

GONÇALO DUARTE SILVA GONÇALVES ROCHA

CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE FABRICO ADITIVO DE POLÍMEROS COM DEPOSIÇÃO POR REVOLUÇÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
março, 2023

CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE FABRICO ADITIVO DE POLÍMEROS COM DEPOSIÇÃO POR REVOLUÇÃO

GONÇALO DUARTE SILVA GONÇALVES ROCHA

Dissertação para obtenção do grau mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Valdemar Rebelo Duarte,
Professor Auxiliar Convidado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: António Mourão,
Professor Associado, FCT-NOVA

Membros: António Gabriel dos Santos,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA
Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA
Valdemar Rebelo Duarte,
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Universidade NOVA de Lisboa

março, 2023

Construção de um Equipamento de Fabrico Aditivo de Polímeros com Deposição por Revolução

Copyright © Gonçalo Duarte Silva Gonçalves Rocha, 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

Analogamente à finalização da leitura de um bom livro, o término deste capítulo na minha vida pessoal e profissional é marcado por um fenómeno agridoce, pois a sua concretização enverga, felizmente, uma tristeza nostálgica.

Em primeiro lugar quero agradecer ao professor Bruno Soares, por todo o apoio e acompanhamento, providos de imensos anos de experiência e trabalho, e ao professor Valdemar Duarte por ter demonstrado que um bom engenheiro se revela até dentro do relvado.

Ao professor Rui Martins, a quem deixo uma nota reverente de agradecimento pelo seu carácter e solicitude inigualáveis como docente e coordenador.

Aos meus colegas Pedro Ferreira e Pedro Fonseca por disponibilizarem sempre as suas ideias e conselhos com muita paciência, obrigado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa, agradeço o apoio prestado durante toda a minha educação académica e o contributo financeiro prestado para a concretização deste projeto.

Certamente à minha família, a quem devo os meus valores e educação, serão para sempre o sal da minha terra.

Ao André Loureiro, João Mourão, João Ribeiro e Tomás Marinho por navegarem pelas mesmas correntes que eu, sem esquecer a importância da camaradagem em todos estes anos de estudo e trabalho, obrigado.

Em último lugar, agradeço ao António Jordão pela companhia nestes últimos anos, onde as noites se estenderam mais que a infinidade dos dias.

RESUMO

O Fabrico Aditivo, nomeadamente o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), é uma tecnologia de fabrico cada vez mais presente na indústria atual, que segue um procedimento inverso aos modelos subtrativos convencionais. O progresso tecnológico motivou um desenvolvimento considerável desta aplicação, permitindo a construção de geometrias livres e peças cada vez mais complexas.

No entanto, a sua distinção é também a sua limitação, pois à construção de camada a camada, está associada uma ampliação anisotrópica relativamente às propriedades mecânicas desenvolvidas.

Neste contexto, foi construído um equipamento que, contrariamente às impressoras 3D convencionais, sugere um método de deposição de camadas segundo um movimento rotacional. A esta rotação está associado um enrolamento filamentar que permite melhorar as propriedades mecânicas das peças concebidas pelo equipamento descrito, como foi possível concluir através da realização de ensaios universais realizados aos provetes de estudo analisados.

Palavas chave: Fabrico aditivo, Impressão 3D, FDM, anisotropia, deposição de camadas, rotação, enrolamento filamentar.

ABSTRACT

Fused deposition modeling (FDM) is an additive manufacturing technology increasingly present in today's industry, which follows an inverse procedure to conventional subtractive models. Technological progress has allowed a substantial development of this application, granting a limitless design by increasing parts complexity.

However, its distinction is also its limitation, as the successive construction of layer by layer is associated with an anisotropic expansion in relation to the mechanical properties developed.

In this context, an equipment was built that, contrary to conventional 3D printers, suggests a layer deposition method according to a rotational movement. This rotation is associated with a filament winding that improves the mechanical properties of the parts designed by the equipment described, as it was possible to conclude by carrying out universal tests carried out on the analyzed study specimens.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D printing, FDM, Anisotropy, layer deposition, Rotary, filament winding.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do Documento.....	2
2	REVISÃO DA FDM	3
2.1	Fabrico Aditivo	3
2.2	Materiais	3
2.3	Impressora 3D	4
2.3.1	Configuração Cartesiana	5
2.3.2	Configurações Alternativas	7
2.4	Limitações	8
2.4.1	Erros no Processo.....	8
2.4.2	Estruturas Auxiliares.....	9
2.4.3	Anisotropia	10
3	METODOLOGIA.....	13
3.1	Engenharia Inversa.....	13
3.2	Projeto Direcionado à Manufatura	15
3.3	Projeto Direcionado à Montagem.....	16
3.4	Projeto direcionado ao Fabrico Aditivo.....	18
4	PROJETO MECÂNICO	21
4.1	Decomposição do Conjunto Primitivo	21
4.2	Especificações.....	22
4.2.1	Extrusão	22
4.2.2	Resolução de Movimento.....	24

4.2.3	Dimensionamento do Provete de Estudo.....	26
4.3	Alterações de Projeto	28
4.3.1	Conjunto Rotativo.....	28
4.3.2	Conjunto Linear Horizontal	33
4.3.3	Conjunto de Extrusão	37
4.3.4	Conjunto Linear Vertical	40
4.3.5	Estrutura	44
5	ELETRÓNICA E PROGRAMAÇÃO	46
5.1	Software.....	46
5.2	Hardware	47
5.3	Firmware.....	49
5.3.1	Configuração	49
5.3.2	Calibração	52
5.4	Programação.....	54
5.4.1	Malha de Suporte	55
5.4.2	Malha Cilíndrica	56
5.4.3	Malha Radial	59
6	DESPESAS.....	61
7	ANÁLISE DOS PROVETES DE ESTUDO.....	63
7.1	Preparação.....	63
7.2	Ensaio de Tração Uniaxiais.....	65
8	CONCLUSÕES.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Processo FDM simplificado.....	4
Figura 2.2 Diferentes configurações de impressoras 3D	5
Figura 2.3 Configurações retilíneas: a) cabeça XZ b) cabeça XY [17].....	6
Figura 2.4 Outras configurações cartesianas c) Delta d) SCARA [17]	6
Figura 2.5 Configurações Alternativas: e) <i>Polar 3D</i> [18] f) <i>Theta Printer</i> [19]	7
Figura 2.6 Exemplos de: a) vibração [21] b) <i>over-extrusion</i> [22] c) empenamento [23].....	8
Figura 2.7 Exemplo de aplicações: a) Suportes [25] b) <i>Raft</i> c) <i>Brim</i> d) <i>Skirt</i> [26].....	9
Figura 2.8 Forças de tração em diferentes direções [30].....	10
Figura 2.9 Cruzamento filamentar.....	10
Figura 2.10 Enrolamento e cruzamento de camadas.....	11
Figura 2.11 Protótipos de impressoras 3D com coordenadas cilíndricas [31],[32].....	11
Figura 2.12 Renderização CAD do projeto inicial [33].....	12
Figura 3.1 Metodologia aplicada.....	13
Figura 4.1 Conjunto inicialmente proposto.....	21
Figura 4.2 a) <i>Hotend</i> E3D v6 [45] b) Extrusora E3D Titan [46].....	22
Figura 4.3 Análise estática do conjunto de extrusão [33], [47]	23
Figura 4.4 Configuração a) <i>Direct drive</i> b) <i>Bowden</i>	24
Figura 4.5 Dimensionamento do Provete de Estudo [47], [50]	26
Figura 4.6 Plataforma de extrusão inicialmente proposta	28
Figura 4.7 Vista explodida do Suporte angular inicialmente proposto	29
Figura 4.8 Montagem do Motor de passo ao Suporte angular.....	30
Figura 4.9 Detalhes de montagem do Suporte Angular.....	30
Figura 4.10 Fixação da plataforma cilíndrica ao sistema de transmissão.....	31
Figura 4.11 Acoplamento da plataforma cilíndrica ao suporte contraponto	32
Figura 4.12 Vista geral do conjunto rotativo.....	32
Figura 4.13 Vista geral do subconjunto linear horizontal	33
Figura 4.14 Distância percorrida correspondente ao eixo X.....	34
Figura 4.15 Encosto do suporte de extrusão	34
Figura 4.16 Atualização dos suportes horizontais	35
Figura 4.17 Inversão da posição dos suportes horizontais.....	36

Figura 4.18 Vista explodida do suporte de extrusão inicialmente proposto	37
Figura 4.19 Montagem do suporte de extrusão ao carro	38
Figura 4.20 Distância entre o eixo de montagem do fuso e do carro deslizante	38
Figura 4.21 Passo associado à montagem da porca de conexão	39
Figura 4.22 Vista explodida do acoplamento do <i>hotend</i> ao suporte de extrusão	39
Figura 4.23 Vista geral do conjunto linear vertical	40
Figura 4.24 Montagem da extrusora e motor de passo ao suporte vertical esquerdo	41
Figura 4.25 Atualização do suporte radial inferior.....	42
Figura 4.26 Aparafusamento dos rolamentos em chumaceira	42
Figura 4.27 Funcionamento esperado dos sensores fim de curso	43
Figura 4.28 Visão geral do suporte de bobine inicialmente proposto.....	44
Figura 4.29 Aparafusamento de uma união de canto ao perfil estrutural.....	44
Figura 4.30 Estrutura inicialmente proposta (esquerda) e atualizada (direita)	45
Figura 4.31 Ilustração do auxílio de montagem concedido pelo pé	45
Figura 5.1 Esquema da transcrição associada ao processo FDM.....	46
Figura 5.2 Esquema de ligação da placa de controlo [50].....	48
Figura 5.3 Excerto da configuração através do <i>RepRap Config Tool</i> [51].....	50
Figura 5.4 Ilustração dos limites definidos para cada eixo	50
Figura 5.5 Sistema de transmissão.....	51
Figura 5.6 Montagem correspondente à calibração dos eixos X e Z.....	52
Figura 5.7 Calibração do eixo de rotação.....	53
Figura 5.8 Ilustração representativa das malhas.....	54
Figura 5.9 Ilustração representativa das paredes da estrutura do suporte.....	55
Figura 5.10 Excerto do código referente à malha de suporte.....	56
Figura 5.11 Ilustração representativa do ângulo de enrolamento efetuado	56
Figura 5.12 Excerto do código referente à malha cilíndrica.....	58
Figura 5.13 Localização das curvas de transição do provete.....	59
Figura 5.14 Ilustração do raciocínio para a construção da malha radial	60
Figura 5.15 Excerto do código referente à malha radial.....	60
Figura 6.1 Protótipo físico do equipamento final	62
Figura 7.1 Adaptação dos provetes de teste.....	63
Figura 7.2 Provetes de teste fabricados na Prusa.....	64
Figura 7.3 Varões de alumínio para as extremidades dos provetes.....	64

Figura 7.4 Montagem do Extensómetro.....	65
Figura 7.5 Desvio da média em relação ao valor mais elevado da tensão de rotura.....	66
Figura 7.6 Deposição horizontal - Amostra 2.....	67
Figura 7.7 Deposição Vertical - Amostra 2.....	67
Figura 7.8 Deposição Rotativa segundo um ângulo mínimo de $1,9^{\circ}$ - Amostra 1.....	67
Figura 7.9 Deposição Rotativa segundo um ângulo ótimo de 45° - Amostra 1.....	68
Figura 7.10 Deposição Rotativa através de um ângulo de construção de 60° - Amostra 1.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Redefinição das Especificações	27
Tabela 4.2 Redimensionamento dos elementos longitudinais	35
Tabela 5.1 Componentes eletrônicos	47
Tabela 6.1 Custo total de cada conjunto.....	61
Tabela 7.1 Tratamento de resultados dos Ensaios de Tração Uniaxiais.....	65

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot
STL	Standard Tessellation Language
PET	Polyethylene Terephthalate
PETg	Polyethylene Terephthalate Glycol
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PEEK	Polyether Ether Ketone
POM	Polyoxymethylene
TPU	Thermoplastic Polyurethane
PLA	Polylactic Acid
DFM	Design for Manufacture
DFA	Design for Assembly
DFAM	Design for Additive Manufacture

SÍMBOLOS

R	raio
L_c	comprimento
d	diâmetro
d_{min}	resolução linear
p	passo
P	perímetro
M	momento de torção
A_s	área da secção
E	fator de extrusão
α	ângulo de enrolamento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O mercado, nos dias de hoje, é fortemente marcado pela competitividade industrial e o consumismo populacional. Face a esta realidade, o sucesso das empresas está vinculado aos desafios enfrentados pela produção industrial, marcados pela redução do período de desenvolvimento e dos custos de produção de um produto [1]. Estas necessidades motivaram o surgimento e desenvolvimento do fabrico aditivo, que hoje se estende a um vasto campo de aplicações [2]–[5].

Assim nasce a FDM (*Fused Deposition Modeling*), onde contrariamente aos processos convencionais subtrativos, como a fresagem ou o torneamento, os modelos são concebidos segundo um processo aditivo, cuja geometria desejada é gradualmente contruída camada a camada. Embora as vantagens da tecnologia FDM sejam bem conhecidas, de onde se destacam a imensa compatibilidade de materiais [6] ou a capacidade de fabricar geometrias complexas em pouco tempo [7], as desvantagens não são amplamente abordadas. Analogamente a outros métodos de fabrico aditivo, as peças fabricadas segundo o processo FDM exibem características anisotrópicas, pois a direção de construção tem um efeito visível sobre as suas propriedades mecânicas [6], [8], [9].

Uma vez que a *Nova School of Science and Technology* disponibiliza um espaço dedicado à investigação de fabrico aditivo, esta dissertação foi impulsionada pela motivação de fazer parte do contributo para o progresso nesta área e abrir caminho para o seu desenvolvimento.

1.2 Objetivos

O intento desta dissertação passa por concretizar um projeto iniciado na *Nova School of Science and Technology*, que propõe a construção de um equipamento distinguido pela deposição das camadas poliméricas segundo um movimento rotacional. Neste contexto, foram definidos os seguintes objetivos:

1. Adaptar o fabrico do equipamento para um orçamento justificável.
2. Fabricar, montar e configurar o equipamento cumprindo uma metodologia apropriada.
3. Provar o aumento das propriedades mecânicas das peças fabricadas através do processo de enrolamento e cruzamento filamentar sugerido.

1.3 Estrutura do Documento

Capítulo 2: É introduzido o processo referente à tecnologia FDM e as suas limitações.

Capítulo 3: São estabelecidas as metodologias adotadas para adaptar o projeto do equipamento consoante os objetivos definidos.

Capítulo 4: É realizada uma abordagem detalhada das alterações de projeto realizadas mediante as especificações redefinidas.

Capítulo 5: Trata da configuração do equipamento e dos respetivos componentes eletrónicos.

Capítulo 6: Discussão breve do orçamento calculado e das despesas associadas à construção do equipamento.

Capítulo 7: Apresenta o desenvolvimento e análise dos provetes de estudo.

Capítulo 8: Divulgação das conclusões e trabalhos futuros a serem feitos.

2 REVISÃO DA FDM

2.1 Fabrico Aditivo

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900-15, o fabrico aditivo é o processo de união de materiais para fazer peças a partir de modelos tridimensionais [10]. Em 2004, a *Society of Manufacturing Engineers* fez uma classificação das tecnologias associadas a este tipo de fabrico e em 2012 verificou novas entradas nesta lista, perfazendo um total de 7 variantes: *Binder Jetting*, *Directed Energy Deposition*, *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Powder Bed Fusion*, *Sheet Lamination* e *VAT Photopolymerization* [11]. A Modelagem por Deposição Fundida (*Fused Deposition Modeling*), também denominada de Fabrico de Filamentos Fundidos (*Fused Filament Fabrication*) por outros autores, faz parte do grupo de ME (*Material Extrusion*) e tornou-se a categoria mais popular dada a sua relação custo-benefício e fácil acessibilidade [12].

2.2 Materiais

Como o nome indica, a tecnologia FDM constrói peças através da deposição consecutiva de material na forma filamentar previamente fundido. Desde os polímeros aos cerâmicos, a compatibilidade de materiais continua a ser alargada paralelamente ao seu desenvolvimento. Contudo, é seguro afirmar que os termoplásticos ocupam o primeiro lugar nesta lista devido à facilidade de processamento em conjunto com a sua acessibilidade. Materiais como o PLA, TPU e o PET são populares no mercado do consumidor comum. Por outro lado, polímeros como o ABS e o POM são voltados para os campos profissionais. Além disso, a comercialização de filamentos como o PEEK promoveu a integração desta tecnologia na indústria atual [13]. Adicionalmente, o interesse em materiais compósitos tem vindo a aumentar, onde estudos recentes prometem soluções mais sustentáveis, sem comprometer sua processabilidade e desempenho, tanto do ponto de vista ambiental como mecânico [14].

2.3 Impressora 3D

Os equipamentos de fabrico aditivo são normalmente apelidados de impressoras 3D e apesar de existirem várias soluções presentes no mercado, estas são naturalmente associadas a máquinas de modelagem por deposição fundida devido à sua simplicidade, cujo processo de impressão pode ser resumido nas seguintes fases:

Desenho: O processo é iniciado pela criação ou obtenção de um modelo tridimensional, através de um *software* de desenho assistido por computador (CAD), que representa o objeto ou peça desejada a ser impressa.

Fatiamento: O modelo 3D é fatiado em uma série de camadas transversais 2D segundo um software especificamente concebido para a impressão FDM designado de *Slicer*.

Impressão: Cada camada consiste numa seção horizontal fina que é individualmente enviada para a impressora e traduzida nos comandos necessários para realizar os processos de extrusão e deposição.

Na Figura 2.1 são ilustradas as etapas sequenciais do processo da FDM, juntamente com os componentes presentes num equipamento convencional necessários para a sua concretização. De forma sucinta, o filamento é alimentado a partir de uma bobina e é conduzido pela extrusora, que dispõe de um sistema de engrenagens, até ao bocal de extrusão, onde o material é fundido até um estado viscoso com o auxílio de uma resistência, e posteriormente expelido pelo bocal de extrusão sobre a plataforma, onde origina a geometria idealizada.

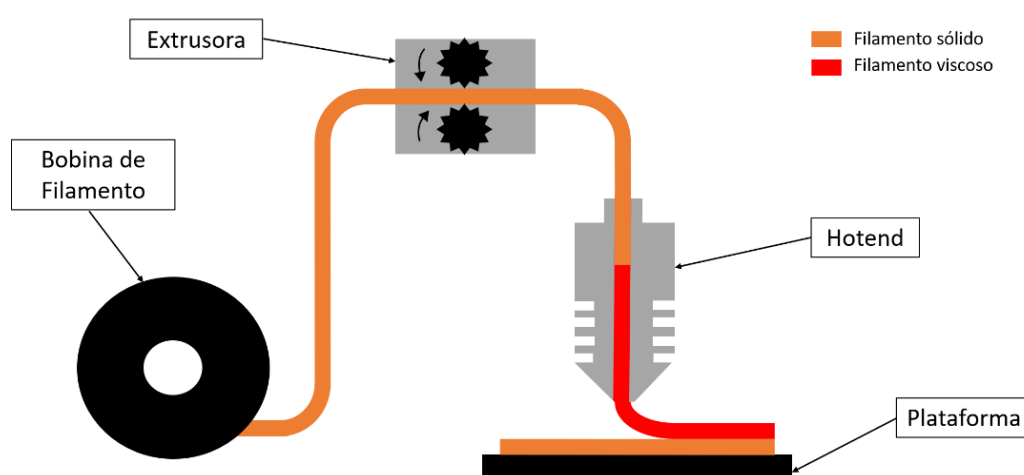


Figura 2.1 Processo FDM simplificado

A movimentação por trás da impressão é provavelmente o aspecto mais fundamental da modelagem por deposição fundida, pelo que é comum batizar o equipamento segundo o seu movimento. O processo de extrusão referido anteriormente deve ser coordenado de forma harmoniosa e precisa com os restantes elementos da impressora para produzir a peça conforme projetada. Este é obtido combinando os movimentos do *hotend* e da plataforma em um movimento tridimensional coordenado [15].

Para entender melhor onde se insere o projeto em questão, serão abordadas em seguida as configurações mais comuns disponíveis no mercado (Figura 2.2).

