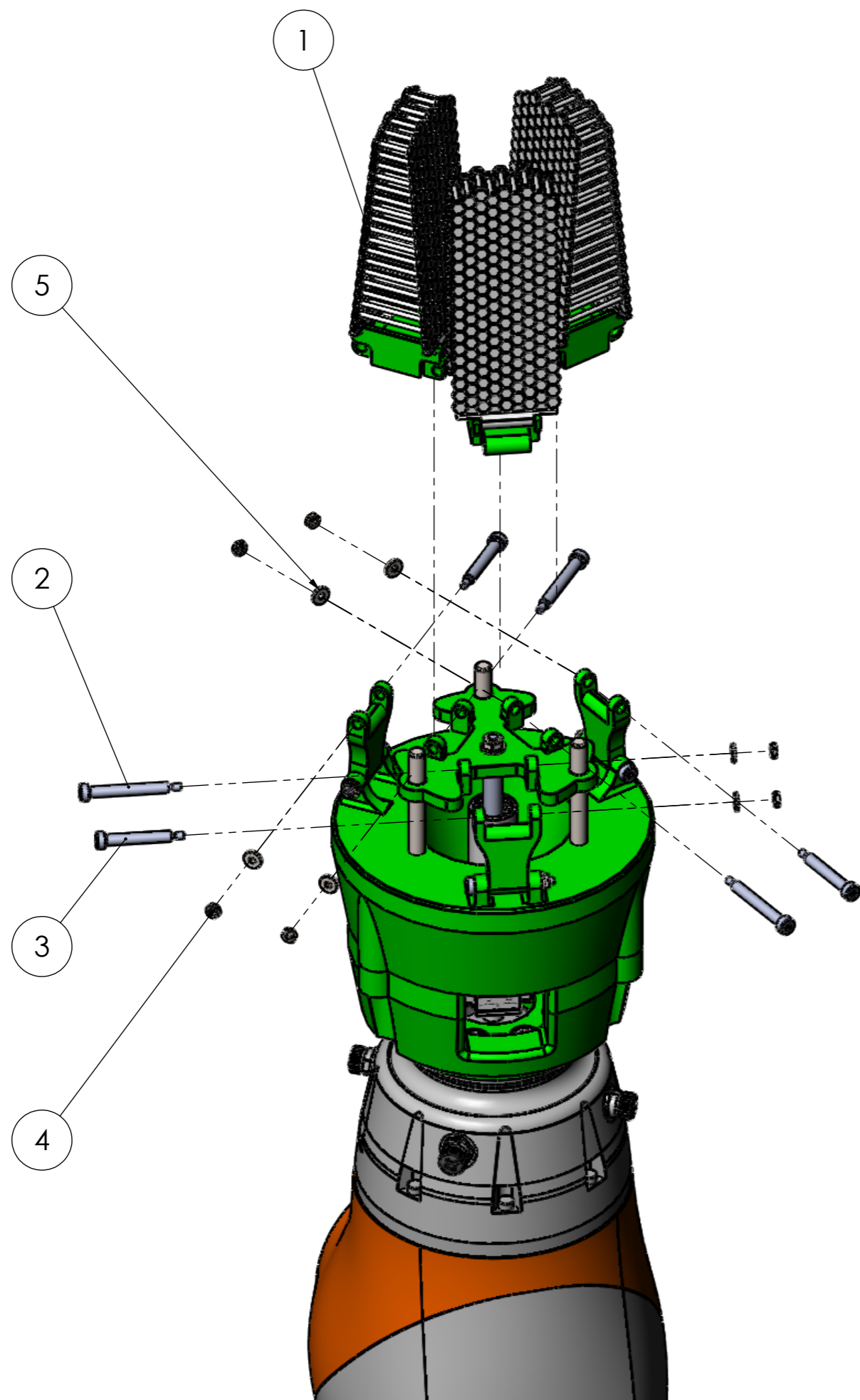
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	SG_P04_Plataforma_A		1
2	SG_P05_Pino_Guia_A		3
3	ISO 10673-4.55-S		1
4	ISO - 4032 - M4 - W - N		1

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		Soft Gripper LÍNGUA PT	
TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 6ª Parte da Montagem		REV.	REV.	ESCALA 1/2	FOLHA 6/8
		ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CD_P02_Adaptador_A		3
2	CD_P01_Dedo_A		3
3	SG_P04_Pino_A		6

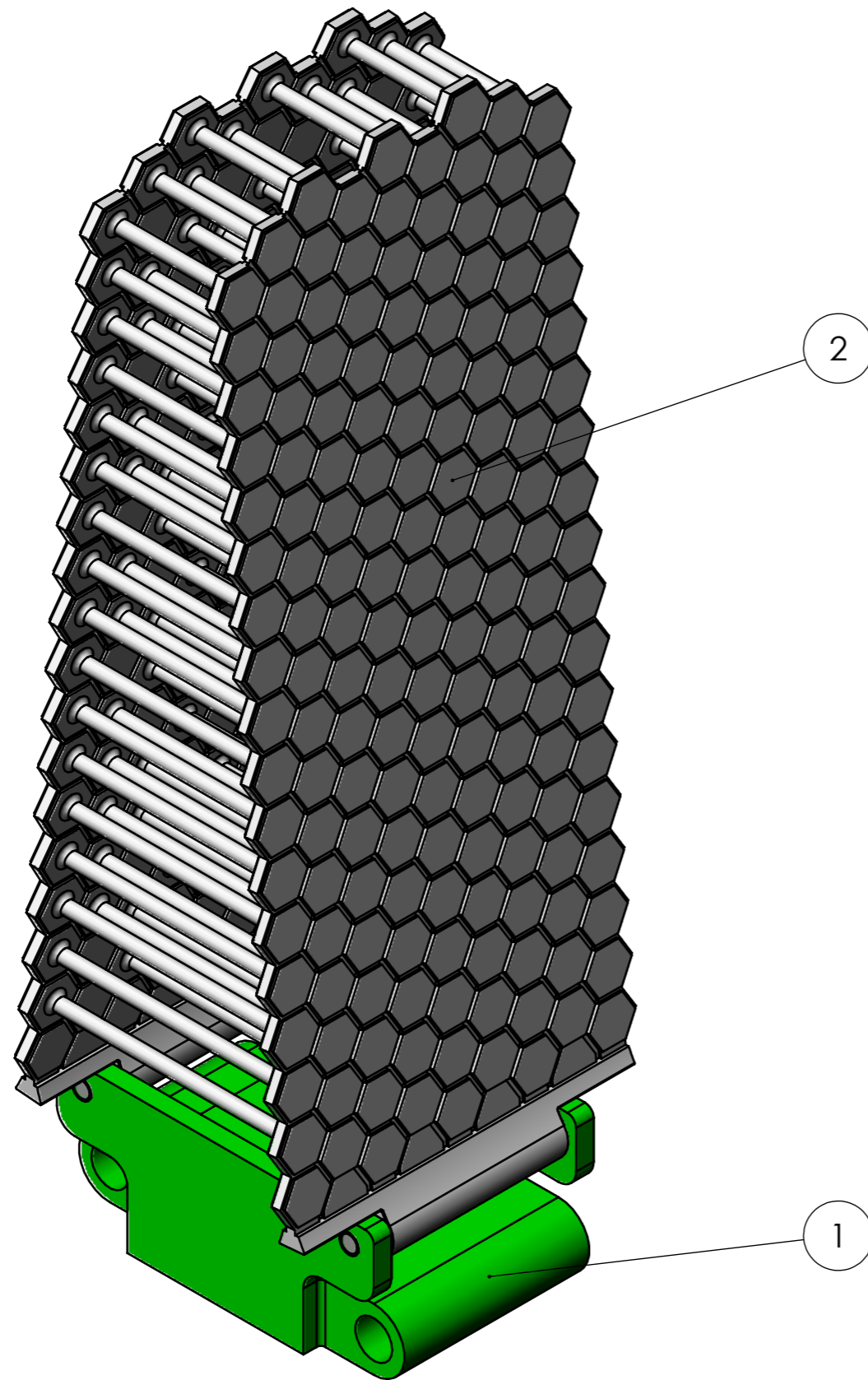
D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira				
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		Soft Gripper		LÍNGUA PT
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 7ª Parte da Montagem			REV.	REV.
	ESTADO Concluído		ESCALA 1/1	FOLHA 7/8	
			DATA DE EMISSÃO 6/05/2021		



