

# Conceção de uma impressora 3D de alta performance para operação em vácuo e microgravidade

*Tiago Ramiro Mateus Rodrigues*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Coorientador INEGI: Doutor Luís Miguel Oliveira



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Setembro 2020



*Aos meus pais*



## Resumo

Ao longo dos últimos anos, os avanços das tecnologias de fabrico aditivo possibilitaram o uso deste processo para o fabrico de componentes com características capazes de competir, e até mesmo, superar componentes produzidos por processos tradicionais de fabrico. Assim, este processo começou a ser estudado para aplicações em diferentes ambientes, incluindo a Estação Espacial Internacional.

O Departamento de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS), com o intuito de trazer avanços para esta área de fabrico, propôs uma nova abordagem para a impressão 3D a bordo da Estação Espacial Internacional: impressão em ambiente de vácuo, no exterior da estação.

Desse modo, o principal objetivo desta dissertação é a realização do projeto para uma impressora 3D de alto rendimento para operação num ambiente de vácuo e microgravidade. Ao longo desta dissertação é abordada a Estação Espacial Internacional, o processo de fabrico aditivo, patentes e, de seguida, é proposta uma solução para um dispositivo capaz de operar nas condições da Órbita Terreste Baixa. Assim, durante a escolha de componentes e materiais foram consultadas as normas aplicáveis e consideradas as características do ambiente da Órbita Terreste Baixa. São indicados fornecedores para alguns componentes e apresentados os desenhos técnicos dos componentes projetados. No final, são aduzidas algumas conclusões relativamente ao processo de escolha de materiais e componentes, do processo de fabrico aditivo na Estação Espacial Internacional e da impressora projetada.



# Design of a high-performance 3D printer for operation in vacuum and microgravity

## Abstract

Over the past few years, advances in additive manufacturing technologies enabled this process to manufacture components with properties capable of competing and even surpassing components produced by traditional manufacturing processes. Thus, this process began to be studied for applications in different environments, including the International Space Station.

The Department of Products and Systems Development (DPS), in order to bring advances to this area of manufacturing, proposed a new approach to 3D printing on board the International Space Station: printing in a vacuum environment, outside the space station.

The main objective of this thesis is the design of a high-performance 3D printer for operation in a vacuum and microgravity environment. Topics like The International Space Station, the additive manufacturing process and some patents are firstly aborded. After that is proposed a solution for a device capable of operating in the conditions of Low Earth Orbit. During the selection of components and materials, the characteristics of the Low Earth Orbit environment were considered, and the space standards made by space agencies were consulted. Components suppliers are pointed, and the technical drawings of the designed parts are presented. At the end, some conclusions are drawn regarding the selection process of materials and components, the additive manufacturing process on the International Space Station and the designed printer.



## Agradecimentos

Um agradecimento especial ao meu orientador, Doutor Luís Miguel Oliveira, pela forma como me acompanhou ao longo deste trabalho. A disponibilidade, o imenso conhecimento transmitido e o auxílio no desenvolvimento de ideias foram pilares fundamentais para a realização deste trabalho.

Também, ao Professor Fernando Gomes de Almeida pela valiosa disponibilidade e pelas questões pertinentes que permitiram levar esta dissertação para um nível superior.

Aos meus pais, irmão e avós, pelo apoio e suporte que me dão em todas as ocasiões, pela boa disposição e, sobretudo, pelos exemplos transmitidos que me dão vontade de continuar a construir o meu carácter, atingir os meus objetivos e ser a melhor pessoa que posso ser.

Aos meus amigos, pelos bons momentos que tenho na guardados minha memória.

Ramiro Rodrigues

# Índice de Conteúdos

Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos .....	iv
Índice de Figuras .....	xiv
Índice de Tabelas .....	xv
Siglas e Acrónimos .....	xvii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2 Objetivos do projeto.....	2
1.3 Método seguido no projeto .....	2
1.4 Estrutura da dissertação .....	3
2 Estado da arte.....	5
2.1 Estação Espacial Internacional.....	5
2.2 Características da Órbita Terrestre Baixa.....	7
2.3 Fabrico Aditivo .....	8
2.4 Fabrico Aditivo na Estação Espacial Internacional.....	11
2.5 Processos aptos para adaptação ao ambiente da EII.....	13
2.6.1 Directed Energy Deposition (DED) .....	14
2.6.2 Fused Deposition Modelling (FDM) .....	15
2.6 Patentes .....	17
2.7.1 3D Printing System With Vacuum Chamber Enclosure: US 2018/0178463 .....	17
2.7.2 High-Temperature Modeling Apparatus: US 6,722,872 B1 .....	18
2.7.3 Additive manufacturing of extended structures: US2015/0076732 A1 .....	18
3 Projeto Conceptual .....	21
3.1 Seleção do processo de fabrico aditivo .....	21
3.2 Escolha do local no exterior da ISS .....	21
3.3 Especificações.....	23
3.4 Projeto de Desenvolvimento de Produto.....	24
3.4.1 Análise funcional.....	25
3.4.2 Matriz morfológica.....	30
4 Projeto de Materialização.....	31
4.1 Seleção de materiais para ambiente espacial.....	31
4.1.1 Polímeros, metais e oxigénio atómico.....	34
4.2 Separação dos sistemas e subsistemas .....	35
4.2.1 Estrutura da impressora .....	35
4.2.2 Proteção da estrutura .....	36
4.2.3 Conversão de energia elétrica em movimento linear X, Y e Z.....	36
4.2.4 Acomodar matéria prima extrudida.....	41
4.2.5 Conversão de energia elétrica em energia térmica – plataforma de impressão .....	42
4.2.6 Transferência de energia térmica no extrusor – permutador de calor.....	43
4.2.7 Guiamento da matéria prima – heatbreak.....	44
4.2.8 Transferência de energia térmica – extrusor.....	44
4.2.9 Conversão de energia elétrica em energia térmica .....	46
4.2.10 Conversão de energia térmica em sinal digital – extrusor.....	47
4.2.11 Extrusão de matéria prima.....	47
4.2.11 Conversão de energia elétrica em movimento linear Extrusor .....	48
4.2.12 Conversão de energia elétrica em energia térmica – câmara de impressão .....	51
4.2.13 Conectores elétricos .....	52
4.2.13 Controlo.....	53

4.2.14	Considerações sobre a escolha de fabricantes .....	55
5	Cálculos de Engenharia .....	57
5.1	Cálculo Energia de Arrefecimento Extrusor .....	57
5.2	Dimensionamento Motores Lineares .....	59
5.3.1	Eixo X .....	60
5.3.2	Eixo Y .....	62
5.3.3	Eixo Z .....	63
5.3.3	Considerações sobre perfis de velocidade .....	66
5.3	Dimensionamento Guias Lineares .....	67
5.3.1	Eixo X .....	67
5.3.2	Eixo Y .....	70
5.3.3	Eixo Z .....	75
5.4	Solicitação da estrutura durante o lançamento .....	76
5.5	Solicitação da estrutura durante a impressão .....	78
6	Conclusão .....	81
6.1	Trabalhos futuros .....	83
	Referências .....	85
ANEXO A:	Seleção de Materiais e Componentes .....	89
ANEXO B:	Lista de componentes .....	97
ANEXO C:	Desenhos técnicos .....	105



# Índice de Figuras

Figura 1- Publicações com parceria da EEI, até 31 Maio 2018 [1].	6
Figura 2- Laboratório Columbus [8].	7
Figura 3- Laboratório Kibo [9].	7
Figura 4- Modelo CAD.	8
Figura 5- Altura da camada de 0.12 mm.	8
Figura 6-Altura da camada de 0.32 mm.	8
Figura 7 - Peça sem suportes estruturais.	9
Figura 8 - Peça com suportes estruturais.	9
Figura 9- Processo tradicional <i>versus</i> Processo fabríco aditivo [12].	9
Figura 10- Falha de Componentes na ISS. Adaptado de [16].	11
Figura 11- LENS [25].	15
Figura 12-WAAM. Adaptado de [32].	15
Figura 13- EB3F [28].	15
Figura 14- Processo FDM [32].	15
Figura 15 - Impressora FDM, AON M2.	15
Figura 16- Materiais para impressão FDM [30].	16
Figura 17 - Dispositivo de fábrico aditivo localizado no interior de uma câmara de vácuo.	17
Figura 18 -Impressora 3D com câmara aquecida [35].	18
Figura 19- Dispositivo de fábrico, vista 1.	19
Figura 20- Dispositivo de fábrico, vista 2.	19
Figura 21- Instalações <i>Kibo</i> [39].	22
Figura 22 – <i>Payloads</i> livres no módulo <i>JEM-EF</i> .	22
Figura 23 - Análise funcional da impressora FDM/FFF.	25
Figura 24- Componentes de um extrusor FDM típico [40].	29
Figura 25 - Estrutura Impressora, Render CAD.	35
Figura 26 - Bracket, Render CAD.	35
Figura 27 - Revestimento térmico [45].	36
Figura 28- Motor Linear [47].	37
Figura 29 – Calha magnética [47].	37
Figura 30 - Montagem. Adaptado de [47].	37
Figura 31 - Configuração de um sistema de movimento com guias e motores lineares [47].	37
Figura 32 - Eixo Y, modelo CAD.	38
Figura 33 - Conexão eixo Y, <i>render 3D</i> .	38
Figura 34 - Eixo X, <i>render 3D</i> .	38
Figura 35 - Eixo X, <i>render 3D</i> .	38
Figura 36 - Eixo X, Y, Z, <i>render 3D</i> .	39
Figura 37 - Eixo X, Y, Z, <i>render 3D</i> .	39
Figura 38 - Sensor capacitivo para funcionamento em vácuo.	39
Figura 39 - Fim de curso com sensor capacitivo incorporado, <i>render 3D</i> .	39
Figura 40 - Sistema de bloqueio para eixo X e Y simplificado, <i>render 3D</i> .	40
Figura 41 - Sistema de bloqueio para eixo X e Y simplificado, <i>render 3D</i> .	40
Figura 42 - Vista em corte do sistema de bloqueio, eixo Z, <i>render 3D</i> .	40
Figura 43 - Sistema de bloqueio do eixo Z, <i>render 3D</i> .	40
Figura 44 - Conexões plataforma de impressão, <i>render 3D</i> .	41
Figura 45 - Plataforma de impressão, <i>render 3D</i> .	41
Figura 46 - Aquecedor de Poli-imida [48].	42
Figura 47 - Aqueceder de Poli-imida na plataforma de impressão, <i>render CAD</i> .	42
Figura 48 - Permutador de calor, <i>render CAD</i> .	43
Figura 49 - Permutador de calor, <i>render CAD</i> .	43
Figura 50 - Heatbreak e permutador de calor, <i>render 3D</i> .	44
Figura 51 - Heatbreak, <i>render 3D</i> .	44
Figura 52 - Tensão limite elástica de ligas de alumínio [50].	45

Figura 53 - Tensão limite elástica do latão e alumínio [50].....	45
Figura 54- Tensão limite elástica do cobre e alumínio [50].....	45
Figura 55- Tensão limite elástica do aço e alumínio [50].....	45
Figura 56 - Bloco de aquecimento <i>render 3D</i> .....	46
Figura 57 - Bloco de Aquecimento, <i>render 3D</i> . ....	46
Figura 58 - Bico extrusor [51]. ....	47
Figura 59 - Extrusor, <i>render 3D</i> . ....	47
Figura 60 - Alimentador, vista em corte, <i>render 3D</i> .....	48
Figura 61 - Alimentador, <i>render 3D</i> .....	48
Figura 62 - Motor passo a passo <i>Arun Microelectronics</i> . ....	49
Figura 63 - Motor passo a passo e alimentador, <i>render 3D</i> .....	49
Figura 64 - Conetor de componentes eixo X, <i>render 3D</i> .....	50
Figura 65 - Conetor de componentes eixo X, <i>render 3D</i> .....	50
Figura 66 - Extrusor e alimentador, montados no eixo X, <i>render 3D</i> .....	50
Figura 67 - Extrusor e alimentador, <i>render 3D</i> .....	50
Figura 68 - Comparação entre painel infravermelho e tubos de quartzo. ....	51
Figura 69 - Constituição dos painéis infravermelhos.....	51
Figura 70 - Painéis infravermelhos. ....	51
Figura 71 - Impressora e painéis infravermelhos, <i>render 3D</i> . ....	51
Figura 72 - Impressora e painéis infravermelhos, <i>render 3D</i> . ....	51
Figura 73 - Esquema ligações elétricas.....	52
Figura 74 - Diagrama de controlo em malha fechada. ....	53
Figura 75- Configuração simplificada do hardware da impressora 3D.....	54
Figura 76 - Vista em corte do Extrusor.....	57
Figura 77- Dados após simulação.....	58
Figura 78 - Perfil de velocidade trapezoidal. ....	60
Figura 79 - Perfil de velocidades triangular.....	61
Figura 80 - Perfil de velocidades triangular.....	64
Figura 81 - Comparação entre perfil S-curve e trapezoidal [54].....	67
Figura 82 - Forças aplicadas nos patins lineares.....	68
Figura 83 - Momentos aplicados nos patins lineares. ....	68
Figura 84 - Distância do centro de massa e do motor linear ao patim. ....	69
Figura 85 - Distância do centro de massa e do motor linear ao patim. ....	69
Figura 86 -Distância do centro de massa e do motor linear ao patim. ....	69
Figura 87 - Forças aplicadas nos patins dos guias lineares. ....	70
Figura 88 - Momentos aplicados nos patins dos guias lineares. ....	70
Figura 89 - Distância do centro de massa ao patim linear da guia linear do eixo Y. ....	71
Figura 90 - Distância centro de massa ao patim da guia linear, nos eixos X e Z. ....	72
Figura 91 – Distância, nos eixos Z e Y, do centro de massa ao patim da guia linear. ....	72
Figura 92 – Distância máxima, nos planos X e Y, entre os patins das guias lineares. ....	73
Figura 93 - Distância, nos planos Z e X, entre os patins da guia lineares. ....	73
Figura 94 - Distância, nos planos Z e Y, entre os patins das guias lineares.....	74
Figura 95 - Vista em corte, superfície apoiada/fixa durante o transporte. ....	77
Figura 96 - Referencial usado na simulação. ....	77
Figura 97 - Travão para guia linear [56]. ....	78
Figura 98 - Forças aplicadas nos suportes dos motores lineares, vista 1, <i>render 3D</i> .....	79
Figura 99 - Forças aplicadas nos suportes dos motores lineares, vista 2, <i>render 3D</i> .....	79
Figura 100 - Mangueira S145/S245 [58]. ....	93
Figura 101 – Cobre e testes realizados. ....	94
Figura 102 - Prata a Silicon e testes realizados.....	94
Figura 103 - Testes Alumina. ....	94

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Etapas gerais no processo de fabrico. Imagens do processo de FDM. ....	10
Tabela 2 - Características AMF. Adaptado de [21]. ....	12
Tabela 3 - Processos de fabrico aditivo. ....	13
Tabela 4 – Especificações para impressora 3D. ....	23
Tabela 5 – Blocos funcionais do extrusor.....	29
Tabela 6 - Matriz Morfológica .....	30
Tabela 7 - Compatibilidade galvânica metais.....	33
Tabela 8 -Corrosão por oxigénio atómico de alguns polímeros e metais [41].....	34
Tabela 9 - Modelo Guia e Bloco Linear. ....	41
Tabela 10 - Especificações para o aquecedor da plataforma de impressão .....	43
Tabela 11 - Especificações Resistência Extrusor .....	47
Tabela 12 - Componentes do Alimentador.....	49
Tabela 13 - Especificação motor passo a passo.....	50
Tabela 14 - Especificações motores lineares .....	59
Tabela 15 - Componentes do eixo X em movimento .....	60
Tabela 16 - Componentes do eixo Y em movimento. ....	62
Tabela 17 - Componentes do eixo Z.....	63
Tabela 18 -Forças aplicadas no patim linear do eixo X.....	68
Tabela 19 - Distância do motor linear e do centro de massa ao patim do guia linear.....	69
Tabela 20 - Bloco para guia linear selecionado.....	70
Tabela 21 – Forças aplicadas no patim do eixo Y, devido à massa de 1.100 kg. ....	71
Tabela 22 - Distância dos centros de massa aos patins lineares .....	72
Tabela 23 - Forças nas guias lineares do eixo Y.....	73
Tabela 24 - Distâncias entre os patins lineares dos eixos X e Y.....	74
Tabela 25 – Distância entre patim linear do eixo Y e centro de massa. ....	74
Tabela 26 - Momentos totais nos patins do eixo Y.....	75
Tabela 27 – Características do patim selecionado. ....	75
Tabela 28 - Acelerações verificadas durante eventos críticos do voo [55].....	76
Tabela 29 - Resultados do estudo de tensões para as acelerações de lançamento. ....	77
Tabela 30 - Resultado do estudo de tensão para as forças de impressão .....	79
Tabela 31 - Ligas com elevada resistência à corrosão por tensão, <i>ECSS-Q-ST-70-36C</i> .....	91
Tabela 32 - Ligas com elevada resistência a corrosão por tensão, <i>ECSS-Q-ST-70-36C</i> .....	92
Tabela 33 - Material dos componentes do motor passo a passo .....	93
Tabela 34 - Corrosão por oxigénio atómico de alguns polímeros [61].....	95
Tabela 35 - Lista de Componentes Impressora.....	99
Tabela 36 - Lista de Componentes Impressora (Continuação) .....	101
Tabela 37 - Componentes do Alimentador.....	101
Tabela 38 - Componentes do Extrusor .....	103



## Siglas e Acrónimos

ABS - *Acrylonitrile butadiene styrene*  
AMF - *Additive Manufacturing Facility*  
BJ - *Binder Jetting*  
CAD - *Computer-Aided Design*  
CSA - *Canadian Space Agency*  
CIT – *Centro de Interface tecnológico*  
DED - *Directed Energy Deposition*  
DLP - *Digital Light Processing*  
DMD - *Direct Metal Deposition*  
DOD - *Drop on Demand*  
DPS - *Desenvolvimento de Produtos e Sistemas*  
EBAM - *Electron-Beam Additive Manufacturing*  
EBM - *Electron Beam Melting*  
ECSS- *European Cooperation for Space Standardization*  
EEI - *Estação Espacial Internacional*  
ESA - *Agência Espacial Europeia*  
HDPE - *High-Density Polyethylene*  
JAXA *Japan Aerospace Exploration Agency*  
JEM-RMS - *Japanese Experiment Module Remote Manipulator System*  
LENS - *Laser Engineered Net Shaping*  
LOM - *Laminated Object Manufacturing*  
MAPTIS - *Materials and Processes Technical Information System*  
MJ - *Material Jetting*  
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*  
FDM - *Fused Deposition Modeling*  
FFF - *Fused Filament Fabrication*  
FOPDT - *First Order Plus Dead-Time*  
OTB – *Órbita Terrestre Baixa*  
PC - *Polycarbonate*  
PEEK - *Polyether Ether Ketone*  
PEKK - *Polyetherketoneketone*  
PETG - *Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified*  
PEI – *Polyethylenimine*  
PID - *Proporcional Integral Derivativo*  
PLA - *Polylactic Acid*  
SLA - *Stereolithography*  
SLM - *Selective Laser Melting*  
SLS - *Selective Laser Sintering*  
ULTEM – *Polyetherimid*



## **1 Introdução**

Neste capítulo faz-se uma introdução e um enquadramento ao tema da presente dissertação, aos objetivos a atingir, ao método seguido e à organização da mesma.

### **1.1 Enquadramento do projeto e motivação**

Durante o processo de fabrico aditivo é depositado material, camada sobre camada, em formas geométricas precisas para criar um objeto. Os processos disponíveis têm a capacidade de produzir peças com características mecânicas e físicas que competem e, em alguns casos, superam as peças produzidas os processos tradicionais - com a vantagens da rapidez, poupança de matéria prima e não necessidade de ferramentas especializadas que o processo de fabrico aditivo tem.

A polivalência deste processo leva a que já se encontre a bordo da ISS uma impressora 3D, localizada no espaço interior pressurizado. Dado que o volume do dispositivo e, conseqüentemente, o tamanho das peças que pode fabricar é limitado pela necessidade de um ambiente pressurizado, propôs-se a conceção de uma impressora 3D, de alto rendimento, habilitada para operar em vácuo. Além da capacidade de operar num ambiente de vácuo e microgravidade, pretende-se também que a impressora 3D consiga imprimir toda a gama de materiais polímeros de engenharia e alto rendimento disponíveis – limitação da impressora atualmente localizada na Estação Espacial Internacional.

Durante a fase do projeto, além de encontrar soluções para ultrapassar os desafios que o ambiente de microgravidade e vácuo proporciona, tiveram-se também em conta as condições da Órbita Terrestre Baixa (OTB) e as normas aplicadas pelas agências espaciais, de forma a ter um dispositivo certificado para operar no ambiente em questão.

Esta dissertação desenvolveu-se no Departamento de Desenvolvimento de Produto e Sistemas (DPS) do INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. O INEGI 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. Tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral, através da inovação de base científica e tecnológica.

## **1.2 Objetivos do projeto**

Com esta dissertação propõe-se a conceção de uma impressora 3D capaz de fabricar num ambiente de vácuo e de microgravidade - características da Órbita Terreste Baixa - local onde se encontra a Estação Espacial Internacional.

Deste modo, pretende-se:

1. Conhecer o ambiente destinado ao dispositivo de fabrico aditivo;
2. Selecionar um processo de fabrico aditivo adaptável ao ambiente em questão;
3. Expor as limitações que este ambiente impõe ao processo de fabrico aditivo;
4. Expor as oportunidades que este ambiente traz ao processo de fabrico aditivo;
5. Conhecer as normas aplicáveis pelas agências espaciais;
6. Dimensionar um dispositivo de fabrico aditivo de alto rendimento;
7. Selecionar componentes capazes de operar no meio ambiente em questão.

## **1.3 Método seguido no projeto**

A metodologia adotada passou, inicialmente, pela abordagem teórica do processo de fabrico na Estação Espacial Internacional e das condições ambientais da OTB. Depois de selecionado o processo, realizou-se uma abordagem prática à impressão 3D, no laboratório do DPS, de forma a entender o papel e o funcionamento de todos os constituintes de uma impressora 3D e do seu papel no processo de impressão. De seguida, escolheram-se as especificações para que fosse possível fabricar peças em todos os materiais polímeros de engenharia e alto rendimento disponíveis para o processo. Também, durante a escolha das especificações, teve-se em conta o ambiente do meio e as restrições impostas pela EEI. Por fim, tendo por base as condições do meio, as normas aplicáveis e as especificações pretendidas, projetaram-se componentes, selecionaram-se materiais e possíveis fornecedores para os mesmos.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. Neste capítulo é feita uma breve introdução à dissertação.

No capítulo dois é feita uma contextualização teórica da Estação Espacial Internacional, do processo de fabrico aditivo e da sua utilização para o fabrico de componentes. São selecionados processos possíveis de adaptação ao ambiente em questão e também apresentadas algumas patentes.

De seguida, é selecionado o processo de fabrico aditivo, e, tendo em conta as características pretendidas e o ambiente destinado, são escolhidas as especificações para o dispositivo de fabrico, feita a análise funcional e dada uma explicação acerca dos blocos lógicos constituintes.

Logo após, com base nas normas aplicáveis e nas especificações pretendidas, são escolhidos os componentes do dispositivo de fabrico aditivo, os materiais constituintes e potenciais fornecedores. No capítulo seguinte, cinco, é feita uma verificação matemática para a escolha de componentes e outras questões relevantes.

Por fim, no capítulo seis são extraídas conclusões sobre o projeto realizado e apresentados trabalhos futuros que valorizarão ainda mais o processo de impressão 3D em órbita.



## 2 Estado da arte

Neste capítulo faz-se uma introdução bibliográfica aos tópicos considerados importantes, nomeadamente, a Estação Espacial Internacional, tecnologias e processos de fabrico aditivo e patentes. Deste modo, adquire-se conhecimento, para que em fases posteriores do projeto, se façam escolhas tendo em conta toda a informação relevante.

### 2.1 Estação Espacial Internacional

A Estação Espacial Internacional (EEI) é o maior veículo modular espacial fabricado pelo ser humano. Situado na Órbita Terrestre Baixa, representa um grande feito de engenharia que tem evoluído ao longo das duas décadas. Os seus componentes foram construídos em diferentes países espalhados por todo o mundo. A coordenação necessária para obter uma estrutura funcional num ambiente espacial, sem a possibilidade de uma montagem completa em Terra, permitiu adquirir múltiplos conhecimentos, no que diz respeito à construção de sistemas extremamente complexos e de grandes dimensões. Com um peso de 420 toneladas e um comprimento de 109 m, a estação tem aproximadamente 900 metros cúbicos de espaço pressurizado, capaz de acolher seis tripulantes. Este consórcio internacional, que serve de modelo para outras cooperações internacionais, é constituído por diferentes agências espaciais. As principais agências são a NASA (EUA), ESA (Europa), Roscomos (Rússia), JAXA (Japão) e CSA (Canadá). Embora cada parceiro da ISS tenha objetivos de investigação distintos, o objetivo unificado é o de alargar o conhecimento recolhido em benefício de toda a humanidade [1]–[4].

A EEI, como plataforma científica, recebeu mais de 2500 projetos de investigação de mais de 100 países, tendo sido publicados mais de 2100 artigos científicos em diversos campos da ciência, como se pode observar na figura 1. À medida que estes novos conhecimentos começam a moldar investigações e inovações tecnológicas em Terra, novos produtos comerciais e novas linhas de investigação começam a ser explorados - todas elas demonstrando

como a investigação em ambiente espacial e as suas características únicas de microgravidade podem melhorar as nossas vidas na Terra [5], [6].

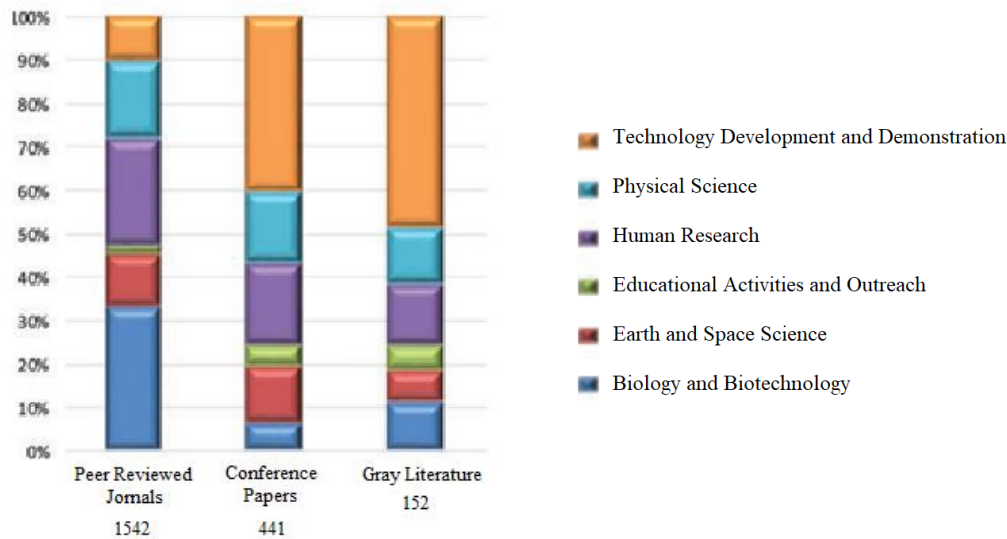


Figura 1- Publicações com parceria da EEI, até 31 Maio 2018 [1].

Subsequentemente, a realização económica da estação espacial foi conseguida através do aproveitamento das suas capacidades técnicas e através da mudança dos mecanismos de contratação que deram origem a novas empresas, patentes e produtos[1]. A alteração nos processos contratuais permitiu parcerias público-privadas, em que empresas como a *SpaceX* e *Orbital* investiram no mercado aeroespacial para o desenvolvimento de novas tecnologias e sistemas. Um exemplo positivo desta parceria é a redução no custo de colocar material em órbita, que nos anos 2000 rondava os 14880-18600€/kg, passando para aproximadamente 2230€/kg e 1400€/kg com o *Falcon9* e *Falcon Heavy*, respetivamente. Esta redução abre portas a mais participações no mercado espacial tais como o turismo espacial, fabrico espacial e outros novos serviços, que aumentam a probabilidade de criar um negócio realista com uma rentabilidade sustentada.

Inúmeras empresas comerciais estão a desenvolver, operar e manter as suas próprias instalações interna e externamente na EEI. Estes tipos de investimentos privados levaram a uma redução de um terço no custo de pesquisa na estação espacial, o que melhora a acessibilidade do espaço a novos investigadores e instituições [1].

No interior da EEI existem quatro locais onde são levadas a cabo pesquisas científicas: módulo *ESA Columbus*; *JAXA Kibo*; *U.S. Destiny* e módulo russo *Zvezda*. No exterior podem também ser realizadas experiências expostas ao ambiente espacial no *European Columbus Research Laboratory* - figura 2, *U.S. Truss* e *Japanese Exposed Facility* – figura 3 [7].

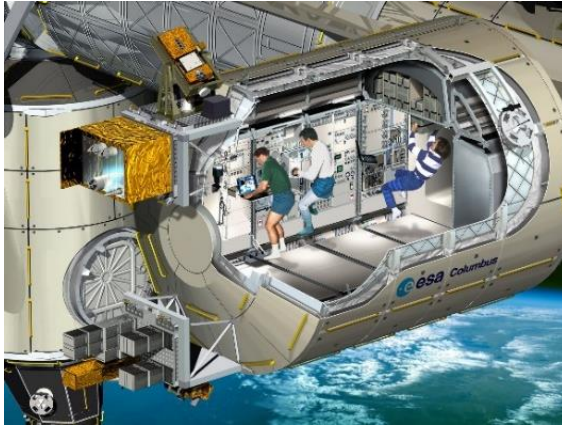


Figura 2- Laboratório Columbus [8].



Figura 3- Laboratório Kibo [9].

Concluindo, a exploração espacial requer inovação, que resulta em descobertas e benefícios para a humanidade. A inovação cria novas tecnologias e novas descobertas resultam em novos conhecimentos e, ambas criam oportunidades económicas que fornecem infraestruturas que permitem continuar com novas explorações [1].

## 2.2 Características da Órbita Terrestre Baixa

A estação espacial encontra-se a uma altitude média de, aproximadamente, 400km, na Órbita Terrestre Baixa [10]. Este ambiente é caracterizado por diversas condições e fatores:

- Vácuo: o elevado vácuo do espaço,  $10^{-6}$  Torr a  $10^{-9}$  Torr, causa o fenómeno de *outgassing* – libertação de gases que estão dissolvidos, presos ou absorvidos num certo material. A norma *ASTM E1559, Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of Spacecraft Materials*, dá indicações acerca deste fenómeno [6];
- Oxigénio atómico: produzido quando a radiação UV, com comprimento de onda curto, reage com moléculas de oxigénio na atmosfera. É o fator mais significativo na degradação de materiais. Oxida diversos metais e reage com materiais que contenham nitrogénio, enxofre, hidrogénio e ligação carbono. A norma *ASTM E2089, Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications*, deve utilizar-se para selecionar materiais resistentes a este fenómeno [6];
- Radiação ultravioleta, radiação ionizante e plasma: estes tipos de radiação poderão causar danos a superfícies expostas e componentes eletrónicos[6];
- Ciclos térmicos: à medida que a EEI entra e sai da zona de exposição solar, durante sua órbita ao redor da Terra, esta sofre variações de temperaturas extremas. Ocorrem dezasseis ciclos térmicos por dia (órbita à Terra em aproximadamente 92 minutos) com variações de temperaturas que vão dos  $-120$  °C até  $+120$  °C [6];

- Impacto de micrometeoritos e lixo espacial: todas as áreas da estação podem ser atingidas por micrometeoritos que viajam a mais de 60 km/s, assim como lixo espacial a 10 km/s. Detritos espaciais de elevadas dimensões são rastreados para que a estação possa realizar manobras de prevenção para os evitar, não havendo, no entanto, maneira de evitar impactos de pequenos detritos [6].

## 2.3 Fabrico Aditivo

A norma ISO/ASTM 52900 define fabrico aditivo como um processo que une materiais para criar peças, a partir de dados de um modelo 3D, camada sobre camada - em oposição às técnicas de fabrico subtrativo.

A esmagadora maioria das máquinas de fabrico aditivo atualmente existentes utilizam este processo de construção de camada a camada, variando nos materiais que podem ser utilizados e na forma como as camadas são criadas e unidas entre si. Tais diferenças influenciam a precisão, propriedades mecânicas, tempo de impressão, pós-processamento e custo da peça fabricada. [11], [12].

Cada camada, é uma secção transversal da peça e tem uma espessura finita, sendo portanto uma aproximação do modelo original [11], [12]. Quanto menor a espessura de cada camada, melhor a qualidade superficial da peça e mais próxima a peça estará do seu modelo CAD [11]. Na figura 5 e 6 podem observar-se as diferenças entre uma altura de camada de 0,12 mm e uma altura de camada de 0,32 mm.

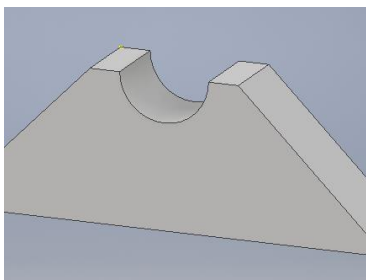


Figura 4- Modelo CAD.



Figura 5- Altura da camada de 0,12 mm.

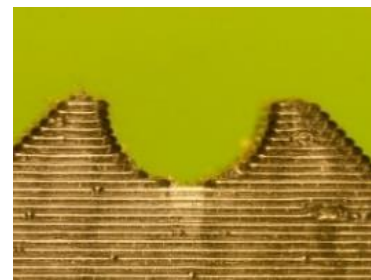


Figura 6-Altura da camada de 0,32 mm.

Durante o processo de construção, a nova camada é suportada pela camada fabricada anteriormente e, portanto, se o modelo possuir um elemento que não é suportado pela camada anterior, em algumas técnicas de fabrico aditivo, é necessário o uso de suportes estruturais para garantir suporte para a nova camada – figura 8. A figura 7 mostra a mesma peça fabricada sem o uso de suportes. Os suportes estruturais removem-se no pós processamento da peça [13].



Figura 7 - Peça sem suportes estruturais.



Figura 8 - Peça com suportes estruturais.

As primeiras tecnologias de impressão 3D exibiam baixos níveis de detalhe e acabamento, os materiais disponíveis apresentavam fracas propriedades mecânicas e o processo era dispendioso e lento. Estes fatores levaram a que esta tecnologia fosse apenas usada para prototipagem rápida e não para a criação de produtos finais. No entanto, permitia a materialização de modelos CAD complexos e, conseqüentemente, facilitava a análise de determinados detalhes do produto antes deste entrar em produção [12], [14].

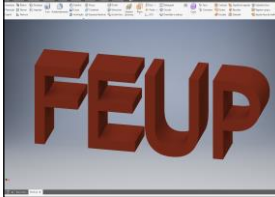
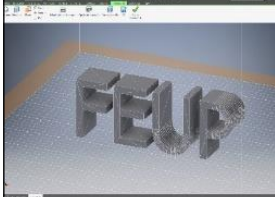
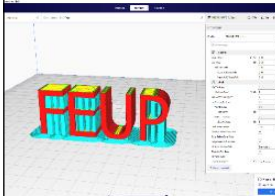

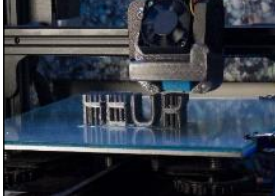



Com o passar do tempo, o custo de impressão começou a baixar e, novas tecnologias e materiais começaram a surgir, de tal forma que as peças produzidas puderam começar a ser usadas como peças finais, dando origem ao termo fabrico rápido. Garantindo as mesmas propriedades mecânicas que uma peça fabricada por processo tradicional de fabrico, é possível produzir peças com formas e geometrias que, de outro modo, são mais trabalhosas de conseguir, sendo esta umas das vantagens do processo de fabrico aditivo [12]. A figura 9 demonstra as diferenças entre peças com mesmo propósito, uma fabricada por um processo tradicional e outro por um processo de fabrico aditivo.



Figura 9- Processo tradicional *versus* Processo fabrico aditivo [12].

Para o fabrico aditivo de uma peça são, geralmente, seguidos os seguintes passos:

Tabela 1 - Etapas gerais no processo de fabrico. Imagens do processo de FDM.

<p><b>Passo 1: CAD</b> - Todas as peças fabricadas por processos aditivos devem ser desenvolvidas através de um modelo de software 3D. Para isso pode ser usado qualquer programa de modelação de sólidos CAD. Equipamentos de engenharia reversa, tais como laser scanners, também podem usar-se para criar o modelo 3D [11]</p>	
<p><b>Passo 2: Conversão para STL</b> - O formato STL (Standard Triangle Language) é o formato padrão da indústria para Impressão 3D. Este ficheiro, através do uso de triângulos, descreve as superfícies externas do modelo CAD e forma a base para o cálculo das diversas camadas da peça. A exportação para o ficheiro STL pode fazer-se na maior parte dos softwares CAD modernos [15].</p>	
<p><b>Passo 3: Manipulação ficheiro STL</b> - É necessário transformar o ficheiro STL num ficheiro G.Code de modo a que possa ser lido pelo dispositivo de fabrico aditivo. Pode haver manipulação do ficheiro de forma a alterar o tamanho, orientação e posição da peça. Parâmetros de construção tais como: espessura da camada, temperatura do processo, espessura de parede, entre outros, são escolhidos nesta etapa [15].</p>	
<p><b>Passo 4: Setup máquina</b> - É necessário preparar a máquina para o processo de fabrico aditivo. A preparação envolve: o preaquecimento do dispositivo de fabrico, a transferência do ficheiro G.Code para a máquina, o carregamento de matéria prima e um check-up geral para ter a certeza que esta está pronta para levar a cabo o processo de fabrico aditivo [15].</p>	
<p><b>Passo 5: Construção da peça</b> - A construção da peça é um processo automatizado que se realiza sem uma supervisão exigente. Apenas é necessária uma supervisão esporádica para garantir que não ocorrerem quaisquer erros, tais como falhas de software, energia ou problemas relacionados com a falta de matéria prima [11].</p>	
<p><b>Passo 6: Remoção da peça</b> - Depois do processo concluído é necessário remover a peça da plataforma de impressão. É aconselhável garantir que não existem componentes da máquina em movimento e que as temperaturas são seguras para o utilizador [11].</p>	
<p><b>Passo 7: Pós processamento peça</b> - Depois da peça removida podem ser necessários processos de pós-processamento, tais como, por exemplo, a limpeza da peça e remoção dos suportes estruturais [11].</p>	
<p><b>Passo 8: Aplicação</b> - A peça pode, finalmente, ser usada para o fim que foi projetada.</p>	

## 2.4 Fabrico Aditivo na Estação Espacial Internacional

Atualmente, os astronautas a bordo da Estação Espacial Internacional dependem de missões de reabastecimento para o transporte de peças e ferramentas provenientes da Terra, existindo por vezes um tempo de espera de semanas ou meses. Dado que este modelo não contempla o fabrico e reparo sob demanda nem a reciclagem de consumíveis, a manutenção dos componentes presentes na EEI é exigente e existe uma baixa eficiência de *sparing* (95% das peças sobressalentes disponíveis nunca serão utilizadas).

Um estudo feito pela NASA analisou as falhas de diferentes componentes na estação espacial e, concluiu que 82% dos componentes são possíveis de produzir por processos de fabrico aditivo. Desses 82%, 28,6 % consistem em plásticos ou compósitos que podem fabricar-se através de processos aditivos de extrusão, figura 10 [16].

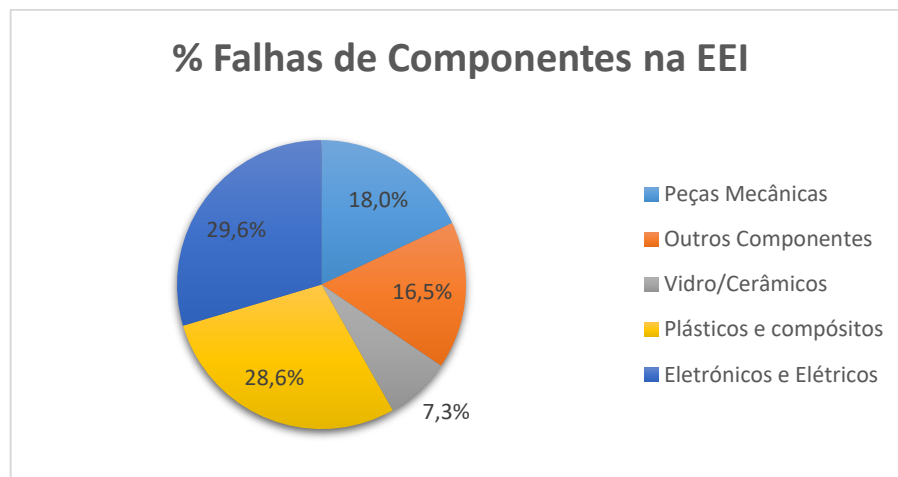


Figura 10- Falha de Componentes na ISS. Adaptado de [16].

O fabrico aditivo pode fornecer uma solução sustentável e flexível através do fabrico e reparo sob demanda, que proporciona uma redução significativa do risco devido à diminuição da dependência de peças sobressalentes. A redução da massa transportada também reduz os custos de lançamento.

Para aumentar o rendimento da matéria prima usada neste processo de fabrico aditivo, estão a estudar-se processos, para uso na EEI, capazes de transformar peças fabricadas por processos aditivos novamente em matéria prima [17]–[20].

O fabrico aditivo em ambiente espacial pode levar também a uma mudança de ideias e conceitos relativamente a este processo. Todas as estruturas e componentes que se situam no ambiente espacial foram construídas e lançadas para órbita a partir da Terra. Por vezes, o design destes componentes é limitado pela necessidade de sobrevivência às elevadas forças que ocorrem durante o lançamento do veículo espacial [18]. A ausência de gravidade poderá levar a novas técnicas de fabrico não disponíveis em Terra. Assim, o fabrico aditivo em ambiente

espacial não só traz vantagens para a EEI mas, serve também como banco de ensaio para o desenvolvimento desta tecnologia neste ambiente, que poderá ser usada em futuras viagens de exploração espacial [17].

Em março de 2016 foi lançada para a Estação Espacial Internacional um dispositivo de fabrico aditivo, *Additive Manufacturing Facility* (AMF), capaz de fabricar hardware a bordo da estação [21], [22]. A impressora a bordo é do tipo *Fused filament fabrication* (FDM)/*Fused filament fabrication* (FFF), pode ser operada local e remotamente a partir da Terra e é capaz de imprimir vários materiais polímeros [21], [22].

Na tabela 2 encontram-se as principais características deste dispositivo.

Tabela 2 - Características AMF. Adaptado de [21].

Característica de impressão	
Volume de Impressão	140 mm largura x 100 mm comprimento x 100 mm altura
Materiais	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (ABS), <i>High-density polyethylene</i> (HDPE), <i>Polyetherimide e Polycarbonate</i> (PEI+PC)
Resolução X/Y	0,025-0,440mm; Nominal: 0,150 mm
Resolução Z	Altura de camada mínima de 0,075 mm
Espessura mínima paredes	1,00 mm
Furos roscados	>M10
Temperaturas	
Temperatura extrusor:	180°C a 375°C
Cama aquecida	Sim
Volume aquecido	Sim
Características da impressora	
Dimensões	566,50 mm x 460,40 mm x 273,20 mm
Peso	45kg na Terra
Chassi	Alumínio maquinado
Fixação	<i>ISS Express Rack</i>
Tipo impressora	Fused filament fabrication (FFF) Fused filament fabrication (FDM)
Energia	
Input:	28V DC @12A
Outras características	
Monotorização do <i>status</i> de impressão e vídeo em tempo real	
Filtro de nanopartículas e de gases tóxicos	
Componentes modulares podem ser removidos apenas com uma mão	
Concebida para durar toda a vida da estação internacional espacial	
Construída para suportar a descolagem do vaivém espacial	

Ao contrário do dispositivo de impressão que atualmente se encontra na EEI, a impressora apresentada nesta dissertação é capaz de imprimir num ambiente de vácuo. A não necessidade de um ambiente pressurizado possibilita volumes de impressão muito maiores e representa uma poupança de espaço no habitáculo pressurizado da estação. Este trabalho é um precursor de outros equipamentos mais ambiciosos, onde os volumes de trabalho são maiores, com a capacidade de produzirem estruturas sem restrições de espaço, em pelo menos um eixo. No entanto, para peças de dimensões mais reduzidas, onde a precisão dimensional e acabamento são fatores fundamentais, uma solução tradicional de fabrico aditivo, possivelmente, trará melhores resultados.

## 2.5 Processos aptos para adaptação ao ambiente da EII

De uma forma resumida, e de acordo com a norma ISO/ASTM 52900, os diferentes processos de fabrico aditivo podem ser divididos da seguinte maneira:

Tabela 3 - Processos de fabrico aditivo.

Processo	Descrição	Exemplos	Materia Prima
Material Extrusion	Um semilíquido é extrudido através de um <i>nozzle</i> de forma a criar camadas sucessivas de um objeto	Fused filament fabrication (FFF); Fused filament fabrication (FDM)	Filamento
Vat Photopolymerization	Um laser de luz solidifica camadas sucessivas, até criar um objeto, de um líquido foto polímero que se encontra num “vat”	Stereolithography (SLA) Digital light processing (DLP)	Resina
Material Jetting	Uma cabeça de impressão deposita gotas de uma resina que posteriormente são curadas por uma luz ultravioleta ou por ação de calor	Material Jetting (MJ); Drop on Demand (DOD)	Resina
Binder Jetting	Uma cabeça de impressão deposita um aglutinante em camadas sucessivas de um pó	Binder Jetting (BJ)	Resina +Partículas de Pó
Powder Bed Fusion	Um laser ou outra fonte de calor funde seletivamente sucessivas camadas de partículas de pó	Selective laser sintering (SLS) Selective laser melting (SLM) Electron Beam Melting (EBM)	Partículas de Pó
Direct Energy Deposition	Um laser ou outra fonte de calor funde a matéria prima à medida que estes são depositados.	Laser Engineered Net Shaping (LENS); Electron-beam additive manufacturing (EBAM)	Partículas de Pó ou Fio Metálico
Sheet Lamination	Folhas do mesmo material são unidas através de soldadura ou por meio de um adesivo	Laminated object manufacturing (LOM)	Papel, Plástico ou Metal

O ambiente onde se encontra a ISS caracteriza-se pela ausência de gravidade e por um elevado vácuo. Assim, o processo escolhido tem de ser passível a adaptação para este ambiente.

Os processos de *Vat Photopolymerization*, *Material Jetting*, *Binder Jetting* e *Powder Bed Fusion*, devido às características de funcionamento do processo e ao tipo de material usado como matéria prima, não podem ser usados neste ambiente. A resina devido ao fenómeno de *outgassing* e as partículas de pó devido à ausência de gravidade que é necessária para as imobilizar.

As peças provenientes do processo de fabrico devem ter características físicas e mecânicas que possam substituir peças produzidas por processos de fabrico convencionais. O processo DED é capaz de imprimir uma grande gama de materiais - aço inoxidável, aços ferramenta, níquel, cobalto e titânio. As peças apresentam boas propriedades mecânicas, elevada resistência e ductilidade. Este processo é capaz de reparar componentes já fabricados (por fabrico aditivo ou fabrico convencional) e não necessita do uso de suportes estruturais, uma vez que as máquinas apresentam até cinco eixos de liberdade e a matéria prima é depositada na peça através de uma cabeça de impressão [23], [24]. As peças fabricadas por este processo apresentam pobre acabamento superficial e tolerâncias baixas. Embora possa ser implementado como um processo independente de fabrico, costuma utilizar-se uma abordagem híbrida, que passa pela adição e subtração de material às peças [25].

O processo de *Material Extrusion*, é um processo capaz de fabricar peças em diferentes tipos de polímeros - *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), *Polylactic Acid* (PLA), *Polyethylene Terephthalate Glycol-modified* (PETG), *Polycarbonate* (PC), *Poly Ether Ketone* (PEEK), entre outros - apresenta boas tolerâncias dimensionais ( $\pm 0.5$  mm) e é capaz de produzir peças funcionais. A matéria prima é extrudida através de uma cabeça de impressão móvel e vem na forma de filamento. É de fácil utilização e não necessita de pós processamentos extensos ou complexos.

### **2.6.1 Directed Energy Deposition (DED)**

O processo DED usa uma fonte de energia - laser, feixe de eletrões ou arco elétrico - para derreter o material que é adicionado à peça. O material é derretido ao mesmo tempo que é depositado pela cabeça de impressão. A matéria prima pode vir na forma de partículas de pó ou fio metálico. No caso de sistemas que usam feixes de eletrões, o processo ocorrer numa atmosfera de vácuo para impedir a oxidação dos metais. Sistemas baseados em laser requerem uma câmara totalmente inerte. Em alternativa, em processos onde são usadas partículas de pó,

estas podem ser depositadas em conjunto com um gás inerte, diminuindo deste modo, a taxa de oxidação. Esta tecnologia é frequentemente referida por outros nomes, tais como *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*, *Direct Metal Deposition (DMD)*, *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*, entre outros, dependendo da aplicação ou método [26], [27]. Nas figuras 11, 12 e 13 estão representados os processos referidos.

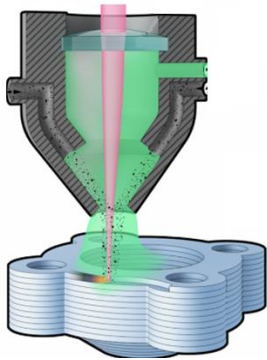


Figura 11- LENS [25].

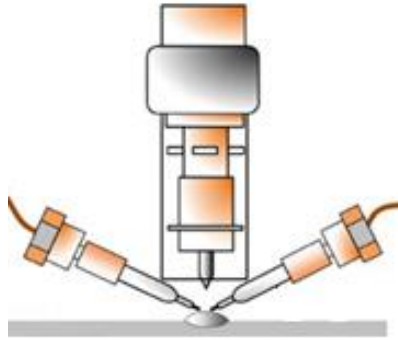


Figura 12-WAAM. Adaptado de [32].

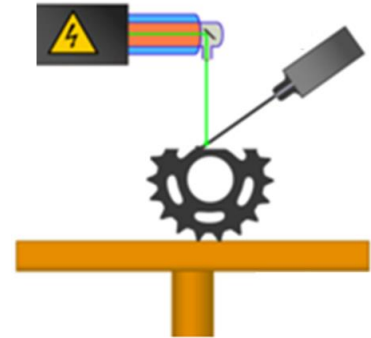


Figura 13- EB3F [28].

### 2.6.2 Fused Deposition Modelling (FDM)

A matéria prima deste processo vem na forma de filamento de matrizes poliméricas que, através do uso de um motor passo a passo, é impelido até à cabeça de impressão. A cabeça de impressão é aquecida a uma temperatura superior ao ponto de transição vítrea do material a ser usado, temperatura que pode variar dos 60°C até aos 420°C [25], [29]. Na cabeça de impressão o material é derretido e extrudado através de um bico de impressão. A cabeça de impressão move-se no eixo x e y e o material é depositado em sítios específicos ditados pelo modelo CAD, arrefecendo e solidificando, formando assim uma camada da peça – figura 14. Quando uma camada é terminada a plataforma móvel desce e o processo é repetido até se concluir a peça. [23], [30], [31]. Na figura 15 está uma impressora FDM.

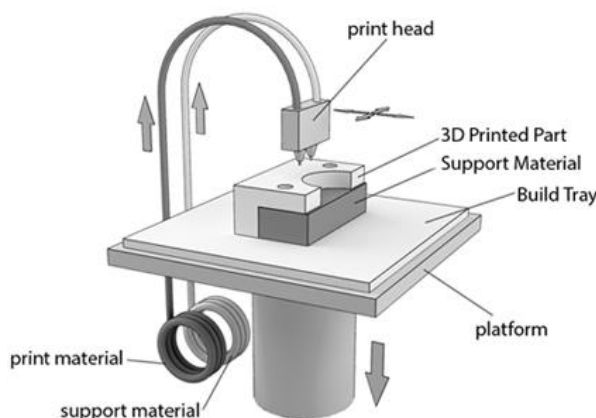


Figura 14- Processo FDM [32].