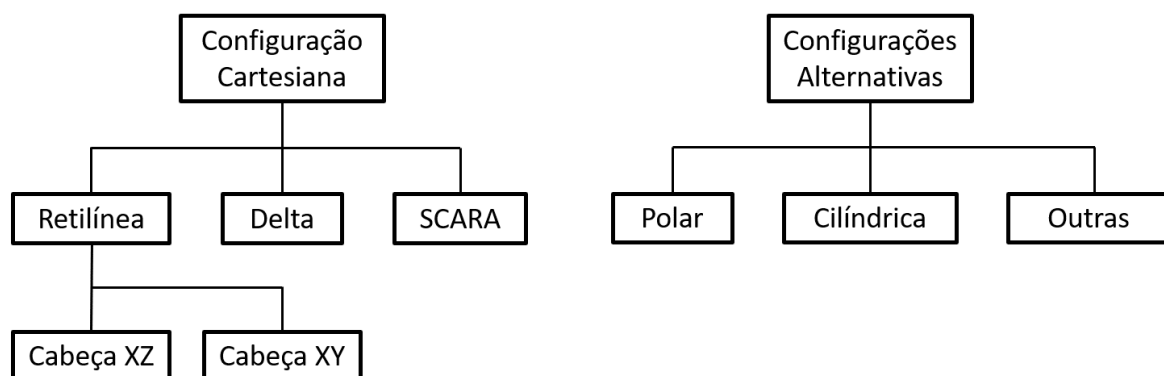


Figura 2.2 Diferentes configurações de impressoras 3D

2.3.1 Configuração Cartesiana

A configuração cartesiana é indubitavelmente a mais utilizada nas impressoras 3D comuns, onde os componentes efetivam os seus movimentos segundo um sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z) [16].

As configurações retilíneas (Figura 2.3) propõem várias soluções segundo os eixos cartesianos em que o conjunto da cabeça de impressão cumpre a movimentação segundo xz ou xy enquanto a locomoção da plataforma assegura o deslocamento de acordo com o eixo y ou z respetivamente.

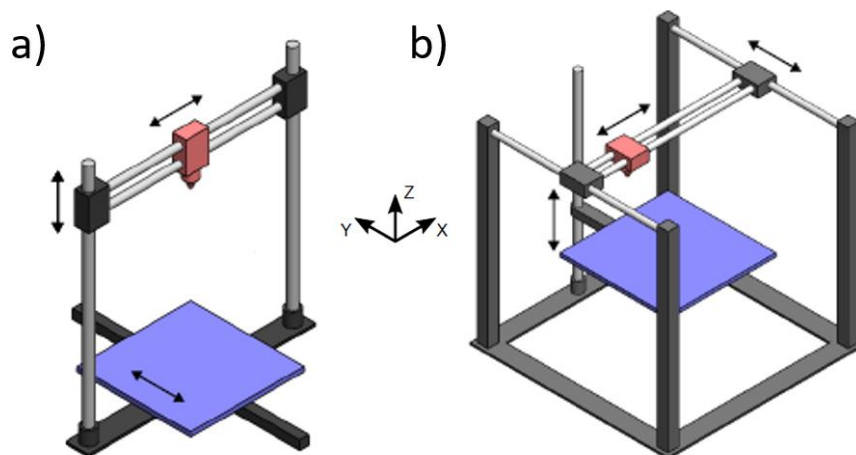


Figura 2.3 Configurações retilíneas: a) cabeça XZ b) cabeça XY [17]

Existem algumas variações desta configuração de onde se destacam a Delta e a SCARA. A configuração delta é prestigiada pela sua velocidade de impressão que é cumprida geralmente por única cabeça de impressão suspensa por três colunas equidistantes (Figura 2.4 c). O centro da plataforma imóvel atua como a origem de um referencial $Oxyz$ onde é iniciada a impressão. A configuração SCARA apresenta alta precisão de impressão através de um braço robótico articulado que satisfaz o plano xy como é possível observar na Figura 2.4 d). O eixo z é cumprido pela locomoção da plataforma ou por intermédio de um motor adicional que governa o braço.

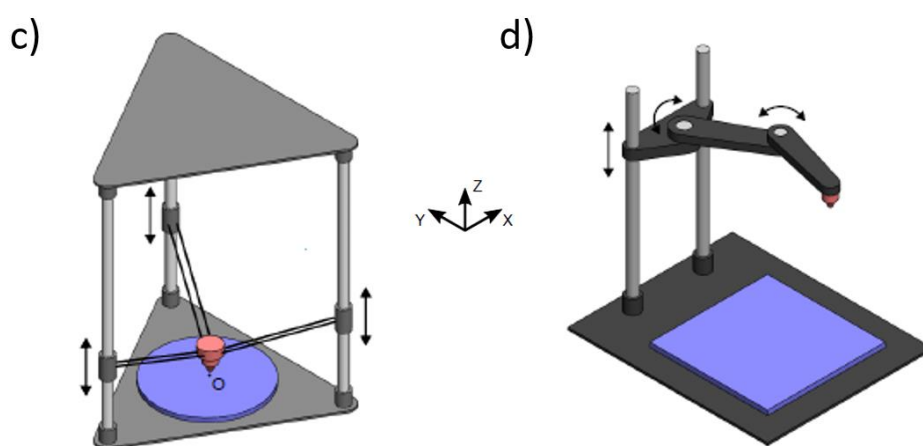


Figura 2.4 Outras configurações cartesianas c) Delta d) SCARA [17]

2.3.2 Configurações Alternativas

Como seria de esperar com o aumento de interesse na área e avanço tecnológico, existem outras configurações com maior flexibilidade através de um sistema com graus de liberdade superior ao cartesiano referido anteriormente. Todavia, é importante notar que com o aumento do número de graus de liberdade vem maior complexidade de controlo e *hardware*, sendo por isso discutível a aplicação de cada configuração.

A configuração polar (Figura 2.5 e) é uma solução comercializada há relativamente pouco tempo que utiliza um sistema de coordenadas polares onde o conjunto de extrusão é deslocado segundo um ângulo e distância radial em alternativa aos eixos x e y para localizar pontos relativos à origem, que é representada por uma plataforma circular giratória.

Existem alguns projetos em desenvolvimento baseados num sistema de coordenadas cilíndrico como a *Theta Printer* (Figura 2.5 f), que é definida por quatro cabeças de impressão (com um grau de liberdade cada), juntamente com uma plataforma rotativa para fornecer um movimento de impressão horizontal.

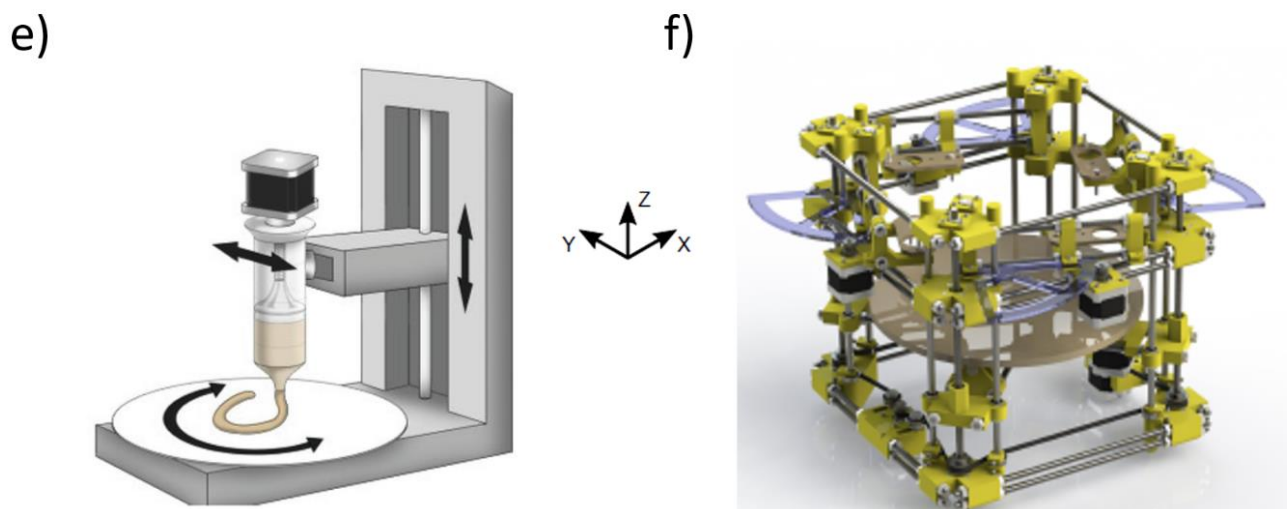


Figura 2.5 Configurações Alternativas: e) *Polar 3D* [18] f) *Theta Printer* [19]

2.4 Limitações

2.4.1 Erros no Processo

Podem surgir vários defeitos na peça devido a erros induzidos na máquina por agentes próprios do processo FDM, ou mesmo por agentes exteriores como o operador, dos quais se destacam [20]:

Vibração: Existe uma vibração comum à grande maioria dos equipamentos FDM que se deve à inércia da cabeça de impressão combinada com mudanças bruscas de direção inerentes ao processo, levando a um efeito também conhecido como *ghosting*. Geralmente este tipo de problemas pode ser resolvido através de uma redução nos valores da velocidade e aceleração presentes no *firmware*.

Extrusão Inadequada: É um erro bastante perceptível quando o *hotend* apresenta uma extrusão em demasia (*over-extrusion*) ou insuficiente (*under-extrusion*). Este tipo de problemas merece uma atenção especial e estão associados à configuração da máquina juntamente com a parametrização do *firmware*, mas por vezes pode mesmo verificar-se a obstrução de filamento no bocal devido a baixas temperaturas de aquecimento ou a uma refrigeração pouco eficiente, sendo necessário desmontar o conjunto de extrusão.

Empenamento: É provavelmente o problema mais corrente durante o processo e consiste na separação da primeira camada à plataforma de impressão devido ao efeito de contração após a extrusão do material. Geralmente sucede-se nos cantos e pode ser resolvido através do aquecimento da plataforma ou aplicação de um adesivo à mesma, promovendo assim a aderência do filamento.

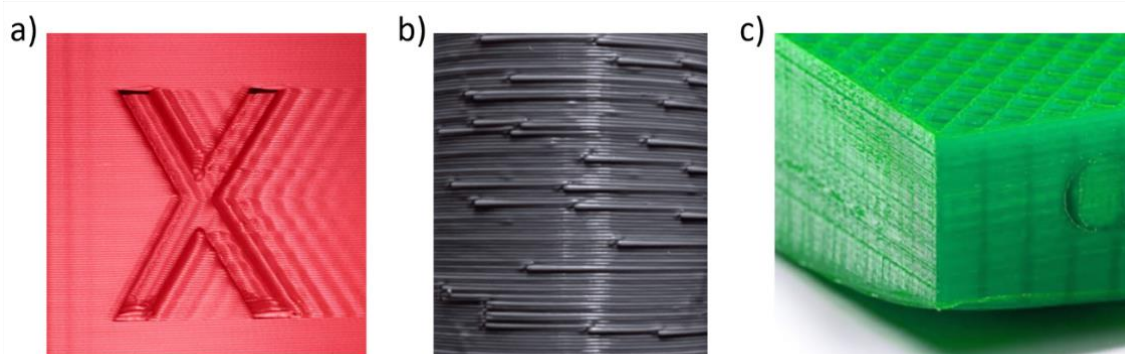


Figura 2.6 Exemplo de: a) vibração [21] b) *over-extrusion* [22] c) empenamento [23]

2.4.2 Estruturas Auxiliares

Grande parte das geometrias desejadas dependem substancialmente de estruturas auxiliares para a sua concretização. Estas estruturas procuram mitigar alguns erros descritos anteriormente e após a finalização do processo devem ser removidas, pelo que estão associadas a um desperdício inerente ao mesmo [24].

Suportes: Como seria de esperar, o material extrudido necessita de uma base suficientemente firme para solidificar devidamente. As estruturas de suporte atuam como um andaime de forma a auxiliar as áreas críticas de suspensão (Figura 2.7 a). Esta é uma das principais limitações da FDM, pois o desenho da peça necessita de um esforço adicional para esta estrutura auxiliar e a sua remoção sem comprometer a primeira.

Raft: Cria uma camada primária horizontal de espessura variável entre a plataforma da impressora e a peça a ser fabricada (Figura 2.7 b). Esta é uma das estruturas auxiliares mais adequadas para materiais de difícil adesão à plataforma.

Brim: Este procedimento consiste numa cópia do contorno da peça (Figura 2.7 c), previamente à construção da mesma. Apesar da sua remoção ser relativamente difícil, é bastante eficaz em estruturas estreitas como colunas ou mesmo dentes de pinhões e engrenagens.

Skirt: Esta estrutura atua como uma saia (Figura 2.7 d), onde é previamente preparado uma cópia do contorno da peça a imprimir, como no *brim*, mas sem estabelecer contacto com a mesma. É a estrutura auxiliar mais simples e serve essencialmente para limpar o bocal de extrusão, assegurar a fluidez do filamento e evitar alguns erros no processo descritos anteriormente, como o nivelamento da plataforma.

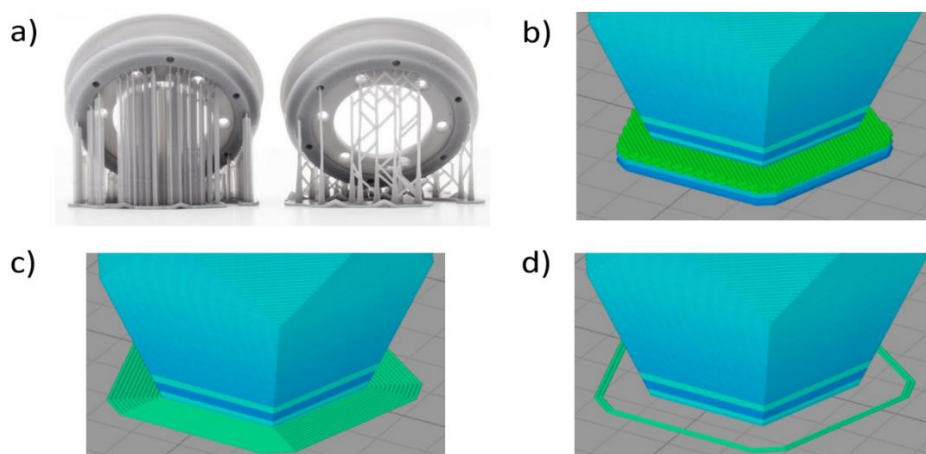


Figura 2.7 Exemplo de aplicações: a) Suportes [25] b) Raft c) Brim d) Skirt [26]

2.4.3 Anisotropia

É facilmente perceptível que o empilhamento de filamento segundo camadas apresenta um desenvolvimento anisotrópico das peças produzidas através da FDM. Como consequência natural desta abordagem de fabrico, a determinação da estratégia de construção terá um efeito pronunciado nas propriedades e, finalmente, no desempenho da peça [27],[28].

Atendendo a Figura 2.8, é evidente que a peça ilustrada é mais propensa a delaminar quando submetida a esforços de tração perpendiculares à orientação de grão manifestada na construção das suas camadas [29].

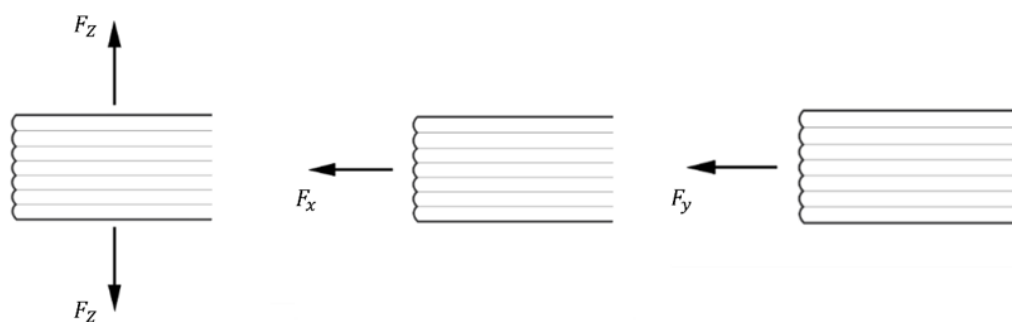


Figura 2.8 Forças de tração em diferentes direções [30]

Esta dissertação procura solucionar esta limitação através da construção de um equipamento que segue um método de deposição alternativo àquele partilhado pelas impressoras do mercado atual. Contrariamente à extrusão de filamento transversalmente a uma plataforma plana, esta solução estuda a aplicação sucessiva de camadas cruzadas de filamento segundo uma orientação helicoidal.

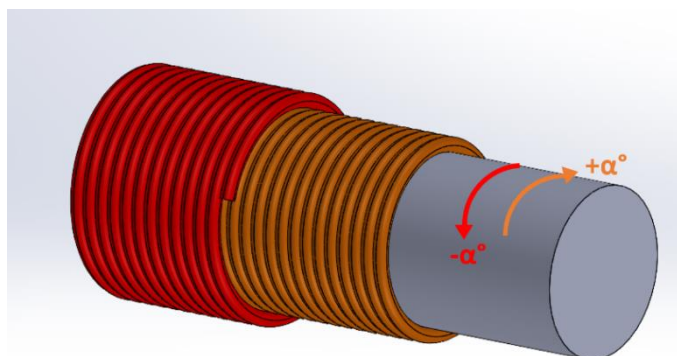


Figura 2.9 Cruzamento filamentar

Seguindo o mesmo princípio de um torno mecânico, o enrolamento filamentar (Figura 2.9) é concretizado através de uma plataforma cilíndrica que efetua a rotação sempre no mesmo sentido enquanto que a mudança de direção é realizada apenas pelo bocal de extrusão, como sugere Figura 2.10.

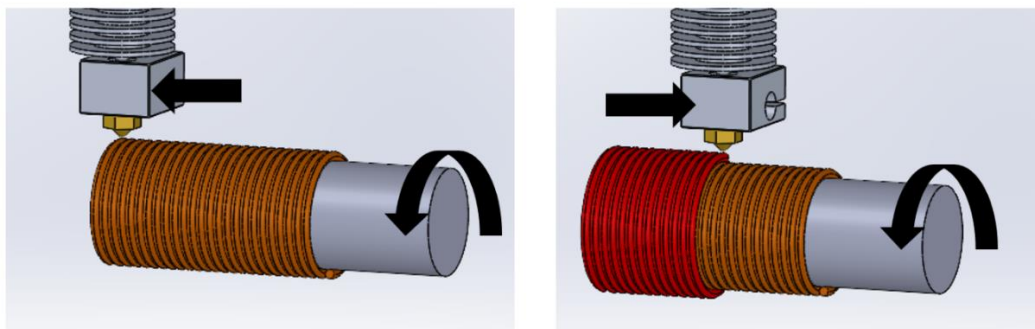


Figura 2.10 Enrolamento e cruzamento de camadas

É certo que esta abordagem implica a presença de um furo longitudinal nas peças, no entanto espera-se ser possível produzir geometrias complexas e exclusivas a configurações cilíndricas sem comprometer as suas propriedades mecânicas, como por exemplo molas e hélices, que são relativamente difíceis de fabricar através de impressoras 3D convencionais.

Na data do presente documento, é possível testemunhar a realização de soluções FDM semelhantes à desenvolvida no contexto desta dissertação, como a *Lathe-type 3D Printer*, concebida pelos alunos da *Imperial London College* (Figura 2.11 a), e a *Roto-Printer*, elaborada por *Jonas Duteloff* enquanto frequentava a *Burg Giebichenstein University* (Figura 2.11 b). Contudo, não existe qualquer evidência relativamente ao estudo das propriedades mecânicas exibidas pelas peças produzidas segundo o método descrito, pelo que foi incluído nos objetivos deste projeto.