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CD_C00_Conjunto_De do_A		3
2	MSB4-30		3
3	MSB4-25		3
4	ISO - 4032 - M2.5 - W - N		6
5	ISO 10669-2.5-N		6

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Montagem		LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR 8ª Parte da Montagem		REV.	FOLHA 8/8
		REV.	ESTADO Concluído	DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	

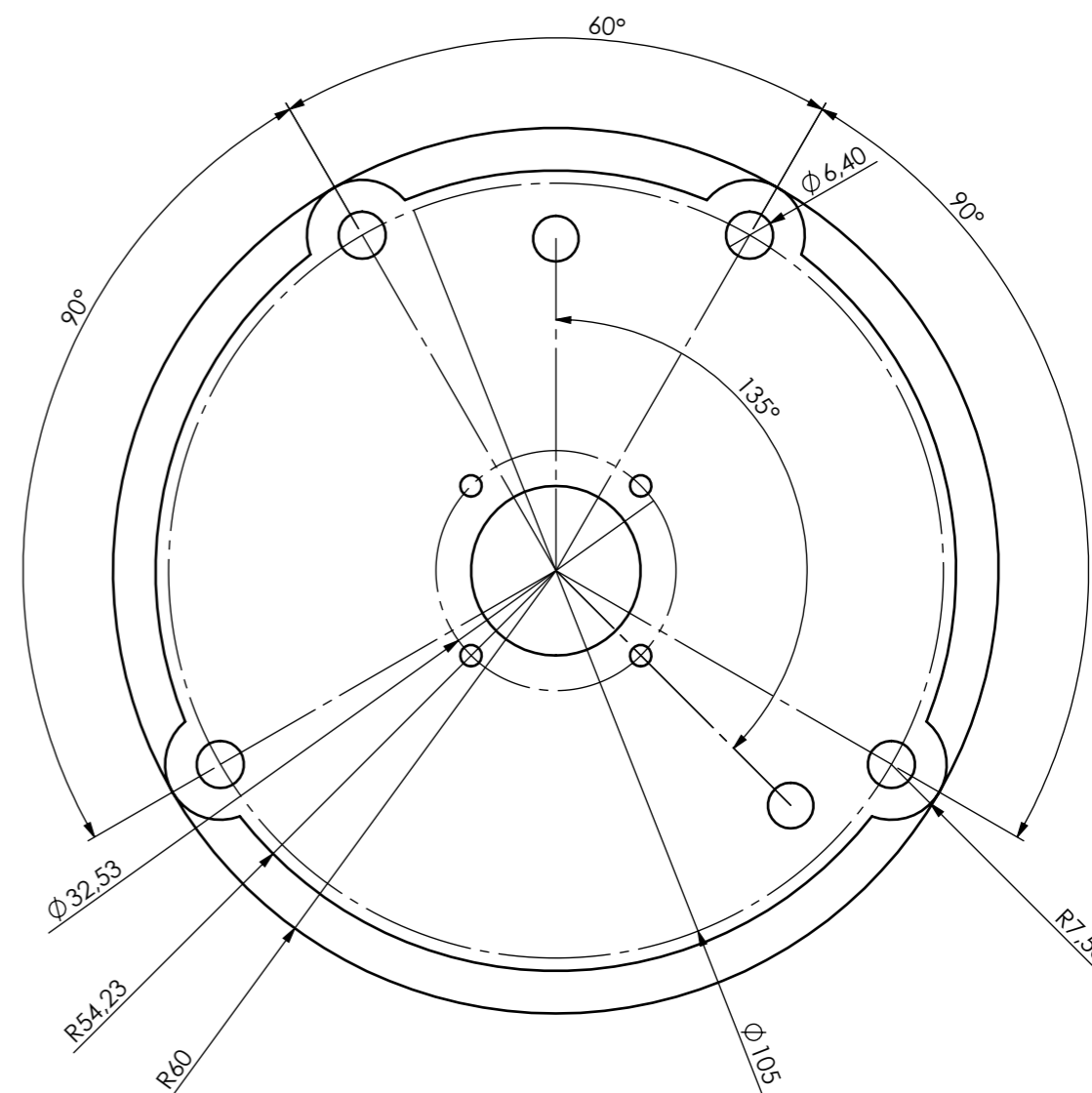
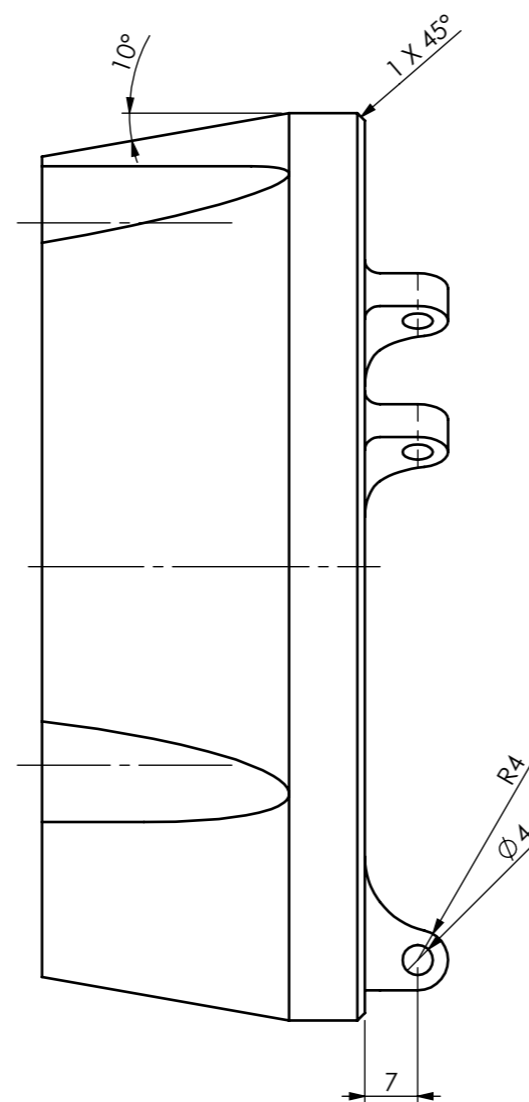
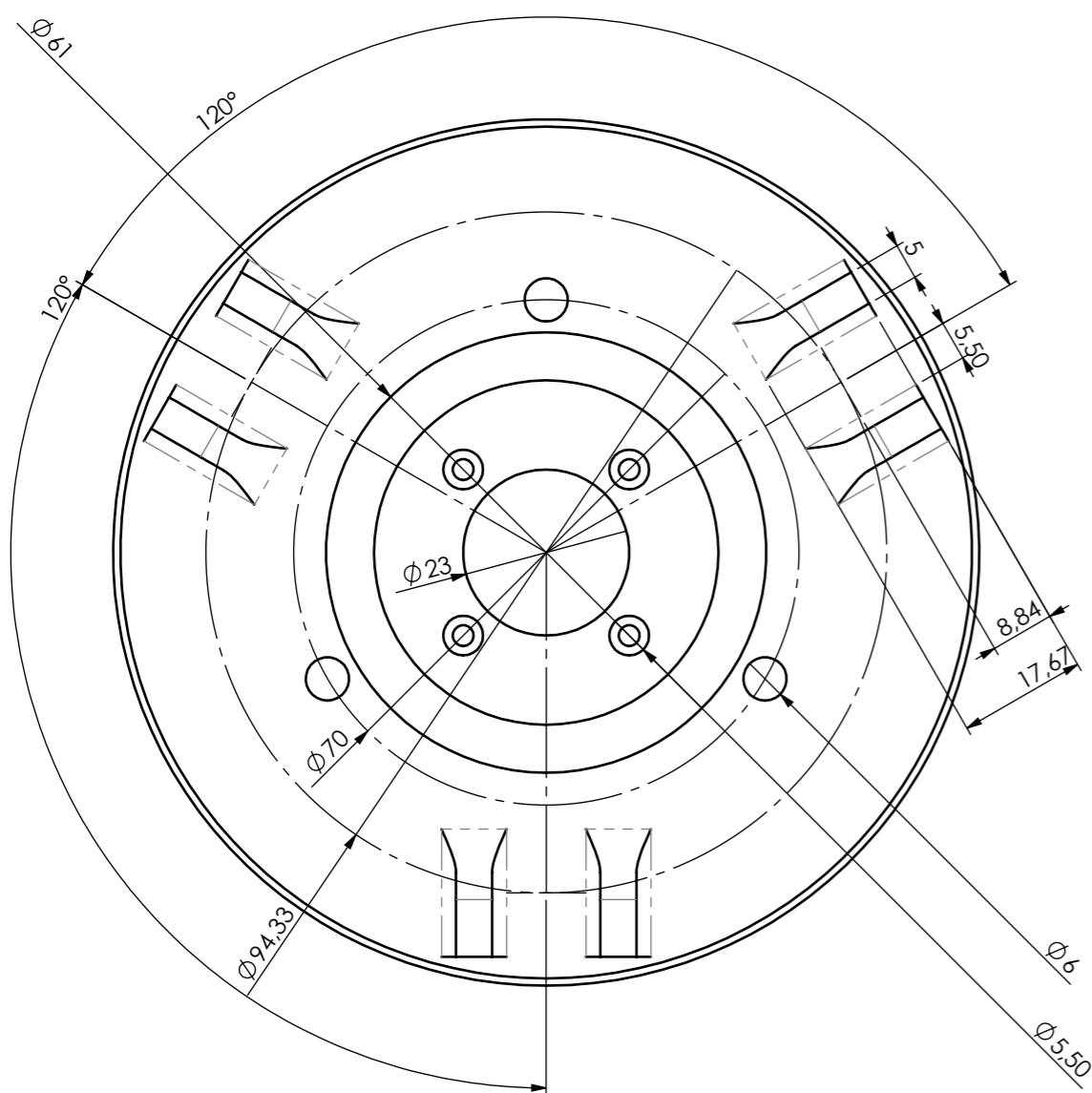
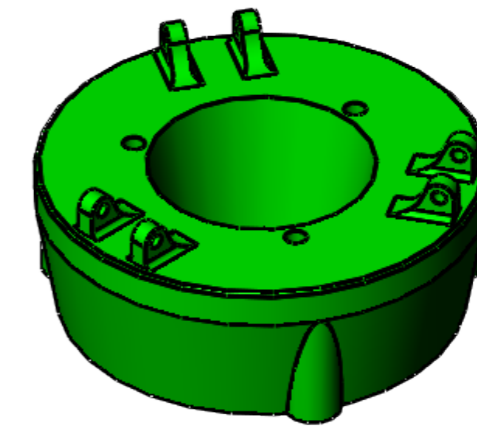
6.2 Desenhos de conjunto



