



JOÃO CARLOS GOMES INÁCIO
Licenciado em Engenharia Mecânica

CONCEÇÃO E REALIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE
EQUIPAMENTO DESTINADO À EXTRUSÃO FRICCIONAL
DE MATERIAIS COMPÓSITOS

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO EM INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022



CONCEÇÃO E REALIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO DESTINADO À EXTRUSÃO FRICCIONAL DE MATERIAIS COMPÓSITOS

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO CARLOS GOMES INÁCIO

Licenciado em Engenharia Mecânica

Orientadora: Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadores: Alexandre José da Costa Velhinho,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Nome do(a) presidente,
Professor(a) Catedrático(a), FCT-NOVA

Arguentes: Nome de um dos arguentes,
Professor Associado, Outra Universidade
Nome do outro arguente,
Professor Auxiliar, Ainda Outra Universidade

Orientador: Nome do orientador presente nas provas,
Professor Associado, FCT-NOVA

Membros: Mais um membro do júri,
Professora Catedrática, Outra Universidade
E ainda mais um membro do júri,
Professor Auxiliar, Ainda Outra Universidade

CONCEÇÃO E REALIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO DESTINADO À EXTRUSÃO FRICCIONAL DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Copyright © João Carlos Gomes Inácio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar aproveito para agradecer à Professora Doutora Carla Machado, orientadora da minha dissertação e pessoa que mais me ajudou neste desafio, pelo apoio e experiência que foi crucial para o desenvolvimento da dissertação. Agradeço também ao meu co-orientador, Professor Doutor Alexandre Velhinho pelo seu empenho e disponibilidade,

Em segundo lugar quero agradecer à minha família mais especificamente os meus pais pelo seu apoio, por me ajudarem neste percurso, pelos conselhos e por tudo em geral.

Quero agradecer também ao aluno de doutoramento Pedro Fonseca que sempre se mostrou disponível para me ajudar no desenvolvimento desta dissertação.

E por fim quero agradecer aos meus amigos e colegas de curso, pelas sessões de estudo, pelas sessões de trabalho e pelo fantástico percurso académico em geral.

Nos últimos anos tem vindo a verificar-se a cada vez maior relevância de processos que permitam a reciclagem de materiais poliméricos, devido essencialmente ao seu impacto a nível ambiental. A redução de consumo de matérias-primas, a redução de poluição e ainda a redução do desperdício estão atualmente em destaque. O desenvolvimento das técnicas de *Friction Stir Processing*, nomeadamente o processo de extrusão friccional, uma variante da extrusão que permite a produção de arames ou veios através de aparas ou *billets*, sem ter de previamente fundir o material faz com que este processo seja procurado para reciclagem de material.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo funcional destinado à extrusão friccional de materiais compósitos. Desta forma, pretende-se conceber, projetar, construir e validar um protótipo que não só garanta uma prova de conceito, mas também assegure o controlo das diferentes variáveis do processo, nomeadamente: velocidades de rotação e translação, forças e momentos aplicados e pressão, ajustado assim aos requisitos funcionais e especificidades desta tecnologia.

Foi então criado um equipamento cujo dimensionamento foi realizado considerando os aspetos funcionais e estruturais para garantir o seu correto funcionamento. Foram também desenvolvidos os meios eletrónicos e o software para a sua automatização. Este equipamento foi testado em condições de funcionamento e, após algumas iterações, produziram-se veios de 4 mm de diâmetro.

Os resultados permitem concluir que o equipamento desenvolvido é eficaz na extrusão friccional de materiais compósitos de matriz polimérica, e tem forte potencial para ser utilizado em materiais compósitos de matriz metálica.

Palavras-chave: Extrusão friccional; Materiais compósitos; Protótipo Funcional.

In recent years, there has been an increasing relevance of processes that allow recycling polymeric materials, mainly due to their environmental impact. Reducing consumption of raw materials, reducing pollution and reducing waste are currently in the spotlight. The development of Friction Stir Processing techniques, namely the frictional extrusion process, a variant of extrusion that allows the production of wires or shafts through chips or billets, without having to previously melt the material, makes this process sought after for recycling of material.

The objective of this work is the development of a functional prototype for the frictional extrusion of composite materials. In this way, it is intended to conceive, design, build and validate a prototype that not only guarantees a proof of concept, but also ensures the control of the different variables of the process, namely: rotation and translation speeds, applied forces and pressure, thus adjusted to the functional requirements and specificities of this technology.

An equipment was then created whose dimensioning was carried out considering the functional and structural aspects to ensure its correct operation. Electronic means and software for their automation were also developed. This equipment was tested under operating conditions, and, after a few iterations, 4 mm diameter shafts were produced.

The results allow us to conclude that the developed equipment is effective in the frictional extrusion of polymer matrix composite materials and has strong potential to be used in metallic matrix composite materials.

Keywords: Frictional extrusion; Composite materials; Functional Prototype.

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 MATERIAIS	3
2.2 PROCESSOS.....	4
2.2.1 Contexto Histórico	4
2.2.2 Extrusão Friccional.....	4
2.2.3 Friction Stir Consolidation.....	6
2.2.4 Extrusão friccional em alumínio	7
2.2.5 Extrusão friccional em PCL.....	9
2.3 EQUIPAMENTO	10
2.3.1 Equipamento de PEF.....	10
2.3.2 Equipamento de controlo	12
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS	12
3 CONCEPÇÃO, PROJETO E PRODUÇÃO DO EQUIPAMENTO	13
3.1 REQUISITOS FUNCIONAIS	13
3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	14
3.3 SISTEMA DE CONTROLO	28
3.3.1 Instalação elétrica	28
3.3.2 Programação do Arduíno.....	32
3.4 MONTAGEM DO PROTÓTIPO	32
4 PROVA DE CONCEITO	38
5 CONCLUSÕES.....	41
ANEXOS	45
ANEXO 1 – CATÁLOGO DE PERFIS DA BOSCH	45
ANEXO 2 – TABELA DAS DIMENSÕES NOMINAIS DAS ROSCAS ISO.....	46
ANEXO 3 – CATÁLOGO DE CONECTORES CÚBICOS DE CANTO DA BOSCH.....	47
ANEXO 4 – CATÁLOGO DE CONECTORES “GUSSET” DA BOSCH	48
ANEXO 5 – CATÁLOGO DE ROLAMENTOS DA SKF.....	49
ANEXO 6 – CATÁLOGO DE ROLAMENTOS LINEARES DA AVA	50
ANEXO 7 – CATÁLOGO DE COUPLERS DA HUCO	51
ANEXO 8 – ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR DE PASSO	52
ANEXO 9 – ESPECIFICAÇÕES DO SPINDLE.....	53

Índice de Figuras

Figura 1 - Processo e componentes de um setup de extrusão [22]	5
Figura 2 - Extremidade com perfil em espiral e ferramenta extrusora [3].....	5
Figura 3 - Câmara da ferramenta extrusora [3]	6
Figura 4 - Comparação da qualidade dos arames extrudidos. (a) arame de Al2050 extrudido a 400 rpm; (b) arame de Al2195 extrudido a 200 rpm; (c) arame de Al2195 extrudido a 100 rpm. Adaptado de [3]	7
Figura 5 - Ampliação de um arame de Al2050 extrudido a 400 rpm [3].....	7
Figura 6 - Ampliação de um arame de Al2195 extrudido a 100 rpm [3].....	8
Figura 7 - Análise de qualidade dos arames com relação Força/Velocidade de rotação [8].....	8
Figura 8 - Fresadora modificada para SFL [12]	11
Figura 9 - Máquina de SFL dedicada [12].....	11
Figura 10 - Protótipo da máquina de extrusão friccional.....	14
Figura 11 - Estrutura de produto do equipamento	15
Figura 12 - Perfil 40 x 40 [16].....	16
Figura 13 - Conector cúbico de canto 40/3 [16]	16
Figura 14 - Conector "Gusset" [16].....	16
Figura 15 - Mesa de suporte	17
Figura 16 - Câmara de extrusão.....	17
Figura 17 - Ferramenta extrusora	20
Figura 18 - Máquina de corte de precisão linear	20
Figura 19 - Suporte de alinhamento para corte.....	20
Figura 20 - Peça de elevação	21
Figura 21 - Spindle e elementos de ligação [21].....	21
Figura 22 - Caixa do fuso	22
Figura 23 - Conector spindle-fuso	24
Figura 24 - Porca flangeada.....	24
Figura 25 - Rolamento rígido de esferas [17].....	25
Figura 26 - Rolamento linear [18]	25
Figura 27 - Motor de passo [20]	25
Figura 28 - Coupler [19]	26
Figura 29 - Peça inferior do sistema de alinhamento.....	26
Figura 30 - Peça superior do sistema de alinhamento	26
Figura 31 - Sistema de alinhamento	27
Figura 32 - Suporte do regulador de velocidade.....	28
Figura 33 - Caixa da fonte de alimentação	28
Figura 34 - Suporte de placas	28
Figura 35 - Circuito do Spindle	29
Figura 36 - Placa de driver [24].....	29
Figura 37 - Placa de arduíno [23]	30
Figura 38 - Pinout da placa de arduíno [23]	30
Figura 39 - Circuito do motor de passo	31
Figura 40 - Célula de carga	31
Figura 41 - Código do Arduíno	32
Figura 42 - Vista explodida da estrutura da máquina	33
Figura 43 - Detalhe de montagem do "Gusset"	33
Figura 44 - Montagem da caixa do fuso	34
Figura 45 - Montagem do conector spindle-fuso.....	34
Figura 46 - Montagem do fuso	35
Figura 47 - Montagem do motor de passo	35
Figura 48 - Montagem do spindle.....	36
Figura 49 - Montagem da câmara de extrusão.....	36
Figura 50 - Montagem da mesa de suporte.....	37
Figura 51 - Disposição das peças complementares	37
Figura 52 - Aparato experimental	38
Figura 53 - Provetes obtidos nos testes de validação.....	39
Figura 54 - Forças adquiridas durante o ensaio 1	39

Figura 55 – Forças adquiridas durante o ensaio 2	40
Figura 56 - Forças adquiridas durante o ensaio 3.....	40

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação de densidades dos diferentes provetes [9]	9
Tabela 2 - Métodos de controlo de parâmetros de processo	12
Tabela 3 - Requisitos funcionais do equipamento	13
Tabela 4 - Plano de processo da câmara de extrusão	18
Tabela 5 - Plano de processo da ferramenta extrusora	19

Nomenclatura

PEF	Processo de extrusão friccional
SFL	Soldadura por fricção linear
PCL	Policaprolactona
FSC	<i>Friction Stir Consolidation</i>
PLA	Poliácido láctico
PVA	Acetato de polivinila
P	Peso [N]
m	Massa [g]
g	Aceleração gravítica [m/s ²]
VR	Rácio de velocidade
D	Diâmetro [mm]
p	Passo [mm]
η	Eficiência
α	Ângulo de rosca [°]
β	Ângulo de fricção [°]
f	Coefficiente de fricção
W	Trabalho [N]
T	Torque [N·m]
F	Força [N]
R	Raio [m]

1 Introdução

1.1 Motivação

São cada vez mais relevantes processos de reciclagem de material devido ao impacto que estes têm, nomeadamente a redução de consumo de material, redução de poluição e ainda redução do desperdício. A reciclagem de alumínio, por exemplo, pode economizar até 95% da energia que seria necessária para criar uma quantidade semelhante a partir de matéria-prima.[10]

No caso dos plásticos, são produzidos milhões de toneladas todos os anos, pelo que apenas cerca de 9% são reciclados, o que tem um grande impacto ambiental. [11]

O processo de extrusão friccional visa à produção de arames, ou produtos com outros perfis, através de diferentes materiais, possibilitando a reciclagem de material, e ainda a junção dos mesmos de modo a obter produtos finais com determinadas propriedades.

Este processo destina-se também ao processamento de materiais compósitos. Estes materiais são conseguidos tendo em conta a diferença nas propriedades dos mesmos que permite a deformação de um dos materiais, que irá escoar e sinterizar o outro, com determinadas temperaturas e pressões aplicadas pelo mecanismo, resultando numa junção de ambos num produto final que será extrudido por um perfil.

Contudo, é necessária a correta seleção dos parâmetros do processo para a obtenção de determinados produtos com determinados materiais.

Assim é necessário um estudo, não só da influência destes parâmetros na qualidade do produto final como também um estudo do processo e dos seus constituintes, pelo que é necessária a construção de um protótipo que garanta o sucesso do processo e o controlo dos diferentes parâmetros.

Este estudo irá proporcionar um melhor entendimento do processo.

1.2 Objetivo

O objetivo do trabalho que se pretende desenvolver no âmbito da dissertação é o desenvolvimento de um protótipo funcional destinado à extrusão friccional de materiais compósitos. Desta forma, pretende-se projetar, construir e validar um protótipo que não só garanta uma prova de conceito, mas também assegure o controlo das diferentes variáveis do processo, nomeadamente: velocidades de rotação e translação, forças e momentos aplicados e pressão.

2 Revisão da Literatura

2.1 Materiais

Através do equipamento a desenvolver pretende-se obter produtos axissimétricos com materiais de matriz polimérica com reforços nanoestruturados e com materiais de matriz metálica em forma de pó. No caso dos materiais de matriz metálica é utilizado alumínio e no caso de materiais de matriz polimérica é utilizado PCL.

Para a realização deste trabalho foi selecionado o PCL que é um polímero com um baixo ponto de fusão (cerca de 60 °C) com uma baixa viscosidade e fácil processabilidade.

A conceção do equipamento deverá ter em consideração o seu uso futuro para duas ligas de alumínio, Al 2050 e Al 2195, pois são utilizadas em processos de extrusão friccional. Estas ligas pertencem à série de ligas 2xxx (também denominada por séries 2000) e são semelhantes em composição entre si. O primeiro dígito indica o grupo da liga ou a adição de liga principal, o segundo dígito indica modificações da liga original ou limites de impureza e os últimos dígitos indicam a liga de alumínio específica. Para além disso ambas são muito utilizadas no processo de extrusão friccional.

A liga 2050 (composição nominal Al-3.55Cu-0.4Mg-1.0Li-0.45Ag-0.1Zr-0.35Mn.) é uma liga de alumínio que foi definida para uma resistência média a alta, com alta tolerância a danos e destinada a superar a propriedade de equilíbrio de ligas de chapa fina 2xxx e ligas de chapa grossa 7xxx [5].

A liga 2195 (composição nominal Al-4.0Cu-1.0Li-0.4Mg-0.4Ag-0.12Zr) é uma das ligas de alumínio mais complexas da série 2xxx. Esta liga, que proporciona valores de módulo de elasticidade muito altos e com elevada resistência, foi desenvolvida originalmente para substituir a 2219, sendo que esta era utilizada para construir o tanque externo de vaivéns espaciais dos EUA. A liga 2195 teve o seu primeiro uso comercial na missão STS-91 da NASA, onde permitiu reduzir a massa em 3175kg e aumentar em 50% a capacidade de carga do vaivém espacial [6].

Estas ligas pertencem à série de ligas 2xxx, cujas características principais são [4]:

- Permitem que sejam aplicados tratamentos térmicos;
- Resistência elevada, mesmo a altas temperaturas;
- Intervalo de resistência à tração de 190 a 430 MPa;
- Geralmente unidas mecanicamente, mas algumas são possíveis de soldar;
- Estas ligas não são tão resistentes à corrosão atmosférica como as ligas de outras séries e, portanto, acabam por muitas das vezes ser revestidas para proteção adicional.

As ligas de alumínio que contêm lítio são bem conhecidas pelos seus benefícios em reduzir a densidade e em aumentar o módulo de Young, proporcionalmente ao seu conteúdo em lítio [6]. O alumínio e as suas ligas podem ser forjados por praticamente quase todos os processos conhecidos [7].

2.2 Processos

2.2.1 Contexto Histórico

O processo de extrusão friccional foi inventado e patenteado em 1993 no *The Welding Institute*, em Cambridge, no Reino Unido. Até 2002 foi largamente ignorado e, só após expirar a patente nesse ano, começou a receber mais atenção [1]. Este processo deriva da FSP e, inicialmente, era utilizado para proceder à formação ou reconstrução de materiais compósitos metal/cerâmico [2].

Diversos autores têm desenvolvido recentemente várias experiências relacionadas com a extrusão friccional, tais como [3], onde procederam à extrusão de cabos recorrendo à extrusão friccional de ligas de alumínio.

Existem vários aspetos positivos da extrusão friccional que podem ainda vir a ser muito úteis industrialmente para atingir certos propósitos, tais como a reciclagem de materiais, consolidação de produto em pó e, possivelmente, como método de junção mecânica de ligas [3].

Atualmente, é uma tecnologia de produção inovadora que permite a produção direta de arame por meio da consolidação e extrusão de aparas de metal ou de *billets* sólidos.

2.2.2 Extrusão Friccional

O processo de extrusão friccional, uma variante da extrusão, é um processo de fabrico que permite a produção de arames ou veios (com cerca de 5 mm de diâmetro) através de aparas ou *billets*. O facto de permitir o fabrico destas peças a partir de aparas sem ter de previamente aquecer o material faz com que este processo seja procurado para reciclagem de material.

A máquina de extrusão friccional é composta por uma câmara de extrusão, uma ferramenta extrusora, uma placa de suporte e um equipamento semelhante ao de SFL (Soldadura por fricção linear). Ao contrário do processo de extrusão tradicional em que a ferramenta extrusora se limita a aplicar uma força que expelle o material, neste caso, a ferramenta extrusora tem uma rotação. Esta rotação, em conjunto com a força vertical, leva a um movimento friccional que gera calor e permite a consolidação do material dentro da câmara de extrusão. Após a consolidação do material este é expelido verticalmente de maneira semelhante à de extrusão inversa. Assim, os parâmetros deste

processo são a força aplicada na ferramenta extrusora e a velocidade de rotação, que, consoante a sua variação, resultam em arames com diferentes características e diferentes defeitos.

O equipamento é aqui utilizado para atuar a ferramenta extrusora. Esta aplica ao processo uma pressão constante e um fluxo de extrusão e velocidade de rotação que podem ser variáveis.

Este processo é assim um processo de reciclagem direto, visto que é um processo em que não é necessário fundir o material previamente ou utilizar moldes. No entanto difere em certos aspetos da maioria de processos de reciclagem diretos pois não necessita de fontes de calor terceiras, uma vez que o calor gerado pelo atrito é suficiente para o processo e o equipamento é relativamente simples e de baixo custo.

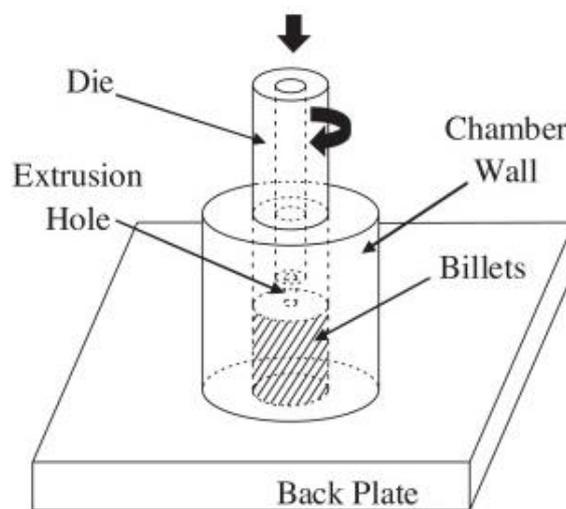


Figura 1 - Processo e componentes de um setup de extrusão [22]

Na figura 2 está representada a ferramenta extrusora. Esta tem na extremidade um perfil de espiral de maneira a conduzir o fluxo de material para o centro do perfil, tal como se pode observar na figura 2. Na figura 3 encontra-se representada a câmara de extrusão.



Figura 2 - Extremidade com perfil em espiral e ferramenta extrusora [3]

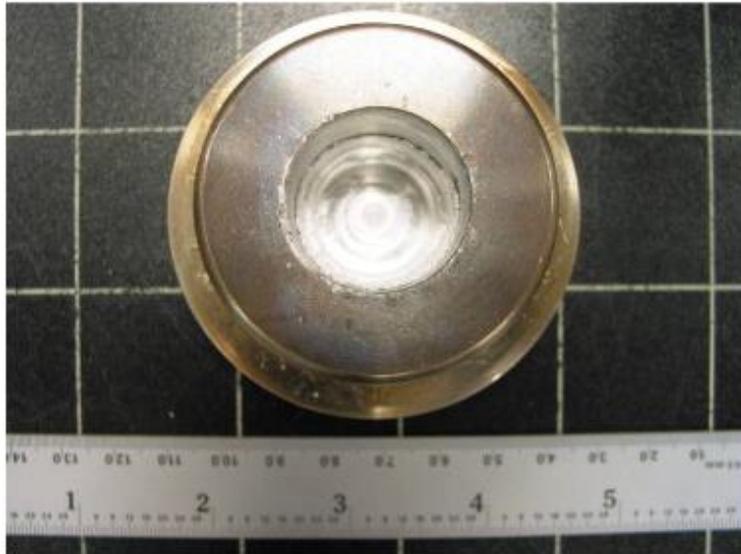


Figura 3 - Câmara da ferramenta extrusora [3]

2.2.3 Friction Stir Consolidation

Dentro da câmara de extrusão ocorre o processo de FSC (*Friction Stir Consolidation*), quando o material é submetido a rotação e compressão, as lacunas entre partículas são diminuídas e suavizadas e em seguida as partículas são soldadas e consolidadas, resultando num bloco sólido de material.

Este processo tem dois períodos distintos: a compactação e a consolidação. No período de compactação, o material é amplamente compactado. Aqui os vazios entre partículas são substancialmente reduzidos, aproximando-se de zero, mas sem estarem soldados. No período de consolidação a densidade do material aumenta ligeiramente sendo que é necessária a obtenção de uma densidade relativa de 1 para a ligação dos pós ou aparas.

Com a combinação de alta temperatura com alta deformação plástica, forma-se uma região totalmente consolidada com grão equiaxial recristalizado na parte superior da câmara de extrusão.

Conforme o avanço do PEF (Processo de extrusão friccional), a zona de deformação vai ser expandida sendo que não chega a atingir uma zona central na parte inferior da câmara de extrusão, denominada por “zona morta”. Foi concluído que a velocidade de rotação da ferramenta extrusora, e a força de compressão influenciam a fração de consolidação do material, mas o tempo de processamento influencia pouco ou nada em tempos elevados de processamento, uma vez que ocorre consolidação total num espaço de tempo limitado (excluindo a “zona morta”) [10].

2.2.4 Extrusão friccional em alumínio

Para compreender a aplicação do processo de extrusão friccional em alumínio foram analisados dois estudos. No primeiro estudo [3] são utilizadas aparas de cada uma das ligas de alumínio, 2050 e 2195, separadamente, e incidiu principalmente sobre a influência da velocidade de rotação da ferramenta extrusora na qualidade dos arames produzidos. Neste pôde-se observar que a velocidade de rotação influencia o aparecimento de defeitos, sendo que, por exemplo, as fissuras podem estar associadas a baixas velocidades (*cold cracks*) em que não é gerado calor suficiente. Observaram ainda que, quando a extrusão é realizada a velocidade mais elevada, há também o aparecimento de fissuras (*hot cracks*) e que o efeito da torção do material é mais evidente a velocidades mais baixas. Neste estudo os autores concluíram que os arames obtidos com os mesmos parâmetros de extrusão apresentam resultados semelhantes independentemente de ser utilizada a liga Al 2050 ou Al 2195, devido à semelhante composição das mesmas.

Na figura 4 é possível comparar a qualidade dos arames. O arame (a) é produzido com uma velocidade de rotação de 400 rpm e revela várias fissuras à superfície (ampliado na figura 5), o arame (c) apresenta uma pequena torção na parte central (ampliado na figura 6) e o arame (b) aparenta não ter quaisquer defeitos superficiais.