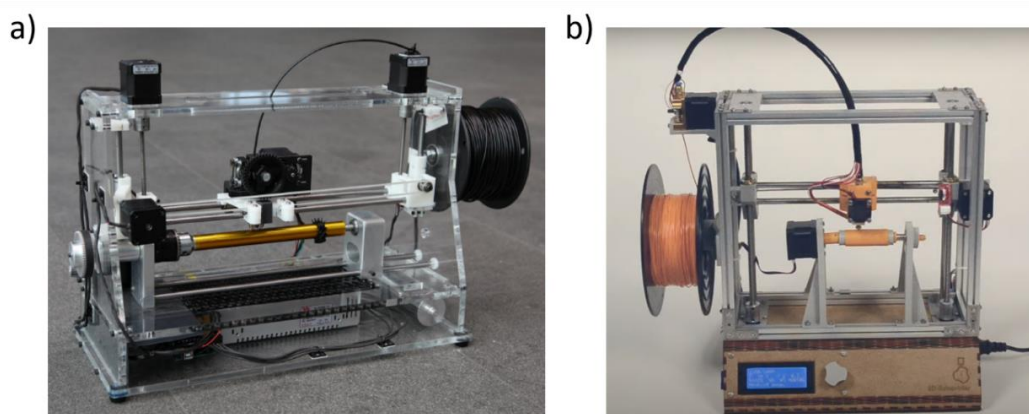


Figura 2.11 Protótipos de impressoras 3D com coordenadas cilíndricas [31],[32]

Uma renderização CAD é apresentada na Figura 2.12 como uma visão geral do projeto proposto no ano de 2020, por Rafael Carlos Mestre da Costa, mestre em Engenharia Mecânica na *Nova School of Science and Technology*.

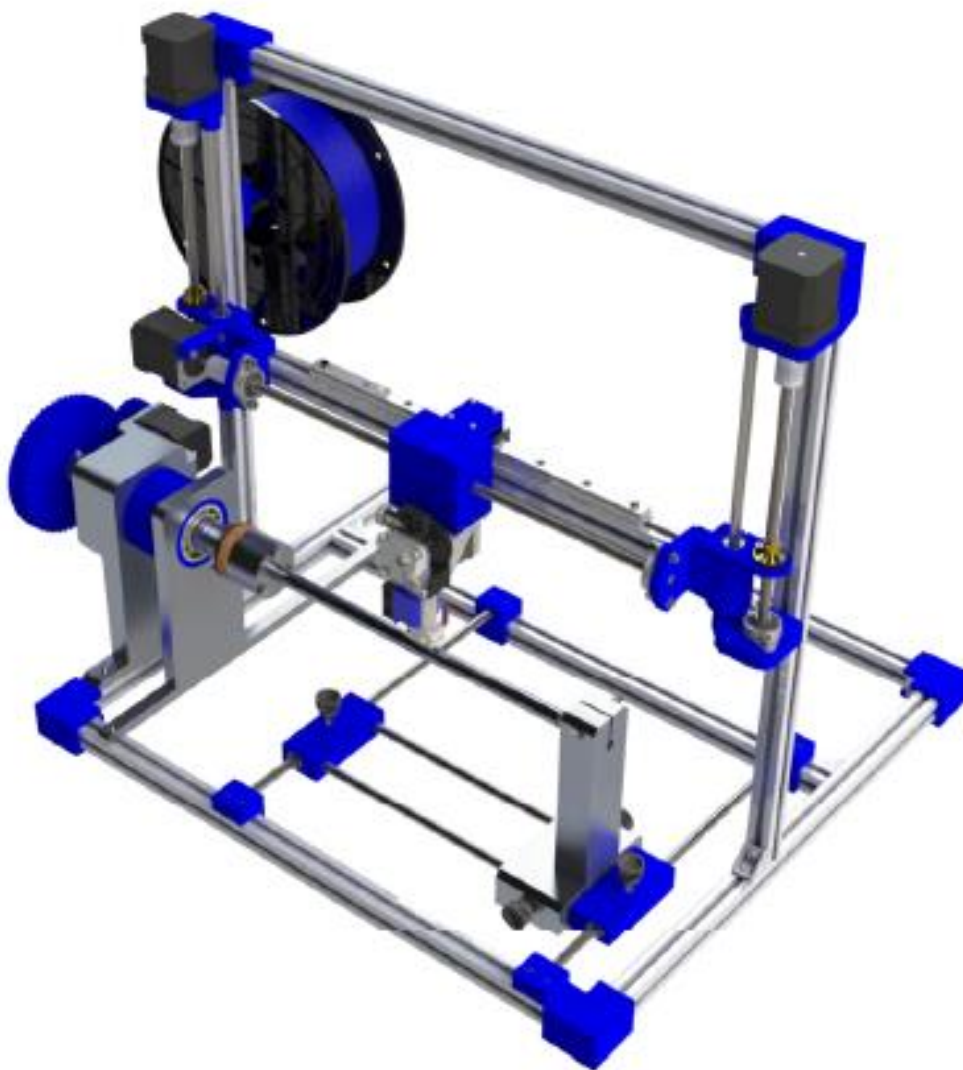


Figura 2.12 Renderização CAD do projeto inicial [33]

3 METODOLOGIA

Como já foi mencionado, o desenvolvimento deste projeto tem como raiz a proposta de construção de um equipamento, no entanto foram feitas várias alterações antes de avançar para essa mesma fase. É importante reparar que no presente capítulo serão apenas apresentados os critérios considerados para efetuar estas alterações (Figura 3.1). A discussão das mesmas terá lugar no capítulo 4, mediante uma análise mais objetiva e detalhada ao cenário em questão.

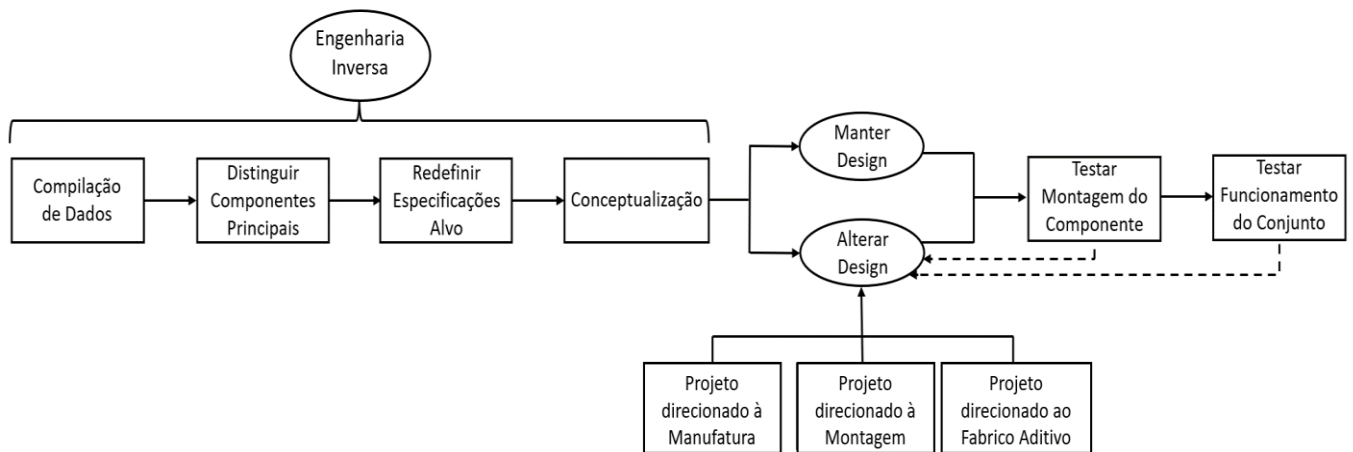


Figura 3.1 Metodologia aplicada

3.1 Engenharia Inversa

Em primeiro lugar foi feita uma revisão do projeto existente, utilizando uma abordagem desconstrutiva, com o objetivo de redefinir e priorizar as especificações delineadas pelo autor. Apesar de não existir um protótipo físico, este método é semelhante àquele que podemos apelidar de engenharia inversa. Define-se por engenharia inversa o ato de criar um conjunto de especificações para um produto existente, por alguém que não seja o projetista original, baseado na análise e dimensionamento com a finalidade de replicar ou melhorar as suas capacidades [34].

Podemos dividir as especificações de um produto em dois tipos: funcional e dimensional. As especificações funcionais descrevem não só como um conjunto mecânico e os seus subconjuntos funcionam, mas também como estes interagem. Por outras palavras, fornecem informações sobre como e porquê de um equipamento funcionar da maneira que funciona. As especificações dimensionais estabelecem as dimensões da peça, tais como: comprimentos, ângulos, entre outros.

Geralmente, é necessário decompor o conjunto em subconjuntos mais pequenos para efetuar uma análise dos respetivos componentes. Só assim se obtém uma compreensão das suas funções básicas, as inter-relações, os mecanismos de operação, os parâmetros críticos para essa operação, os materiais e as propriedades críticas. Quando se atinge uma decomposição suficientemente baixa para compreender o seu funcionamento, deixa-se de desenvolver as especificações funcionais e inicia-se o estudo das especificações dimensionais, que por vezes pode exigir uma decomposição adicional do conjunto. Assim sendo, a decomposição pode desenvolver-se até ao nível porca, parafuso e anilha, isto é, até ao ponto do qual a desmontagem não é mais possível sem a destruição física das próprias partes [34].

Esta metodologia foi adaptada para o equipamento em questão e dividida nas quatro seguintes etapas sequenciais:

Compilação de Dados: A primeira etapa consiste em reunir o máximo de informação possível relacionado com o projeto inicial, como: desenhos técnicos, tabelas de materiais, folhas de cálculo, gráficos e simulação de operações.

Distinguir Componentes Principais: Com o auxílio dos dados reunidos na primeira etapa, é possível identificar os componentes principais para a concretização do projeto. É importante analisar quaisquer funções, operações, configurações e materiais ou métodos de acabamento peculiares.

Redefinir Especificações Alvo: O objetivo desta etapa é priorizar ou modificar as especificações do projeto segundo os componentes principais do conjunto.

Conceptualização: Por último, é feita uma documentação de maneira clara e concisa das novas evidências, que são posteriormente integradas à compilação de dados, onde se estabelece um conceito de projeto que será utilizado para efetuar as modificações necessárias de modo a garantir as especificações alvo estabelecidas anteriormente.

3.2 Projeto Direcionado à Manufatura

A orientação e desenvolvimento deste equipamento apoiou-se significativamente no projeto direcionado à manufatura, resultante de uma investigação feita por *Boothroyd & Dewhurst* em 1996. É importante destacar que o projeto direcionado à manufatura e montagem é a integração das questões de projeto separadas, mas inter-relacionadas, dos processos de montagem e fabrico [35].

O projeto direcionado à manufatura (DFM), visa garantir a alta qualidade de um produto e, ao mesmo tempo, minimizar o seu custo de fabrico. O DFM começa durante a fase de desenvolvimento do conceito, quando as funções e especificações do equipamento ainda estão a ser finalizadas. Esta é uma das práticas mais complementares envolvidas no desenvolvimento de um produto e serve-se de vários tipos de informação, tais como: esboços, desenhos técnicos, especificações, alternativas de projeto, estimativas dos custos de fabrico, uma compreensão detalhada dos processos de produção e montagem. Conforme foi descrito, esta abordagem distingue os seguintes objetivos [36]:

- I. **Estimar os custos de fabrico**
- II. **Reduzir os custos dos componentes**
- III. **Considerar o impacto das decisões do DFM em outros fatores do projeto**

De forma a possibilitar uma estimativa dos custos, foram realizadas algumas precauções relativamente aos materiais, com base no custo esperado de fabrico comparativamente ao de compra. Esta análise foi desenvolvida de forma prioritária, pois o custo é quase sempre um dos critérios com base no qual a decisão é tomada, ainda que as estimativas de custo nessa fase sejam altamente subjetivas.

A fim de reduzir custos, serão preferencialmente usados componentes comerciais (usados em máquinas FDM) prontamente disponíveis no mercado. Quando não for possível, podem ser facilmente fabricadas através dos equipamentos de fabrico aditivo disponibilizados no laboratório de máquinas da FCT.

Inicialmente foi considerado o PLA, uma vez que é relativamente resistente, barato, acessível e reciclável. Porém, o PETg revelou-se igualmente fácil de imprimir e pode oferecer muitas propriedades mecânicas que as impressões de PLA não conseguem alcançar. O exemplo das máquinas Original Prusa comprova a sua qualidade de construção industrial, que utilizam este material para produzir os seus próprios componentes [37].

3.3 Projeto Direcionado à Montagem

O projeto direcionado à montagem, ou DFA (*Design for Assembly*), é uma abordagem que envolve procedimentos sistemáticos para avaliar e melhorar um produto de modo a facilitar a sua montagem e, consequentemente, reduzir os custos inerentes [36]. Para este efeito, foram considerados os seguintes princípios [35]:

- I. **Minimizar o número de componentes**
- II. **Normalizar os componentes sempre que possível**
- III. **Projetar para uma montagem simples**

A minimização de componentes é possível combinando dois ou mais em um único, a menos que se verifique uma ou mais das seguintes situações [38]:

- Durante a operação do produto, o componente move-se relativamente às restantes partes montadas (pequenos movimentos não se qualificam quando podem ser obtidos através do uso de articulações).

- O componente é constituído por um material diferente, ou deve ser isolado dos outros conjuntos de componentes (por razões de isolamento elétrico, isolamento térmico, amortecimento de vibrações, entre outros).

- O componente deve ser separado dos demais (por razões de acesso ao conjunto, manutenção ou reparações) caso contrário, a montagem de peças que verifiquem um dos critérios precedentes seria impedida.

Com o intuito de normalizar e padronizar componentes, optou-se por comprar as peças pretendidas sempre que possível. Isto inclui não só vários acessórios de montagem como os parafusos, as anilhas e os rolamentos, mas também alguns componentes mais complexos tais como a extrusora e o *hotend*, já que o crescimento de interesse na área de FDM, impulsionou várias opções de compra dedicadas a impressoras 3D.

Fundamentalmente, a análise do projeto de um produto, quanto à sua montagem, depende se o produto será montado manualmente ou com auxílio de automação. O projeto foi inicialmente concebido para uma montagem manual, e foi mantido nessa mesma direção de forma a garantir uma acessibilidade e manutenção relativamente simples. O processo de montagem manual, geralmente, pode ser dividido em dois domínios: a manipulação, que consiste em adquirir e orientar cada componente, e a união, onde é feita a inserção e fixação entre os componentes [35]. As diretrizes de projeto para a manipulação de componentes são apresentadas a seguir [33]:

- Projetar componentes com o máximo de simetria possível (simetria ponta a ponta e simetria rotacional em relação ao eixo de inserção).

- Evitar projetar componentes que se unam, sejam delicados, flexíveis, demasiado pequenos ou demasiado grandes.

- Evitar projetar componentes com geometrias afiadas ou que tendem a lascar para não prejudicar o utilizador. Um exemplo comum é a utilização de boleados sobre esquinas vivas.

Por conseguinte, seguem-se as diretrizes de projeto para a união de componentes [33]:

- Projetar de modo que haja o mínimo de resistência possível à inserção utilizando chanfros.

- Utilizar folgas generosas, mas não demasiado grandes para evitar encravamentos ou bloqueios de componentes durante a sua inserção.

- Normalizar tanto quanto possível, utilizando partes, processos e métodos comuns a todos os modelos.

- Selecionar uma direção de montagem. Geralmente deve-se proceder à montagem a partir de cima, isto é, aplicando força no topo do conjunto.

- Evitar, sempre que possível, a necessidade de segurar um ou mais componentes para guiar a manipulação do subconjunto. Se este for o caso, deve-se projetar de modo que o posicionamento desejado do componente seja assegurado imediatamente depois da inserção.

- Projetar para que o componente esteja devidamente colocado antes de ser libertado.

- Quando é necessário utilizar acessórios de ligação, deve-se privilegiar os elementos com menor custo inerente. O custo relativo dos processos de ligação mais comuns, pode ser associado da seguinte forma: Encaixe < Deformação Plástica < Rebitagem < Aparafusamento.

- Projetar de forma a conceder acesso permanente aos acessórios de ligação, como os parafusos e as porcas.

3.4 Projeto direcionado ao Fabrico Aditivo

As características de fabrico estão ligadas umas às outras e não podem ser vistas separadamente, portanto, é necessária uma visão global que se baseie em todo o conhecimento e experiência da comunidade [39]. Todavia, as características únicas dos processos de fabrico aditivo requerem e possibilitam diferentes abordagens para a conceção e projeto. Assim surgiu o DFAM (*Design for Additive Manufacturing*), que compreende conceitos e regras idênticos aos definidos pelo DFM, mas direcionados e aplicados à impressão 3D. Isto inclui novos procedimentos que procuram explorar e superar as barreiras impostas pelas técnicas convencionais de fabrico subtrativo. Os objetivos do DFAM passam por [40]:

- I. Oferecer ferramentas, técnicas e diretrizes para adaptar um desenho a um determinado conjunto de restrições de fabrico a jusante.
- II. Compreender e quantificar o efeito do processo de desenho durante o processo de fabrico, a fim de melhorar o desempenho do sistema de fabrico respetivo e da qualidade do produto.
- III. Conhecer a relação entre o desenho e o fabrico, tal como o seu impacto no projetista e no processo de desenho.

As restrições de fabrico são impostas de acordo com as limitações do equipamento utilizado, que neste caso se referem à máquina *Original Prusa i3 MK3S*, disponível no laboratório de máquinas e engenharia inversa da Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Uma das maiores vantagens do fabrico aditivo, como já foi mencionado anteriormente, é a liberdade das peças projetadas, onde a forma é praticamente ilimitada, permitindo assim o uso de geometrias complexas sem incorrer penalidades de tempo ou custo quando comparadas com geometrias simples. Neste contexto, os projetistas devem criar modelos digitais completos da peça final. Como haverá pouca ou nenhuma intervenção do utilizador na tradução do modelo digital para o produto físico, os modelos CAD devem ser de maior qualidade e conter informações mais completas do que aquelas necessárias para as tecnologias tradicionais de fabrico [41].

Desta forma, foram definidas as seguintes diretrizes:

- Foi imposto um volume máximo, de acordo com as limitações de fabrico da máquina referida, no valor de $250\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ para todos os componentes a serem produzidos.

- Pela mesma razão, foram rejeitados quaisquer pormenores inferiores ao valor de $0,4\text{ mm}$, limitado pela resolução mínima de acordo com o diâmetro do bocal.

- Devido ao comportamento anisotrópico debatido em 2.4.3, deve-se priorizar sempre a direção de construção mediante do estudo das forças, que serão aplicadas no componente, durante o funcionamento do equipamento.

- Deve-se selecionar a orientação de impressão mais favorável (sem comprometer a diretriz estabelecida anteriormente) de modo a evitar a utilização de suportes. Se não for possível, deve-se aplicar as alterações geométricas necessárias. Este esforço tem o objetivo de diminuir o tempo de impressão, reduzir o material utilizado e ainda evitar atividades de pós processamento.

- Em consequência da contração térmica do filamento e das implicações associadas ao *overlapping* efetuado pelo bocal, foi definido uma tolerância mínima de $+0,5\text{ mm}$ para todos os furos.

- Foram adicionados boleados ou chanfros em zonas de deflexão acentuada, como arestas e vértices agudos, uma vez que facilitam a montagem de componentes (como foi descrito no tópico 3.3).

A utilização de forma adequada do *Slicer* é indubitavelmente uma questão fundamental, pois a sua parametrização pode influenciar significativamente as propriedades das peças impressas, o filamento despendido e, consequentemente, os custos de material [42]. Neste contexto, foram definidas as seguintes diretrizes no *PrusaSlicer*:

- Foi definido um preenchimento de construção no valor de 20% para todos os componentes fabricados em PETg, sem comprometer significativamente as propriedades mecânicas, permitindo economizar material e tempo [43].

- Tirando partido do efeito compressivo efetuado pelo bocal (*overlapping*), foi estipulado uma altura de camada no valor de $0,2\text{ mm}$ para todos os componentes, pois fornece um equilíbrio entre velocidade, resolução e qualidade [44].

4 PROJETO MECÂNICO

4.1 Decomposição do Conjunto Primitivo

De acordo com o procedimento descrito na engenharia inversa, o conjunto total inicialmente proposto foi dividido em subconjuntos mais simples representados na Figura 4.1:

Conjunto Rotativo: Como o próprio nome indica, este subconjunto é constituído pelos componentes responsáveis pela concretização do enrolamento filamentar.

Conjunto Linear Horizontal: Como é comum na maioria das máquinas FDM, este subconjunto é encarregue de efetuar o movimento horizontal, segundo o eixo X .

Conjunto de Extrusão: Corresponde ao subconjunto incumbido de realizar a mobilização, fusão e extrusão do filamento.

Conjunto Linear Vertical: Este subconjunto é responsável por cumprir o movimento ascendente e descendente do subconjunto Linear Horizontal, segundo o eixo Z .

Estrutura: Atua como o esqueleto do equipamento que suporta os restantes subconjuntos, através de vigas perfiladas em alumínio.