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	CD_P02_Adaptador_A		1
2	CD_P01_Dedo_A		1

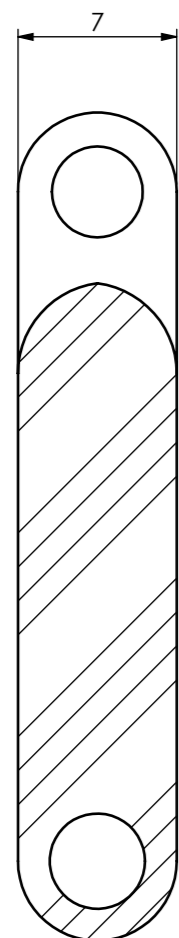
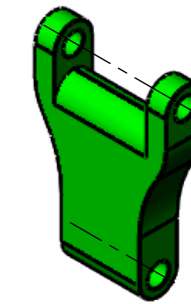
D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Conjunto		LÍNGUA PT	
		TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR CD_C00_Conjunto_Dedo_A		REV.	FOLHA 2/2
				ESTADO Concluído	DATA DE EMISSÃO 6/05/2021

6.3 Desenhos de definição

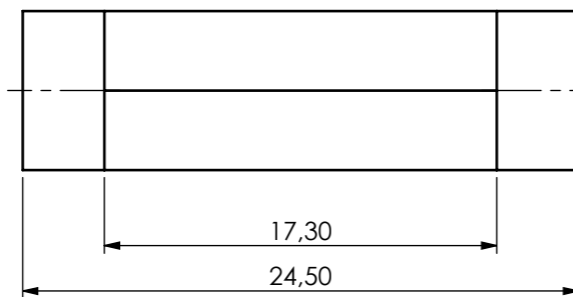
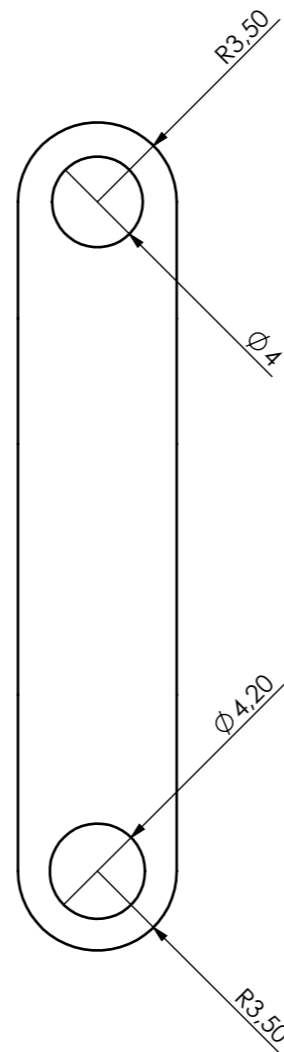