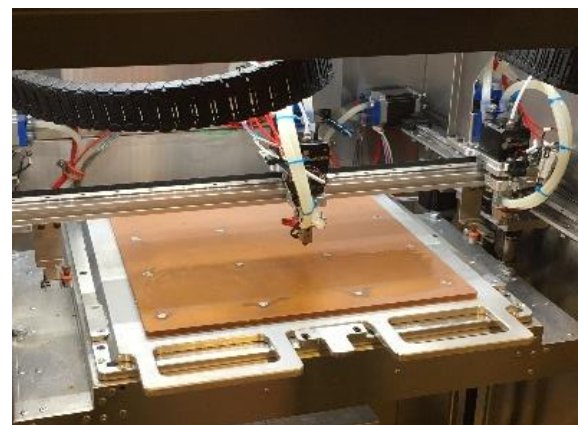


Figura 15 - Impressora FDM, AON M2.

Podem usar-se várias cabeças de impressão, sendo assim possível imprimir diferentes materiais ou cores na mesma peça. Também existem tecnologias capazes de extrudir diferentes materiais pelo mesmo bico extrusor [23].

É necessário usar suportes estruturais em peças que apresentem geometrias suspensas. Em impressoras que é possível imprimir dois tipos de material, os suportes podem ser impressos num material solúvel, sendo, deste modo, mais fácil de os remover, permitindo o fabrico de peças com geometrias mais complexas e com um melhor acabamento das partes suportadas [11], [30], [31].

Existe uma gama alargada de materiais polímeros que podem ser usados como matéria prima, dependendo da finalidade da peça, representados na figura 16.

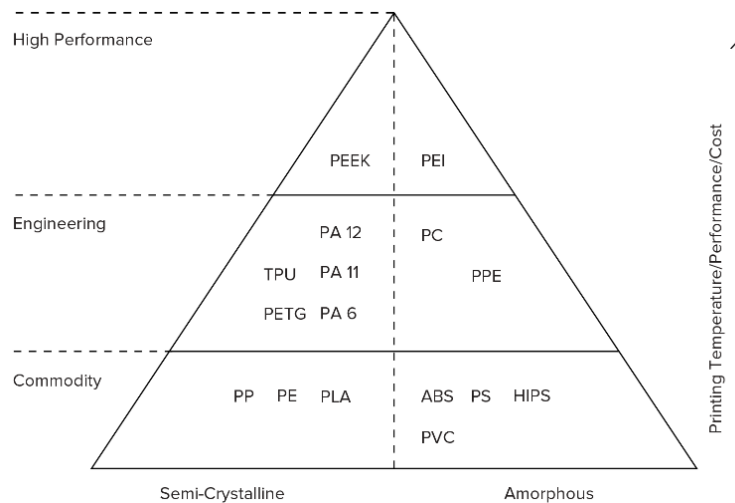


Figura 16- Materiais para impressão FDM [30].

PLA é um material biodegradável de baixo custo e facilidade de impressão sendo, consequentemente, dos materiais mais usados neste processo. Usa-se no fabrico de peças e protótipos com boa qualidade visual que não necessitem de suportar forças extremas e temperaturas acima dos 60°C.

ABS é também um material de baixo custo e bastante conhecido, sendo dos primeiros materiais a ser impressos. Com uma dificuldade de impressão ligeiramente superior ao PLA, apresenta melhor resistência ao choque, maior flexibilidade e resistência ao calor - temperaturas de serviço até 98°C.

Ainda na mesma gama de preços, PET e PETG combina a facilidade de impressão do PLA com as características mecânicas do ABS. É também seguro para uso na indústria alimentar e apresenta boa resistência química.

TPU permite o fabrico de peças semi-flexíveis. PA oferece a melhor combinação entre resistência, tenacidade e resistência ao impacto. PC é um material com alta resistência,

destinado a ambientes extremos, possui alta resistência ao impacto e calor - temperaturas de serviço até 140°C.

PEEK, PEKK, ULTEM são filamentos com elevada resistência mecânica e térmica, capazes de substituir peças metálicas, em algumas situações, devido ao seu rácio de peso/resistência. Atualmente, é o material disponível com melhores características mecânicas.

## 2.6 Patentes

De forma a ter conhecimento de invenções que trouxeram valor para o processo de fabrico aditivo e, de projetos que estão a ser desenvolvidos neste campo, consultaram-se algumas patentes.

### 2.7.1 3D Printing System With Vacuum Chamber Enclosure: US 2018/0178463

Esta patente refere-se a uma impressora 3D contida numa câmara de vácuo - onde o dispositivo de fabrico aditivo é configurado para fabricar componentes 3D – figura 17.

A realização deste processo num ambiente de vácuo apresenta algumas vantagens, tais como a redução de energia necessária para o processo e o fabrico de objetos com interior em vácuo. Com uma pressão menor, a temperatura de transição vítrea do filamento baixa e consequentemente a temperatura, potência e outros fatores podem ajustar-se, reduzindo a energia necessária.

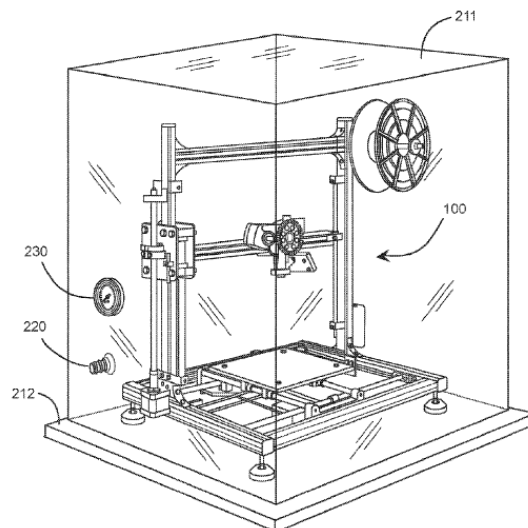


Figura 17 - Dispositivo de fabrico aditivo localizado no interior de uma câmara de vácuo.

No campo da medicina, biomateriais e implantes podem ser produzidos sem a presença de ar no interior e possíveis contaminantes, que de outra forma seriam prejudiciais para o paciente.

Estudos realizados apontam para uma melhor adesão entre camadas devido à maior retenção de calor na peça, uma vez que a transferência de calor por convecção é nula [33], [34].

### 2.7.2 High-Temperature Modeling Apparatus: US 6,722,872 B1

Esta invenção consiste numa impressora 3D que fabrica componentes numa câmara aquecida, figura 18. Os componentes eletrónicos, responsáveis pelo movimento das partes móveis da impressora, estão isolados da câmara aquecida de forma a que a temperatura da câmara aquecida não seja limitada pela temperatura máxima de funcionamento dos aparelhos eletrónicos [35].

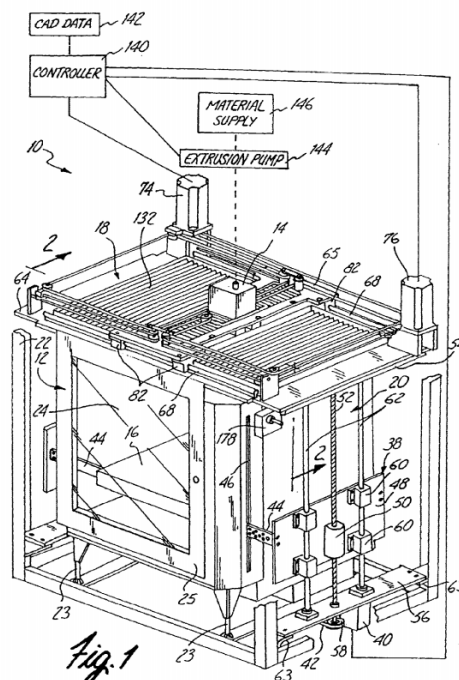


Figura 18 -Impressora 3D com câmara aquecida [35].

Permite a impressão de materiais que possuem alta temperatura de transição vítrea e, portanto, devem depositar-se numa câmara a alta temperatura para obter peças com boas características físicas e mecânicas. [35]. A detentora desta patente, *Stratasys Inc*, possui dispositivos de fabrico aditivo do tipo FDM que a utilizam para a produção de peças em PEEK, PC, ABS, PA e outros materiais [36].

### 2.7.3 Additive manufacturing of extended structures: US2015/0076732 A1

Este dispositivo de fabrico aditivo é constituído por mecanismo de deposição de material e um mecanismo de movimentação, que permite a construção de peças, além do

volume convencional de fabrico, figuras 19 e 20. Primeiramente é criada uma porção da peça e, de seguida, toda a estrutura de impressão move-se relativamente à parte fabricada, dando-se assim continuação ao fabrico da peça [37].

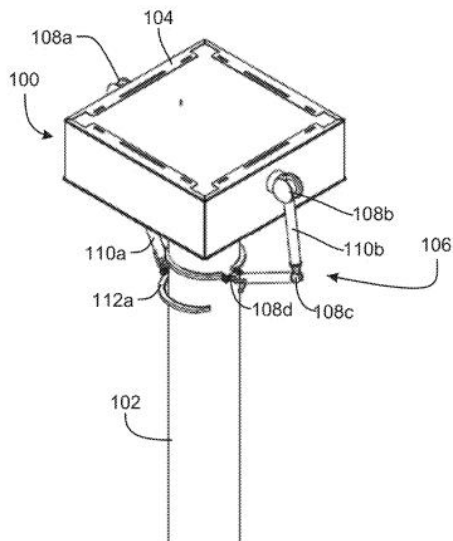


Figura 19- Dispositivo de fabrico, vista 1.

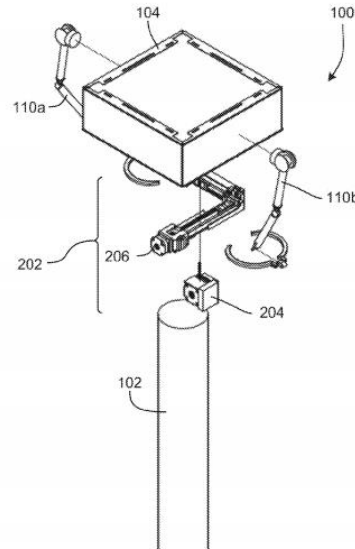


Figura 20- Dispositivo de fabrico, vista 2.

A *Made In Space, Inc*, proprietária desta patente, tem um projeto em desenvolvimento que contempla esta abordagem ao fabrico aditivo no espaço – *Archinaut*. Desenvolvida para funcionar em órbita, pensada para construir estruturas complexas, de tamanho ilimitado num eixo e, otimizadas para o ambiente espacial, através do uso de processos de fabrico aditivos cuja matéria prima são termoplásticos.



### 3 Projeto Conceptual

Depois de conhecidas as condições e o fim a que o dispositivo de impressão se destina, neste capítulo é escolhido o processo de fabrico e as especificações pretendidas para a impressora 3D. Além disso, faz-se a análise funcional ao dispositivo de fabrico e explicam-se os blocos funcionais constituintes.

#### 3.1 Seleção do processo de fabrico aditivo

Como descrito no capítulo dois, o processo FDM apresenta características interessantes para uso em ambiente espacial: é capaz de produzir peças funcionais com relativa facilidade, a matéria prima é de fácil manuseamento, existem diferentes tipos de matéria prima e, quando comparado com o DED, é um processo que requer menor energia e menor pós-processamento.

Apesar de requerer o uso de suportes, o material usado para tal, num futuro próximo, poderá voltar a transformar-se em matéria prima. O mesmo se aplica a peças que apenas sejam necessárias para uma única utilização – após a utilização poderão ser convertidas em matéria prima. Esta característica permite aumentar o rendimento da matéria prima a bordo da estação, tendo ainda mais valor em missões interplanetárias.

Deste modo, escolheu-se o processo FFF/FDM.

#### 3.2 Escolha do local no exterior da ISS

Das instalações existentes no exterior da ISS, *Kibo* apresenta características únicas que fazem com que seja o local favorável para a instalação do dispositivo de fabrico aditivo:

- *Japanese Experiment Module Remote Manipulator System* (JEM-RMS): sistema manipulador robótico, localizado no exterior da *Kibo*. Constituído por dois braços, com seis graus de rotação cada um, consegue manipular cargas ou objetos grandes, como também, itens mais sensíveis e de menor tamanho [38];

- Arrefecimento ativo: única instalação exterior que oferece arrefecimento ativo. Tem uma capacidade de arrefecimento de 3-6 kW [7].
- *Japanese Experiment Module Airlock*: janela estanque que faz ligação ao módulo exterior, pela qual as experiências são expostas ou retiradas.

Na figura 21 está representado o laboratório exterior *Kibo*.

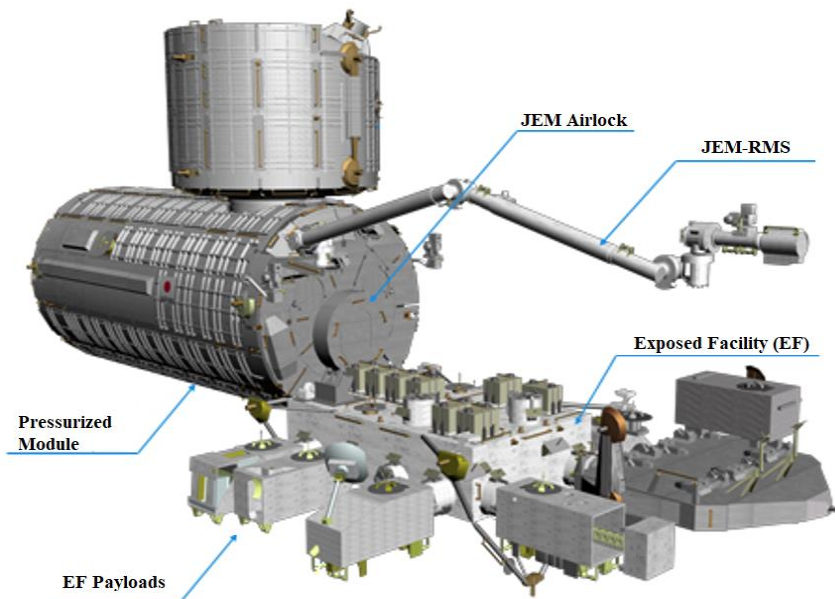


Figura 21- Instalações *Kibo* [39].

O *JEM Airlock* permite a movimentação de equipamentos até 300 kg, entre o interior pressurizado da estação e o ambiente de vácuo da instalação *Kibo*, com dimensões máximas de  $640 \times 830 \times 800$  mm.

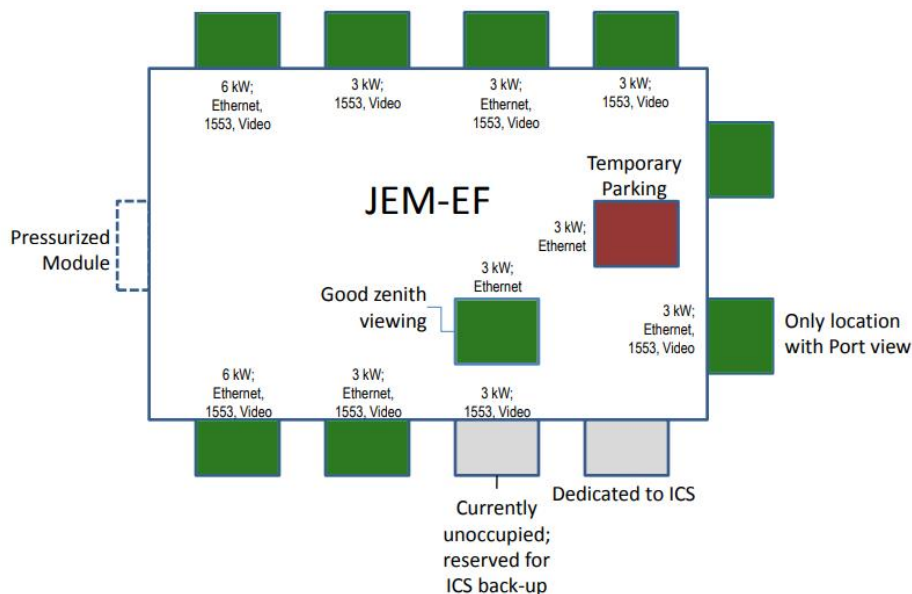


Figura 22 – Payloads livres no módulo *JEM-EF*.

Neste laboratório estão disponíveis diversos locais que acomodam cargas e experiências científicas. Assim, a impressora será desenvolvida tendo em conta as especificações necessárias para que a instalação se realize num dos locais assinalados a verde na figura 22.

### 3.3 Especificações

Escolheu-se um sistema cartesiano de movimento para a impressora, onde a plataforma se move no eixo Z e a cabeça de impressão nos eixos X e Y.

Pretende-se que a impressora tenha a capacidade de imprimir todos os filamentos de engenharia e de alta performance disponíveis no mercado, daí as temperaturas máximas de funcionamento para o extrusor, plataforma de impressão e câmara de impressão.

O local escolhido para a impressora, *Kibo*, impõe alguns limites no que diz respeito ao volume total, massa, potência de funcionamento e potência de arrefecimento.

Por fim, outras especificações são necessárias para obedecer às normas, aplicáveis pelas agências espaciais, e resistir ao ambiente da Órbita Terrestre Baixa.

Tabela 4 – Especificações para impressora 3D.

Nº	Métrica	Unidade	Valor
1	Tipo impressora	lista	FDM/FFF
2	Volume construção	mm <sup>3</sup>	270 mm x 270 mm x 270 mm
3	Temperatura máxima extrusor	°C	450
4	Temperatura máxima plataforma impressão	°C	200
5	Temperatura máxima camara de impressão	°C	200
6	Velocidade de impressão	mm/s	≤ 400
7	Potência de funcionamento	W	< 3000
8	Potência de arrefecimento	W	3000-6000
9	Tensão sistema	VDC	120
10	Massa Total	kg	≤ 520
11	Volume	m <sup>3</sup>	≤ 1.5
12	Materiais constituintes	lista	ECSS-Q-ST-70C
12	Funcionamento em Vácuo	Torr	≤ 10 <sup>-9</sup>
13	Resistência a oxigénio atómico	binário	sim
14	Reduzida manutenção	binário	Sim
15	Funcionamento em ambiente de microgravidade	binário	Sim
16	Sobreviver às forças de lançamento de uma nave espacial	binário	Sim

### 3.4 Projeto de Desenvolvimento de Produto

Neste subcapítulo, o dispositivo de fabrico aditivo é decomposto em blocos funcionais, de forma a criar uma descrição mais específica de cada elemento constituinte do produto e, assim, realizar uma análise a cada um deles.

Numa primeira fase, durante a análise funcional, o objetivo desta subdivisão é descrever cada bloco funcional sem indicar nenhuma tecnologia ou princípio de funcionamento. Só de seguida, na matriz morfológica, são apresentados diferentes conceitos, para cada bloco funcional, e escolhida uma solução para cada um. A solução final é a combinação de todos os blocos funcionais a trabalharem em sintonia.

Durante o desenvolvimento, além de atender aos requisitos impostos, o principal objetivo foi projetar um dispositivo o menos complexo possível, com a menor necessidade de manutenção possível e com o melhor aproveitamento do espaço possível sem, de algum modo, sacrificar a qualidade de impressão.

A fiabilidade, num local como a EII, tem um valor ainda maior e, um dispositivo pouco complexo, em grande parte dos casos, traduz-se em subsistemas com um menor número de componentes e, assim, com uma quantidade menor de possíveis pontos de falha.

Deste modo, na matriz morfológica, de forma geral, optaram-se por conceitos que apresentam o melhor balanço entre as características referidas anteriormente. Além disso, ao longo do capítulo 4.2 – Separação dos sistemas e subsistemas, faz-se uma comparação entre os diferentes candidatos para cada bloco funcional.

### 3.4.1 Análise funcional

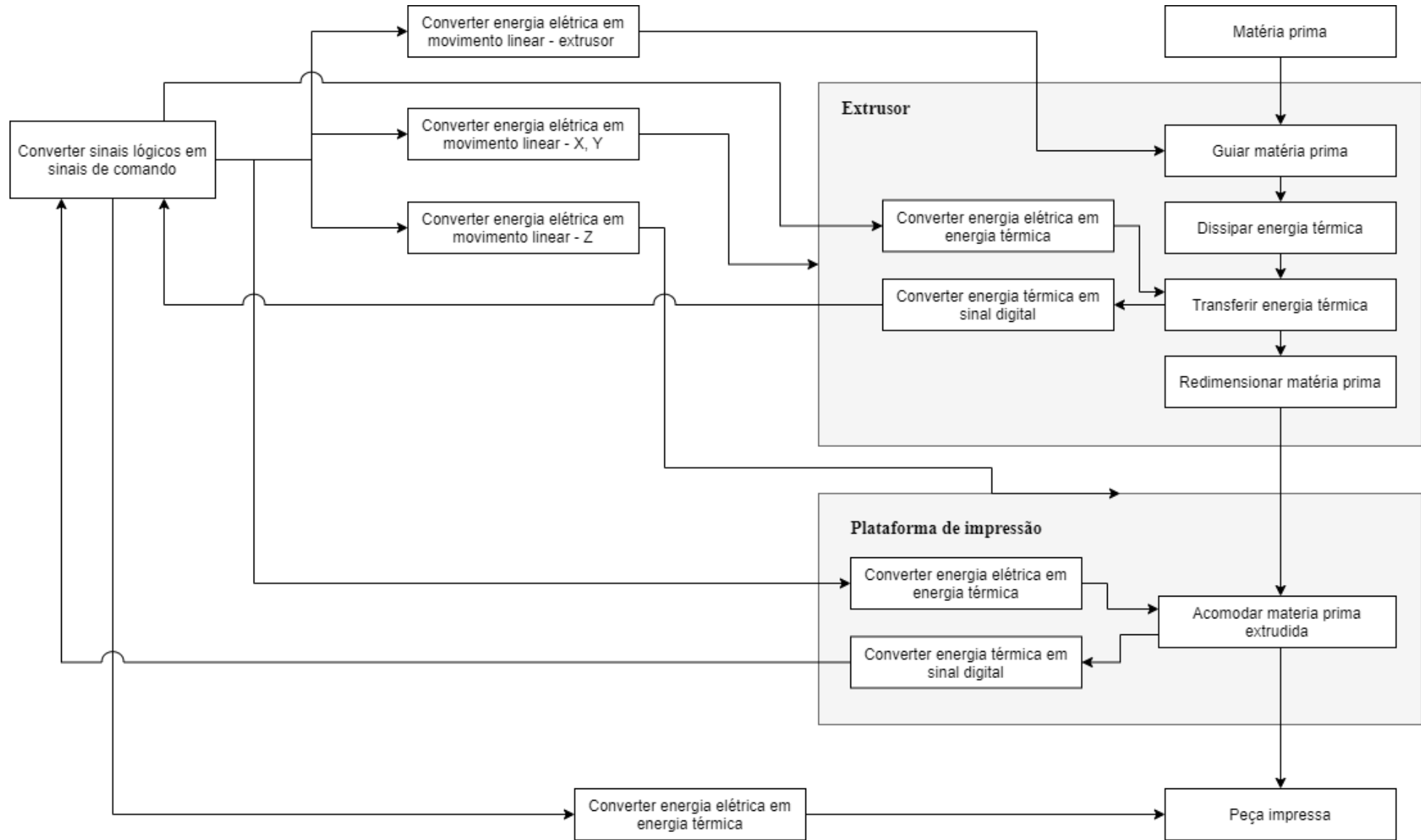


Figura 23 - Análise funcional da impressora FDM/FFF.



### *Converter energia elétrica em movimento linear X, Y, Z*

Este bloco funcional é representado pelo mecanismo capaz de modificar energia elétrica em movimento linear. Tem como *input*, a energia de alimentação da máquina e como *output*, a energia do movimento linear.

### *Converter energia elétrica em movimento linear - extrusor*

Este bloco funcional é representado pelo alimentador, componente que força a matéria prima para o extrusor. Tem como *input*, a energia de alimentação da máquina e como *output*, a energia do movimento linear da matéria prima

### *Guiar matéria prima – heatbreak*

Este bloco funcional é representado pelo componente que guia a matéria prima do alimentador até ao extrusor. Tem também o papel de criar um gradiente térmico, entre o bloco de aquecimento e o dissipador de energia térmica, de forma a que o filamento não atinja a temperatura de transição vítrea antes de chegar ao bloco de aquecimento. Tem como *input*, o movimento linear da matéria prima e como *output*, o movimento linear da matéria prima.

### *Dissipar energia térmica*

Este bloco funcional é representado pelo permutador de calor localizado no extrusor. Tem como função dissipar a energia térmica proveniente do bloco de aquecimento para que o filamento não atinja a temperatura de fusão antes de chegar ao bloco de aquecimento. Se a temperatura não for suficientemente baixa, o filamento perde rigidez e não ocorre uma extrusão com as características desejadas. Tem como *input*, energia térmica e como *output*, energia térmica.

### *Transferir energia térmica - extrusor*

Este bloco funcional é representado pelo bloco de aquecimento localizado no extrusor. Tem como função transmitir energia térmica proveniente da fonte de aquecimento ao filamento. Tem como *input*, energia térmica e como *output*, energia térmica.

### *Alterar dimensões da matéria prima*

Este bloco funcional é representado pelo bico extrusor. Tem como função alterar o diâmetro da matéria prima extrudida. Tem como *input*, matéria prima e como *output*, matéria prima.

### *Converter energia elétrica em energia térmica – extrusor*

Este bloco funcional é representado pela fonte de calor localizada no bloco de aquecimento do extrusor. Fornece a energia térmica necessária para que o filamento atinja a temperatura de transição vítrea. Tem como *input*, energia elétrica e como *output*, energia térmica

### *Converter energia térmica em sinal digital – extrusor*

Este bloco funcional é representado pelo dispositivo localizado no extrusor, usado para ler a temperatura no bloco de aquecimento e no bico de extrusão, de modo a que se possa fazer o controlo da fonte de calor. Tem como *input*, energia térmica e como *output*, sinal digital.

### *Acomodar peça impressa*

Este bloco funcional é representado pela superfície onde a primeira camada da peça é depositada. É um fator importante para o processo, pois se não existir boa adesão, a peça pode apresentar deformações nas primeiras camadas ou até mesmo soltar-se da superfície da impressão. Tem como *input* o material extrudido e como *output* a peça final

### *Converter energia elétrica em energia térmica – plataforma de impressão*

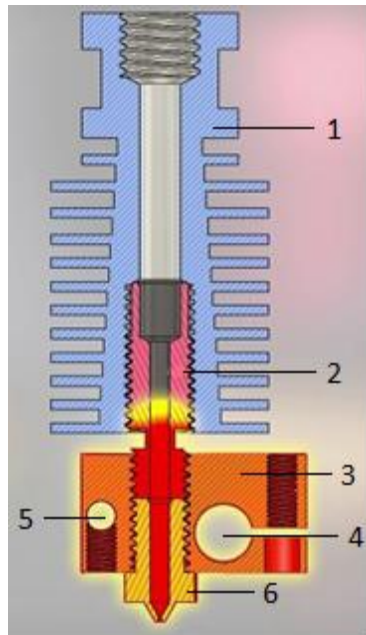
De forma a minimizar distorções que possam ocorrer na peça durante o processo de fabrico e também para promover a adesão do material à plataforma, esta é mantida a uma determinada temperatura enquanto o processo decorre. Assim, este bloco funcional é representado pela fonte de calor localizada na plataforma de impressão. Tem como *input*, energia elétrica e como *output*, energia térmica.

### *Converter energia elétrica em energia térmica*

Também, para minimizar a distorções na peça é aconselhável mantê-la a uma temperatura constante durante o processo de fabrico. Uma vez que, num ambiente de vácuo apenas existe transferência de calor por radiação e condução, este bloco funcional é representado por um aquecedor por radiação. Tem como *input*, energia elétrica e como *output*, energia térmica.

O extrusor é o conjunto de diferentes blocos que funcionam em sintonia:

Tabela 5 – Blocos funcionais do extrusor



Bloco	Componente
Transferir energia térmica	1
Guiar matéria prima	2
Transferir energia térmica	3
Converter energia elétrica em energia térmica	4
Converter energia térmica em sinal digital	5
Redimensionar matéria prima	6

Figura 24- Componentes de um extrusor FDM típico [40]

### 3.4.2 Matriz morfológica

Na tabela 6 são apresentados diferentes conceitos para cada bloco funcional. Estes são alguns princípios de solução a serem considerados, para cada subsistema da impressora. Os princípios sombreados são os princípios escolhidos. Ao longo do capítulo 4 são apresentadas as razões que levaram à escolha de tal princípio.

Tabela 6 - Matriz Morfológica

Funções	Princípios de solução			
	1	2	3	4
Converter energia elétrica em movimento linear – eixo X e Y	Motor + guia linear + polia + correia de transmissão	Motor + guia linear + parafuso sem fim	Motor + guia linear + pinhão e rack	Motor linear + guia linear
Converter energia elétrica em movimento linear - eixo Z	Motor + guia linear + polia + correia de transmissão	Motor + guia linear + parafuso sem fim	Motor + guia linear + pinhão e rack	Motor linear + guia linear
Acomodar matéria prima extrudida	Vidro	<i>Polyethylenimine (PEI)</i>	Policarbonato (PC)	
Converter de energia elétrica em energia térmica – plataforma de impressão	Aquecedor Poli-imida			
Dissipar energia térmica- extrusor	Radiador	Permutador de calor		
Guiar matéria prima	<i>Heatbreak titânio</i>	<i>Heatbreak inox + tubo PTFE</i>	<i>Heatbreak inox</i>	
Transferir energia térmica - extrusor	Bloco de aço	Bloco de cobre	Bloco de latão	Bloco de alumínio
Converter energia elétrica em energia térmica - extrusor	Resistência elétrica	Laser		
Converter energia térmica em sinal digital - extrusor	Termistor	<i>Resistance Temperature Detectors (RTD)</i>	Termopar	
Redimensionar matéria prima	Bico em Latão	Bico em Carboneto de Tungsténio	Bico em Cobre	Bico em Aço Temperado
Converter energia elétrica em movimento linear - extrusor	Motor + Redutor + Alimentador	Motor + Alimentador		
Converter energia elétrica em energia térmica – câmara de impressão	Radiador infravermelho			

## 4 Projeto de Materialização

Neste capítulo são escolhidos os componentes e respetivos materiais que vão constituir a impressora.

De forma a ter um produto final capaz de suportar o ambiente em que estará inserido, para a seleção de materiais consultaram-se as normas aplicáveis pelas agências espaciais e tiveram-se em conta as condições da OTB.

Na seleção de componentes, foi feito um esforço para selecionar empresas que têm experiência no ramo espacial, mas, no entanto, nem sempre foi possível. Nestes casos, se a lista de materiais for providenciada pelo fabricante, é feita uma análise para averiguar se os constituintes estão de acordo com as normas e têm a capacidade de suportar as condições da OTB.

Outras das empresas selecionadas não fornecem um modelo em concreto nem se alongam muito na descrição ou constituição do componente, referindo apenas que conseguem produzir um determinado produto, para ambiente espacial, capaz de desempenhar certas funções e de acordo com as normas aplicáveis. Nesta situação são apresentadas especificações consideradas relevantes para o componente.

À medida que os componentes são escolhidos e/ou dimensionados são apresentados *renders* do modelo CAD 3D.

### 4.1 Seleção de materiais para ambiente espacial

A seleção de materiais deve ocorrer da seguinte maneira:

- Se existir uma aplicação idêntica em outros programas espaciais, com semelhanças nas restrições impostas pelo ambiente e pela vida útil da aplicação, o material pode ser usado para tal aplicação.

- Caso contrário:
  - Se existirem materiais para os quais sejam obtidos resultados satisfatórios de avaliação, em amostras representativas da aplicação, com margem acima das especificadas em relação às condições de uso, esse material pode ser usado;
  - Podem ser usados materiais incluídos em bases de dados certificadas.

De acordo com a norma *ECSS-Q-ST-70C Rev.2*, deve ter-se em conta os seguintes critérios para a seleção de materiais:

- **Temperatura:** as propriedades do material devem ser compatíveis com o ambiente térmico ao qual estão expostos;
- **Ciclo térmico:** os materiais sujeitos a ciclos térmicos devem ser avaliados quanto à sua capacidade de suportar o *stress* térmico induzido;
- **Vácuo:** Devem ser feitos testes relativos ao *outgassing*, de acordo com a cláusula 5 da norma *ECSS-Q-ST-70-02*
- **Toxicidade e *offgassing*:** a nave espacial e os equipamentos associados devem ser fabricados com materiais e processos que não causem perigo ao pessoal ou ao hardware, seja no solo ou no espaço;
- **Inflamabilidade:** a resistência à inflamabilidade dos materiais deve ser avaliada em conformidade com os requisitos da cláusula 5 da norma *ECSS-Q-ST-70-2*;
- **Radiação:** os materiais expostos à radiação devem ser avaliados em conformidade com os requisitos da cláusula 5 da norma *ECSS-Q-ST-70-06*, para determinar sua resistência à radiação esperada durante a missão;
- **Corrosão:** todos os materiais que estão em contacto com gases atmosféricos, fluidos de limpeza ou outros produtos químicos, devem demonstrar que a degradação das propriedades, durante a sua vida útil prevista, não impede o cumprimento dos requisitos de desempenho e integridade;
- **Cargas e descargas elétrica:** as superfícies externas do veículo espacial devem ser condutivas, interconectadas e aterradas à estrutura da espaçonave para evitar o acúmulo de cargas diferenciais, em conformidade com os requisitos das cláusulas 6 a 10 da norma *ECSS-E-ST-20-06*;
- **Corrosão por stress:** materiais utilizados em aplicações estruturais e de suporte de carga (à tração) devem selecionar-se de acordo com os requisitos das secções 5.2.1, 5.2.3 e 5.2.4 da norma *ECSS-Q-ST-70-36*;

- **Oxigénio atómico:** todos os materiais usados nas superfícies externas de espaçonaves, para uso em altitudes de Órbita Terrestre Baixa, entre 200 km e 700 km, devem avaliar-se quanto à sua resistência ao oxigénio atómico (ATOX);
- **Micrometeoritos e detritos:** o efeito dos impactos de micrometeoritos e detritos nos materiais deve ser avaliado caso a caso;
- **Absorção de humidade:** a absorção de humidade deve evitar-se durante o fabrico e armazenamento de materiais higroscópicos;
- **Fragilização por hidrogénio:** a possibilidade de ocorrer fragilização por hidrogénio, durante o fabrico ou uso do componente, deve avaliar-se.
- **Compatibilidade galvânica:** as compatibilidades galvânicas devem seleccionar-se de acordo com a tabela 7;

Tabela 7 - Compatibilidade galvânica metais.

Pure metals and alloys in alphabetical order (including carbon)	Aluminium-Copper alloys	Al (pure), Al-Zinc alloys	Cadmium	Cast iron (austenitic)	Chromium	Copper, Brasses	Cupro-Nickel, Al-bronzes, Si-bronzes	Gold, Platinum, Carbon	Gun-metal (CuZn10 alloy), P-bronzes, Sn-bronzes	Magnesium	Nickel, Monel, Inconel, Nickel/Molybdenum-alloys	Silver	Sn-Pb alloys (all), Tin, Lead	Stainless steel 18/8 (300 series)	Stainless steel 13Cr (400 series)	Steel (carbon, low alloy), Cast iron	Titanium and Ti-alloys
Aluminium-Copper alloys	1	1	3	3	3	3	3	3	2	2	3	1	2	2	3	2	
Al (pure)		1	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	
Al-Zinc alloys				2	2	2	2	2	1	2	2	0	1	1	2	2	
Cadmium					1	1	1	2	1	3	1	2	1	1	1	2	1
Cast iron (austenitic)						1	0	0	1	3	1	0	2	0	0	2	0
Chromium							0	2	0	3	1	1	2	1	1	3	0
Copper, Brasses																	
Cupro-Nickel Al-bronzes Si-bronzes								2	0	3	1	1	2	2	1	3	0
Gold Platinum, Carbon Rhodium									2	3	2	0	3	0	1	3	0
Gun-metal (CuZn10 alloy), P-bronzes, Sn-bronzes										3	1	1	1	0	0	3	0
Magnesium											3	3	2	3	3	3	3
Nickel, Monel, Inconel												2	2	1	0	2	1
Silver													3	0	0	3	0
Sn-Pb alloys (all) Tin, Lead														1	1	1	3
Stainless steel 18/8 (300 series)															1	3	0
Stainless steel 13Cr (400 series)																3	0
Steel (carbon, low alloy) Cast iron																	0
Titanium and Ti-alloys																	

Key:  
 0 - Can be used without restriction.  
 1 - Can be used in a non-controlled environment (e.g. assembly area and general non-clean room environment).  
 2 - Can be used in a clean room environment.  
 3 - Needs specific measures to avoid galvanic corrosion when these combinations are selected.

Para os materiais usados neste projeto no Anexo A - Seleção de Materiais estão verificados alguns dos critérios anteriores.

#### 4.1.1 Polímeros, metais e oxigénio atómico

A presença de oxigénio atómico, no ambiente de Órbita Terrestre Baixa é considerada uma das principais razões para a degradação das superfícies expostas ao ambiente espacial. Os polímeros sofrem mais corrosão do que os metais quando expostos ao oxigénio atómico. No entanto, a sua excelente propriedade torna-os imprescindíveis em certas aplicações espaciais.

A profundidade da erosão, devido ao ataque de oxigénio atómico para diferentes tipos de polímeros e metais, é avaliada através do cálculo da fluência total acumulada. A quantificação e a suscetibilidade do material ao ataque de oxigénio atómico são descritas, como o rácio de volume ou massa perdida, por incidência de um átomo de oxigénio.

A figura 57 representa diferentes tipos de polímeros e metais amplamente utilizados em projetos espaciais e a sua reatividade ao oxigénio atómico. Dos materiais mais usados, Kapton apresenta uma taxa de corrosão de  $3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{átomo}$  e titânio e tungsténio uma taxa de  $0,0039 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{átomo}$  e de  $0,00044 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{átomo}$ , respetivamente [41].

Tabela 8 -Corrosão por oxigénio atómico de alguns polímeros e metais [41].

Polímeros			Metais		
Material	Taxa de Corrosão ( $10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{átomo}$ )	Ref.	Material	Taxa de Corrosão ( $10^{-24} \text{ cm}^3 / \text{átomo}$ )	Ref.
<b>Kevlar 92</b>	1.500	LDEF	<b>Cobre</b>	0.00640	SPENVIS
<b>Halar</b>	2.100	LDEF	<b>Molibdénio</b>	0.00560	SPENVIS
<b>Peek</b>	2.300	LDEF	<b>Tungsténio</b>	0.00044	LDEF
<b>Tedlar</b>	3.200	SPENVIS	<b>Tântalo</b>	0.00600	LDEF
<b>Polysulfone</b>	2.400	SPENVIS	<b>Titânio</b>	0.00390	LDEF
<b>Mylar A</b>	3.400	SPENVIS	<b>Alumínio</b>	0.00000	SPENVIS
<b>Kapton H</b>	3.000	SPENVIS	<b>Nióbio</b>	0.01400	LDEF
<b>PE</b>	3.700	SPENVIS	<b>Ouro</b>	0.00000	SPENVIS
<b>Teflon-FEP</b>	0.037	SPENVIS	<b>Ósmio</b>	0.02600	SPENVIS
<b>Epoxy</b>	0.037	SPENVIS	<b>Prata</b>	10.50000	SPENVIS
<b>Carbon</b>	1.700	SPENVIS			
<b>Silicon</b>	0.055	SPENVIS			

Apesar da taxa de corrosão em alguns metais, os efeitos do oxigénio atómico nestes materiais parecem ser mínimos, com exceção da prata e do cobre [42].

Por outro lado, os polímeros sofrem uma corrosão maior devido ao oxigénio atómico. Com isto, é necessário, através de testes práticos, avaliar o efeito da corrosão na vida útil e nas características mecânicas dos componentes polímeros. Apesar disso, PEEK é um polímero

bastante usado em aplicações aeroespaciais, tendo sido usados em projetos como o *CubeSats* (mini-satélites com aproximadamente 10 cm de comprimento) [43]. Um estudo ao efeito do oxigénio atómico, com características semelhantes às encontradas no ambiente da OTB, em folhas de PEEK com 0,40 mm de espessura, mostrou que a resistência à tração, alongação e tensão de rotura de amostras que sofreram corrosão por oxigénio atómico era semelhante à da amostra que não sofreu corrosão, sugerindo que a camada que sofreu reação química era muito pequena para afetar as propriedades mecânicas da peça estudada [44]. Apesar de este estudo apresentar resultados promissores é aconselhado que peças deste material sejam testadas no que diz respeito ao oxigénio atómico e o seu efeito na vida útil dos componentes.

## 4.2 Separação dos sistemas e subsistemas

Ao longo deste capítulo são apresentados os princípios de solução para cada bloco lógico constituinte da matriz morfológica. Também é explicado o porquê de ser esse o componente ou princípio escolhido.

### 4.2.1 Estrutura da impressora

O corpo da impressora é constituído por seis placas com 6 mm de espessura, figura 25, fabricadas em Alumínio 6061 t6. Além do peso reduzido, o alumínio apresenta elevada resistência às condições do meio da OTB (Anexo A – Seleção de Materiais e Componentes).

A união entre as placas é feita com um *bracket* de 90° maquinado e uma ligação roscada, como se observa na figura 26. De forma a evitar o desaperto que pode ocorrer durante a descolagem, devido às elevadas vibrações, usam-se porcas autoblocantes.

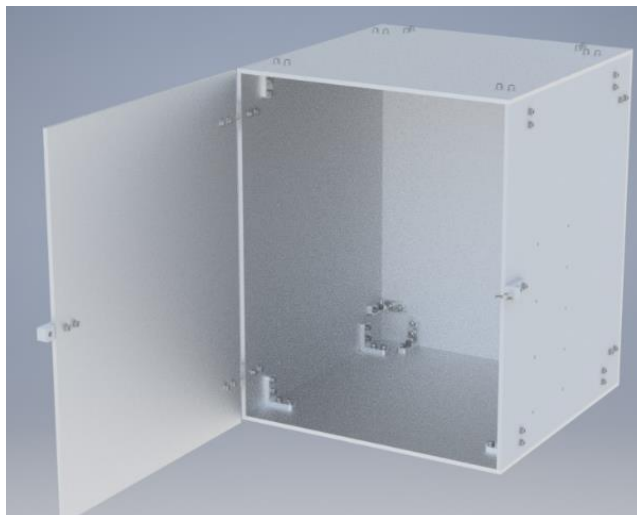


Figura 25 - Estrutura Impressora, Render CAD.

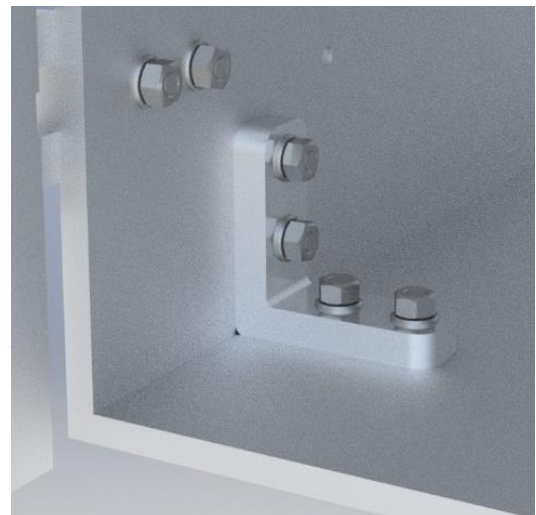


Figura 26 - Bracket, Render CAD.

#### 4.2.2 Proteção da estrutura

Para proteger os componentes das elevadas variações de temperatura que ocorrem durante a órbita à Terra é aconselhável o uso de isolamento multicamada. As empresas *Kaneka* e *RUAG* oferecem soluções testadas e usadas em diversas aplicações espaciais [45], [46]. O material fornecido por estas empresas pode-se observar na figura 27.



Figura 27 - Revestimento térmico [45].

#### 4.2.3 Conversão de energia elétrica em movimento linear X, Y e Z

Os motores lineares em conjunto com guias lineares oferecem uma opção compacta, simples e com poucos componentes. Isto permite um melhor aproveitamento do espaço, um sistema menos complexo e com menos pontos de falha, quando comparado com os outros sistemas apresentados na matriz morfológica. Outra grande vantagem reside no facto de não existir contacto entre o motor linear e a calha onde este se insere, o que leva a que seja um componente que não sofre desgaste e que não necessita de manutenção. Apenas as guias lineares, que são transversais a todos os sistemas de acionamento, necessitam de alguma manutenção periódica- lubrificação. É também um sistema sem *backlash*. Pelas razões acima mencionadas, optou-se pelo uso de motores lineares.

A empresa *H2W Technologies* fornece uma alargada gama de produtos, no que diz respeito a motores linear. Esta empresa oferece a possibilidade de adaptar os seus produtos a diferentes tipos de aplicações, incluindo a indústria espacial e, também, a ambientes de vácuo com pressões de funcionamento até  $10^{-9}$  Torr. Estes fatores fizeram com que fosse uma empresa que se destacou em relação aos seus concorrentes e, por isso, foi selecionada.

Estão disponíveis diferentes materiais para seleção: Alumínio, Cerâmica, Aço Inox, Titânio, Teflon, PEEK, Kapton, Viton e Macor. Além disso, a *H2W* pode personalizar o design de forma a aumentar a eficácia do arrefecimento por condução. Estão ao dispor seis tipos de

motores, com forças que variam dos 5,3 N aos 771N [47]. Escolheu-se o modelo BLDM-A02 para os eixos X, Y e o modelo BLDM-B02. Os cálculos de dimensionamento apresentam-se no capítulo 5.2.

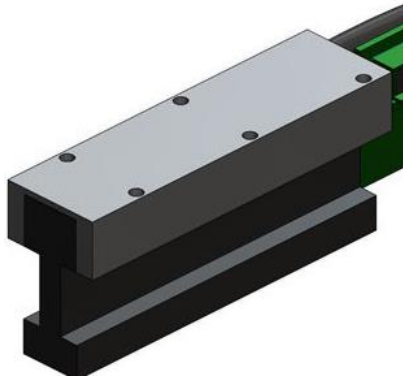


Figura 28- Motor Linear [47].

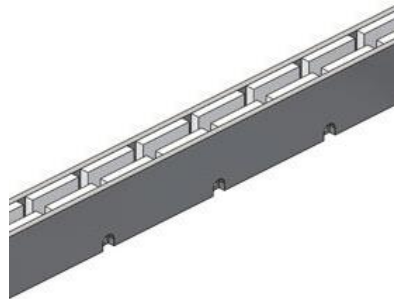


Figura 29 – Calha magnética [47].



Figura 30 - Montagem.  
Adaptado de [47].

Para guiar o motor linear, figura 28, no interior das calhas, figura 29, e ao longo do curso pretendido, é necessário o uso de guias lineares. Quanto às guias lineares, além dos materiais utilizados para o fabrico, é importante considerar o tipo de lubrificante que é possível usar - devido ao fenómeno de *outgassing*.

Em conjunto com os motores lineares, a H2W tem disponíveis configurações - exemplo na figura 31 - que, além dos motores linear, já incluem guias lineares, fins de curso, sensores fins de curso e *encoders* (1 micrómetro de resolução). Estas configurações são totalmente customizáveis e fabricadas em materiais recomendados pela NASA, que apresentam *baixo outgassing* [47].



Figura 31 - Configuração de um sistema de movimento com guias e motores lineares [47].

Assim, tendo por base os sistemas de movimentos oferecidos pela empresa H2W, são utilizados dois motores e dois guias lineares no eixo Y, um em cada lado da impressora, conectados por uma barra de alumínio 6061 t6. A cabeça de impressão move-se nos eixos X e Y e a plataforma móvel move-se no eixo Z.

O componente que faz a ligação entre o motor linear e a guia linear, componentes este que guia o motor linear dentro da calha, fabrica-se por quinagem e soldadura. A norma ECSS-Q-ST-70-39C refere-se ao processo de soldadura e deve consultar-te aquando da realização deste componente.

As figuras 32 e 33 representam a configuração utilizada para o eixo Y.

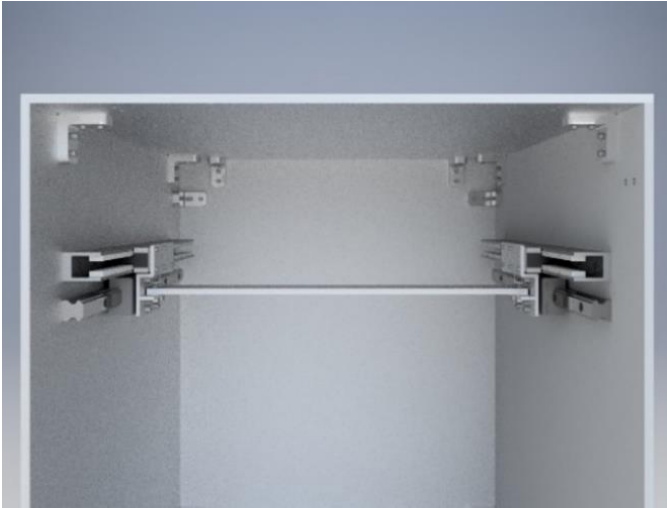


Figura 32 - Eixo Y, modelo CAD.

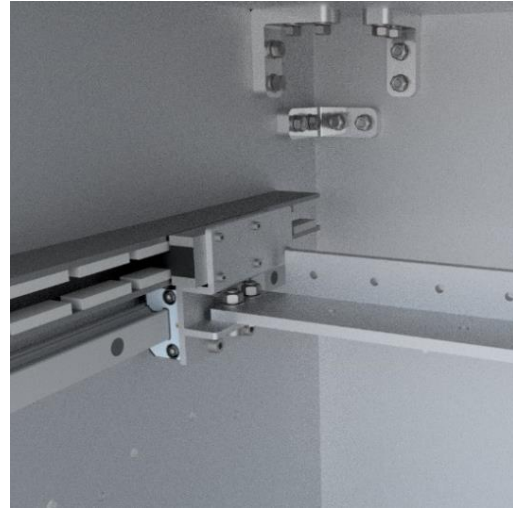


Figura 33 - Conexão eixo Y, render 3D.

A barra conecta os dois motores e as guias lineares do eixo Y utiliza-se para a montagem da guia e motor linear do eixo X. Como se observa nas figuras 34 e 35, o motor monta-se na parte de cima da barra e o rail linear monta-se na parte de baixo.

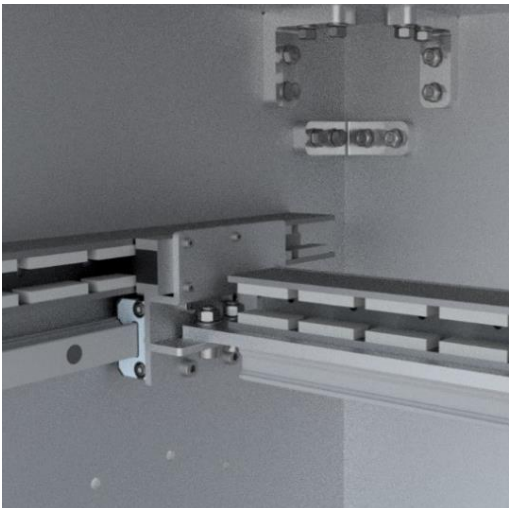


Figura 34 - Eixo X, render 3D.