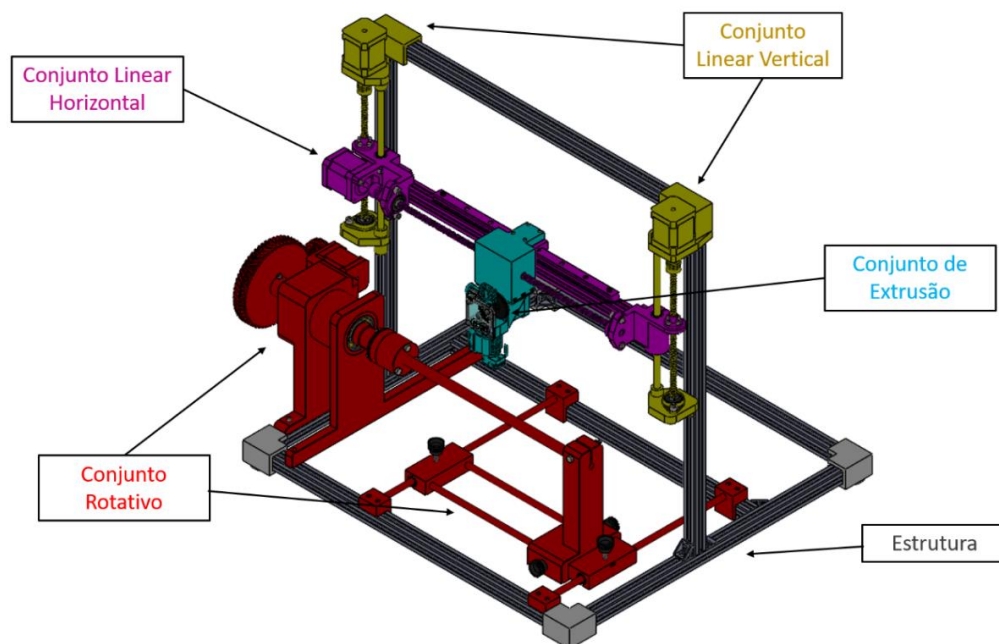


Figura 4.1 Conjunto inicialmente proposto

4.2 Especificações

4.2.1 Extrusão

Uma vez que a variedade de filamentos não é uma prioridade, foi removida a necessidade de aquecer a plataforma rotativa com a finalidade de simplificar o projeto e reduzir significativamente os custos de fabrico associados, tendo em consideração que através de algum esforço é possível efetuar uma deposição da primeira camada bem-sucedida à temperatura ambiente.

Os modelos descritos para a extrusora e o *hotend* foram coincidentes com os do projeto inicial, pois apesar de ter decorrido dois anos, o fabricante E3D continua a ser uma referência no mercado, seja para a génese destes projetos ou direcionado à melhoria de outras máquinas comercializadas. O *hotend* selecionado (Figura 4.2) permite atingir uma temperatura máxima de 300°C, vem equipado com um bocal de extrusão de 0,4 mm de diâmetro, uma ventoinha de refrigeração e um termístor capaz de facultar uma retroalimentação em tempo real. Este modelo compreende diferentes variações, pelo que foi optada por uma versão compatível com filamento de 1,75 mm de diâmetro e uma potência correspondente à fonte de alimentação disponível no laboratório, no valor de 24 Volts DC.

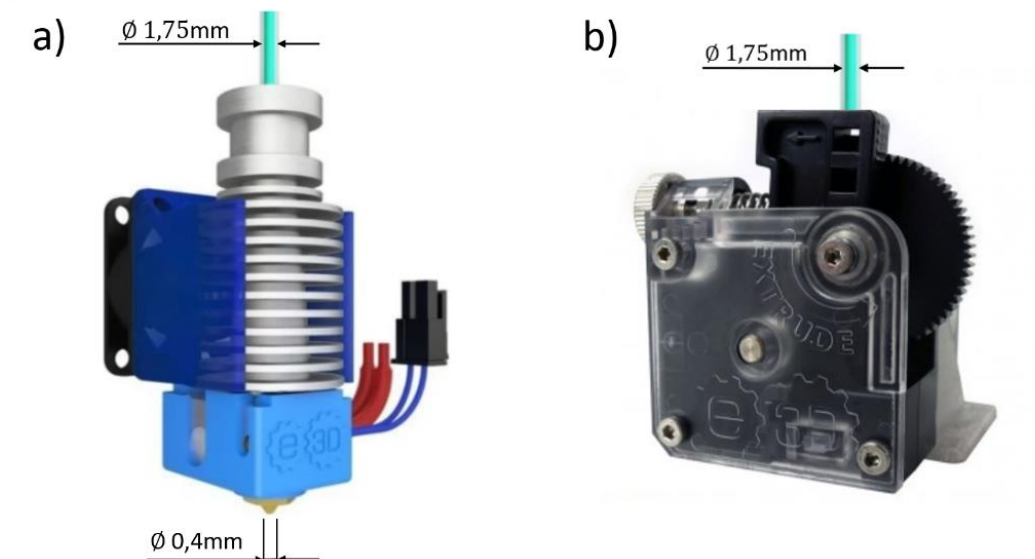


Figura 4.2 a) *Hotend* E3D v6 [45] b) Extrusora E3D *Titan* [46]

A massa total do conjunto de extrusão constitui um fator importante, pois a sua inércia compromete a qualidade de impressão. Segundo uma análise de deslocamentos efetuada no desenvolvimento do projeto inicial, é evidente que o conjunto de extrusão projetado apresenta um impacto significativo na deflexão do conjunto linear horizontal, pelo que se revelou prudente reduzir a carga mobilizada sobre a guia. É possível constatar os resultados deste estudo através de uma simulação efetuada no *SolidWorks* (Figura 4.3) onde é retratado o caso mais crítico, determinado pela posição do conjunto de extrusão a meio vão da guia linear.

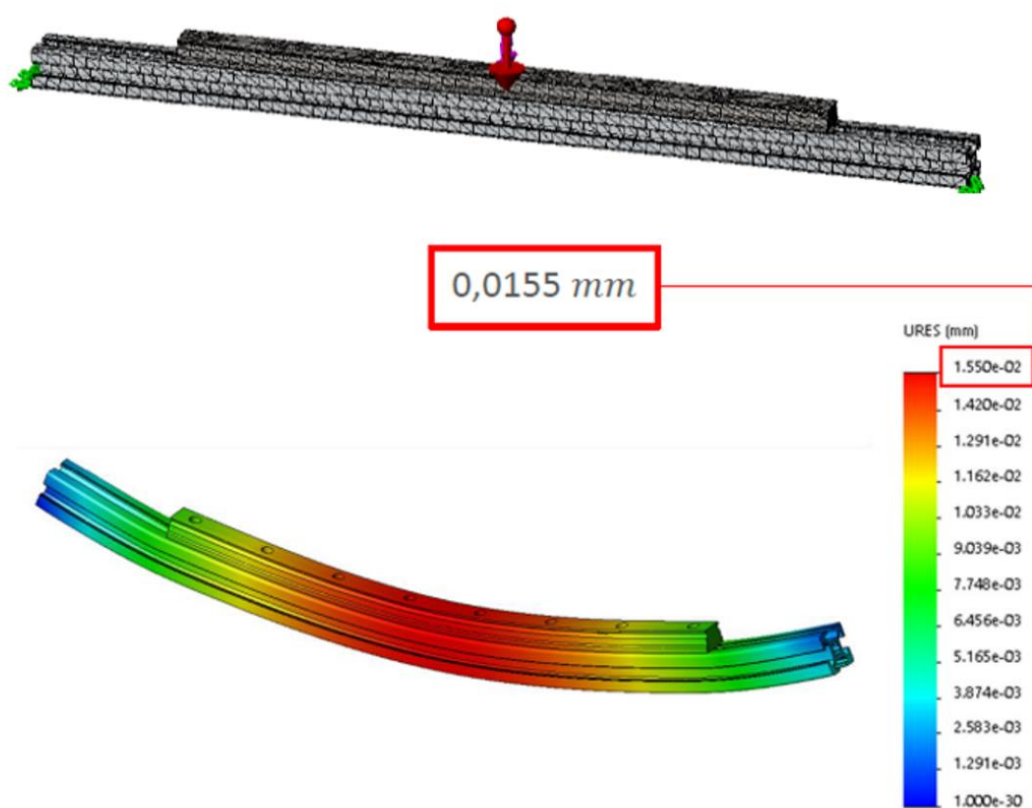


Figura 4.3 Análise estática do conjunto de extrusão [33], [47]

Foi adotada uma configuração *bowden*, cuja montagem é efetuada remotamente através de um tubo guia entre a extrusora e o *hotend*, pois ainda que a extrusora seja relativamente leve, o motor a qual está acoplada tem uma massa considerável.

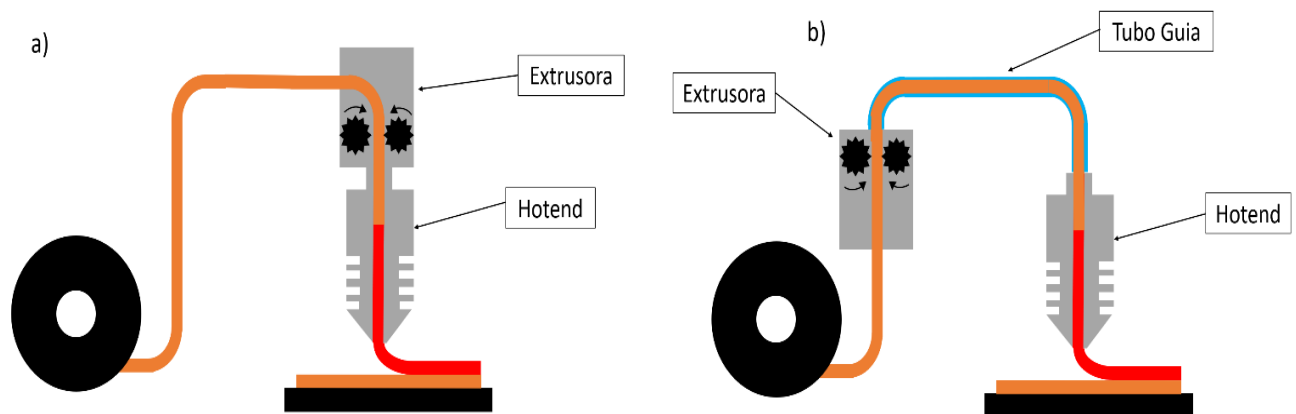


Figura 4.4 Configuração a) *Direct drive* b) *Bowden*

Como é possível observar na Figura 4.4, o *hotend* presente na configuração *bowden* é a única parte móvel, contrariamente à configuração *direct drive*, permitindo assim reduzir a inércia do movimento da cabeça de extrusão e, consequentemente, viabilizar maiores velocidades de impressão sem comprometer a qualidade da peça. O atrito no tubo guia pode causar alguns problemas de impressão já que promove o entupimento de filamento de natureza flexível. Porém, este tipo de desfecho não é preocupante dado que foi estabelecido produzir os provetes de estudo exclusivamente em PLA, que não faz parte do grupo dos elastómeros [48]. Consequentemente, tanto a extrusora como o motor de passo foram transpostos para o conjunto linear vertical (Figura 4.1).

4.2.2 Resolução de Movimento

A resolução do movimento consiste no incremento mínimo posicional, que pode ser fisicamente controlado através do *firmware* do equipamento. A parametrização dos valores de precisão do sistema foi determinada em comparação com outras máquinas de fabrico aditivo [33], onde foi possível averiguar que uma altura de construção de camada de pelo menos $0,1\text{ mm}$ será suficiente para o estudo em causa. Neste contexto, foi delineado uma resolução mínima de $10\text{ }\mu\text{m}$ para os eixos lineares, que corresponde a $1/10$ da altura de camada, e um valor alvo de $50\text{ }\mu\text{m}$ para o eixo rotativo, obtido em função do comprimento de arco da plataforma cilíndrica. Isto significa que, em qualquer momento do seu funcionamento, o menor movimento horizontal e vertical de que a máquina é capaz de executar deve ser menor ou igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, enquanto que o menor movimento angular possível deve ser menor ou igual a $50\text{ }\mu\text{m}$.

Os movimentos lineares são transmitidos segundo a rotação de porcas de conexão, por intermédio de fusos trapezoidais, que podem ser matematicamente traduzidos pela seguinte equação:

$$d_{min} = \frac{\theta_{min}}{2\pi} \times p \quad p \rightarrow \text{passo do fuso trapezoidal}$$

Dado que foi estabelecido reduzir a massa da carga deslocada (subconjunto de extrusão) em 4.2.1, é seguro afirmar que os motores de passo, inicialmente definidos para os eixos lineares, são igualmente aptos.

Assim, para o subconjunto linear horizontal foi adquirido um motor Nema 17HS19, com uma resolução de $1,8^\circ$ e um *microstepping* de $1/16$, juntamente com um fuso trapezoidal de diâmetro e passo no valor de 8 mm .

$$d_{min}(\text{horizontal}) = \frac{\theta_{min}}{2\pi} \times p = \frac{(1,8^\circ \times 1/16) \times \frac{2\pi}{360}}{2\pi} \times 8 = 2,5 \mu\text{m} < 10 \mu\text{m}$$

Analogamente ao subconjunto linear horizontal, os fusos trapezoidais utilizados no eixo vertical empregam um sistema de engrenagem helicoidal, conectados aos motores de passo por meio de acopladores de eixo flexível, e dispõem de um diâmetro de 8 mm , mas com um avanço de 2 mm por rotação.

$$d_{min}(\text{vertical}) = \frac{\theta_{min}}{2\pi} \times p = \frac{(1,8^\circ \times 1/16) \times \frac{2\pi}{360}}{2\pi} \times 2 = 0,625 \mu\text{m} < 10 \mu\text{m}$$

O sistema de engrenagens é caracterizado por uma transmissão de dentes em espinha (*herringbone*), que é acionada por um motor de passo idêntico aos anteriores. Este tipo de sistema permite uma operação suave e alinhada, pois não transmite qualquer esforço axial.

A resolução angular foi definida relativamente ao comprimento de arco correspondente a uma altura de construção de 50 mm , que estabelece uma especificação alvo no valor de $50 \mu\text{m}$ para este parâmetro.

No que concerne às velocidades e acelerações, é seguro inferir que valores elevados tendem a prejudicar a qualidade de impressão. Por este motivo foram respeitadas as especificações estabelecidas no projeto original, uma vez que foram utilizados valores conservadores.

4.2.3 Dimensionamento do Provete de Estudo

O volume de impressão do equipamento depende essencialmente do dimensionamento estabelecido para o provete de estudo, cuja geometria foi definida segundo a norma EN ISO 6892-1, direccionada para provetes de geometria tubular oca. Geralmente um provete de estudo tem as extremidades mais largas do que a sua zona intermédia (L_c), uma vez que se destinam a ser fixadas pelas garras das máquinas de ensaio universais. Esta zona tubular intermédia deve ser conectada às extremidades por meio de superfícies de transição, definidas por um raio (R), como sugere a Figura 4.5. Estes valores foram aproximados das proporções inicialmente estabelecidas [49], tal como o diâmetro da plataforma cilíndrica (d), onde se destina a construção do provete de estudo.

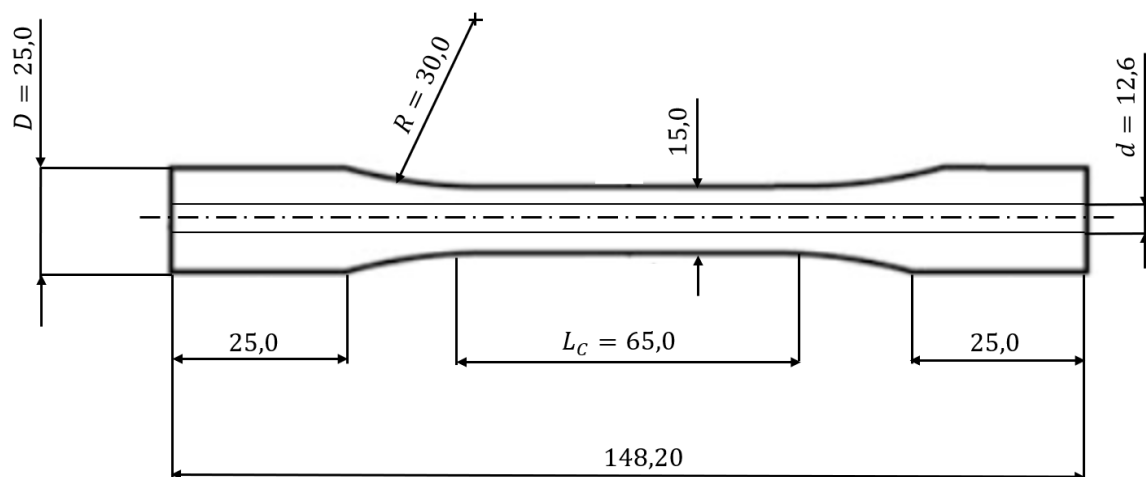


Figura 4.5 Dimensionamento do Provete de Estudo [47], [50]

É importante reconhecer que as especificações alvo consideradas na Tabela 4.1, como o próprio nome indica, podem não vir a ser atingidas no final do projeto, uma vez que podem ser efetuadas várias alterações em benefício das decisões realizadas no futuro.

Tabela 4.1 Redefinição das Especificações

	Antes	Depois
Tecnologia	FDM	FDM
Configuração	Cilíndrica	Cilíndrica
Número de extrusoras	1	1
Tipo de Extrusor	<i>Direct Drive</i>	<i>Bowden</i>
Número de <i>hotend</i>	1	1
Temperatura do <i>hotend</i>	300°C	210°C
Diâmetro do bocal de extrusão	0,4 mm	0,4 mm
Diâmetro de filamento	1,75 mm	1,75 mm
Aquecimento da plataforma	Não	Não
Dimensões da plataforma	$d \cong 12,6 \text{ mm} \times L \geq 225 \text{ mm}$	$d \cong 12,6 \text{ mm} \times L \geq 150 \text{ mm}$
Altura mínima de camada	0,1 mm	0,1 mm
Altura de construção	$\geq 100 \text{ mm}$	$\geq 25 \text{ mm}$
Resolução vertical	$\geq 10 \mu\text{m}$	$\geq 10 \mu\text{m}$
Resolução horizontal	$\geq 10 \mu\text{m}$	$\geq 10 \mu\text{m}$
Resolução angular	50 μm	50 μm
Velocidade tangencial	$\leq 100 \text{ mm/s}$	$\leq 100 \text{ mm/s}$
Velocidade linear	$\leq 200 \text{ mm/s}$	$\leq 200 \text{ mm/s}$
Aceleração linear	$\leq 3000 \text{ mm/s}^2$	$\leq 3000 \text{ mm/s}^2$
Velocidade angular	$\leq 15.87 \text{ rad/s}$	$\leq 15.87 \text{ rad/s}$
Aceleração angular	$\leq 100 \text{ rad/s}^2$	$\leq 100 \text{ rad/s}^2$
Tipo de Estrutura	Aberta	Aberta

4.3 Alterações de Projeto

4.3.1 Conjunto Rotativo

A validação do conjunto rotativo é verificada pelo suporte angular, que não só aloca a plataforma cilíndrica, como também confere o momento necessário para efetuar a sua rotação, e por um suporte contraponto, que é responsável por garantir a estabilidade e alinhamento da plataforma mencionada, durante a impressão.