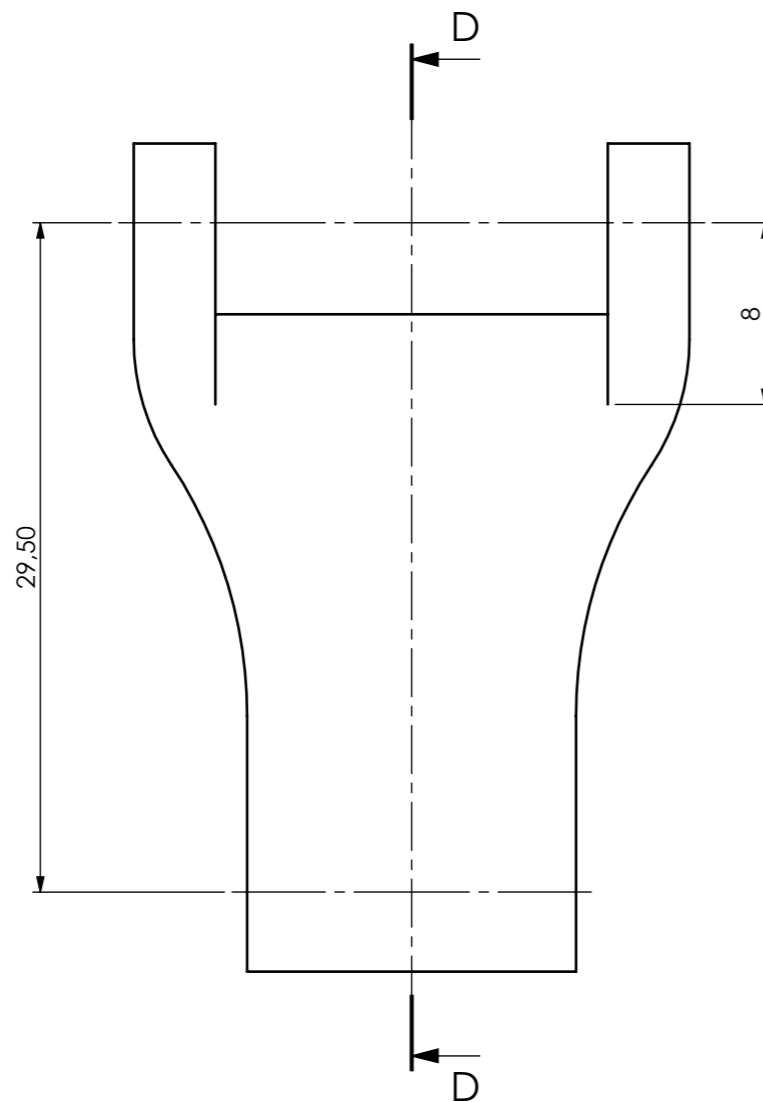


ISO 8015

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira		LÍNGUA PT	
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Definição		Soft Gripper	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR SG_P02_Base_Superior_A		REV.	FOLHA 2/6
			ESTADO Concluido	DATA DE EMISSÃO 6/05/2021



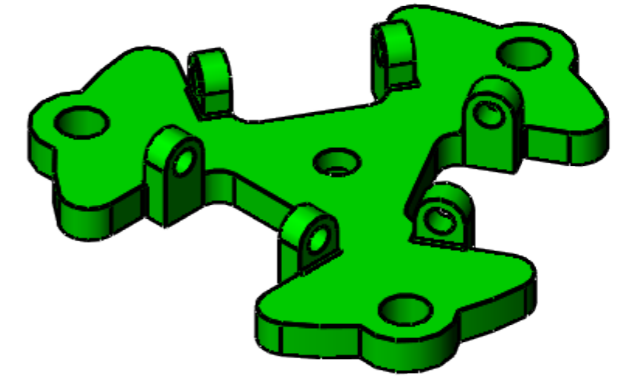
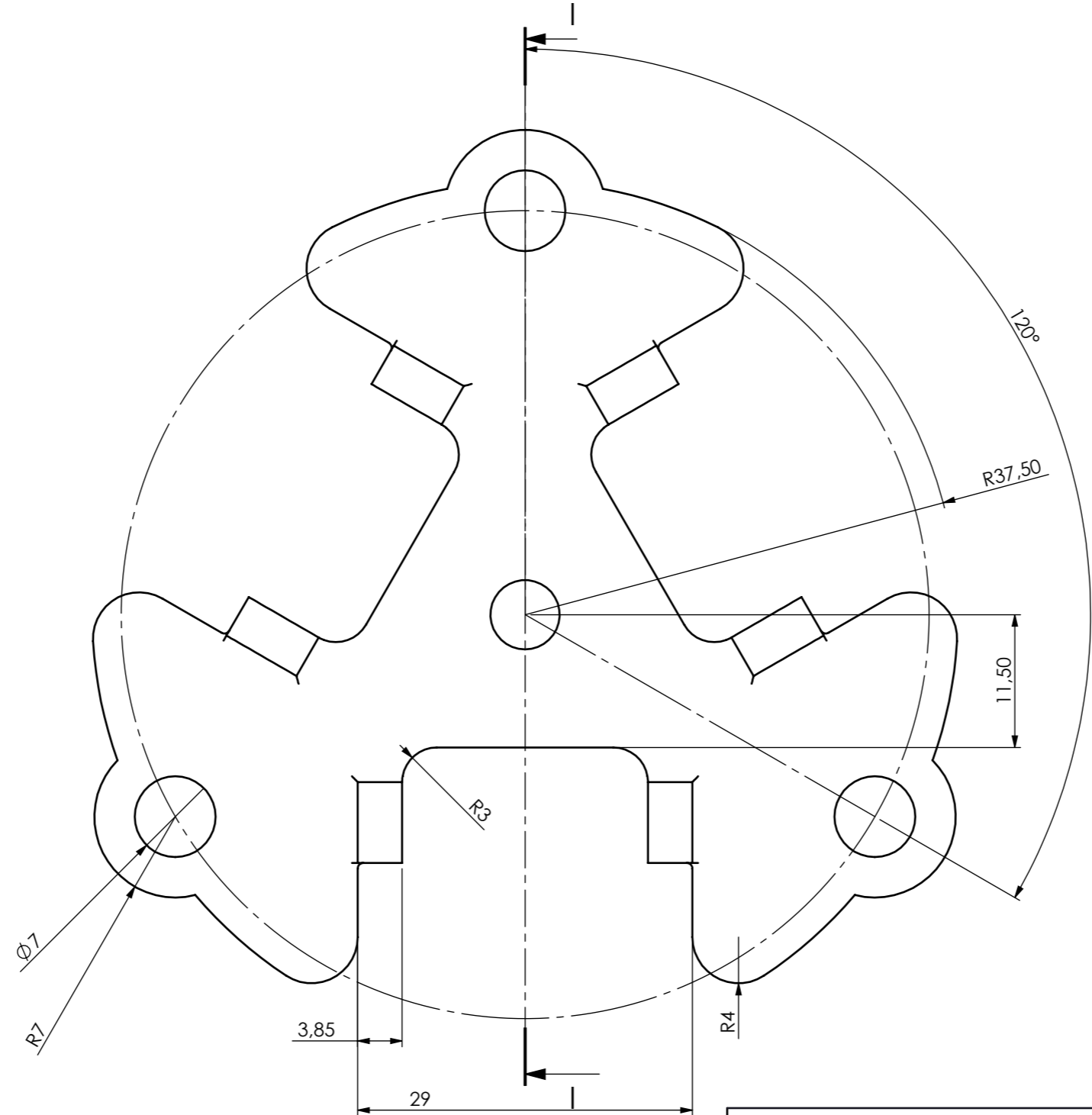
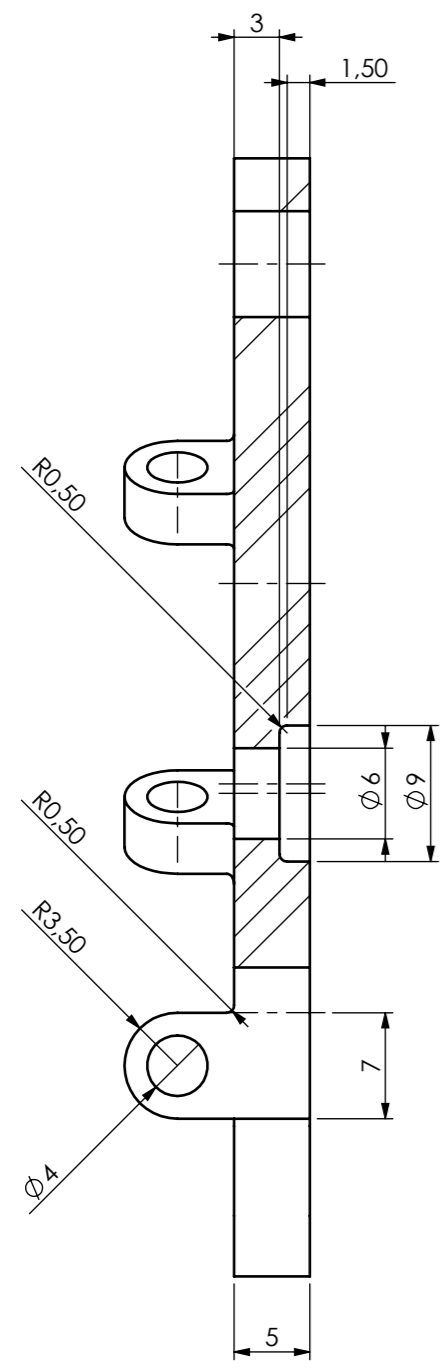
SECTION D-D
SCALE 3 : 1