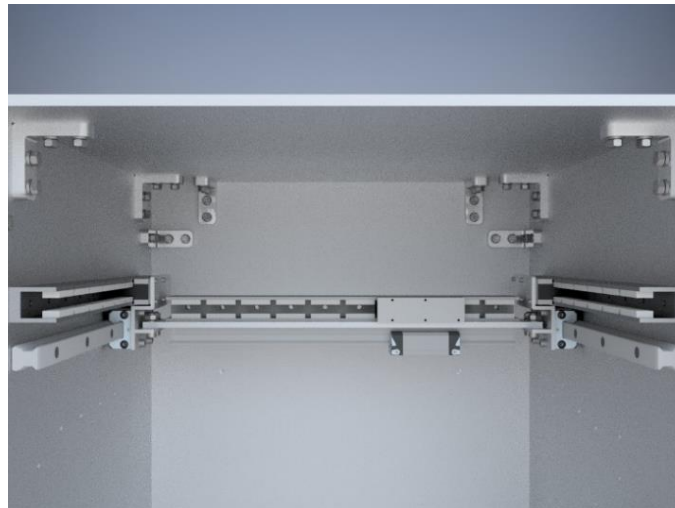


Figura 35 - Eixo X, render 3D.

No que diz respeito ao eixo Z, que suporta a plataforma de impressão, são utilizados dois motores lineares, um de cada lado da impressora, e três guias lineares, como se verifica nas figuras 36 e 37.



Figura 36 - Eixo X, Y, Z, *render 3D*.

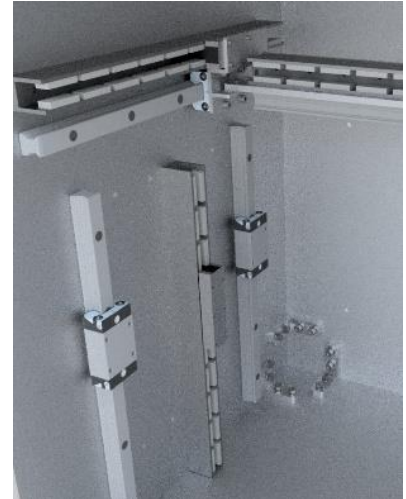


Figura 37 - Eixo X, Y, Z, *render 3D*.

São necessários fins de curso para o sistema ao iniciar ter uma posição de referência e, assim, saber a posição dos motores lineares. A empresa *MicroSense* apresenta experiência no fabrico de sensores capacitivos para funcionamento em alto vácuo e pode adaptar os seus sensores às necessidades do cliente. Assim, selecionaram-se três sensores capacitivos desta empresa, para utilizar um em cada eixo de movimento. Na figura 38 é possível visualizar o sensor em questão.

Para limitar o movimento dos patins das guias e dos motores lineares ao rail e à calha magnética, respetivamente, projetaram-se limitadores de curso. O sensor capacitivo insere-se dentro do limitador, tal como apresentado na figura 39.



Figura 38 - Sensor capacitivo para funcionamento em vácuo.

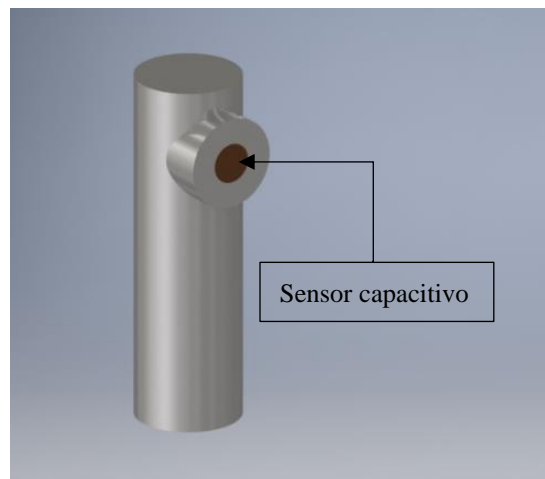


Figura 39 - Fim de curso com sensor capacitivo incorporado, *render 3D*.

De forma a impedir o movimento dos eixos durante a inatividade da impressora, após o fim de cada trabalho a cabeça de impressão retorna a uma posição predefinida e, através de um sistema de bloqueio, permanece nessa posição. A libertação faz-se através da atuação de um

solenóide - figura 40. Através de uma mola, na posição de repouso e sem o solenóide estar energizado, faz-se o bloqueio do sistema – figura 41.

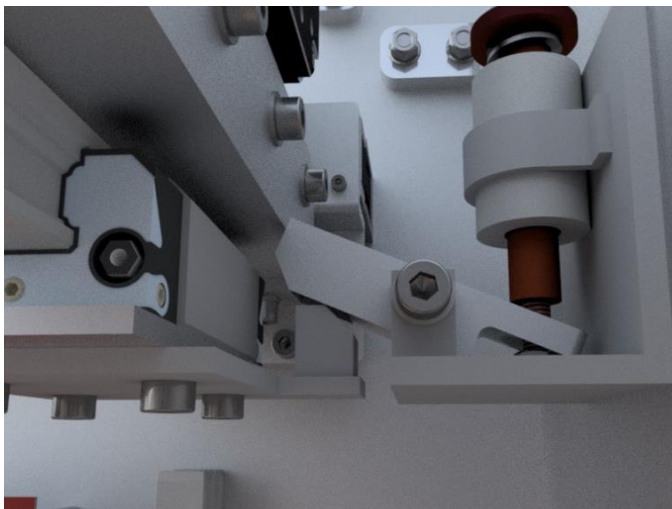


Figura 40 - Sistema de bloqueio para eixo X e Y simplificado, *render 3D*.



Figura 41 - Sistema de bloqueio para eixo X e Y simplificado, *render 3D*.

Na figura 42 pode ver-se, em vista de corte, o sistema de bloqueio.

No eixo Z, o sistema de bloqueio situa-se na parte inferior da estrutura, onde a mesa está mais afastada da cabeça de impressão, de modo ser possível bloquear a plataforma de impressão depois de uma peça ser impressa – figura 43.

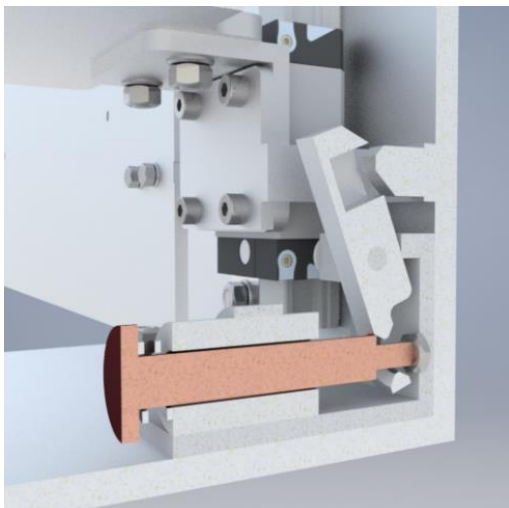


Figura 42 - Vista em corte do sistema de bloqueio, eixo Z, *render 3D*.

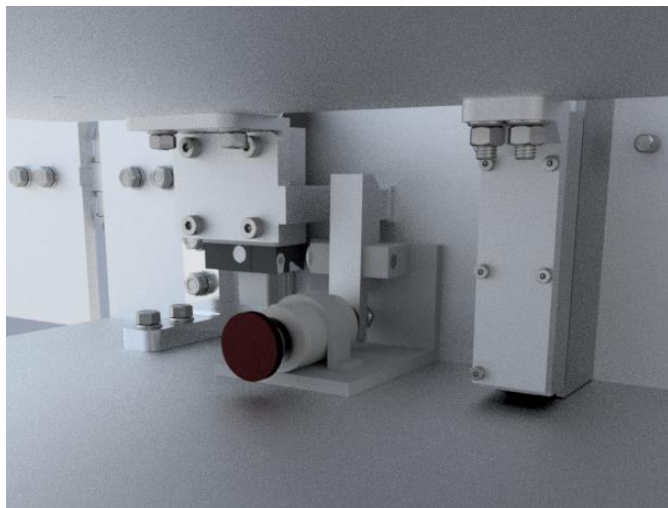


Figura 43 - Sistema de bloqueio do eixo Z, *render 3D*.

Para a seleção das guias lineares teve-se em atenção o material constituinte dos componentes. Como referido anteriormente, os metais não sofrem corrosão significativa no que diz respeito ao oxigénio atómico. No entanto, é necessário ter em atenção o lubrificante escolhido, devido ao fenómeno de *outgassing*. Selecionaram-se guias lineares da *Bosh Rexroth*. Esta empresa pode adaptar os seus produtos para ambiente de vácuo. A descrição dos modelos para a guia linear e respetivo bloco está apresentada na tabela 9.

Tabela 9 - Modelo Guia e Bloco Linear.

Eixo X, Y e Z	Guia linear	Bloco
Fabricante	<i>Bosh Rexroth</i>	<i>Bosh Rexroth</i>
Modelo	R1605 102 31, 320 mm	R1622 193 22

#### 4.2.4 Acomodar matéria prima extrudida

A plataforma móvel é fabricada em alumínio 6061 t6 e conecta-se às guias lineares e motores lineares através de conectores, também em alumínio 6061 t6. Os conectores observam-se na figura 44.

Dos materiais candidatos para a superfície de impressão, *Polyethylenimine* (PEI), é o material ao qual o filamento PEEK possui melhor adesão. Deste modo, usa-se uma placa de *Polyethylenimine* (PEI) sobre a plataforma de impressão, como demonstrado na figura 45.



Figura 44 - Conexões plataforma de impressão, *render 3D*.

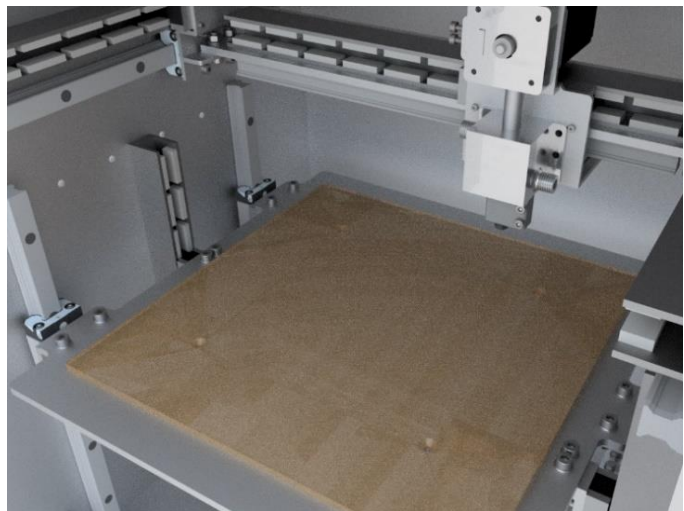


Figura 45 - Plataforma de impressão, *render 3D*.

Apesar de PEI, quando comparado com os outros polímeros, apresentar uma corrosão de *elevado* valor, a única função deste componente é acomodar matéria prima. É um item consumível que sofre desgaste pelo processo de impressão e não apresenta nenhuma função estrutural. Assim, é de esperar que este componente desempenhe plenamente a sua função, durante toda a sua vida útil, sem que a corrosão por oxigénio atómico cause problemas. No entanto, é necessária a realização de testes práticos para confirmar o referido anteriormente.

#### 4.2.5 Conversão de energia elétrica em energia térmica - plataforma de impressão

Em aplicações espaciais em que é necessário o uso de aquecedores opta-se, em grande parte, por aquecedores de Poli-imida (PI). Estes aquecedores apresentam grande fiabilidade e suportam elevadas variações de temperatura (-60 a 220°C). Na figura 46 observa-se um aquecedor deste tipo.

As empresas *Fralock* e *Minco* são empresas que estão envolvidas em projetos de programas espaciais, produzindo aquecedores que, atualmente, se encontram em órbita. Os aquecedores de ambas as empresas estão em conformidade com a norma da NASA referente a este tipo de componentes: *NASA Goddard S-311-P-841, General Specification for Thermofoil Heater, All-Polyimide, Space Applications*. Apresentam densidades até  $31,0 \text{ W/cm}^2$ .

Estes aquecedores, em impressoras FFF/FDM, localizam-se na parte inferior da plataforma de impressão, tal como na figura 47.



Figura 46 - Aquecedor de Poli-imida [48].

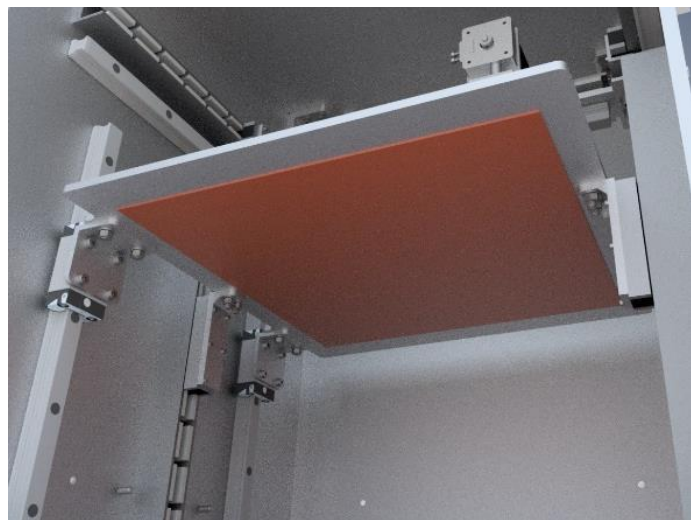


Figura 47 - Aquecedor de Poli-imida na plataforma de impressão, *render* CAD.

Para se imprimirem os materiais desejados é necessário que a plataforma de impressão atinja uma temperatura máxima de 200°C.

Uma resistência deste tipo, usada numa impressora comercial, numa plataforma com uma área de 300 x 300 mm, capaz de atingir uma temperatura de 200°C, tem uma potência de 1100W [49].

Deste modo, na tabela 10 estão listadas as características pretendidas para o aquecedor em questão.

Tabela 10 - Especificações para o aquecedor da plataforma de impressão

Área	270 x 270 mm
Temperatura máxima	200°C
Potência	1000 W
Densidade	1,37 W/cm <sup>2</sup>

#### 4.2.6 Transferência de energia térmica no extrusor - permutador de calor

Visto que num ambiente de vácuo não há transferência de energia por convecção, é necessário utilizar uma solução que passe por dissipar a energia térmica por radiação ou condução. Dado o local escolhido, JEM-RMS, possui sistema de arrefecimento ativo, que utiliza fluido como meio de transferência de calor, foi projetado um permutador de calor em alumínio 6061 t6, que está retratado nas figuras 48 e 49.

Este componente foi projetado tendo em vista o uso de um processo de fabrico aditivo para a sua construção - SLM. O uso de um processo de fabrico aditivo reduz a complexidade do componente, i.e., necessidade de solda ou juntas com o-rings/vedantes. Além disso, é uma forma de testar peças fabricadas por fabrico aditivo na EEI, com risco reduzido.

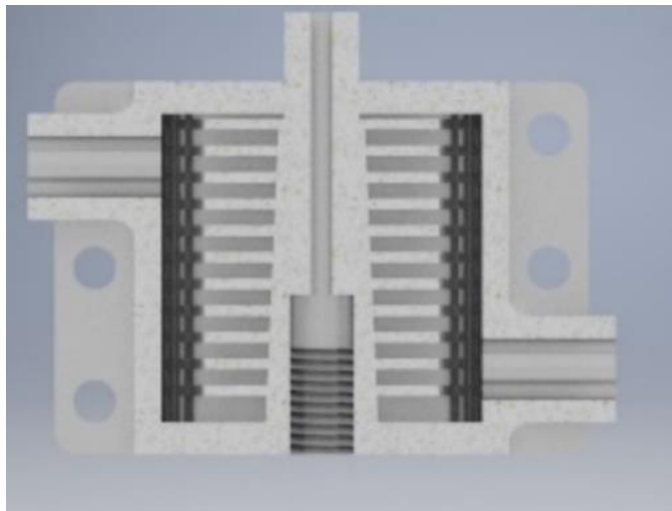


Figura 48 - Permutador de calor, *render CAD*.

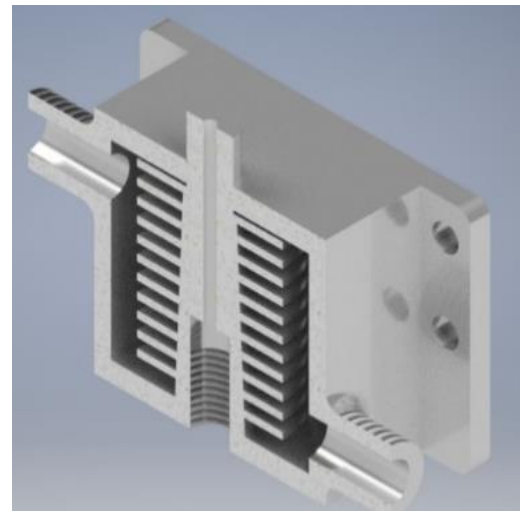


Figura 49 - Permutador de calor, *render CAD*.

Para fazer conexão ao sistema de arrefecimento são utilizadas duas ligações roscadas ANSI 7/16-20 UNF. A estas ligações são acopladas duas mangueiras *Titeflex S145* tamanho 4, com um joelho de 90° (Anexo A). Diversos produtos da empresa *Titeflex* são utilizados extensivamente em veículos espaciais e veículos de lançamento, estando, portanto, de acordo com as normas necessárias.

Não se encontraram informações relativas ao hardware do sistema de arrefecimento do JEM-RMS. No entanto, o fabricante dispõe de diversos conectores que podem ser acoplados à outra extremidade da mangueira.

Para a conexão com o *heatbreak* utiliza-se uma rosca M7.

#### 4.2.7 Guiamento da matéria prima - *heatbreak*

Comparativamente aos outros materiais candidatos, o titânio apresenta propriedades que o tornam interessante para este componente. Com uma condutividade térmica menor do que o aço, é um material de eleição em impressoras comerciais de elevado desempenho, uma vez que dificulta a propagação de calor proveniente do bloco de aquecimento para os restantes componentes a montante.

A ligação ao permutador de calor faz-se por uma ligação roscada M7, resultando na configuração que pode observar-se na figura 50. A ligação ao bloco de aquecimento faz-se por uma ligação roscada M7. A figura 51 representa o *heatbreak*.

Este componente fabrica-se por maquinagem. A norma ECSS-Q-ST 70-71C faz referência a este processo.

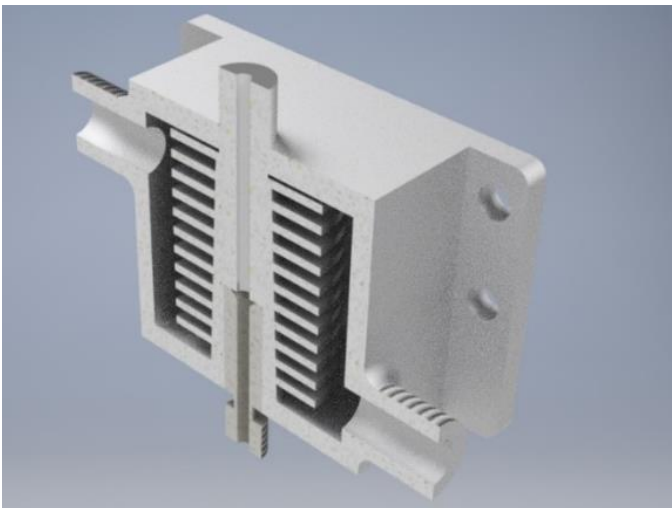


Figura 50 - Heatbreak e permutador de calor, *render* 3D.

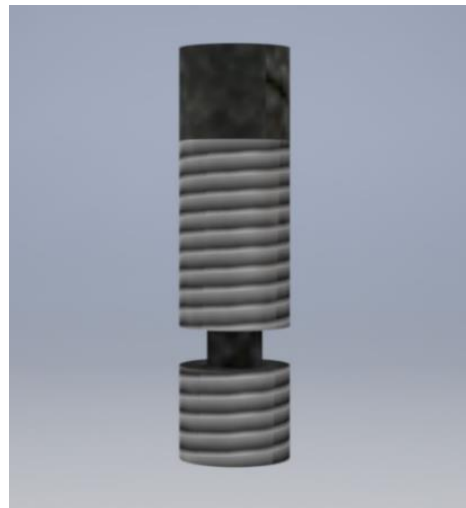


Figura 51 - Heatbreak, *render* 3D.

#### 4.2.8 Transferência de energia térmica - extrusor

Uma vez que o bloco térmico é concebido para transferir o calor da fonte de aquecimento para o termoplástico, é importante fazê-lo de forma eficiente. Duas grandes propriedades são interessantes nesta aplicação: condutividade térmica e calor específico. No entanto, um valor de condutividade térmica duas vezes maior não representa uma duplicação

no desempenho da impressão 3D. Uma maior condutividade térmica tem maior impacto em componente mais compridos e largos, como por exemplo num dissipador de calor. Como a resistência elétrica e o filamento estão a *poucos* milímetros de distância, a diferença não é perceptível do ponto de vista do desempenho da impressão 3D [50].

A resistência à fadiga térmica é um fator que deve ter-se em conta, uma vez que o extrusor é sujeito a inúmeros ciclos térmicos com temperaturas de impressão que podem atingir os 450°C. Também, deve considerar-se a tensão limite de elasticidade, uma vez que, quando esta tensão é atingida, o material deforma ou pode até mesmo atingir a fratura. Dos quatro materiais candidatos, o aço, apesar da pior condutividade térmica, apresenta uma maior temperatura de fusão e tensão limite de elasticidade [50].

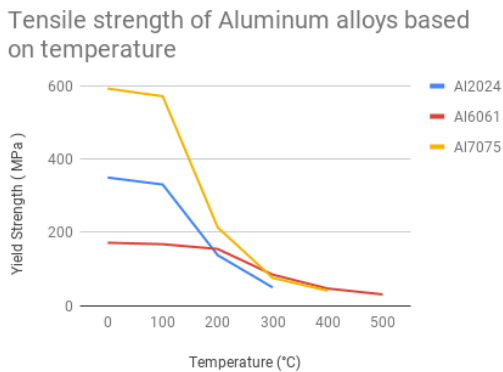


Figura 52 - Tensão limite elástica de ligas de alumínio [50].

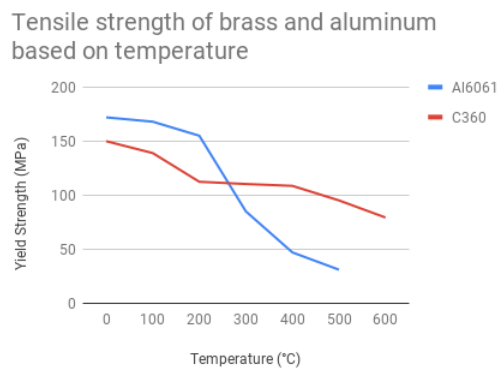


Figura 53 - Tensão limite elástica do latão e alumínio [50].

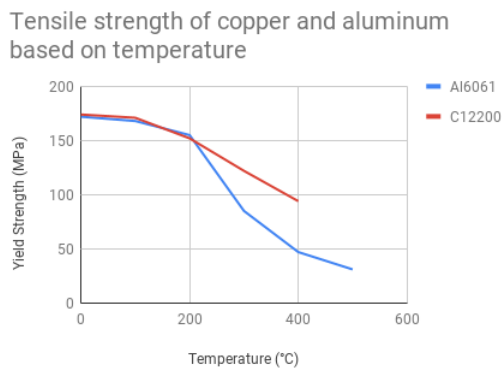


Figura 54- Tensão limite elástica do cobre e alumínio [50].

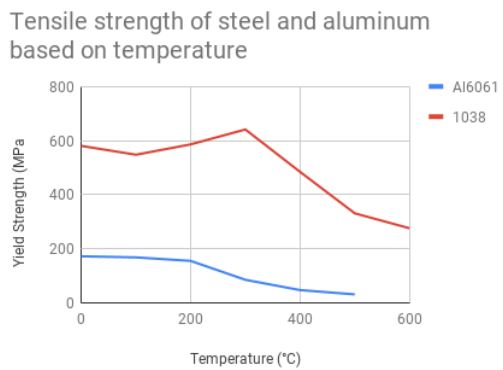


Figura 55- Tensão limite elástica do aço e alumínio [50].

Assim, o aço 316 é o material escolhido para o bloco de aquecimento.

A ligação ao *heatbreak* e ao bico extrusor faz-se com uma rosca M7.

Nas figuras 56 e 57 está representado o bloco de aquecimento e os restantes componentes do extrusor. Este componente fabrica-se por maquinagem.



Figura 56 - Bloco de aquecimento *render 3D*.



Figura 57 - Bloco de Aquecimento, *render 3D*.

#### **4.2.9 Conversão de energia elétrica em energia térmica**

Devido à sua simplicidade, eficiência e funcionalidade as resistências cilíndricas, usadas na esmagadora maioria das impressoras comercializadas, são responsáveis por atingir a temperatura de impressão desejada, no bloco de aquecimento. Impressoras disponíveis no mercado, normalmente, utilizam resistência com valores entre 40-60W, capazes de atingir temperaturas a rondar os 470°C.

Os seguintes fabricantes disponibilizam soluções customizadas, para ambientes de vácuo, dentro da gama de potência e dimensões e pretendidas:

- *Chromalox;*
- *Belilove Company – Engineers;*
- *Tempco Electric Heater Corporation;*
- *Hakko Electric Co., Ltd;*

Num ambiente de vácuo, a resistência tem de ser hermeticamente selada para não ocorrer *outgassing*. Os fabricantes acima referidos oferecem uma combinação *ceramic to metal seal* que elimina este fenómeno.

As dimensões que se encontram na tabela 11 estão de acordo com as dimensões do bloco de arrefecimento – local onde a resistência elétrica é instalada.

Tabela 11 - Especificações Resistência Extrusor

Diâmetro	$\leq 6$ mm
Comprimento	$\leq 20$ mm
Temp. máx.	500 °C
Potência	40-60 W
Selante	<i>Ceramic to metal seal</i>
Sensor de temperatura	Termopar incorporado

#### 4.2.10 Conversão de energia térmica em sinal digital - extrusor

Todas as empresas mencionadas anteriormente oferecem possibilidade de incorporar um sensor de temperatura – termopar - dentro do bloco de aquecimento. Desta maneira é conseguida uma solução mais simples e com um menor número de componentes acoplados ao bloco de aquecimento.

#### 4.2.11 Extrusão de matéria prima

O bico extrusor é o componente responsável por alterar a dimensão de matéria prima. Acopla-se ao bloco de aquecimento com uma rosca M7. Na figura 58 e 59 observa-se um bico extrusor e a montagem completa do extrusor, respetivamente.



Figura 58 - Bico extrusor [51].

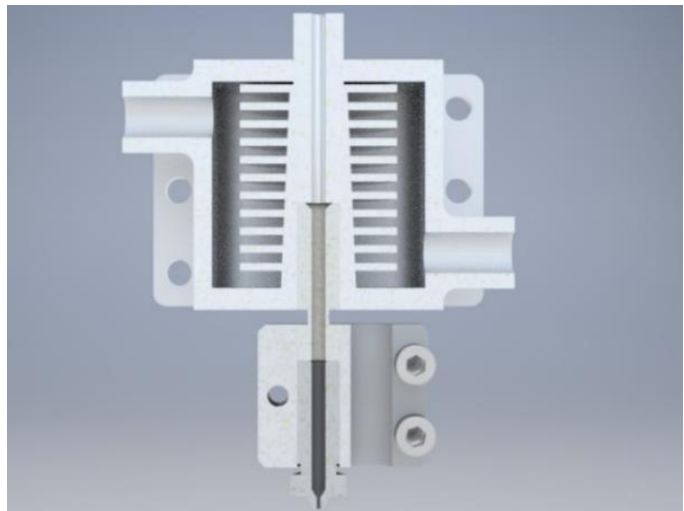


Figura 59 - Extrusor, render 3D.

De modo a combater o efeito abrasivo que alguns filamentos causam no bico extrusor, é necessário escolher um material que tenha elevada resistência à abrasão, para aumentar a vida útil deste componente e, assim, reduzir a necessidade de peças sobressalentes.

O carboneto de tungsténio - material com elevada resistência à abrasão - é usado para fabricar bicos extrusores resistentes ao afeito de filamentos abrasivos. Desta forma, opta-se por um bico extrusor em carboneto de tungsténio. A *Dyze Design* é uma das empresas que tem disponível um bico deste material e, portanto, optou-se por um bico extrusor da mesma.

#### 4.2.11 Conversão de energia elétrica em movimento linear Extrusor

Para o processo de impressão ocorrer, é necessário um sistema que force a extrusão do filamento no bico extrusor. Utiliza-se, normalmente, um motor em conjunto com um sistema alimentador para transmitir movimento ao filamento.

No alimentador podem utilizar-se engrenagens reductoras de forma a reduzir o binário necessário para o motor. No entanto, estes sistemas são mais complexos, têm um maior número de componentes - mais pontos de falha - e necessitam de manutenção, i.e., lubrificação. Devido a estes fatores, optou-se por um sistema alimentador sem reductor.

Fez-se uma pesquisa de forma a tentar encontrar no mercado uma solução que se pudesse utilizar no ambiente da OTB. Contudo, os materiais constituintes não obedeciam às normas aplicáveis. Deste modo, tendo como base o extrusor *Bulldog All-Metal*, foi criado um modelo CAD 3D de um alimentador. Durante o processo de conceção teve-se o cuidado de projetar o componente para que este pudesse ser fabricado por maquinagem. Alumínio 6061 t6 é o material escolhido para o alimentador, que se pode observar nas figuras 60 e 61.

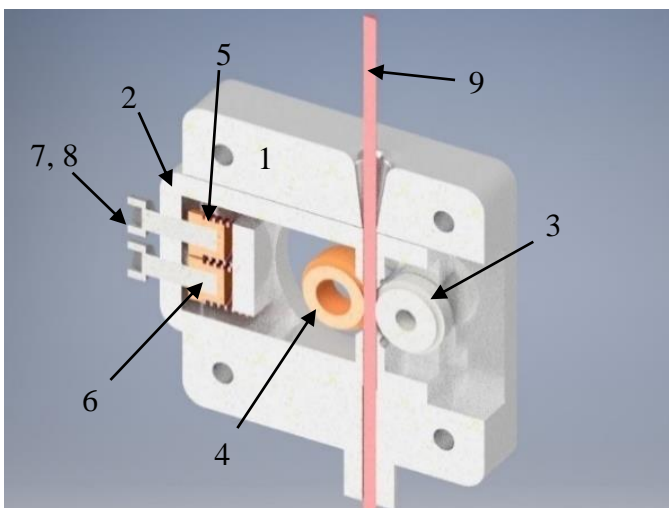


Figura 60 - Alimentador, vista em corte, render 3D

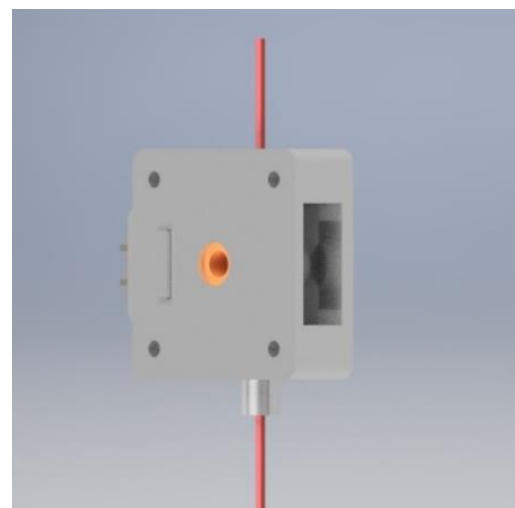


Figura 61 - Alimentador, render 3D

Na tabela 12 encontram-se os materiais das peças que constituem o alimentador. No anexo A – Seleção de materiais, encontram-se informações que aprovam os materiais selecionados como aptos para uso no ambiente da OTB.

Tabela 12 - Componentes do Alimentador

Legenda	Peça	Material
1	Estrutura 1	Al 6061 t6
2	Estrutura 2	Al 6061 t6
3	Roda dentada 1	Aço 316
4	Roda dentada 2	Aço 316
5, 6	Molas	Aço 1095
7, 8	Parafusos	Aço 304
9	Filamento	-----

Para gerar a força necessária para impelir o filamento é necessário um motor rotativo. Um servomotor, comparativamente a um motor passo a passo, torna-se numa solução mais complexa, devido à necessidade de um redutor. Por isso, escolheu-se um motor passo a passo.

A empresa *Arun Microelectronics* tem ao dispor motores passo a passo para aplicações em ambiente de vácuo até  $7.5^{-11}$  Torr e para uma gama de temperaturas dos  $-65^{\circ}\text{C}$  até aos  $+175^{\circ}\text{C}$ . Esta empresa fornece também *drivers* para os motores passo a passo, *drivers* estes que estão desenvolvidos para otimizar o funcionamento do motor, de modo a que este produza o menor calor possível.

Impressoras FDM utilizam, normalmente, motores com um binário de aproximadamente 0,40 Nm e com uma resolução de  $1.8^{\circ}$ . Assim, selecciona-se o modelo AML D42.3 UHV, figura 62. O motor conectado ao alimentador está representado na figura 63.



Figura 62 - Motor passo a passo *Arun Microelectronics*.

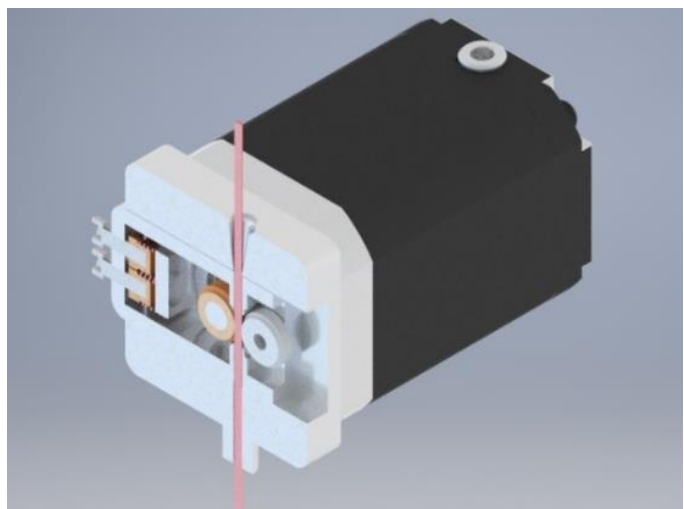


Figura 63 - Motor passo a passo e alimentador, *render 3D*.

Na tabela 13 encontram-se as características do motor selecionado.

Tabela 13 - Especificação motor passo a passo

Modelo	AML D42.3 UHV
Binário	0,45 Nm
N.º de passos	200
Ângulo de cada passo	1,8º/passo

No sentido de montar o motor passo a passo, o alimentador e os restantes componentes do extrusor à guia linear e ao motor linear do eixo Y, projetou-se o componente das figuras 64 e 65, em alumínio 6061 t6, que se fabrica por quinagem e maquinagem.

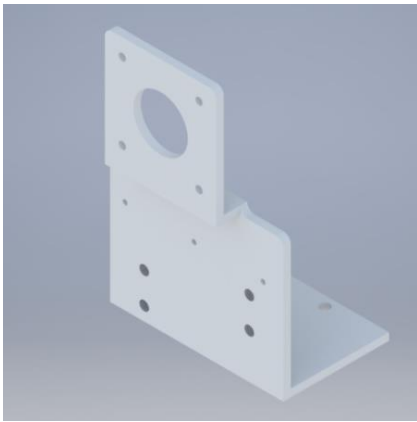


Figura 64 - Conetor de componentes eixo X, *render 3D.*



Figura 65 - Conetor de componentes eixo X, *render 3D.*

Dando origem à configuração que pode observar-se nas figuras 66 e 67.

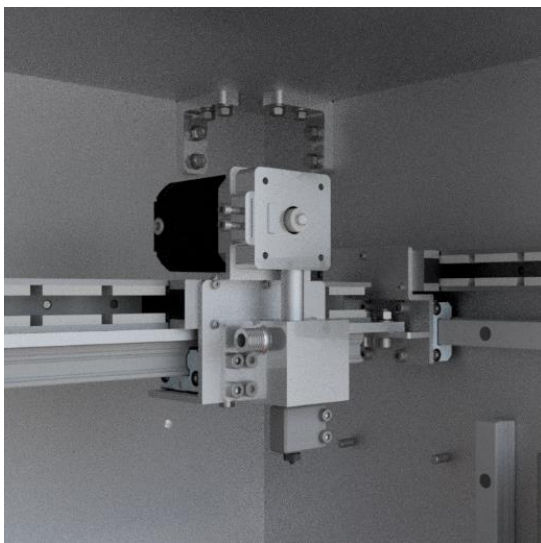


Figura 66 - Extrusor e alimentador, montados no eixo X, *render 3D.*

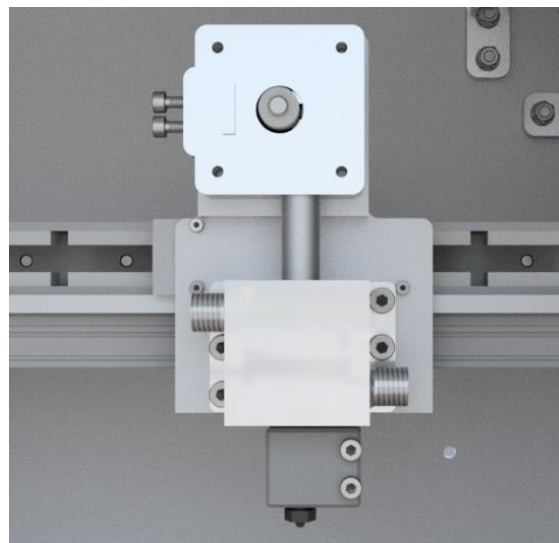


Figura 67 - Extrusor e alimentador, *render 3D.*

#### 4.2.12 Conversão de energia elétrica em energia térmica - câmara de impressão

Uma vez que não existe transferência de calor por convecção num ambiente de vácuo, é necessário usar-se uma solução que transmita energia térmica à peça em construção sob a forma de radiação.

A empresa *Heraeus* dispõem de painéis infravermelhos que são constituídos por filamentos metálicos impressos, localizados entre duas camadas de quartzo - figura 69 e 70. Os filamentos podem adaptar-se de forma flexível às necessidades pretendidas e os painéis podem funcionar em ambiente de vácuo. Em comparação às soluções tradicionais, além da flexibilidade e tamanho reduzido, apresentam uma homogeneidade maior, como se observa na figura 68. Devido a estes fatores, e por não se ter encontrado outra fabricante com solução semelhante, optaram-se por estes painéis infravermelhos.

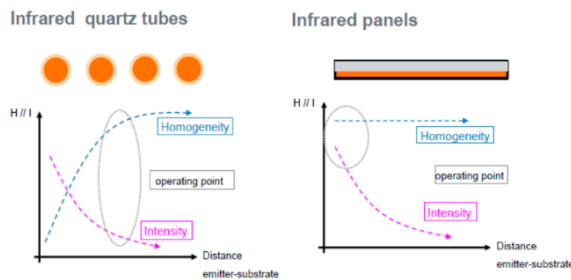


Figura 68 - Comparação entre painel infravermelho e tubos de quartzo.

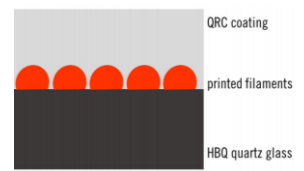


Figura 69 - Constituição dos painéis infravermelhos.

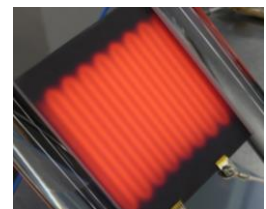


Figura 70 - Painéis infravermelhos.

Dado que, com os painéis escolhidos é possível criar diferentes configurações, projetaram-se os aquecedores que se podem visualizar nas figuras 71 e 72.

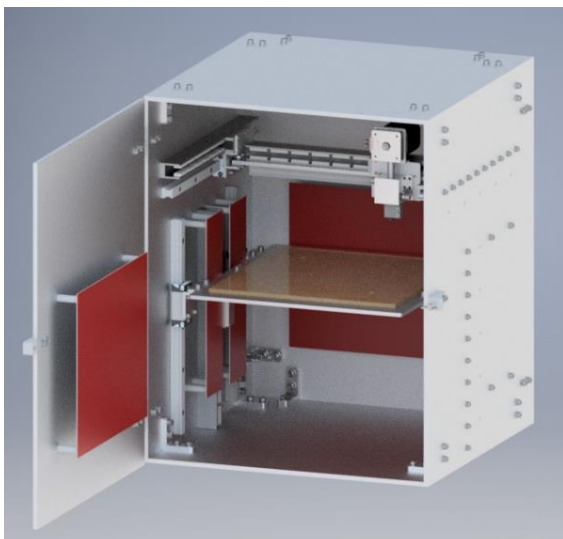


Figura 71 - Impressora e painéis infravermelhos, render 3D.

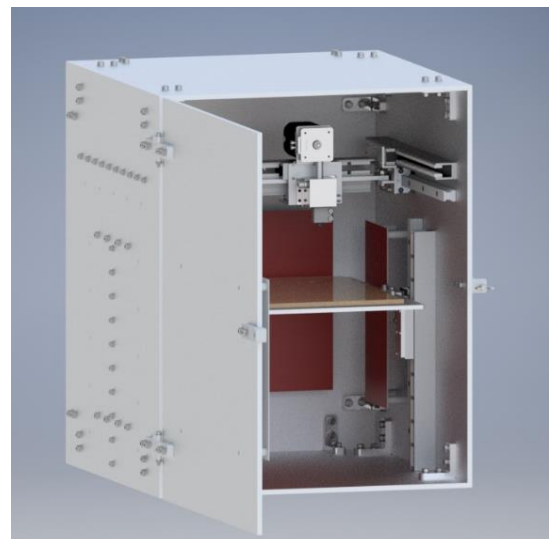


Figura 72 - Impressora e painéis infravermelhos, render 3D.

Para estimar a potência necessária para aquecer a peça impressa, têm de realizar-se testes termográficos ao processo de impressão, num ambiente de vácuo.

De forma a poupar energia e evitar o aquecimento desnecessário dos componentes constituintes da impressora, os painéis estão divididos em módulos. Com a análise termográfica em tempo real, verifica-se qual a parte da peça que necessita de aquecimento e, ligam-se os módulos ou modulo necessário, até se atingir a temperatura pretendida na peça.

#### 4.2.13 Conectores elétricos

O sistema de controlo está pensado para localizar-se no interior da EEI. Assim, para ligar-se o sistema de controlo aos componentes da impressora, seleccionaram-se conectores e cabos elétricos com a capacidade de suportar o ambiente espacial. O diagrama da figura 73 representa o esquema das ligações elétricas necessárias.

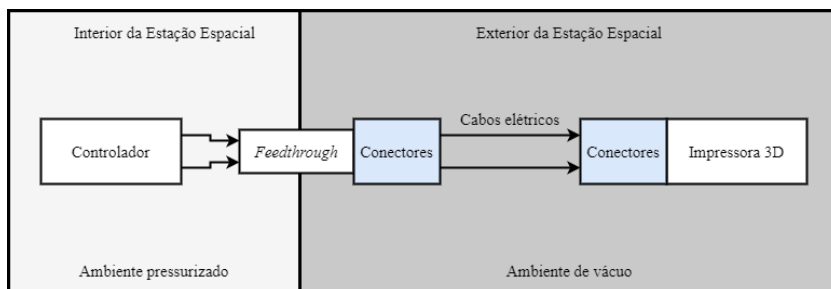


Figura 73 - Esquema ligações elétricas.

A empresa *GORE* possui cabos que são usados em diversos programas espaciais, incluindo a Estação Espacial Internacional e, por isso, de acordo com as especificações da agência espacial europeia - ESA. Para a transferência de potência usa-se um cabo identificado pelo modelo SPP – 600 V tensão máxima e corrente máxima de 24 a 150 A – e para a transferência de sinais um cabo do modelo SPM – tensão máxima de 600 V e corrente máxima de 0,09 a 9,30 A.

Relativamente aos conectores, a empresa *TEConnectivity* tem ao dispor conectores, também de acordo com as especificações requeridas pela ESA. A série *DBAS 7 - ESA/SCC QPL* tem correntes de funcionamento que vão dos 2,5 A aos até aos 46,0 A, tensão de funcionamento de 200 V e conectores com diferentes combinações de pinos – em tamanho e número.

Por fim, a empresa *Belilove Company-Engineers* fabrica um *feedthrough*, modelo BCE 550, de acordo com a norma NASA ASTM E595, que diz respeito ao *outgassing*. É possível integrar os cabos seleccionados anteriormente.

#### 4.2.13 Controlo

Para o controlo dos motores lineares escolheu-se um circuito em malhada fechada. Quando comparado com um circuito em malha aberta, possui uma maior precisão. Assim, optou-se por um circuito em malha fechada, que tem a configuração que pode ver-se na figura 74.

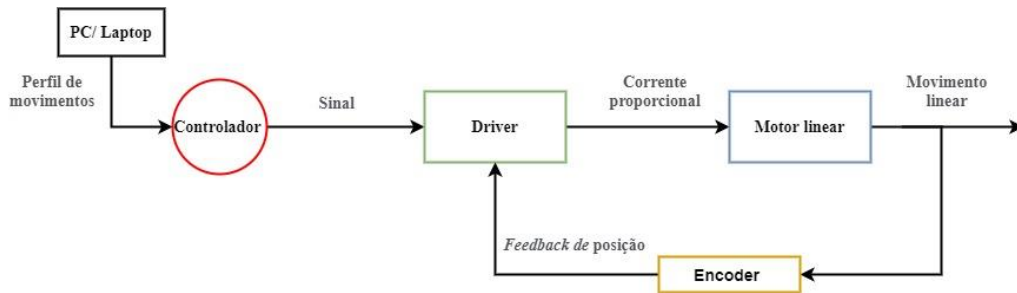


Figura 74 - Diagrama de controlo em malha fechada.

Dada experiência da empresa em dispositivos de fabrico aditivo, escolheu-se um sistema de controlo da empresa *Yaskawa*. O controlador seleccionado é o modelo MP3300iec e já possui processador incorporado. Consegue controlar até 8 eixos de movimento e comunica através dos protocolos de comunicação *OPC*, *EtherNet/IP* e *Modbus TCP*. A comunicação entre o controlador e os drivers é realizada através de *Mechatrolink-III*.

Os drives escolhidos para os motores lineares são o modelo SGDV 2R1F A 25 008000, também da *Yaskawa*. Estes drivers funcionam com motores lineares que possuem uma potência e corrente máxima de 200 W e 6,5 A, respetivamente – tendo assim as características necessárias para controlar os motores lineares escolhidos. O *encoder* linear conecta-se ao driver de cada eixo.

Uma vez que a estação espacial utiliza corrente contínua, é necessário um conversor DC-AC para alimentar os drivers dos motores em corrente alternada. O controlador e restantes periféricos têm uma tensão de alimentação de 24 VDC. Apesar de existir pelo menos um componente eléctrico a funcionar com corrente AC na EEI – um aspirador – optou-se por adicionar um conversor ao sistema [52]. O modelo ODS-750-7277 da empresa *Premium* possui uma potência de 750W, com uma tensão de entrada de 110 VDC e uma tensão de saída de 120 VAC.

Para controlar o motor passo a passo, usado no alimentador, a empresa fabricante do motor, *Arun Microelectronics*, fornece também um driver - modelo SMD210. Este driver está desenvolvido para otimizar o funcionamento do motor de modo a que este produza o menor calor possível. A comunicação faz-se através de uma interface RS232C.

Com o fim de existir comunicação entre o driver do motor passo a passo e o controlador, é necessária uma placa adicional - que se instala no controlador. A placa é identificada pelo código 218IF-Y1 e mune o controlador de comunicação por RS232C.

Outro modulo adicional, LIO-01, permite a entrada e saída de sinais digitais. No total podem adicionar-se dezasseis entradas e dezasseis saídas digitais. Estas saídas em conjunto com um relé de estado sólido, usam-se para controlar a resistência localizada no extrusor e na plataforma de impressão, e se necessário, outros dispositivos.

Com o objetivo de ler as temperaturas no extrusor e na plataforma de impressão é necessário, também, um modulo adicional para o controlador - 031-1LB90. Possui 2 inputs, permite ler sensores do tipo J, K, N, R, S, T, B, C, E, L, com tensões entre  $\pm 80$  mV. Os módulos adicionais são fornecidos pela *Yaskawa*.

De forma resumida, o esquema do sistema de controlo está disposto figura 75.

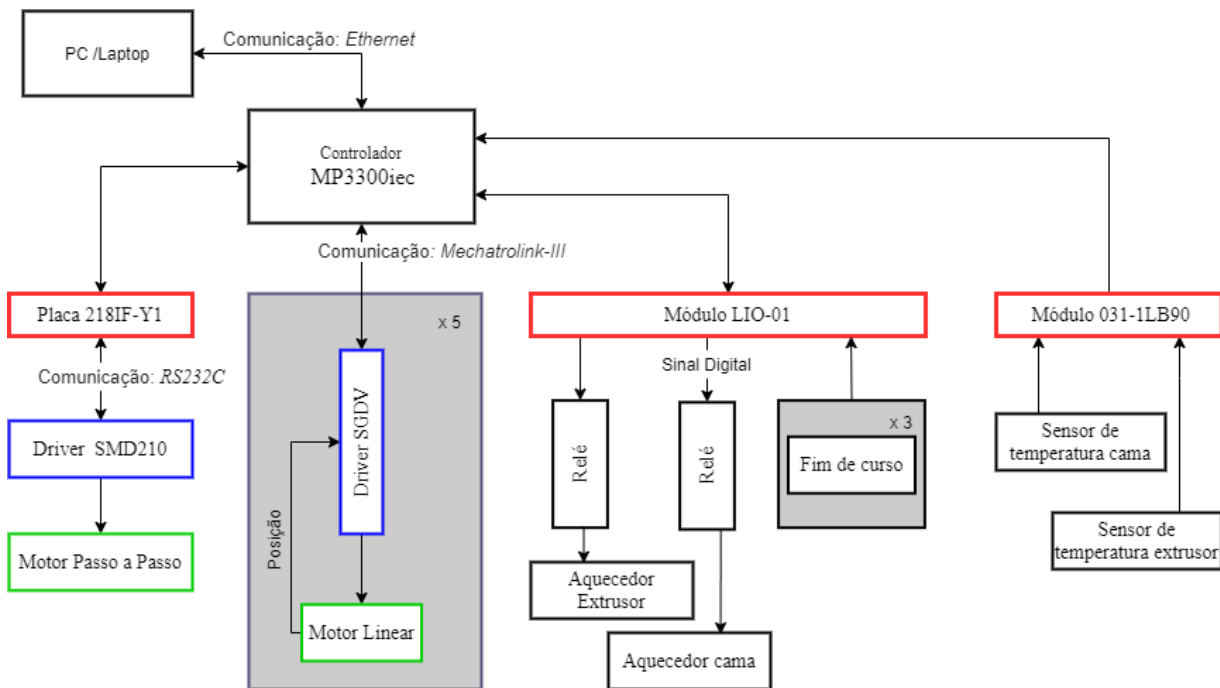


Figura 75– Configuração simplificada do hardware da impressora 3D.

Para o controlo de temperatura, no extrusor e na plataforma de impressão, usa-se um controlo proporcional integral derivativo (PID). Para ajudar na seleção correta de parâmetros para o controlador PID, utiliza-se *First Order Plus Dead-Time* (FOPDT).

#### 4.2.14 Considerações sobre a escolha de fabricantes

Além das empresas referidas anteriormente existem outras empresas que têm ao dispor componentes com características semelhantes aos escolhidos anteriormente.

Pode optar-se por outras empresas, desde que se garanta que os seus produtos conseguem desempenhar plenamente o papel para que foram projetados, nesta dissertação. Também, tem de se ter em conta as condições da Órbita Terrestre Baixa e as normas aplicáveis pelas agências espaciais.