Figura 4 - Comparação da qualidade dos arames extrudidos. (a) arame de Al2050 extrudido a 400 rpm; (b) arame de Al2195 extrudido a 200 rpm; (c) arame de Al2195 extrudido a 100 rpm. Adaptado de [3]



Figura 5 - Ampliação de um arame de Al2050 extrudido a 400 rpm [3]



Figura 6 - Ampliação de um arame de Al2195 extrudido a 100 rpm [3]

Foram produzidos também outros arames com estas ligas de alumínio, sem defeitos, com velocidades de rotação de 150, 200 e 250 rpm, o que leva a concluir que estas velocidades intermédias são as ideais para a produção deste tipo de peça.

No segundo estudo [8] foi apenas utilizada a liga 2050 em *billet*, incidindo este na aplicação da força vertical imposta pelo equipamento. Neste caso, foram utilizadas velocidades de rotação intermédias, consideradas ideais para o processo, sendo estas 100 rpm, 200 rpm e 300 rpm, tal como apresentado na figura 7.

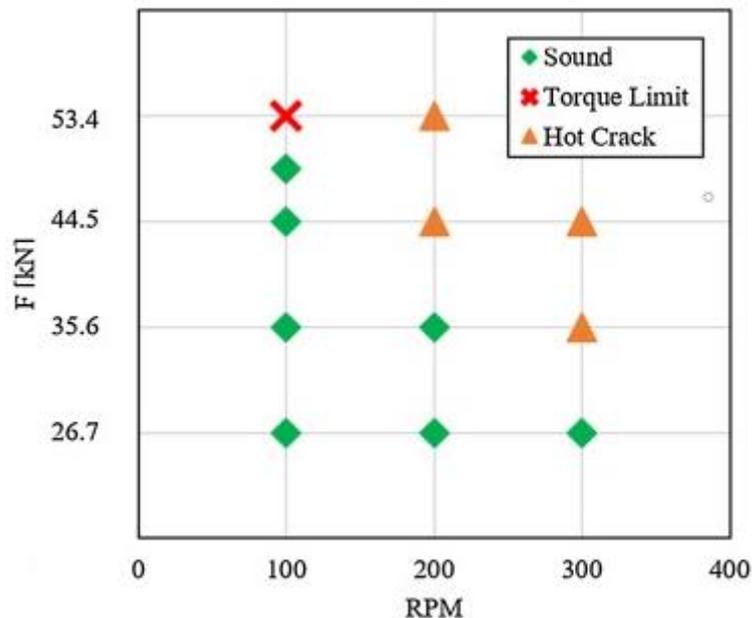


Figura 7 - Análise de qualidade dos arames com relação Força/Velocidade de rotação [8]

Como pode ser observado na Figura 7, com a variação de força vertical imposta e da velocidade de rotação, as fissuras nos arames de alumínio surgem quando a velocidade e a força são de, respetivamente, 300 rpm e 34.5 kN e de 200 rpm e 44.5 kN. Quando a velocidade corresponde a 100 rpm não há aparecimento de fissuras, dentro do limite de torque que o equipamento consegue transmitir.

Assim, os autores concluíram que, sempre que são aplicados valores elevados de força e velocidade, estes levam a excesso de calor gerado dentro da câmara de extrusão, resultando em arames com fissuras. Constatou-se ainda que quanto maior for a velocidade de rotação, menor terá de ser a força de compressão, de forma que não surjam defeitos superficiais evidentes nas peças resultantes do processo.

2.2.5 Extrusão friccional em PCL

Para o caso do PCL foi analisado um estudo [9] de extrusão friccional da PCL no qual foram extrudidos vários provetes de modo a estudar diferentes parâmetros de extrusão. Foram investigados os diferentes provetes produzidos com diferentes velocidades de rotação (Tabela 1).

Tabela 1 - Comparação de densidades dos diferentes provetes [9]

v (rpm)	Densidade (g/cm ³)			
	Global	Topo	Meio	Base
56	1,09±0,01	1,04±0,01	1,11±0,01	1,07±0,01
71	1,06±0,01	1,09±0,01	1,11±0,00	0,90±0,02
90	1,11±0,00	1,10±0,02	1,13±0,01	1,11±0,02
112	1,11±0,01	1,12±0,00	1,12±0,02	1,09±0,01
140	1,12±0,01	1,12±0,00	1,14±0,00	1,12±0,01
180	1,13±0,01	1,12±0,02	1,14±0,01	1,12±0,02
224	1,12±0,01	1,11±0,01	1,13±0,01	1,09±0,01
280	1,12±0,02	1,12±0,01	1,13±0,00	1,10±0,02
355	1,12±0,00	1,11±0,01	1,12±0,00	1,10±0,00
560	1,13±0,01	1,11±0,02	1,13±0,01	1,12±0,01
900	1,12±0,01	1,12±0,01	1,12±0,01	1,11±0,01
1400	1,12±0,00	1,12±0,01	1,13±0,02	1,11±0,00
1800	1,10±0,01	1,10±0,01	1,12±0,01	1,09±0,01

Através de uma análise das densidades em diferentes locais de cada um deles, foi definida a velocidade ideal de rotação como 900 rpm, de maneira a garantir um produto final o mais homogéneo possível.

Relativamente às temperaturas dentro da câmara de extrusão concluiu-se que estas não deveriam ultrapassar os 377 °C visto de modo a evitar a degradação térmica do PCL. E, com a utilização de reforços argilosos não deveria ultrapassar os 200 °C de modo a evitar maiores taxas de perda de material.

2.3 Equipamento

2.3.1 Equipamento de PEF

O equipamento de extrusão friccional equipara-se ao equipamento de SFL. Como foi visto anteriormente será necessária uma ferramenta extrusora, uma câmara de extrusão e uma placa de suporte específicas, mas o atuador da ferramenta terá os mesmos princípios do equipamento de SFL, necessitando-se apenas a deslocação verticalmente.

- **Equipamento de maquinagem convencional**

Outros equipamentos que poderiam ser considerados para a atuação desta ferramenta podiam ser os que são usados em processos que consistiriam em mover uma ferramenta rotativa, como por exemplo uma fresadora ou equipamento de furação. Contudo as cargas geradas no processo de extrusão friccional são superiores às cargas geradas nestes processos, pelo que é necessário um reforço deste equipamento no que toca à capacidade de carga e rigidez das mesmas.

Assim existem algumas potenciais oportunidades de modificação deste equipamento para realizar PEF. Estas modificações podem ser estruturais de maneira a tornar o equipamento mais robusto (substituição de partes do equipamento como geometria, motores, fusos) e podem ser sensoriais, no que toca à incorporação de vários sensores para coletar diferentes informações relativas aos parâmetros de processo que serviram para o controlo do equipamento.

Estas máquinas são populares para este processo porque são muito comuns e mais fáceis de operar.

No caso do PEF, o uso deste equipamento de maquinagem convencional modificado é recomendado para prototipagem e produção em series pequenas pois têm um baixo desempenho de produção [12].

- **Equipamento de SFL dedicado**

O equipamento de SFL dedicado tende a ter a maior capacidade de carga e rigidez. Nesta família de máquinas estão inseridas as máquinas customizadas que são máquinas desenvolvidas especificamente para satisfazer requisitos especiais de produto, sendo que a utilização destas máquinas para um diferente propósito do qual esta foi feita é muitas vezes difícil. Para além disso estas são relativamente caras e são utilizadas especialmente para produção de grandes séries de peças e para materiais de alta temperatura como titânio, ligas de níquel, aço. [12].

- **Equipamento robótico de SFL**

Desenvolvimentos recentes levaram ao desenvolvimento e conseqüente lançamento no mercado de equipamentos robóticos com altas cargas úteis, capazes de realizar SFL em materiais de espessura fina a moderada. As principais vantagens apresentadas pelas máquinas robóticas são flexibilidade e

automação de processos que permitem melhorias significativas de produtividade. No entanto, estes tipos de máquinas são mais adequados ao processo de SFL, e não ao processo de PEF, devido ao maior número de graus de liberdade que oferece, o qual para o processo de PEF não tem qualquer interesse visto que é apenas necessário o deslocamento vertical da máquina [12].

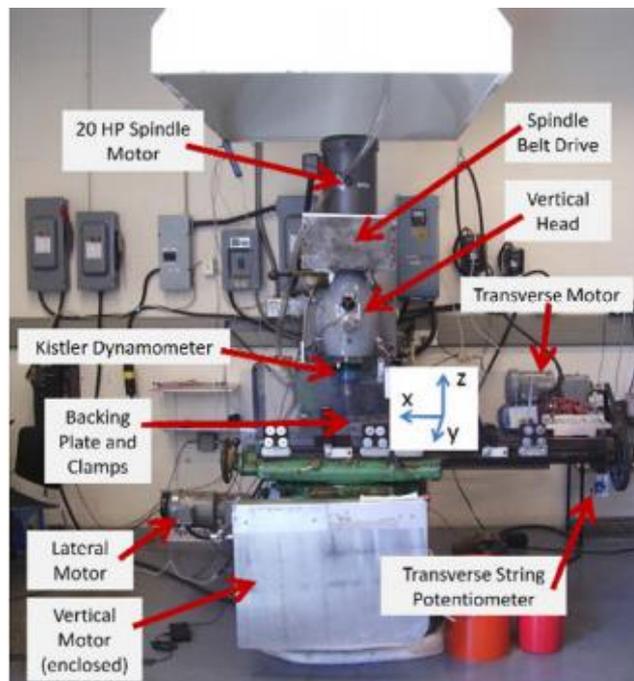


Figura 8 - Fresadora modificada para SFL [12]

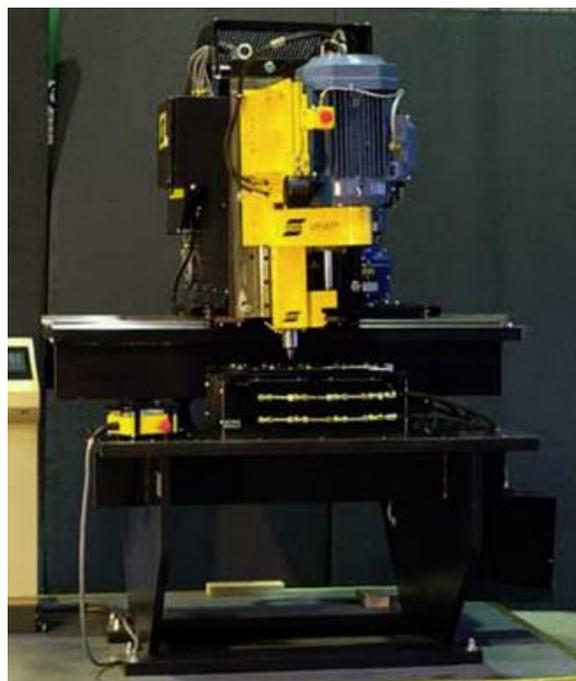


Figura 9 - Máquina de SFL dedicada [12]

2.3.2 Equipamento de controlo

Para sistema de controlo dos parâmetros de processo podem ser utilizados sensores que são utilizados normalmente para o processo de SFL, com a vantagem de ser apenas preciso o movimento vertical da ferramenta extrusora, ao contrário do processo de SFL onde é necessário o movimento em duas dimensões e por vezes 3 dimensões [13].

Tabela 2 - Métodos de controlo de parâmetros de processo

Parâmetro	Método de controlo
Carga vertical	Células de carga ou pressão
Velocidade de rotação	Tacógrafos
Velocidade de avanço	Sensores de posição

Alguns dos métodos de controlo utilizados no processo de SFL (Tabela 2) podem assim também ser utilizados no processo de PEF. Na prototipagem do equipamento seria assim possível a incorporação destes elementos, e através de um Arduino o seu controlo simultâneo.

2.4 Comentários finais

Com a pesquisa bibliográfica deste trabalho é possível uma melhor compreensão do processo em estudo e uma noção de valores dos parâmetros com que vão ser trabalhados. Para além disso são analisados também vários tipos de equipamento, que serão prestáveis para a construção do protótipo em si.

Relativamente à prototipagem foi possível constatar que o equipamento de PEF se equipara bastante ao de SFL e que este pode ser usado para o processo em estudo. Podem ainda ser utilizados equipamentos de maquinaria convencionais, como por exemplo uma fresadora, para a atuação da ferramenta extrusora desde que sejam feitas modificações apropriadas de maneira que estas consigam suportar os requerimentos do processo de PEF. No que toca ao sistema de controlo foram também discutidos alguns aparelhos de análise e controlo dos parâmetros de processo para um bom funcionamento do equipamento.

3 Concepção, Projeto e Produção do equipamento

3.1 Requisitos funcionais

Para o desenvolvimento do equipamento dedicado para extrusão friccional de materiais compósitos, procedeu-se a uma análise cuidada tendo em vista o levantamento exaustivo dos requisitos funcionais do equipamento. Na Tabela 3 descrevem-se as várias funcionalidades e atributos que devem caracterizar os equipamentos dedicados de extrusão friccional.

Tabela 3 - Requisitos funcionais do equipamento

	Funcionalidade	Comentário
1	Aplicar uma força de compressão vertical na câmara de extrusão.	As forças de compressão verticais que com que irão ser trabalhadas são cerca de 1 kN mas não superiores a este valor.
2	Aplicar uma rotação na ferramenta extrusora.	As rotações com que irão ser trabalhadas são até 2000 rpm.
3	Variar o movimento vertical	Deverá ser garantido não só o movimento da ferramenta no sentido de cima para baixo, mas também o movimento de baixo para cima.
4	Garantir o curso do processo e remoção da ferramenta extrusora	A máquina terá de ter espaço suficiente para poder completar o ciclo de baixar a ferramenta até à base da câmara de extrusão e voltar a subir de modo a possibilitar a remoção da ferramenta extrusora.
5	Automatização	O ciclo do processo deve ocorrer de forma automática.
6	Mobilidade ou Portabilidade	O sistema deve ser portátil de modo a garantir o seu transporte.
7	Controlo da Força	Deverá ser possível o controlo das forças utilizadas no processo.
8	Controlo da rotação	Deverá ser possível o controlo da rotação utilizada no processo.
9	Economia	O custo de produção e manutenção devem ser o mínimo possível (inferior a 1000€) por questões de constrangimento orçamental.
10	Fixação	A fixação deve impedir movimentos indesejados ao processo.

3.2 Desenvolvimento do protótipo

Os materiais com que vão ser trabalhados são compósitos de matriz polimérica, pelo que os esforços estudados acima serão significativamente superiores aos que irão ser necessários.

Na figura 10 apresenta-se o modelo do equipamento que irá ser utilizado para a realização do processo.

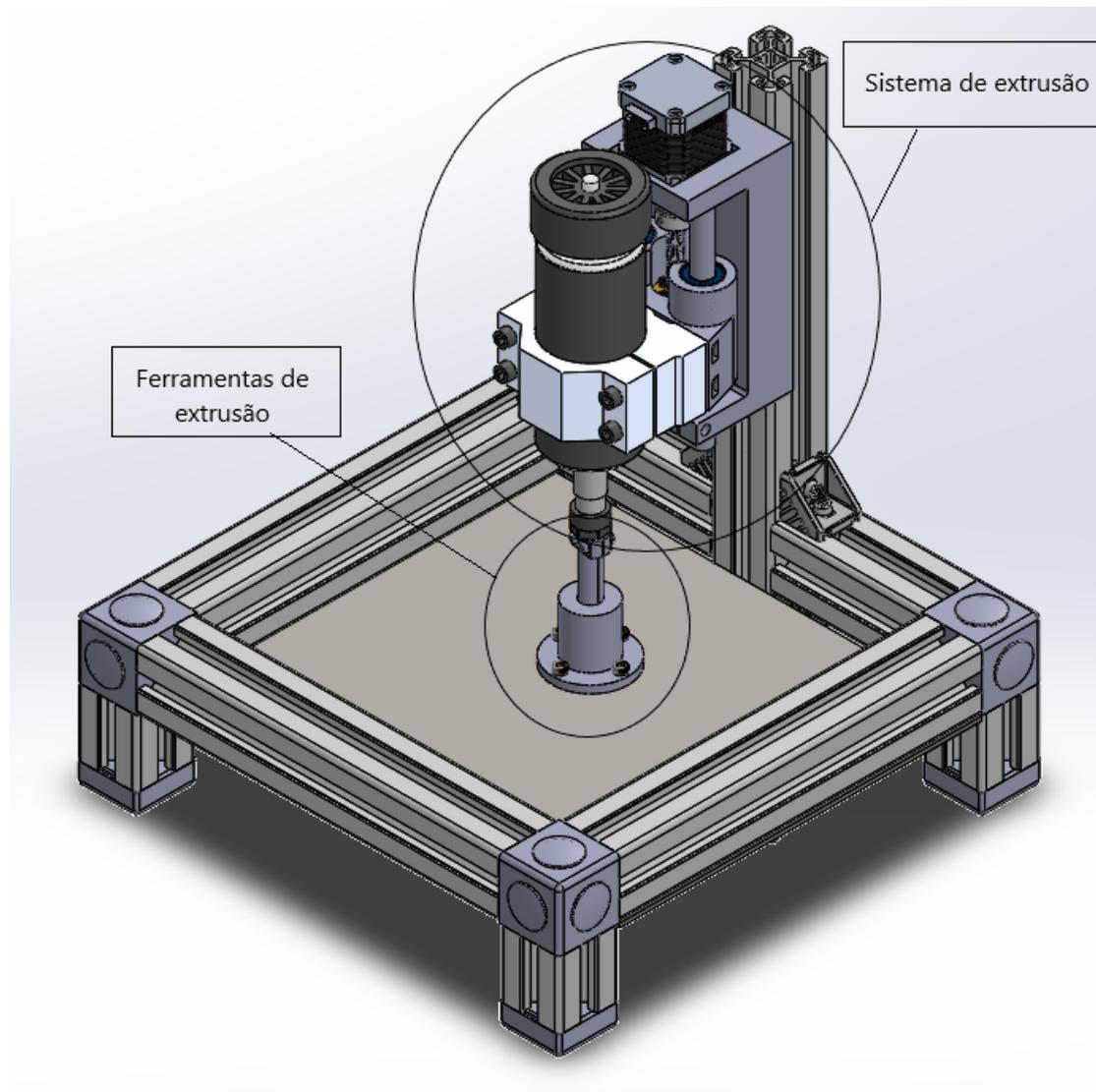


Figura 10 - Protótipo da máquina de extrusão friccional

A estrutura de produto deste equipamento é composta em 3 partes: o sistema de extrusão, que irá fornecer o movimento rotacional e axial, as ferramentas de extrusão que é onde irá acontecer a extrusão e a estrutura de suporte que como o nome indica tem uma função de suporte para as outras duas partes do equipamento.

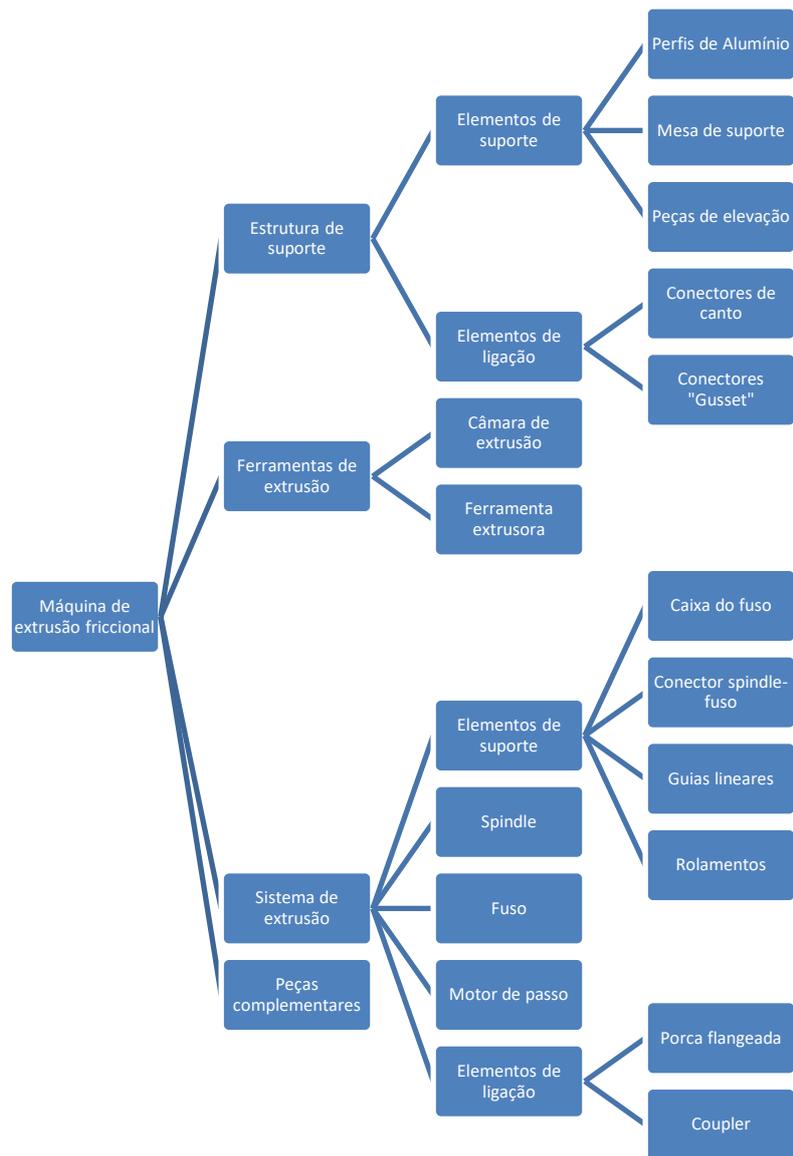


Figura 11 – Estrutura de produto do equipamento

Na Figura 11 pode ser observado um esquema de montagem/desmontagem da máquina projetada bem como a divisão dos seus constituintes em conjuntos e subconjuntos, os quais vão ser explorados ao longo deste documento.

A estrutura de suporte e seus constituintes têm como função garantir a estabilidade da máquina e evitar movimentos indesejados ao processo. Nas ferramentas de extrusão será onde irá ocorrer o processo e servem para garantir as dimensões do arame pretendido. O sistema de extrusão e seus constituintes têm como função garantir os movimentos e esforços necessários para que a extrusão friccional possa ocorrer: o spindle está associado à rotação da ferramenta extrusora e o fuso e o motor de passo estão associados à força de compressão vertical na câmara de extrusão bem como ao movimento vertical da ferramenta extrusora. As peças complementares servem como um meio de organização para a cabeleira da máquina e o sistema elétrico da máquina.

- **Perfil**

Para a estrutura de suporte foi escolhido o perfil 40X40L da BOSCH representado na figura 12.

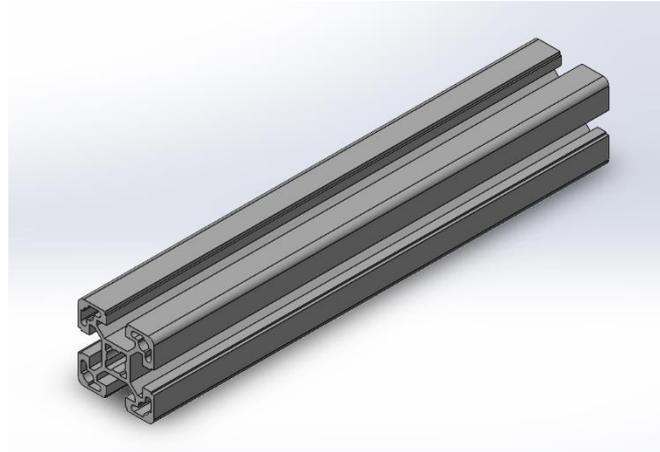


Figura 12 - Perfil 40 x 40 [16]

Deste perfil foram cortados três segmentos de 240 mm de comprimento, dois de 100 mm, quatro de 45 mm e um de 335 mm.