Uma vez removida a necessidade de aquecer a plataforma rotativa, é possível distinguir vários elementos obsoletos no desenvolvimento deste subconjunto, representados na Figura 4.6:

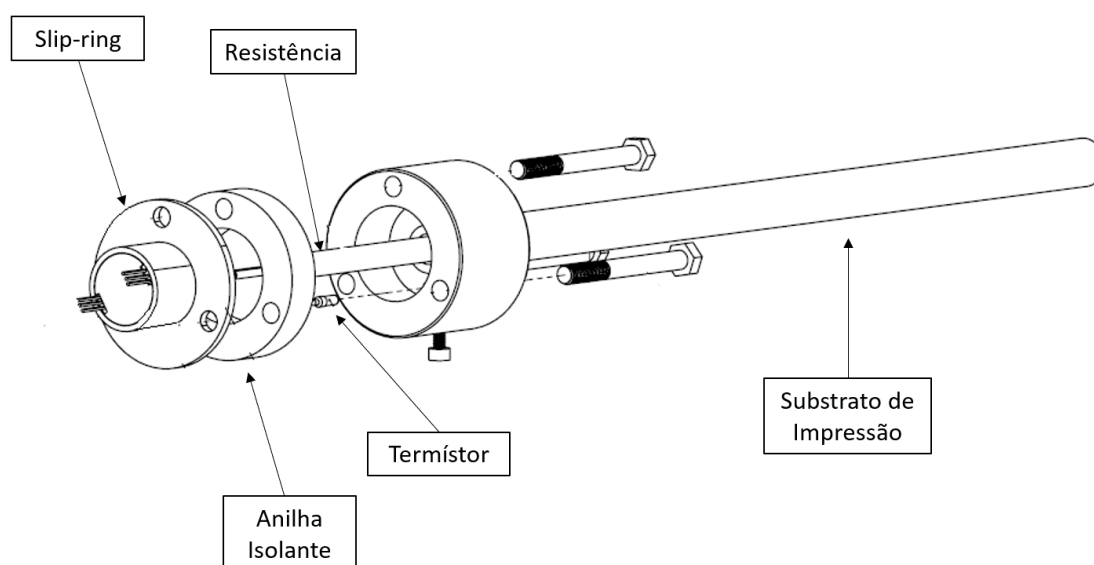


Figura 4.6 Plataforma de extrusão inicialmente proposta

De facto, apenas a plataforma cilíndrica se mantém indispensável para especificações do conjunto. Todavia, a geometria oca mencionada em cima foi igualmente rejeitada devido ao suprimento dos restantes elementos. No seu lugar foi adquirido um varão normalizado em aço maciço já que é igualmente acessível, mas menos propenso a deformar que o alumínio, quando submetido à aplicação de cargas. Em consequência desta normalização, o diâmetro foi reduzido de 12,6 para 12 *mm*, devido à sua disponibilidade. A configuração inicialmente proposta para o acoplamento da plataforma cilíndrica foi concebida com o intuito de viabilizar uma desmontagem simples e propícia à remoção da peça depois de completar o processo de impressão, como sugere a Figura 4.7.

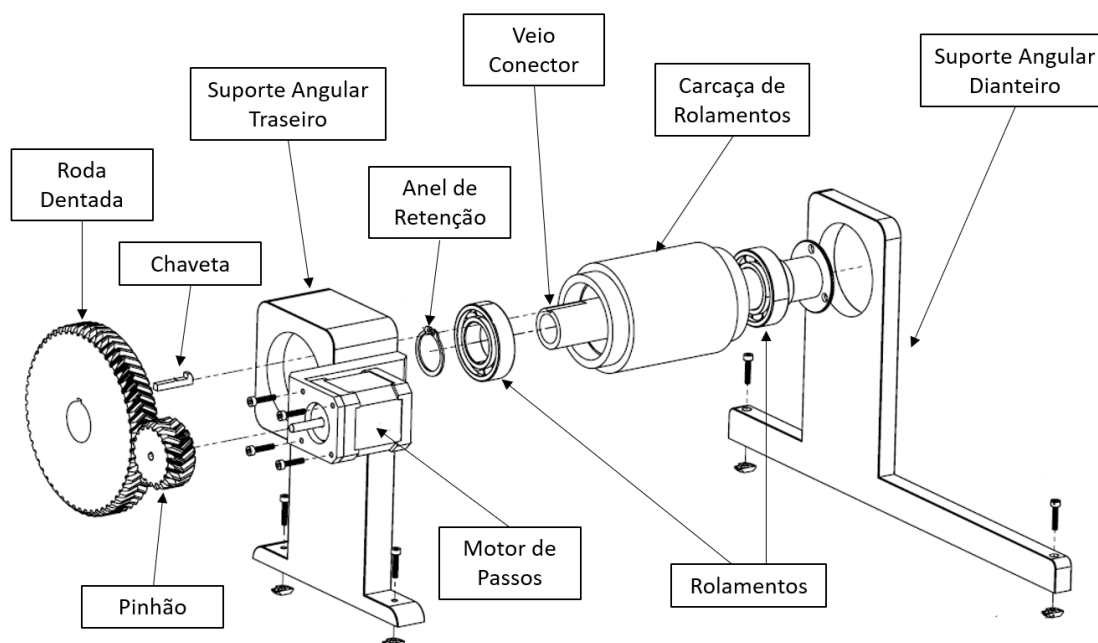


Figura 4.7 Vista explodida do Suporte angular inicialmente proposto

Contudo, esta montagem ocupa um volume relevante para efetivação do processo de extrusão e a sua geometria foi considerada demasiado dispendiosa para ser fabricada, levando em consideração o orçamento planeado. Por este motivo, foi eliminado o suporte dianteiro, o veio conector e a carcaça dos rolamentos, disponibilizando assim mais espaço útil para a concretização dos provetes. Consequentemente, foi necessário redesenhar o apoio duplo numa única consola conforme as seguintes exigências:

- Respeitar a distância entre eixos das engrenagens
- Permitir aparafusamento ao motor de passo
- Garantir um acoplamento ajustado de dois rolamentos de esferas
- Permitir aparafusamento ao perfil estrutural
- Apto para ser produzido em PETg

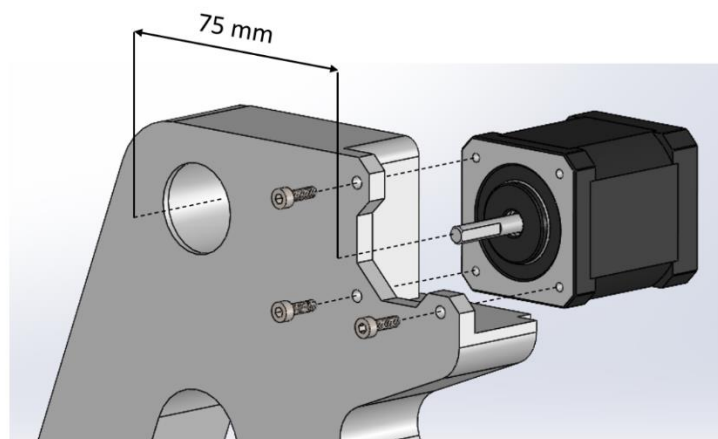


Figura 4.8 Montagem do Motor de passo ao Suporte angular

O acoplamento dos rolamentos foi possibilitado através de um furo passante (Figura 4.8) e interposto por um espaçador, igualmente fabricado em PETg. O restringimento desta montagem é garantido por uma parede, resultando num aumento da sua estabilidade e facilidade de encaixe ao perfil estrutural, que é reforçado pelo aparafusamento de porcas roscadas em T (Figura 4.9).

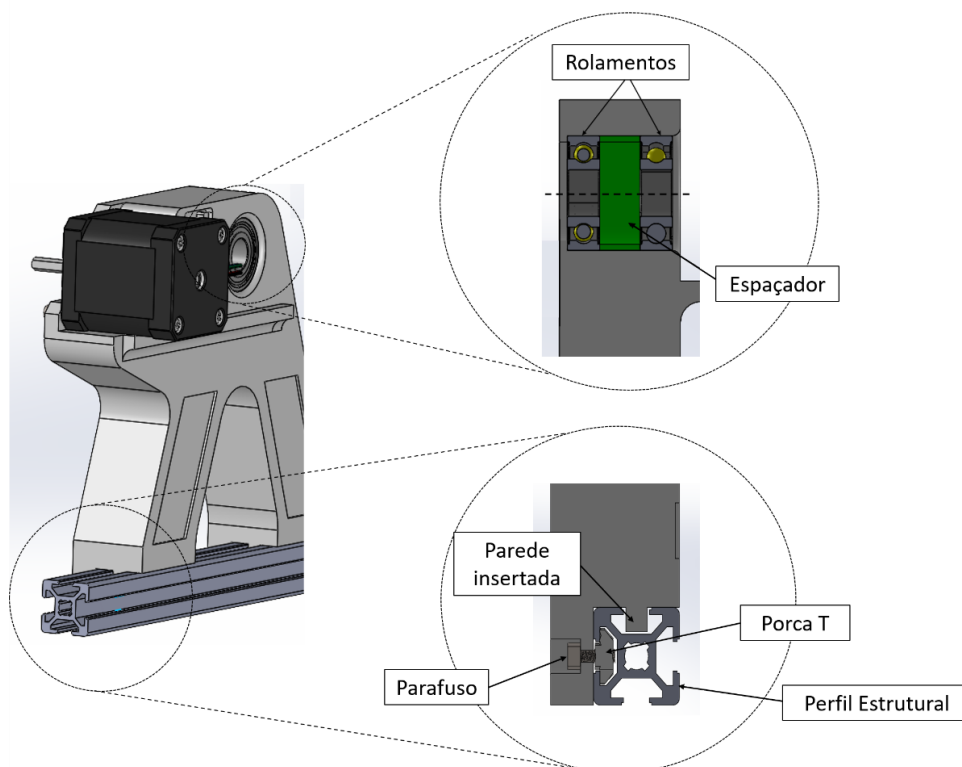


Figura 4.9 Detalhes de montagem do Suporte Angular

Apesar de ter sido mantido o sistema de transmissão, foi necessário adaptar a roda dentada para efetuar o acoplamento da plataforma cilíndrica, agora definida por um varão normalizado. A ideia aqui foi constranger o varão maciço através de um aperto roscado sobre um corte em D, semelhante ao veio dos motores de passo. Esta adaptação pode ser observada na Figura 4.10.

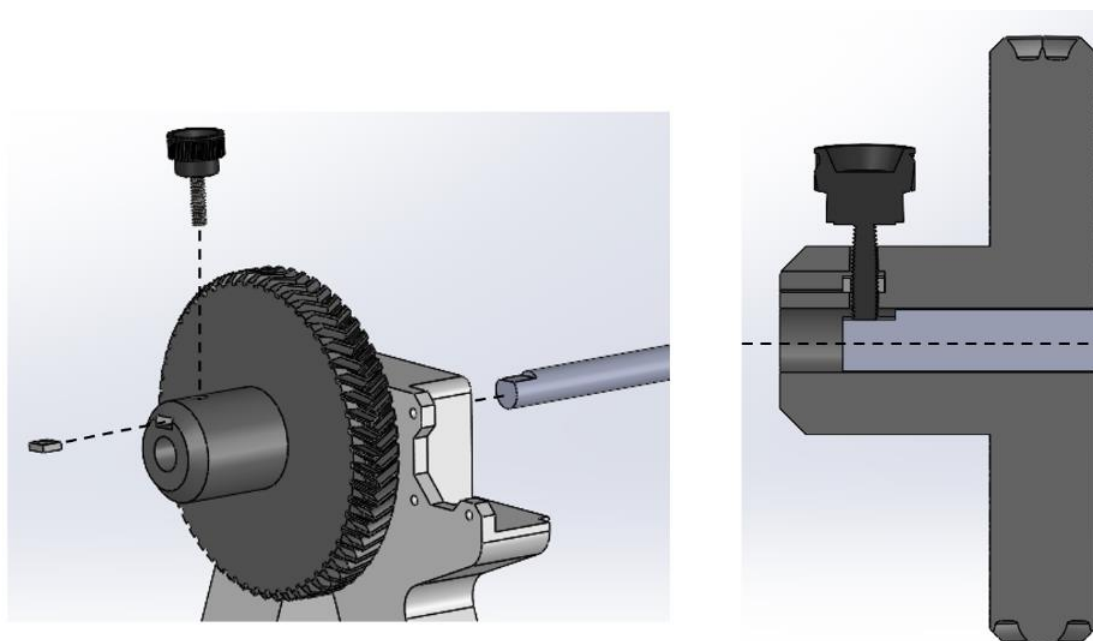


Figura 4.10 Fixação da plataforma cilíndrica ao sistema de transmissão

A conceptualização inicial desenvolvida para o sistema de contraponto foi igualmente conservada, no entanto o alinhamento da plataforma rotativa foi simplificado. O ponto rotativo foi substituído por um rolamento de esferas, com um diâmetro interior superior a 12 *mm*, de forma a integrar um acoplador auxiliar, que acompanha a rotação executada pela plataforma cilíndrica, como sugere a Figura 4.11.

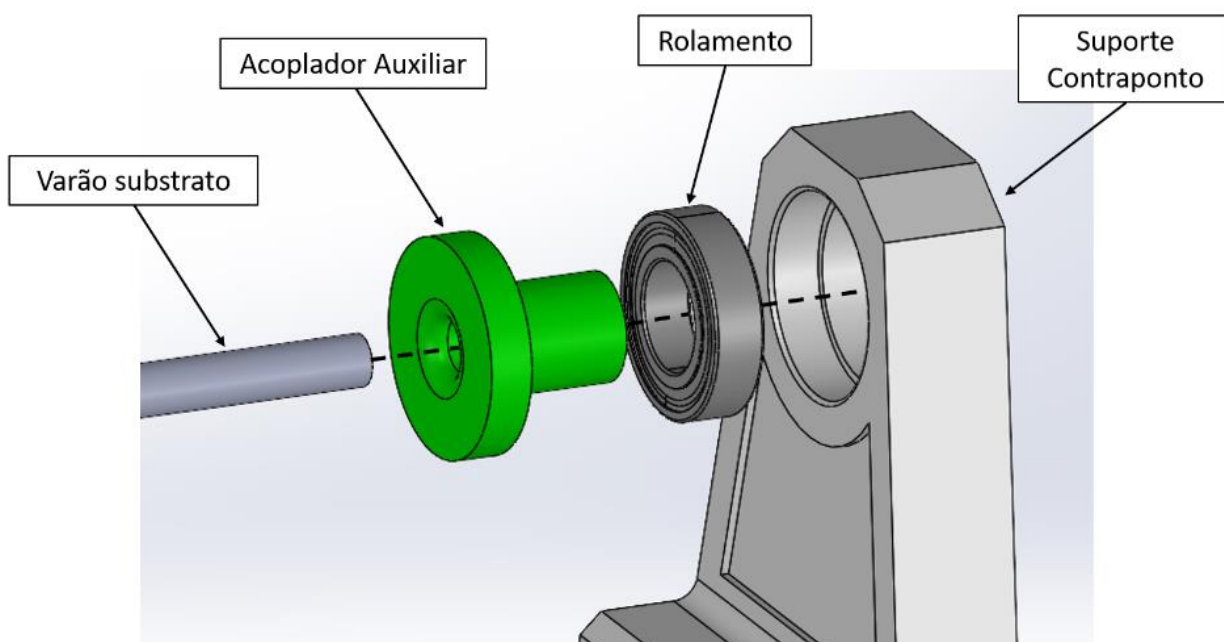


Figura 4.11 Acoplamento da plataforma cilíndrica ao suporte contraponto

De forma idêntica aos suportes horizontais, a inserção dos rolamentos lineares de esferas no suporte contraponto permite o seu deslocamento, através de varões guia, para facilitar a remoção dos provetes. A fixação colinear deste sistema é garantida por parafusos recartilhados (Figura 4.12) que permitem um aperto firme sem a utilização de ferramentas auxiliares.

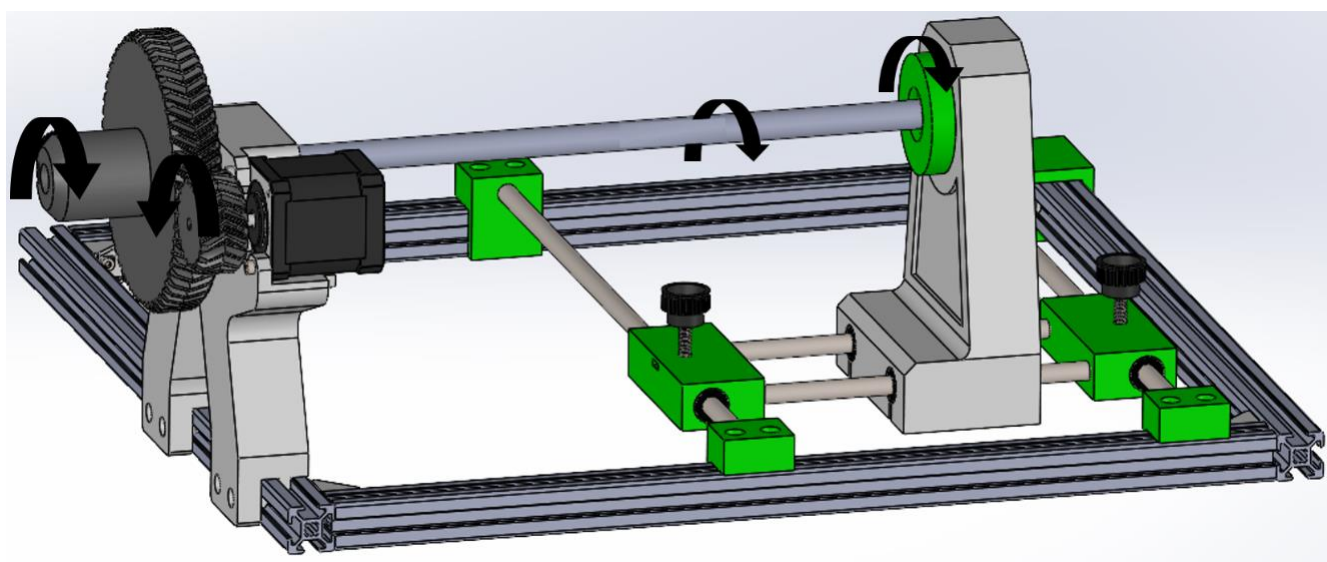


Figura 4.12 Vista geral do conjunto rotativo

4.3.2 Conjunto Linear Horizontal

O objetivo deste subconjunto passa por realizar o deslocamento do bocal de extrusão, segundo o eixo X e paralelamente à plataforma cilíndrica. Isto é possibilitado através da ação do motor de passo fixado no suporte horizontal esquerdo, que transmite a sua rotação ao fuso trapezoidal, conectado por um acoplamento flexível. Como sugere a Figura 4.13, o alinhamento contínuo do eixo é auxiliado por uma guia linear aparafusada ao perfil, que permite a deslocação do carro através de mangas de recirculação de esferas. Podia-se ter optado por um varão de aço liso para substituir a guia linear, já que é relativamente mais barato, mas dado que transfere mais vibração ao conjunto, resultando numa maior instabilidade de impressão, esta alternativa foi descartada.

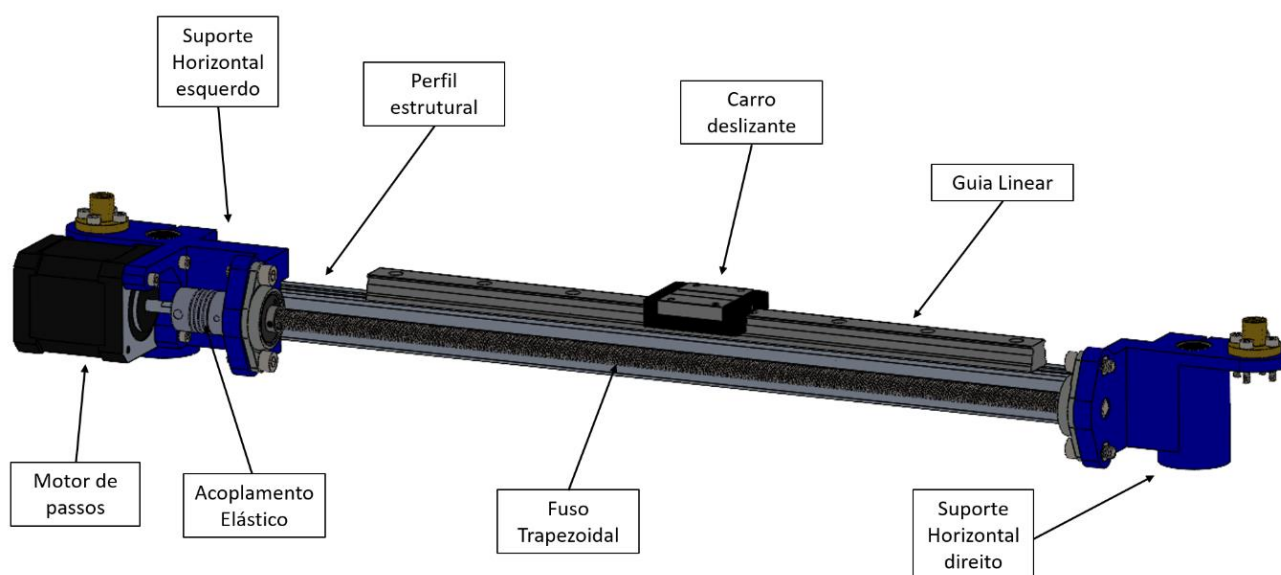


Figura 4.13 Vista geral do subconjunto linear horizontal

Apesar do comprimento útil de extrusão inicialmente projetado (225 mm) cumprir com a especificação redefinida ($> 150\text{ mm}$), este valor foi considerado excessivo, já que a diferença traduz 50% do necessário para o fabrico dos provetes de estudo, definidos em 4.2.3.