Listam-se algumas empresas para os seguintes componentes:

- Motores passo a passo:
  - *Ducommun*
  - *Lin Engineering*
  - *Cobham Advanced Electronic Solutions*
- Guias lineares:
  - THK
  - SKF
  - HIWIN
- Motores lineares:
  - *Aerotech*
  - *Beckoff*
  - *Tecnotion*
- Bico extrusor em carboneto de tungsténio:
  - *3DMakerEngineering*
- Controlador e drivers:
  - ABB
  - *Beckoff*
- Conectores:
  - *Positronic*
  - *Glenair Space Systems*
  - *Harwin*
  - *Axon*
- Conversores DC/AC
  - *Helios Power Solutions*
  - *Eaton*
  - *ABSOPULSE Electronics*



## 5 Cálculos de Engenharia

Neste capítulo confirmam-se matematicamente algumas escolhas feitas no capítulo anterior.

Para garantir que a potência de arrefecimento fornecida pelo JEM-RMS é suficiente para impedir que o filamento atinja uma temperatura de transição vítrea, antes de chegar ao bloco de aquecimento, foi levada a cabo uma simulação, tendo em conta as temperaturas usadas no bloco de aquecimento para a impressão de PEEK.

Também, para assegurar que os motores lineares escolhidos são capazes de atingir determinados valores de aceleração e velocidade, foram efetuados cálculos, considerando os componentes e respetivas massas a mover.

Por fim, de modo a garantir que a estrutura suporta as forças de descolagem do vaivém espacial e as acelerações que ocorrem durante o processo de impressão, sem sofrer deformações fora do domínio elástico e com valores suficientemente baixos, efetuaram-se simulações.

### 5.1 Cálculo Energia de Arrefecimento Extrusor

Para esta simulação foi utilizado o *SolidWorks Flow Simulation*. Pretende-se que a temperatura, no ponto 1 da figura 76, seja inferior à temperatura de transição do filamento. No caso do PEEK, esta temperatura é de 143°C.

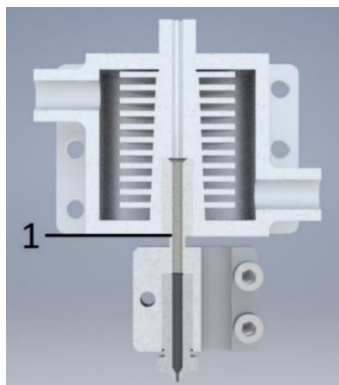


Figura 76 - Vista em corte do Extrusor.

Usou-se a equação da energia para calcular o calor necessário para o arrefecimento:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

Uma vez que o único objetivo da simulação é calcular a potência de arrefecimento necessária, na simulação usaram-se arbitrariamente os seguintes parâmetros:

- Fluido: água;
- Caudal: 0,05 kg/s;
- Temperatura entrada do fluido: 17,00 °C.

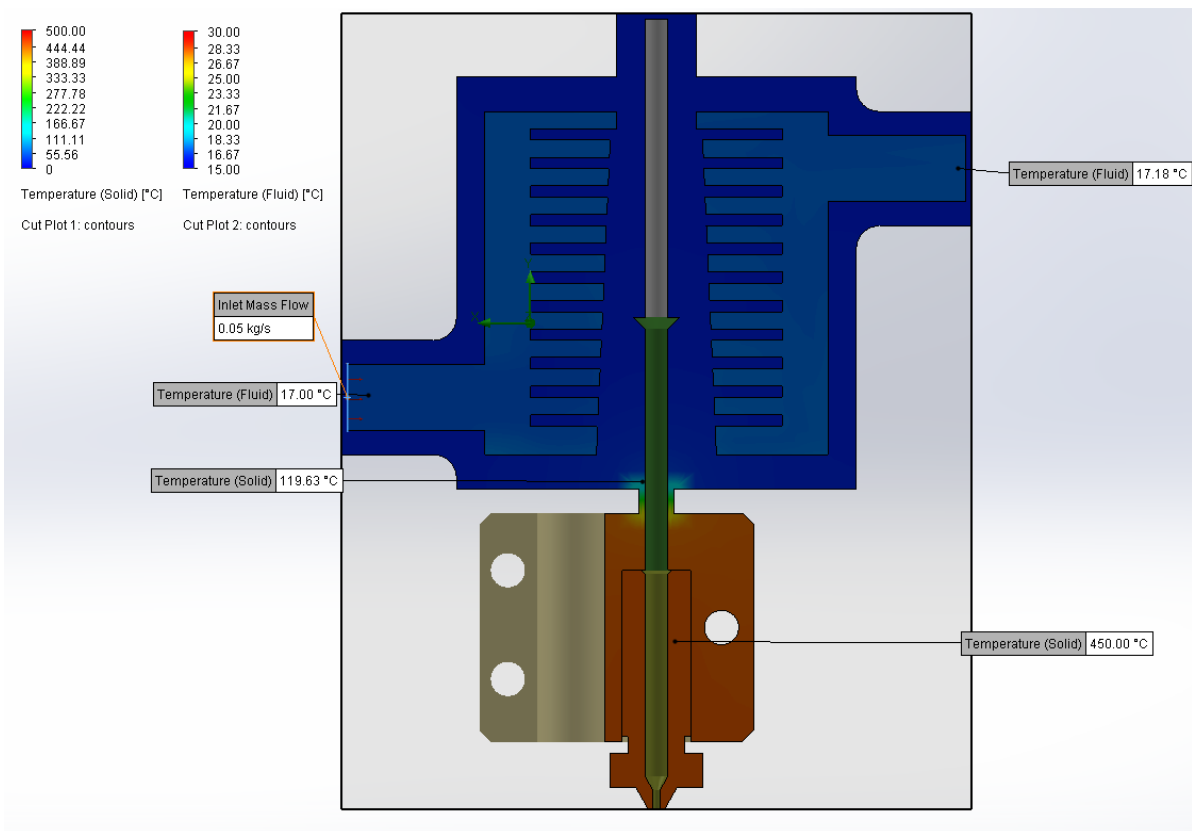


Figura 77- Dados após simulação

Após simulação, foi obtido o seguinte valor:

- Temperatura saída do fluido: 17,18°C

A água apresenta um cp de 4,19kJ/kg/K. Assim, a equação do calor vem:

$$\dot{Q} = 0,05 \frac{kg}{s} * 4,19 \frac{kJ}{kg * K} * ((17,18°C + 273,15K) - (17,00°C + 273,15K)) = 0,03771 kW$$

$$\dot{Q} = 37,71 W$$

Concluindo, a potência de arrefecimento necessária, 37,71 W, está abaixo da capacidade de arrefecimento do JEM-RMS, 3000-6000W.

Com este valor de potência de arrefecimento garantimos que o filamento PEEK não atinge uma temperatura de transição vítrea antes de chegar ao bloco de arrefecimento. A temperatura no *heatbreak*, conforme se pode observar na figura 67, é de 119,63°C. O PEEK tem uma temperatura de transição vítrea de 143°C.

## 5.2 Dimensionamento Motores Lineares

Os cálculos seguintes realizaram-se para que fosse possível atingir, nos eixos X e Y, uma velocidade e aceleração máxima de 400 mm/s e 2000 mm/s<sup>2</sup>, respetivamente, e no eixo Z uma aceleração de 1000 mm/s<sup>2</sup> e uma velocidade de 400 mm/s. Estes valores, são valores máximos de referência e, durante a impressão podem usar-se valores menores.

De forma a poder realizar testes de impressão em Terra e, assim conseguir criar perfis de impressão para um ambiente de vácuo, os cálculos seguintes tiveram em consideração a constante gravítica terrestre.

As características dos motores lineares, retiradas do catálogo do fabricante, encontram-se na tabela 14.

Tabela 14 - Especificações motores lineares

	Eixo X e Y	Eixo Z
Modelo motor	BLDM-A02	BLDM-B02
Comprimento	300,0 mm	300,0 mm
Força contínua	5,3 N	13,8 N
Força máxima	16,0 N	41,8 N
Resolução	1,0 µm	1,0 µm
Potência contínua	11 W	19,6 W
Potência @ 10% ciclo	99,0 W	177,0 W
Corrente contínua	1,7 A	2,1 A
Corrente @ 10% ciclo	5,1 A	6,3 A

### 5.3.1 Eixo X

Os motores do eixo X terão de mover os componentes listados na tabela 15.

Tabela 15 - Componentes do eixo X em movimento

Componente	Massa	Método de obtenção
Extrusor	0,108 kg	CAD
Motor passo a passo extrusor	0,610 kg	Fabricante
Alimentador	0,062 kg	CAD
Carruagem guia linear X	0,150 kg	Fabricante
Conector extrusor a motor linear	0,071 kg	CAD
Massa total a mover	1,051 kg	

A figura 78 representa o perfil de velocidades comumente usado para o dimensionamento de motores lineares. Trata-se de um perfil de velocidade trapezoidal onde no instante  $t_1$  ocorre uma aceleração até à velocidade pretendida, seguindo-se um momento de velocidade constante e aceleração nula -  $t_2$ - e por fim, desaceleração até se atingir uma velocidade nula -  $t_3$ .

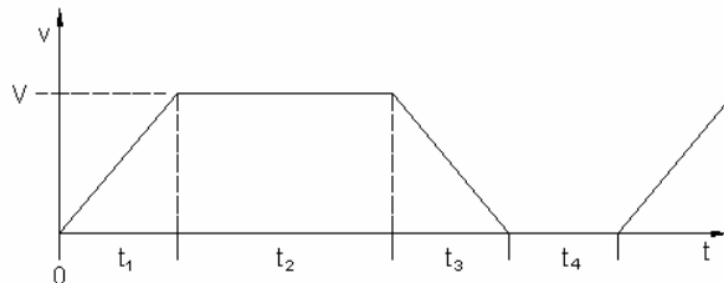


Figura 78 - Perfil de velocidade trapezoidal.

De forma a determinar a força necessária para acelerar ou desacelerar a massa que é necessária mover,  $F_1$  e  $F_3$ , respetivamente, utilizou-se a Segunda Lei de Newton:

$$F = m \times a$$

$$F = 1,20 * 2,00$$

$$F_1 = F_3 = 2,40 \text{ N}$$

Dado que no momento  $t_2$  a aceleração é nula, a força de atrito é a única força que os motores têm de superar. Devido ao seu valor reduzido foi desprezada.

$$F_2 = 0 \text{ N}$$

Para movimentos menores que uma determinada distância, o eixo X não consegue atingir uma velocidade de 400mm/s e, portanto, o valor de  $t_2$  é nulo. Os cálculos seguintes realizaram-se para determinar a distância mínima para qual o eixo X tem um perfil de velocidades trapezoidal:

$$v = a \times \Delta t$$

$$0.40 \text{ m/s} = 2,00 \text{ m/s}^2 \times \Delta t$$

$$\Delta t = 0,20 \text{ s}$$

Que, para os valores de aceleração escolhidos, corresponde a uma distância de:

$$d = d_o + v_o t + 0,50 \times a \times t^2$$

$$d = 0,50 \times 2,00 \times 0,20^2$$

$$d = 0,04 \text{ m} = 40 \text{ mm}$$

Assim, são necessários 40 mm para atingir uma velocidade de 400mm/s. Para distâncias menores a 80 mm, o perfil passa de trapezoidal para triangular. A figura 79 representa um perfil triangular.

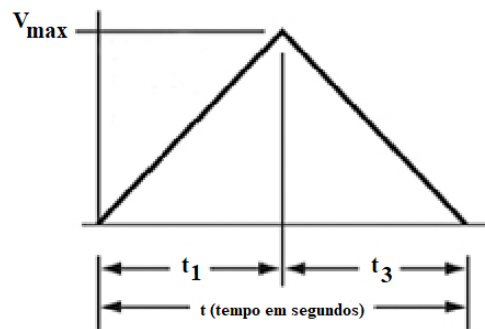


Figura 79 - Perfil de velocidades triangular.

Para o perfil triangular, a velocidade máxima depende da distância do movimento efetuado. No entanto, a força necessária para o movimento, mantém-se.

É necessário calcular a força RMS, de forma a saber qual a força média exigida para o motor. A força RMS é calculada pela seguinte formula:

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{F_1^2 \times t_1 + F_2^2 \times t_2 + F_3^2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

Dado que  $F_2 = 0 \text{ N}$ , a maior valor para a força RMS dá-se para o perfil triangular, onde  $t_2 = 0 \text{ s}$ .

Os valores de  $t_1$  e  $t_3$  podem variar entre 0,01 e 0,2 segundos. No entanto, para este intervalo de tempo, o valor da força RMS tem o mesmo valor. Deste modo:

$$F_{RMS} = 2,40 \text{ N} < 5,30 \text{ N}$$

Os motores seleccionados, BLDM-A02, possuem uma força continua de 5.30 N e uma força máxima de 16,00 N a um ciclo de 10%. Um ciclo a 10% significa que o motor está ligado durante 10% do ciclo.

Concluindo, o motor seleccionado tem a capacidade de movimentar o eixo X, com os valores de velocidade e aceleração pretendidos.

### 5.3.2 Eixo Y

Para o eixo Y seguiu-se o mesmo método de cálculos do que no eixo X.

A tabela 16 representa os componentes que os dois motores do eixo Y têm de mover.

Tabela 16 - Componentes do eixo Y em movimento.

Componente	Massa	Método de obtenção
Componentes eixo X	1,051 kg	
Rail guia linear	0,450 kg	Fabricante
Rail Motor Linear	1,100 kg	Fabricante
Motor Linear	0,220 kg	Fabricante
Barra conectora	0,160 kg	CAD
2x Placas conectoras	0,049 kg x 2	CAD
2x Carruagem guia linear Y	0,150 kg x 2	Fabricante
Massa total a mover	3,379 kg	

É necessária uma força  $F_1$  e  $F_3$  para acelerar ou desacelerar a massa, respetivamente.

Calculou-se:

$$F = m \times a$$

$$F = 3,50 \times 2,00$$

$$F_1 = F_3 = 7,00 \text{ N}$$

Tal como nos cálculos do eixo X, desprezou-se a força  $F_2$ .

De forma a calcular a força RMS, considerou-se o perfil de velocidades triangular, com um intervalo de 0.01 e 0.2 segundos para  $t_1$  e  $t_3$ , chegando-se ao seguinte valor:

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{F_1^2 \times t_1 + F_2^2 \times t_2 + F_3^2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

$$F_{RMS} = 7,00 \text{ N} < 10,6 \text{ N}$$

Tal como no eixo X, o tempo de duração escolhido, quando dentro dum perfil de velocidade triangular, não tem influência na força RMS

Uma vez que são usados dois motores no eixo Y, BLDM-A02, cada um com uma força contínua de 5.3 N. Assim, o conjunto apresenta com uma força contínua de 10.6 N e uma força máxima de 32 N a um ciclo de 10%, concluindo-se então que os motores seleccionados têm a capacidade de movimentar o eixo Y com a velocidade e aceleração pretendida.

### 5.3.3 Eixo Z

Em aplicações verticais é necessário o uso de um contrapeso para anular o efeito da força gravítica, impedindo assim o movimento do motor no caso de uma falha de energia. O uso do contrapeso apenas é necessário durante o funcionamento em Terra e tem de ser removido para que o dispositivo funcione num ambiente de microgravidade.

Os componentes constituintes do eixo Z estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17 - Componentes do eixo Z.

Componente	Massa	Método de obtenção
Plataforma de impressão	1,205 kg	CAD
Conectores plataforma de impressão	0,030 kg x 4	CAD
Conectores motores lineares	0,019 kg x 2	Fabricante
Placa PEI	0,572 kg	CAD
3x Carruagem guia linear	0,150 kg x 3	Fabricante
Resistência elétrica	0.050 kg	Fabricante
Massa total	2,370 kg	

Para eixo Z selecciona-se uma aceleração máxima de  $1 \text{ m/s}^2$ . A distância percorrida pelo eixo Z, no processo de impressão, é reduzida e, por norma, é necessário mover mais massa do que nos eixos X e Y.

Com esta aceleração é possível alternar entre camadas, para uma camada de 0.6 mm, em:

$$\begin{aligned}d &= d_o + v_o t + 0,50 \times a \times t^2 \\d - d_o &= 0,50 \times a \times t^2 \\0,0003 \text{ m} &= 0,50 \times 1,00 \text{ m/s}^2 \times t^2 \\t_{\text{aceleração}} &= t_{\text{desaceleração}} = 0,024 \text{ s} \\t_{\text{total}} &= t_{\text{aceleração}} + t_{\text{desaceleração}} = 0,048 \text{ s}\end{aligned}$$

Para a mudança de camadas, trata-se de um tempo suficiente.

Posto isto, no eixo Z, são feitas duas verificações, para dois casos distintos:

- Funcionamento em Terra
- Funcionamento em microgravidade

Uma vez que a altura de uma camada, no processo FDM/FFF, varia, tipicamente, dos 0.10 a 0.6 mm, o perfil de velocidades usado tem uma representação triangular, figura 80 - como demonstrado anteriormente, para movimentos menores a 80 mm, o perfil de velocidades é triangular.

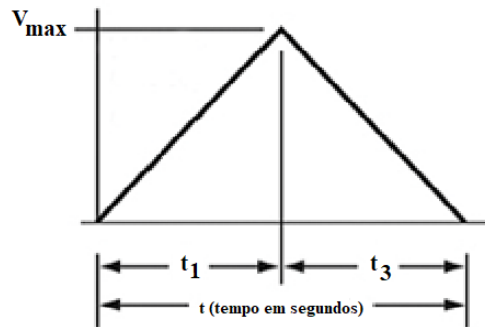


Figura 80 - Perfil de velocidades triangular.

A massa total que os motores têm de mover, com o contrapeso necessário, é:

$$\begin{aligned}M_{\text{total}} &= 2 \times \text{massa}_z \\M_{\text{total}} &= 2 \times 2,37 \text{ kg} \\M_{\text{total}} &= 4,74 \text{ kg}\end{aligned}$$

Calcularam-se as forças necessárias para aceleração e desaceleração,  $F_1$  e  $F_2$ , respetivamente. Dado que o contrapeso anula a força gravítica, vem:

$$F = m \times a_{movimento} + m \times a_{gravitica}$$

$$F = 4,74 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

$$F_1 = F_2 = 4,74 \text{ N}$$

Para um perfil triangular, tal como no eixo X e Y, a força RMS é:

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{F_1^2 \times t_1 + F_2^2 \times t_2 + F_3^2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

$$F_{RMS} = 4,74 \text{ N} < 27,60 \text{ N}$$

Usam-se dois motores no eixo Z, ficando o conjunto com uma força continua de 27,60 N e uma força máxima de 83,60 N a um ciclo de 10%.

Para esta configuração, calculou-se a força disponível antes de os motores ultrapassarem a sua capacidade:

$$Força_{disponível} = Força_{motores} - Força_{RMS}$$

$$Força_{disponível} = 27,60 \text{ N} - 4,74 \text{ N}$$

$$Força_{disponível} = 22,86 \text{ N}$$

De seguida, calculou-se a massa máxima da peça que é possível fabricar, para testes em Terra, antes de os motores ultrapassarem a sua capacidade máxima:

$$F_{disponível} = m_{peça} \times a_{movimento} + m_{peça} \times a_{gravitica}$$

$$22,86 \text{ N} = m_{peça} \times 1,00 \text{ m/s}^2 + m_{peça} \times 9,80 \text{ m/s}^2$$

$$m_{peça} = 2,11 \text{ kg}$$

Para efeitos de teste, em Terra, a massa que pode ser impressa é suficiente e permite testar as funcionalidades necessárias para criar perfis de impressão otimizados.

No que diz respeito ao funcionamento em microgravidade, a capacidade de utilizar todo o volume de impressão é fundamental. A impressora tem um volume de impressão de 270 x 270 x 270 mm e o filamento PEEK tem uma densidade de 1,26 g/cm<sup>3</sup> [53]. Assim, as peças impressas têm no máximo uma massa de 24,80 kg.

Somando a massa dos componentes do eixo Z, a massa total máxima é:

$$m_{total\ max.} = m_{componentes} + m_{peça\ max.}$$

$$m_{total\ max.} = 24,80\ kg + 2,37\ kg$$

$$m_{total\ max.} = 27,17\ kg$$

Na ISS, a aceleração gravítica é considerada nula. Portanto, as forças necessárias para aceleração e desaceleração,  $F_1$  e  $F_2$  são:

$$F = m_{total\ max.} \times a_{movimento} + m_{total\ max.} \times a_{gravitica}$$

$$F = 27,17\ kg \times 1,00\ m/s^2$$

$$F_1 = F_2 = 27,17\ N$$

De seguida calculam-se, tendo em conta o perfil triangular de velocidade, a força RMS:

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{F_1^2 \times t_1 + F_2^2 \times t_2 + F_3^2 \times t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

$$F_{RMS} = 27,17\ N < 27,60\ N$$

De notar que, apesar destes valores serem próximos, para se atingir uma peça com esta massa seria necessário imprimir um cubo com 270 mm de aresta e um *infill* de 100%.

Os motores seleccionados, dois motores BLDM-B02, cada um com uma força contínua de 13.8 N e uma força máxima de 41.8 N, possuem em conjunto uma força contínua de 27.6 N e uma força máxima de 83.6 N a um ciclo de 10%.

Concluindo, em ambiente de microgravidade, os motores têm a capacidade de movimentar a plataforma de impressão e respetiva peça à velocidade e aceleração pretendida. Para efeitos de teste, em Terra, possuem a capacidade de imprimir peças com uma massa máxima de 2.11 kg.

### 5.3.3 Considerações sobre perfis de velocidade

Os cálculos apresentados neste subcapítulo têm para consideração o uso um perfil de velocidades triangular e trapezoidal.

No entanto, de forma a diminuir as reduções bruscas de aceleração e, conseqüentemente, conseguir um funcionamento mais suave, um perfil de aceleração S-curve deve usar-se. Uma comparação entre estes dois perfis encontra-se na figura 81.

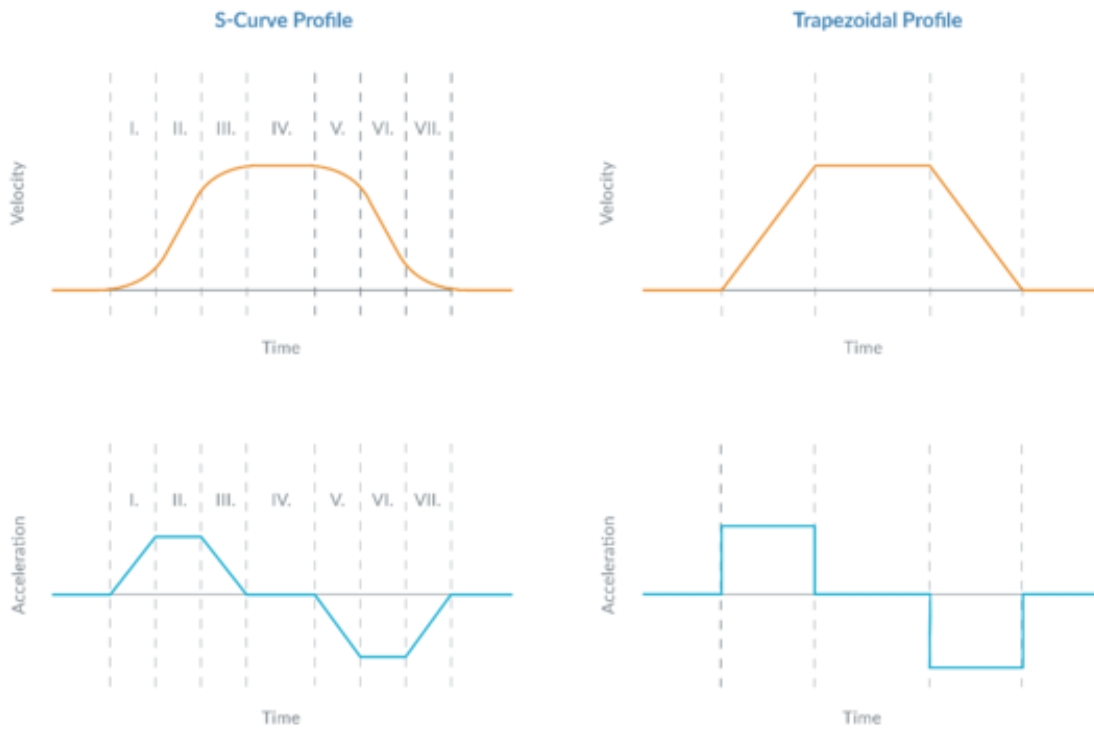


Figura 81 - Comparação entre perfil S-curve e trapezoidal [54].

Num perfil trapezoidal, a taxa de variação da aceleração é infinita - parâmetro denominado de *jerk*.

Por outro lado, num perfil *S-curve*, a variação da aceleração é constante ao longo do tempo. Desta maneira, consegue-se um sistema com menos vibrações e assim, uma melhor qualidade de impressão.

### 5.3 Dimensionamento Guias Lineares

De forma a escolher os guias lineares apropriados, calcularam-se as forças que estes necessitam de suportar

#### 5.3.1 Eixo X

O eixo X é constituído por uma guia linear que suporta a montagem do extrusor. A massa total destes componentes é de 1,051 kg – valor calculado anteriormente, na tabela 15.

Na figura 82 e 83 é possível observar as cargas a que os patins podem estar sujeitos. A carga  $C$  corresponde à carga dinâmica e  $C_0$  corresponde à carga estática.  $M_t$  e  $M_l$  correspondem ao momento dinâmico e  $M_{T0}$  e  $M_{L0}$  ao momento estático.

Os patins escolhidos, da *Bosh Rexroth* possuem pontos de contacto a 45° e, portanto, podem suportar forças em todas as quatro direções, de forma igual.

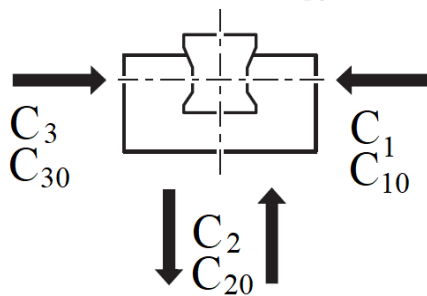


Figura 82 - Forças aplicadas nos patins lineares.

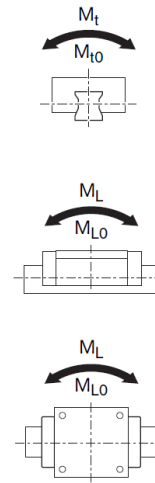


Figura 83 - Momentos aplicados nos patins lineares.

As forças  $C_1$  e  $C_2$  são as forças provocada pela aceleração do eixo Y no patim linear do eixo X. Em qualquer momento do movimento, apenas uma força atua no patim. O valor máximo destas duas forças é igual. Assim, considerando a aceleração máxima de  $2 \text{ m/s}^2$  do eixo Y, a força  $C_1$  vem:

$$C_1 = m_{eixo X} \times a_{eixo Y}$$

$$C_1 = 1,05 \text{ kg} \times 2,00 \text{ m/s}^2$$

$$C_1 = 2,10 \text{ N}$$

Considerando aceleração gravítica, calcula-se  $C_2$ :

$$C_2 = m_{eixo X} \times a_{gravítica}$$

$$C_2 = 1,05 \text{ kg} \times 9,98 \text{ m/s}^2$$

$$C_2 = 10,49 \text{ N}$$

Estão aplicadas diferentes forças, no patim linear do eixo X, com os valores e pontos de aplicação que se podem observar na tabela 18.

Tabela 18 -Forças aplicadas no patim linear do eixo X.

	Valor	Ponto de Aplicação	Direção
Força Motor Linear	$F_{Motor} = 16,00 \text{ N}$	Motor Linear	Eixo X
Força Gravítica	$F_g = C_2 = 10,49 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo Z
Força provocada pelo movimento do eixo Y	$F_y = C_1 = 2,10 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo Y
Força provocada pelo movimento do eixo X	$F_x = m_{eixo X} \times a_{eixo X} = 2,10 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo X

Através do modelo CAD 3D, calcularam-se as distâncias do centro de massa do conjunto ao ponto de montagem do motor linear e do patim linear.

Nas figuras 84, 85 e 86 estão representadas as forças aplicadas e as distâncias do ponto de aplicação ao centro do patim linear.

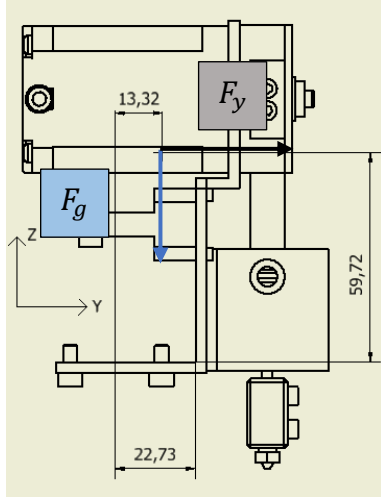


Figura 84 - Distância do centro de massa e do motor linear ao patim.

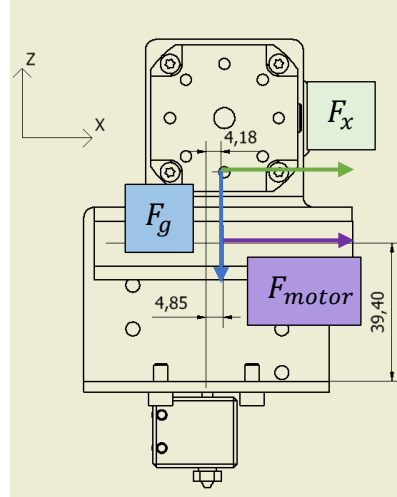


Figura 85 - Distância do centro de massa e do motor linear ao patim.

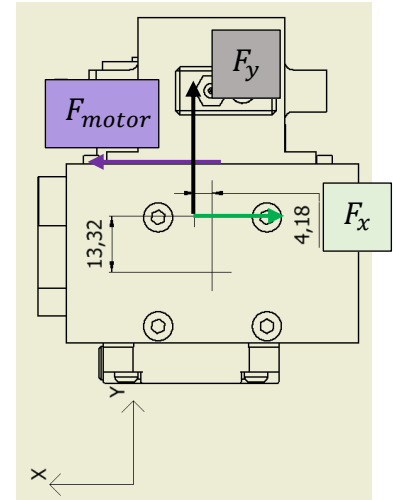


Figura 86 - Distância do centro de massa e do motor linear ao patim.

As distâncias do motor linear e do centro de massa dos componentes ao patim da guia linear, retiradas das figuras 84, 85 e 86, estão representadas na tabela 19.

Tabela 19 - Distância do motor linear e do centro de massa ao patim do guia linear.

Distância	Distância X	Distância Y	Distância Z
Motor Linear	4,85 mm	23,73 mm	39,40 mm
Centro de Massa	4,18 mm	13,32 mm	59,72 mm

De seguida, calcularam-se os momentos:

$$M_x = F_y \times \text{distância}_z + F_g \times \text{distância}_y$$

$$M_x = 2,10 \text{ N} \times 5,97 \times 10^{-2} \text{ m} + 10,49 \text{ N} \times 1,33 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$M_x = 0,27 \text{ Nm}$$

$$M_y = F_{motor} \times \text{distância}_z + F_g \times \text{distância}_x + F_x \times \text{distância}_z$$

$$M_y = 16,00 \text{ N} \times 3,94 \times 10^{-2} \text{ m} + 10,49 \text{ N} \times 4,85 \times 10^{-3} \text{ m} + 2,10 \text{ N} \times 5,97 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$M_y = 0,95 \text{ Nm}$$

$$M_z = F_{motor} \times \text{distância}_y + F_y \times \text{distância}_z + F_x \times \text{distância}_y$$

$$M_z = 16,00 \text{ N} \times 2,27 \times 10^{-2} \text{ m} + 2,10 \text{ N} \times 4,85 \times 10^{-3} \text{ m} + 2,10 \text{ N} \times 2,27 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$M_z = 0,40 \text{ Nm}$$

De acordo com a figura 82 e 83, vem:

$$C_{total} = 10,49 N + 2,10 N = 12,59 N$$

$$M_L = M_Y + M_Z \text{ e } M_T = M_X$$

$$M_L = 0,95 + 0,40 = 1,35 Nm \text{ e } M_T = 0,27 Nm$$

As características dos blocos lineares seleccionados, R1622 192 22, da Bosch Rexroth, apresentam-se na tabela 20.

Tabela 20 - Bloco para guia linear seleccionado.

Modelo	C máximo	$M_t$ máximo	$M_l$ máximo
R1622 193 22	8850 N	85 Nm	62 Nm

Assim, é possível concluir que o patim seleccionado tem a capacidade de suportar as forças e os momentos nele aplicado.

### 5.3.2 Eixo Y

O eixo Y é constituído por duas guias lineares que suportam todos os componentes do eixo X e do extrusor.

Estes duas guias lineares suportam todos os componentes contituíntes do eixo X e Y. Estes componentes apresentam uma massa total de 3,379 kg – valor já calculado anteriormente, na tabela 16 e 17. Destes 3,379 kg, 1,100 kg movem-se apenas na direcção do movimento na guia linear em questão, eixo Y, e os restantes 2,279 kg movem-se nos eixos X e Y.

Na figura 87 e 88 estão representadas as forças e momentos a que os patins das guias lineares pode estar sujeitos.

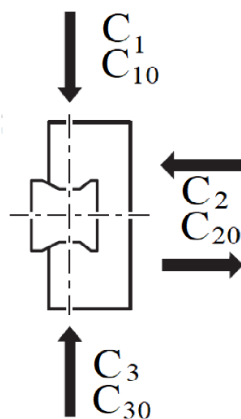


Figura 87 - Forças aplicadas nos patins dos guias lineares.

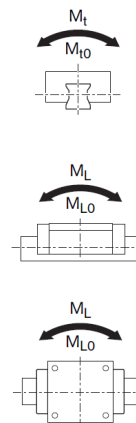


Figura 88 - Momentos aplicados nos patins dos guias lineares.

A força  $C_1$  é o somatório do efeito que a gravidade tem nas massas dos componentes moveis:

$$C_1 = m \times a_{gravitica}$$

$$C_1 = 1,10 \text{ kg} \times 9,98 \text{ m/s}^2 + 2,28 \times 9,98 \text{ m/s}^2$$

$$C_1 = 33,72 \text{ N}$$

O movimento ao longo do eixo X causa uma força  $C_2$ , nos patins do eixo Y:

$$C_2 = m \times a_{eixo Y}$$

$$C_2 = 2,28 \times 2,00 \text{ m/s}^2$$

$$C_2 = 4,56 \text{ N}$$

Para calcular os momentos a que os patins estão sujeitos teve-se primeiramente em consideração os componentes que constituem a massa de 2,279 kg – componentes constituintes do eixo Y. Na tabela 21 estão as forças aplicadas nestes componentes, o seu valor e ponto de aplicação.

Tabela 21 – Forças aplicadas no patim do eixo Y, devido à massa de 1.100 kg.

	Valor	Ponto de Aplicação	Direção
Força Motores Linear Y	$F_{Motor} = 16,00 \text{ N}$	Motor linear 1 e 2	Eixo Y
Força Gravítica	$F_g = m \times a_g = 22,33 \text{ N}$	Centro Massa	Eixo Z
Força gerada pelo movimento em Y	$F_Y = m \times a_{eixo Y} = 4,56 \text{ N}$	Centro Massa	Eixo Y

Com o recurso ao modelo CAD 3D, calcularam-se as distâncias do centros de massa da eixo Y ao patim linear, tal como se observa nas figuras 89, 90 e 91.

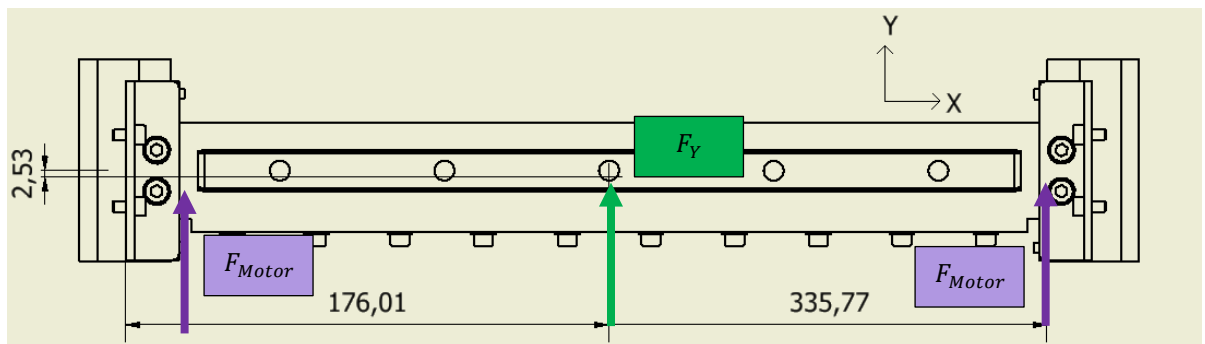


Figura 89 - Distância do centro de massa ao patim linear da guia linear do eixo Y.

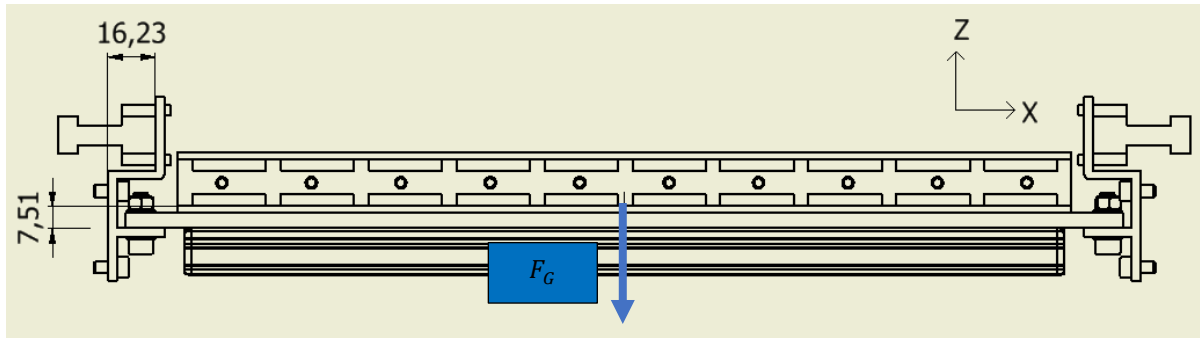


Figura 90 - Distância centro de massa ao patim da guia linear, nos eixos X e Z.

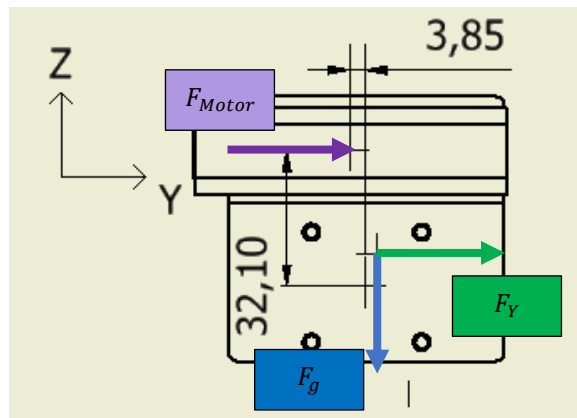


Figura 91 – Distância, nos eixos Z e Y, do centro de massa ao patim da guia linear.

Na tabela 22 estão dispostas as distâncias do centro de massa do conjunto e dos motores lineares aos patins das guias lineares, retiradas das figuras 89, 90 e 91.

Tabela 22 - Distância dos centros de massa aos patins lineares

Distância	Distância X	Distância Y	Distância Z
Centro de massa	176,01 mm	2,53 mm	7,51 mm
Motor linear	16,23 mm	3,85 mm	32,10 mm

De seguida calcularam-se os momentos:

$$M_X = F_{motor} \times distância_z + F_{motor} \times distância_z + F_y \times distância_z + F_g \times distância_x$$

$$M_X = 16,00 \text{ N} \times 3,20 \times 10^{-2} \text{ m} + 16,00 \text{ N} \times 3,20 \times 10^{-2} \text{ m} + 4,56 \text{ N} \times 7,50 \times 10^{-3} \text{ m} + 22,33 \text{ N} \times 2,50 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$M_X = 1,12 \text{ Nm}$$

$$M_Z = F_y \times distância_x + F_{motor} \times distância_x + F_{motor} \times distância_x$$

$$M_Z = 4,56 \text{ N} \times 0,17 \text{ m} + 16,00 \text{ N} \times 0,02 \text{ mm} + 16,00 \text{ N} \times 0,34 \text{ m}$$

$$M_Z = 6,43 \text{ Nm}$$

Relativamente aos momentos aplicados, uma vez que são usados dois patins lineares, um de cada lado da impressora, o momento  $M_y$  é nulo.

$$M_y = 0 \text{ Nm}$$

Passando agora para a segunda massa, de 1,10 kg. Nos componentes que constituem o eixo X estão aplicadas as forças da tabela 23.

Tabela 23 - Forças nas guias lineares do eixo Y.

	Valor	Ponto de Aplicação	Direção
Força gerada pelo movimento do eixo Y	$F_y = m \times a_{eixoY} = 2,20 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo Y
Força gerada pelo movimento do eixo X	$F_x = m \times a_{eixoX} = 2,20 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo X
Força Gravítica	$F_g = m \times a_{gravidade} = 10,78 \text{ N}$	Centro de Massa	Eixo Z

Nas figuras 92, 93 e 94 estão representadas as distâncias entre os patins linear do eixo Y e o patim linear do eixo X.

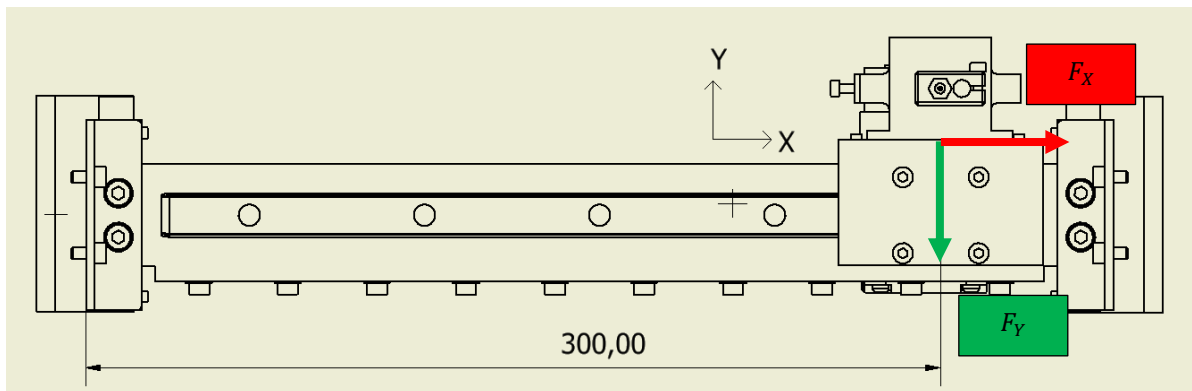


Figura 92 – Distância máxima, nos planos X e Y, entre os patins das guias lineares.

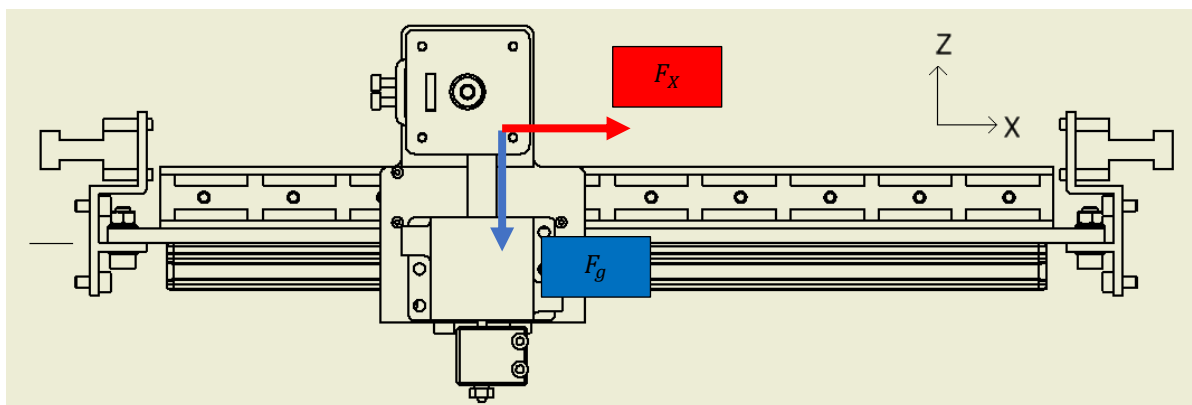


Figura 93 - Distância, nos planos Z e X, entre os patins da guia lineares.

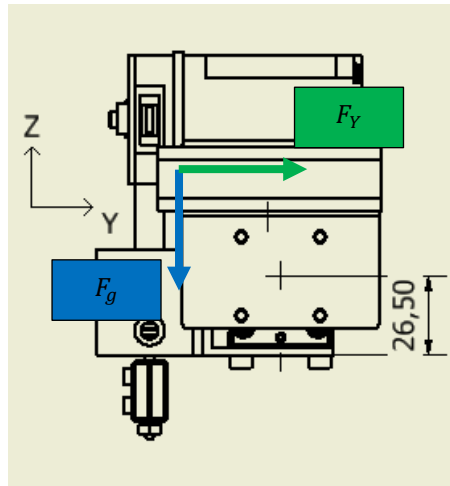


Figura 94 - Distância, nos planos Z e Y, entre os patins das guias lineares.

Retiradas das figuras 92, 93 e 94, as distâncias do patim da guia linear do eixo X ao patim da guia linear do eixo Y encontram-se na tabela 24.

Tabela 24 - Distâncias entre os patins lineares dos eixos X e Y.

	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Distância	$55,50 < d < 300,00 \text{ mm}$	0 mm	26,50 mm

Depois de adicionadas as distâncias do centro de massa do eixo X, retiradas da tabela 19, chega-se à distância entre o patim da guia linear do eixo Y e o centro de massa – tabela 25.

Tabela 25 – Distância entre patim linear do eixo Y e centro de massa.

	Distância X	Distância Y	Distância Z
Centro de Massa	$59,68 < d < 304,18 \text{ mm}$	13,32 mm	65,90 mm

$$M_x = F_y \times \text{distância}_z + F_g \times \text{distância}_y$$

$$M_x = 2,20 \text{ N} \times 6,60 \times 10^{-2} \text{ m} + 10,78 \text{ N} \times 0,00 \text{ m}$$

$$M_x = 0,15 \text{ Nm}$$

$$M_y = 0 \text{ Nm}$$

$$M_z = F_x \times \text{distância}_y + F_y \times \text{distância}_{\text{máxima em x}}$$

$$M_z = 2,20 \text{ N} \times 1,30 \times 10^{-2} \text{ m} + 2,20 \text{ N} \times 0,30 \text{ m}$$

$$M_z = 0,70 \text{ N}$$

Deste modo, os momentos que se verificam nos dois patins, estão na tabela 26.

Tabela 26 - Momentos totais nos patins do eixo Y.

	Momento em X	Momento em Y	Momento em Z
Massa 1	1,12 Nm	0,00 Nm	6,43 Nm
Massa 2	0,15 Nm	0,00 Nm	0,70 Nm
<b>Total</b>	<b>1,27 Nm</b>	<b>0,00 Nm</b>	<b>7,13 Nm</b>
Em cada patim	0,64 Nm	0,00 Nm	3,66 Nm

Assim, vem:

$$M_t = M_y = 0 \text{ Nm}$$

$$M_l = M_x + M_z = 4,29 \text{ Nm}$$

As características dos patins lineares selecionados, R1622 192 22, da Bosch Rexroth, apresentam-se na tabela 27. Estes patins operar em conjunto com um guia de tamanho 15.

Tabela 27 – Características do patim selecionado.

Modelo	C máximo	$M_t$ máximo	$M_l$ máximo
R1622 193 22	8850 N	85 Nm	62 Nm

Assim, conclui-se que os patins selecionados têm a capacidade de suportar as forças e os momentos neles aplicados.

### 5.3.3 Eixo Z

No eixo Z, utilizam-se três guias lineares para orientar a plataforma de impressão ao longo do eixo Z, como demonstrado anteriormente, no capítulo 4.2.3. Ao usar-se esta configuração, os momentos aplicados nos patins das guias lineares têm o valor zero. As únicas forças aplicadas à plataforma, durante o processo de impressão, são aplicadas pelos motores lineares e pela massa da peça que está a ser construída e, têm a direção do eixo Z. Na direção X e Y não são aplicadas nenhuma forças. Assim, o valor de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  é igual a zero.

Deste modo, os patins selecionados suportam as solicitações a que o eixo Z da impressora está sujeito.

## 5.4 Solicitação da estrutura durante o lançamento

É fundamental que os objetos transportados para o ambiente espacial suportem as forças que ocorrem durante a descolagem do veículo espacial. Durante esta viagem, o veículo é exposto a cargas dinâmicas e estáticas. Tais excitações podem dever-se ao sistema de propulsão da nave ou ter origem aerodinâmica – vento, por exemplo.

Para o foguetão usado pela Agência Espacial Europeia, *Ariane 6*, as acelerações verificadas durante as fases críticas do voo estão expostas na tabela 28.

Tabela 28 - Acelerações verificadas durante eventos críticos do voo [55].

Aceleração (g)	Longitudinal	Lateral	
Eventos	Estática	Estática + Dinâmica	
<i>Lift-Off</i>	-2,0	±2,0	
<i>Aerodynamic phase</i>	-2,8	±2,0	Estudo 1
<i>Pressure oscillations</i>	-4,6	±1,0	Estudo 2
<i>ESR jettisoning</i>	-0,9	±0,9	
<i>LLPM</i>	-2,9	±0,5	
<i>ULPM</i>	-3,1	±0,5	

Existem dois momentos em que as acelerações laterais e longitudinais atingem valores máximos. Para ter uma ideia da deformação que ocorre no dispositivo, durante estes dois momentos, foram realizados dois estudos de análise de tensão, no *Autodesk Inventor*, onde a impressora 3D foi sujeita às forças de aceleração verificadas.

Assim, para o teste número um, em que aceleração lateral é máxima, utilizaram-se os seguintes valores:

$$a_{eixo Z} = g \times 2.80 = 27,44 \text{ m/s}^2$$

$$a_{eixo Y} = g \times 2.00 = 19,60 \text{ m/s}^2$$

$$a_{eixo X} = g \times 2.00 = 19,60 \text{ m/s}^2$$

E para o teste número dois, onde a aceleração longitudinal é máxima utilizaram-se:

$$a_{eixo Z} = g \times 4.60 = 45,08 \text{ m/s}^2$$

$$a_{eixo Y} = g \times 1.00 = 9,80 \text{ m/s}^2$$

$$a_{eixo X} = g \times 1.00 = 9,80 \text{ m/s}^2$$

De forma a minimizar as forças na estrutura, considerou-se que a impressora é transportada como representado nas figuras 95 e 96 e que a superfície apoiada é fixa.

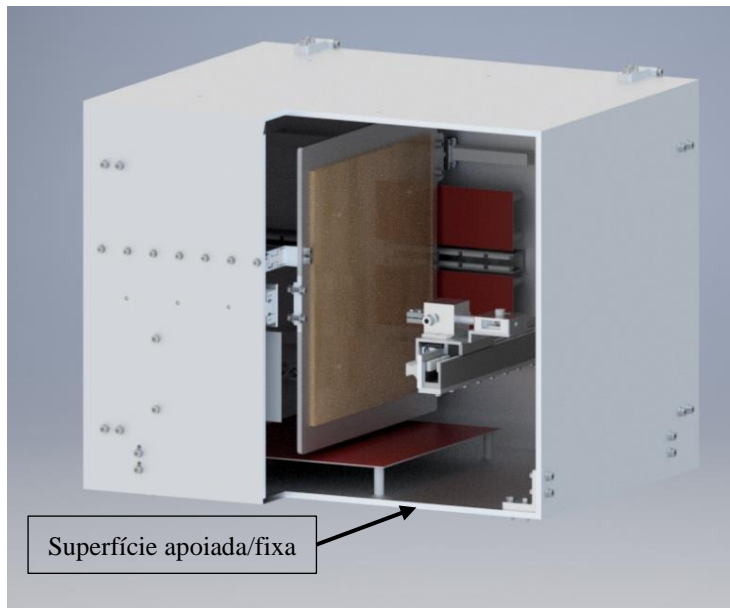


Figura 95 - Vista em corte, superfície apoiada/fixa durante o transporte.