- **Conector de canto**

De formar a conector todos estes perfis foram selecionados quatro conectores cúbicos de canto 40/3, como mostra a figura 13, que por sua vez vêm com os seus parafusos S12X30-T50 e tampas de plástico. Estes permitem a ligação dos perfis pelos três eixos ordenados e são compatíveis em termos de dimensões com os mesmos.

- **Conector "Gusset"**

De modo a unir o perfil principal, onde irá ficar o sistema de extrusão, aos restantes perfis, foram utilizados dois conectores "Gusset" 30X30, cada um com os respetivos elementos de ligação: dois parafusos M6 e duas porcas M6 para calha em T, como mostra a figura 14.

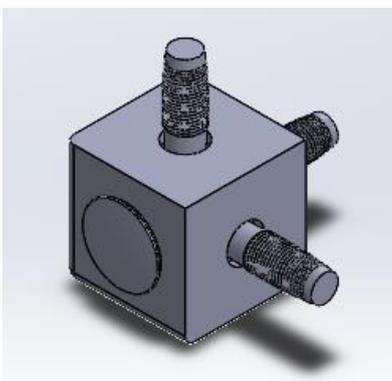


Figura 13 - Conector cúbico de canto 40/3 [16]



Figura 14 - Conector "Gusset" [16]

- **Mesa de suporte**

A câmara de extrusão irá ser colocada acima de uma placa de alumínio com dimensões de 240X320 mm, onde foram feitos furos para a sua ligação tanto à estrutura como à câmara.

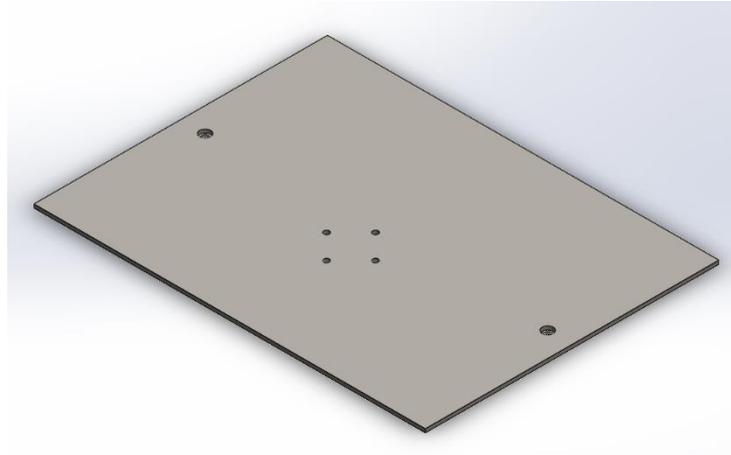


Figura 15 - Mesa de suporte

- **Câmara de extrusão**

A câmara de extrusão foi produzida utilizando os processos de torneamento e fresagem disponíveis de maneira a obter as dimensões requeridas (Figura 16). O plano de processo desta peça está apresentado na tabela 4.

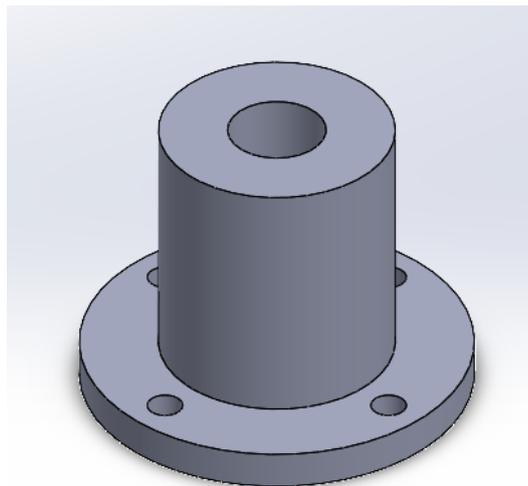
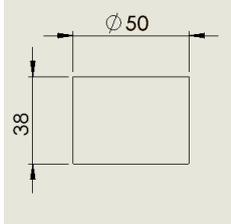
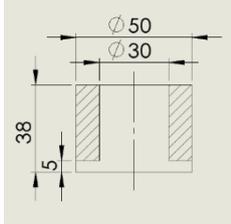
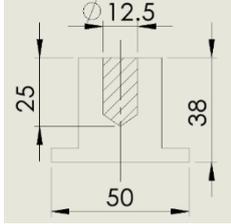
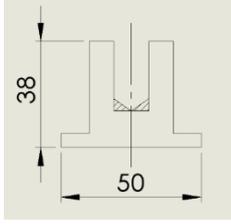


Figura 16 - Câmara de extrusão

Tabela 4 - Plano de processo da câmara de extrusão

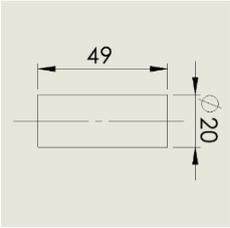
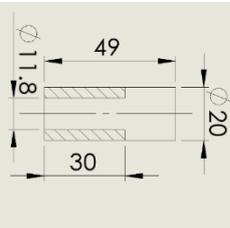
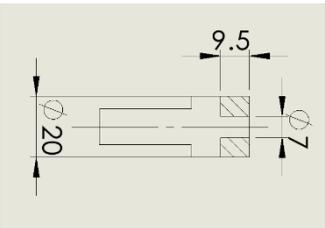
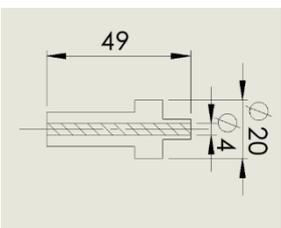
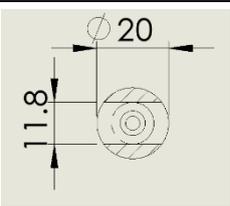
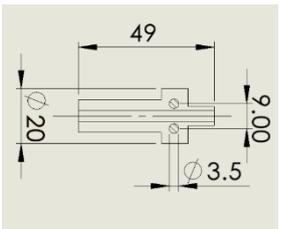
Processo	Representação
<p>A peça inicial é um cilindro de aço com 50 mm de diâmetro e 38 mm de altura.</p>	
<p>Torneamento com desbaste de 10 mm radialmente e 33 mm de profundidade.</p>	
<p>Furação com uma broca de 12.5 mm com uma profundidade de 25 mm.</p>	
<p>Fresagem com fresa de 12.5 mm de modo a achatar o fundo do furo.</p>	
<p>Furação passante com broca de 4.5 mm.</p>	

Nota: Os furos que irão permitir a ligação à mesa de suporte foram feitos tendo em conta o espaçamento das porcas de maneira a ser possível a inserção de uma célula de carga debaixo da mesa de suporte.

- **Ferramenta extrusora**

A ferramenta extrusora foi também produzida de forma a obter as dimensões requeridas (Figura 17). O plano de processo desta peça está representado na Tabela 5.

Tabela 5 - Plano de processo da ferramenta extrusora

Processo	Representação
A peça inicial é um cilindro de aço com 20 mm de diâmetro e 49 mm de altura.	
Torneamento com desbaste de 4.1 mm radialmente e 30 mm de profundidade.	
Torneamento com desbaste de 6.5 mm radialmente e 9.5 mm de profundidade.	
Furação passante com broca de 4 mm.	
Facejamento com profundidade de 4.1 mm de cada lado da peça.	
Furação passante com broca de 3.5 mm.	

Esta peça foi ainda cortada ao meio e junta novamente com parafusos e porcas M3, de modo a permitir a sua abertura depois do processo ocorrer para retirar o produto final.

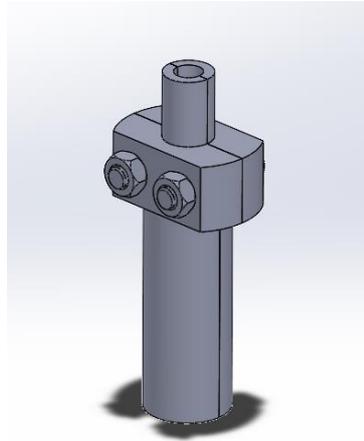


Figura 17 - Ferramenta extrusora

O corte foi efetuado através de uma máquina de corte por serra de precisão linear (Figura 18). Para o alinhamento da peça com a serra, foi também desenvolvido um suporte de maneira a permitir o encaixe na máquina (Figura 19).



Figura 18 - Máquina de corte de precisão linear

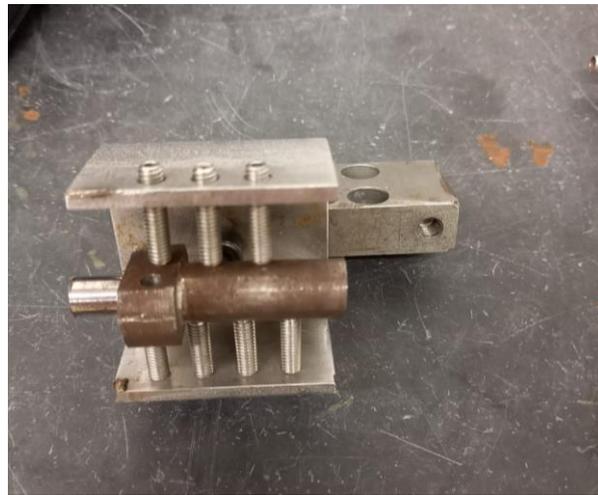


Figura 19 - Suporte de alinhamento para corte

- **Peça de elevação**

Foram realizadas 5 peças de elevação por impressão 3D em PLA, de modo a elevar toda a estrutura para uma altura igual à da célula de carga (Figura 20). Assim, é possível a inserção da célula de carga diretamente debaixo da mesa de suporte para a medição da força imposta na câmara.

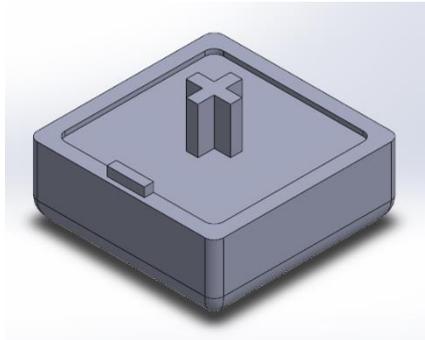


Figura 20 - Peça de elevação

- **Spindle**

As velocidades de rotação recomendadas para o processo são de 50 rpm a 1800 rpm. Assim é necessário um *spindle* que consiga atingir este intervalo de velocidades com um regulador de velocidade. O *spindle* escolhido foi o VEVOR 400 W (Figura 21), o qual vem com um regulador de velocidade que permite ao *spindle* atingir quaisquer velocidades entre 0 rpm e 12000 rpm, uma fonte de alimentação compatível com o próprio e um suporte com os respectivos parafusos e porcas de modo a facilitar a montagem do mesmo.

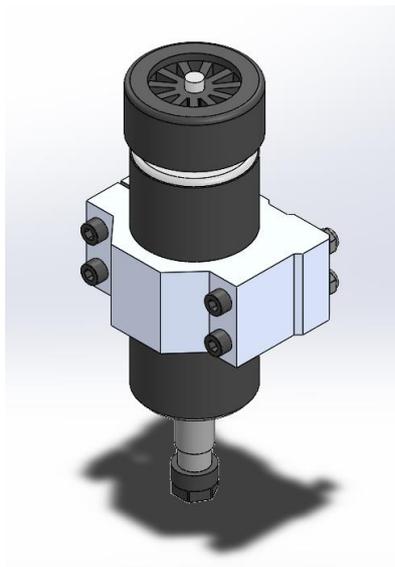


Figura 21 – Spindle e elementos de ligação [21]

Nota: Foi necessário utilizar uma pinça para a extremidade do *spindle*, especificamente a ER11 7 mm Collect Chuck para garantir o encaixe da ferramenta extrusora.

- **Caixa do fuso**

Esta peça foi desenhada e realizada por impressão 3D em PLA. É nesta peça que vai ser colocado todo o sistema de extrusão. A caixa vai ser ligada ao perfil central da estrutura através de parafusos de calha em T. Esta peça tem dois furos no fundo da caixa onde vão ser colocadas duas guias lineares. De modo a garantir uma folga mínima que permita este encaixe foi deixada uma ranhura em cada um dos furos que mais tarde pode ser diminuída com o aperto de um parafuso horizontal. Esta caixa tem também dois furos não passantes na parte de cima da peça de modo a permitir o encaixe destas guias. Ainda no fundo da caixa existe uma cavidade onde irá ficar um rolamento para o fuso. Finalmente, na parte de cima da peça, está o espaço necessário para o motor e os respetivos parafusos para a estabilidade do mesmo (Figura 22).

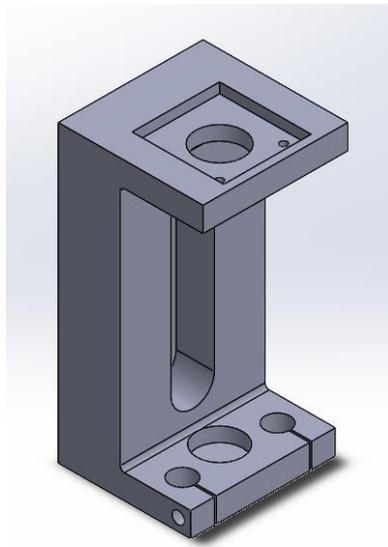


Figura 22 - Caixa do fuso

- **Fuso**

O fuso vai conduzir verticalmente o sistema de extrusão. Este fuso vai estar ligado ao motor de passo e permitirá com auxílio de uma porca flangeada o movimento do *spindle* para cima e para baixo.

O fuso está sujeito ao carregamento do conjunto do *spindle* com o suporte que tem 2 kg massa [m] e está sujeito à gravidade [g] que, assumindo a aceleração gravítica 9.81 m/s², implica, pela segunda lei de Newton (3.1), um peso [P] de 19.62 N.

$$P = m \cdot g \quad (3.1)$$

O fuso escolhido foi um fuso de 8 mm de diâmetro com um passo de 2 mm e com um comprimento de 120 mm, de maneira a respeitar o curso necessário para a ferramenta completar o processo.

Para calcular o torque necessário para o fuso conseguir levantar este peso é necessário primeiro calcular o rácio de velocidade [VR] que pode ser calculado pela equação (3.2) onde é utilizado o diâmetro do fuso [D] e o passo do fuso [p]:

$$VR = \frac{\pi \cdot D}{p} \quad (3.2)$$

Assim obtém-se um rácio de velocidade de 12.57.

De seguida é necessário o cálculo da eficiência do fuso [η] que pode ser calculado pela equação (3.3) onde é utilizado o ângulo de rosca [α] e o ângulo de fricção [β]:

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan (\alpha + \beta)} \quad (3.3)$$

Os ângulos de rosca e de fricção podem ser calculados pelas equações (3.4) e (3.5) respetivamente, onde se utilizam o diâmetro [D] e o passo [p] do fuso e no caso do ângulo de fricção, o coeficiente de fricção [f] que vai ser considerado equivalente a 0.2.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi \cdot D}\right) \quad (3.4)$$

$$\beta = \tan^{-1}(f) \quad (3.5)$$

De onde se podem retirar os ângulos: $\alpha = 4.57^\circ$ e $\beta = 11.31^\circ$ e com estes, $\eta = 0.2857$

Com estes valores é possível retirar o trabalho realizado pelo fuso [W] quando este eleva o conjunto do *spindle*, através da equação (3.6)

$$W = \frac{P}{VR \cdot \eta} \quad (3.6)$$

Que resulta num $W = 5.46$ N

Que resulta num torque [T] que pode ser calculado pela equação (3.7) onde se utiliza o trabalho como a força [F] e o raio do fuso [R]

$$T = F \cdot R \quad (3.7)$$

E assim se obtém um $T = 0.022$ N.m

Utilizando o mesmo trajeto de cálculo, mas para a força que vai ser utilizada no processo para exercer pressão na câmara de extrusão, assumindo uma força de 1 kN obtém-se um trabalho de 278.46 N que resulta num torque de 1.12 N.m.

- **Guias lineares**

Para uma melhor estabilidade do sistema de extrusão foram selecionadas duas guias lineares cilíndricas de alumínio que vão ser colocadas em paralelo com o fuso e vão garantir a estabilidade da peça de ligação do *spindle* ao fuso. Estas guias têm um diâmetro de 12 mm.

- **Conector spindle-fuso**

Esta peça foi desenhada e realizada por impressão 3D em PLA (Figura 23). Este conector, como o nome indica vai conectar o conjunto do *spindle* (*spindle*, suporte e elementos de ligação) ao fuso.

Esta peça tem 3 furos passantes verticais principais onde se vão situar as guias lineares e o fuso no meio destas. Para além disto tem furos para os parafusos e ranhuras laterais para as porcas do suporte do *spindle*.

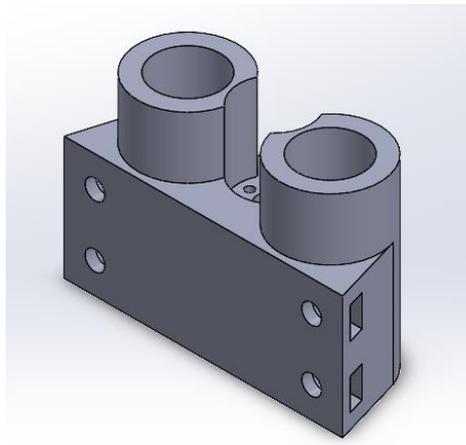


Figura 23 - Conector spindle-fuso

- **Porca flangeada**

A porca flangeada (Figura 24) irá ser colocada no conector *spindle*-fuso e será, posteriormente, onde irá entrar o fuso. Esta porca irá ser movimentada para cima e para baixo consoante a rotação do fuso, e com ela também, o conjunto do *spindle*. O diâmetro e o passo desta porca correspondem com o do fuso.

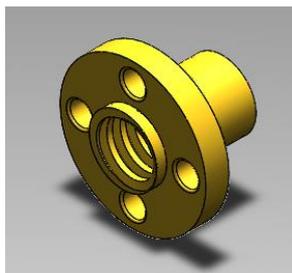


Figura 24 - Porca flangeada

- **Rolamentos**

Neste sistema vão ser usados dois tipos de rolamentos: um rolamento rígido de esferas e dois rolamentos lineares, apresentados nas Figura 25 e Figura 26, respetivamente. O rolamento rígido de esferas escolhido é um 608ZZ, com um diâmetro exterior e interior de 22 mm e 8 mm respetivamente e uma espessura de 7 mm. Este vai ser colocado no fundo da caixa do fuso e vai permitir a fixação do fuso, bem como a sua rotação livre.

Os rolamentos lineares escolhidos foram uns Machifit LM12UU com um diâmetro exterior e interior de 21 mm e 12 mm respetivamente e uma espessura de 30 mm. Estes vão ser colocados no conector *spindle*-fuso e vão permitir a fixação horizontal das guias verticais e do conector, bem como o seu movimento vertical livre.

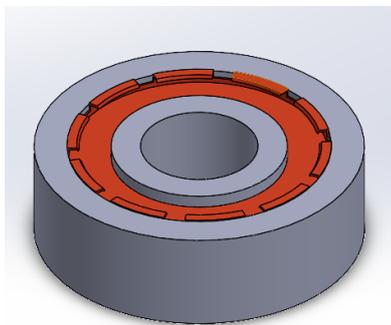


Figura 25 - Rolamento rígido de esferas [17]



Figura 26 - Rolamento linear [18]

- **Motor de passo**

O motor de passo servirá para a condução do fuso. Como foi visto anteriormente este motor terá de fornecer um torque mínimo de 1.12 N.m para a funcionalidade do sistema. Assim foi escolhido o motor Nema 23 - M57STH76-2804S que tem um Torque máximo de 1.85 N.m (Figura 27).

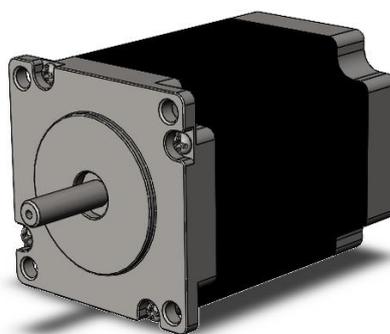


Figura 27 - Motor de passo [20]

- **Coupler**

O *coupler* escolhido foi um *coupler* com diâmetros superior e inferior de 6 e 8 mm (Figura 28). Este *coupler* serve para fazer a ligação do motor de passo ao fuso. Foi necessário alargar os furos para 6.5 mm e 8.5 mm de modo a permitir a entrada do veio do motor e do fuso, respetivamente.

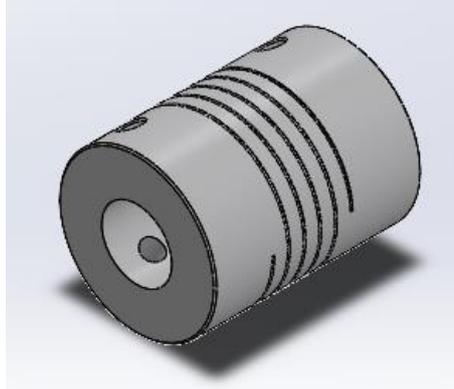


Figura 28 – Coupler [19]

- **Sistema de alinhamento**

Por uma questão de redundância, no caso de algum desvio na montagem, foi desenhado um sistema de alinhamento do *spindle* à câmara de extrusão. Este consiste de duas peças, que estão apresentadas nas figuras 29 e 30, que irão ser realizadas por impressão 3D e quatro guias lineares em aço inox.

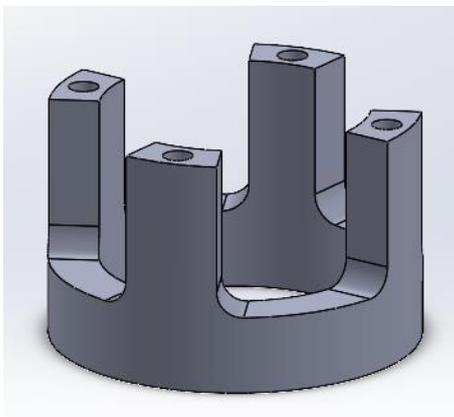


Figura 29 - Peça inferior do sistema de alinhamento

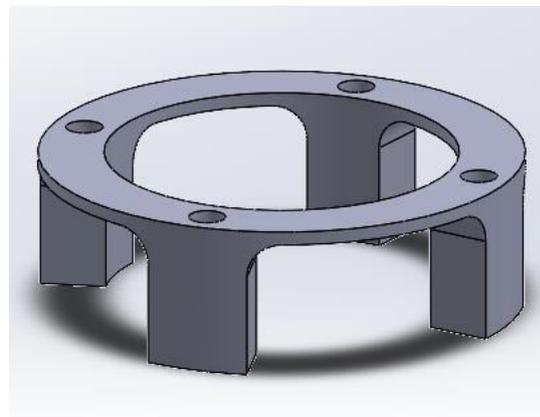


Figura 30 - Peça superior do sistema de alinhamento

O produto final do alinhador que está apresentado na Figura 31, permite o movimento livre da segunda peça.

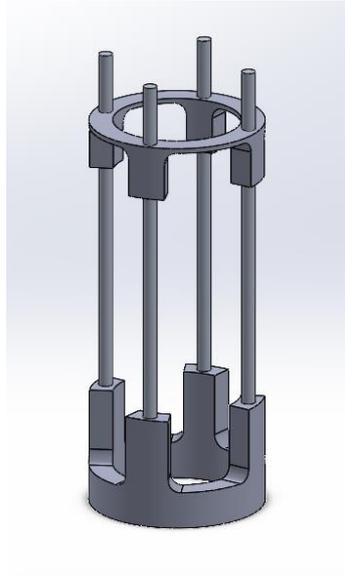


Figura 31 - Sistema de alinhamento

Com este sistema de alinhamento é possível marcar com rigor os furos na mesa de suporte onde se irá situar a câmara de extrusão.