ISO 8015

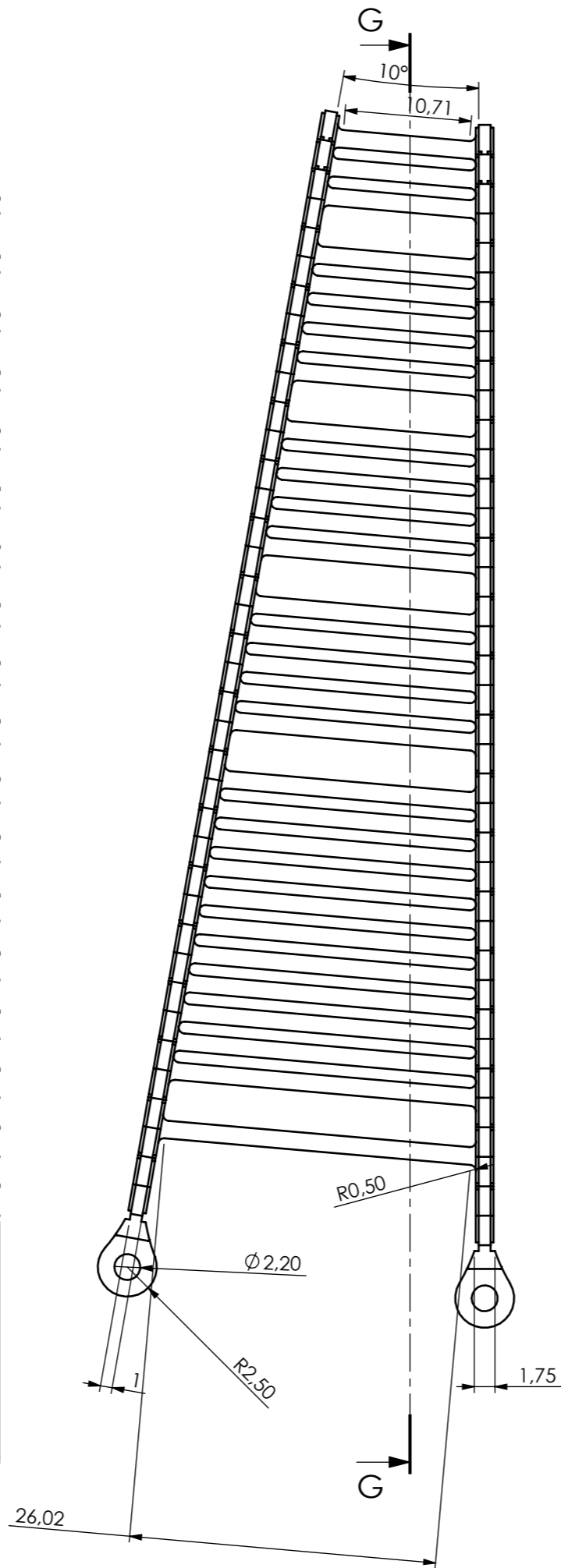
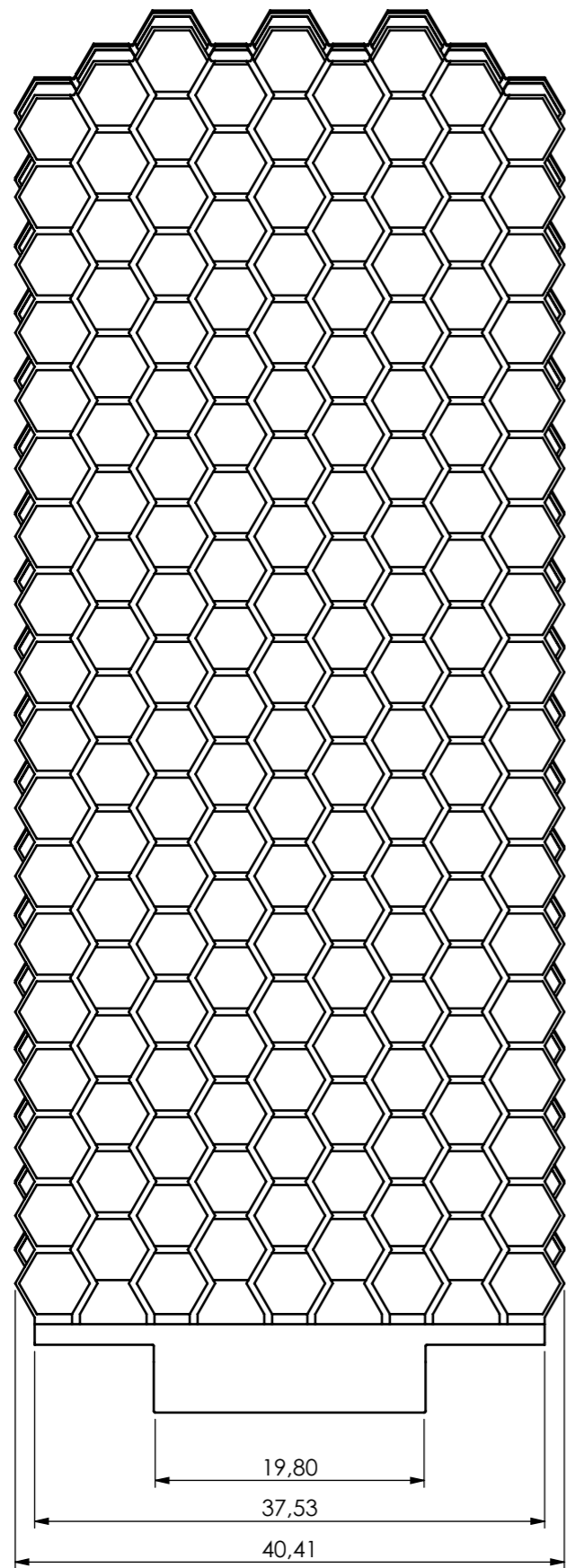
D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Definição		Soft Gripper LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR SG_P03_Braço_A		REV.	REV.
			ESCALA 3/1	FOLHA 3/6
ESTADO Concluído			DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	