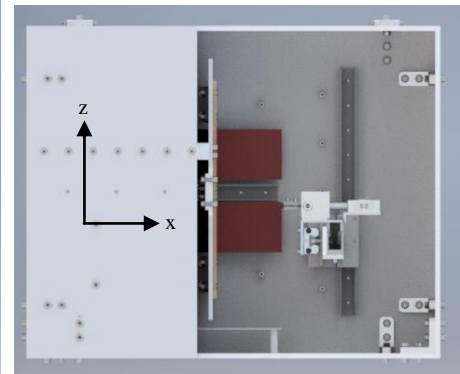


Figura 96 - Referencial usado na simulação.

Os valores resultantes do estudo um e dois, encontram-se na tabela 29.

Tabela 29 - Resultados do estudo de tensões para as acelerações de lançamento.

Nome	Estudo nº 1		Estudo nº2	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Tensão de <i>Von Mises</i>	0	9,78 MPa	0 MPa	30,03 MPa
Primeira tensão principal	-3,45 MPa	11,92 MPa	-10,89 MPa	29,689 MPa
Terceira tensão principal	-12,98 MPa	3,06 MPa	-36,06 MPa	3,857 MPa
Deslocamento	0,00 mm	0,05 mm	0,00 mm	0,0756441 mm
Fator de segurança	11,00	15,00	8,00	15,00
Deformação equivalente	0	$8,00 \times 10^{-5}$	0	$1,30 \times 10^{-4}$
Primeira deformação principal	0	$9,60 \times 10^{-5}$	0	$1,40 \times 10^{-4}$
Terceira deformação principal	0	$1,00 \times 10^{-6}$	0	$6,00 \times 10^{-6}$

Pelos valores apresentados, garante-se que os componentes constituintes não atingem valores de tensão que levam a uma deformação permanente da estrutura. Os fatores de segurança são elevados e os valores de deslocamento e as deformação são baixos.

Para imobilizar os componentes dos eixos X, Y e Z é necessário usarem-se travões, que se aplicam nos guias linear. O sistema de imobilização apresentado anteriormente, no capítulo 4.2.3, não tem a capacidade de suportar as forças de lançamento.

A mesma empresa que fornece as guias lineares, Bosch Rexroth, tem disponíveis travões lineares. O travão em questão está representado na figura 97.

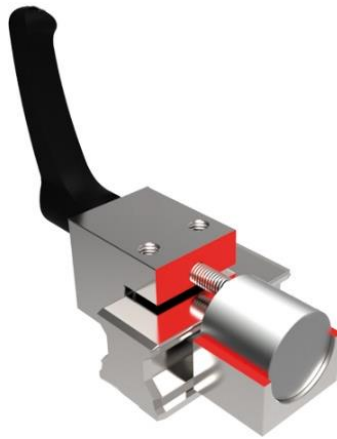


Figura 97 - Travão para guia linear [56].

O modelo escolhido, R161914282, possui uma força de travagem de 1200N.

Tendo em conta a maior massa que o travão suporta e a aceleração máxima que se verifica durante a descolagem calcula-se a força máxima:

$$F_{m\acute{a}xima} = massa_{eixo\ z} \times a_{m\acute{a}xima}$$

$$F_{m\acute{a}xima} = 2,40\ kg \times 45,08\ m/s^2$$

$$F_{m\acute{a}xima} = 108,19\ N$$

Assim, considerando que se aplica um travão por eixo, verifica-se que o travão é capaz de imobilizar os componentes durante a descolagem do veículo espacial.

Os travões apenas são necessários para a descolagem. Para ser possível iniciar o processo de impressão remotamente, uma vez em órbita estes travões são removidos, passando o bloqueio dos eixos a fazer-se pelo sistema de imobilização referido no capítulo 4.2.3.

## 5.5 Solicitação da estrutura durante a impressão

No *Autodesk Inventor*, sujeitam-se os apoios dos motores lineares à força máxima de cada motor, de forma a aferir a deformação que se verifica na estrutura da impressora 3D. Na figura 98 e 99 podem observar-se as forças aplicadas ao modelo 3D.

Considerou-se a placa inferior da impressora como fixa.

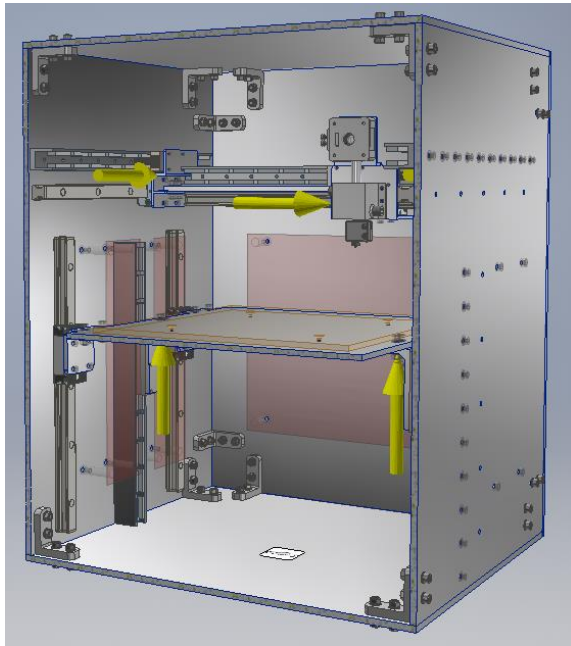


Figura 98 - Forças aplicadas nos suportes dos motores lineares, vista 1, render 3D

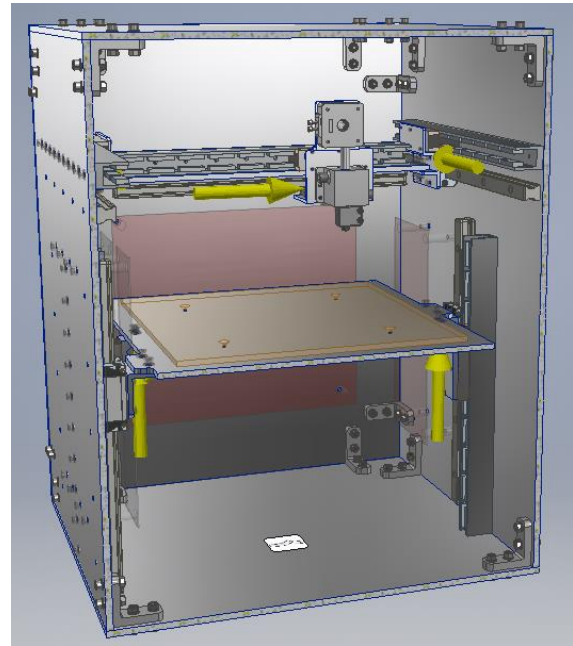


Figura 99 - Forças aplicadas nos suportes dos motores lineares, vista 2, render 3D

Nos eixos X e Y a força máxima do motor é de 16,00 N e no eixo Z é de 83,60 N.

Na tabela 30 estão os valores obtidos após o estudo de tensão.

Tabela 30 - Resultado do estudo de tensão para as forças de impressão

Nome	Mínimo	Máximo
Tensão de <i>Von Mises</i>	0,00 MPa	15,75 MPa
Primeira tensão principal	-6,87 MPa	1867,00 MPa
Terceira tensão principal	-17,60 MPa	4,06 MPa
Deslocamento	0,00 mm	0,06 mm
Fator de segurança	13,14	15,00
Deformação equivalente	0,00	$1,10 \times 10^{-4}$
Primeira deformação principal	0,00	$1,60 \times 10^{-4}$
Terceira deformação principal	0,00	0,00

A estrutura consegue suportar as forças geradas pelos motores lineares e, consequentemente, a qualidade de impressão não é afetada pelas deformações que ocorrem na estrutura.



## 6 Conclusão

Esta dissertação consistiu na conceção de uma impressora para funcionamento no exterior da Estação Internacional Espacial. O avanço desta tecnologia de fabrico levou a que começasse a ser utilizada para o fabrico de diversos componentes, para uso em áreas distintas. Também na área da exploração espacial estão a surgir novos projetos que pretendem aproveitar ao máximo as vantagens desta tecnologia para a produção de componentes que, por outros processos de fabrico, seriam impossíveis de conceber. Além disso, a ocorrência deste processo em ambiente espacial permite a criação de peças sem a necessidade de, durante o seu dimensionamento, ter em conta as forças de lançamento.

A capacidade de produção sob demanda é também outra grande vantagem e característica, que faz deste processo um processo desejado para ambiente espacial - diminui a dependência de peças sobresselentes e, ao mesmo tempo, aumenta a diversidade de peças disponíveis em órbita com um menor aumento do custo de lançamento, quando comparada com a solução atual.

O processo de impressão num ambiente de vácuo permite uma melhor adesão entre as camadas da peça, devido à maior retenção de calor na peça, levando a uma peça mais homogénea. A atmosfera de vácuo também resolve o problema de absorção de humidade por parte dos filamentos. Estas características são conseguidas à custa de um controlo de ambiente mais exigente.

Após pesquisa, é possível concluir que existem as condições necessárias – local, espaço, fonte de arrefecimento, fonte de energia, entre outros - para a instalação de uma impressora 3D, no exterior da Estação Internacional Espacial. A localização da impressora 3D, na parte exterior, possibilitará a impressão de peças 140% maiores e a impressão de materiais polímeros de alta performance - PEEK, PEI - materiais estes, que, apresentam elevada resistência ao ambiente espacial. É também uma forma de maturar esta tecnologia para que, em futuras missões espaciais interplanetárias, se tenha um processo de fabrico aditivo e respetivo dispositivo de fabrico a funcionar em ambiente espacial, totalmente compreendido e configurado.

O processo FFF/FDM apresenta características únicas – matéria prima na forma de filamento, capacidade de produzir peças em materiais polímeros de alto rendimento, reutilização de matéria prima, pós processamento das peças reduzido – que fazem deste, um processo adaptável ao ambiente da OTB e capaz de produzir peças funcionais. Os componentes selecionados têm as características necessárias para que o dispositivo de fabrico aditivo consiga imprimir todos os materiais polímeros disponíveis, atualmente.

O processo DED é um processo que também poderá ser adaptado ao ambiente espacial, mas, no entanto, apresenta algumas características que tornam essa adaptação mais complicada, quando comparado com o processo FDM: necessita de elevados valores de potência para funcionar; necessita de uma abordagem híbrida que passa pela adição e remoção de material – dificuldade em lidar com as aparas resultantes do processo subtrativo em ambiente de microgravidade.

A localização da impressora e os componentes selecionados para a mesma levam a que seja possível começar e terminar um trabalho de impressão remotamente sem a necessidade de contactar fisicamente com a impressora e, levar a peça para o interior da estação sem os astronautas saírem do interior da estação.

O processo de seleção de materiais foi dificultado pela pouca informação disponível ao público não parceiro de agências espaciais. O acesso à base de dados *Materials and Processes Technical Information System* (MAPTIS), que contém informações relativas aos efeitos do ambiente espacial em materiais metálicos e não metálicos, propriedades físicas e mecânicas, sistemas de proteção térmicos e outras informações, seria uma ajuda valiosa que permitiria o acesso a informação verificada pela NASA. No entanto, esse problema foi resolvido com a consulta de outros documentos e publicações que forneceram as orientações necessárias para a seleção de materiais e componentes.

Relativamente aos materiais e componentes metálicos escolhidos, é possível garantir que estes apresentam elevada resistência às condições do meio a que vão estar expostos. Por outro lado, os materiais polímeros sofrem corrosão quando expostos ao oxigénio atómico e, assim, não têm uma vida útil infinita. Apesar de os polímeros escolhidos serem usados em outros projetos espaciais, é aconselhada a realização de testes práticos a estes materiais de forma a analisar o efeito da corrosão por oxigénio atómico nas propriedades físicas e mecânicas e, também, na capacidade de o componente desempenhar a função para que foi projetado, ao longo da sua vida útil.

No que diz respeito aos componentes que têm de ser adquiridos, é necessário fornecer às empresas as especificações, condições do meio de funcionamento e normas aplicáveis de forma a ter um dispositivo certificado. Foi feito um esforço para encontrar empresas com experiência

no ramo aeroespacial, no entanto, para determinados componentes, não foi possível. Existem componentes em que outras empresas podem ser escolhidas. Se for escolhida outra empresa é preciso garantir que os componentes apresentam as mesmas características que os selecionados nesta dissertação.

Para os componentes que têm de ser fabricados, é necessário consultar as normas referentes a cada processo de fabrico.

Por fim, com os materiais e componentes selecionados conseguiram-se satisfazer todas as especificações inicialmente propostas.

## 6.1 Trabalhos futuros

Como continuação do projeto, iniciado nesta dissertação, propõem-se outros trabalhos que podem complementar e aumentar o valor da solução aqui apresentada. A materialização deste projeto permitirá a realização de testes em vácuo e microgravidade que ajudam a perceber em profundidade o funcionamento deste processo em tais ambientes e, assim, criar perfis de impressão otimizados para cada material. Também, para facilitar o processo de impressão, pode existir um dispositivo com diferentes tipos de filamentos que, antes do processo se iniciar, alimentava um determinado filamento escolhido à impressora 3D.

De forma a poderem ser impressos diferentes materiais na mesma peça, pode ser usado um sistema com mais de uma cabeça de impressão ou com uma cabeça de impressão capaz de extrudir diferentes materiais.

Também, e, uma vez que o oxigénio atómico afeta principalmente materiais não metálicos, um estudo aos componentes que possuem este tipo de materiais pode relacionar o efeito deste fenómeno de corrosão na vida útil dos componentes, sendo assim possível criar uma agenda de manutenção ou substituição para os componentes em questão.

Como a impressora depende do sistema de arrefecimento da ISS, uma solução de arrefecimento incorporado na impressora facilitaria o seu uso em futuras missões espaciais que têm em vista a habitação de outros planetas.

No que diz respeito ao aquecimento da peça pelos radiadores, como referido na dissertação, cada radiador poderia estar divididos em pequenos módulos que ligariam de acordo com o local da peça que necessitasse de aquecimento, com o uso de uma análise termográfica, em tempo real.

Uma vez que o laboratório exterior *Kibo* possui um braço robótico, uma comunicação entre os dois dispositivos permitiria automatizar o processo de recolha da peça impressa para o interior da estação.

Assim, para projetos futuros propõem-se:

- Materialização do projeto aqui apresentado;
- Realização de testes numa câmara de vácuo ao dispositivo de fabrico aditivo para verificação do funcionamento da impressora;
- Realização de testes termográficos ao processo, numa câmara de vácuo, de forma a estudar a propagação de energia na peça para posteriormente seleccionar parâmetros de impressão e especificações para aquecedor por radiação;
- Projeção de um sistema de controlo de aquecimento, tendo por base uma análise termográfica em tempo real.
- Realização testes num ambiente de microgravidade para seleccionar parâmetros de impressão;
- Estudos às peças não metálicas para concluir o tempo de vida útil em ambiente espacial;
- Solução de arrefecimento autónomo para utilização ambiente de vácuo, capaz de dissipar a energia necessária para o processo de fabrico aditivo ocorrer;
- Integração do dispositivo de impressão com o braço robótico do laboratório *Kibo*, de forma a existir uma recolha automática da peça para o interior da estação;
- Mudança automática da matéria prima no dispositivo de impressão;
- Adição de sistema de impressão com a capacidade de imprimir mais do que um material na mesma peça.
- Otimização do sistema de bloqueio para os eixos X, Y e Z.

## Referências

- [1] T. Thumm *et al.*, “International space station research benefits for humanity,” in *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, 2012, vol. 5, pp. 3780–3788.
- [2] NASA, “International Cooperation on ISS.” [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/cooperation/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/cooperation/index.html). [Accessed: 16-Apr-2020].
- [3] ECSS, “About the International Space Station.” [Online]. Available: [https://m.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/International\\_Space\\_Station/About\\_the\\_International\\_Space\\_Station](https://m.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/About_the_International_Space_Station). [Accessed: 16-Jun-2020].
- [4] NASA, “International Space Station Length and Width,” 2014. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/content/international-space-station-length-and-width/>. [Accessed: 20-Apr-2020].
- [5] NASA, “Space Station Construction,” 2018. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/feature/20-years-ago-iss-construction-begins>. [Accessed: 10-Mar-2020].
- [6] K. de G. Miria M. Finckenor, “A Researcher Guide to: International Space Station - Space Environmental Effects,” 2015.
- [7] United States. National Aeronautics and Space Administration., *Reference guide to the International Space Station*. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2010.
- [8] “ESA - Cutaway view of Columbus laboratory.” [Online]. Available: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2001/11/Cutaway\\_view\\_of\\_Columbus\\_laboratory](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2001/11/Cutaway_view_of_Columbus_laboratory). [Accessed: 28-Jul-2020].
- [9] “The Sky is Not the Limit.” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/issistflpt/website-builder/us-side>. [Accessed: 28-Jul-2020].
- [10] NASA, “What Is the International Space Station?” [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-the-iss-58.html>. [Accessed: 06-Sep-2020].
- [11] I.Gibson, D.W.Rosen, and B.Stucker, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, vol. 67, no. 6. 2007.
- [12] A. Gebhardt and A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*. 2012.
- [13] “3D Printing Support Structures – All You Need To Know in 2019 | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [14] T. Rayna and L. Striukova, “From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 102, pp. 214–224, Jan. 2016.
- [15] “3D Printing STL files: A step-by-step guide | 3D Hubs.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide>. [Accessed: 01-Apr-2020].

- [16] “ISS Utilization: 3D Print - Satellite Missions - eoPortal Directory.” [Online]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-3d-print>. [Accessed: 26-Jul-2020].
- [17] S. Litkenhous, “In-Space Manufacturing | NASA.” [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/oem/inspacemanufacturing>. [Accessed: 31-Mar-2020].
- [18] NASA and NAS, “3D Printing in Space.” [Online]. Available: [https://www.nap.edu/resource/18871/3D\\_Printing\\_Report\\_Brief.pdf](https://www.nap.edu/resource/18871/3D_Printing_Report_Brief.pdf). [Accessed: 31-Mar-2020].
- [19] NASA, “Space Tools On Demand : 3D Printing in Zero G,” pp. 3–4, 2014.
- [20] N. Werkheiser, “Overview of NASA Initiatives in 3D Printing and Additive Manufacturing 2014,” *2014 DoD Maint. Symp.*, pp. 1–28, 2014.
- [21] MADE IN SPACE, “Additive Manufacturing Facility,” 2016. [Online]. Available: <https://madeinspace.us/>. [Accessed: 26-May-2019].
- [22] Made In Space, “Additive Manufacturing Facility (AMF) User Guide.” 2016.
- [23] C. Barnatt, *3D Printing: Third Edition*. ExplainingTheFuture.com, 2016.
- [24] “What is Directed Energy Deposition and how does it work? - BeAM Machines – Directed Energy Deposition.” [Online]. Available: <https://www.beam-machines.com/faq/directed-energy-deposition-work>. [Accessed: 27-May-2019].
- [25] L. Yang *et al.*, *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer, 2017.
- [26] “Directed Energy Deposition - an overview.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/directed-energy-deposition>. [Accessed: 28-Jul-2020].
- [27] “The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!> [Accessed: 28-Jul-2020].
- [28] “Metal 3D Printing Processes - Directed Energy Deposition (DED).” [Online]. Available: <https://news.3deo.co/metal-3d-printing-processes-directed-energy-deposition-ded>. [Accessed: 04-May-2020].
- [29] “Ultimate guide: PEEK 3D printing.” [Online]. Available: <https://tractus3d.com/3d-printing-materials/peek-3d-printing/>. [Accessed: 27-May-2020].
- [30] B. Redwood, F. Schöffner, and B. Garret, *The 3D printing handbook : technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.
- [31] M. Khorram Niaki and F. Nonino, *The Management of Additive Manufacturing*. Springer, 2018.
- [32] “FDM technology: The advantages of FDM printing | dddrop.” [Online]. Available: <https://www.dddop.com/fdm-technology/>. [Accessed: 04-Aug-2019].
- [33] S. Maidin, J. H. U. Wong, A. S. Mohamed, and S. B. Mohamed, “Effect of vacuum assisted fused deposition modeling on 3D printed ABS microstructure,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. 15, pp. 4877–4881, 2017.
- [34] S. Maidin, J. H. U. Wong, A. S. Mohamed, W. F. A. Romlee, and S. Akmal, “Vacuum system assisted Fdm – Characteristic of heat transfer using finite element analysis,” *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- [35] W. J. Swanson, P. W. Turley, P. Leavitt, P. J. Karwoski, J. E. LaBossiere, and R. L. Skubic, “High temperature modeling apparatus US 6,722,872B1,” 23-Jun-2004.
- [36] “Stratasys: 3D Printing & Additive Manufacturing | Stratasys.” [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/>. [Accessed: 05-Aug-2020].
- [37] A. Kemmer, M. Snyder, M. Chen, and J. Dunn, “Additive manufacturing of extended structures,” Sep-2015.
- [38] “Remote Manipulator System:About Kibo - International Space Station - JAXA.” [Online]. Available: <https://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/>. [Accessed: 29-Jul-2020].

- [39] JAXA, “Kibo Handbook,” 2007.
- [40] “Hotend explained and how to properly change the nozzle.” [Online]. Available: <https://hobbyhoarder.net/hotend-explained/>. [Accessed: 10-May-2020].
- [41] S. W. Samwel, “Low earth orbital atomic oxygen erosion effect on spacecraft materials,” *Sp. Res. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2014.
- [42] A. F. Whitaker, R. R. Kamenetzky, M. M. Finckenor, J. K. Norwood, and N. Marshall, “Atomic Oxygen Effects On LDEF Experiment AO171.”
- [43] “CubeSat.” [Online]. Available: <https://www.cubesat.org/>. [Accessed: 08-Sep-2020].
- [44] T. Nakamura, H. Nakamura, O. Fujita, T. Noguchi, and K. Imagawa, “The Space Exposure Experiment of PEEK Sheets under Tensile Stress \*.”
- [45] “Multi Layer Insulation | KANEKA CORPORATION.” [Online]. Available: [https://www.kaneka.co.jp/en/business/qualityoflife/eit\\_005.html](https://www.kaneka.co.jp/en/business/qualityoflife/eit_005.html). [Accessed: 30-Jul-2020].
- [46] “Satellite Multi-Layer Insulation | RUAG.” [Online]. Available: <https://www.ruag.com/en/products-services/space/spacecraft/multi-layer-insulation-mli/satellite-multi-layer-insulation>. [Accessed: 30-Jul-2020].
- [47] “H2W Technologies.” [Online]. Available: <https://www.h2wtech.com/>. [Accessed: 29-Jul-2020].
- [48] “Minco - Flex Circuits, Temperature Sensors, Heating Elements & More.” [Online]. Available: <https://www.minco.com/>. [Accessed: 30-Jul-2020].
- [49] “High Temperature Heated Beds E3D.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/high-temperature-heated-beds>. [Accessed: 03-Jun-2020].
- [50] “Heater Block: A Better Understanding of the DyzeEnd Pro Design Choices.” [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/2018/10/heater-block-material-understanding-pro-series-hotend-design/>. [Accessed: 02-Jun-2020].
- [51] “Dyze Design.” [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/>. [Accessed: 11-Aug-2020].
- [52] “One Of The Most Detailed ISS Tour - YouTube.” [Online]. Available: <https://youtu.be/QvTmdIhYnes>. [Accessed: 21-Aug-2020].
- [53] “PEEK Filament | 3D4Makers | 3D Printing.” [Online]. Available: <https://www.3d4makers.com/products/peek-filament>. [Accessed: 13-Sep-2020].
- [54] “S-Curve Motion Profiles.” [Online]. Available: <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/s-curve-profiles-deep-dive-article>. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [55] Ariane Group, “ARIANE 6 User’s Manual,” 2018.
- [56] “Bosch Rexroth.” [Online]. Available: <https://www.boschrexroth.com>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [57] “Space Materials Database. Materials data for space applications.” [Online]. Available: <https://www.spacematdb.com/>. [Accessed: 08-Aug-2020].
- [58] “Aerospace Flexible Hoses and Fittings.” [Online]. Available: <https://www.titeflex.com/aerospace/>. [Accessed: 01-Jun-2020].
- [59] A. de Rooij, “Corrosion in Space,” in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2010.
- [60] “Alpha Magnetic Spectrometer (AMS): How It Works | NASA.” [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/ams\\_how\\_it\\_works.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/ams_how_it_works.html). [Accessed: 07-Aug-2020].
- [61] B. A. Banks, J. A. Backus, M. V. Manno, D. L. Waters, K. C. Cameron, and K. K. De Groh, “Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polymers,” *J. Spacecr. Rockets*, vol. 48, no. 1, pp. 14–22, 2011.



## **ANEXO A: Seleção de Materiais e Componentes**



### Escolha de uma Liga de Alumínio – 6061 t6

Pode observar-se na tabela 31, retirada da norma *ECSS-Q-ST-70-36C*, que toda a série 6000 da liga de alumínio apresenta elevada resistência à corrosão por tensão.

Tabela 31 - Ligas com elevada resistência à corrosão por tensão, *ECSS-Q-ST-70-36C*

Ligas de Alumínio			
<i>Wrought</i>		<i>Cast</i>	
Ligas	Condição	Ligas	Condição
1000 series	All	355.0, C355.0	T6
2011	T8	356.0, A356.0	All
2024, rod bar	T8	357.0	All
2219	T6, T8	B358.0 (Tens-50)	All
(E) 2419	T8	359.0	All
(E) 2618	T6, T8	380.0, A380.0	As cast
3000 series	All	514.0 (214)	As casts
5000 series	All <sub>4,5</sub>	518.0 (218)	As casts
6000 series	All	535.0 (Almag 35)	As casts
(E) 7020	T6 <sub>6</sub>	A712.0, C712.0	As cast

### Escolha de um Aço – 440, 304, 316, 303

Pode observar-se na tabela 32, que a série de aço 300 e 400 apresentam elevada resistência à corrosão por tensão.

Tabela 32 - Ligas com elevada resistência a corrosão por tensão, *ECSS-Q-ST-70-36C*

Carbon steel (1000 series)	Below 1 225 MPa (180 ksi) UTS
Low alloy steel (4130, 4340, etc.)	Below 1 225 MPa (180 ksi) UTS1
(E) D6AC, H-11	Below 1 450 MPa (210 ksi) UTS
Music wire (ASTM 228)	Cold drawn
HY-80 steel	Quenched and tempered
HY-130 steel	Quenched and tempered
HY-140 steel	Quenched and tempered
1095 spring steel	Quenched and tempered
300 series stainless steel (unsensitized)2	All
400 series Ferritec stainless steel (404, 430, 431, 444, etc.)	All
21-6-9 stainless steel	All
Carpenter 20 Cb stainless steel	All
Carpenter 20 Cb-3 stainless steel	All
A286 stainless steel	All
AM350 stainless steel	SCT 10004 and above
AM355 stainless steel	SCT 1000 and above
Almar 362 stainless steel	H10005 and above
Custom 450 stainless steel	H1000 and above
Custom 455 stainless steel	H1000 and above
15-5 PH stainless steel	H1000 and above
PH 14-8 Mo stainless steel	CH900 and SRH950 and above6,7
PH 15-7 Mo stainless steel	CH900
17-7 PH stainless steel	CH900
Nitronic 333	All
(E) Maraging steel MARVAL X12	All

Os aços destas séries não sofrem de corrosão devido ao oxigénio atómico [57].

## Titeflex S145/245

A mangueira é comprovada para uso aeroespacial, totalmente metálica, de acordo com a norma AS1424, e consegue suportar temperaturas extremas, que vão para além da gama das mangueiras termoplásticas. Utilizada extensivamente em aplicações com veículos espaciais e veículos de lançamento, bem como em secções quentes de motores, onde o desempenho e a fiabilidade são críticos. A mangueira consiste de um núcleo interno formado por tubos CRES ou Inconel®, reforçado com uma camada de CRES 304, capaz de suportar temperaturas até 1200°F (649°C) sem a necessidade de manga de incêndio.

Acessórios standard disponíveis em CRES ou Inconel®[58].



Figura 100 - Mangueira S145/S245 [58].

## Motor passo a passo AML D42.3 UHV

Na tabela encontram-se os materiais dos componentes que constituem o motor passo a passo.

Tabela 33 - Material dos componentes do motor passo a passo

Material	Consultar
Polyimide	Anexo B
Aluminium Alloy 6061	Anexo C
Stainless steel 440, 304, 316, 303	Anexo D
PEEK	Anexo B
Diamond-like carbon	<i>Coating</i>
Silicon steel	Figura 59
Neodymium	Anexo E
Alumina ceramic	Figura 60
Silver	Figura 59
Copper	Figura 58

As figuras 67, 68 e 69 foram retiradas da norma MSFC-HDBK-527/ JSC-09604.

			COR	SCC	GOX	LOX	H2O4	HDZE	LOH2	HIH2
			RTG	RTG	RTG	RTG	RTG	TEMP	RTG	RTG
			PRESS	PRESS	PRESS	PRESS	TEMP	TEMP	PRESS	TEMP
50504	COPPER 661/SIL ALLOY ROD SPEC: ASTM B98		A	A	U	U	U	U	U	U
50828	COPPER ALLOY 110 ROD SPEC: ASTM B-152	ASTM B-187	A	A	A	A	X	X	X	X
10346	COPPER ALLOY 110 SHEET SPEC: ASTM B152 MIL-F-55561	ASTM B187	A	A	A	A	X	X	U	U
50826	COPPER ALLOY 110 STRIP SPEC: ASTM B-152	ASTM B-187	A	A	A	A	X	X	U	U
50144	COPPER ALLOY 210 (95%) SHEET SPEC: MIL-C-21768		A	A	U	U	U	U	U	U
10213	COPPER 100% SHEET ANNEALED		A	A	A	2700	A	X	X	A
50838	COPPER 100% STRIP ANNEALED		A	A	A	2700	A	X	X	A
10213	COPPER 100% SHEET ANNEALED		A	A	A	2700	A	X	X	A
50838	COPPER 100% STRIP ANNEALED		A	A	A	2700	A	X	X	A
10615	COPPER 22NI		A	A	U	U	U	U	U	U
10607	COPPER 30NI ALLOY NO 715 SPEC: ASTM-B-122 #5		A	A	U	U	U	U	U	U

Figura 101 – Cobre e testes realizados.

O cobre apresenta resistência à corrosão e corrosão por tensão (COR, SCC, classificação A). No entanto sofre corrosão por oxigénio atómico [42], [57].

			COR	SCC	GOX	LOX	H2O4	HDZE	LOH2	HIH2
			RTG	RTG	RTG	RTG	RTG	TEMP	RTG	RTG
			PRESS	PRESS	PRESS	PRESS	TEMP	TEMP	PRESS	TEMP
30187	SILICON		A	U	U	U	U	U	U	U
10433	SILVER		A	A	A	A	X	X	X	X
30146	SILVER 18% NICKEL ALLOY		A	A	U	U	U	U	X	X

Figura 102 - Prata a Silicon e testes realizados.

A prata apresenta resistência à corrosão e corrosão por tensão (COR, SCC, classificação A). No entanto, como podemos observar na tabela 15, a prata sofre corrosão por oxigénio atómico. A camada superficial é oxidada, causando a perda de condutividade elétrica e resistência mecânica. Após uma exposição prolongada, a camada de óxido não adere e fragmenta-se no substrato de prata. Portanto, um revestimento protetor de prata é aconselhado para fornecer uma barreira entre o material de base e o oxigénio atómico [41]. Para *silicon*, apenas existem dados em relação à corrosão (COR, classificação A). No que diz respeito à corrosão por tensão (COR) o material não foi testado (classificação U), sendo necessário realizar testes.

05352 CERAMIC ALUMINA AD-96		GID: DOH00	
MANF: COORS PORCELAIN			
FLAMMABILITY			
RT TEST	%OXY	PRESS	THICK
A	1	030.0	010.0
FSC			
RT TEST	PRESS	IMPACT	TEMP
A	0.002	04.30	NONE
OXYGEN COMP			
RT TEST	PRESS	IMPACT	TEMP
A	No test data	No test data	No test data
THERMAL VACUUM STABILITY			
RT PRESS	THL%	VCH%	RNL%
A	2.0E-6	.43	.07
CURE			
RT	RT WEIGHT	CURE	TOXICITY
A	00022.55		

Figura 103 - Testes Alumina.

No que diz atinente à inflamabilidade e estabilidade em vácuo (*outgassing*), a alumina apresenta as características necessárias (classificação A). Relativamente, à corrosão por oxigénio atómico, vidros e cerâmicos à base de óxidos, não apresentam nenhuma degradação [59]

O neodímio não se encontra na norma *MSFC-HDBK-527/ JSC-09604*, e por isso são necessários testes para verificar a resistência à corrosão e corrosão por tensão. No entanto, estes tipos de imanes são usados no *Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)*, que se encontra no exterior da estação espacial internacional [60].

Tabela 34 - Corrosão por oxigénio atómico de alguns polímeros [61].

Material	Abbrev.	Trade Name(s)	Fractional Uncertainty in Erosion Yield	Uncertainty in Erosion Yield	Erosion Yield (cm <sup>3</sup> /atom)
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	Cycolac	0.027017	2.96E-26	1.09 ± 0.03 E-24
Allyl diglycol carbonate	ADC	CR-39, Homalite H-911	0.025824	1.76E-25	>6.80 E-24
Amorphous fluoropolymer	AF	Teflon AF 1601	0.025975	5.13E-27	1.98 ± 0.05 E-25
Cellulose acetate	CA	Clarifoil, Tenite Acetate, Dexcel	0.026573	1.34E-25	5.05 ± 0.13 E-24
Chlorotrifluoroethylene	CTFE	Neoflon CTFE M-300, Kel-F	0.025927	2.15E-26	8.31 ± 0.22 E-25
Crystalline polyvinylfluoride with white pigment	PVF-W	White Tedlar TWH10BS3	0.041361	4.17E-27	1.01 ± 0.04 E-25
Epoxy or epoxy	EP	Hysol EA 956	0.027020	1.14E-25	4.21 ± 0.11 E-24
Ethylene-chlorotrifluoroethylene	ECTFE	Halar	0.025821	4.63E-26	1.79 ± 0.05 E-24
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer	ETFE	Tefzel ZM	0.025598	2.46E-26	9.61 ± 0.25 E-25
Fluorinated ethylene propylene	FEP	Teflon FEP (round robin)	0.026890	5.39E-27	2.00 ± 0.05 E-25
High temperature polyimide resin	PI	PMR-15	0.025696	7.77E-26	>3.02 E-24
Perfluoroalkoxy copolymer resin	PFA	Teflon PFA CLP (200 CLP)	0.027248	4.72E-27	1.73 ± 0.05 E-25
Poly-(p-phenylene terephthalamide)	PPD-T	Kevlar 29 fabric	0.026193	1.64E-26	6.28 ± 0.16 E-25
Poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)	PBO	(balanced biaxial film)	0.059587	8.08E-26	1.36 ± 0.08 E-24
Polyacrylonitrile	PAN	Barex 210	0.032801	4.63E-26	1.41 ± 0.05 E-24
Polyamide 6 or Nylon 6	PA 6	Akulon K, Ultramid B	0.026617	9.33E-26	3.51 ± 0.09 E-24
Polyamide 66 or Nylon 66	PA 66	Maranyl A, Zytel	0.125851	2.27E-25	1.80 ± 0.23 E-24
Polybenzimidazole	PBI	Celazole PBI	0.026275	5.81E-26	>2.21 E-24
Polybutylene terephthalate	PBT	GE Valox 357	0.025798	2.35E-26	9.11 ± 0.24 E-25
Polycarbonate	PC	PEEREX 61 (P61)	0.026545	1.14E-25	4.29 ± 0.11 E-24
Polyetheretherketone	PEEK	Victrex PEEK 450	0.045436	1.36E-25	2.99 ± 0.14 E-24
Polyetherimide	PEI	Ultram 1000	0.026088	8.63E-26	>3.31 E-24
Polyethylene	PE		0.025620	9.59E-26	>3.74 E-24
Polyethylene oxide	PEO	Alkox E-30	0.025948	5.01E-26	1.93 ± 0.05 E-24
Polyethylene terephthalate	PET	Mylar A-200	0.026157	7.87E-26	3.01 ± 0.08 E-24
Polyimide	PI	LaRC CP1 (CP1-300)	0.028199	5.38E-26	1.91 ± 0.05 E-24
Polyimide (BPDA)	PI	Upilex-S	0.030056	2.77E-26	9.22 ± 0.28 E-25
Polyimide (PMDA)	PI	Kapton H	0.024700	7.41E-26	3.00 ± 0.07 E-24
Polyimide (PMDA)	PI	Kapton H	0.024700	7.41E-26	3.00 ± 0.07 E-24
Polyimide (PMDA)	PI	Kapton HIN	0.025748	7.24E-26	2.81 ± 0.07 E-24

## **Ligações Roscadas**

Para todas as ligações estruturais serão utilizados parafusos de tamanho M5. Em casos, onde o comprimento da rosca do furo não é pelo menos 1 a 1.5 diâmetro do parafuso será utilizado um furo passante juntamente com parafuso, porca e anilhas. *ECSS-E-HB-32-23A: Threaded fasteners handbook* recomenda o uso de anilhas para espalhar as forças de aperto pelas peças a aparafusar e também para evitar que a cabeça do parafuso e porca danifiquem as superfícies de aperto. A norma *ECSS-Q-ST-70-46C - Requirements for manufacturing and procurement of threaded fasteners* deve ser consultada aquando da montagem destas ligações.

Também, deve fazer-se o uso de porcas autoblocantes para não existirem desapertos durante as elevadas vibrações que são produzidas durante o deslocamento da nave espacial.

## **ANEXO B: Lista de componentes**



Tabela 35 - Lista de Componentes Impressora

<b>QTDE</b>	<b>Peça</b>	<b>Processo de fabrico</b>	<b>Material</b>	<b>Fornecedor</b>
<b>1</b>	Estrutura Fundo	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Estrutura Direita	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Estrutura Esquerda	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Estrutura Baixo	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Estrutura Cimo	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>16</b>	L bracket com ligações roscadas	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>2</b>	Dobradiça_1	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>2</b>	Dobradiça_2	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Porta	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Fechadura_1	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Fechadura_2	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	IS 2636 - M 5			
<b>6</b>	Guia Linear			Bosh Rextrosh.
<b>3</b>	Calha Motor Linear X e Y			H2W. modelo BLDM-A02
<b>3</b>	Motor Linear X e Y			H2W, modelo BLDM-A02
<b>2</b>	Calha Motor Linear Z			H2W, modelo BLDM-B02
<b>2</b>	Motor Linear Z			H2W, modelo BLDM-B02
<b>2</b>	Conector Eixo X	Quinagem e soldadura	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Ponte eixo X	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Conector Extrusor	Quinagem	Alumínio 6061 t6	
<b>1</b>	Montagem Extrusor			

Conceção de uma impressora 3D de alta performance para operação em vácuo

Tabela 36 - Lista de Componentes Impressora (Continuação)

QTDE	Peça	Processo de fabrico	Material	Fornecedor
1	Mesa de Impressão	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
1	Superfície de Impressão	Maquinagem	PEI	
1	Aquecedor cama			<i>Fralock ; Minco</i>
2	Conector Mesa - Motor Linear	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
1	Alimentador		Alumínio 6061 t6 e aço 316	
1	Conector extrusor feeder	Maquinagem	Alumínio 6061	
1	Motor Passo a Passo			AML. modelo D42.3 UHV
6	Patim Guia Linear			Bosh Rextrosh. tamanho 15
5	Radiadores	Potência a calcular por testes de termografia		<i>Heraeus. modelo black.infrared</i>
2	Sistema de Imobilização	Maquinagem		
1	Conector Sistema de Imobilização Eixo X e Y	Maquinagem, quinagem e soldadura	Alumínio 6061 t6	
1	Conector Sistema de Imobilização Eixo Z	Maquinagem, quinagem e soldadura	Alumínio 6061 t6	

Tabela 37 - Componentes do Alimentador

QTDE	Peça	Processo de fabrico	Material	Fornecedor
1	Conector Mola Parafuso	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
1	Corpo Alimentador 1	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
1	Corpo Alimentador 2	Maquinagem	Alumínio 6061 t6	
2	Mola		Aço 1095	
1	Roda Dentada 1	Maquinagem	Aço 316	
1	Roda dentada 2	Maquinagem	Aço 316	
1	Tampa	Maquinagem	Alumínio 6061	

Conceção de uma impressora 3D de alta performance para operação em vácuo

Tabela 38 - Componentes do Extrusor

<b>QTDE</b>	<b>Peça</b>	<b>Processo de fabrico</b>	<b>Material</b>	<b>Fornecedor</b>
<b>1</b>	Permutador de Calor	SLM	Alumínio 6061	
<b>1</b>	Heatbreak	Maquinagem	Titânio	
<b>1</b>	Bloco de Aquecimento	Maquinagem	Aço 316	
<b>1</b>	Nozzle	Maquinagem	Aço e Carboneto de Tungsténio	
<b>1</b>	Resistência			<i>Chromalox; Belilove; Tempco; Hakko Electric</i>

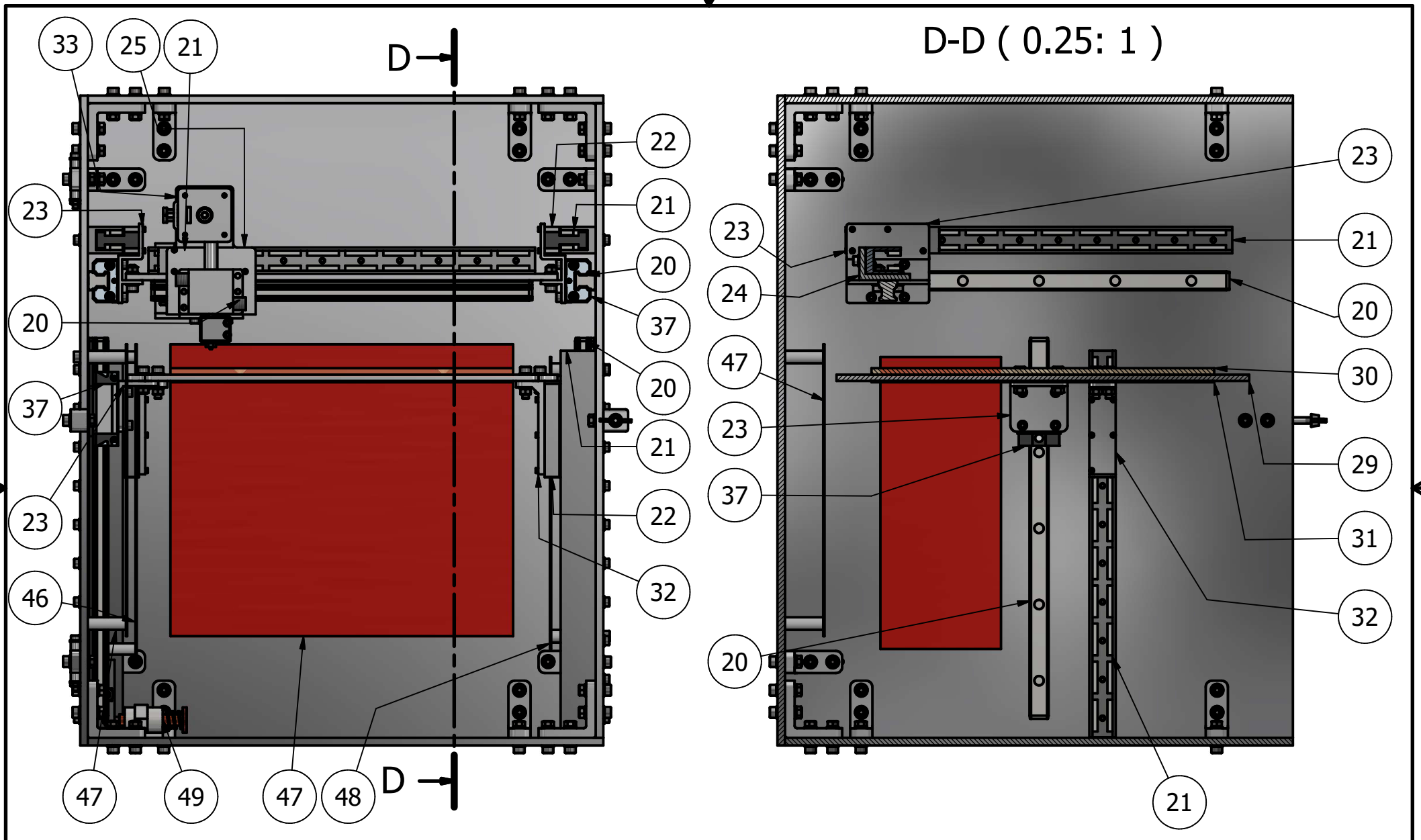
No total, com os parafusos, anilhas e porcas incluídas, a impressora apresenta uma massa de 33Kg.

No que diz respeito à potência elétrica necessária, são necessários 1701 W.