- **Peças complementares**

Estas peças são feitas por impressão 3D e são meramente para fins de organização e disposição dos elementos elétricos associados ao motor de passo e *spindle*. Estas peças asseguram também uma maior facilidade de transporte de toda a estrutura.

Na figura 32 está representado um suporte irá vai ser ligado ao perfil vertical central através de um parafuso de calha em T. Neste ficará o regulador de velocidade que será aparafusado ao mesmo.

Na figura 33 está representada um caixa para a fonte de alimentação do *spindle* que irá ser ligado a um dos perfis horizontais através de parafusos de calha em T.

Na figura 34 está representado um suporte para os elementos de controlo do motor de passo, nomeadamente a placa de arduíno e a placa do *driver* do motor. Estes irão ser aparafusados a este suporte que por sua vez vai ser montado num perfil horizontal através de parafusos de calha em T.

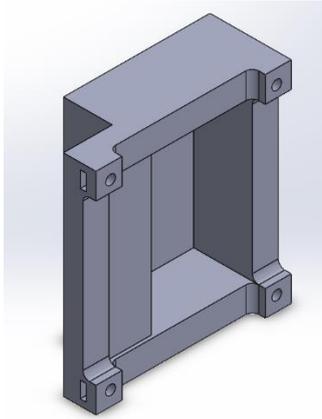


Figura 32 - Suporte do regulador de velocidade

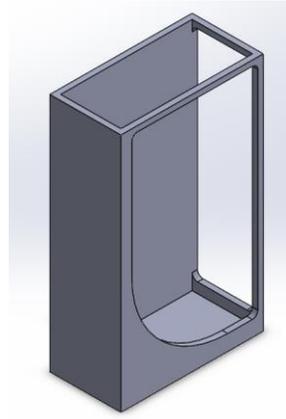


Figura 33 - Caixa da fonte de alimentação

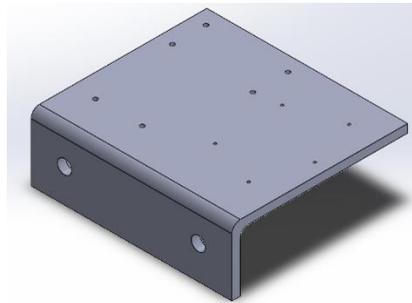


Figura 34 - Suporte de placas

3.3 Sistema de controlo

3.3.1 Instalação elétrica

Para o controlo do *spindle*, como já foi referido, foi utilizado um regulador de velocidade e uma fonte de alimentação que estariam incluídos no conjunto do *spindle*. Para além disso seria apenas necessário um cabo de alimentação para ligar a fonte de alimentação (Figura 35).

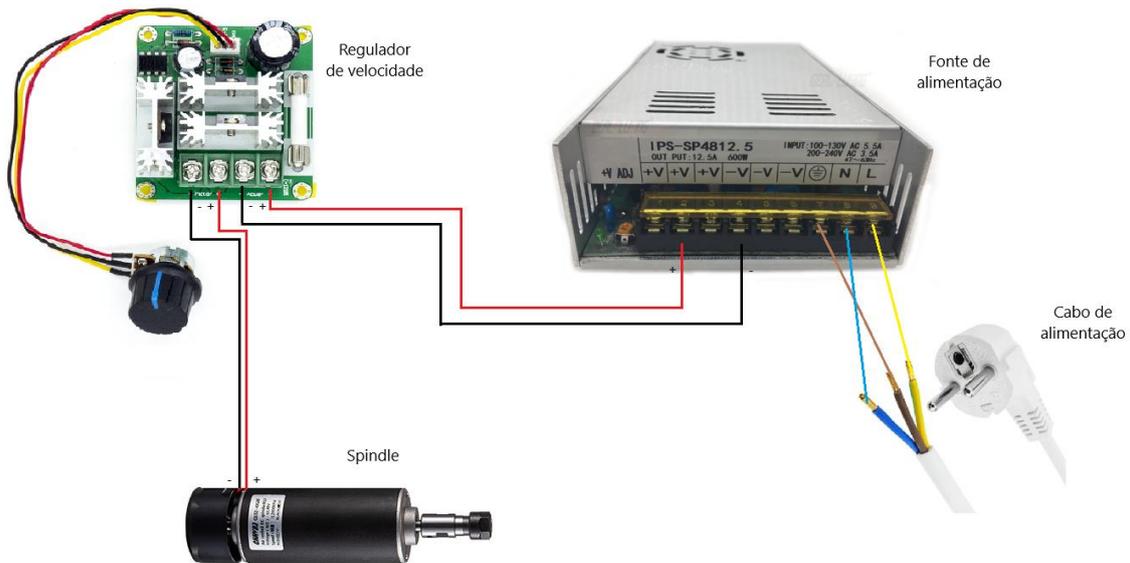


Figura 35 - Circuito do Spindle

Para o controlo do motor de passo foram utilizadas uma placa de Driver e uma placa de Arduíno.

A placa de Driver serve como “tradutor” que permite que seja feita a comunicação entre o motor de passo e o computador. A placa de Driver utilizada foi a Grove - I2C Motor Driver (TB6612FNG), representada na Figura 36. A placa de Arduíno serve como controlador e irá permitir controlar a rotação do motor de passo. A placa de Arduíno escolhida foi a Arduíno UNO R3, que se apresenta na Figura 37. De maneira a perceber as ligações destas placas foram consultadas as suas folhas de referência de onde se pode retirar os respetivos esquemas (Figura 38).

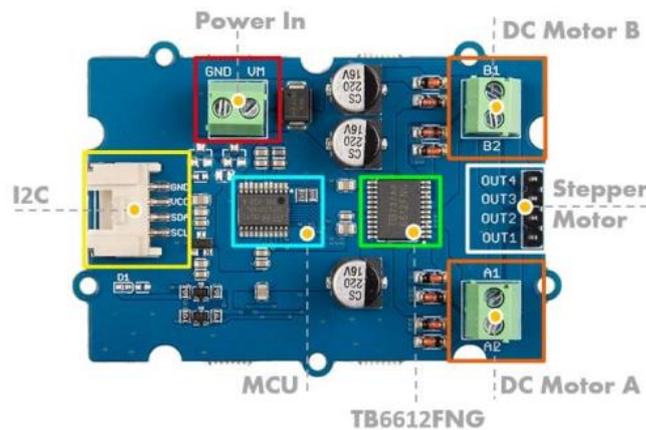
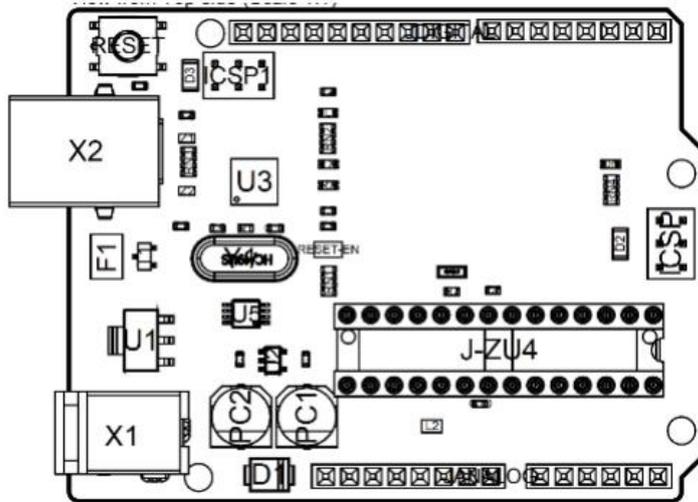


Figura 36 - Placa de driver [24]



Board topology

Ref.	Description	Ref.	Description
X1	Power jack 2.1x5.5mm	U1	SPX1117M3-L-5 Regulator
X2	USB B Connector	U3	ATMEGA16U2 Module
PC1	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	U5	LMV358LIST-A.9 IC
PC2	EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor	F1	Chip Capacitor, High Density
D1	CGRA4007-G Rectifier	ICSP	Pin header connector (through hole 6)
J-ZU4	ATMEGA328P Module	ICSP1	Pin header connector (through hole 6)
Y1	ECS-160-20-4X-DU Oscillator		

Figura 37 - Placa de arduino [23]

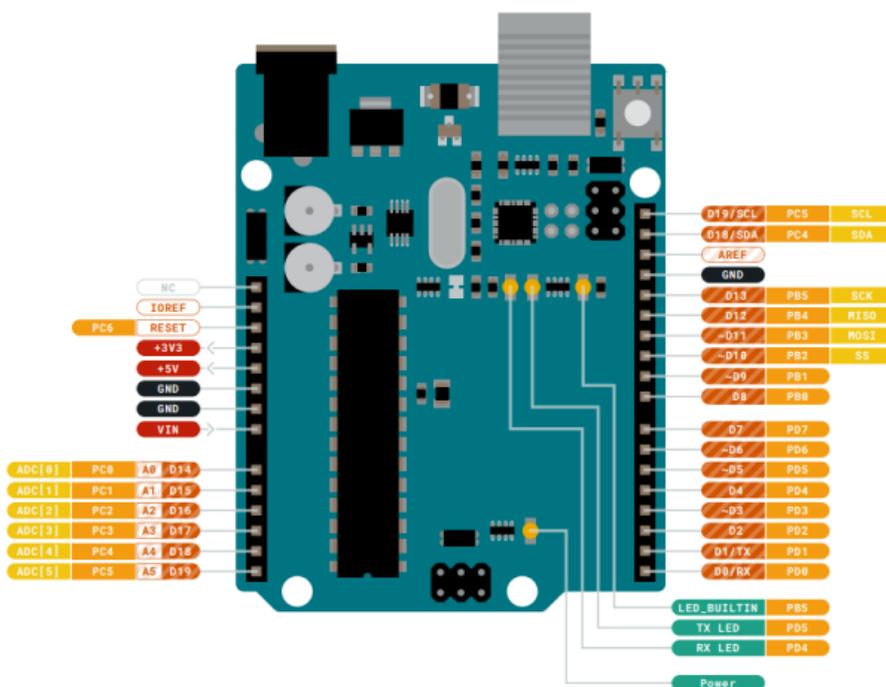


Figura 38 - Pinout da placa de arduino [23]

Com estes foi possível a montagem do circuito do motor de passo, que se encontra na figura 39.

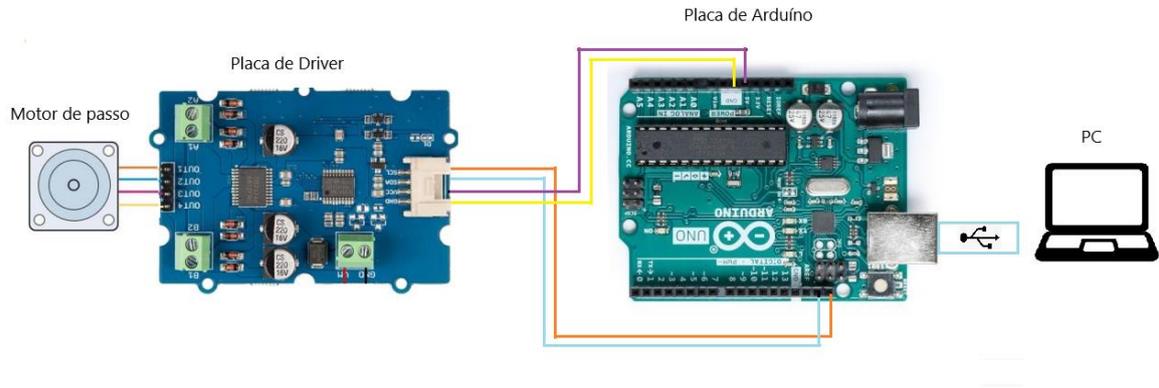


Figura 39 - Circuito do motor de passo

De maneira a controlar a força exercida na câmara de extrusão foi utilizada uma célula de carga (Figura 40). Esta célula de carga funciona através de uma mola que permite retirar a diferença de potencial quando é aplicada uma força. Está ligada a um adaptador com um cabo USB que permite ler essa diferença de potencial no computador. Foram feitos ensaios de referência nos quais foram utilizados diversos pesos de modo a construir uma reta que traduz esta diferença de potencial para peso [N].

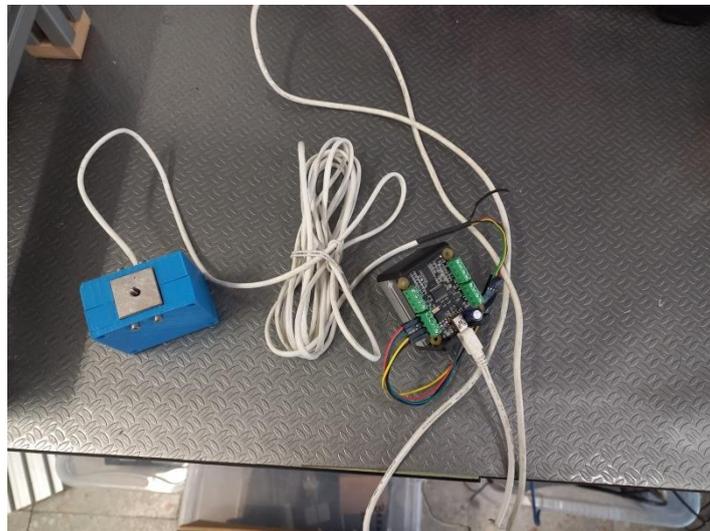


Figura 40 - Célula de carga

3.3.2 Programação do Arduino

Para a programação do Arduino foi necessário verificar primeiro o valor correspondente a uma rotação do fuso. Com o valor de uma rotação foi possível retirar o valor que percorreria o curso do processo.

```
#include <Grove_I2C_Motor_Driver.h>

// default I2C address is 0x0f
#define I2C_ADDRESS 0x0f

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Motor.begin(I2C_ADDRESS);
  //*****/
  Motor.StepperRun(-1000, 1); // 50 = 1 volta para cima / -50 = 1 volta para baixo
  delay(1000); // numero em milisegundos
  Motor.StepperRun(1000, 1);
  //*****/
}

void loop() {

}

// End of file
```

Figura 41 - Código do Arduino

O código de controlo do motor de passo (Figura 41) inicia com as funções `Serial.begin` e `Motor.begin` que são funções para inicialização da comunicação série com os motores. A função “`Motor.StepperRun`” permite a rotação do motor que é influenciada pelo sinal do valor a que esta está associada. No primeiro caso “`Motor.StepperRun(-1000, 1);`” o motor vai rodar na direção que permitirá a descida do spindle na totalidade do curso enquanto no segundo caso “`Motor.StepperRun(1000, 1);`” o motor vai rodar na direção que permitirá a subida do spindle na totalidade do curso. A função “`delay`” é um intervalo de tempo em milissegundos em que o motor irá estar parado.

3.4 Montagem do protótipo

Começando pelos perfis, foi necessário roscar a extremidade que iria levar parafuso. De seguida fez-se a ligação com os mesmos, os conectores de canto e os *gussets*, bem como a colocação das peças de elevação na extremidade inferior dos perfis, como mostra a figura 42.

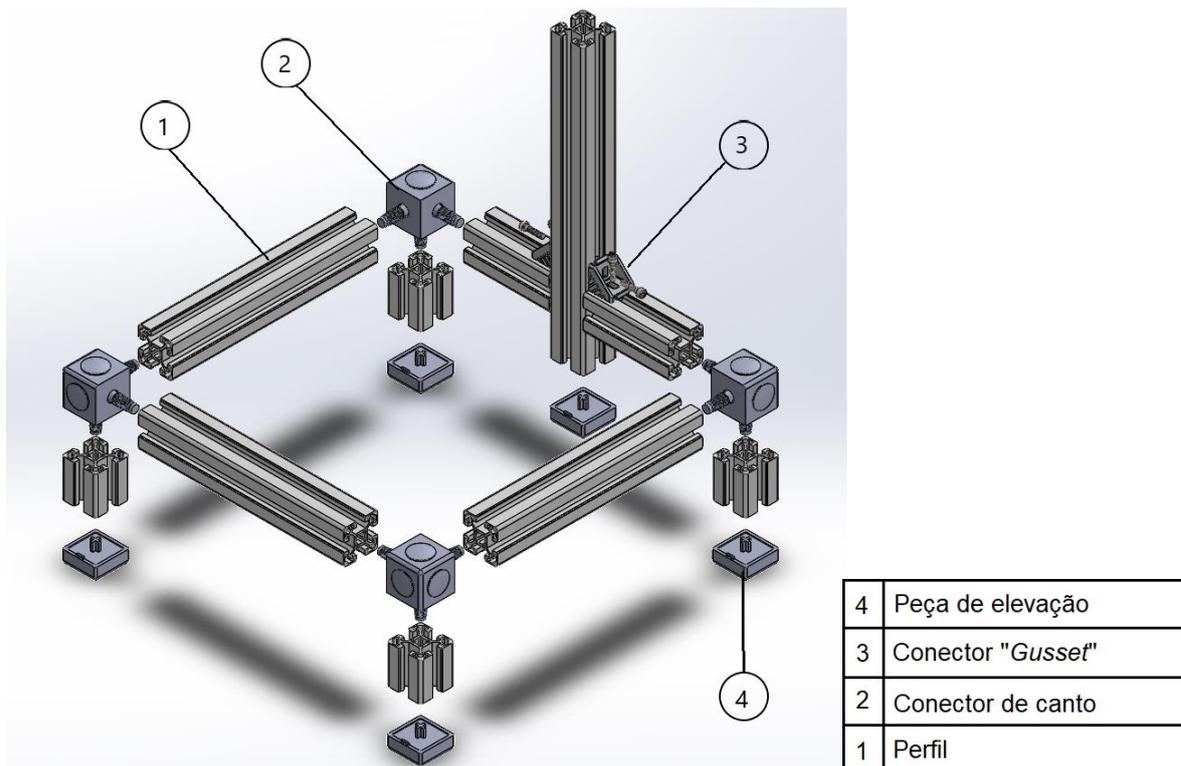


Figura 42 - Vista explodida da estrutura da máquina

O detalhe do *gusset* pode ser observado na figura 43, onde são colocadas as porcas de calha em T no perfil, seguido do *gusset*, seguido dos parafusos, para ligar o perfil vertical central ao resto da estrutura.

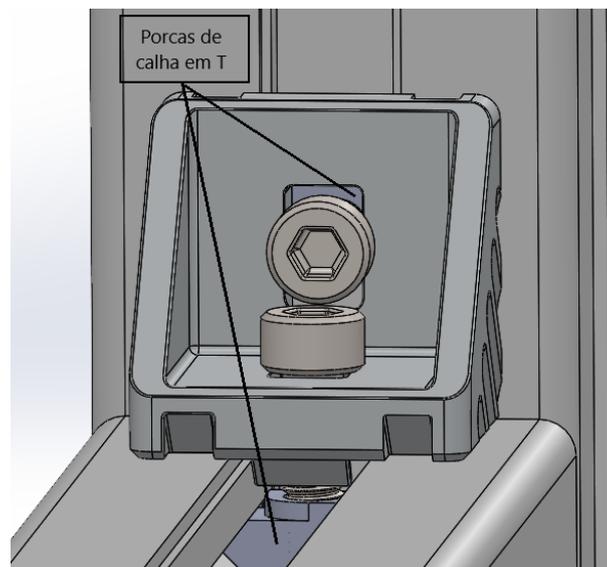


Figura 43 - Detalhe de montagem do "Gusset"

Montada a estrutura dos perfis, será colocada a caixa do fuso, que é ligada ao perfil vertical central a 20 mm do topo do perfil, distância que permite que o *spindle* consiga fazer o curso necessário ao

processo e que seja possível retirar a ferramenta extrusora da extremidade do *spindle*. Esta ligação é feita com parafusos de calha em T como mostra a figura 44.

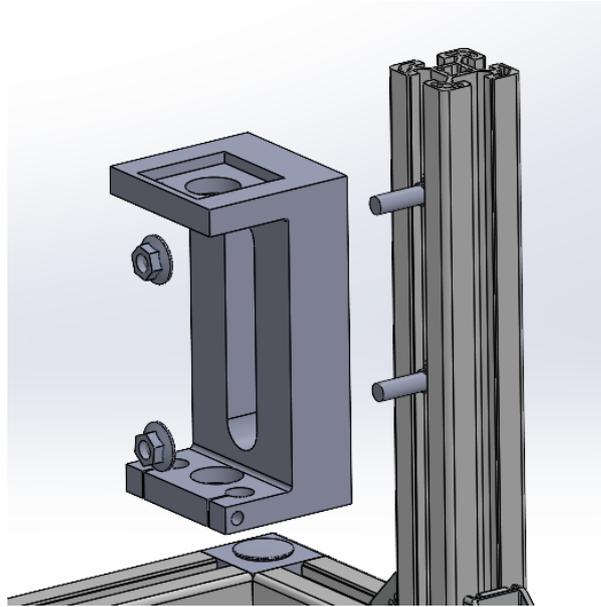


Figura 44 - Montagem da caixa do fuso

Em paralelo à estrutura, é feita a montagem do conector *spindle*-fuso com o fuso, a porca flangeada, os respetivos parafusos e porcas, e recorrendo a um martelo a colocação dos rolamentos lineares, que resulta na estrutura representada na figura 45.

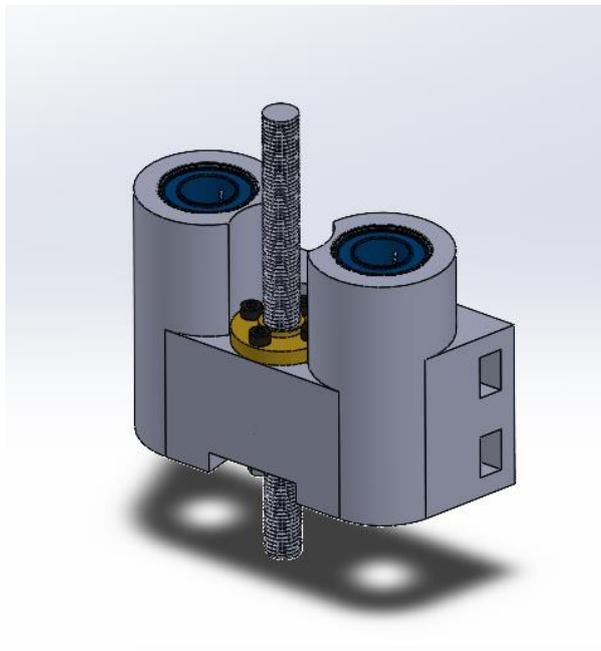


Figura 45 - Montagem do conector spindle-fuso

Na estrutura é colocado o rolamento rígido de esferas no fundo da caixa do fuso e de seguida o conjunto do conector *spindle*-fuso pela parte frontal da caixa. As guias lineares são colocadas, no sentido de baixo para cima, nos furos da caixa do fuso, passando pelos rolamentos lineares dentro do conjunto e encaixando nos furos de cima da caixa (Figura 46).

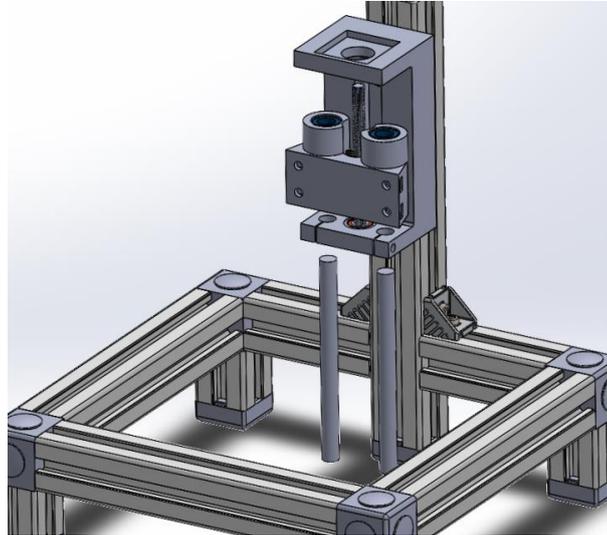


Figura 46 - Montagem do fuso

De seguida é introduzido o motor de passo no topo da caixa do fuso com os respetivos elementos de ligação e o *coupler* que faz a ligação com o fuso (Figura 47).