SECTION I-I
SCALE 2 : 1

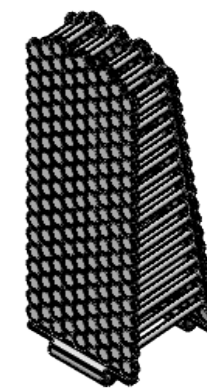
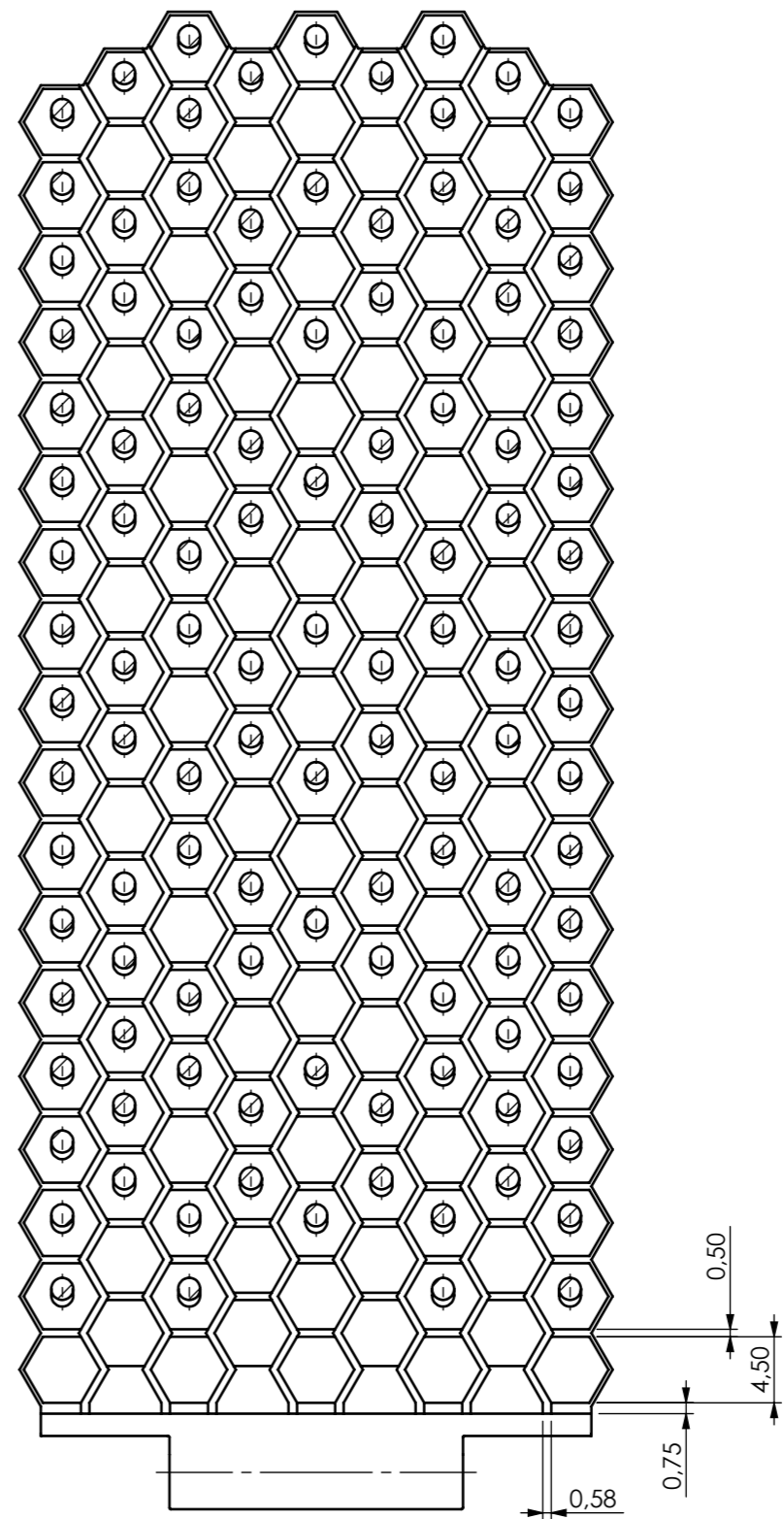


ISO 8015

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira					
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Definição		Soft Gripper		LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR SG_P04_Plataforma_A		REV.	REV.	ESCALA 2/1	FOLHA 4/6
			ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	