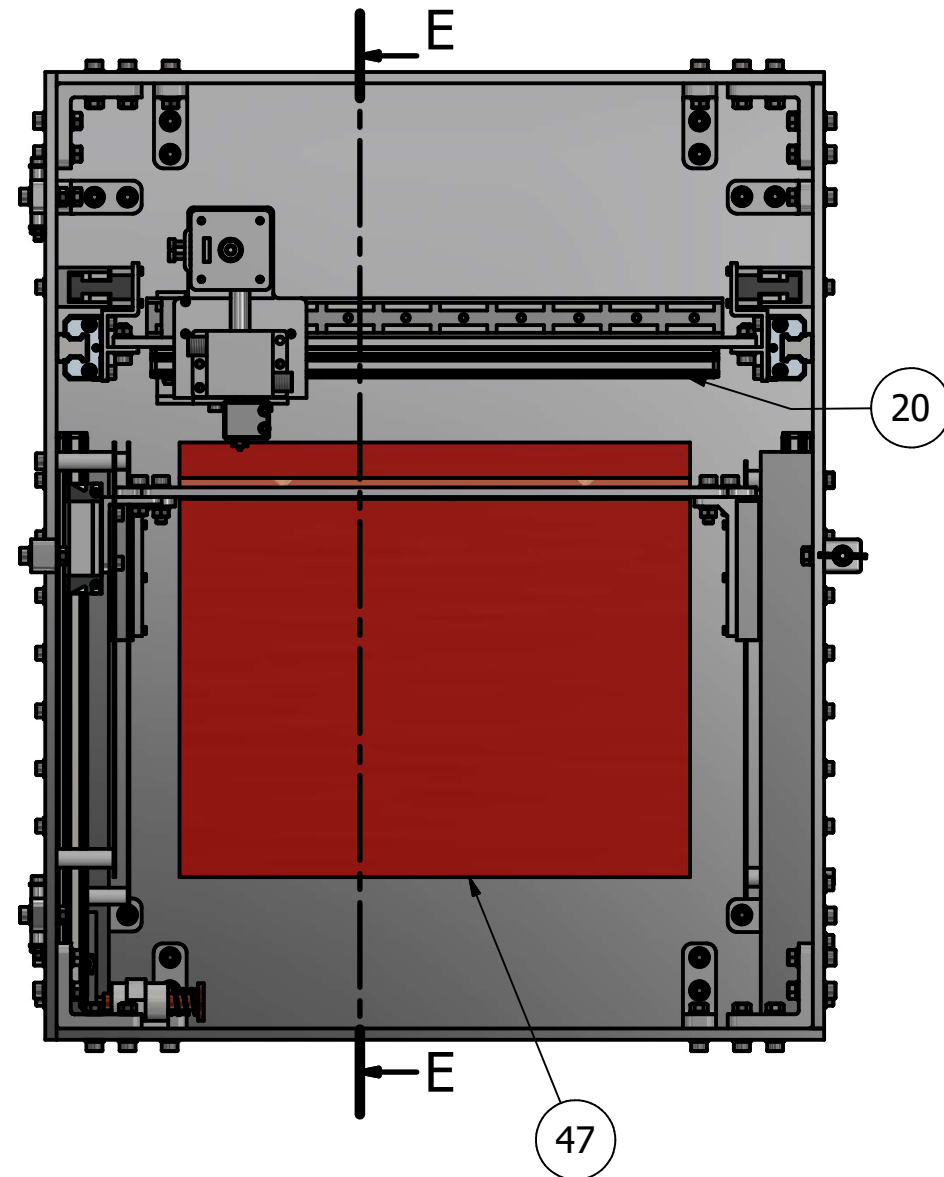
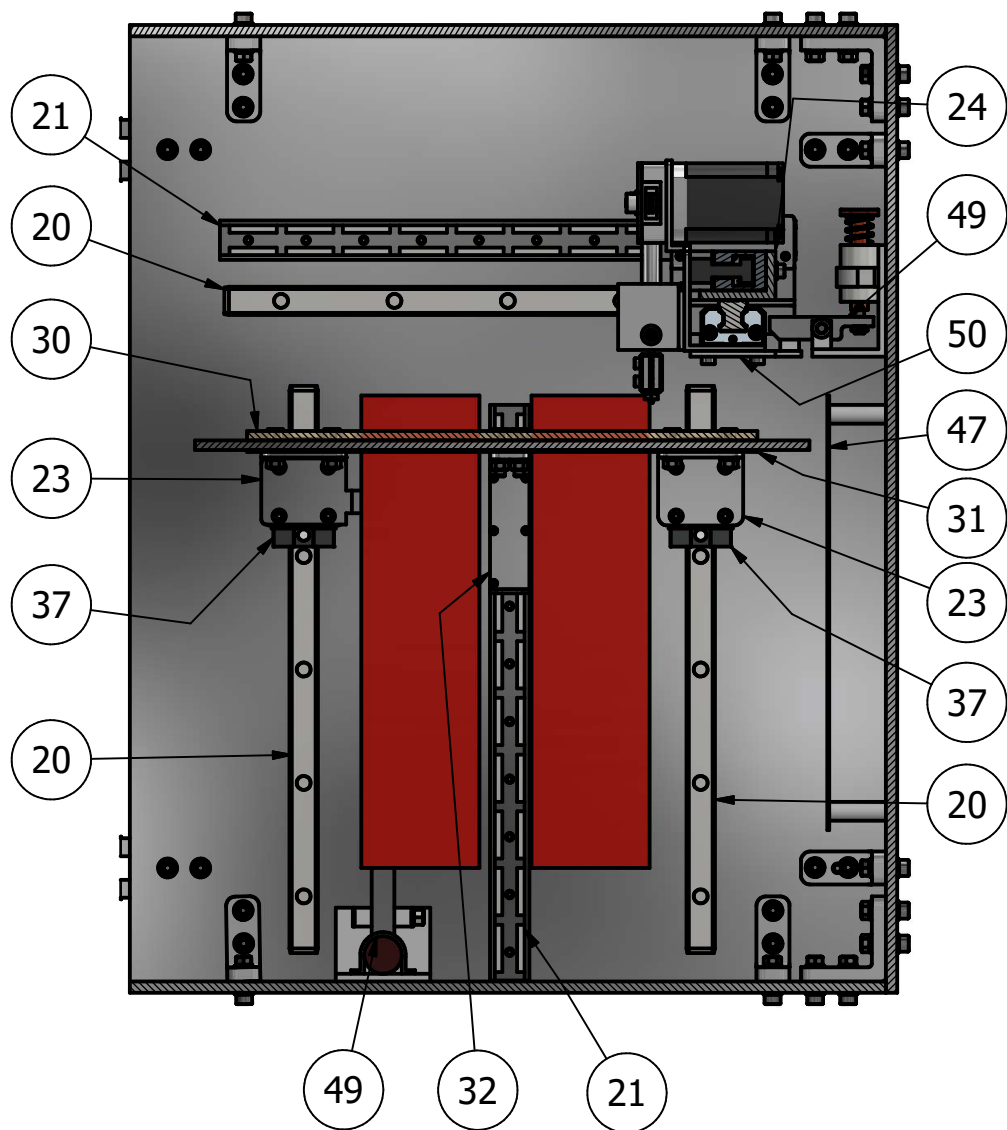
## **ANEXO C: Desenhos técnicos**



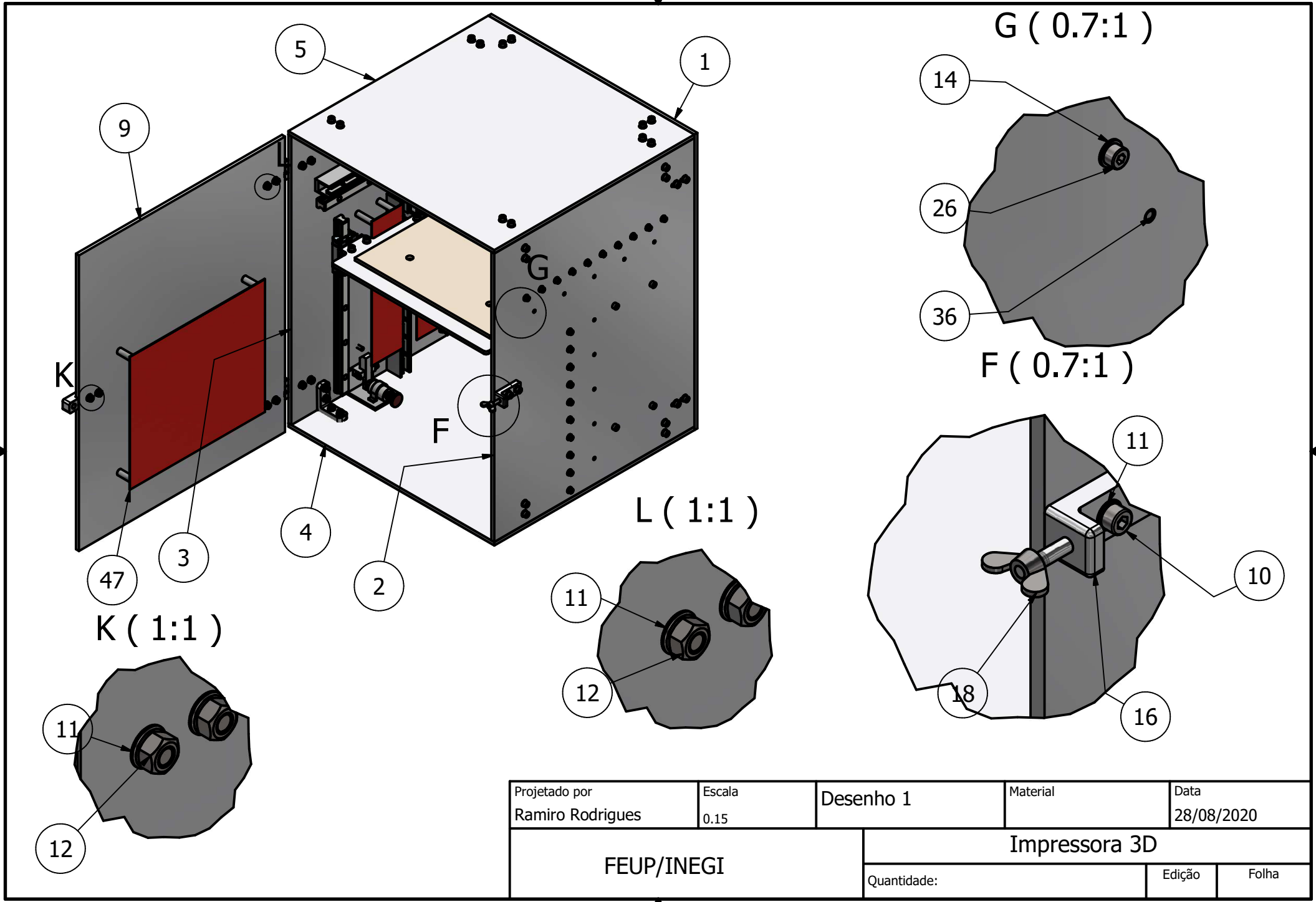


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.25: 1	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
		Quantidade:	Edição	Folha

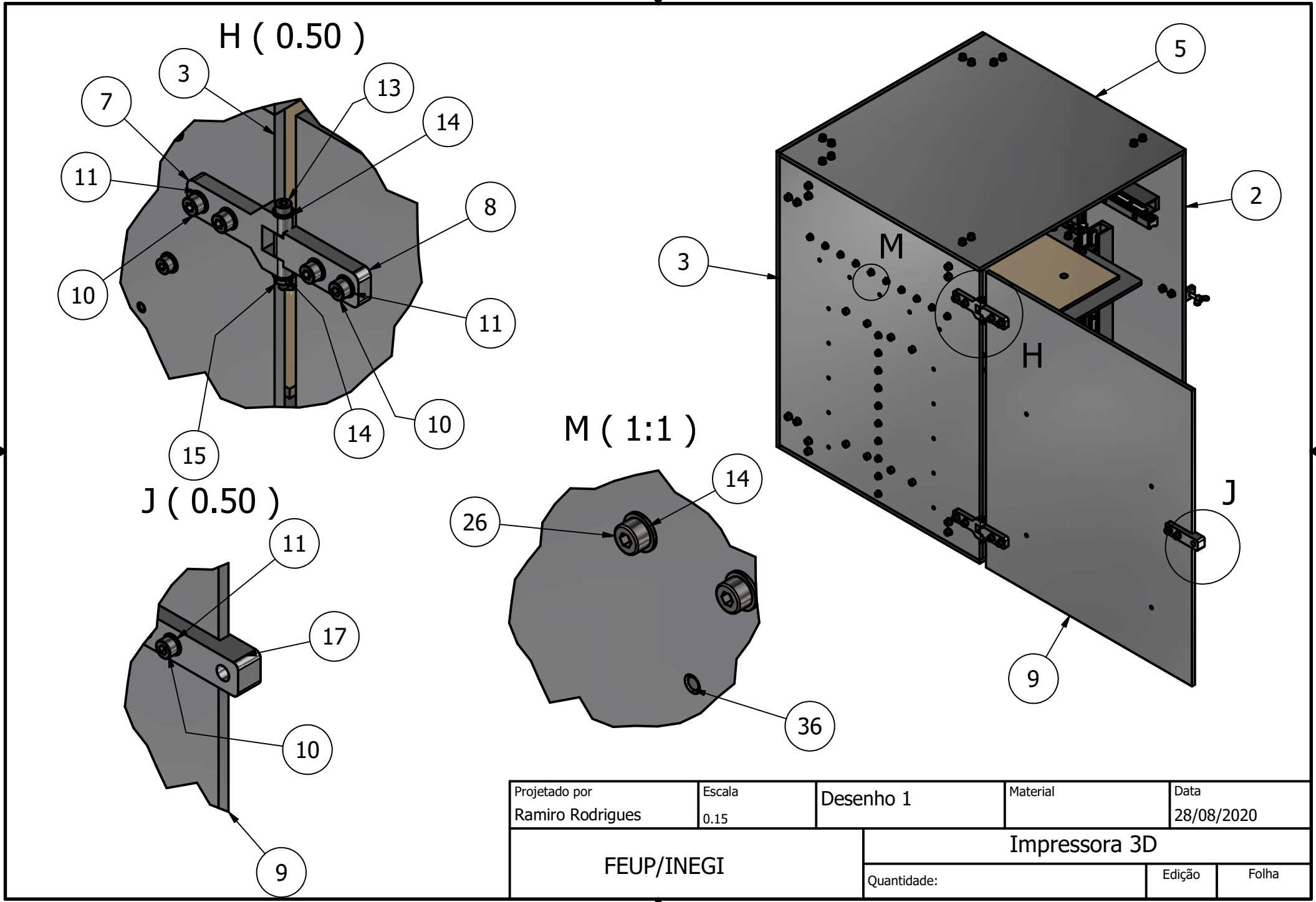
E-E ( 0.25:1 )



Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.25:1	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
		Quantidade:	Edição	Folha



Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.15	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
		Quantidade:	Edição	Folha



H ( 0.50 )

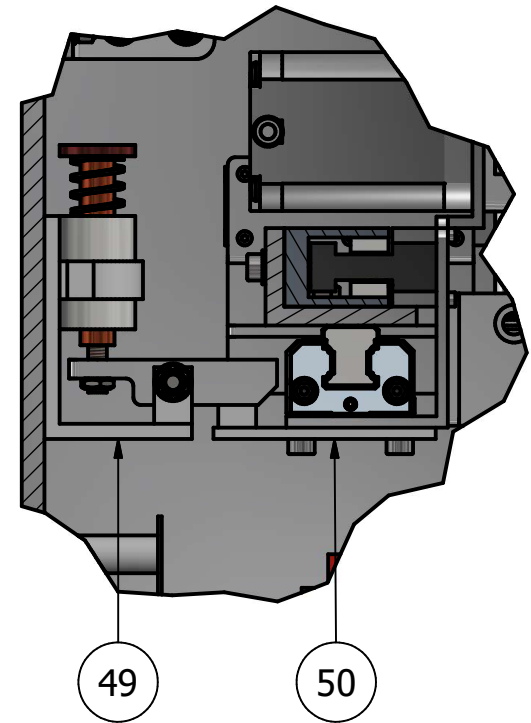
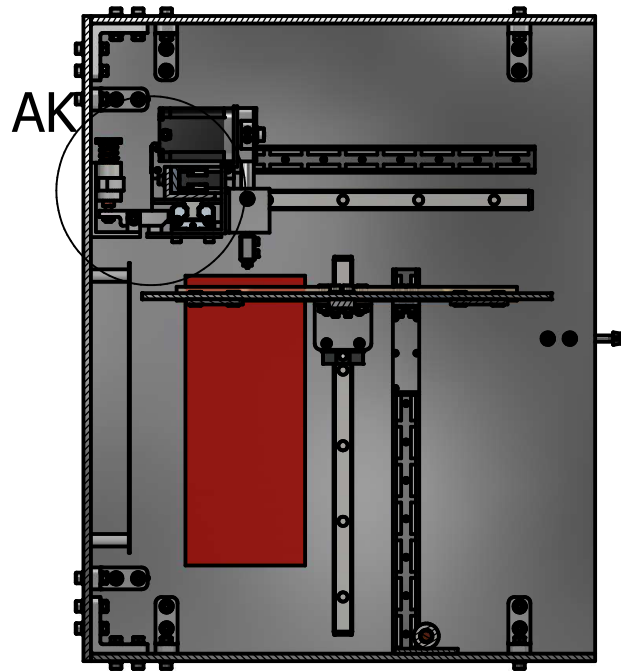
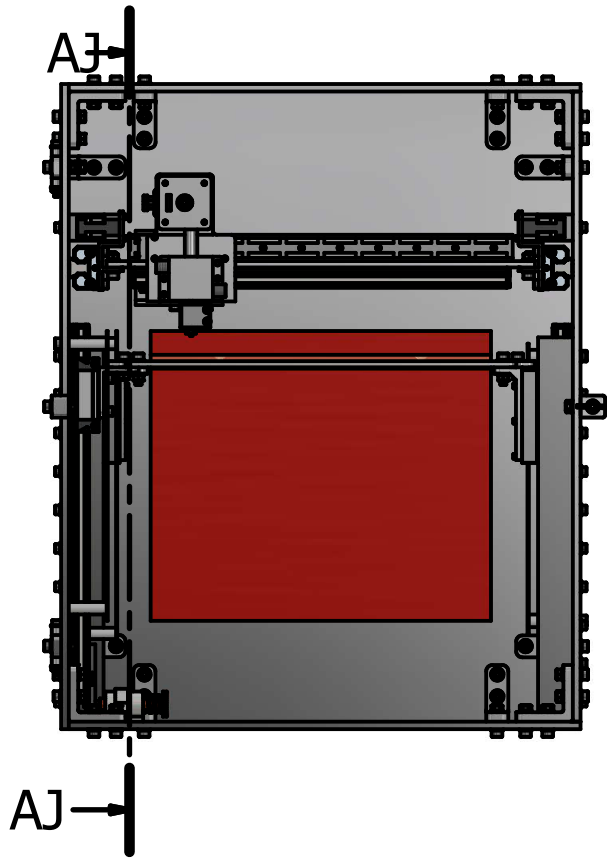
J ( 0.50 )

M ( 1:1 )

Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.15	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
		Quantidade:	Edição	Folha

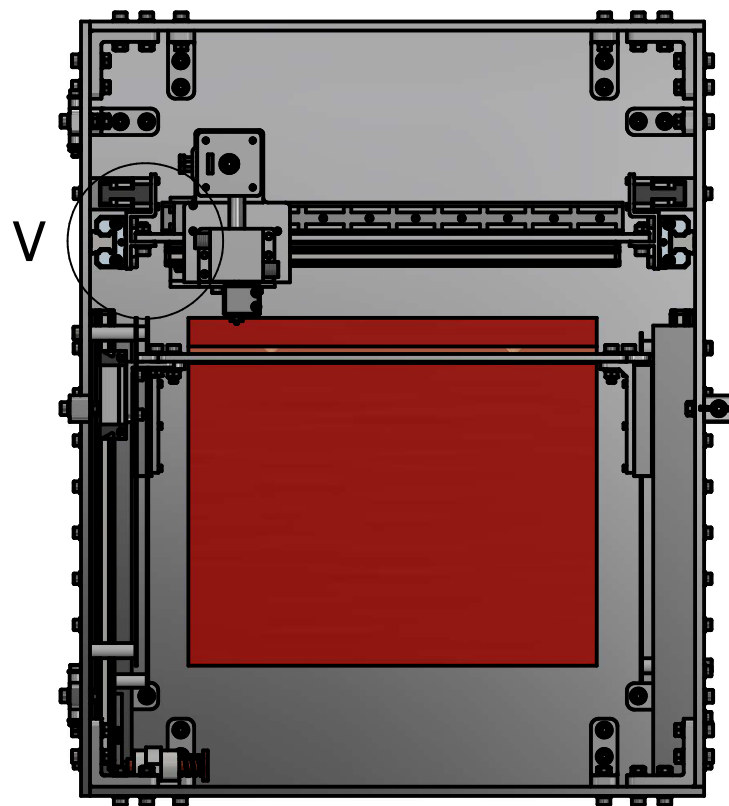
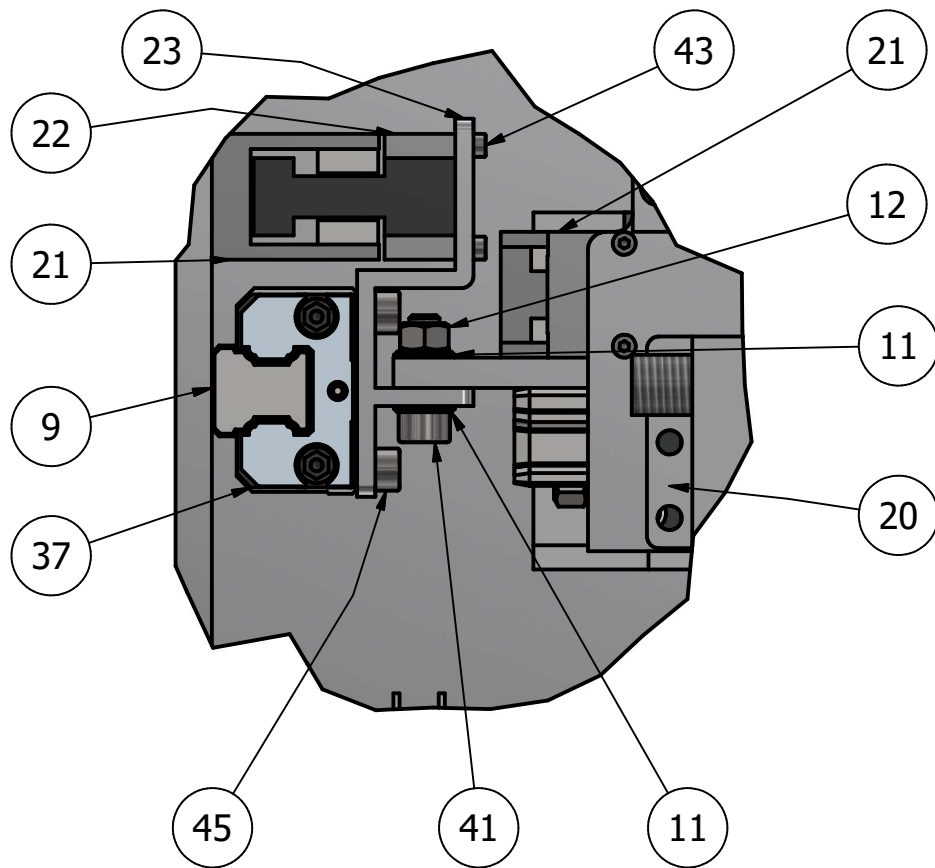
AJ-AJ ( 1 : 6 )

AK ( 1 : 2 )



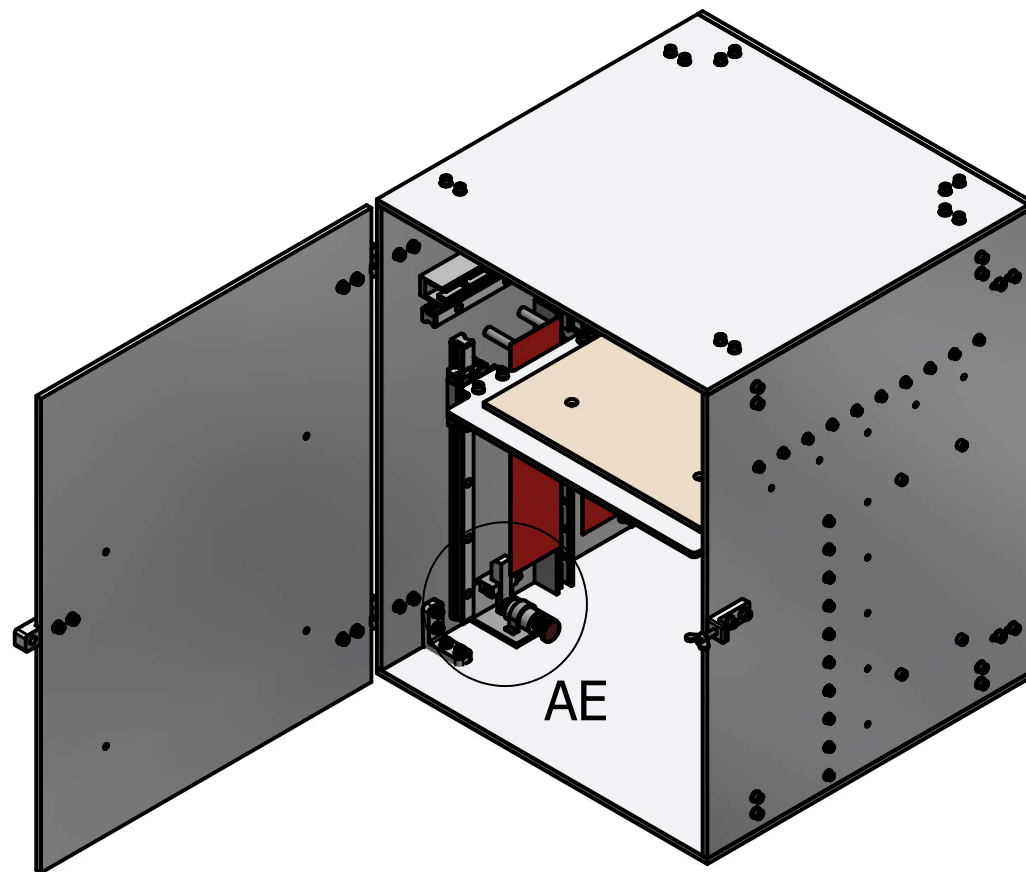
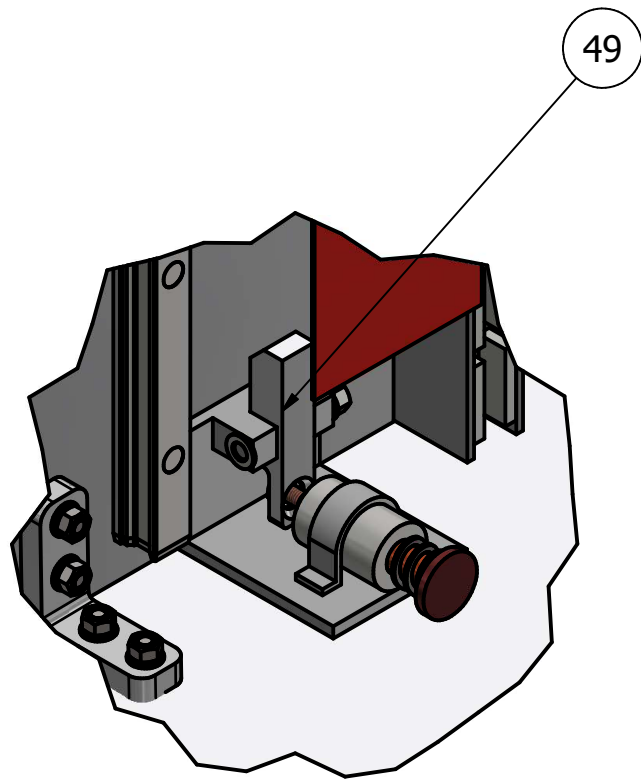
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 6	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
Quantidade:			Edição	Folha

V ( 0.8:1 )



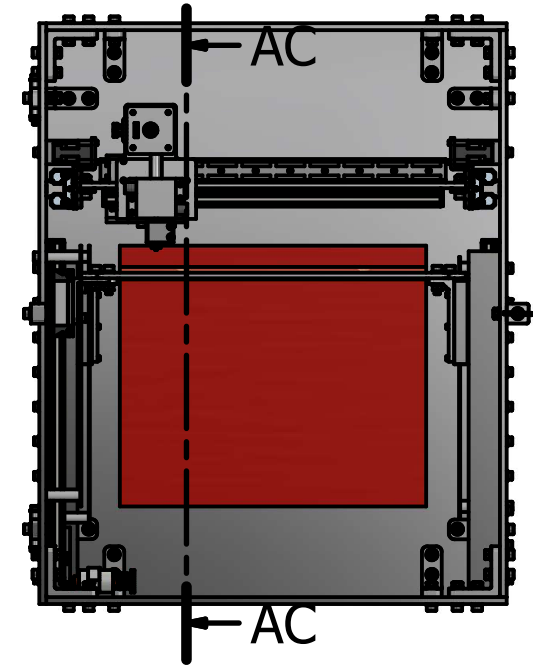
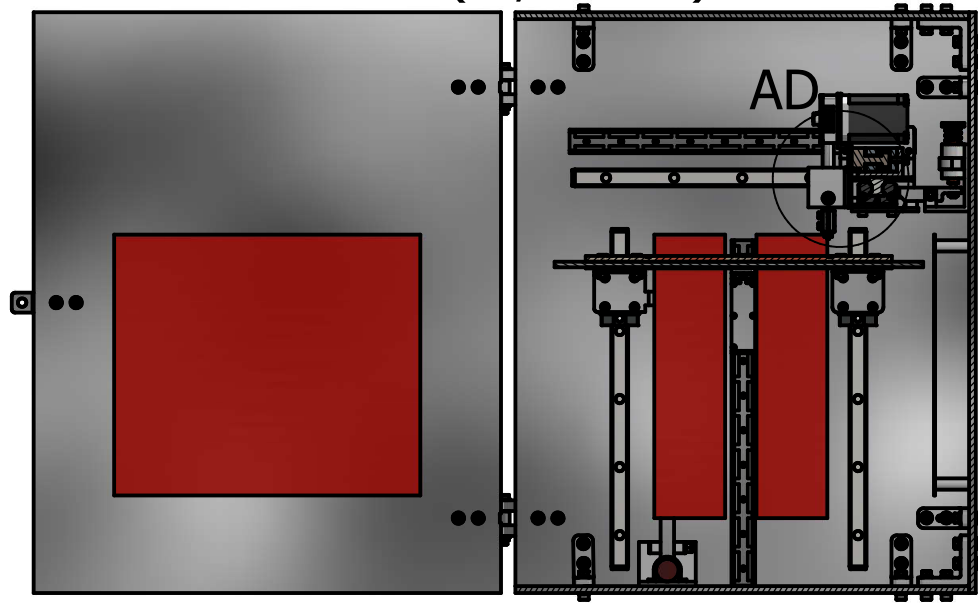
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.2:1	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
Quantidade:			Edição	Folha

AE ( 1 : 2 )

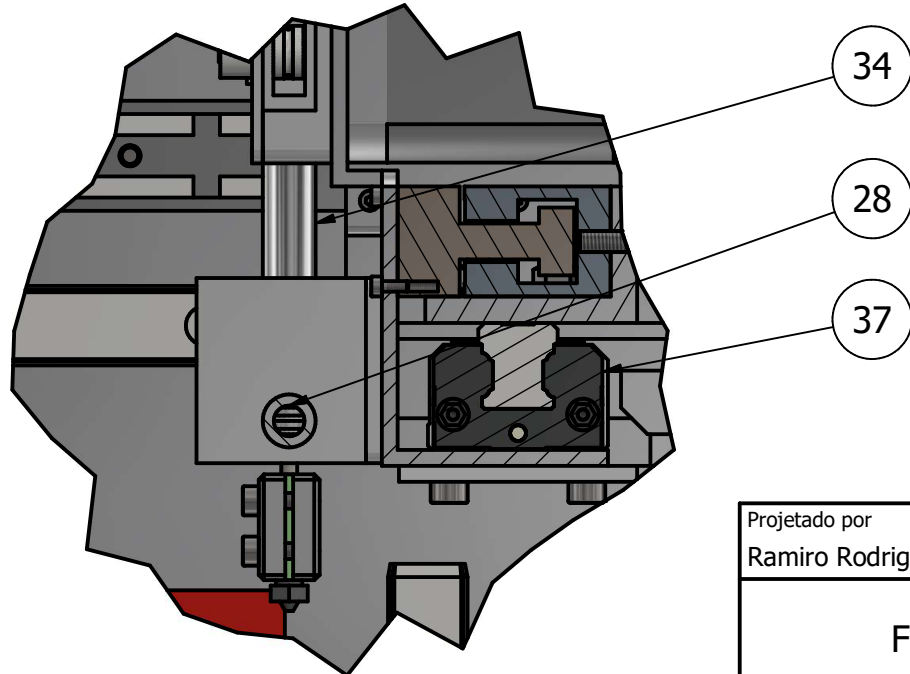


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,15 : 1	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
Quantidade:			Edição	Folha

AC-AC ( 0,15 : 1 )



AD ( 0,70 : 1 )

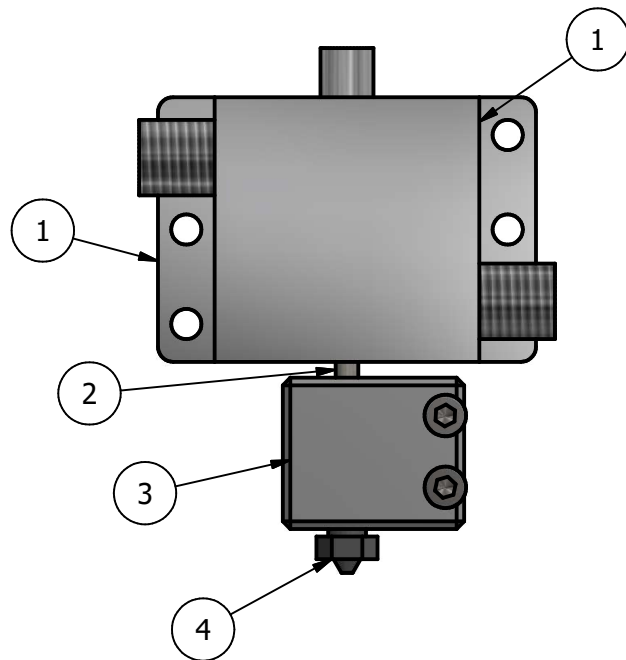
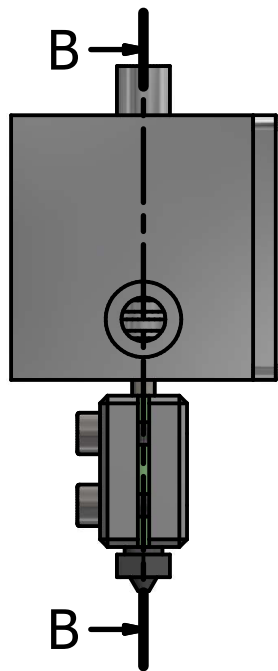


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,15 : 1	Desenho 1	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Impressora 3D		
Quantidade:			Edição	Folha

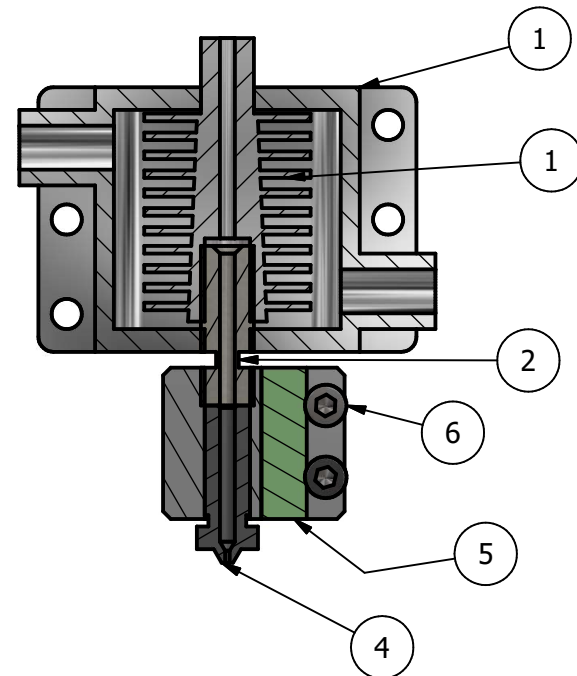
## Desenho 1 Lista de Peças

Lista de Peças				
ITEM	QTDE	PEÇA	DESCRIÇÃO	MASSA
1	1	Estrutura Fundo		3,411 kg
2	1	Estrutura Direita		3,228 kg
3	1	Estrutura Esquerda		3,225 kg
4	1	Estrutura Baixo		2,666 kg
5	1	Estrutura Cimo		2,666 kg
6	16	L bracket com ligações roscadas		0,056 kg
7	2	Dobradiça_1		0,020 kg
8	2	Dobradiça_2		0,016 kg
9	1	Porta		3,414 kg
10	16	ISO 4762 - M5 x 20	Parafuso Allen de cabeça	0,005 kg
11	52	ISO 7090 - 5 - 140 HV	Arruelas lisas, chanfradas - Série normal - Produto classe A	0,045 kg
12	26	ISO 4032 - M5	Porcas sextavadas, estilo 1 - Produto classes A e B	0,001 kg
13	2	ISO 4762 - M4 x 40	Parafuso Allen de cabeça	0,005 kg
14	54	ISO 7089 - 4	Arruelas lisas - Série normal - Produto classe A	0,000 kg
15	2	ISO 4032 - M4	Porcas sextavadas, estilo 1 - Produto classes A e B	0,001 kg
16	1	Fechadura_1		0,019 kg
17	1	Fechadura_2		0,025 kg
18	1	IS 2636 - M 5		0,004 kg
20	6	Guia Linear		0,440 kg
21	5	Calha Motor Linear		0,248 kg
22	5	Motor Linear		0,085 kg
23	5	Conector Eixo X		0.081 kg

<b>ITEM</b>	<b>QTDE</b>	<b>PEÇA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>MASSA</b>
<b>24</b>	1	Ponte eixo X		0,263 kg
<b>25</b>	1	Conector Extrusor		0,069 kg
<b>26</b>	50	ISO 4762 - M4 x 12	Parafuso Allen de cabeça	0,002 kg
<b>28</b>	1	Montagem Extrusor		0,108 kg
<b>29</b>	1	Mesa de Impressão		1,387 kg
<b>30</b>	1	Superfície de Impressão		7,023 kg
<b>31</b>	1	Aquecedor cama		0,077 kg
<b>32</b>	2	Conector Mesa - Motor Linear		0,025 kg
<b>33</b>	1	Alimentador		0,062 kg
<b>34</b>	1	Conector extrusor feeder		0,004 kg
<b>35</b>	1	Motor Passo a Passo	STEP AP203	0,610 kg
<b>36</b>	30	ISO 4762 - M4 x 16	Parafuso Allen de cabeça	0,003 kg
<b>37</b>	6	Patim Guia Linear		0,024 kg
<b>41</b>	23	ISO 4762 - M5 x 16	Parafuso Allen de cabeça	0,004 kg
<b>43</b>	14	ISO 4762 - M2 x 5	Parafuso Allen de cabeça	0,000 kg
<b>44</b>	10	ISO 4762 - M2 x 10	Parafuso Allen de cabeça	0,000 kg
<b>45</b>	24	ISO 4762 - M4 x 8	Parafuso Allen de cabeça	0,002 kg
<b>46</b>	2	Radiador Modelo 1		0,022 kg
<b>47</b>	2	Radiador Modelo 3		0,071 kg
<b>48</b>	1	Radiador Modelo 2		0,032 kg
<b>49</b>	2	Sistema de Imobilização		0,060 kg
<b>50</b>	1	Conector Sistema de Imobilização Eixo X e Y		0,008 kg
<b>51</b>	1	Conector Sistema de Imobilização Eixo Z		0,020 kg



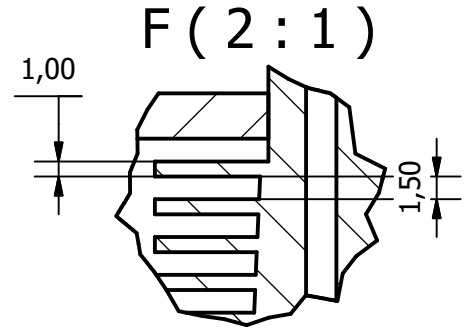
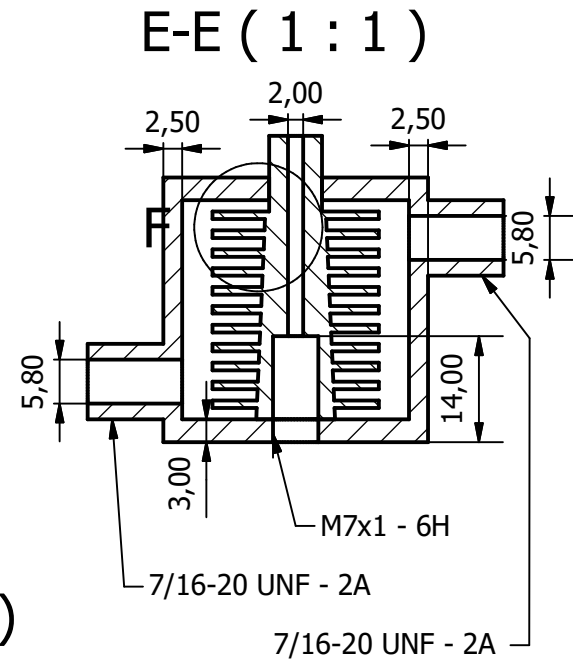
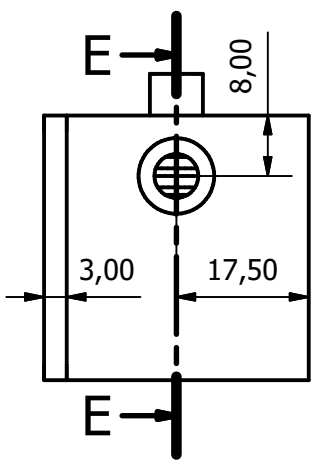
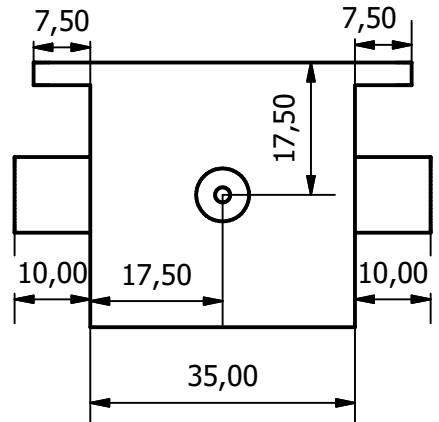
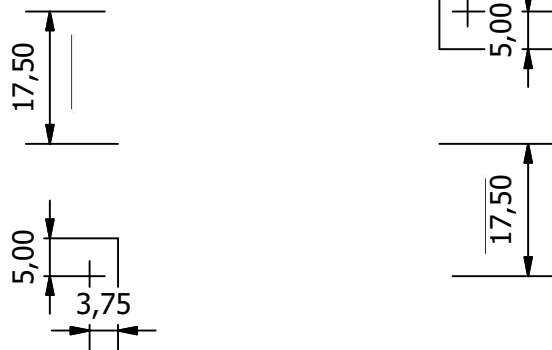
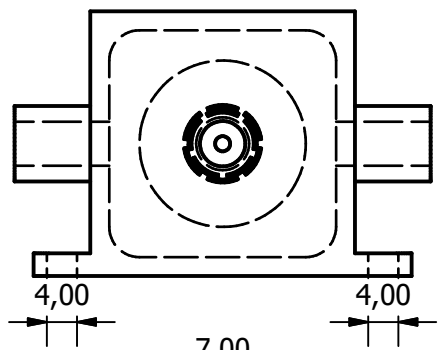
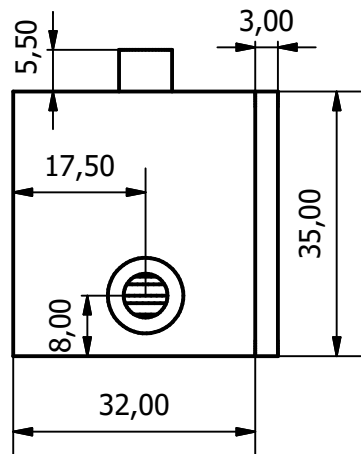
B-B ( 1 : 1 )



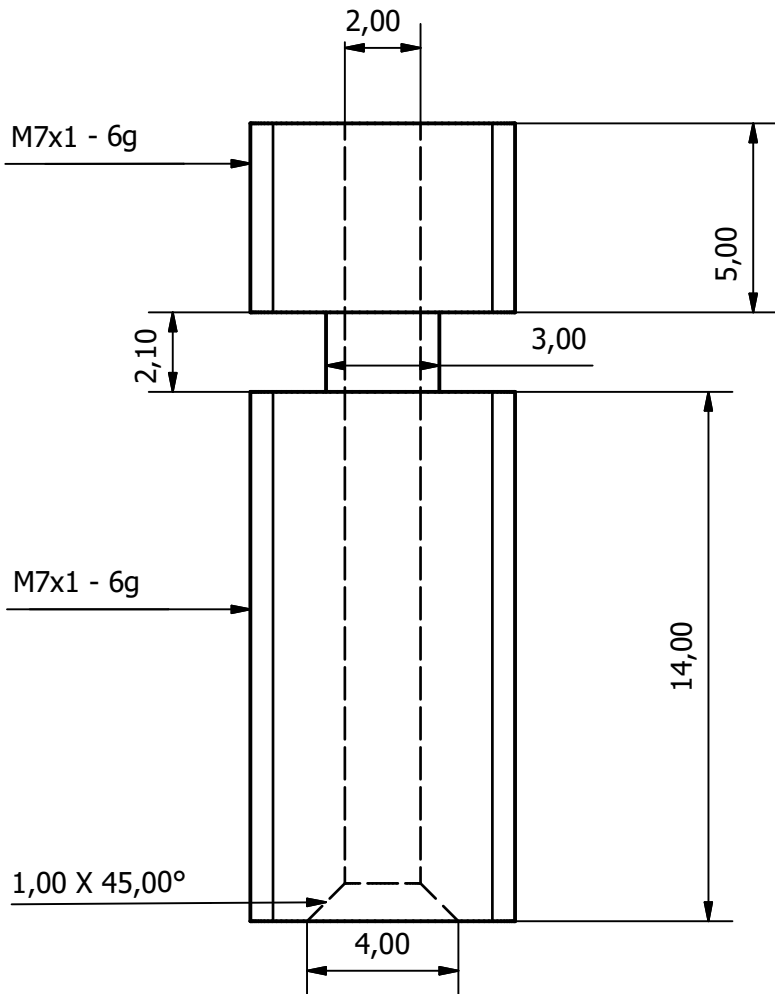
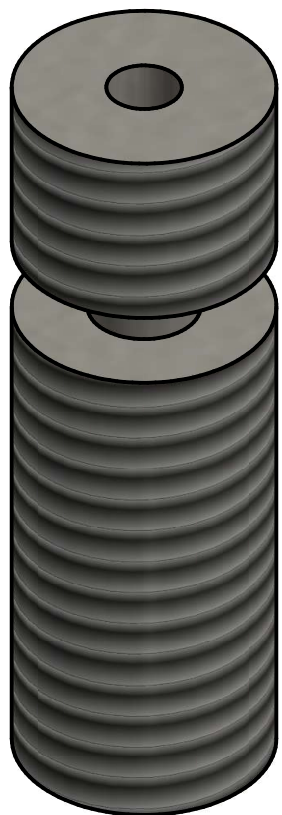
LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO	MASSA
1	1	Permutador de Calor		0,066 kg
2	1	Heatbreak		0,003 kg
3	1	Bloco de Aquecimento		0,031 kg
4	1	Nozzle		0,004 kg
5	1	Resistencia		0,001 kg
6	2	AS 1420 - 1973 - M3 x 10	Parafusos Allen de cabeça métricos ISO	0,001 kg

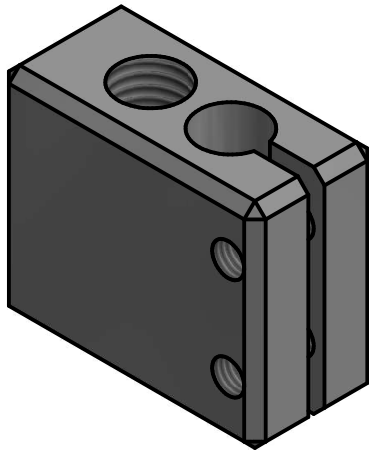
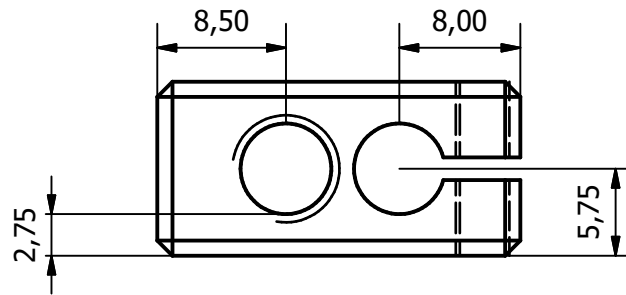
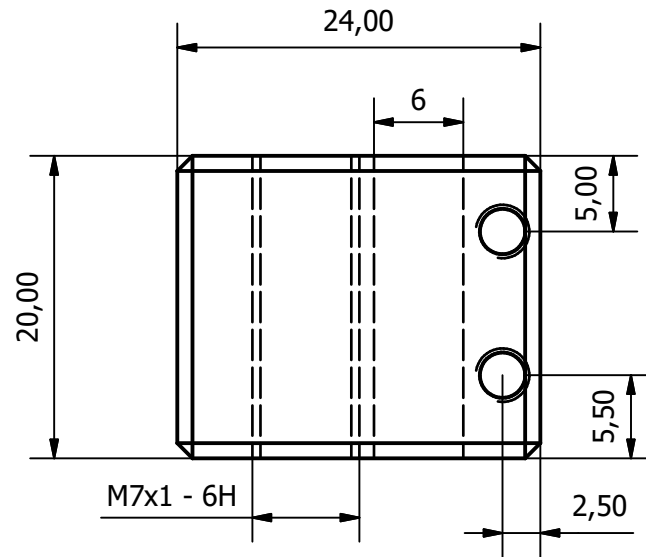
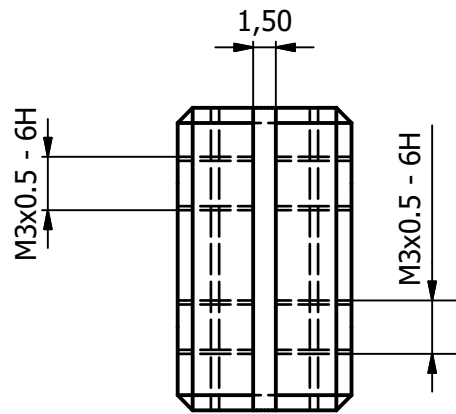
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 2	Material	Data 30/08/2020
FEUP/INEGI		Montagem Extrusor		
		Quantidade:	Edição	Folha



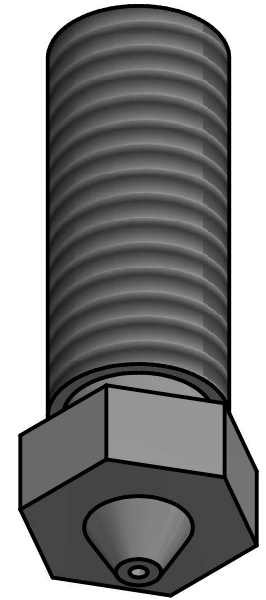
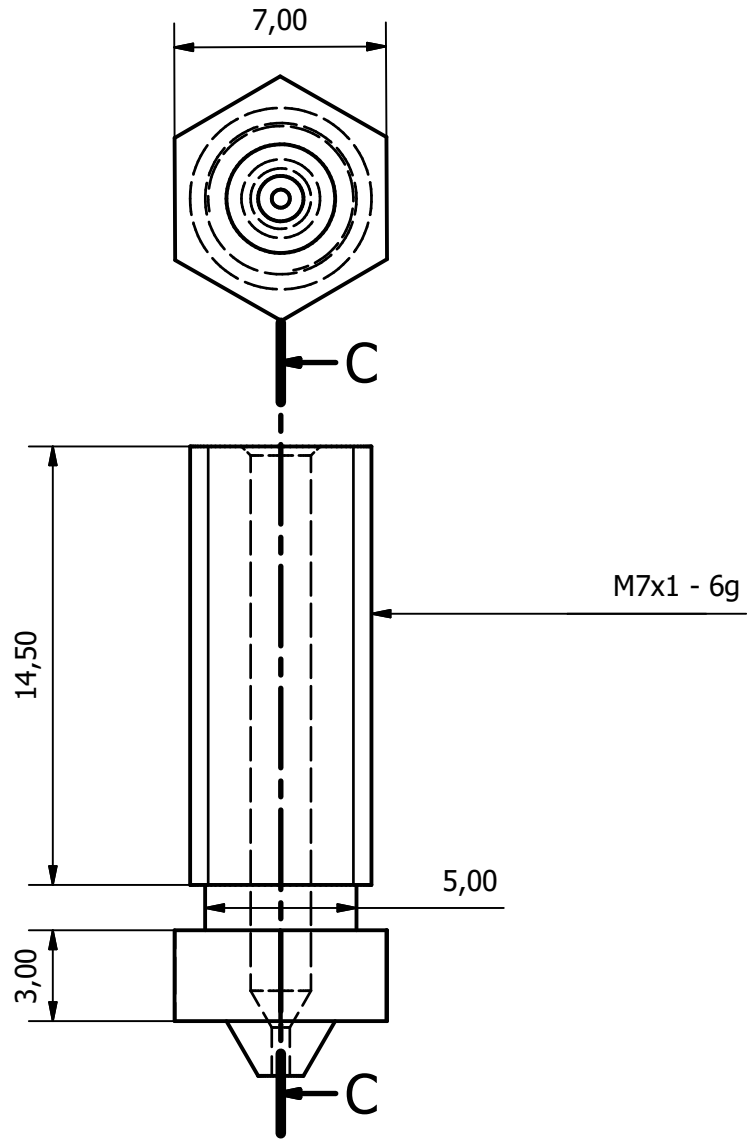
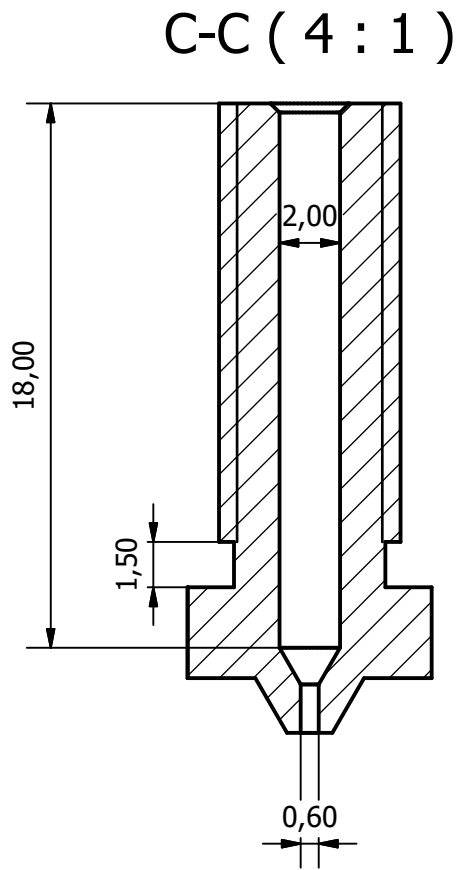
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 2	Material	Data 30/08/2020
FEUP/INEGI		Permutador de Calor		
Quantidade:			Edição	Folha



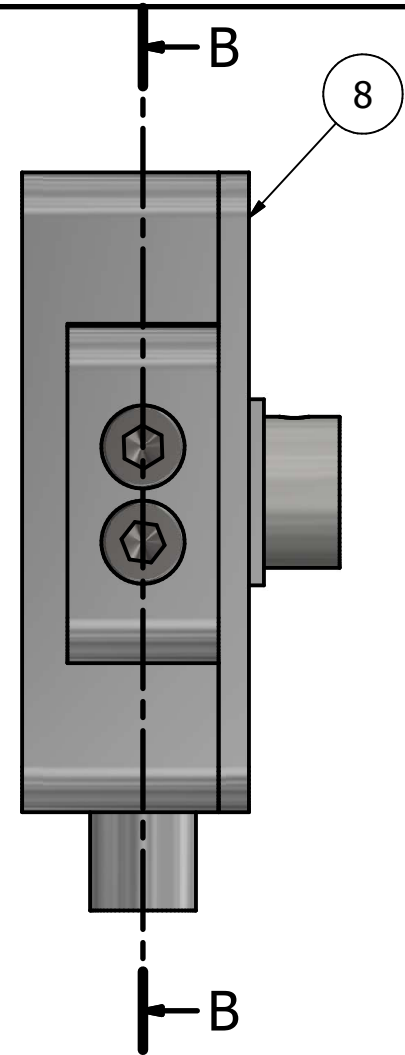
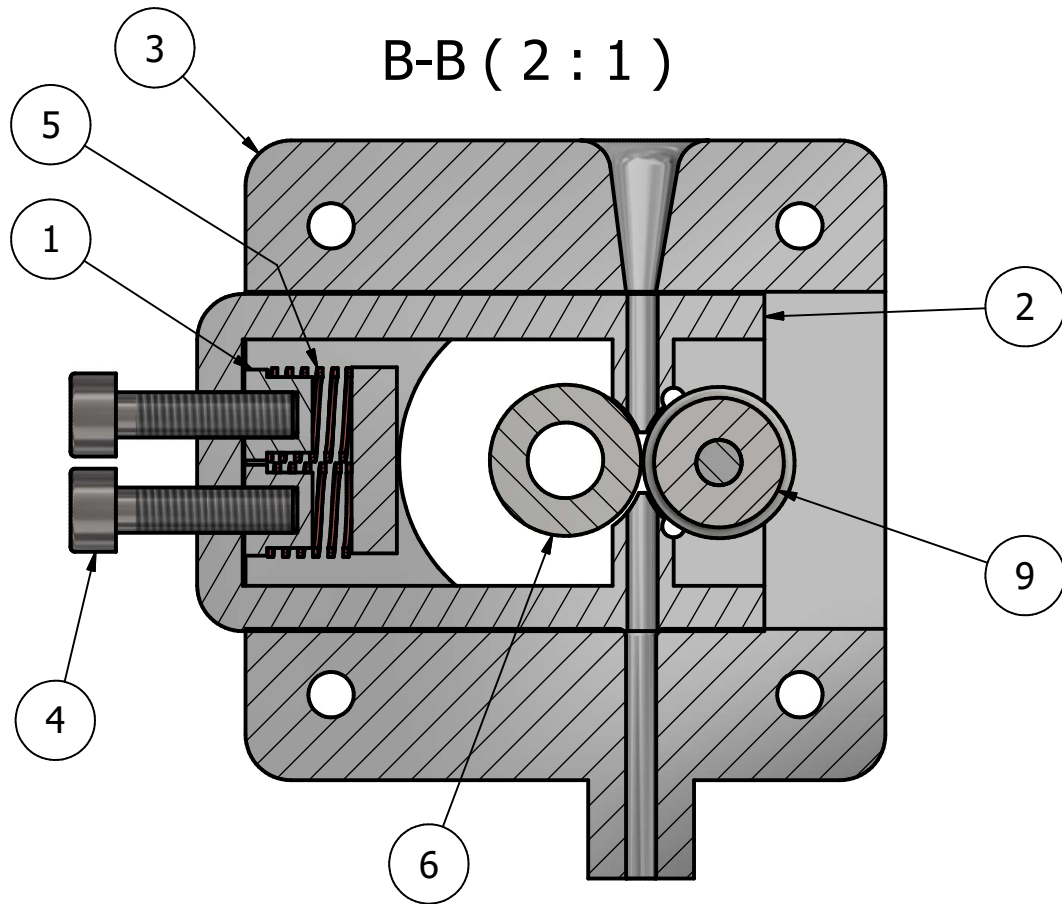
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 5 : 1	Desenho 2	Material Titânio	Data 30/08/2020
FEUP/INEGI		Heatbreak		
Quantidade:			Edição	Folha



Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 2 : 1	Desenho 2	Material Aço	Data 30/08/2020
FEUP/INEGI		Bloco de Aquecimento		
		Quantidade:	Edição	Folha



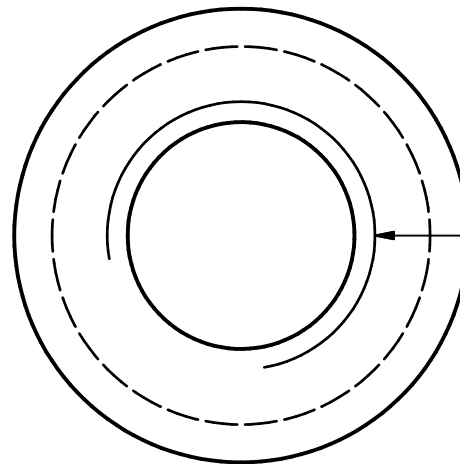
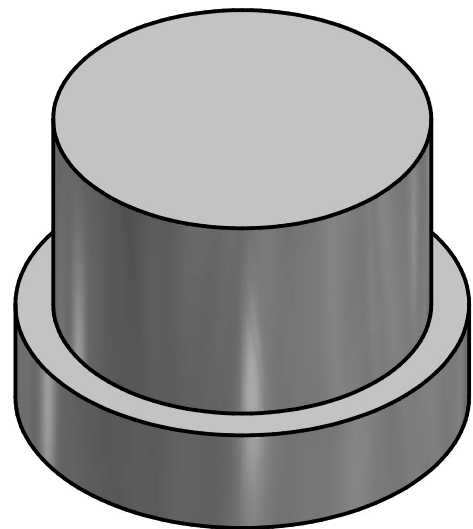
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 4 : 1	Desenho 2	Material Aço, carbono	Data 30/08/2020
FEUP/INEGI		Nozzle		
Quantidade:			Edição	Folha



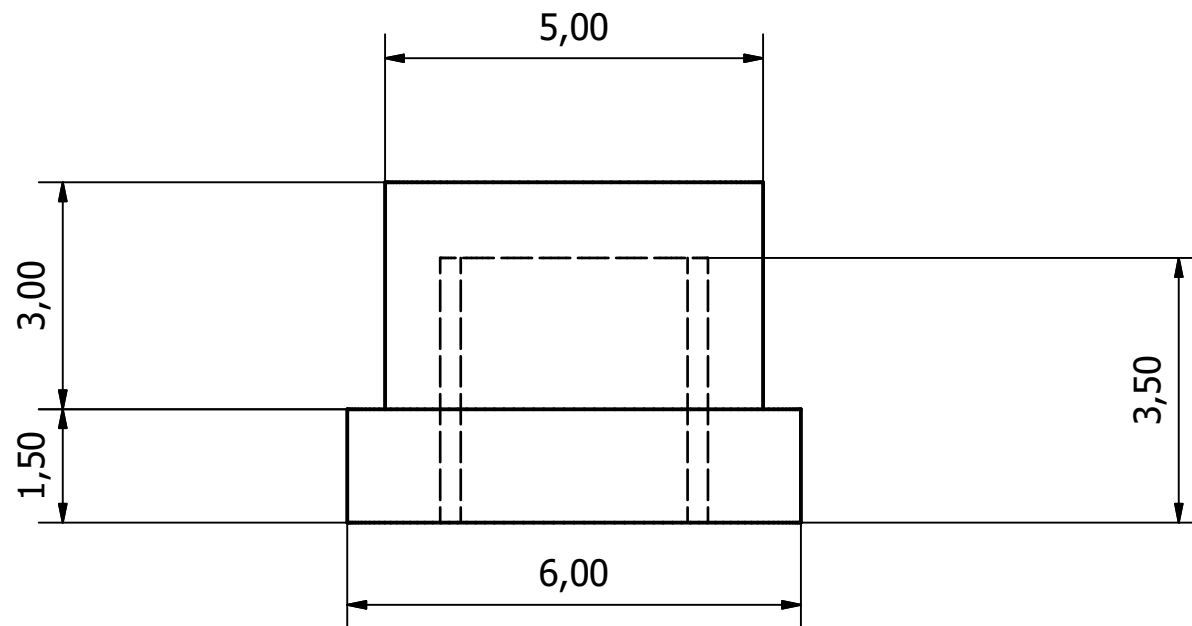
LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	MASSA
1	2	Conector Mola Parafuso	0,000 kg
2	1	Corpo Alimentador 1	0,009 kg
3	1	Corpo Alimentador 2	0,035 kg
4	2	ISO 4762 - M3 x 12	0,001 kg
5	2	Mola	0,000 kg
6	1	Roda Motriz	0,007 kg
8	1	Tampa	0,009 kg
9	1	Roda Guia	0,003 kg

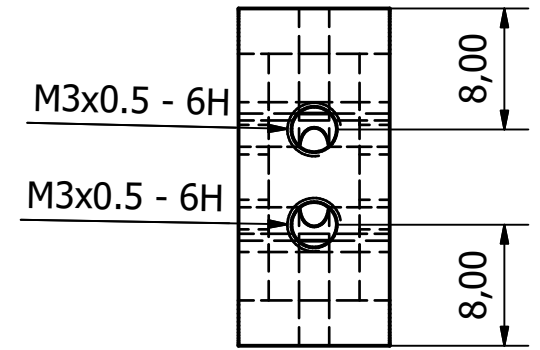
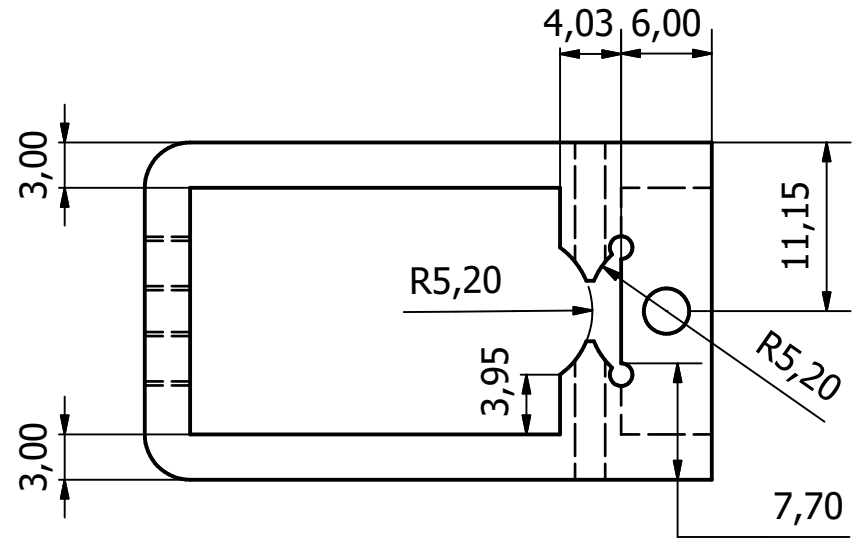
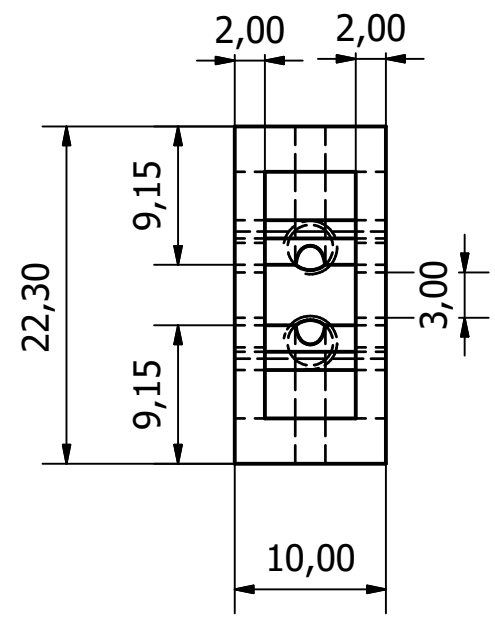
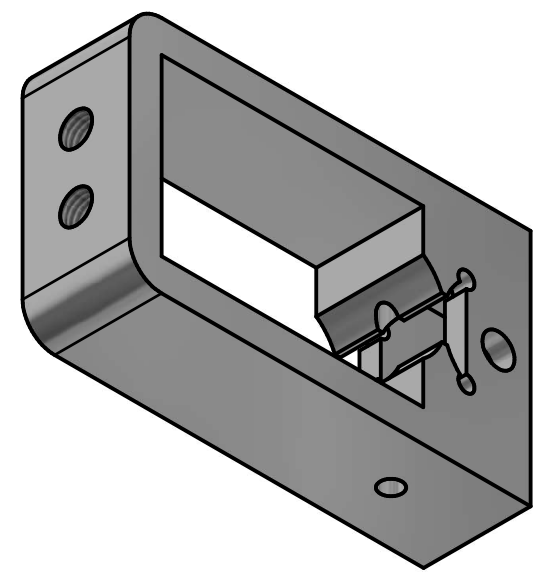
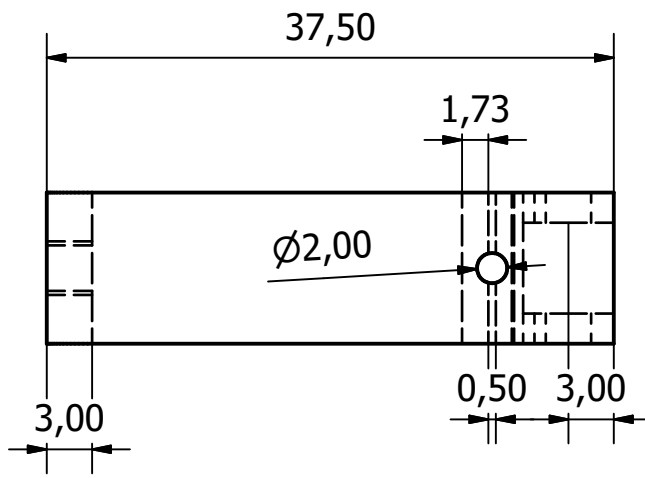
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 2 : 1	Desenho 3	Material	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Alimentador		
		Quantidade:	Edição	Folha 1/7



M3x0.5 - 6H

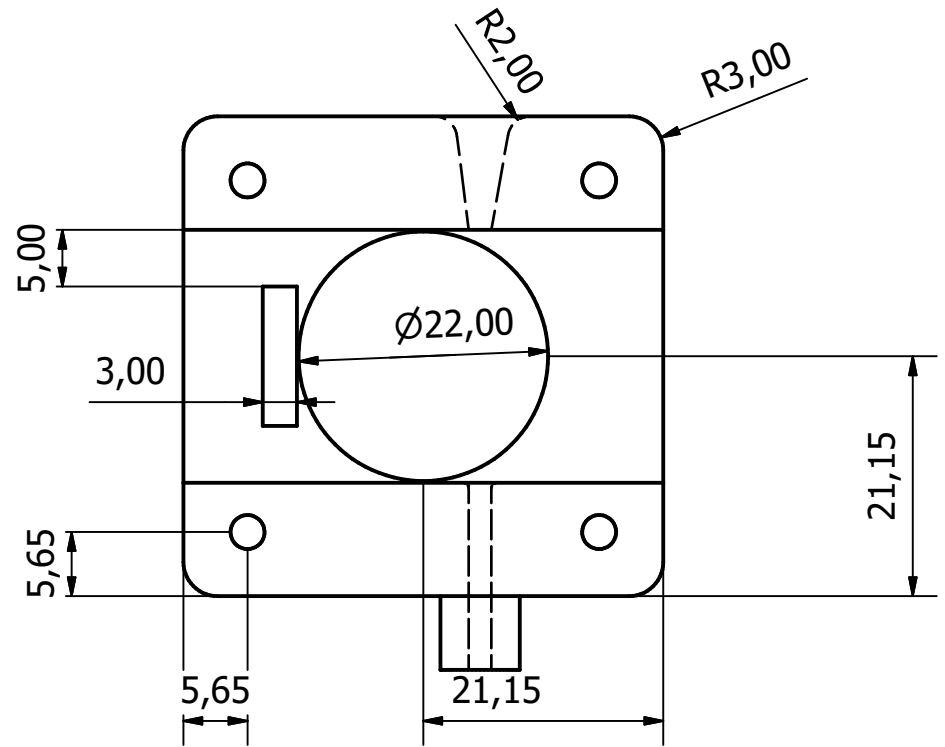
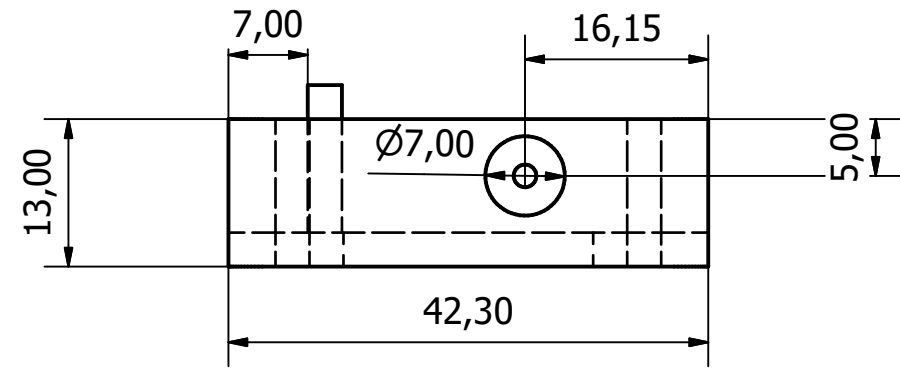
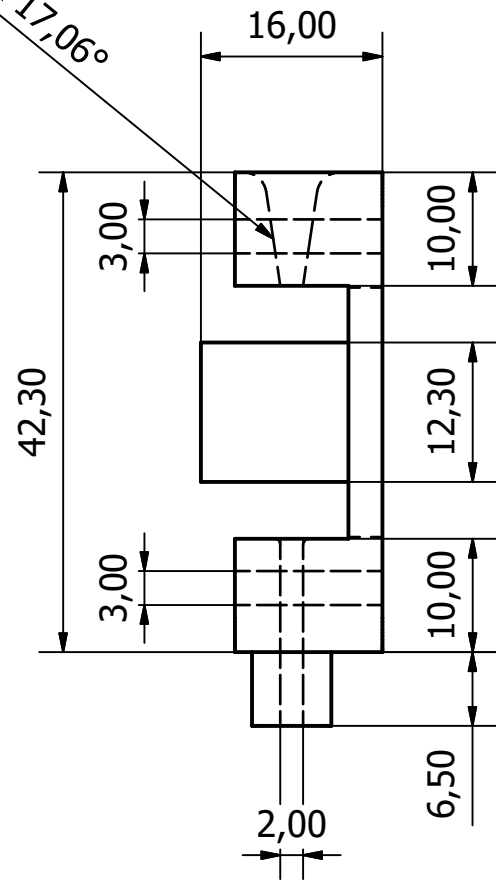


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 10 : 1	Desenho 3	Material Alumínio 6061	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI			Conector Mola Parafuso	
Quantidade:			Edição	Folha 2/7



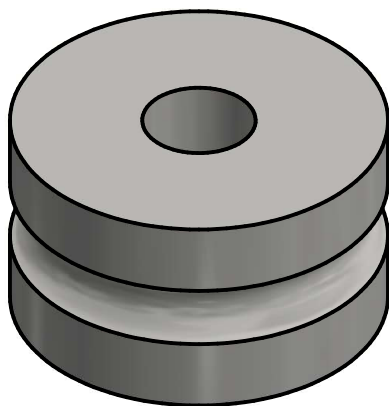
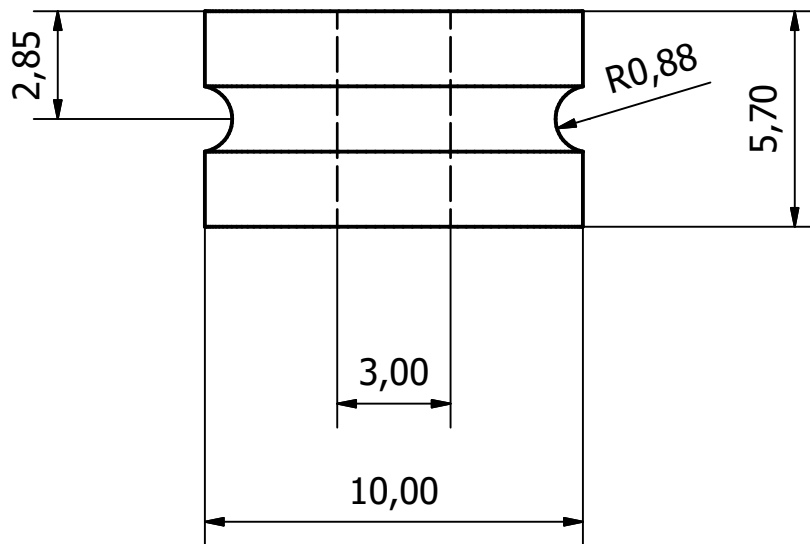
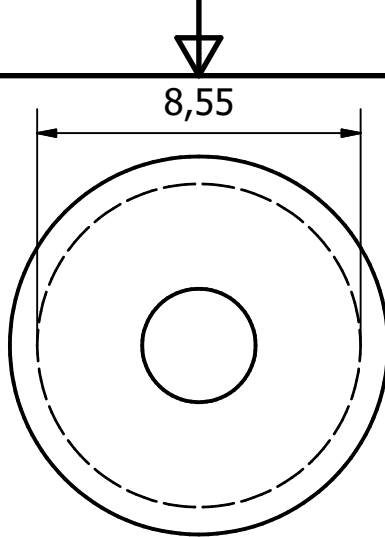
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 2 : 1	Desenho 3	Material Alumínio 6061	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Corpo Alimentador 1		
		Quantidade:	Edição	Folha 3/7

8,02 X 17,06°



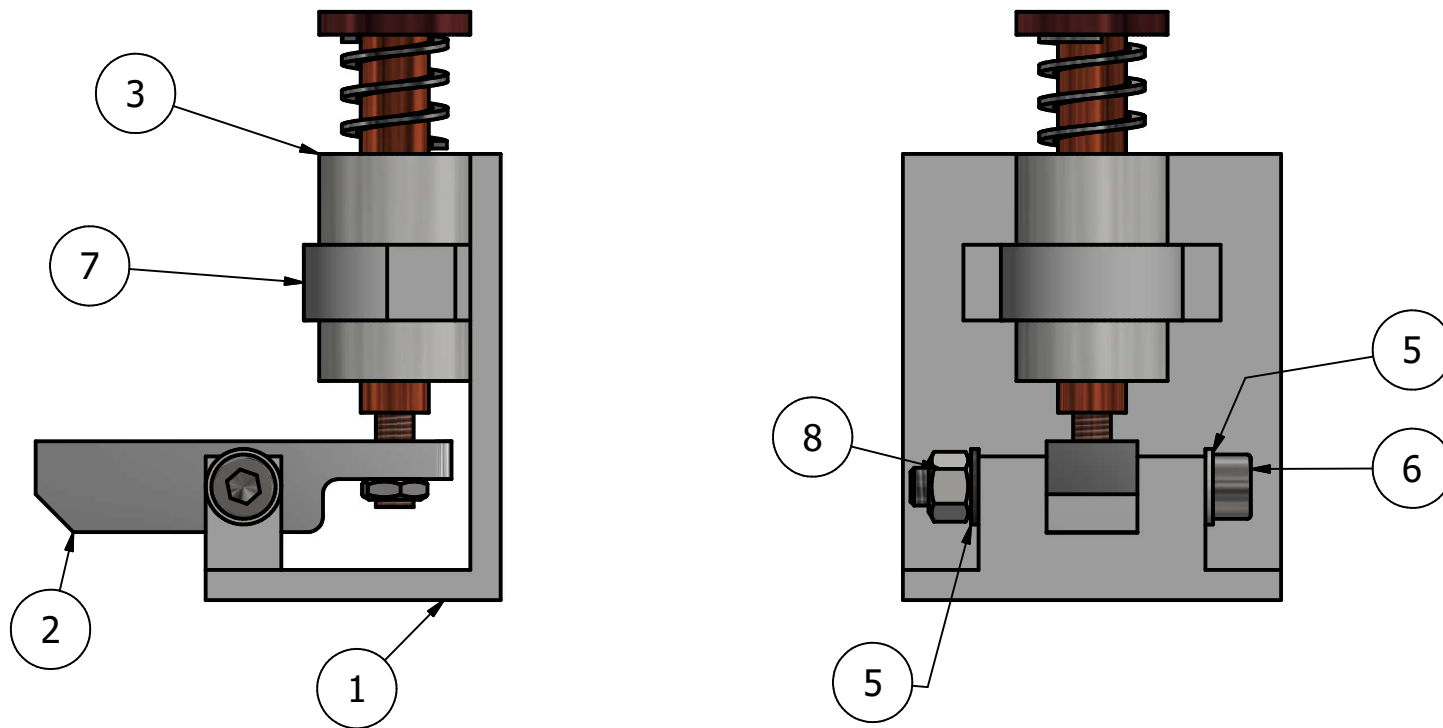
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1.5:1	Desenho 3	Material Alumínio 6061	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI		Corpo Alimentador 2		
		Quantidade:	Edição	Folha 4/7





Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 5 : 1	Desenho 3	Material Aço 316	Data 28/08/2020
FEUP/INEGI			Roda Guia	
			Quantidade:	Folha 6/7

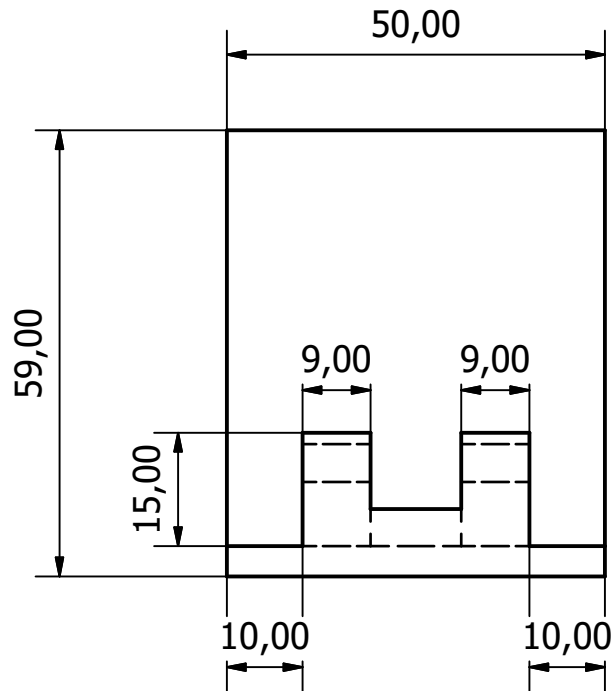
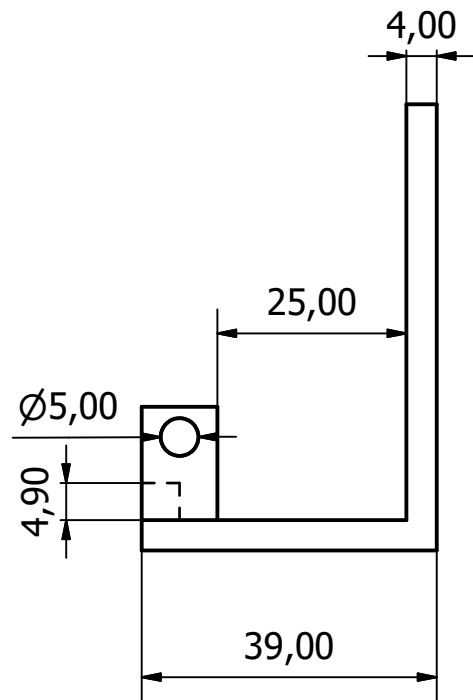




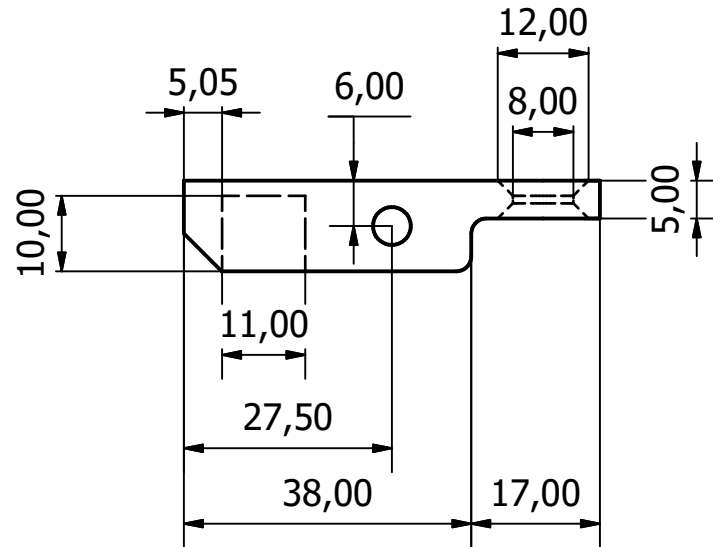
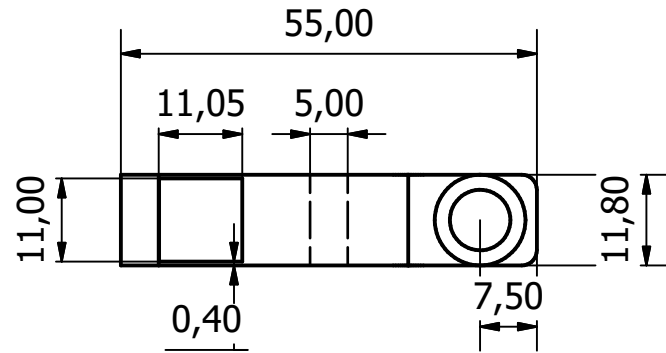
LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	Suporte	
2	1	Braço	
3	1	Solenóide	
4	1	ISO 4035 - M5	Porcas sextavadas finas (Chanfradas) - Produto classes A e B
5	2	ISO 7091 - ST 5 - 100 HV	Arruelas lisas - Série normal - Produto classe C
6	1	ISO 4762 - M5 x 40	Parafuso Allen de cabeça
7	1	Suporte Solenóide	
8	1	ISO 4034 - M5	Porcas sextavadas - Produto classe C

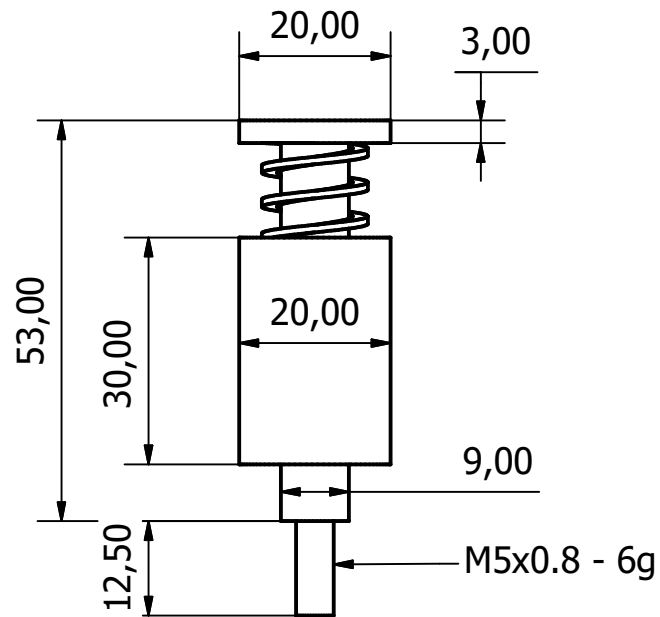
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Sistema de Imobilização		
		Quantidade:	Edição	Folha



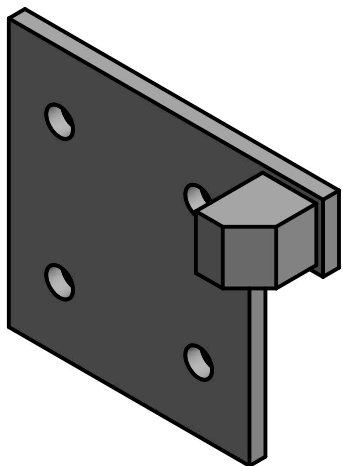
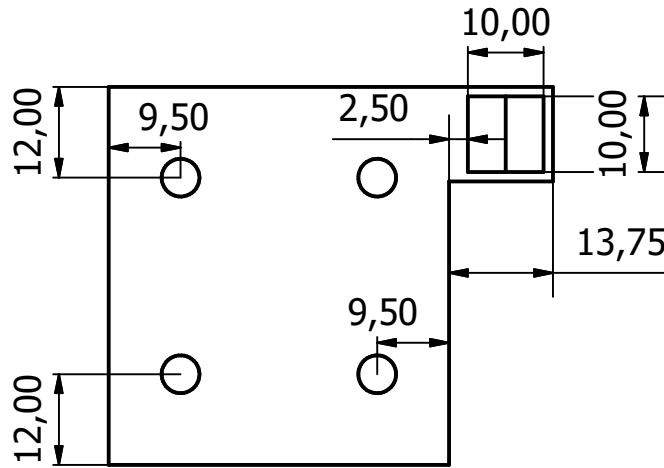
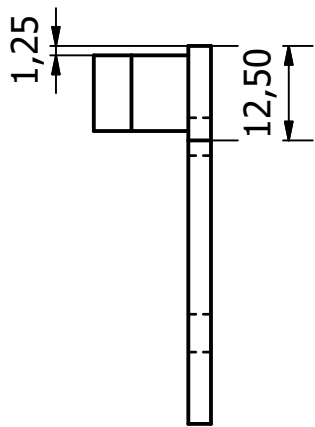
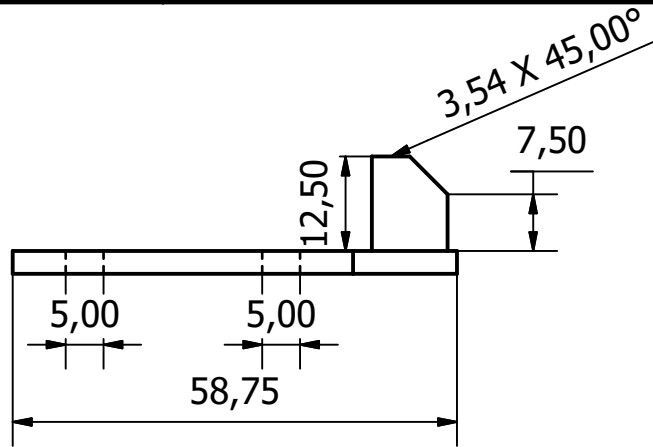
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material Genérico	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Suporte Parede		
		Quantidade:	Edição	Folha



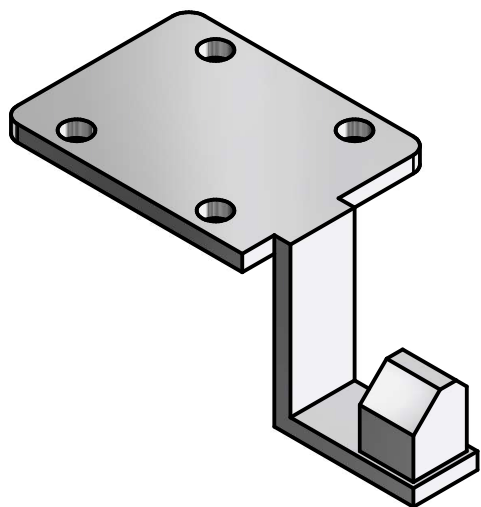
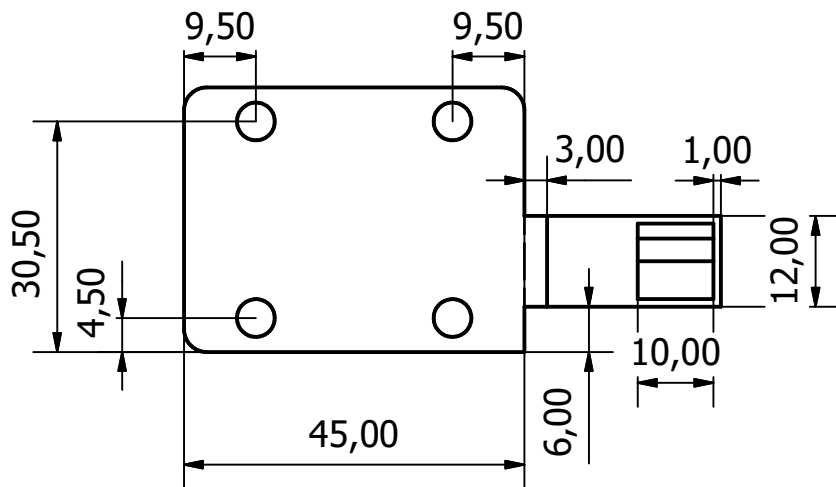
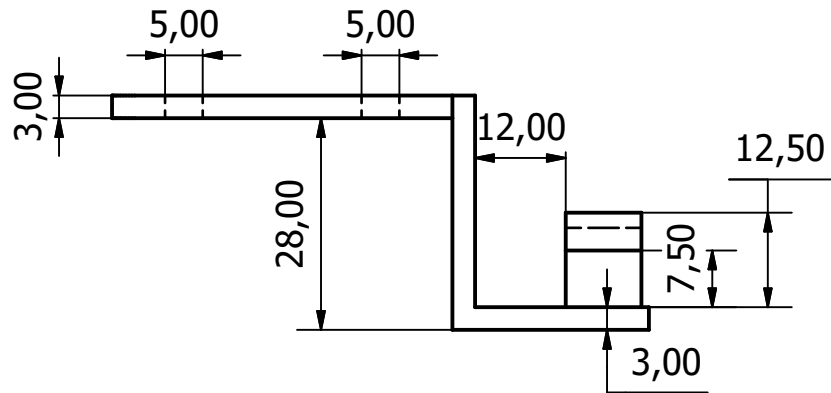
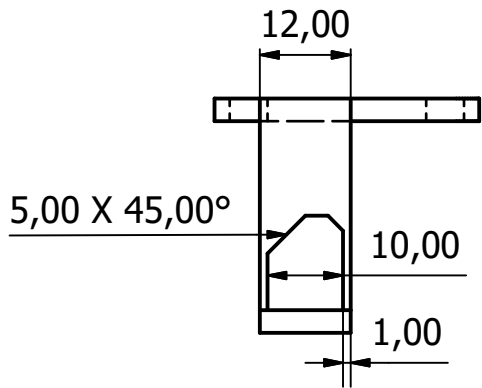
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material Alumínio 6061	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Braço		
		Quantidade:	Edição	Folha



Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Solenóide		
Quantidade:			Edição	Folha

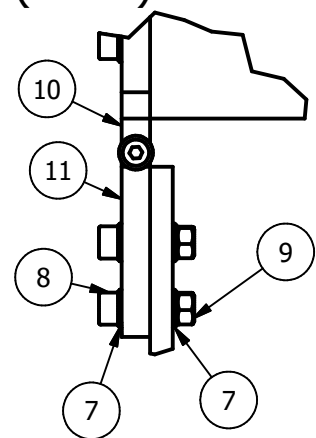


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material Genérico	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI			Conector Sistema de Imobilização Eixo X e Y	
			Quantidade:	Edição Folha

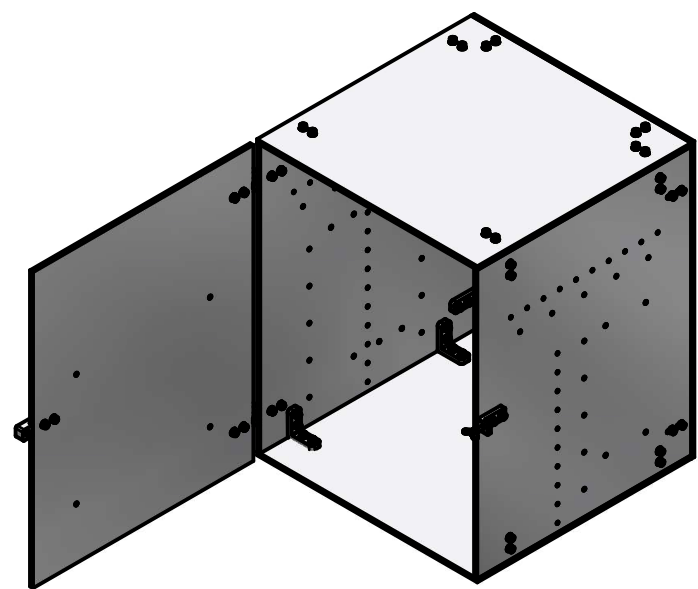
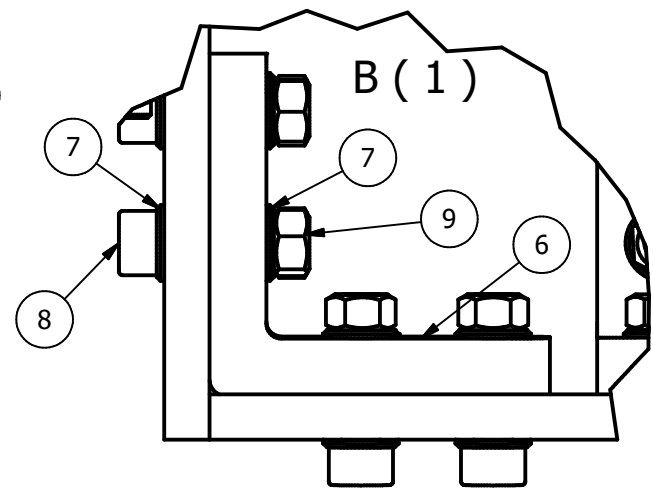
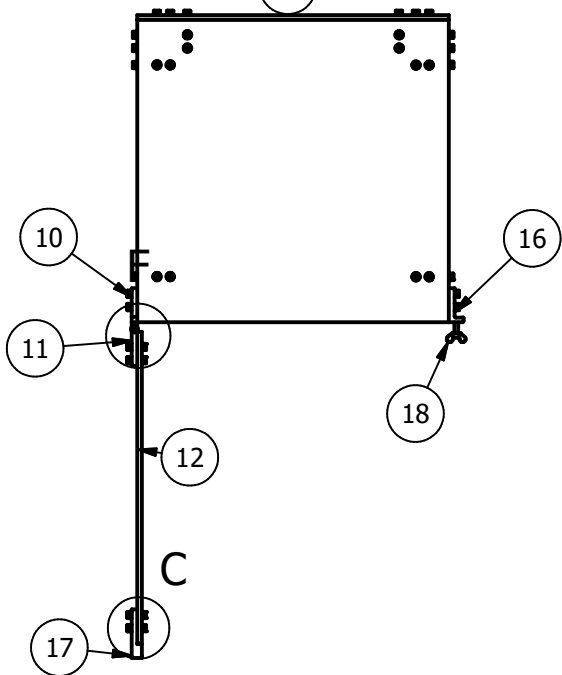
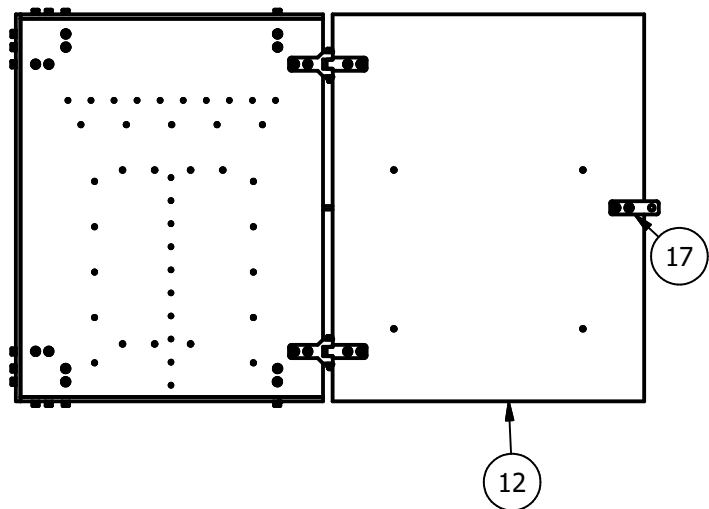
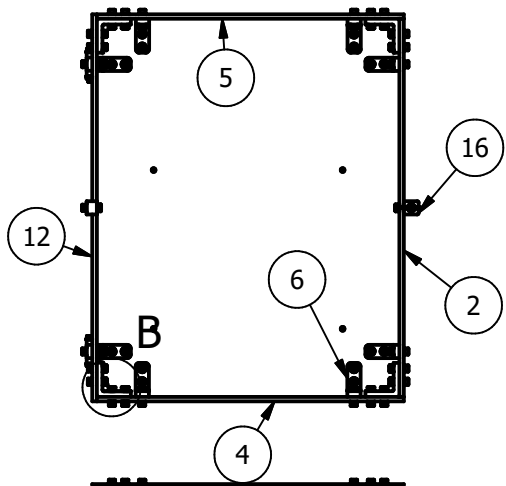
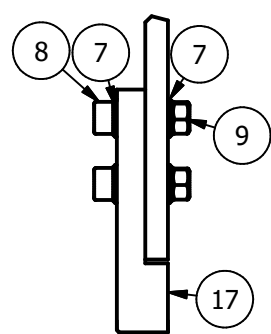


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 4	Material Alumínio 6061	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Conector Sistema de Imobilização Eixo Z		
		Quantidade:	Edição	Folha

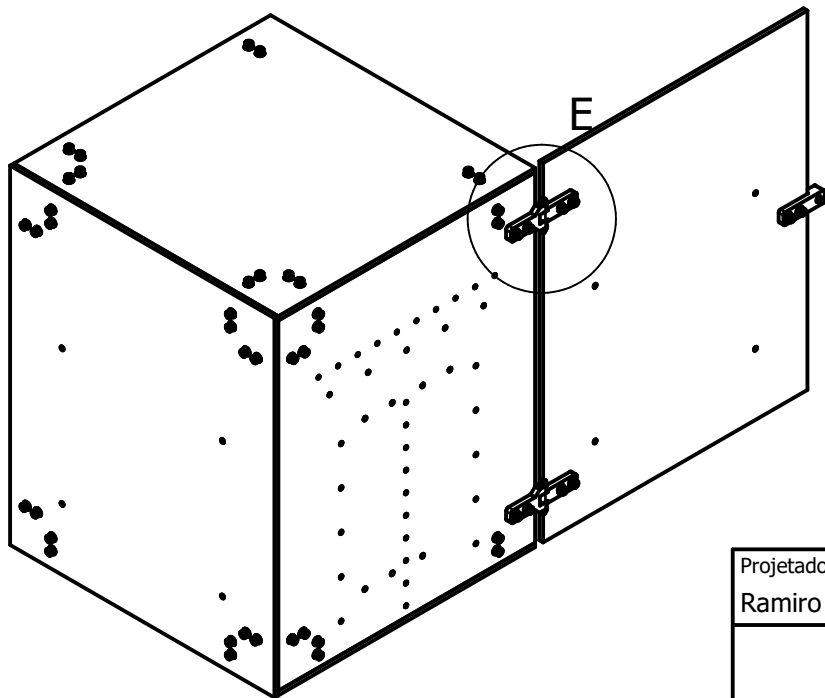
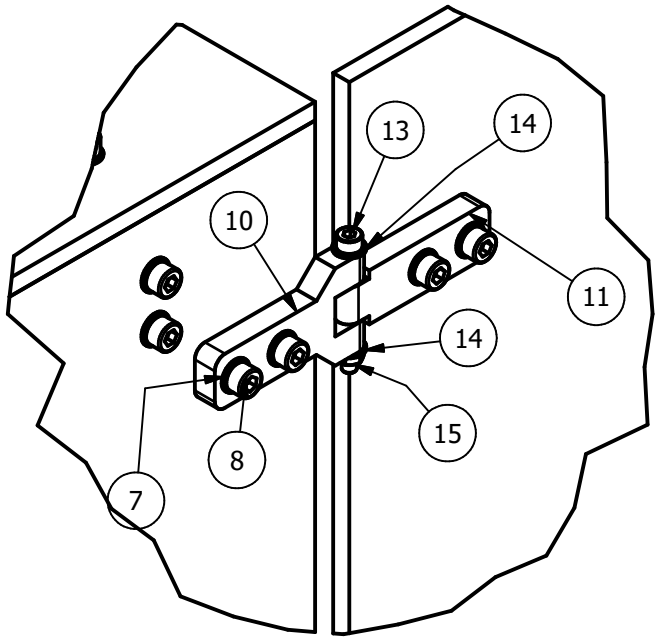
F ( 1 : 2 )



C ( 1 : 2 )

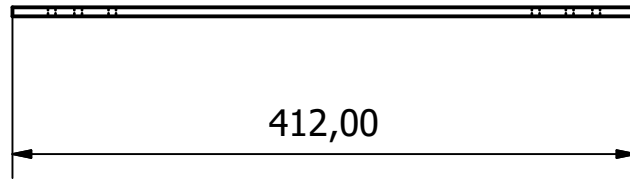
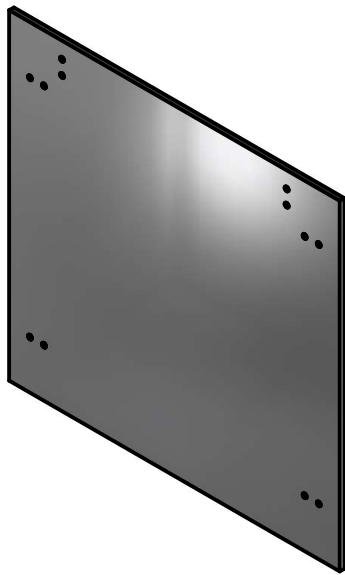
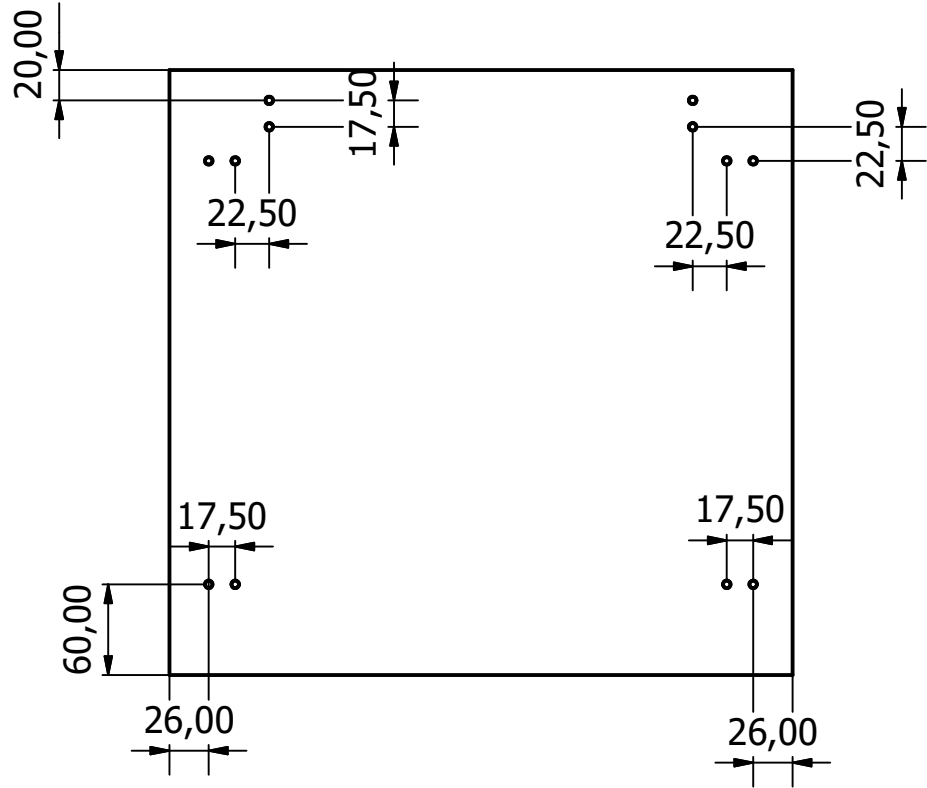
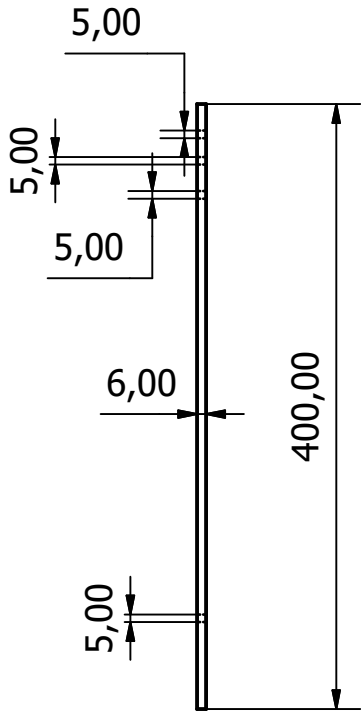


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 10	Desenho 5	Material	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura da Impressora		
Quantidade:			Edição	Folha