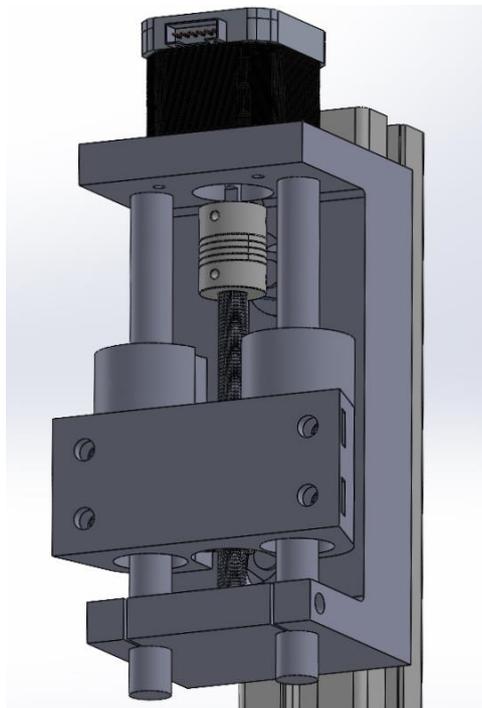


Figura 47 - Montagem do motor de passo

Para a montagem do *spindle*, como mostra a figura 48, irão ser colocadas as porcas nas ranhuras do conector *spindle*-fuso, o *spindle* é colocado no suporte e é aparafusado nas porcas previamente dispostas.

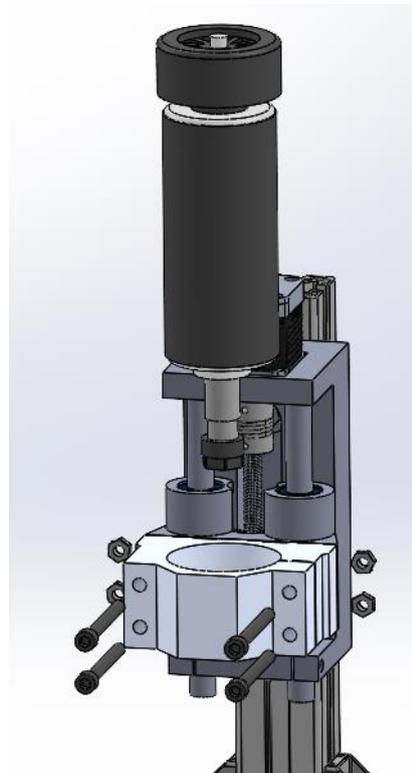


Figura 48 - Montagem do spindle

Para a montagem da mesa, esta é inicialmente disposta na estrutura, de modo a confirmar os furos e os alinhamentos, recorrendo ao sistema de alinhamento. Feitos os furos, é ligada à mesa a câmara de extrusão através de parafusos e porcas M4 (Figura 49).

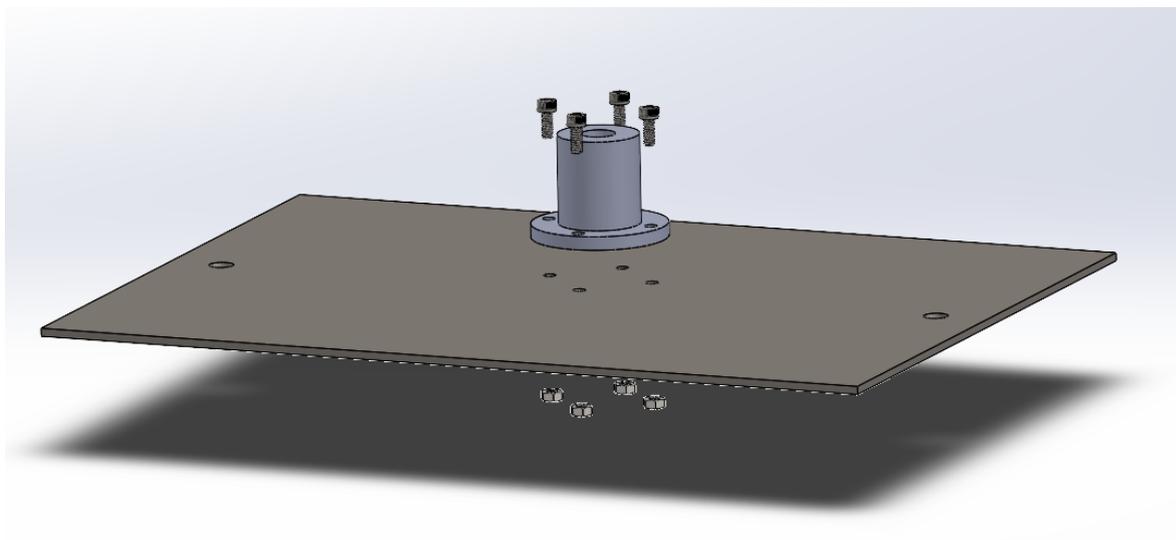


Figura 49 - Montagem da câmara de extrusão

A mesa de suporte é colocada através de parafusos de calha em T e porcas M8, nos furos laterais da mesa, por baixo da estrutura de suporte (Figura 50).

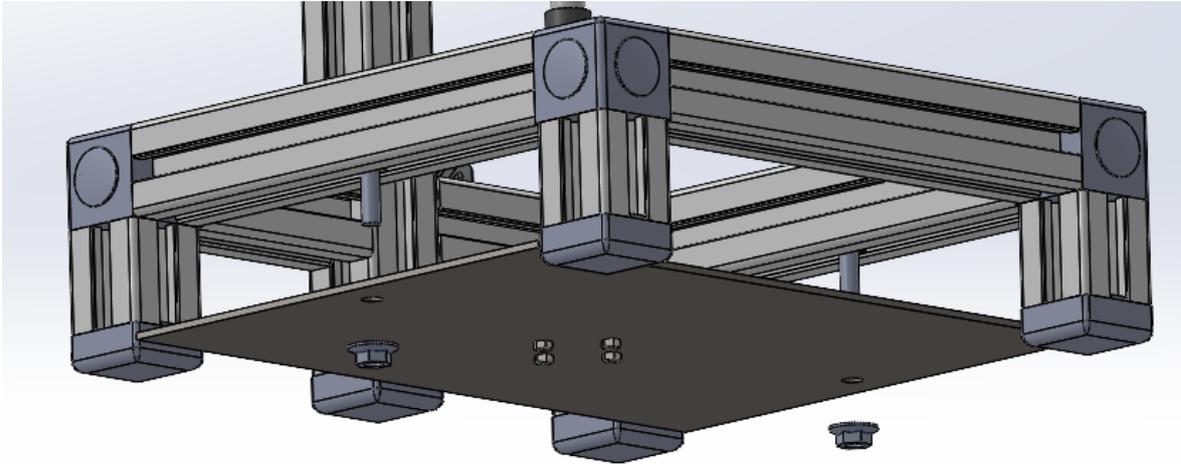


Figura 50 - Montagem da mesa de suporte

Finalmente são postas as peças complementares através de parafusos de calha em T, nos diferentes perfis. A sua disposição está representada na figura 51.

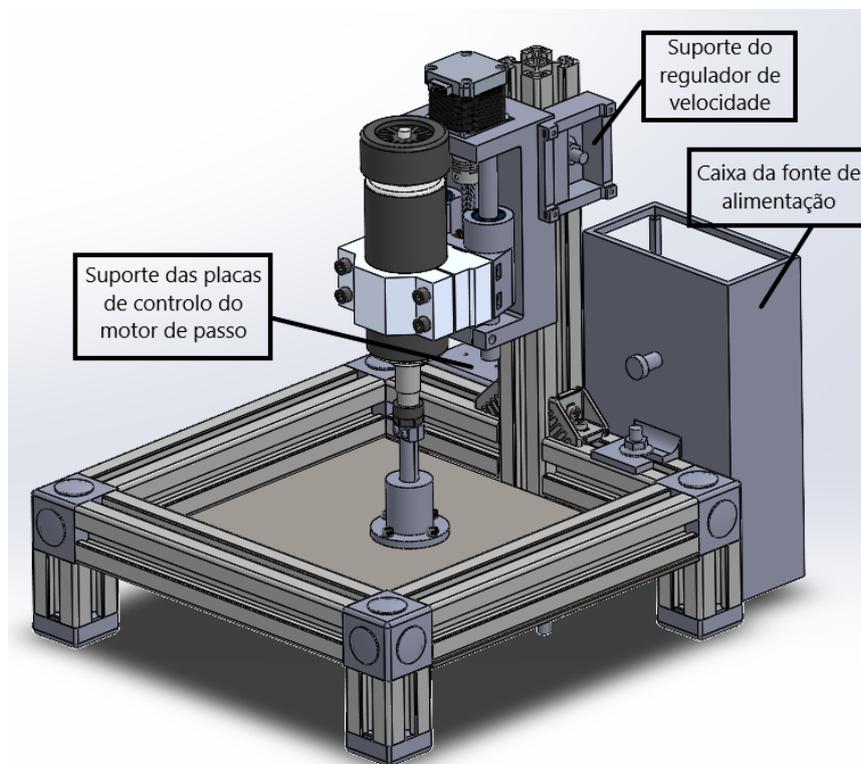


Figura 51 - Disposição das peças complementares

4 Prova de conceito

O sistema de extrusão friccional foi desenvolvido e testado de maneira a garantir uma prova de conceito. O material utilizado para os testes da prova de conceito foi PVA natural em forma de pequenos nódulos e fios de filamento, os quais foram colocados e compactados na câmara de extrusão. A figura 52 apresenta o aparato experimental com o equipamento desenvolvido.

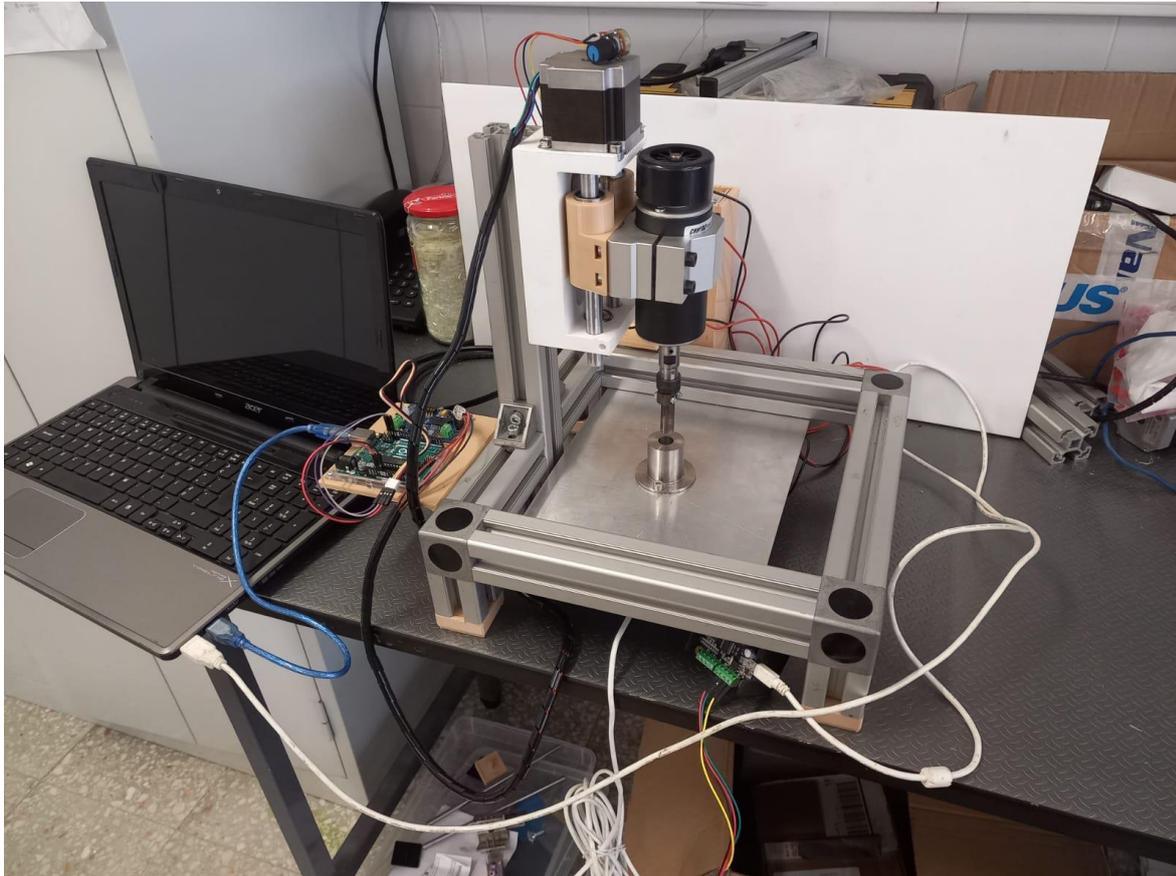


Figura 52 – Aparato experimental

Estes testes foram realizados em intervalos de cerca de 26.3 segundos e foram aplicadas diferentes velocidades de rotação que conduziram aos diferentes resultados apresentados, ilustrados na figura 53 e onde se pode observar que existiram zonas onde o material não fundiu completamente.

As forças medidas durante os ensaios estão apresentadas nas figuras 54, 55 e 56. Pode verificar-se que o equipamento funciona nas gamas previstas de funcionamento, definidas como requisito. Da análise destes gráficos e da inspeção visual dos provetes obtidos, constata-se que o aumento da força permite uma melhor consolidação do material, como esperado.

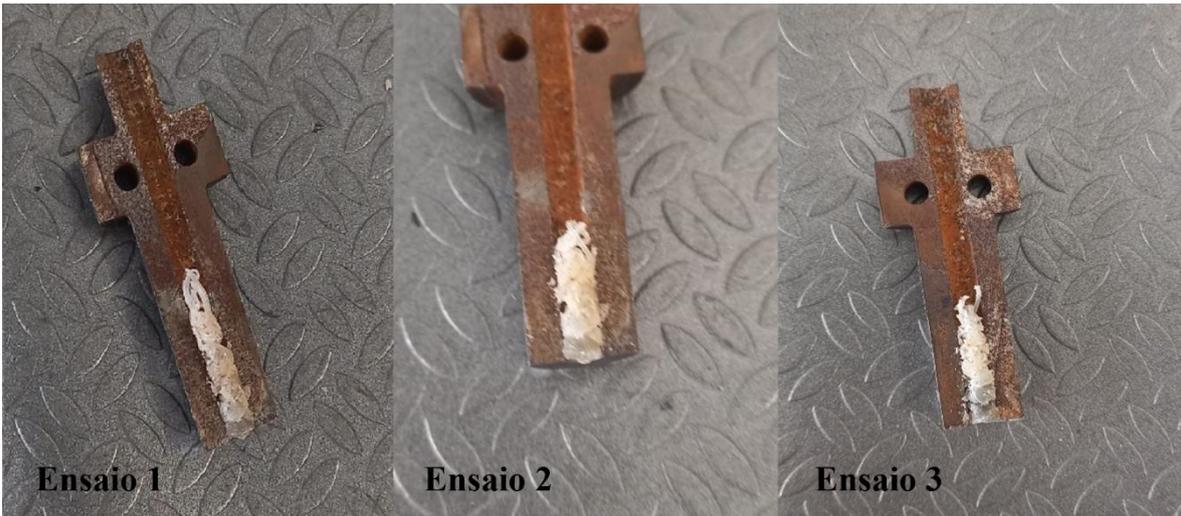


Figura 53 – Provetes obtidos nos testes de validação

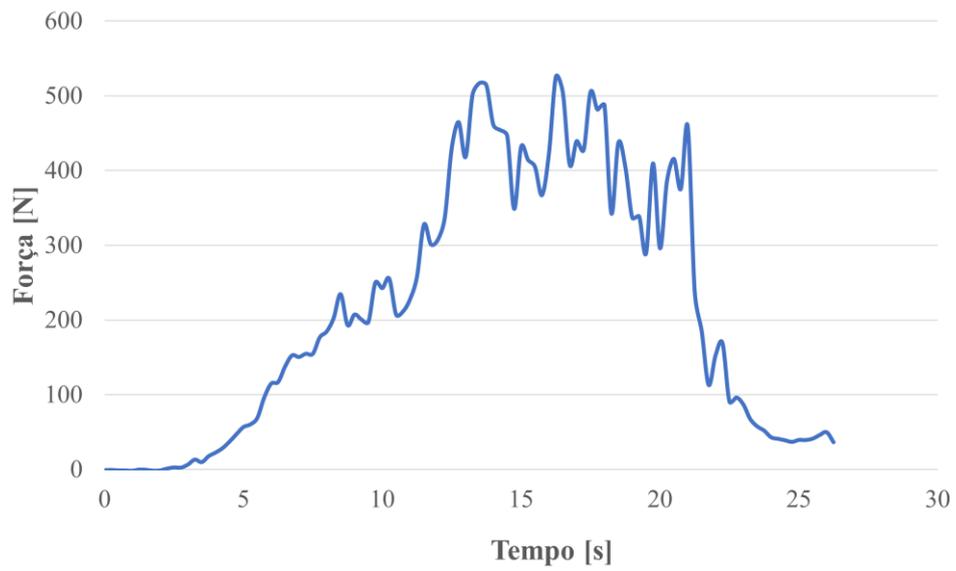


Figura 54 – Forças adquiridas durante o ensaio 1

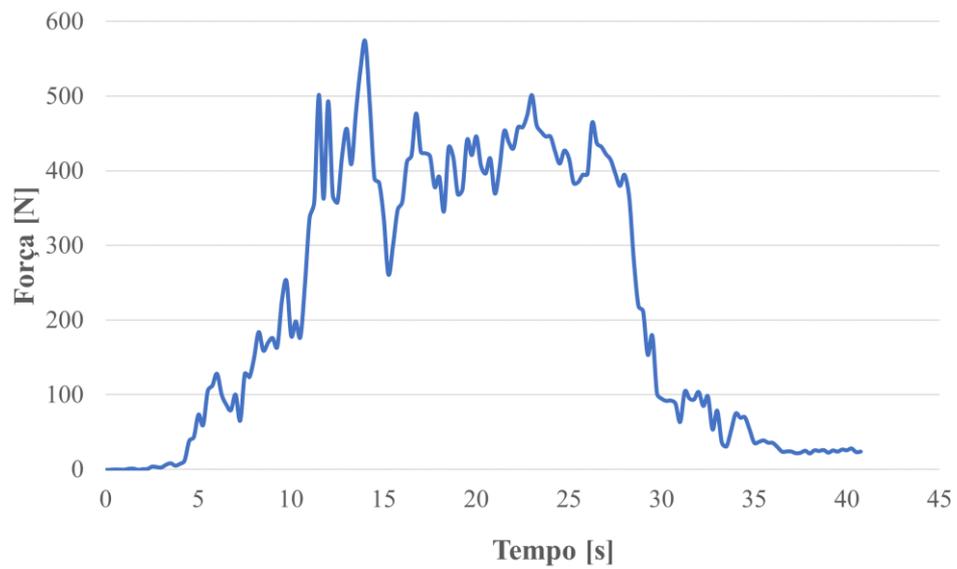


Figura 55 – Forças adquiridas durante o ensaio 2

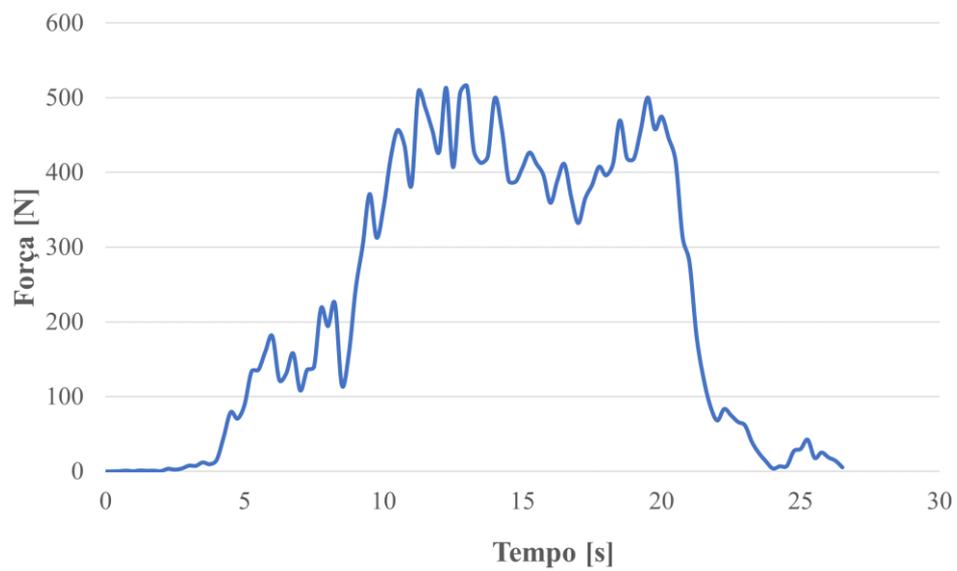


Figura 56 - Forças adquiridas durante o ensaio 3

5 Conclusões

O objetivo da prova de conceito foi cumprido pelo que foi projetada, dimensionada, concebida e programada com sucesso uma máquina que permite a extrusão friccional de materiais compósitos.

O protótipo desenvolvido respeitou os requisitos funcionais pelo que os movimentos e forças foram os esperados, a máquina tem um bom grau de automatização, o sistema é portátil e impede movimentos indesejados ao processo e respeitou o orçamento de 1000€ pelo que ficou com um custo de produção de cerca de 200€. O controlo da rotação não foi o mais indicado pelo que era possível a alteração deste valor, mas com pouca precisão, o que seria resolvido com a utilização de um tacómetro (o qual não foi possível aceder por restrições de tempo).

Dito isto, os resultados da prova de conceito podem ser melhorados com um aperfeiçoamento de parâmetros. A força e a rotação utilizados no processo foram as indicadas, contudo um parâmetro que pode ter contribuído para a falta de fundição localizada nos provetes é a velocidade de avanço vertical, a qual permite o avanço do *spindle* que está associada ao motor de passo. Uma velocidade de avanço mais lenta resultaria num maior intervalo de tempo para o material fundir. Outro fator que pode ter contribuído para este acontecimento é a falta de compactação do material. Visto que o material aparenta estar fundido apenas na parte inferior do provete, isto indica que o material na parte de cima da câmara não estaria corretamente compactado. Uma maior compactação do material resultaria numa distribuição mais uniforme da pressão fornecida pelo *spindle* que levaria a uma fundição mais uniforme do material. Para além disto seria também recomendado um tratamento térmico no aço de maquinação de modo a evitar, no futuro, corrosão e diminuir o seu desgaste.