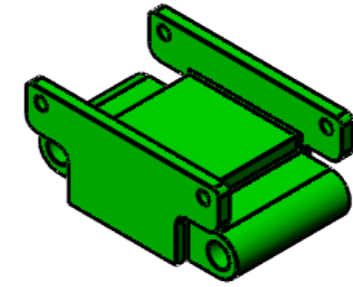
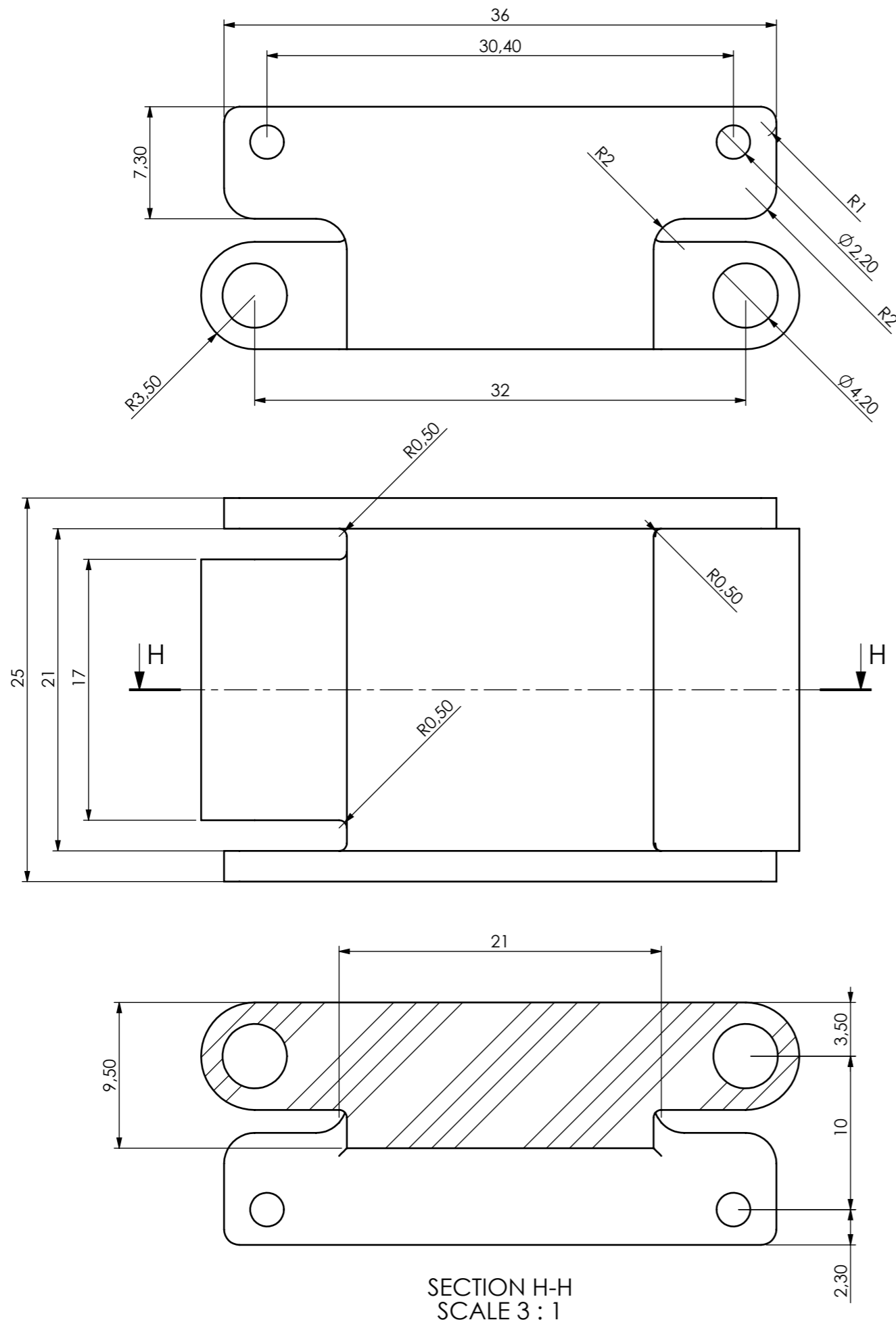


SECTION G-G
SCALE 2 : 1



ISO 8015

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre		DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira			
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto		TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Definição		Soft Gripper LÍNGUA PT	
TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR CD_P01_Dedo_A		REV.	REV.	ESCALA 2/1	FOLHA 5/6
		ESTADO Concluido		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	



ISO 8015

D.E.M. Mestrado em Engenharia Mecânica - Construções Mecânicas Dissertação / Projecto / Estágio 2º Ano 2º Semestre	DESENHO/VERIFICOU 1160576 - Pedro Dias Pereira					
	TIPO DE DOCUMENTO Desenho de Definição		Soft Gripper		LÍNGUA PT	
PROPRIETÁRIO LEGAL Instituto Superior de Engenharia do Porto Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4249-015 Porto	TÍTULO/TÍTULO COMPLEMENTAR CD_P02_Adaptador_A		REV.	REV.	ESCALA 3/1	FOLHA 6/6
			ESTADO Concluído		DATA DE EMISSÃO 6/05/2021	

6.4 Propriedades do PLA

Technical datasheet

PLA/PHA

Date of issue: April 8, 2020
Version: v1.0



Colorfabb developed its own unique PLA blend for 3D printing, namely PLA/PHA. The added PHA makes our grade of PLA tougher and less brittle than generic PLA grades in the market. PHA (polyhydroxyalkanoate) is like PLA a bio-polyester, so our unique blend is still 100% biodegradable. It has proven to be an extremely reliable filament for prototyping and investment casting. Besides its naturel color, the material is also available in a huge variety of colors, take a look in our PLA/PHA portfolio.

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES

Physical properties	Unit	Value	Method
Density	g/cm ³	1,24	ISO 1183
Modulus of elasticity	MPa	2960	ISO 527
Tensile strength	MPa	61,5	ISO 527
Tensile strain at tensile strength	%	5,3	ISO 527
Tensile stress at break	MPa	38	ISO 527
Tensile strain at break	%	10,5	ISO 527
Flexural modulus	MPa	3295	ISO 178
Flexural strain at break	%	NB	ISO 178
Flexural stress at 3.5% strain	MPa	88,8	ISO 178
Notched impact strength (Charpy), RT	kJ/m ²	2,8	ISO 179-1/1 eA
Impact strength (Charpy), RT	kJ/m ²	30,8	ISO 179-1/1 eU
Melting temperature	°C	>155	ISO 3146-C

FILAMENT SPECIFICATION

Nominal diameter:	Diameter tolerance	Ovality
1,75 mm	± 0,05	≥ 95%
2,85 mm	± 0,05	≥ 95%

Netto filament weight 750 grams / 2200 grams

GUIDELINE FOR PRINT SETTINGS

Advised 3D printing temperature	195 – 220 °C
Advised bed temperature	50 – 60 °C
Bed surface / modification	Our PLA/PHA performs well on both heated and non-heated build platforms. For those users printing on a cold build platform we advise applying masking tape to the build area. The rough surface of the tape will provide enough adhesion for the first layer to stick and print almost without any warping.
Active cooling fan	0 – 100 %
Advised 3D printing speed	40 – 100 mm/sec

Disclaimer

The product- and technical information provided in this datasheet is correct to the best of our knowledge. The information given is provided as a guidance for good use, handling and processing and is not to be considered as a quality specification. The information only relates to the specific product and the material properties.