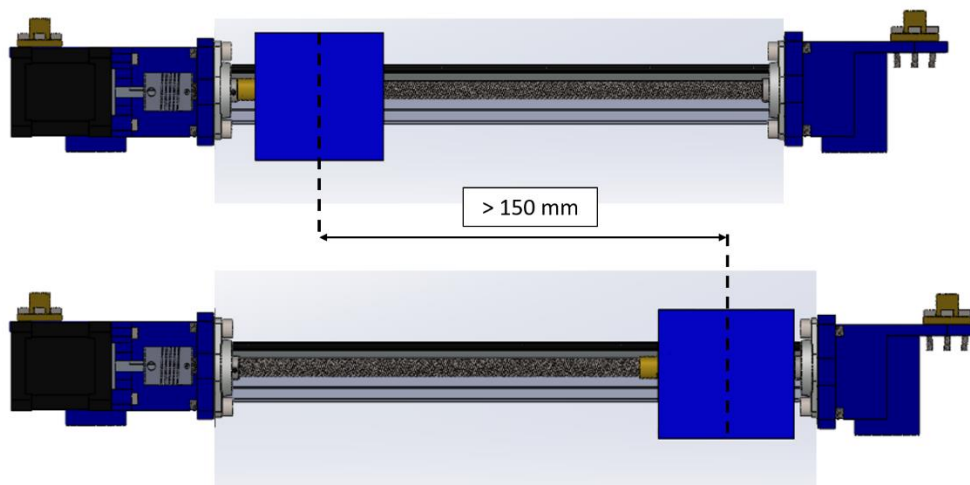


Figura 4.14 Distância percorrida correspondente ao eixo X

Por este motivo, foi decidido alterar o dimensionamento dos elementos associados à efetivação do deslocamento linear, nomeadamente o fuso trapezoidal, a guia e a viga que permite a sua fixação. Para tal, é necessário contabilizar o limite correspondente à posição de encosto entre a porca de conexão integrada no suporte de extrusão, e o rolamento de chumaceira, como sugere a Figura 4.14.

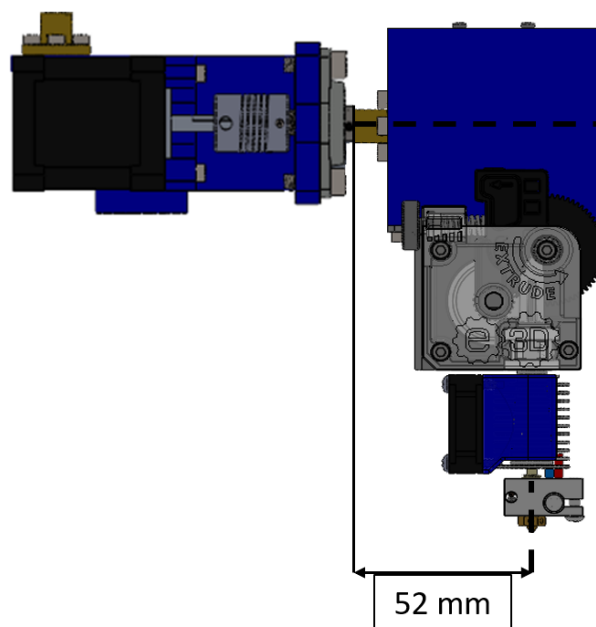


Figura 4.15 Encosto do suporte de extrusão

Assim, a distância percorrida pelo suporte de extrusão, inicialmente definida para 354 *mm*, foi reduzida para um valor de:

$$52 + 150 + 52 = 254 \text{ mm}$$

Em consequência disto, os elementos referidos anteriormente sofrem uma redução no seu comprimento no valor de 100 *mm*, relativamente ao valor inicialmente estabelecido, como propõe a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Redimensionamento dos elementos longitudinais

Componente	Comprimento (mm)	
	Antes	Depois
Guia linear	370	270
Fuso trapezoidal	400	300
Perfil estrutural	430	330

Os desenhos para os suportes deste subconjunto revelaram-se incompletos, após a tentativa de reproduzir este modelo sem sucesso na máquina Prusa. Por esta razão, foram efetuadas algumas alterações para simplificar a sua geometria, sem alterar a distância entre os eixos de montagem (Figura 4.16).

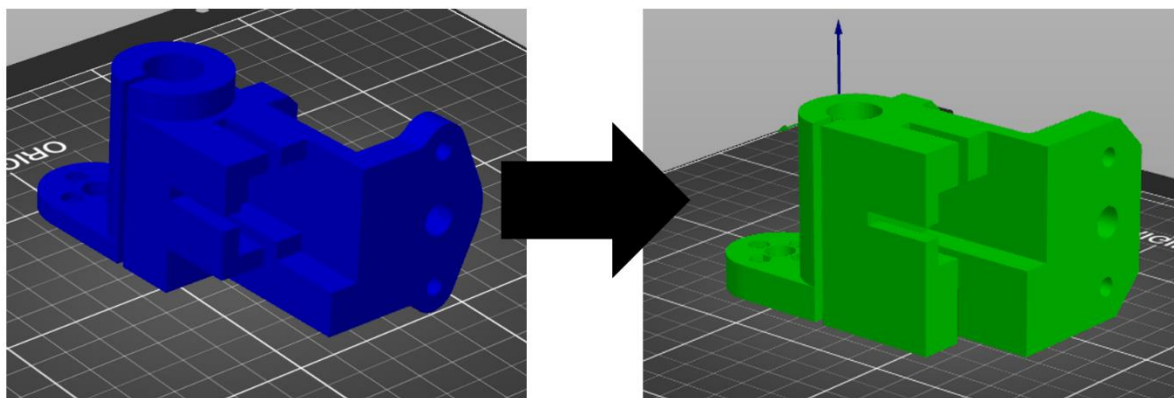


Figura 4.16 Atualização dos suportes horizontais

Devido às alterações efetuadas no subconjunto rotativo, foi conveniente inverter a montagem dos suportes horizontais. Ou seja, a montagem com maior volume de ocupação, correspondente ao aparafusamento do motor, passou a ser efetuada no flanco direito, já que o suporte de contraponto impossibilita a extrusão neste espaço (Figura 4.17).

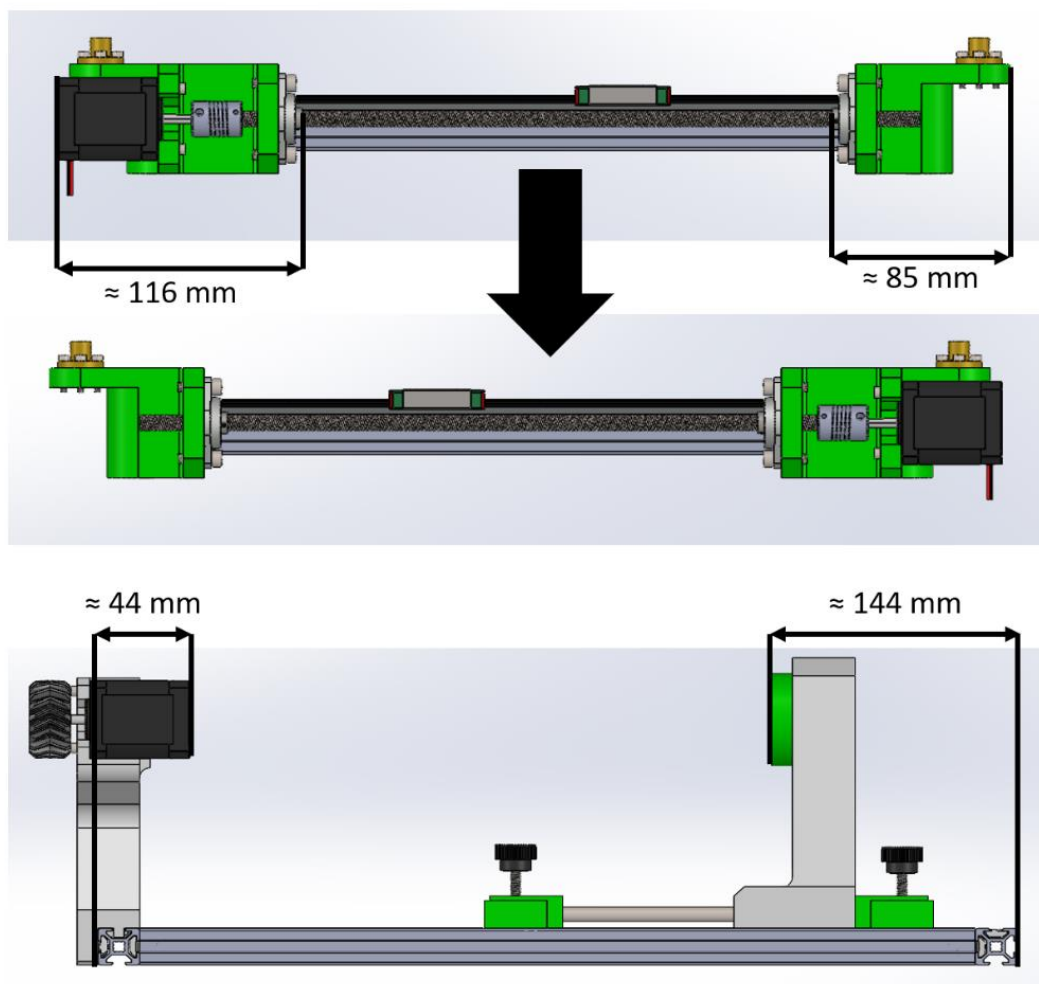


Figura 4.17 Inversão da posição dos suportes horizontais

4.3.3 Conjunto de Extrusão

Este subconjunto é integrado pelo *hotend* e o suporte de extrusão. Através da Figura 4.18, é possível compreender que o suporte de extrusão foi inicialmente idealizado para viabilizar uma configuração *direct drive* por intervenção de um suporte auxiliar, que estabelece o acoplamento entre o motor e a extrusora. Considerando que estes últimos elementos referidos foram transpostos para o subconjunto linear vertical, conforme foi estabelecido em 4.2.1, tornou-se evidente a remoção do suporte auxiliar deste conjunto.

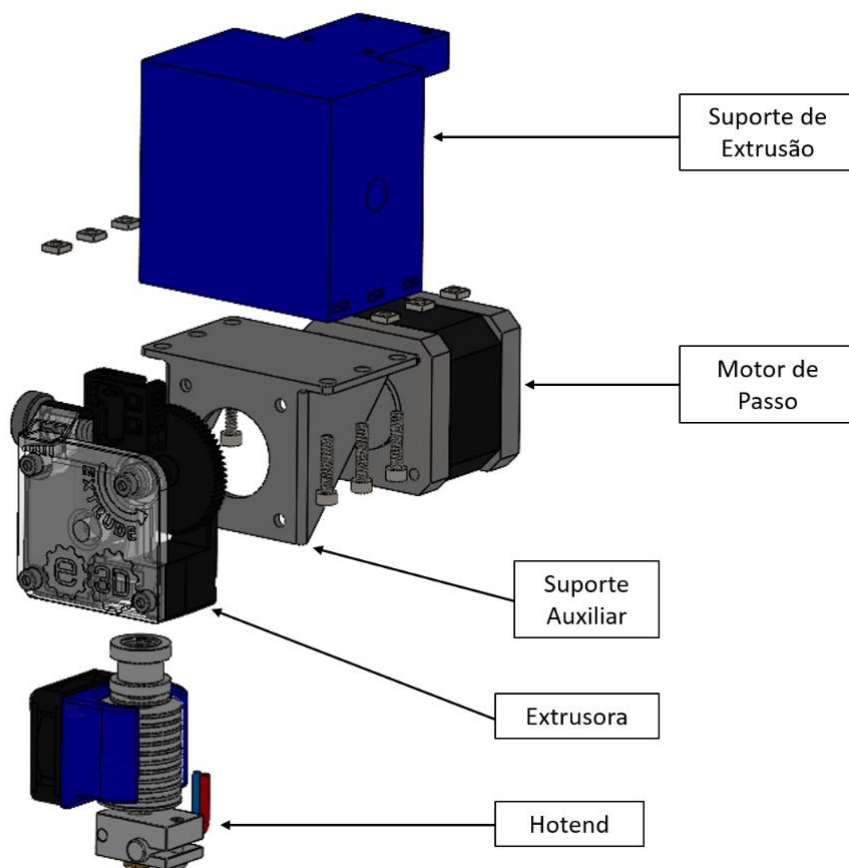


Figura 4.18 Vista explodida do suporte de extrusão inicialmente proposto

Perante este cenário, surgiu a necessidade de redesenhar o suporte de extrusão segundo as especificações definidas, respeitando as seguintes exigências:

- Aparafusamento ao carro deslizante.
- Cumprir a distância estabelecida entre o eixo do fuso trapezoidal e a montagem ao carro.
- Adicionar uma porca de conexão na extremidade oposta.
- Garantir um acoplamento ajustado ao *hotend*.

Com o objetivo de reduzir o material utilizado, o aparafusamento ao carro foi efetuado segundo dois rasgos longitudinais, como indica a Figura 4.19.

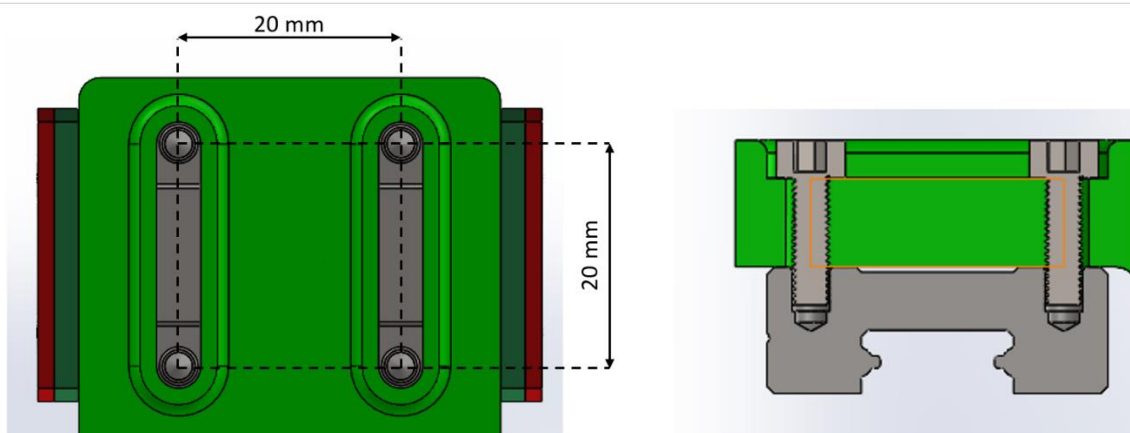


Figura 4.19 Montagem do suporte de extrusão ao carro

O dimensionamento entre o eixo de montagem do carro e o fuso trapezoidal foi estabelecido através da distância entre o encastramento do perfil estrutural e o eixo do rolamento de chumaceira representado na Figura 4.20.

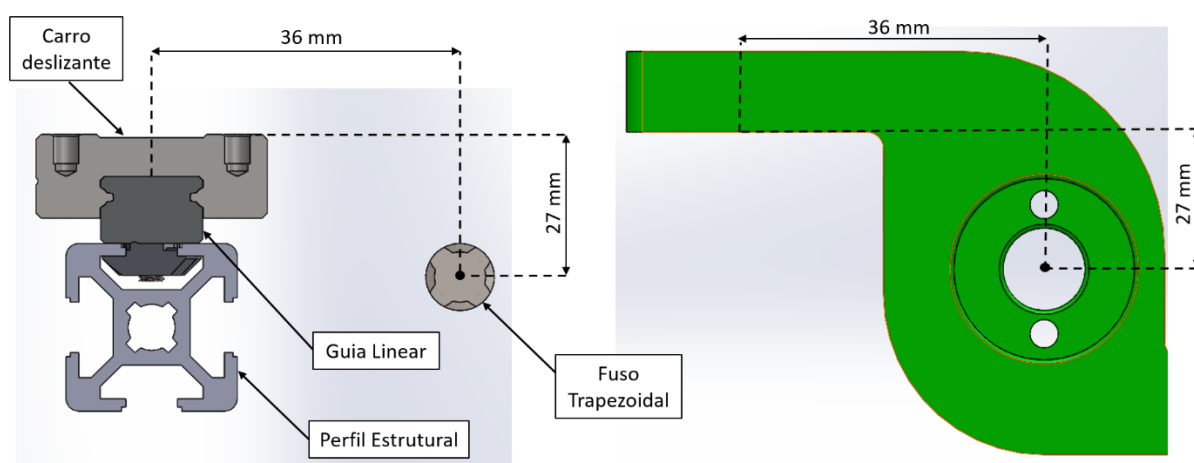


Figura 4.20 Distância entre o eixo de montagem do fuso e do carro deslizante

Para adicionar uma porca de conexão, é necessário contabilizar o passo do fuso trapezoidal. Sabendo que as porcas de conexão dispõem de 4 entradas distanciadas igualmente entre si, é fundamental que estas sejam aparafusadas numa das quatro posições em que os furos se encontrem alinhados, como apresentado na Figura 4.21.

Uma vez que o fuso trapezoidal efetua um avanço de 8 mm por cada rotação completa (360°), podemos concluir que a distância entre as duas porcas deve cumprir um valor múltiplo de 4 para estabelecer uma montagem eficiente. Foi definida uma distância no valor de 28 mm , o que significa que a porca de conexão efetua $28/8 = 3,5$ voltas nesse comprimento, respeitando assim a especificação de montagem imposta anteriormente.

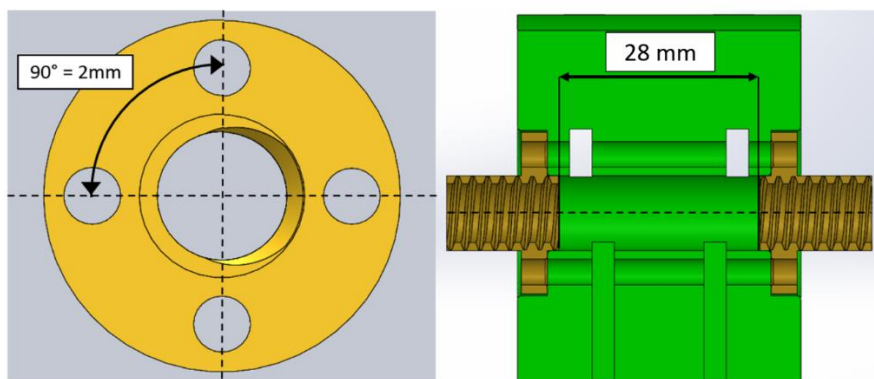


Figura 4.21 Passo associado à montagem da porca de conexão

O perfil de encaixe destinado ao *hotend* foi dimensionado de forma a permitir uma montagem ajustada o suficiente para exigir a utilização de alguma pressão sobre este para a sua concretização. Ainda assim, é aparafusada uma braçadeira de reforço ao suporte de extrusão, prevenindo a existência de folgas e qualquer tipo de vibração associada ao funcionamento do conjunto. Finalmente, foram preparadas cavidades para a inserção de porcas quadradas destinadas ao aparafusamento das roscas de conexão e da braçadeira de reforço, como sugere a Figura 4.22.