Referências bibliográficas

- [1] H. Zhang, X. Zhao, X. Deng, M.A. Sutton, A.P. Reynolds, S.R. McNeill, X. Ke, Investigation of material flow during friction extrusion process, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 85, pp. 130-141, 2014.
- [2] X. Li, W. Tang, A.P. Reynolds, W.A. Tayon, C.A. Brice, Strain and texture in friction extrusion of aluminum wire, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 229, pp. 191-198, 2016.
- [3] W. Tang, A.P. Reynolds, Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2231-2237, 2010.
- [4] Kaufman, J.G. (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. Retirado de <https://books.google.pt/books>
- [5] Ph. Lequeu, K. P. Smith, and A. Daniélou, Aluminum-Copper-Lithium Alloy 2050 Developed for Medium to Thick Plate, *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 841-847, 2010.
- [6] J. Na, G. Xiang, Z. Zi-qiao, Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial production, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 740-745, 2010.
- [7] Davis, J. R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. Retirado de <https://books.google.pt/books>
- [8] Dario Baffari, Anthony P. Reynolds, Xiao Li, Livan Fratini, Influence of processing parameters and initial temper on Friction Stir Extrusion of 2050 aluminum alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, no.1, pp. 319-325, 2017.
- [9] Rosa, Joana (2019). *Extrusão friccional de compósitos de policaprolactona reforçados por nanoargilas*. Dissertação de Mestrado de Engenharia dos Materiais, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- [10] Li, Xiao & Baffari, Dario & Reynolds, A.P.. (2018). Friction stir consolidation of aluminum machining chips. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 94. 1-12. 10.1007/s00170-017-1016-4.
- [11] Legnan Koula/EPA. Mais de 400 milhões de toneladas de plásticos produzidos por ano, só 9% são reciclados de <https://observador.pt/2018/06/05/mais-de-400-milhoes-de-toneladas-de-plasticos-produzidos-por-ano-so-9-sao-reciclados/>
- [12] Nuno Mendes, Pedro Neto, Altino Loureiro, António Paulo Moreira, Machines and control systems for friction stir welding: A review, *Materials and Design*, vol. 90, 2016, pp 256-265, ISSN 0264-1275.

- [13] T. Zappia, C. Smith, K. Colligan, H. Ostersehlte, S.W. Kallee, 4 - Friction stir welding equipment, Editor(s): Daniela Lohwasser, Zhan Chen, In Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Friction Stir Welding, Woodhead Publishing, 2010, Pages 73-117, ISBN 9781845694500
- [14] V. V. Athani, Stepper Motors: Fundamentals, Applications And Design, 1997, New Age International
- [15] L. V. Da Cunha, Desenho Técnico, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2017.
- [16] “BOSCH REXROTH”, [Online]. Available: <https://www.boschrexroth.com/en/dc/> [Acedido em Junho 2022].
- [17] “SKF”, [Online]. Available: <https://www.skf.com/pt> [Acedido em Junho 2022].
- [18] “AVA Linear System”, [Online]. Available: <https://www.avasistema.com.br/> [Acedido em Junho 2022].
- [19] “HUCO”, [Online]. Available: <https://www.huco.com/> [Acedido em Junho 2022].
- [20] “Motion Control Products”, [Online]. Available: <https://www.motioncontrolproducts.com/> [Acedido em Junho 2022].
- [21] “VEVOR”, [Online]. Available: <https://www.vevor.com/> [Acedido em Junho 2022].
- [22] H. Zhang, X. Li, X. Deng, A. P. Reynolds, and M. A. Sutton, “Numerical simulation of friction extrusion process,” J. Mater. Process. Technol., vol. 253, no. October 2017, pp. 17–26, 2018.
- [23] “ARDUINO”, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/> [Acedido em Junho 2022].
- [24] “SEEED STUDIO” [Online]. Available: <https://www.wiki.seeedstudio.com/> [Acedido em Junho 2022].

Anexos

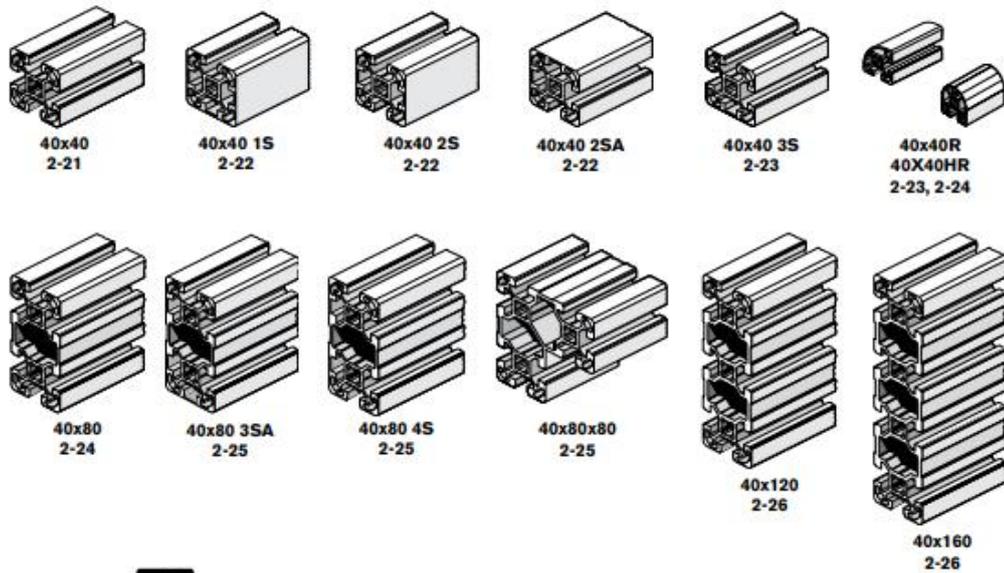
Anexo 1 – Catálogo de perfis da BOSCH [16]

8981 500 201 09/14 | Aluminum Framing

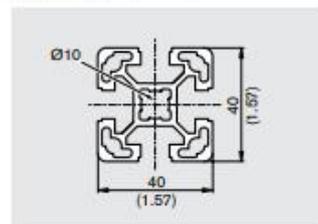
Linear Motion and Assembly Technologies | Bosch Rexroth Corp. 2-21

Section 2: Profiles

40-Series Profiles



2



Features:

- Ideal for medium-duty, medium-stress construction, such as guarding, partitions, shelves, etc.
- Has four 10mm T-slots

Non-Machined End Finish Options

	Part Number
Profile 40x40, pkg. of 20, 6000mm long	3 842 529 339
Profile 40x40, single, 6000mm long	3 842 529 340

Machined Options

	End Finish	Part Number
Profile 40x40, -/-, specify length $\geq 30\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 120/ __mm
Profile 40x40, M12/-, specify length $\geq 55\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 121/ __mm
Profile 40x40, D17/-, specify length $\geq 40\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 124/ __mm
Profile 40x40, M12/M12, specify length $\geq 110\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 122/ __mm
Profile 40x40, M12/D17, specify length $\geq 90\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 123/ __mm
Profile 40x40, D17/D17, specify length $\geq 80\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 125/ __mm
Profile 40x40, D17/D17VS, specify length $\geq 80\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 126/ __mm
Profile 40x40, D9.8/D9.8, specify length $\geq 80\text{mm} \leq 6000\text{mm}$		3 842 993 129/ __mm

Please contact your distributor for other machining options.

GoTo boschrexroth-us.com/framing to get these in stock items **FAST** from your local distributor

Anexo 2 – Tabela das dimensões nominais das roscas ISO [15]

TABELA 15.10

DIMENSÕES NOMINAIS DAS ROSCAS ISO (MÉTRICO)¹

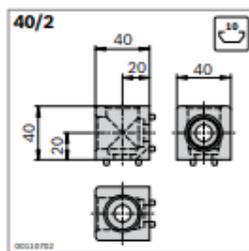
1) Parafusos, porcas e pemos com passo grosso

Dimensões em mm; secções em mm²

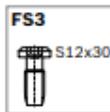
Diâmetro nominal	Passo	Diâmetro dos flancos	Diâmetro interior	Diâmetro para cálculo da secção resistente	Secção (²) resistente
$D = d$	P	$D_2 = d_2$	$D_1 = d_1$	d_3	S_r
1	0,25	0,838	0,729	0,693	0,460
1,1	0,25	0,938	0,829	0,793	0,588
1,2	0,25	1,038	0,929	0,893	0,732
1,4	0,3	1,205	1,075	1,032	0,983
1,6	0,35	1,373	1,221	1,171	1,27
1,8	0,35	1,573	1,421	1,371	1,70
2	0,4	1,740	1,567	1,509	2,07
2,2	0,45	1,908	1,713	1,648	2,48
2,5	0,45	2,208	2,013	1,948	3,39
3	0,5	2,675	2,459	2,387	5,03
3,5	0,6	3,110	2,850	2,764	6,78
4	0,7	3,545	3,242	3,141	8,78
4,5	0,75	4,013	3,688	3,580	11,3
5	0,8	4,480	4,134	4,019	14,3
6	1	5,350	4,917	4,773	20,1
7	1	6,350	5,917	5,773	28,9
8	1,25	7,188	6,647	6,466	36,6
10	1,5	9,026	8,376	8,160	58,0
12	1,75	10,863	10,106	9,853	84,3
14	2	12,701	11,835	11,546	115
16	2	14,701	13,835	13,546	157
18	2,5	16,376	15,294	14,933	192
20	2,5	18,376	17,294	16,933	245
22	2,5	20,376	19,294	18,933	303
24	3	22,051	20,752	20,319	353
27	3	25,051	23,752	23,319	459
30	3,5	27,727	26,211	25,706	561
33	3,5	30,727	29,211	28,706	694
36	4	33,402	31,670	31,098	817
39	4	36,402	34,670	34,092	976

Anexo 3 – Catálogo de conectores cúbicos de canto da BOSCH [16]

3-44 MGE 13.2 | Connection elements



Type	
40/2	60 Nm

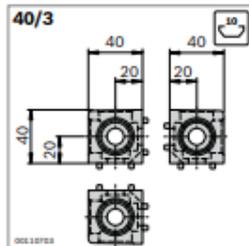


Cubic connector 40/2	Slot	ESD	No.	FS	
Set (standard), signal gray	10	⚡	1	3 842 549 866	2xFS3
Set <i>designLINE</i> , signal gray	10	⚡	1	3 842 549 867	2xFS3
Cubic connector	10	⚡	20	3 842 529 010	
Cover cap signal gray (PP)			100	3 842 548 702	
D24 black (PP)		⚡	100	3 842 548 706	
Screw S12x30	10	⚡	100	3 842 530 236	

Material: Cubic connector: Die-cast aluminum
designLINE cubic connector: painted (RAL 9006)
 Fastening material: steel; galvanized

Scope of delivery: set incl. fastening material (FS), caps

Cubic connector creates conductive connection, but the cover caps included in the set are not ESD-compatible.



Type	
40/3	70 Nm

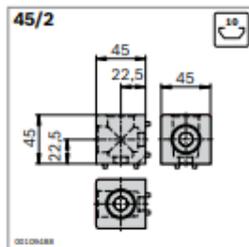


Cubic connector 40/3	Slot	ESD	No.	FS	
Set (standard), signal gray	10	⚡	1	3 842 549 868	3xFS3
Set <i>designLINE</i> , signal gray	10	⚡	1	3 842 549 869	3xFS3
Cubic connector	10	⚡	20	3 842 529 011	
Cover cap signal gray (PP)			100	3 842 548 702	
D24 black (PP)		⚡	100	3 842 548 706	
Screw S12x30	10	⚡	100	3 842 530 236	

Material: Cubic connector: Die-cast aluminum
designLINE cubic connector: painted (RAL 9006)
 Fastening material: steel; galvanized

Scope of delivery: set incl. fastening material (FS), caps

Cubic connector creates conductive connection, but the cover caps included in the set are not ESD-compatible.



Type	
45/2	45x45L 150 Nm
	45x45 200 Nm



Cubic connector 45/2	Slot	ESD	No.	FS	
Set (standard), signal gray	10	⚡	1	3 842 549 870	2xFS3
Set <i>designLINE</i> , signal gray	10	⚡	1	3 842 549 871	2xFS3
Cubic connector	10	⚡	20	3 842 523 877	
Cover cap signal gray (PP)			100	3 842 548 702	
D24 black (PP)		⚡	100	3 842 548 706	
Screw S12x30	10	⚡	100	3 842 530 236	

Material: Cubic connector: Die-cast aluminum
designLINE cubic connector: painted (RAL 9006)
 Fastening material: steel; galvanized

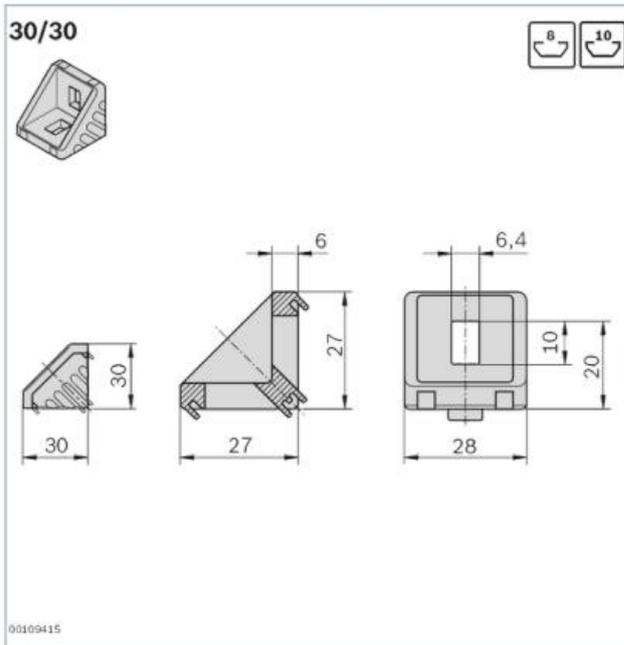
Scope of delivery: set incl. fastening material (FS), caps

Cubic connector creates conductive connection, but the cover caps included in the set are not ESD-compatible.

Anexo 4 – Catálogo de conectores “Gusset” da BOSCH [16]

Dimensions

Bracket 30/30 with cover cap

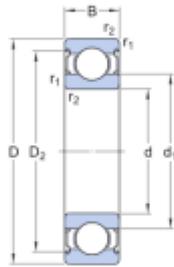


FS2	FS3	FS4
<p>DIN 7984 M6x14</p>	<p>8 → 10</p>	<p>DIN 7984 M6x18</p>

Anexo 5 – Catálogo de rolamentos da SKF [17]

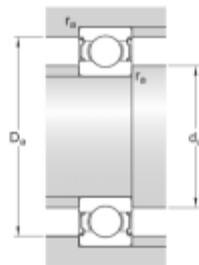


Especificações técnicas



Dimensões

d	8 mm	Diâmetro do furo
D	22 mm	Diâmetro externo
B	7 mm	Largura
d ₁	≈ 12.15 mm	Diâmetro do ressalto
D ₂	≈ 19.2 mm	Diâmetro do rebaixo
r _{1,2}	min. 0.3 mm	Dimensão de chanfro



Dimensões do encosto

d _a min.	10 mm	Diâmetro do encosto do eixo
d _a max.	12 mm	Diâmetro do encosto do eixo
D _i max.	20 mm	Diâmetro do encosto do mancal
r _a max.	0.3 mm	Raio de concordância do eixo ou filetemançal

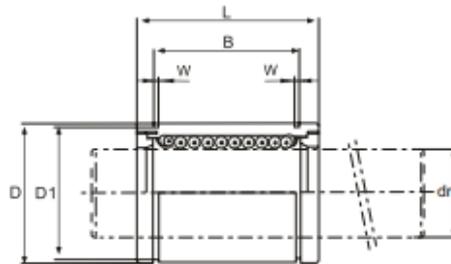
Dados de cálculo

Classificação de carga dinâmica básica	C	3.45 kN
Classificação de carga estática básica	C ₀	1.37 kN
Limite de carga de fadiga	P _u	0.057 kN
Velocidade de referência		75 000 r/min
Velocidade-limite		38 000 r/min
Fator de carga mínima	k _r	0.025
Fator de cálculo	f ₀	12

Anexo 6 – Catálogo de rolamentos lineares da AVA [18]



Modelo **LM**



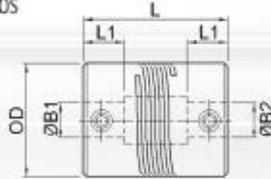
Nominal shaft diameter (mm)	Part No.						dr (mm)	Tolerance (µm)	D (mm)	Tolerance (µm)
	Seal Type	Ball Circuit	Open Type	Ball Circuit	Adjustable Type	Ball Circuit				
3	LM3	4	-	-	-	-	3	0 -8	7	0 -9
4	LM4	4	-	-	-	-	4		8	
5	LM5UU	4	-	-	-	-	5		10	
6	LM6UU	4	-	-	LM6UUAJ	4	6	0 -9	12	0 -11
8	LM85UU	4	-	-	LM85UUAJ	4	8		15	
8	LM8UU	4	-	-	LM8UUAJ	4	8		15	
10	LM10UU	4	-	-	LM10UUAJ	4	10	0 -9	19	0 -13
12	LM12UU	4	LM12UU-OP	3	LM12UUAJ	4	12		21	
13	LM13UU	4	LM13UU-OP	3	LM13UUAJ	4	13		23	
16	LM16UU	5	LM16UU-OP	4	LM16UUAJ	5	16	0 -10	28	0 -16
20	LM20UU	5	LM20UU-OP	4	LM20UUAJ	5	20		32	
25	LM25UU	6	LM25UU-OP	5	LM25UUAJ	6	25		40	
30	LM30UU	6	LM30UU-OP	5	LM30UUAJ	6	30	0 -12	45	0 -19
35	LM35UU	6	LM35UU-OP	5	LM35UUAJ	6	35		52	
40	LM40UU	6	LM40UU-OP	5	LM40UUAJ	6	40		60	
50	LM50UU	6	LM50UU-OP	5	LM50UUAJ	6	50	0 -15	80	0 -22
60	LM60UU	6	LM60UU-OP	5	LM60UUAJ	6	60		90	
80	LM80UU	6	LM80UU-OP	5	LM80UUAJ	6	80		120	
100	LM100UU	6	LM100UU-OP	5	LM100UUAJ	6	100	0 -20	150	0 -25
120	LM120UU	8	LM120UU-OP	6	LM120UUAJ	8	120		180	
150	LM150UU	8	LM150UU-OP	6	LM150UUAJ	8	150		210	

Anexo 7 – Catálogo de Couplers da Huco [19]

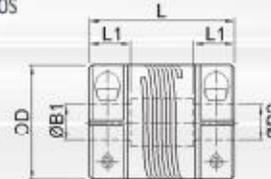
S-Beam Single Helix Beam Couplings - Aluminium



Set Screw Hubs



Clamp Hubs



DIMENSIONS & ORDER CODES

Size	Set Screw Style	Clamp Style	Dimensions						Fasteners				
	Order Code		OD.	O/A Length L	Bore Depth L1	Min B1	Min B2	Max B1 & B2	Mass kg x 10 ⁻³	Set Screw	Cap Screw	Torque (Nm)	A/F (mm)
16	B26.16	-	15.9	20	6.0	3	4	6.35	8.8	M4	-	2.27	2.0
	-	B27.16		22	6.5					9.8	-	M2.5	1.32
19	B26.19	-	19.1	20	6.0	4	4.76	8	13.1	M4	-	2.27	2.0
	-	B27.19		28	8.0					17.3	-	M2.5	1.32
25	B26.25	-	25.4	24	7.5	5	6	10	28	M5	-	4.62	2.5
	-	B27.25		30	10.0					33	-	M3	2.43
32	B26.32	-	31.8	30	10.0	6	8	16	55	M6	-	7.61	3.0
	-	B27.32		38	12.0					67	-	M4	5.66
38	B26.38	-	38.1	50	16.0	8	12	19	127	M6	-	7.61	3.0
	-	B27.38		50	16.0					130	-	M5	11.40
50	B26.50	-	50.8	54	18.0	10	16	26	241	M8	-	18.36	4.0
	-	B27.50		54	18.0					237	-	M6	19.34

35

PERFORMANCE

Size	Peak Torque (Nm)	Max misalignment compensation			Nominal stiffness at std. bore size	
		Angular deg	Radial mm	Axial mm	Bore	Torsional (Nm/rad)
16	0.6	5	0.25	0.25	5	6
19	1.1	5	0.25	0.25	6	12
25	2.2	5	0.25	0.25	10	17
32	4.1	5	0.25	0.25	12	32
38	10	5	0.25	0.25	16	70
50	15	5	0.25	0.25	20	119

Materials & Finishes

Couplings: Aluminium L 168 or better

Fasteners: Alloy steel, black oiled

Temperature Range

-40°C to +120°C

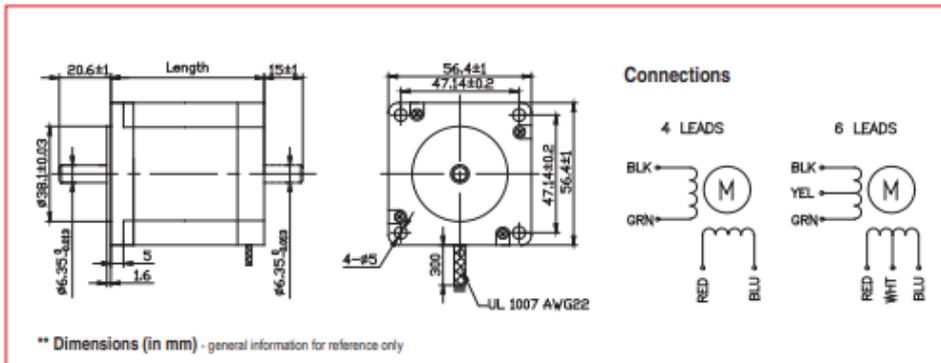
AVAILABLE BORES

Size	+0.03/-0mm																						
	3	3.175	4	4.763	5	6	6.350	7.938	8	9	9.525	10	12	12.700	14	15	15.875	16	19.050	20	24	25	
16	○	○	●	●	●	●	●																
19			○	●	●	●	●		●														
25				○	●	●	●	●	●	●	●	●											
32					○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●					
38											●	●	●	●	●	●	●	●	●				
50														●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bore Ref	14	16	18	19	20	22	24	27	28	30	31	32	35	36	38	40	41	42	47	48	52	53	

Anexo 8 – Especificações do motor de passo [20]

M57STH series - High Torque 57mm / NEMA Size 23, 1.8 degree

Hybrid Stepper Motors



General Specifications

Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)	Insulation Resistance	100MΩ min., 500VDC
Resistance Accuracy	±10%	Dielectric Strength	500VAC for one minute
Inductance Accuracy	±20%	Shaft Radial Play	0.02mm max. (450g load)
Temperature Rise	80°C max. (rated current, 2 phases on)	Shaft Axial Play	0.08mm max. (450g load)
Ambient Temperature	-20°C to +50°C	Max. Radial Force	75N (20mm from the flange)
Rotation	CW (seen from front flange)	Max. Axial Force	15N

Model Specifications

Model Part Number		Voltage V	Current/phase A	Resistance/phase Ω	Inductance/phase mH	Holding Torque mNm	Rotor Inertia gcm ²	Detent Torque gcm	No. of Leads	Length mm	Weight g
Single shaft	Double shaft										
M57STH41-1006S	M57STH41-1006D	5.7	1	5.7	5.4	382	120	210	6	41	450
M57STH41-2006S	M57STH41-2006D	2.8	2	1.4	1.4	382	120	210	6	41	450
M57STH41-3006S	M57STH41-3006D	1.9	3	0.63	0.6	382	120	210	6	41	450
M57STH41-2804S	M57STH41-2804D	1.96	2.8	0.7	1.4	539	120	210	4	41	450
M57STH51-1006S	M57STH51-1006D	6.6	1	6.6	8.2	706	275	360	6	51	650
M57STH51-2006S	M57STH51-2006D	3.3	2	1.65	2.2	706	275	360	6	51	650
M57STH51-3006S	M57STH51-3006D	2.2	3	0.74	0.9	706	275	360	6	51	650
M57STH51-2804S	M57STH51-2804D	2.3	2.8	0.83	2.2	990	275	360	4	51	650
M57STH56-1006S	M57STH56-1006D	7.4	1	7.4	10	883	300	400	6	56	700
M57STH56-2006S	M57STH56-2006D	3.6	2	1.8	2.5	883	300	400	6	56	700
M57STH56-3006S	M57STH56-3006D	2.3	3	0.75	1.1	883	300	400	6	56	700
M57STH56-2804S	M57STH56-2804D	2.5	2.8	0.9	2.5	1236	300	400	4	56	700
M57STH76-1006S	M57STH76-1006D	8.6	1	8.6	14	1324	480	680	6	76	1200
M57STH76-2006S	M57STH76-2006D	4.5	2	2.25	3.6	1324	480	680	6	76	1200
M57STH76-3006S	M57STH76-3006D	3	3	1	1.6	1324	480	680	6	76	1200
M57STH76-2804S	M57STH76-2804D	3.2	2.8	1.13	3.6	1853	480	680	4	76	1200

Please contact us for any specific model datasheet or drawing.