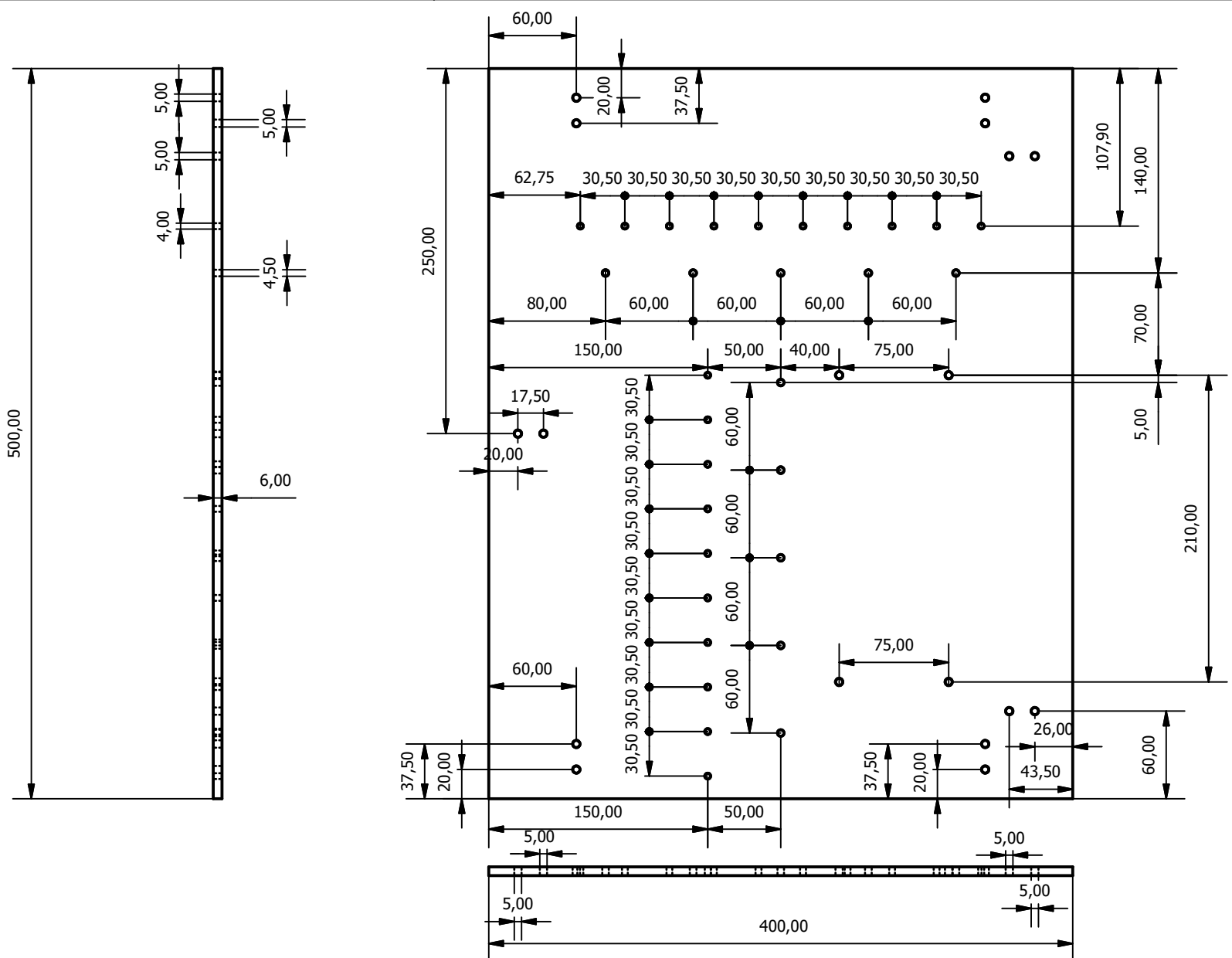
LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	Estrutura Fundo	
2	1	Estrutura Direita	
3	1	Estrutura Esquerda	
4	1	Estrutura Baixo	
5	1	Estrutura Cimo	
6	16	L bracket	
7	152	ISO 7090 - 5 - 140 HV	Arruelas lisas, chanfradas - Série normal - Produto classe A
8	76	ISO 4762 - M5 x 20	Parafuso Allen de cabeça
9	76	ISO 4032 - M5	Porcas sextavadas, estilo 1 - Produto classes A e B
10	2	Dobradiça_1	
11	2	Dobradiça_2	
12	1	Porta	
13	2	ISO 4762 - M4 x 40	Parafuso Allen de cabeça
14	4	ISO 7089 - 4	Arruelas lisas - Série normal - Produto classe A
15	2	ISO 4032 - M4	Porcas sextavadas, estilo 1 - Produto classes A e B
16	1	Fechadura_1	
17	1	Fechadura_2	
18	1	IS 2636 - M 5	Especificação para porca borboletas

Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,12 : 1	Desenho 5	Material	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura da Impressora		
Quantidade:			Edição	Folha

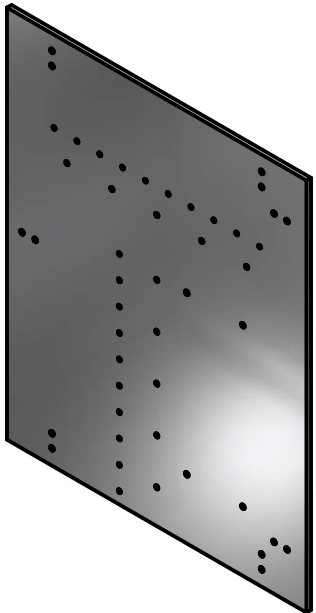


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,2 : 1	Desenho 6	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura Baixo		
		Quantidade: 1	Edição	Folha 1 / 1

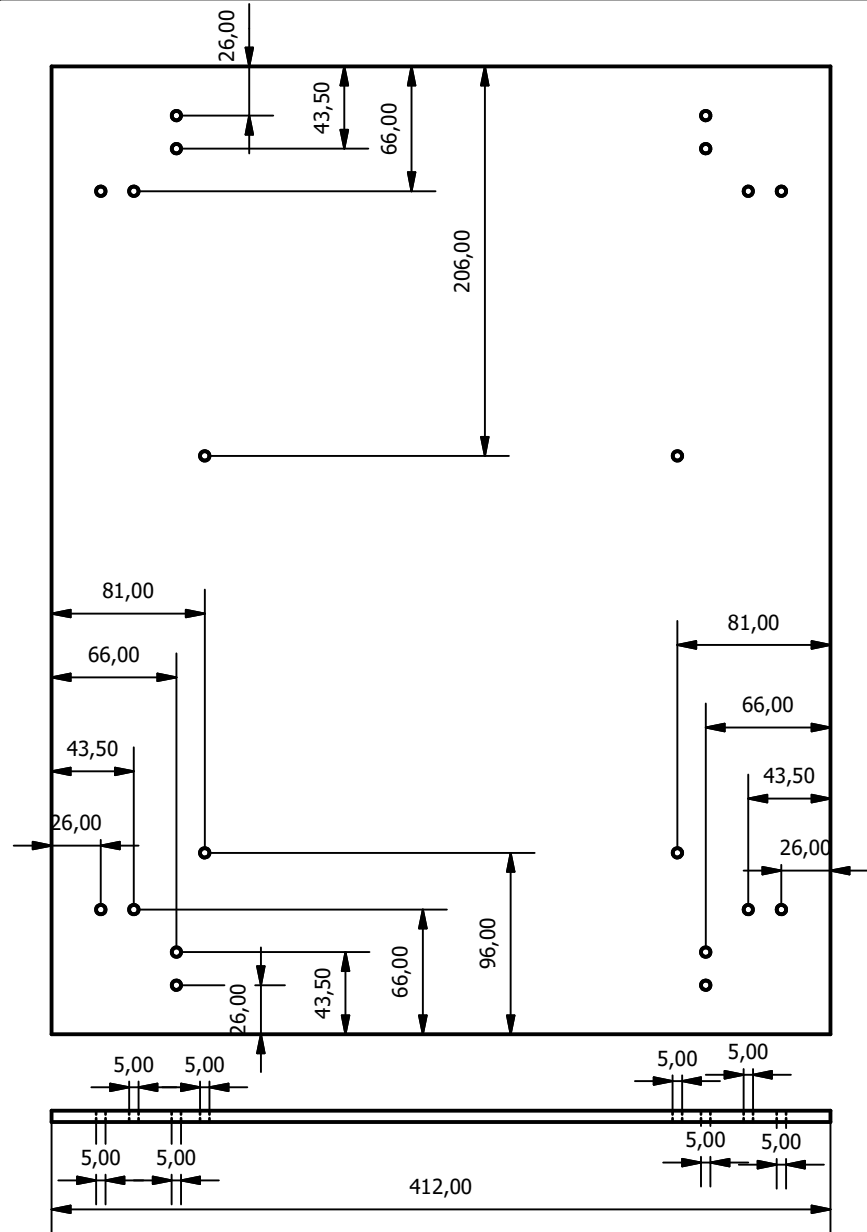
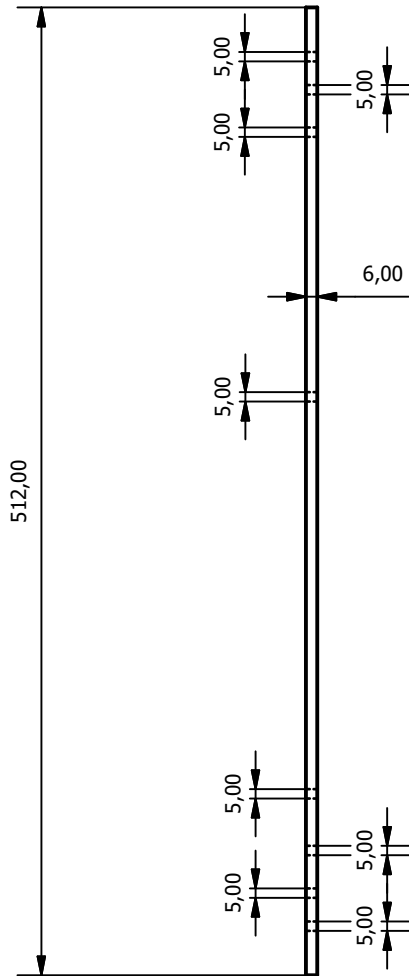
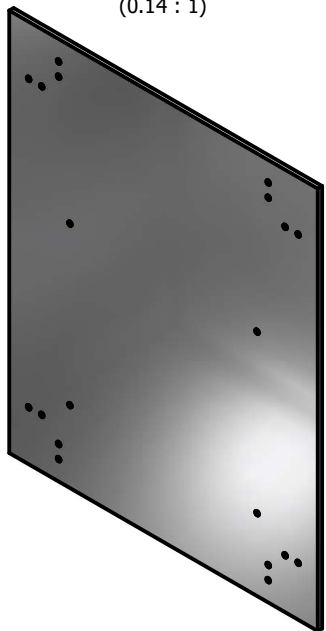




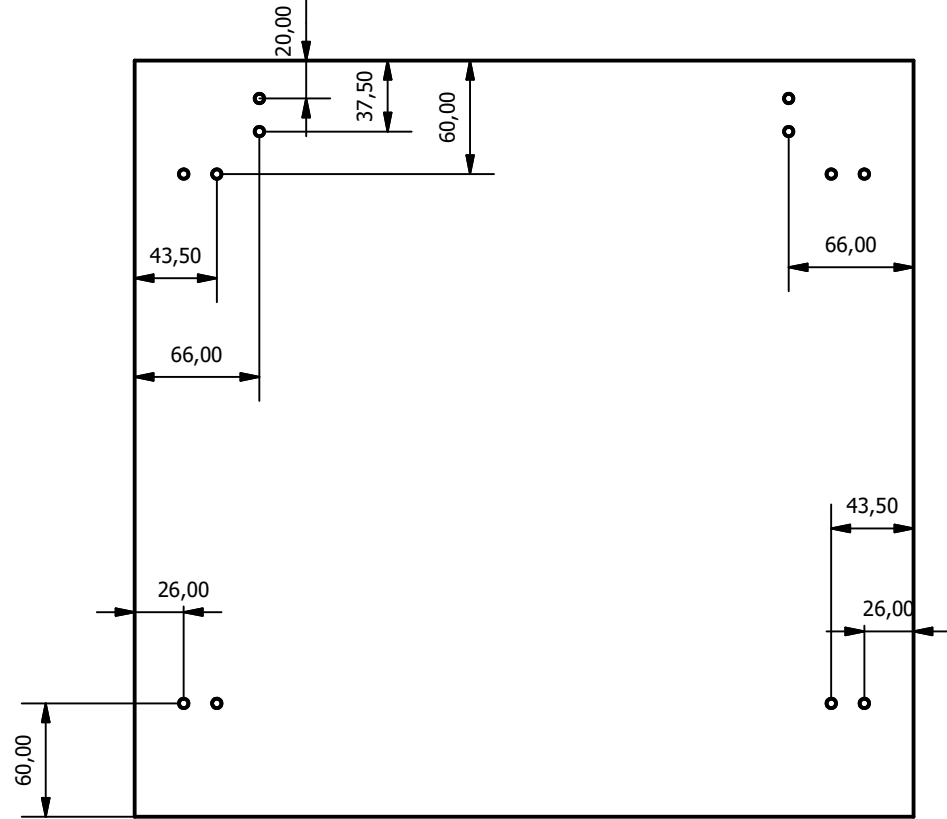
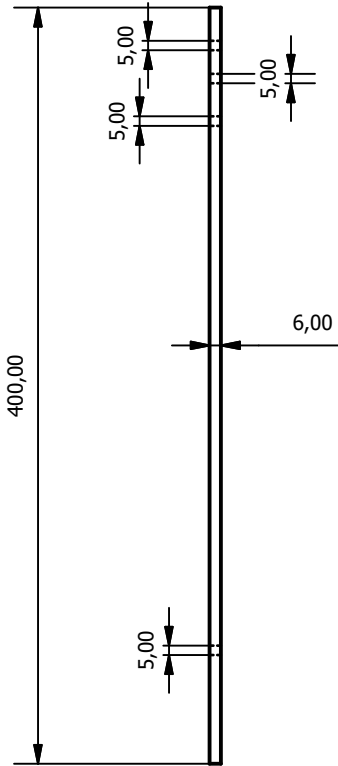
(0.14 : 1)



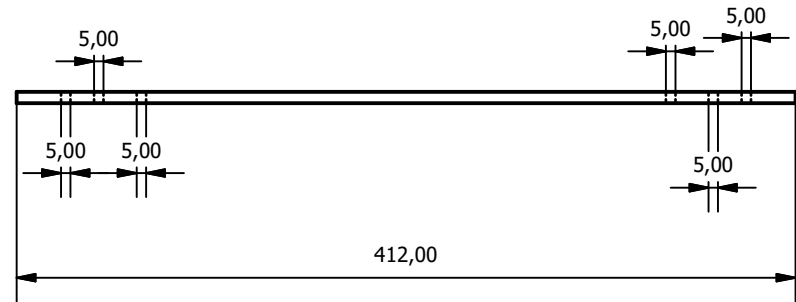
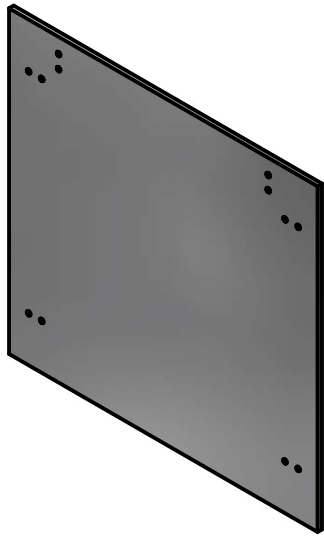
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,25 : 1	Desenho 8	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura Direita		
Quantidade:			Edição	Folha 1 / 1



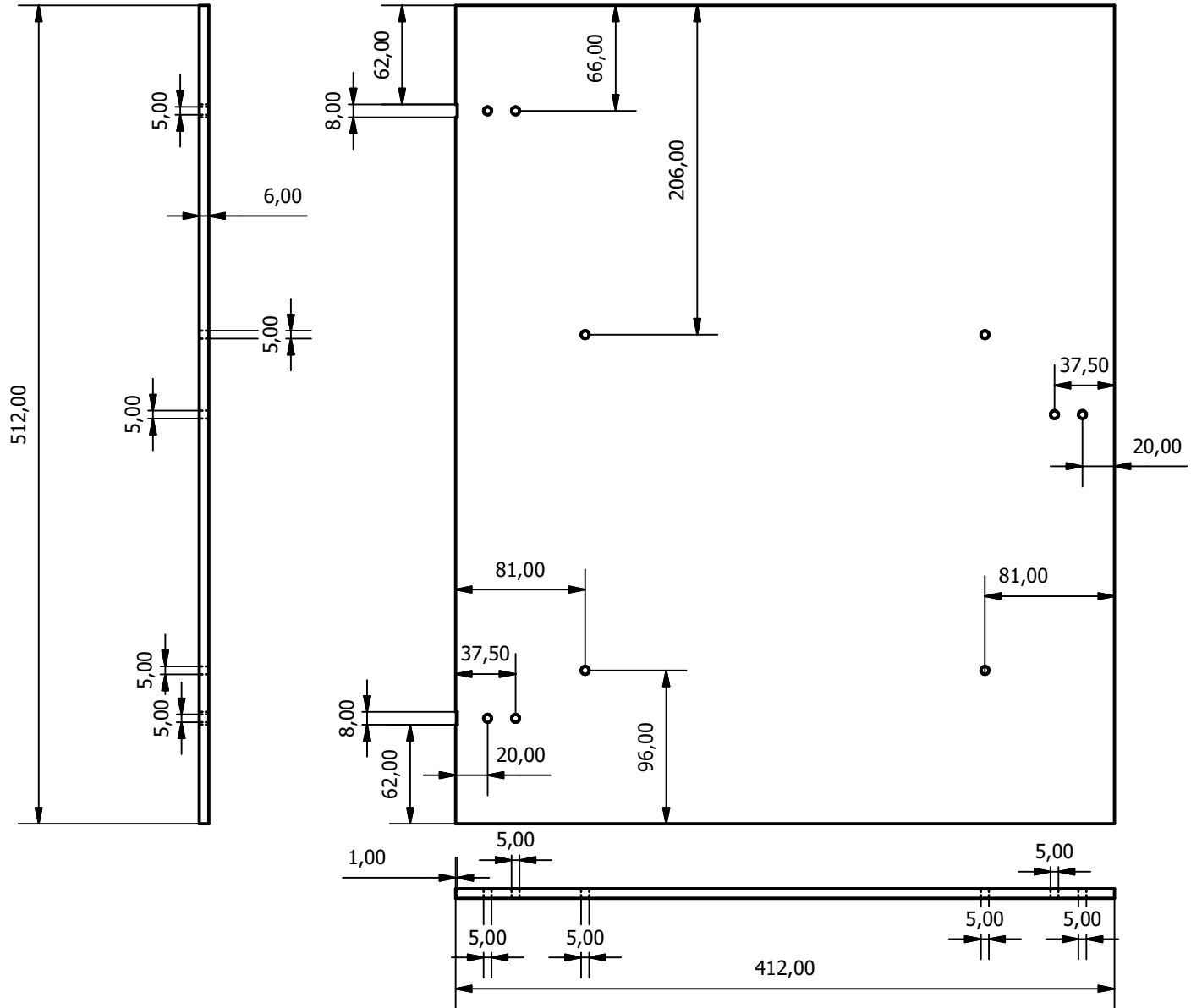
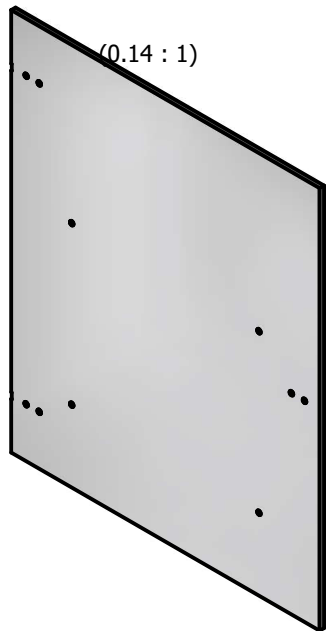
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,25 : 1	Desenho 9	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura Fundo		
Quantidade: 1			Edição	Folha 1 / 1



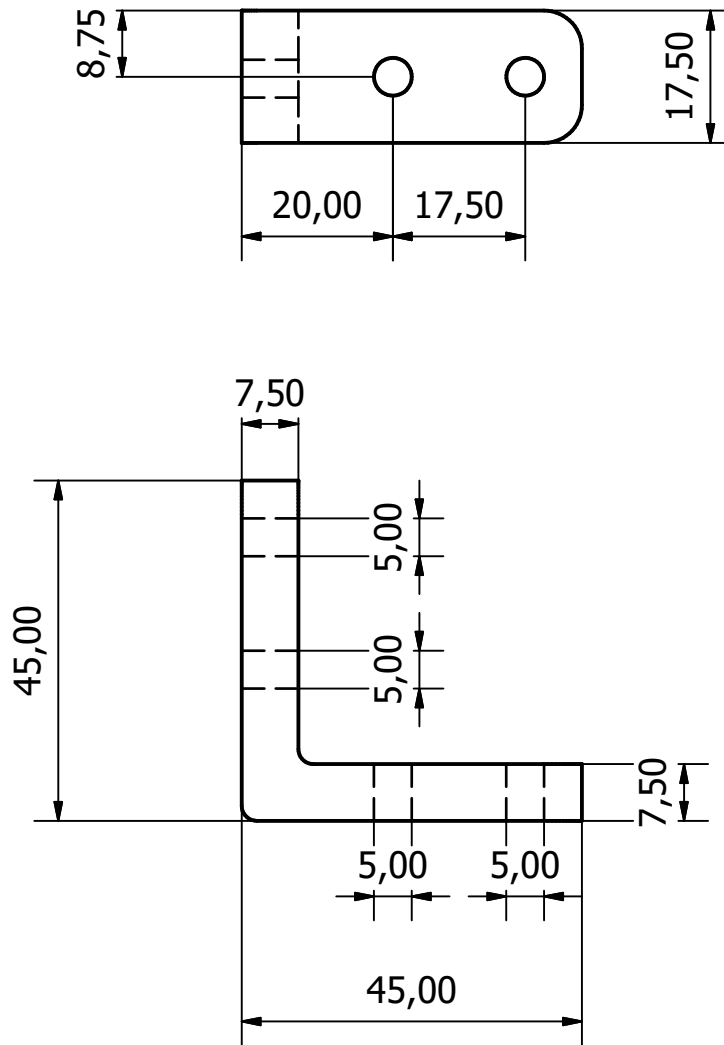
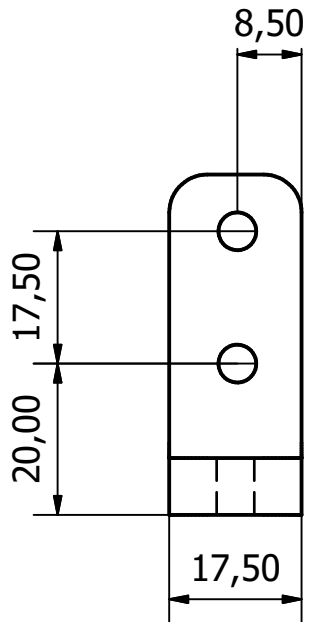
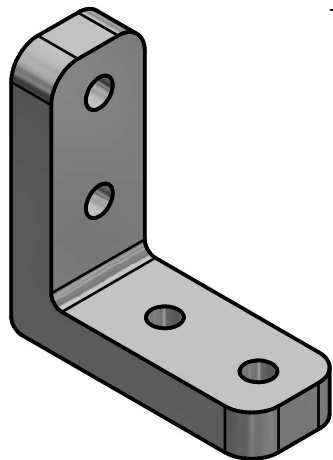
(0.14 : 1)



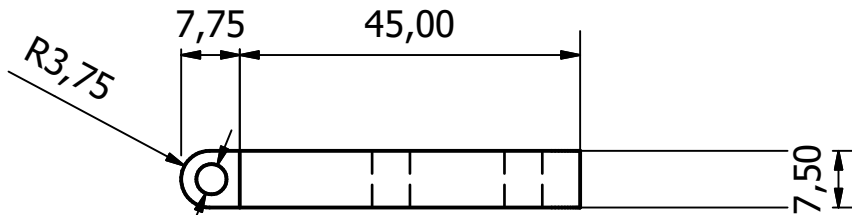
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0.25:1	Desenho 10	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Estrutura Cimo		
Quantidade: 1			Edição	Folha 1 / 1



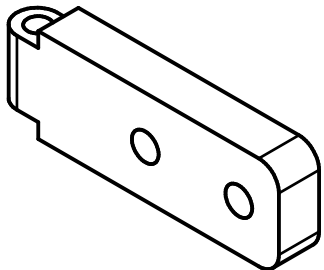
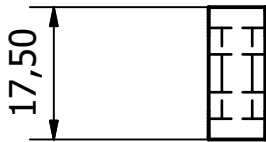
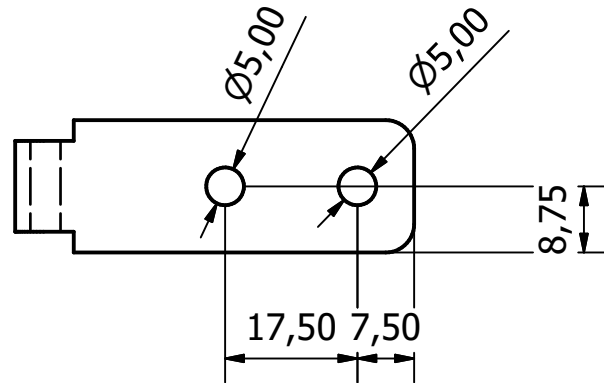
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 0,25 : 1	Desenho 11	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Porta		
Quantidade: 1			Edição	Folha 1 / 1



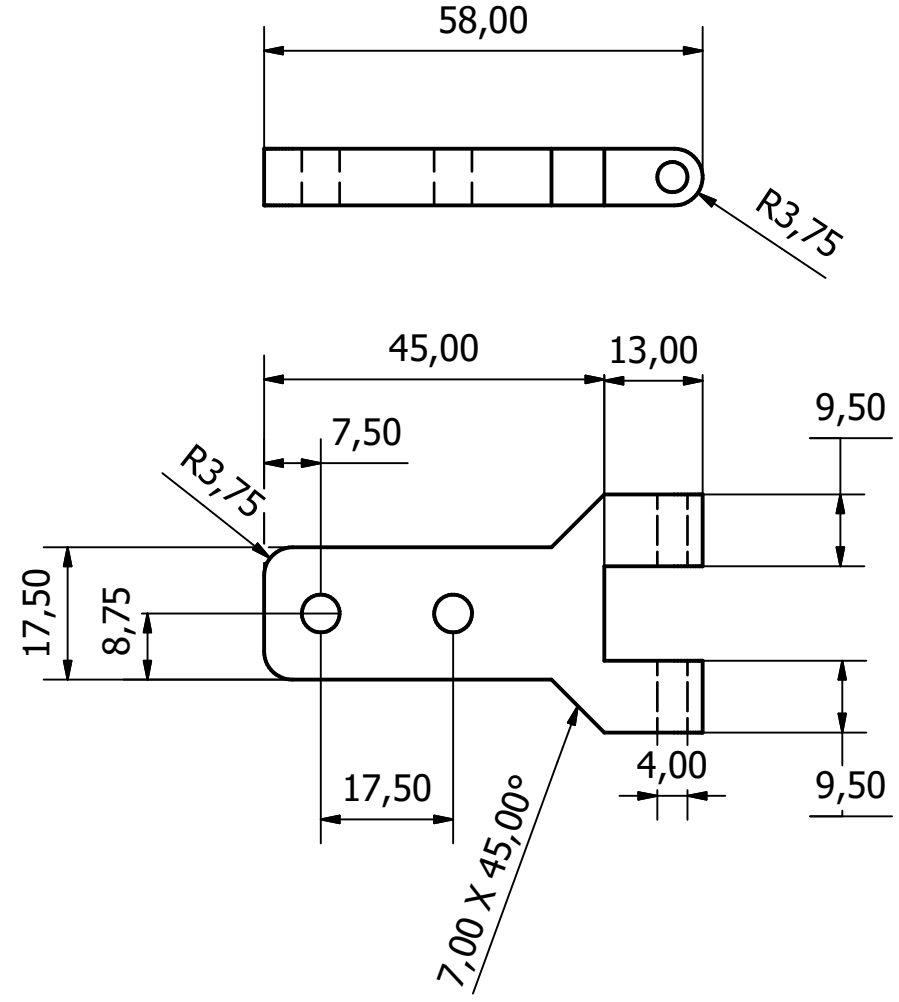
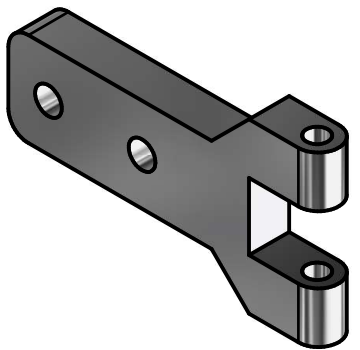
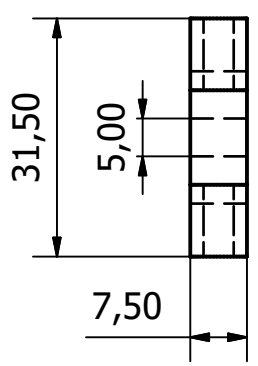
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 12	Material Alumínio 6061	Data 20/08/2020
FEUP/INEGI		Conector L		
		Quantidade: 16	Edição	Folha 1 / 1



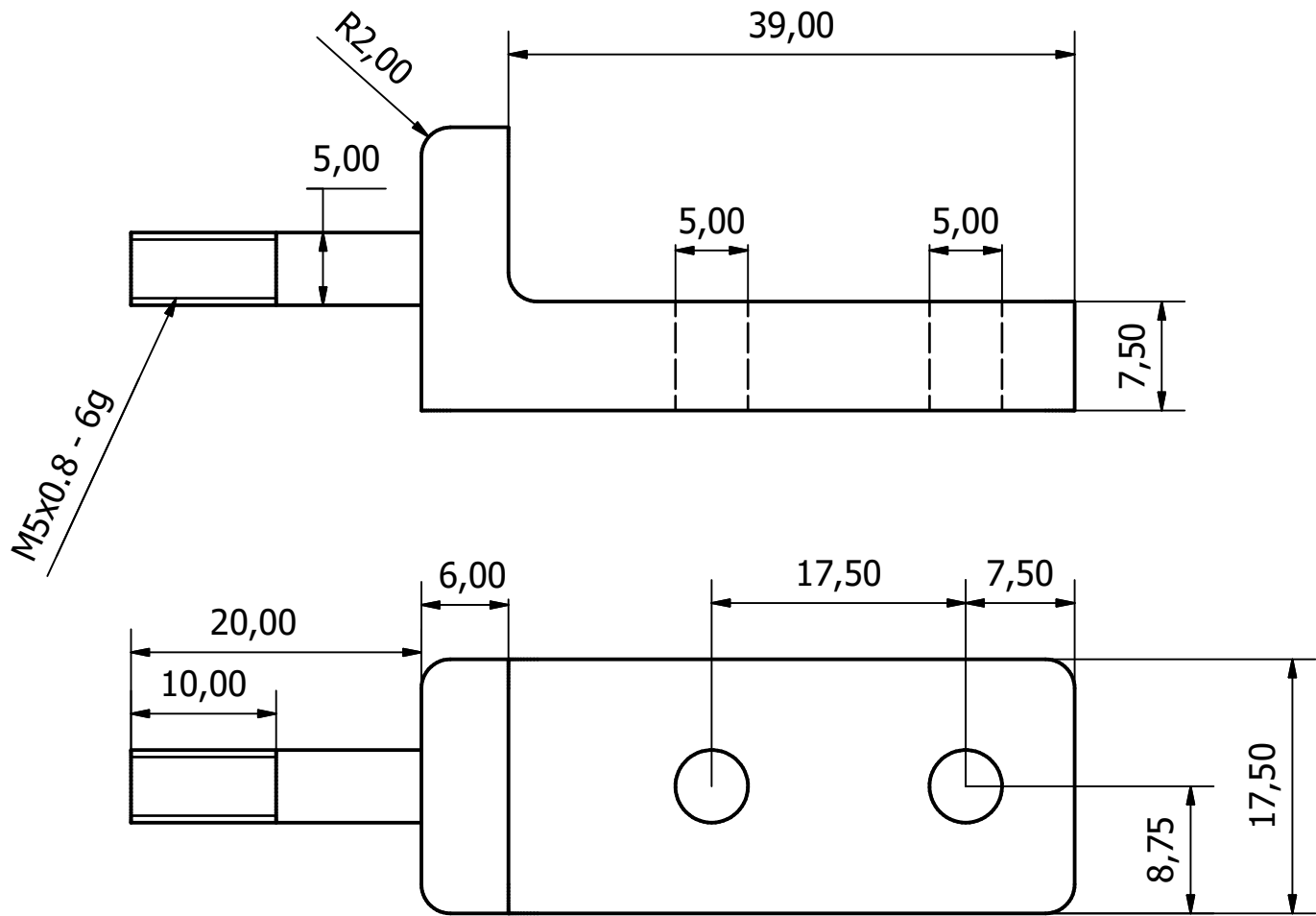
$\varnothing 4,00$



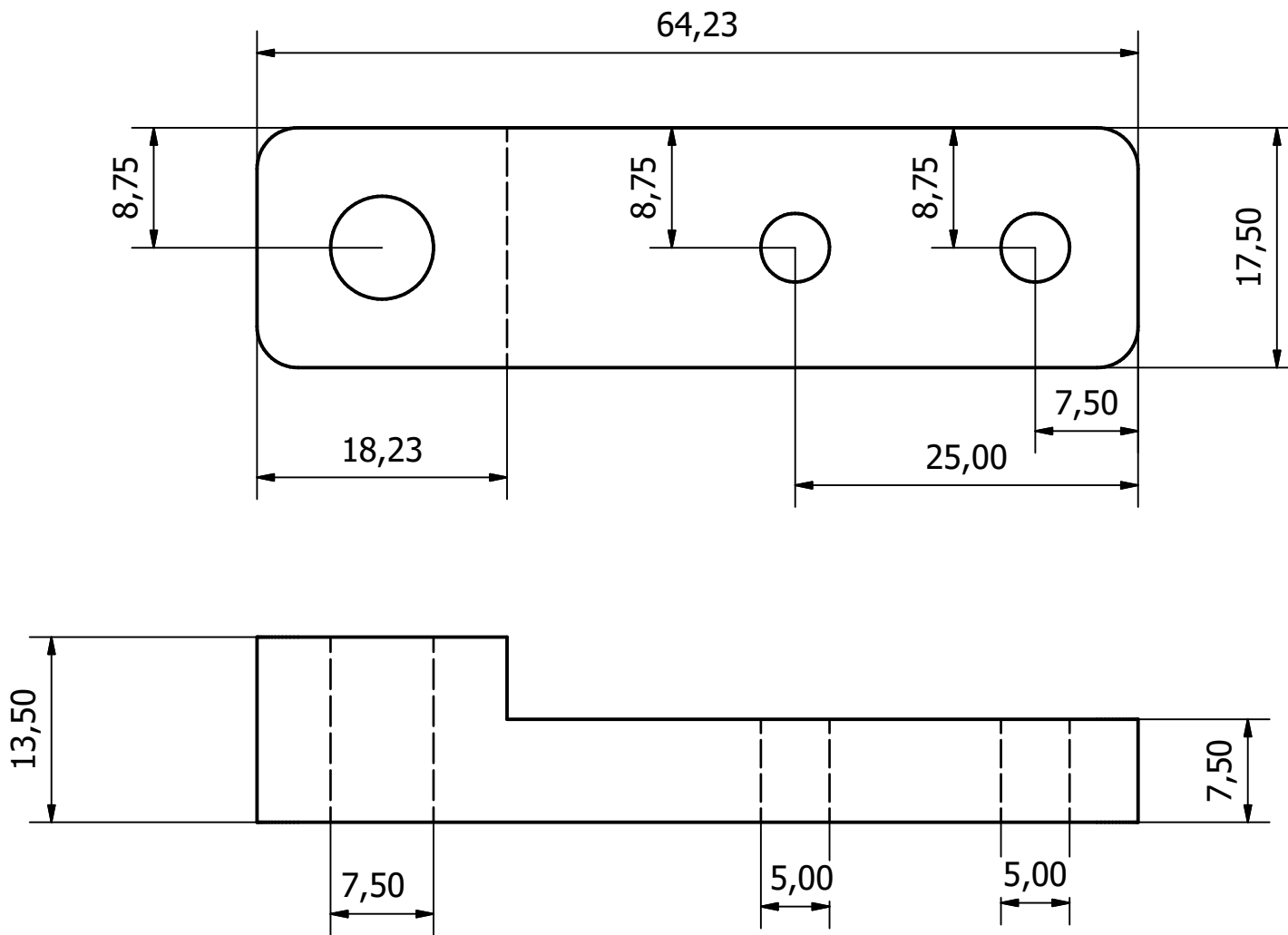
Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 13	Material Alumínio 6061	Data 21/08/2020
FEUP/INEGI		Dobradiça_2		
		Quantidade: 2	Edição	Folha 1 / 1



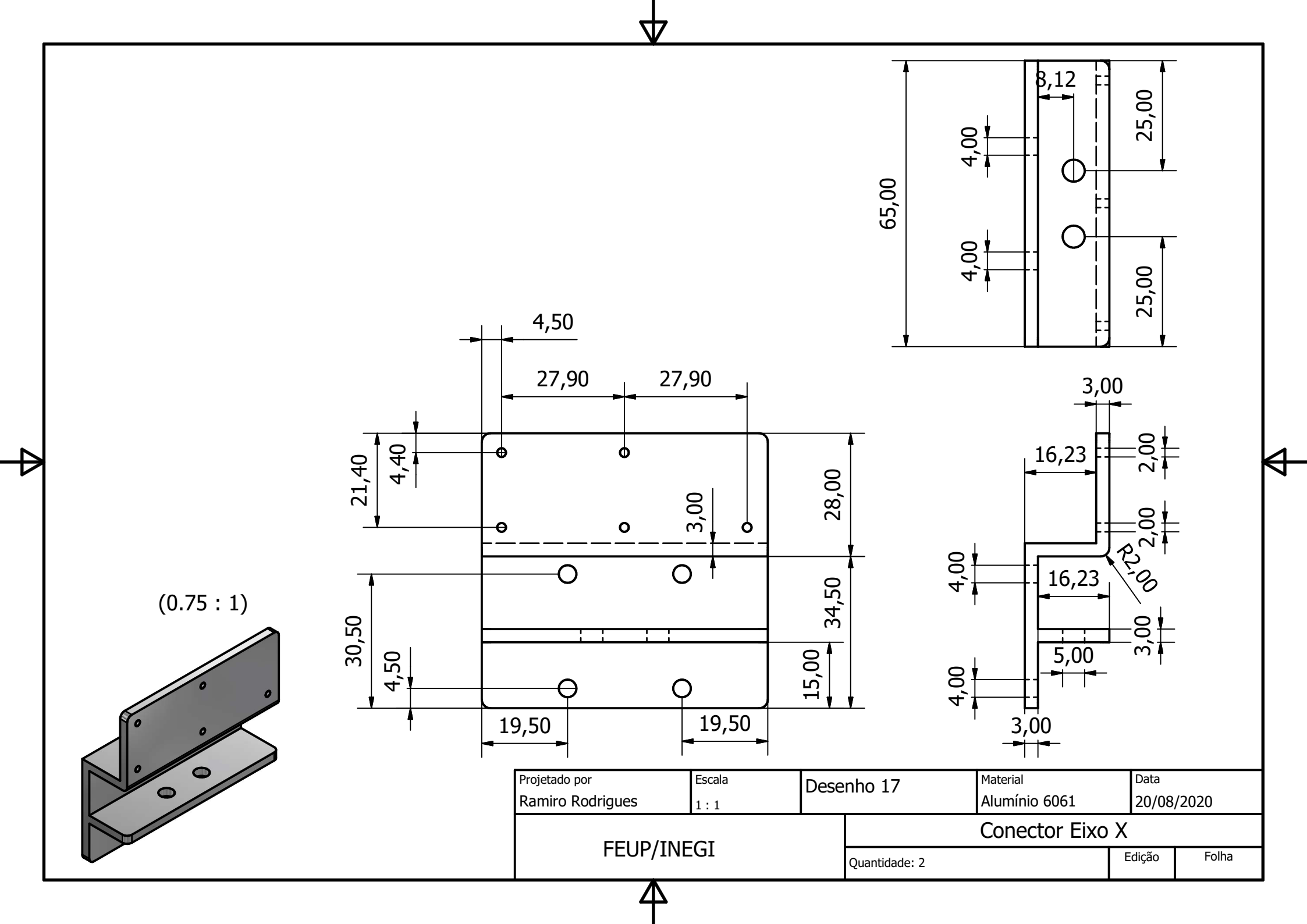
Projetado por <b>Ramiro Rodrigues</b>	Escala 1 : 1	Desenho 14	Material <b>Alumínio 6061</b>	Data <b>23/08/2020</b>
<b>FEUP/INEGI</b>		<b>Dobradiça_1</b>		
		Quantidade: 2	Edição	Folha

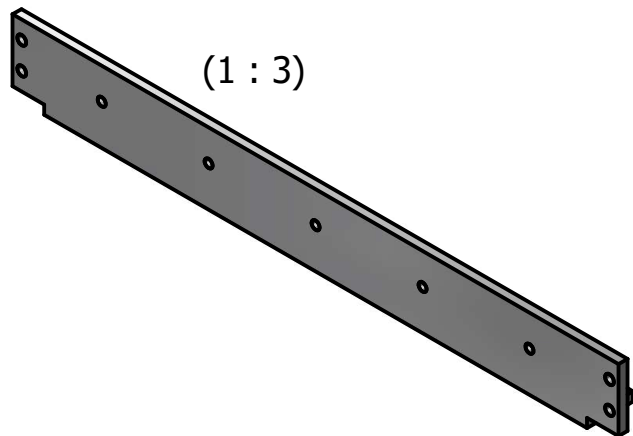
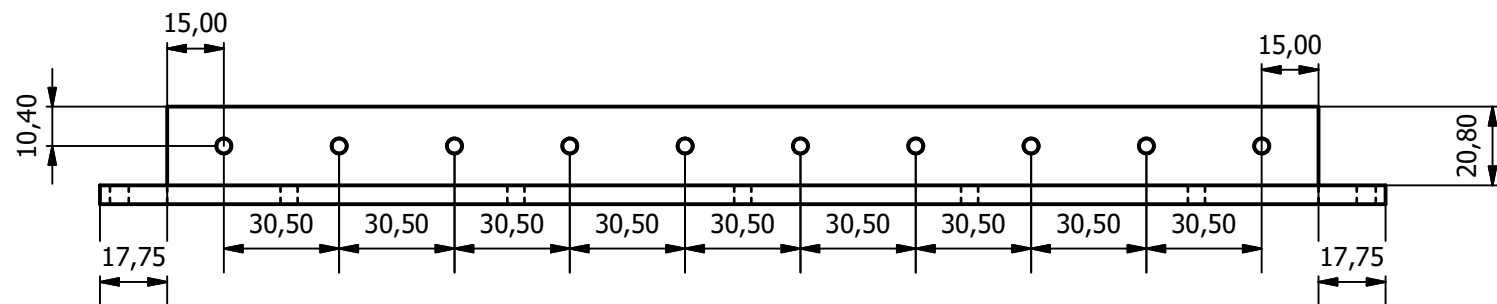
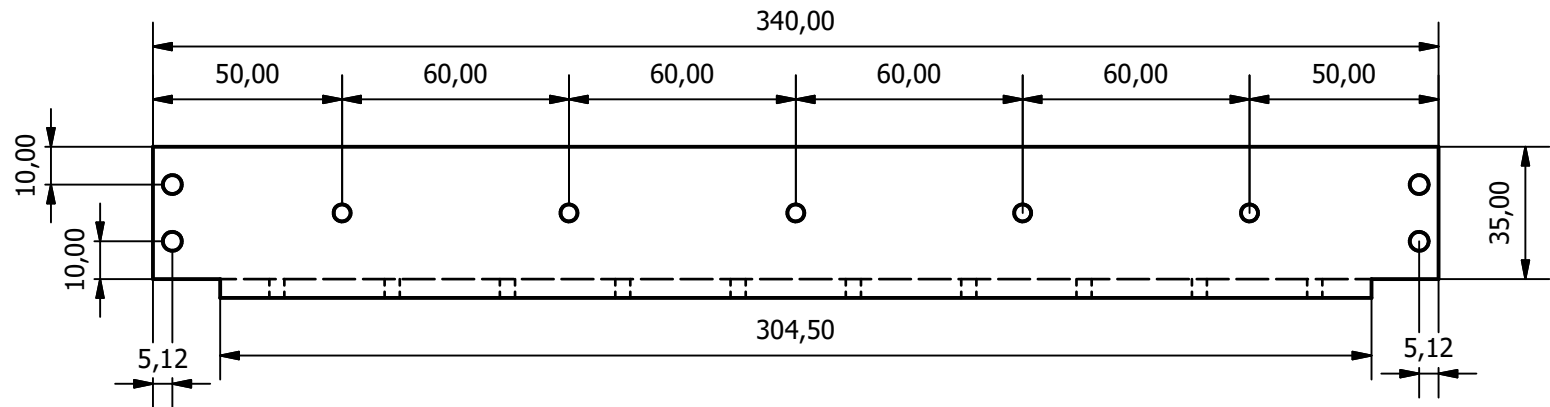
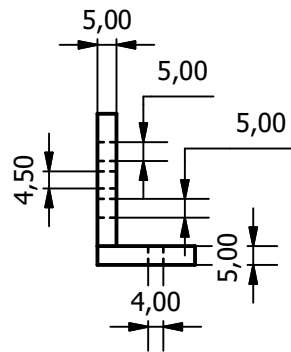


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 2 : 1	Desenho 15	Material Alumínio 6061	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Fechadura 1		
		Quantidade:	Edição	Folha 1 / 1

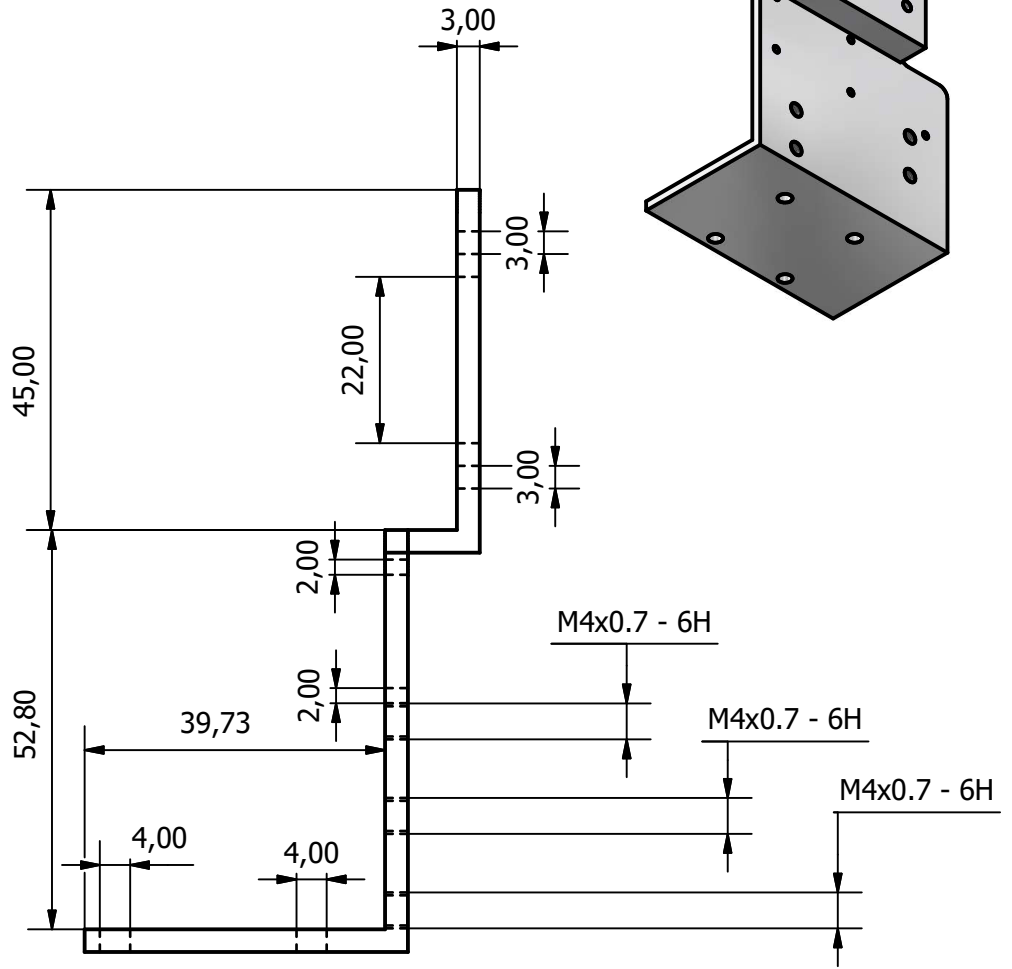
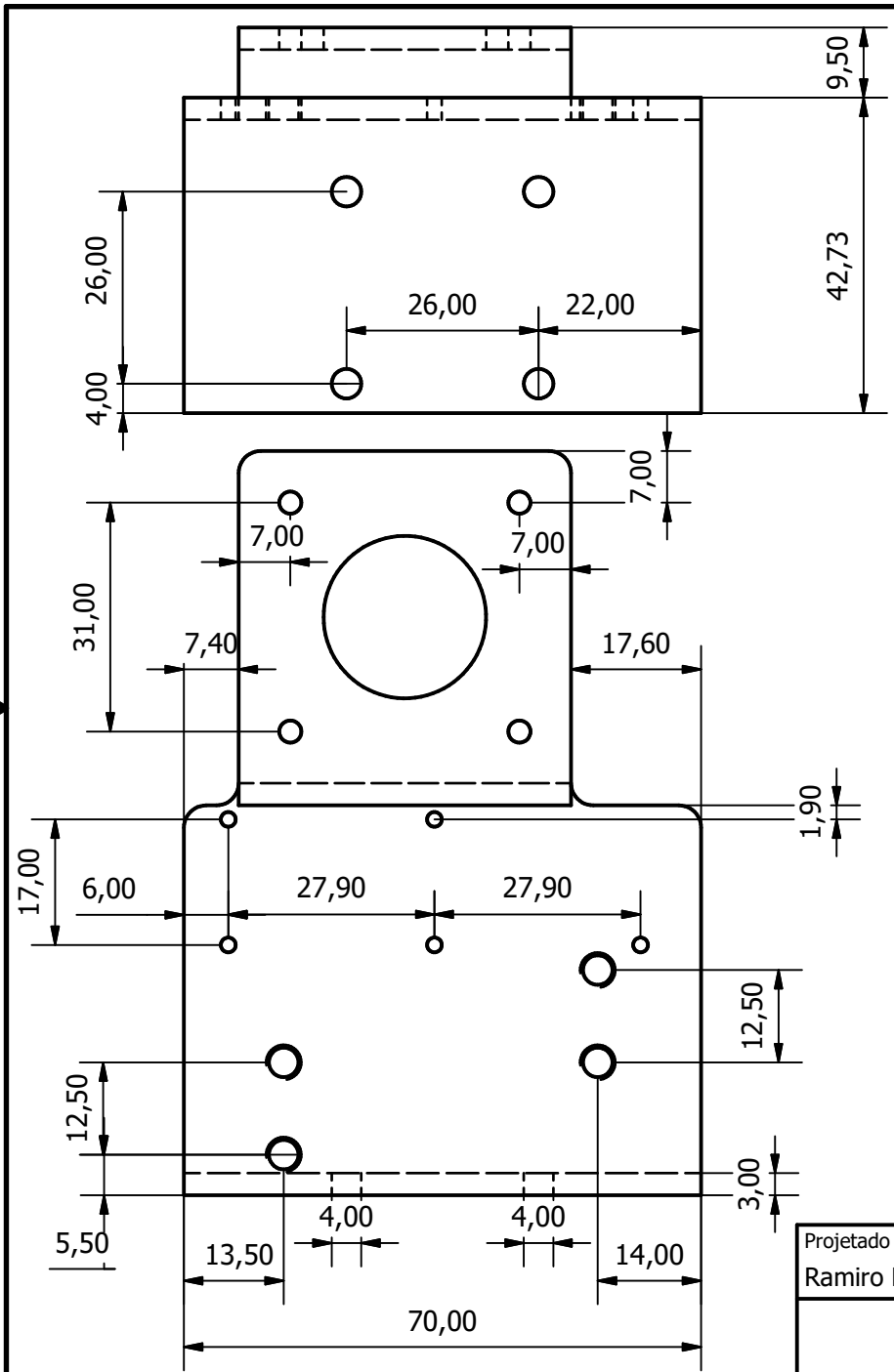


Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 2 : 1	Desenho 16	Material Alumínio 6061	Data 17/09/2020
FEUP/INEGI		Fechadura 2		
		Quantidade:	Edição	Folha 1 / 1





Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 2	Desenho 18	Material Alumínio 6061	Data 20/08/2020
FEUP/INEGI		Base eixo X		
		Quantidade: 1	Edição	Folha



Projetado por Ramiro Rodrigues	Escala 1 : 1	Desenho 19	Material Alumínio 6061	Data 20/08/2020
FEUP/INEGI		Conector Extrusor		
Quantidade: 1			Edição	Folha