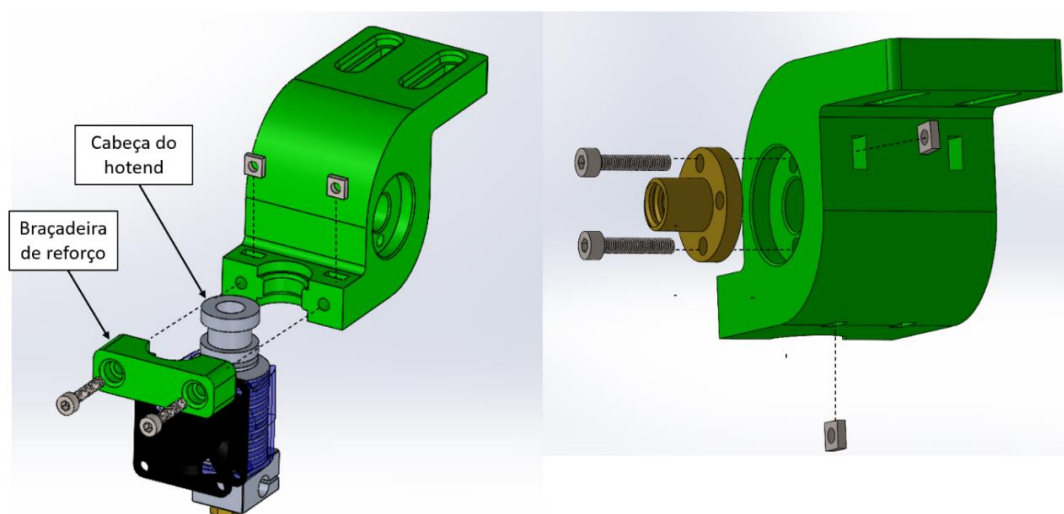


Figura 4.22 Vista explodida do acoplamento do *hotend* ao suporte de extrusão

4.3.4 Conjunto Linear Vertical

O Conjunto linear vertical representa o sistema de elevação do equipamento, que é traduzido unicamente pelo eixo Z. Tendo em consideração que a ascensão da plataforma cilíndrica implicaria também a do sistema de contraponto e, portanto, todo o conjunto rotativo, este sistema compreende apenas a elevação do conjunto linear horizontal.

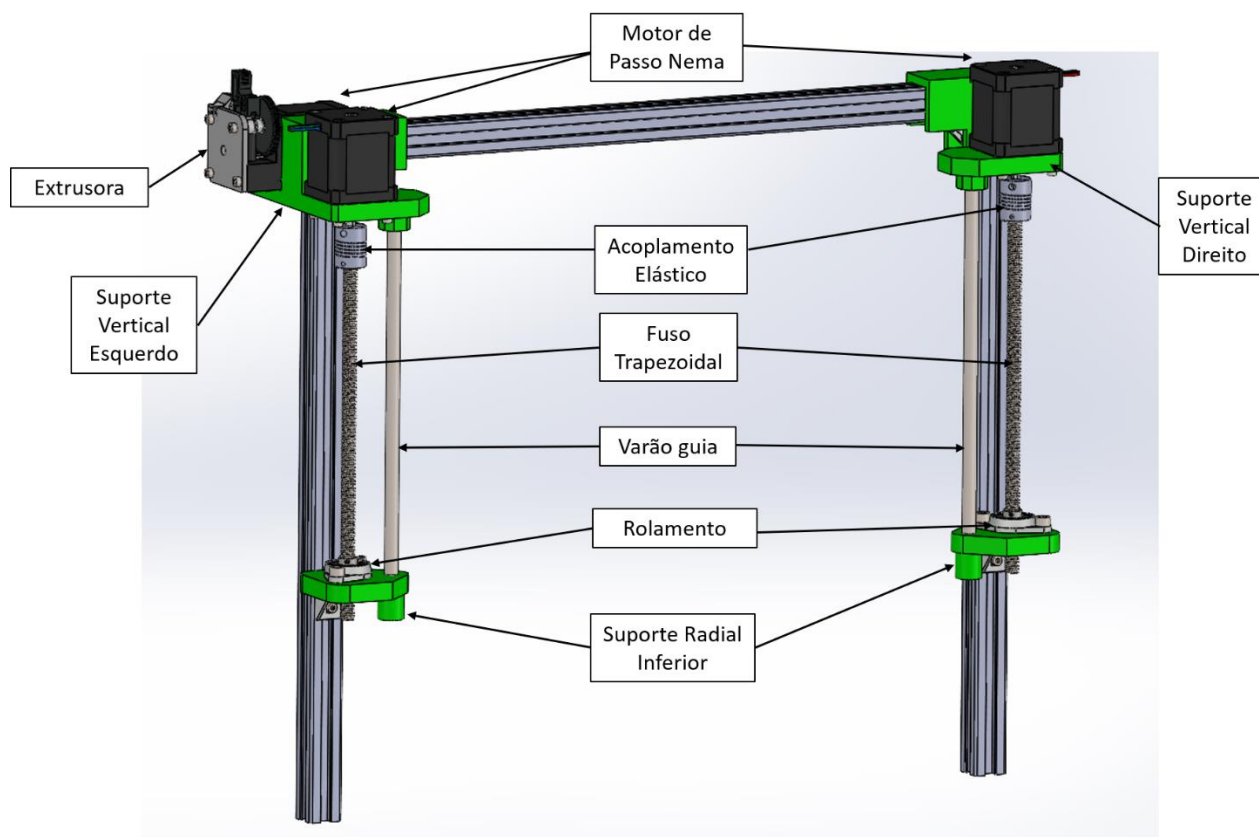


Figura 4.23 Vista geral do conjunto linear vertical

Tal como sugere a Figura 4.23, todo o subconjunto é apoiado pela estrutura de alumínio através da montagem dos suportes verticais que, analogamente aos suportes do subconjunto horizontal, são inseridos por pressão. A utilização de dois motores de passo para o eixo Z, executando os mesmos movimentos sincronizados, foi considerada imprescindível para garantir que o carro permaneça nivelado. Em alternativa, poderia ter sido usado um sistema de correia, mas pode facilmente introduzir problemas de nivelamento devido a folgas e perdas por atrito. Esta rotação é traduzida em movimento vertical linear, através das porcas instaladas no conjunto linear horizontal.

Conforme foi definido no capítulo 4.2, foram efetuadas algumas alterações geométricas no suporte vertical esquerdo, para permitir a montagem da extrusora segundo a configuração *bowden* especificada.

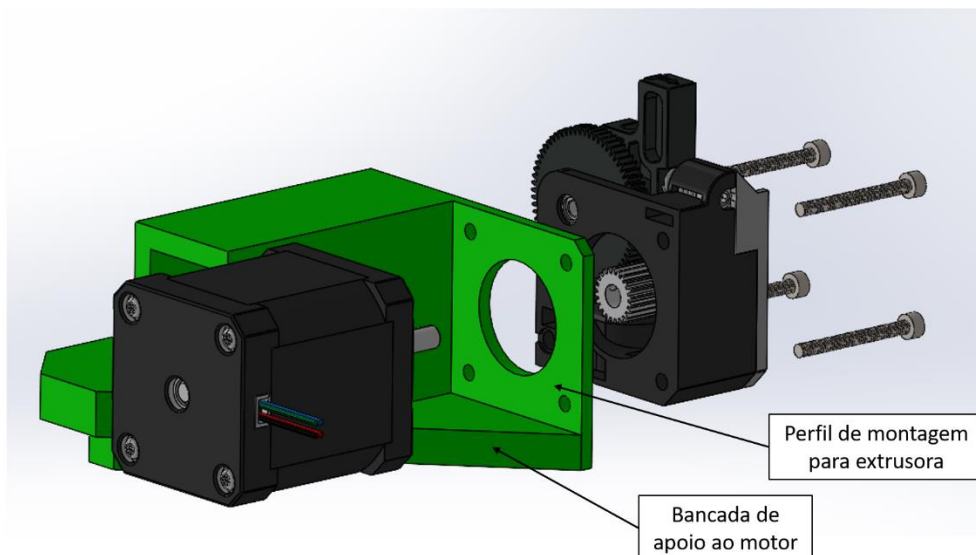


Figura 4.24 Montagem da extrusora e motor de passo ao suporte vertical esquerdo

Foi adicionada uma bancada para suportar o motor e integrado um perfil com quatro entradas, semelhante ao do suporte de montagem utilizado inicialmente, como se encontra representado na Figura 4.24.

Para garantir o alinhamento do conjunto, juntamente com os fusos trapezoidais, são utilizados varões guia em aço encastrados nos suportes radiais inferiores. Estes suportes são constrangidos através do aparafusamento às vigas estruturais por meio de uniões de canto. Sem comprometer a eficiência de encastramento realizado por estes suportes e com a finalidade de poupar material, foram aplicadas algumas alterações geométricas (Figura 4.25).

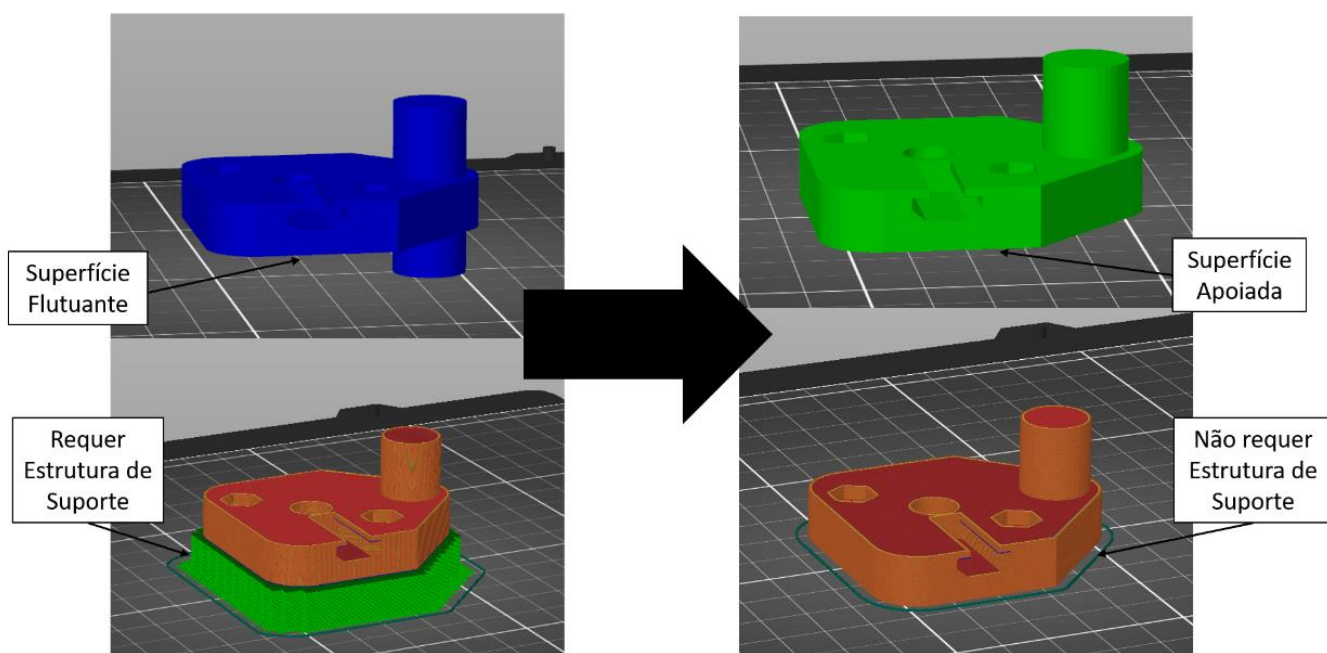


Figura 4.25 Atualização do suporte radial inferior

Analogamente ao conjunto linear horizontal, apesar de limitar os varões guia, estes suportes viabilizam a rotação dos fusos trapezoidais através de rolamentos em chumaceira, que efetuam a sua conexão ao eixo por intermédio de parafusos sextavados sem cabeça (Figura 4.26).

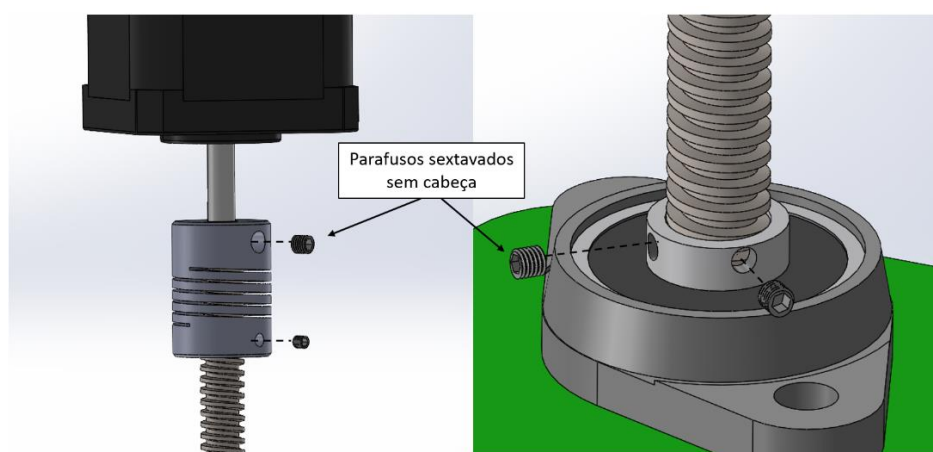


Figura 4.26 Aparafusamento dos rolamentos em chumaceira

Foi necessário desenhar uma estrutura de raiz para integrar os sensores fim de curso, tendo em conta que este detalhe não foi idealizado no projeto inicial. A sua geometria foi definida pelos limites associados a cada eixo linear, que são agora conhecidos. A ideia aqui é ativar a patilha mecânica dos sensores, sem que as porcas de conexão encostem na chumaceira do rolamento (eixo X) e no acoplamento elástico (eixo Z), como evidencia a Figura 4.27.

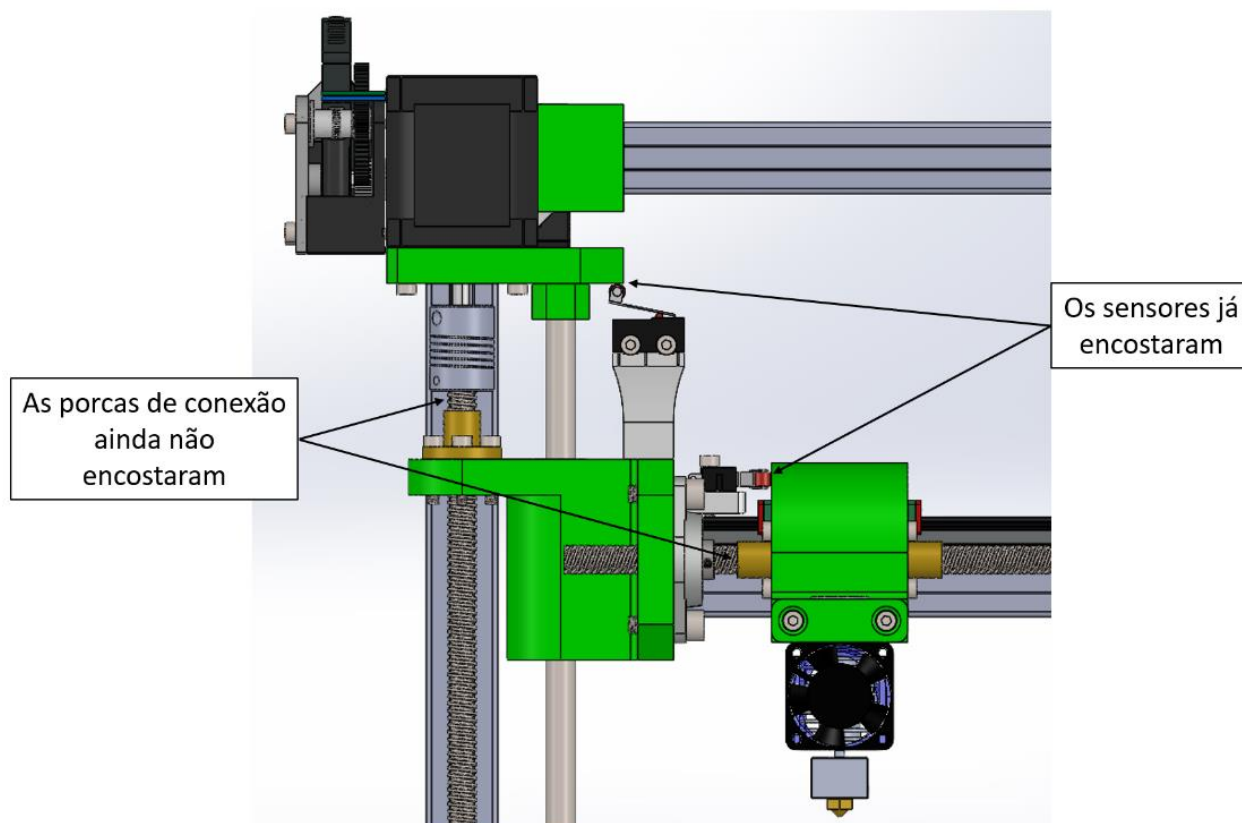


Figura 4.27 Funcionamento esperado dos sensores fim de curso

O suporte dos sensores fim de curso tira partido do rasgo, localizado no suporte horizontal esquerdo, para estabelecer a sua fixação por encaixe, e efetua o aparafusamento dos sensores através de porcas hexagonais embutidas.

Tendo em consideração que a massa do suporte vertical esquerdo foi duplicada pela adição de outro motor de passo e que as bobinas de filamento chegam aos 2 Kg , tornou-se sensato remover o suporte destas bobinas (Figura 4.28).

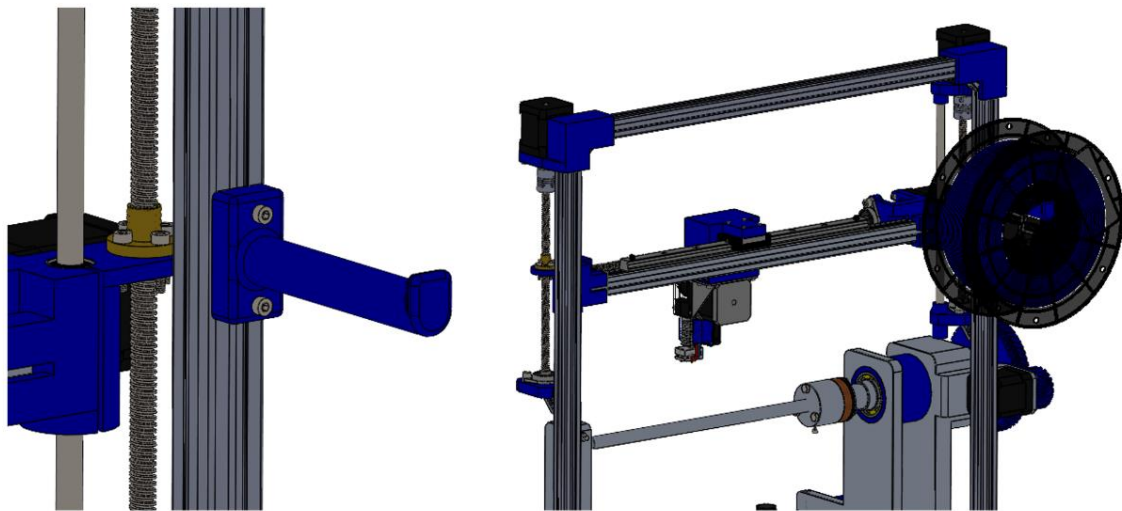


Figura 4.28 Visão geral do suporte de bobine inicialmente proposto

4.3.5 Estrutura

Atendendo a importância da vibração no decurso do processo de extrusão, o suporte do equipamento deve constituir uma posição estável. Para este efeito, tal como já foi frequentemente mencionado, a estrutura é constituída por vigas perfiladas 20x20 em alumínio anodizado, cuja montagem é consolidada através do aparafusamento de uniões de canto angulares (90°) por meio de porcas roscadas em T (Figura 4.29).

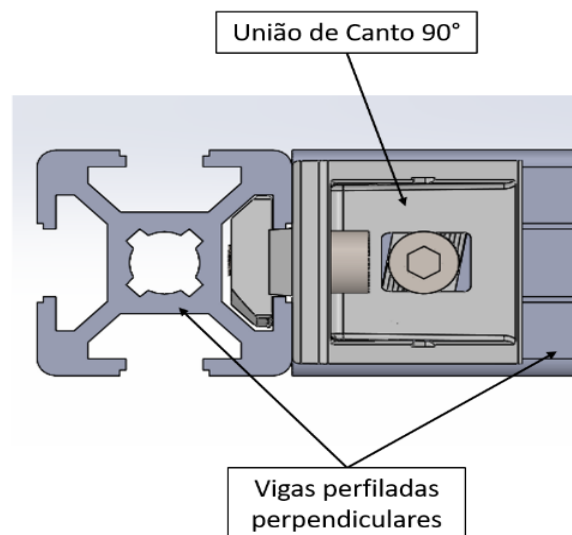


Figura 4.29 Aparafusamento de uma união de canto ao perfil estrutural

Após as alterações efetuadas aos restantes subconjuntos, foi conveniente suprimir a viga auxiliar destinada à montagem do sistema de contraponto, poupando assim um total de 1300 mm de perfil estrutural relativamente ao projeto inicialmente proposto (Figura 4.30).