Anexo 9 – Especificações do spindle [21]

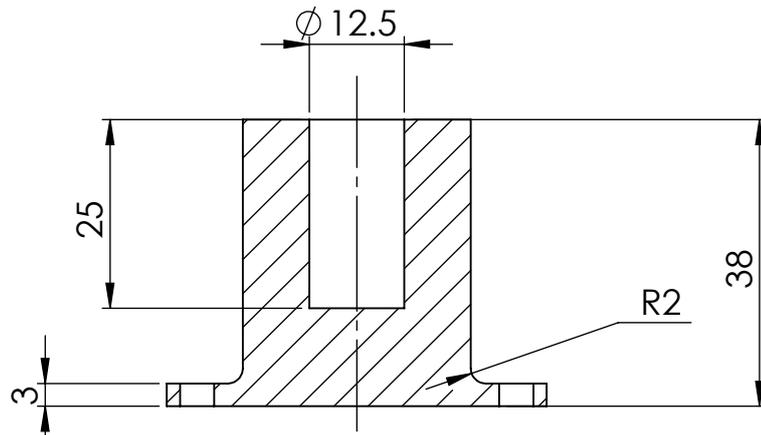
	Brushed Spindle DC Motor	Working Voltage	48V DC
Rotation Speed	12000 r/min	Power	400W
Torque	230 m N.m	Insulation Resistance	>2Megohm
Dielectric Strength	400V	Diameter	2.05"/52 mm
Motor Length	6.89"/175 mm		ER11 Collet Chuck
Diameter of Axis Collet Chuck	0.63"/16 mm	Axis Collet Length	1.89"/48 mm
Repeat accuracy	0.0007-0.0019"/0.02-0.05 mm		PWN Speed Controller
Operating Voltage	DC 12V-48V		Power Supply
Input	AC 115/230V±10%, 50/60Hz	Output	DC48V, 8.3A
Adapter Power	400W		

Projectou		2022-09-19
Desenhou		2022-09-19
Verificou		2022-09-19

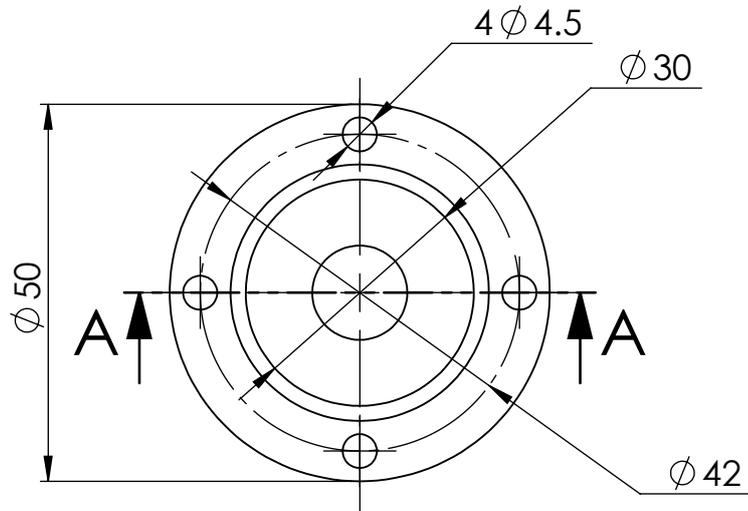
FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855

MIEMc



SECTION A-A



1:1

Câmara de extrusão

A1

Substitui:

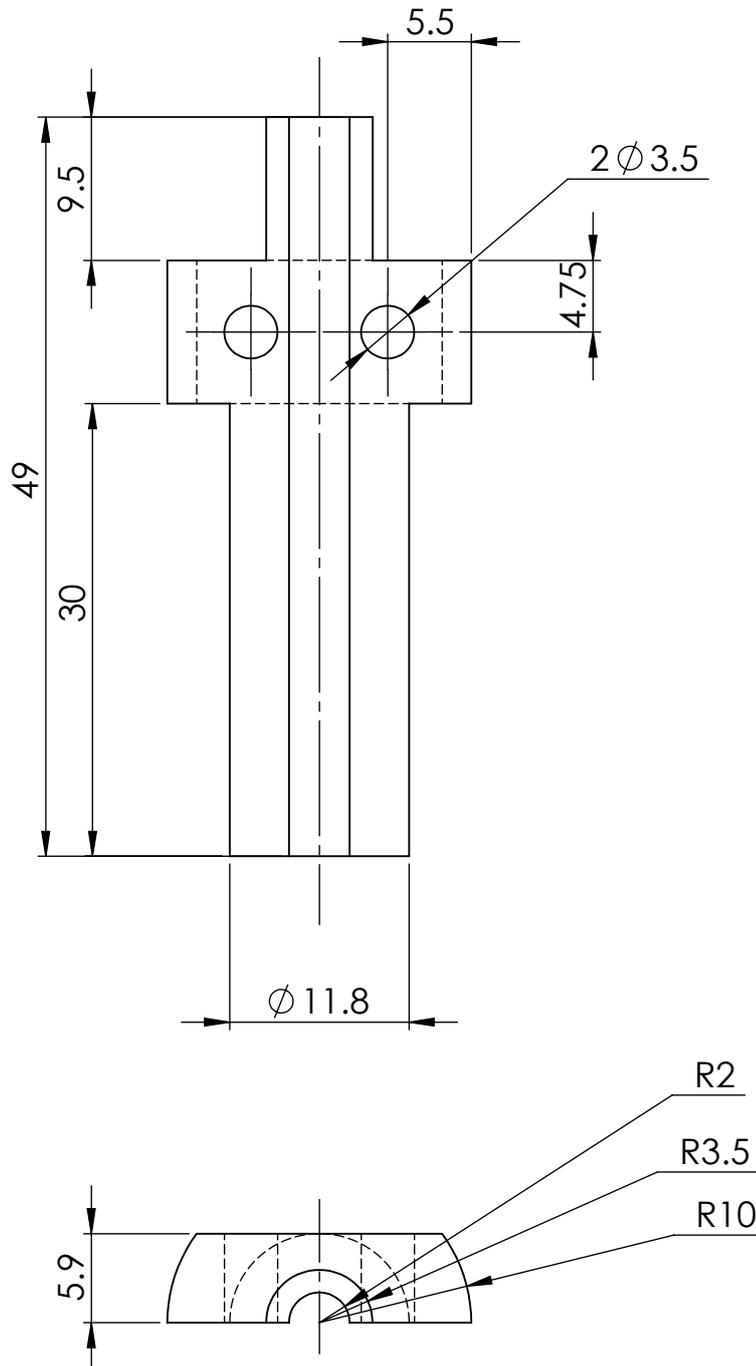
Substituído:

Projectou		2022-09-19
Desenhou		2022-09-19
Verificou		2022-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em
Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855

MIEMc



2:1

Ferramenta
extrusora

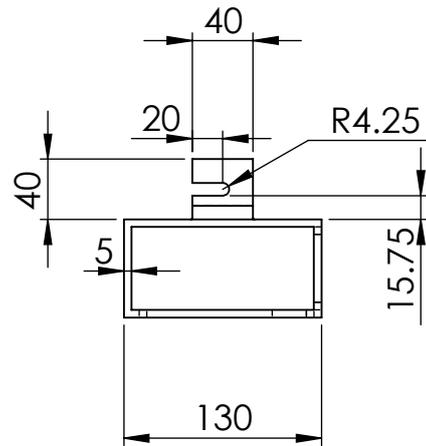
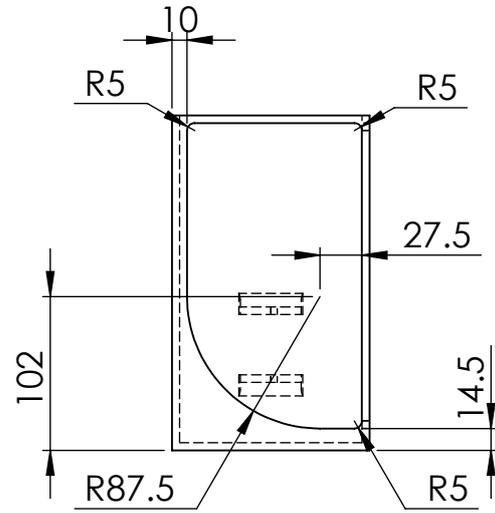
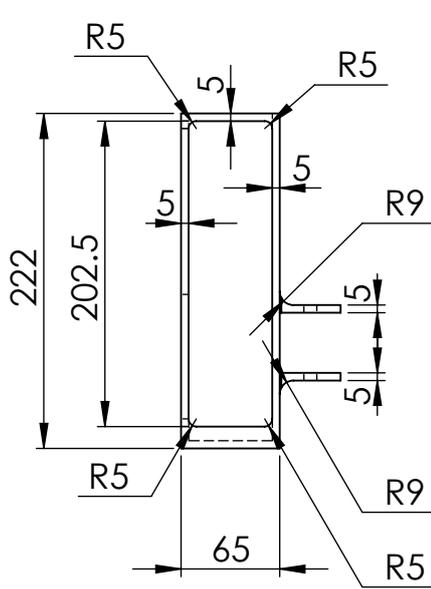
A2

Substitui:
Substituído:

Projectou	2022-09-19
Desenhou	2022-09-19
Verificou	2022-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855
MIEMc



1:5

Caixa para fonte de alimentação

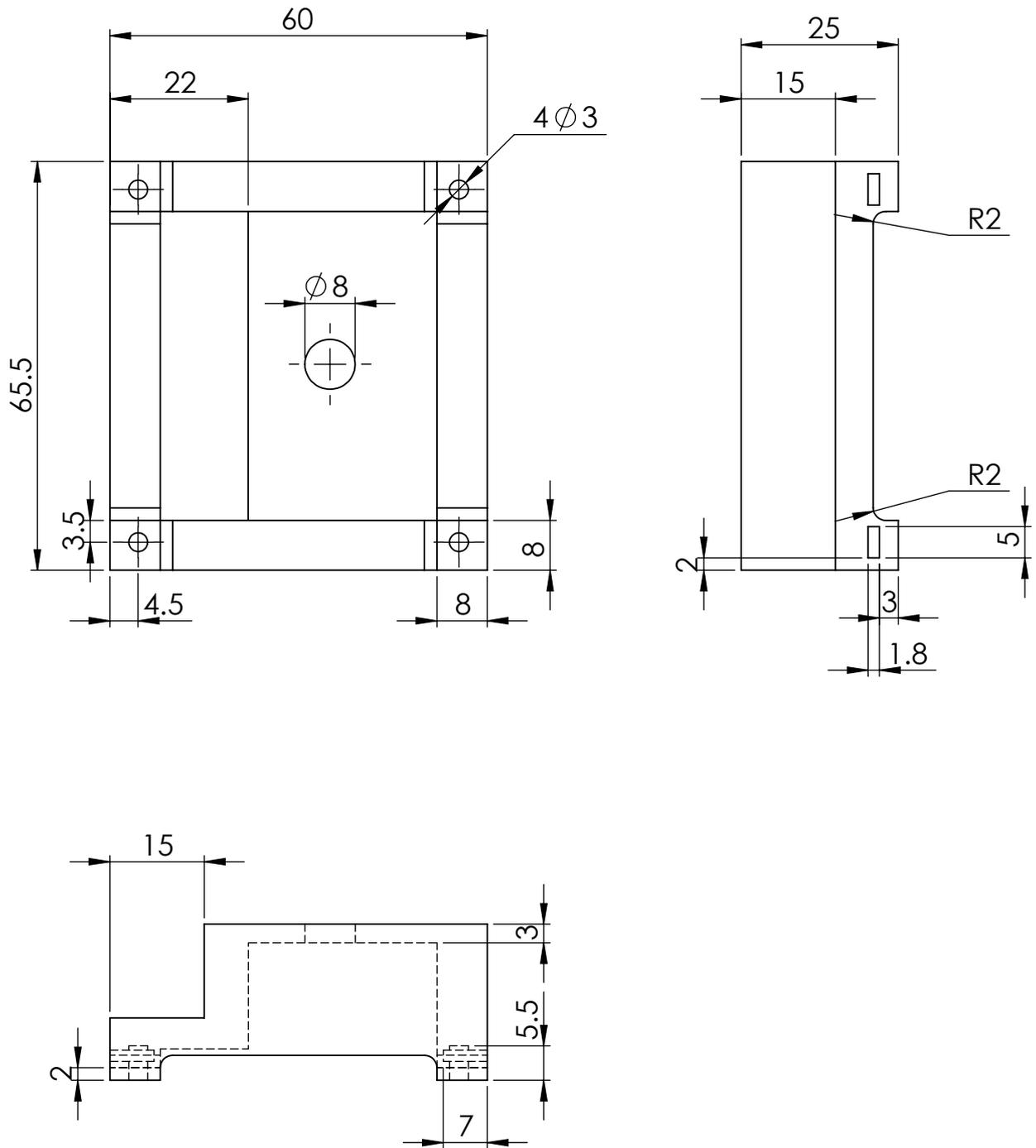
A3

Substitui:
Substituído:

Projectou	2022-09-19
Desenhou	2022-09-19
Verificou	2022-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em
Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855
MIEMc



1:1

Suporte para regulador de
velocidade

A4

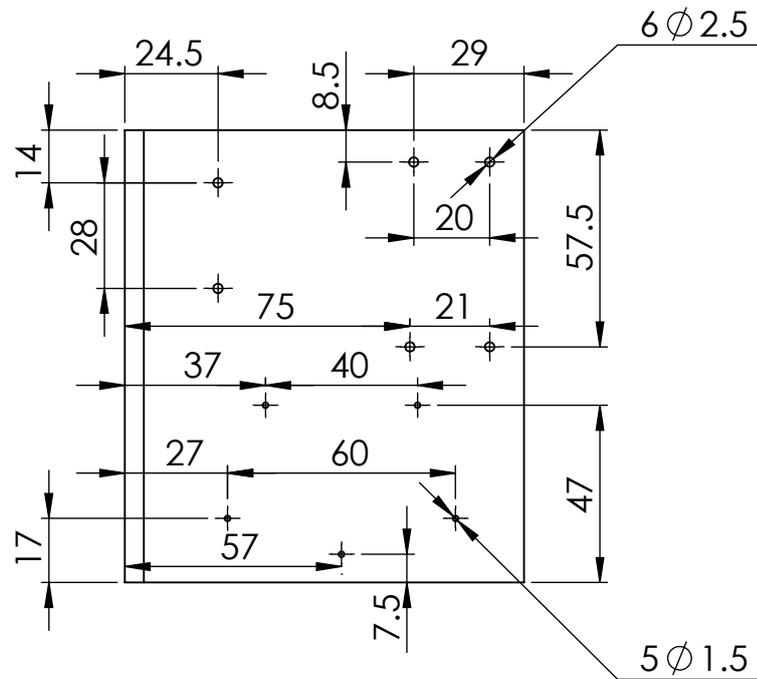
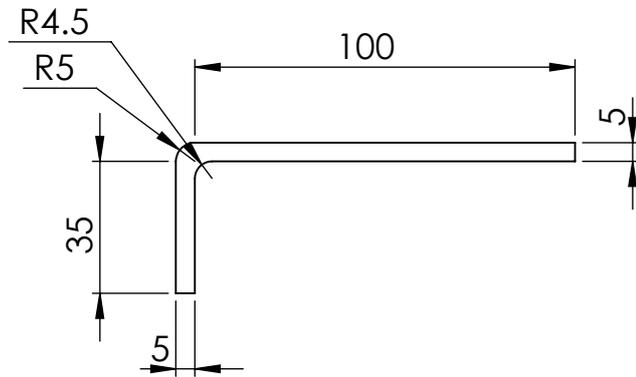
Substitui:
Substituído:

Projectou		2022-09-19
Desenhou		2022-09-19
Verificou		2022-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855

MIEMc



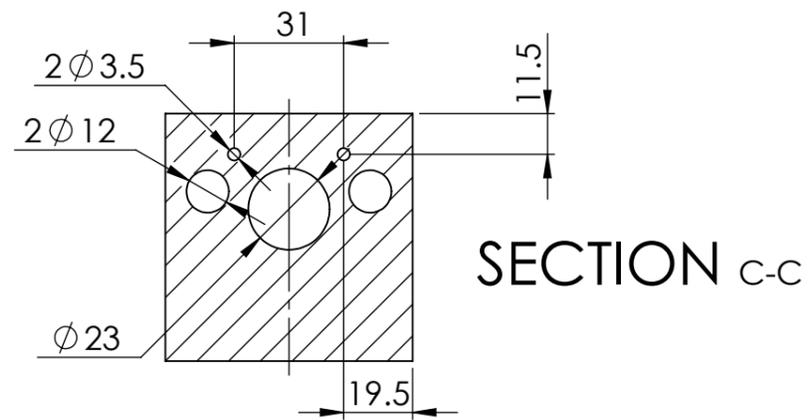
1:2

Suporte de placas

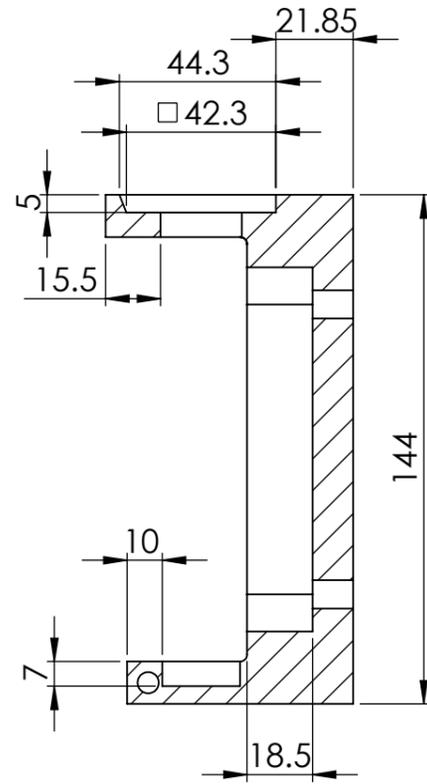
A5

Substitui:

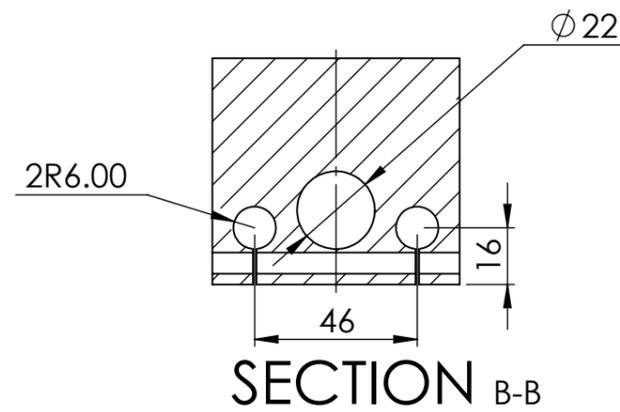
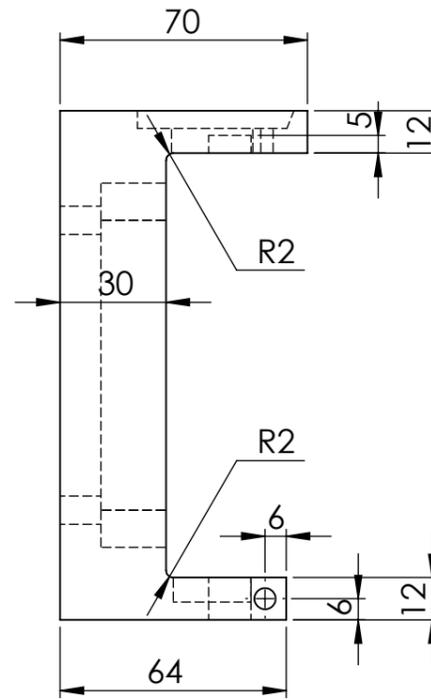
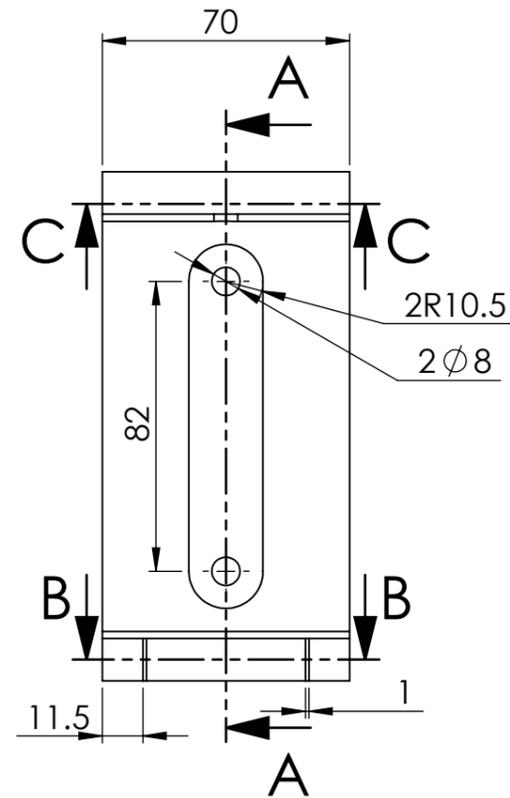
Substituido:



SECTION C-C



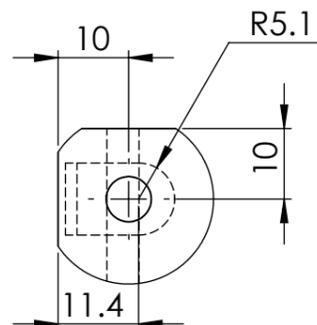
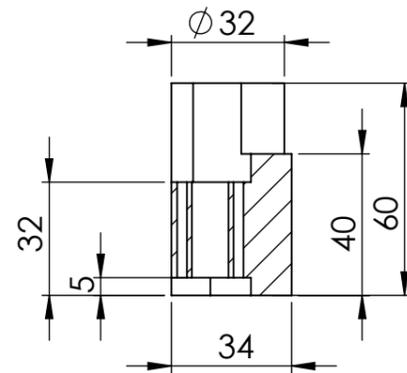
SECTION A-A