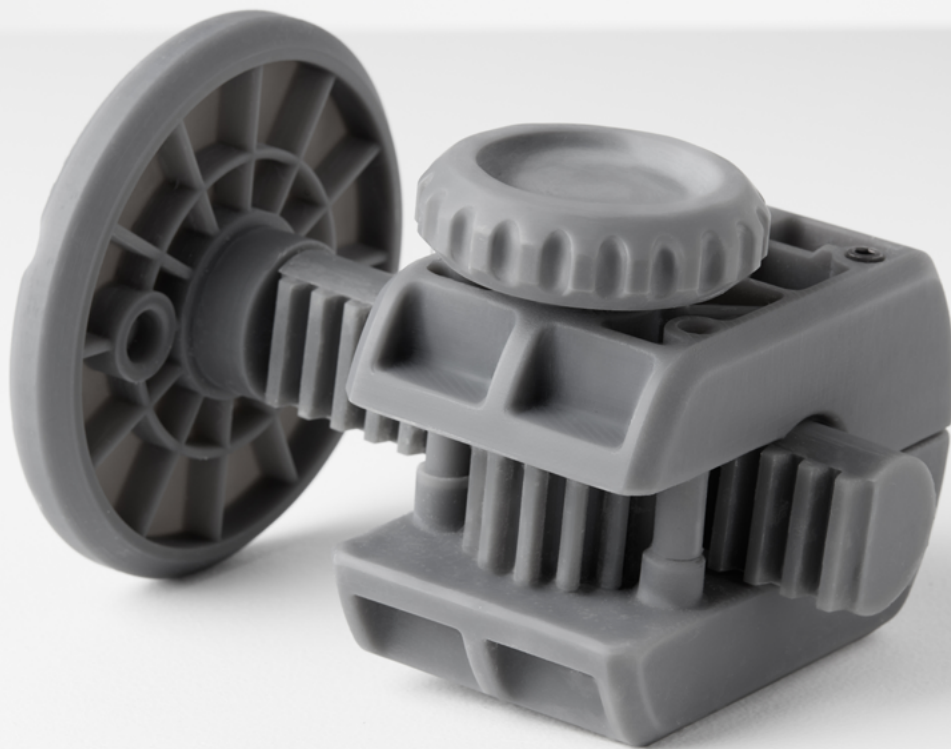
6.5 Propriedades do Grey Pro Resin

Grey Pro

Photopolymer Resin for Form 2

Grey Pro Resin's high precision, moderate elongation, and resistance to deformation over time make it a versatile material suitable for a wide range of engineering applications.

Supports print resolutions: 100 and 50 microns. **Requires Resin Tank LT.**



FLPRGR01

formlabs 

Prepared 01 . 22 . 2018
Rev 01 01 . 22 . 2018

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

Material Properties Data

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	35 MPa	61 MPa	5076 psi	8876 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	1.4 GPa	2.6 GPa	203 ksi	377 ksi	ASTM D 638-14
Elongation	32.5 %	13 %	32.5 %	13 %	ASTM D 638-14
Flexural Properties					
Flexural Stress at 5% Strain	39 MPa	86 MPa	5598 psi	12400 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.94 GPa	2.2 GPa	136 ksi	319 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched IZOD	not tested	18.7 J/m	not tested	0.351 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Temperature Properties					
Head Deflection Temp. @ 1.8 MPa	not tested	62.4 C	not tested	144.3 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	not tested	77.5 C	not tested	171.5 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion (-30 to 30° C)	not tested	78.5 um/m/C	not tested	43.4 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Grey Pro settings, without additional treatments.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Grey Pro settings and post-cured with a Formcure for 120 minutes at 80 C.

Solvent Compatibility

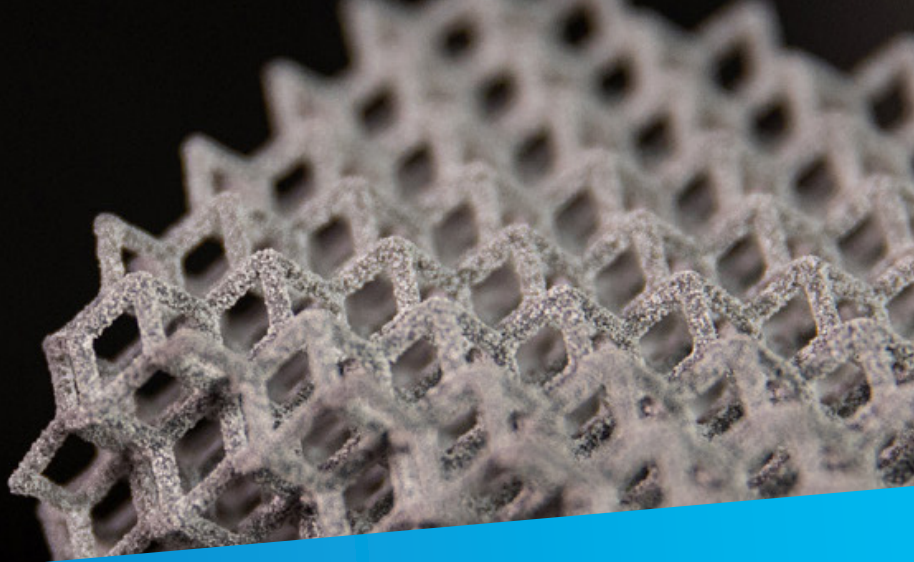
Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Mechanical Properties	24 hr weight gain (%)	Mechanical Properties	24 hr weight gain (%)
Acetic Acid, 5 %	0.75	Hydrogen Peroxide (3 %)	0.75
Acetone	10.77	Isooctane	0.02
Isopropyl Alcohol	1.56	Mineral Oil, light	0.35
Bleach, ~5 % NaOCl	0.65	Mineral Oil, heavy	0.27
Butyl Acetate	0.84	Salt Water (3.5 % NaCl)	0.64
Diesel	0.08	Sodium hydroxide (0.025 %, pH = 10)	0.72
Diethyl glycol monomethyl ether	2.38	Water	0.83
Hydraulic Oil	0.16	Xylene	0.42
Skydrol 5	0.54	Strong Acid (HCl Conc)	8.21

6.6 Propriedades do Ultrasint TPU 90A-01



Datasheets
Multi Jet Fusion



Ultrasint TPU 90A-01

Ultrasint TPU 90A-01, a thermoplastic polyurethane, is a fully-functional and flexible material with high elongation at break. Ultrasint TPU 90A-01 combines durable elasticity with good wear resistance and abrasion resistance, making it an ideal material for prototyping and manufacturing applications that require good shock absorption and rubber-like elasticity over a wide range of temperatures. Produced with Multi Jet Fusion technology, Ultrasint TPU 90A-01 exhibits smooth surfaces and high detail.

MEASUREMENT	VALUE X Y	VALUE Z	STANDARD
Density	1,1 g/cm ³	1,1 g/cm ³	
Hardness Shore A	88	88	DIN ISO 7619-1
Tensile Strength	9 MPa	7 MPa	DIN 53504, S2
Tensile Elongation at break	220 %	120 %	DIN 53504, S2
Tensile Modulus	75 MPa	85 MPa	ISO 527-2, 1A
Flexural Modulus	75 MPa	75 MPa	DIN EN ISO 178
Tear resistance (Trouser)	20 kN/m	16 kN/m	DIN ISO 34-1, A
Tear resistance (Graves)	36 kN/m	32 kN/m	DIN ISO 34-1, B
Compression set B (23°C, 72h)	20 %	20 %	DIN ISO 815-1
Rebound resilience	63 %	63 %	DIN 53512
Abrasion resistance	140 mm ³	100 mm ³	DIN ISO 4649
Charpy Impact Strength (notched, 23°C)	Partial Break	No Break	DIN EN ISO 179-1
Charpy Impact Strength (notched, -10°C)	21 kJ/m ²	29 kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1
Rossflex testing (100k cycles, 23°C)	No Cut Growth		ASTM D1052
Rossflex testing (100k cycles, -10°C)	No Cut Growth		ASTM D1052
Vicat/ A (10N)	84	96 °C	DIN EN ISO 306
Melting temperature	120-150 °C	120-150 °C	ISO 11357 (20K/min)

Actual values may vary with build condition

For more information on this material, please visit mtls.me/TPU-MJF.