SECTION B-B

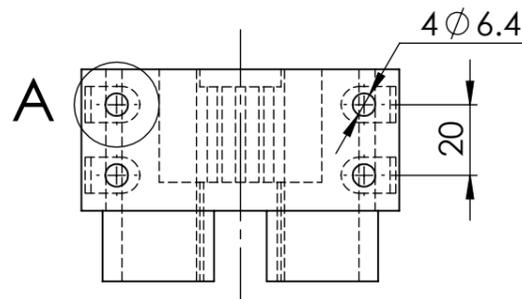
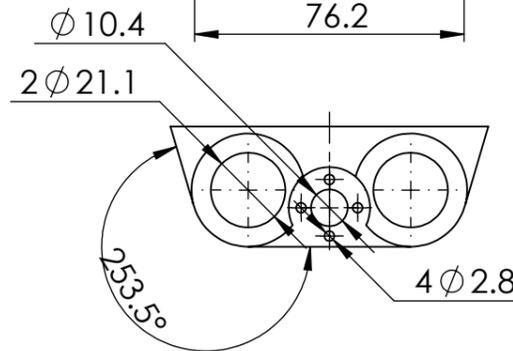
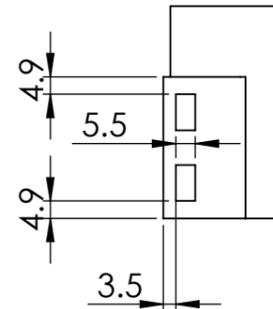
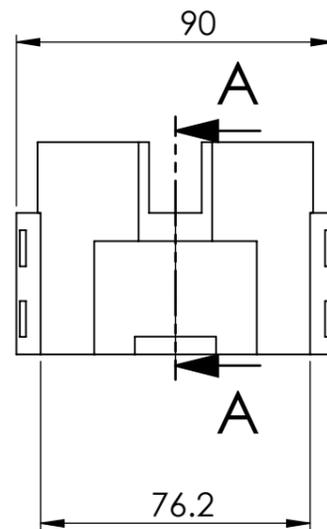
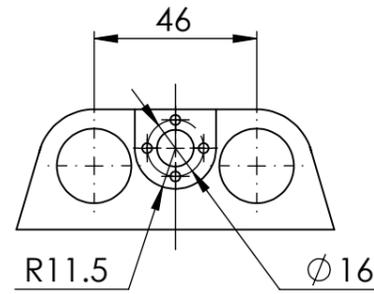
Projectou	2022-09-19	FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22 Máquina de extrusão friccional	João Inácio 51855 MIEMc
Desenhou	2022-09-19		
Verificou	2022-09-19		
Escala	1:2	Caixa do fuso	
Toleran.			
			A6

SECTION A-A



DETAIL A

SCALE 1 : 1



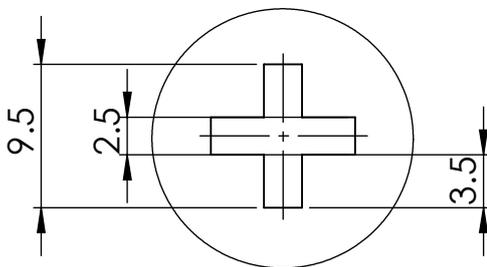
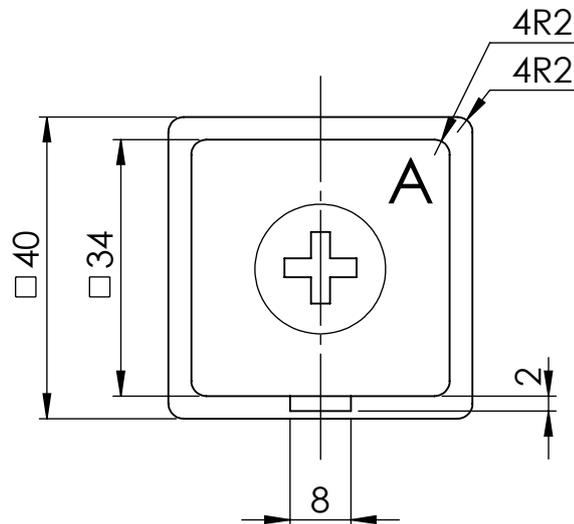
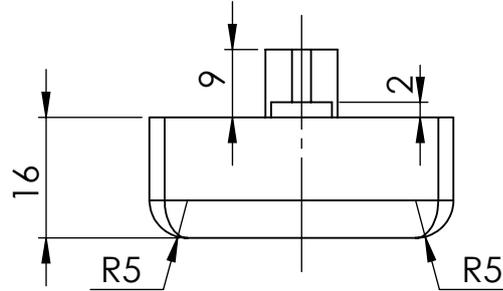
Projectou	2022-09-19	FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22 Máquina de extrusão friccional	João Inácio 51855 MIEMc
Desenhou	2022-09-19		
Verificou	2022-09-19		
Escala	1:2	Conector spindle-fuso	
Toleran.			
			A7

Projectou		2022-09-19
Desenhou		2022-09-19
Verificou		2022-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855

MIEMc



DETAIL A

SCALE 2 : 1

1:1

Peça de elevação

A8

Substitui:

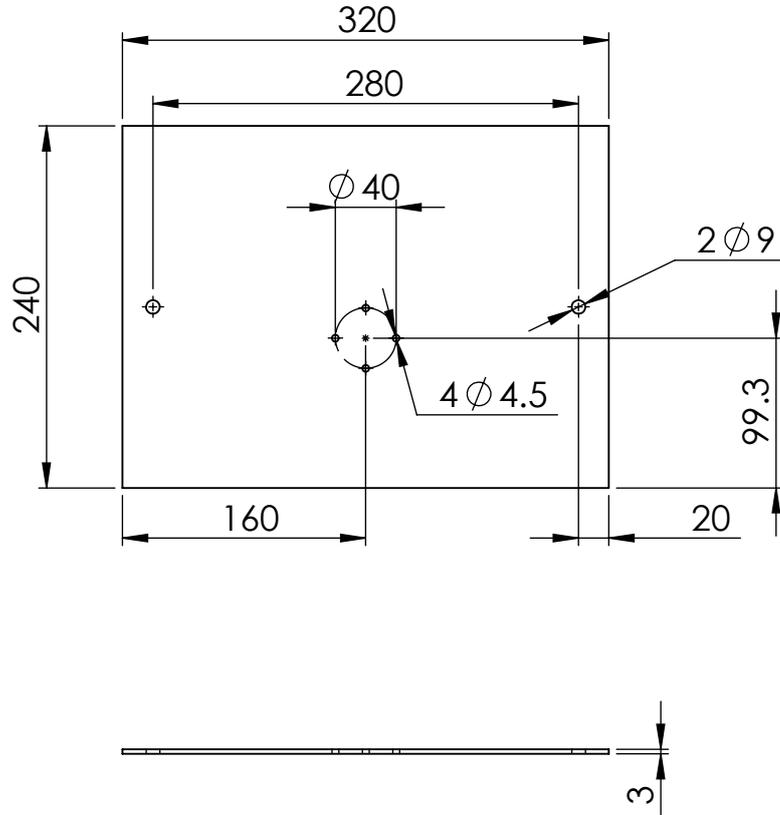
Substituído:

Projectou	2022-09-19
Desenhou	2020-09-19
Verificou	2020-09-19

FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22
Máquina de extrusão friccional

João Inácio 51855

MIEMc



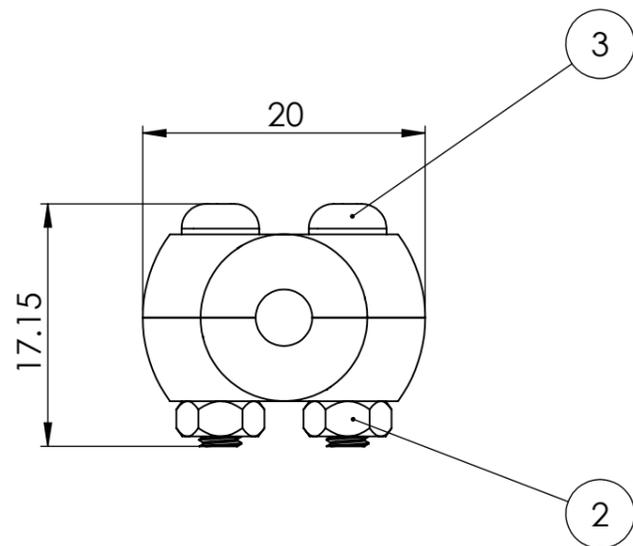
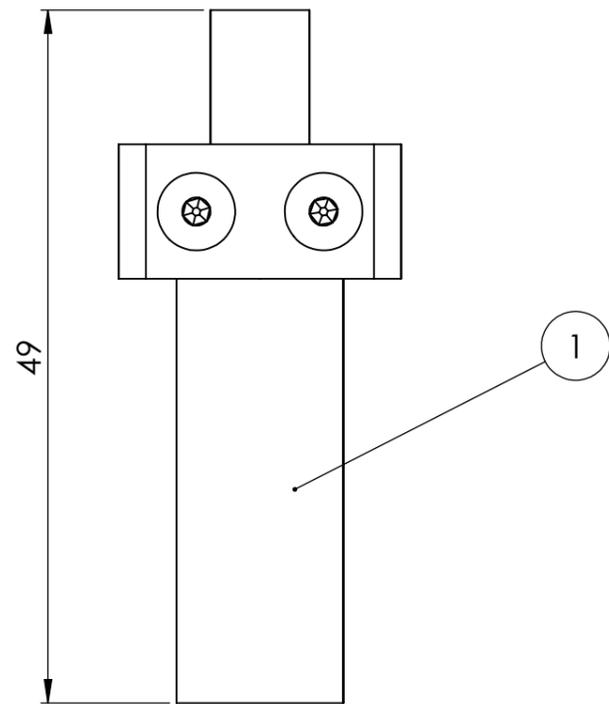
1:5

Mesa de suporte

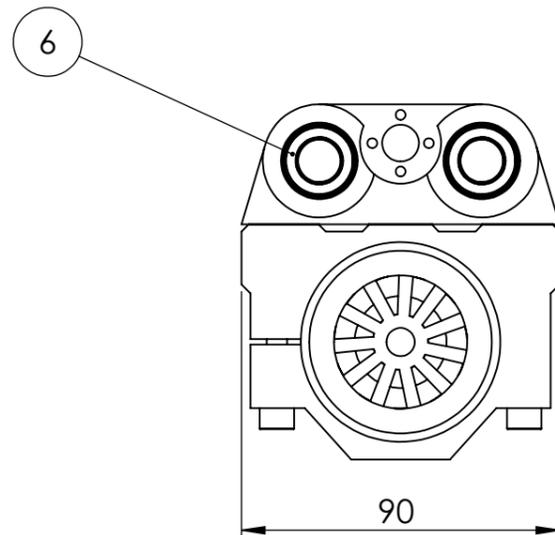
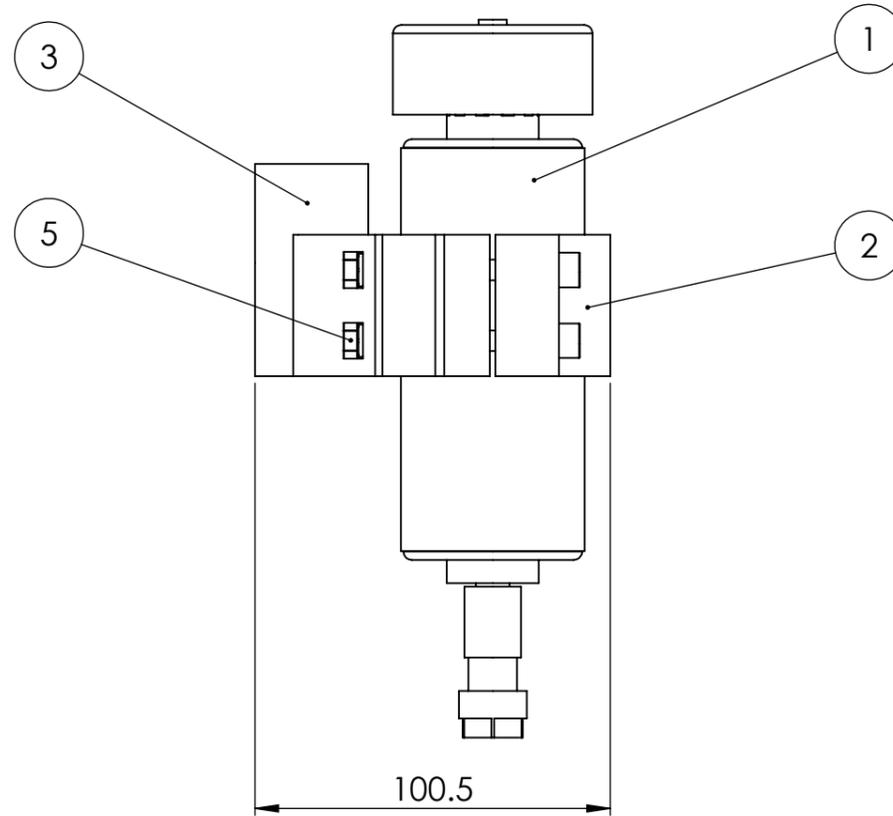
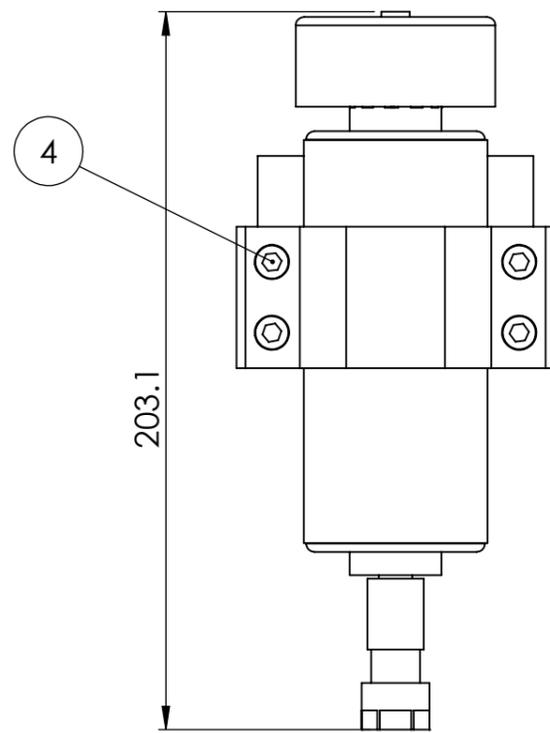
A9

Substitui:

Substituído:



2	Parafuso M3 x 12.5	DIN 7984	Aço	3			
2	Porca M3	DIN 7984	Aço	2			
2	Ferramenta extrusora	A2	Aço CK45	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES
		Projectou	2022-09-19	FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22 Máquina de extrusão friccional		João Inácio 51855 MIEMc	
		Desenhou	2022-09-19				
		Verificou	2022-09-19				
		Escalas	Conjunto ferramenta extrusora			B1	
		2:1					
		Toleran.					



2	Rolamento linear	LM12UU		6			AVA
4	Porca M6		Aço	5			VEVOR
4	Parafuso M6 x 60		Aço	4			VEVOR
1	Conector Spindle-fuso	A7	Alumínio	3			
1	Suporte de Spindle		Alumínio	2			VEVOR
1	Spindle			1			VEVOR
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES

Projectou	2022-09-19	FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22 Máquina de extrusão friccional
Desenhou	2022-09-19	
Verificou	2022-09-19	

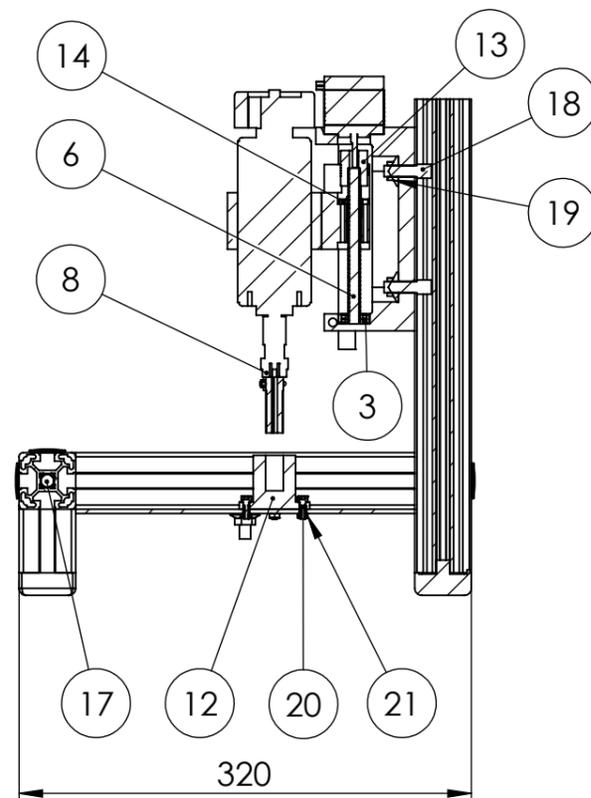
**João Inácio 51855
MIEMc**

Escalas
1:2

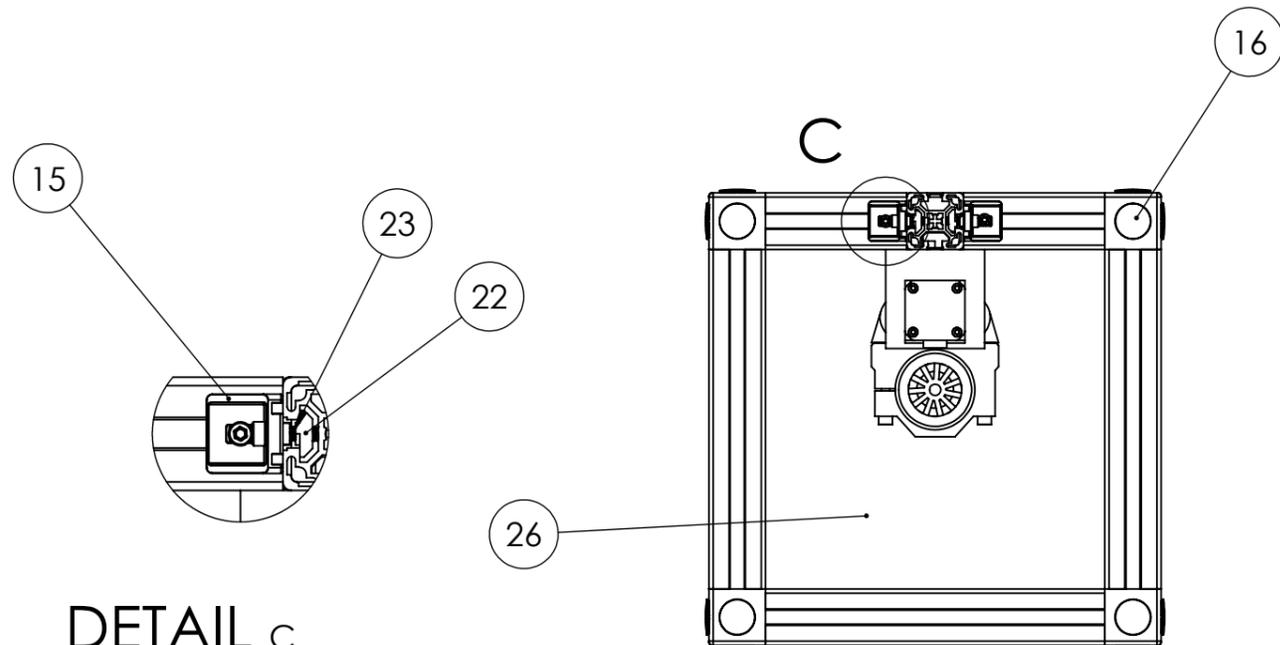
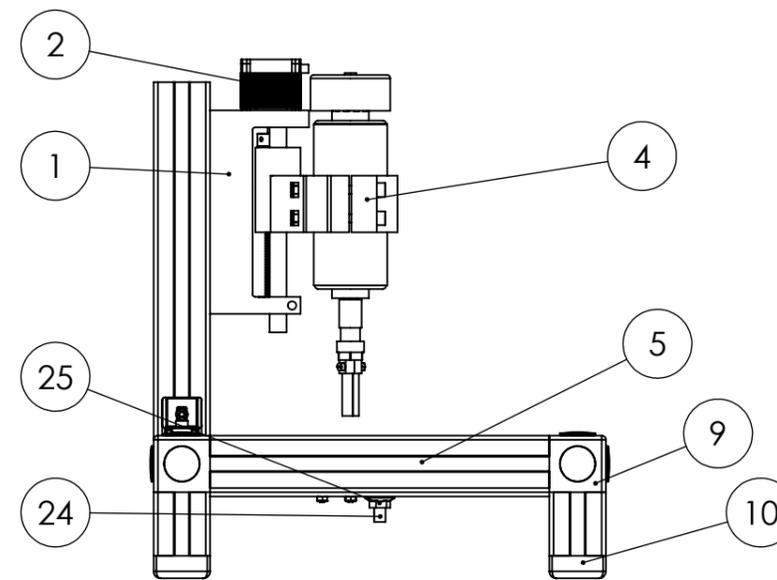
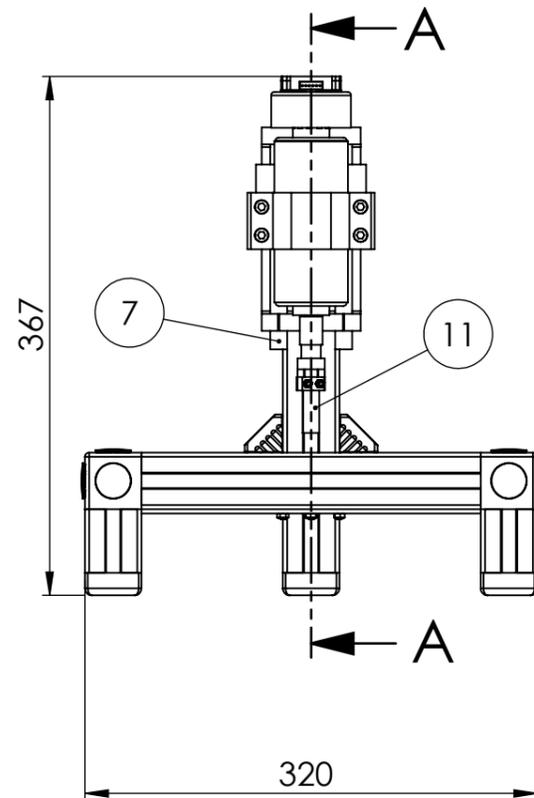
B2

Toleran.

Conjunto Spindle



SECTION A-A



DETAIL C
SCALE 2 : 5

1	Mesa de suporte	A9	Alumínio	26			
2	Porca M8		Aço	25		BOSCH	
2	Parafuso de calha em T M8 x 25		Aço	24		BOSCH	
4	Parafuso M6 x 14	DIN 7984	Aço	23			
4	Porca de calha em T M6		Aço	22		BOSCH	
4	Porca M4	DIN 7984	Aço	21			
4	Parafuso M4 x 12	DIN 7984	Aço	20			
2	Porca M8		Aço	19		BOSCH	
2	Parafuso de calha em T M8 x 25		Aço	18		BOSCH	
12	Parafuso S12 x 30		Aço	17		BOSCH	
8	Tampa conector		Plástico	16		BOSCH	
2	Conector Gusset		Alumínio	15		BOSCH	
1	Porca flangeada		Aço	14			
1	Coupler			13		HUCO	
1	Câmara de extrusão	A1	Aço CK45	12			
1	Conjunto ferramenta de extrusão	B1	Vários	11			
4	Peça de elevação	A8	PLA	10			
4	Conector de canto		Alumínio	9		BOSCH	
1	Pinça ER			8		VEVOR	
2	Guia linear		Alumínio	7			
1	Fuso		Aço INOX	6			
10	Perfil 40 x 40		Alumínio	5		BOSCH	
1	Conjunto Spindle	B2	Vários	4			
1	Rolamento rígido de esferas	608ZZ		3		SKF	
1	Motor de passo			2		Motion Control Products	
1	Caixa do fuso	A6	PLA	1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO	PESO	OBSERVAÇÕES

Projectou	2022-09-19	FCT/UNL - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - 2021/22 Máquina de extrusão friccional	João Inácio 51855 MIEMc
Desenhou	2022-09-19		
Verificou	2022-09-19		
Escala	1:5	Máquina de extrusão friccional	B0
Toleran.			



2022

João Inácio

CONCEÇÃO E REALIZAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO DESTINADO À EXTRUSÃO
FRICCIONAL DE MATERIAIS COMPOSITOS

NVA

NOVA ESCOLA DE
ENGENHARIA