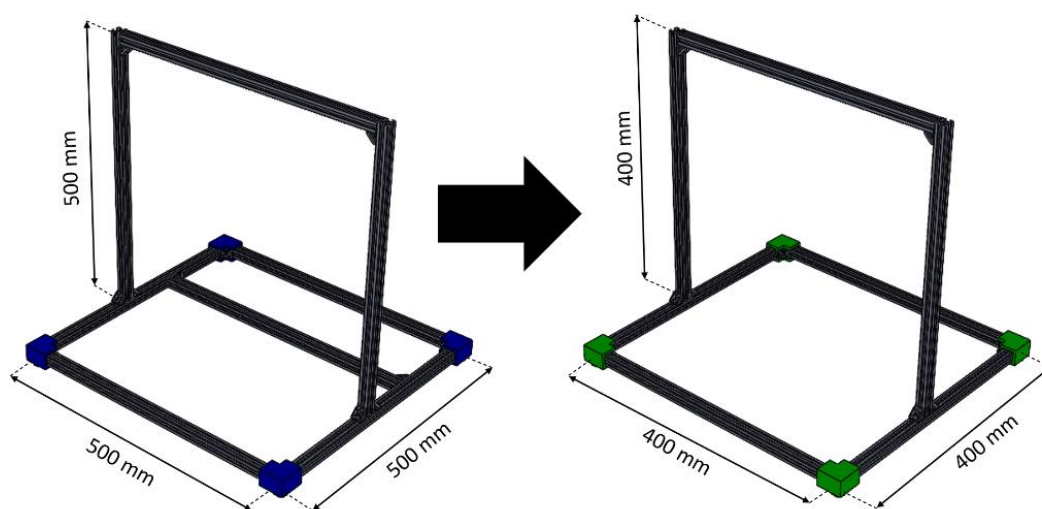


Figura 4.30 Estrutura inicialmente proposta (esquerda) e atualizada (direita)

Em último lugar foram fabricados os pés, cuja montagem é localizada nos cantos inferiores da estrutura com o intuito de elevar uniformemente a mesma. Apesar de serem resumidos por componentes simples de apoio, os pés revelaram-se imprescindíveis para estabelecer uma referência de montagem alinhada. Como é possível observar na Figura 4.31, o acoplamento do *hotend* estabelece a perpendicularidade axial com a plataforma rotativa, quando o suporte angular se encontra constrangido entre o pé e a união de canto.

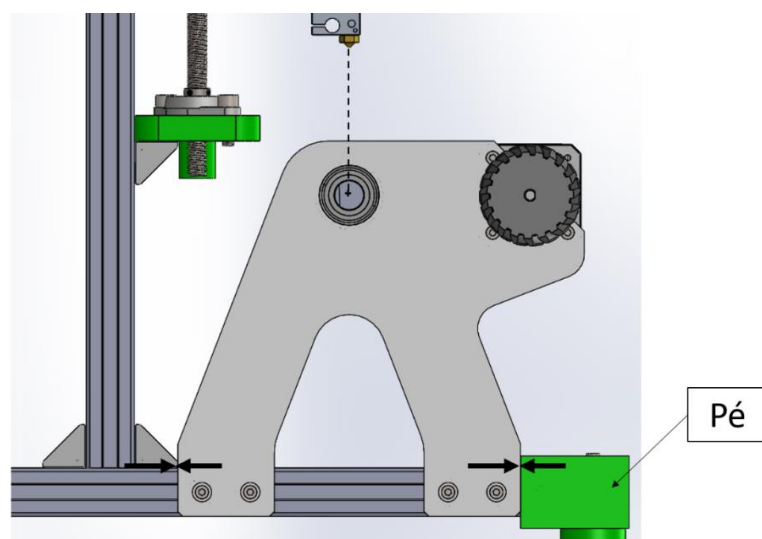


Figura 4.31 Ilustração do auxílio de montagem concedido pelo pé

5 ELETRÓNICA E PROGRAMAÇÃO

Ao contrário do projeto mecânico e estrutural, muitos dos aspetos eletrónicos e de *software* do projeto são construídos usando soluções pré-existentes. Além disso, foram implementadas algumas modificações para adequar o equipamento às especificações do projeto.

Relembrando o processo de fabrico associado à tecnologia FDM descrito em 2.3, podemos dividir a eletrónica em 3 seções principais: o *Software* monitorizado pelo computador, o *Hardware* do equipamento e o *Firmware* integrado.

5.1 Software

Através da utilização de um computador, o *software* tem a tarefa de fatiar um desenho no formato STL para código G, permitindo assim o processamento pelo *firmware* da impressora. Estes softwares são designados por *slicers* e, embora já exista uma grande variedade que cumpre essa função, a maioria é destinada a impressoras com sistema de coordenadas cartesianas.

Tendo em conta as variáveis deste projeto, seria conveniente desenvolver um *slicer* personalizado para este equipamento baseado num sistema de coordenadas cilíndricas. Contudo, o desenvolvimento deste projeto não tomou esta direção, pois compreende um nível de conhecimento que supera a área de estudo. Assim, o provete de teste foi desenvolvido diretamente em código G, permitindo contornar a etapa efetuada pelo *slicer*.

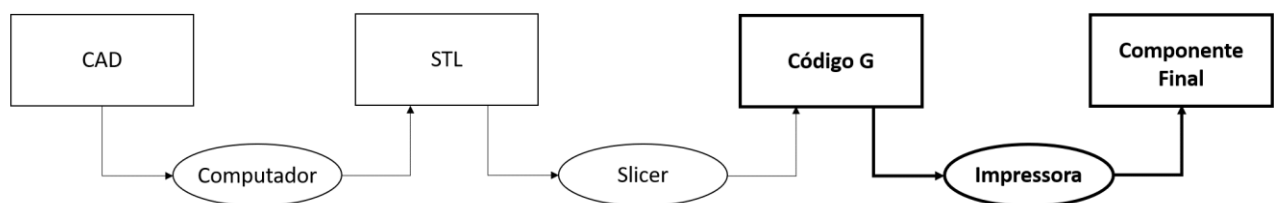


Figura 5.1 Esquema da transcrição associada ao processo FDM

5.2 Hardware

O *hardware* é constituído pelos componentes disponibilizados na Tabela 5.1. É imperativo respeitar a compatibilização relativamente à sua tensão de funcionamento.

Tabela 5.1 Componentes eletrónicos

Elementos Motores	5 motores de passo
	1 ventoinha de refrigeração (<i>hotend</i>)
	1 resistência (<i>hotend</i>)
Sensores	1 termistor (<i>hotend</i>)
	2 sensores fim de curso (eixo <i>X</i> e <i>Z</i>)
Alimentação	1 fonte de alimentação
Controlo	1 placa de controlo

A placa de controlo adquirida corresponde a uma *Duet 3 Mini 5+ Wifi*, que foi concebida diretamente para o mercado das impressoras 3D, de pequeno e médio porte, e ainda beneficia de uma relação qualidade preço muito recomendada para projetos deste tipo, já que possui cinco canais para os motores de passo e sete canais para ventoinhas, termístores e outro tipo de sensores. Na Figura 5.2 pode ser observado o esquema das conexões efetuadas entre os componentes e a placa de controlo *Duet*.

Outra grande vantagem consiste na simplicidade da interface disponível via *Wi-fi* que permite conectar remotamente um computador ou telemóvel à placa de controlo, através de um *browser* que utiliza um interface dedicado designado de *DuetWeb*, onde é possível executar os comandos pretendidos sem a necessidade de um painel auxiliar.

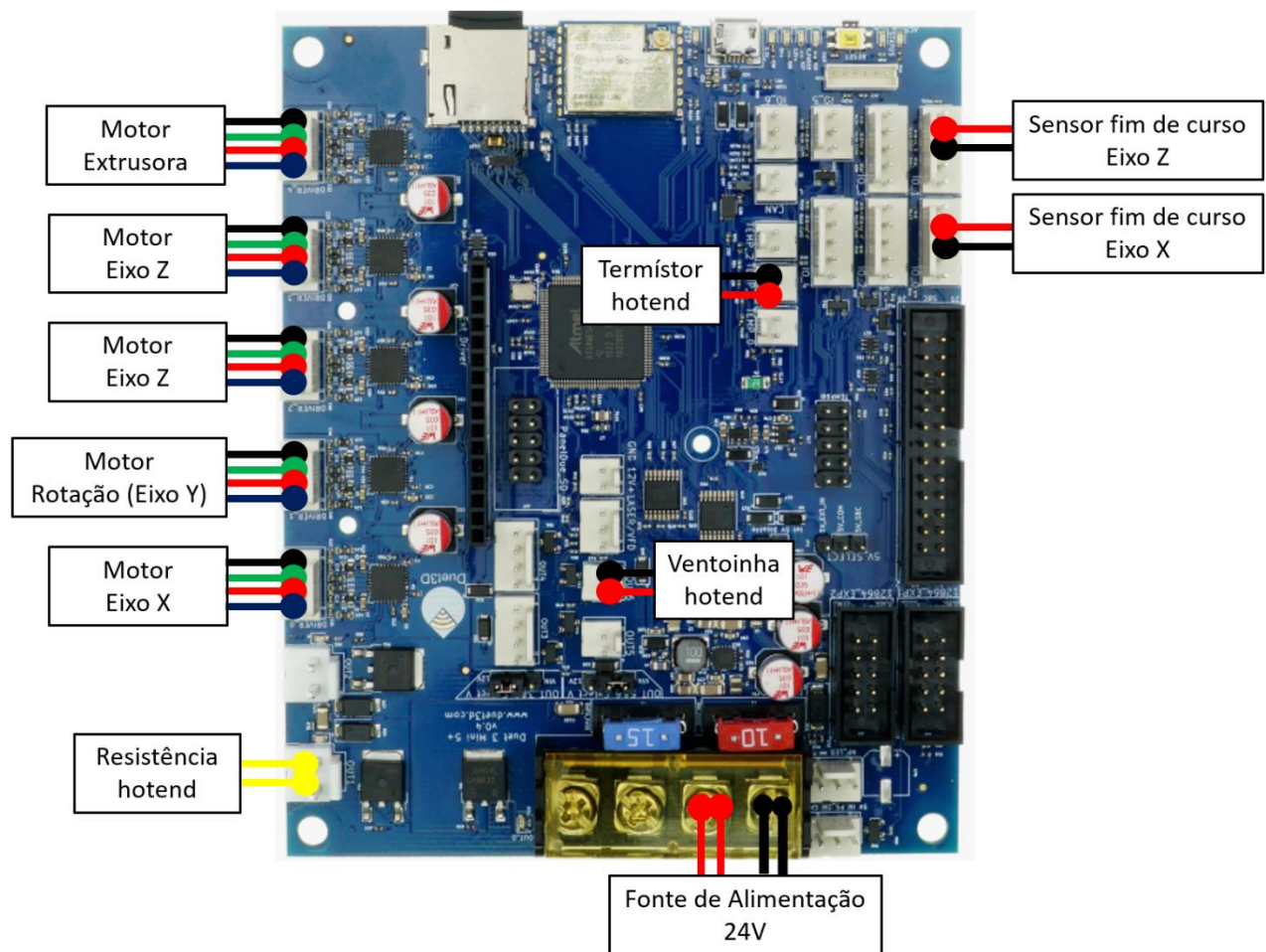


Figura 5.2 Esquema de ligação da placa de controlo [50]

5.3 Firmware

O *firmware* de uma impressora 3D é frequentemente descrito como a ponte entre o *hardware* e o *software*. Basicamente é um programa que interpreta os comandos em código G e traduz esses comandos em ações específicas dos elementos motores e de aquecimento, incorporando a informação proveniente dos sensores.

As placas de controlo *Duet* operam com o *RepRapFirmware*, que é um *firmware* de controle de movimentos abrangente e destinado principalmente ao controle de impressoras 3D, mas também com aplicações em corte por laser e CNC.

5.3.1 Configuração

Antes de inicializar a configuração em si, foi atualizado o *firmware* para a versão 3.4.4, que corresponde à versão estável mais recente na data do presente documento.

Dado a invulgaridade do equipamento, é seguro afirmar que um dos principais desafios associados a este projeto é a adaptação de coordenadas cartesianas em conformidade com o movimento rotativo da plataforma. Neste contexto, foram abordados os aspetos mais relevantes da configuração realizada através da ferramenta auxiliar do *firmware*, *RepRap ConfigTool*, simplificando assim um processo que por vezes se revela bastante extenso.

O primeiro passo foi limitar os eixos cartesianos consoante as especificações de operação da máquina. É importante perceber que os eixos *X* e *Z* serão abordados de forma semelhante a uma impressora cartesiana, já que são limitados pelas dimensões do equipamento. Em oposição a estas restrições, o eixo *Y*, que representa a rotação da plataforma cilíndrica, é teoricamente ilimitado, pois deve manter o movimento rotativo de forma contínua durante todo o trabalho de impressão. Assim, foi definido como ponto de origem a posição cujo bocal se encontra o mais à esquerda possível ($X = 0\text{ mm}$), e atinge a altura máxima especificada ($Z = 90\text{ mm}$). O *firmware* processa esta informação através dos sensores fim de curso ou *endstops*.

Para o eixo *Y* não foram utilizados sensores fim de curso, já que a sua rotação deve ser infinita. A estratégia consistiu em definir valores exageradamente elevados para que sejam praticamente inalcançáveis, como sugere a Figura 5.3, onde é representado um excerto desta configuração presente no *RepRap ConfigTool*.

Printer Geometry

Cartesian CoreXY CoreXZ Delta

X minimum: 0 ✓ mm X maximum: 180 ✓ mm Y minimum: -100000 ✓ mm Y maximum: 1000000 ✓ mm Z minimum: 0 ✓ mm Z maximum: 90 ✓ mm

Endstop Configuration

Axis	Endstop Type				Endstop Location at	
X	None	Switch	Z-Probe	Sensorless	Low end	High end
Y	None	Switch	Z-Probe	Sensorless	Low end	High end
Z	None	Switch	Z-Probe	Sensorless	Low end	High end

Figura 5.3 Excerto da configuração através do *RepRap Config Tool* [51]

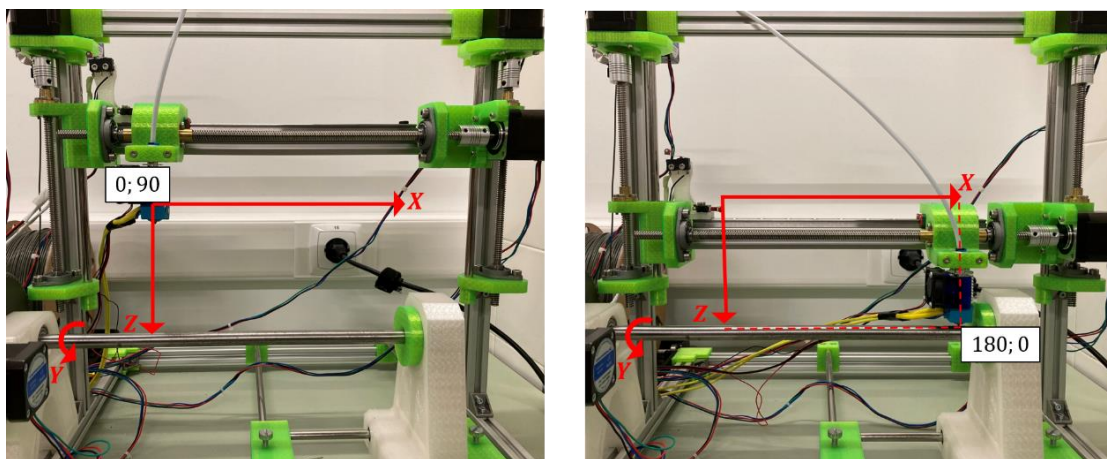


Figura 5.4 Ilustração dos limites definidos para cada eixo

Os motores de passo recebem os comandos para avançar ou retroceder segundo incrementos intitulados de passos. Conforme está configurado o sistema de acionamento, cada passo move o eixo do motor correspondente por uma distância definida. Assim, quando o *firmware* recebe o comando para mover um eixo, por exemplo, um milímetro, ele usa a configuração de passos por milímetro e calcula quantos pulsos elétricos (um para cada passo) precisa de enviar para o motor, para este obter a distância final desejada.

Os motores Nema selecionados têm um passo de $1,8^\circ$ o que significa que uma volta completa (360°) equivale a 200 passos ou 1600 micropassos. Utilizando micropassos (*microstepping*), é possível conseguir um controlo ainda mais preciso, já que conferem uma resolução inferior. Por esta razão, é utilizada uma interpolação no valor de $[\times 16]$ nos cálculos que se seguem.

Para o Eixo linear *X* foi realizado um procedimento bastante simples: Procedeu-se à configuração do motor com o valor recomendado pelo *firmware* (80 *passos/mm*) e efetuou-se uma comparação entre o comando induzido na interface (1 *mm*), e a distância real percorrida pelo carro sobre a guia linear, determinada através de uma régua milimétrica.

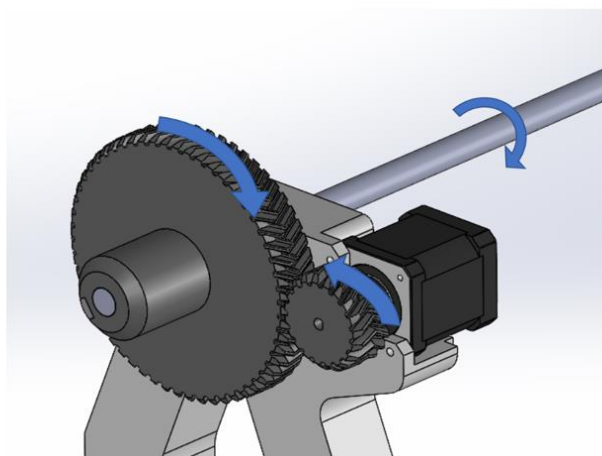
$$\text{Motor } X: 80 \text{ passos/mm} \cong 0,2 \text{ mm} \Rightarrow 1 \text{ mm} = 400 \text{ passos/mm}$$

Os valores para os motores correspondentes à Extrusora e ao Eixo *Z* foram obtidos de forma análoga ao Eixo *X*.

$$\text{Motores } Z: 1600 \text{ passos/mm}$$

$$\text{Motor Extrusora: } 400 \text{ passos/mm}$$

Relativamente ao Eixo *Y*, foi oportuno configurar o movimento rotativo do motor atendendo um incremento em graus, em alternativa à escala milimétrica. Como vamos analisar no capítulo 5.4, este processo vai ser essencial para a programação do provete de teste. Através da Figura 5.5, é explícito que o motor controla o pinhão, mas que a plataforma rotativa é controlada pela roda dentada, pelo que é necessário reter a relação de transmissão para os cálculos que se seguem:



$$\frac{56 \text{ dentes}}{19 \text{ dentes}} = 2,95$$

Figura 5.5 Sistema de transmissão

Este valor significa que o pinhão efetua 2,95 rotações para a roda dentada completar apenas 1 volta. Assim:

$$2,95 \text{ voltas} = 360^\circ \Rightarrow 1 \text{ volta} \cong 122^\circ$$

$$200 \text{ passos} = 122^\circ \Rightarrow 1^\circ \cong 1,64 \text{ passos}$$

$$1,64[\times 16] \cong 27 \text{ passos/}^\circ$$

5.3.2 Calibração

É preciso notar que mesmo o mais pequeno dos arredondamentos pode proporcionar grandes desvios em função da interpolação associada aos micropassos. Posto isto, foi efetuada uma calibração do equipamento com o principal objetivo de manter a precisão e repetibilidade nos testes, garantindo referências e resultados confiáveis. Em primeiro lugar procedeu-se à montagem de um micrómetro analógico equipado para medir pequenas distâncias com grande precisão (ordem da centésima de milímetro) por intervenção de uma ponta de contacto extremamente sensível.

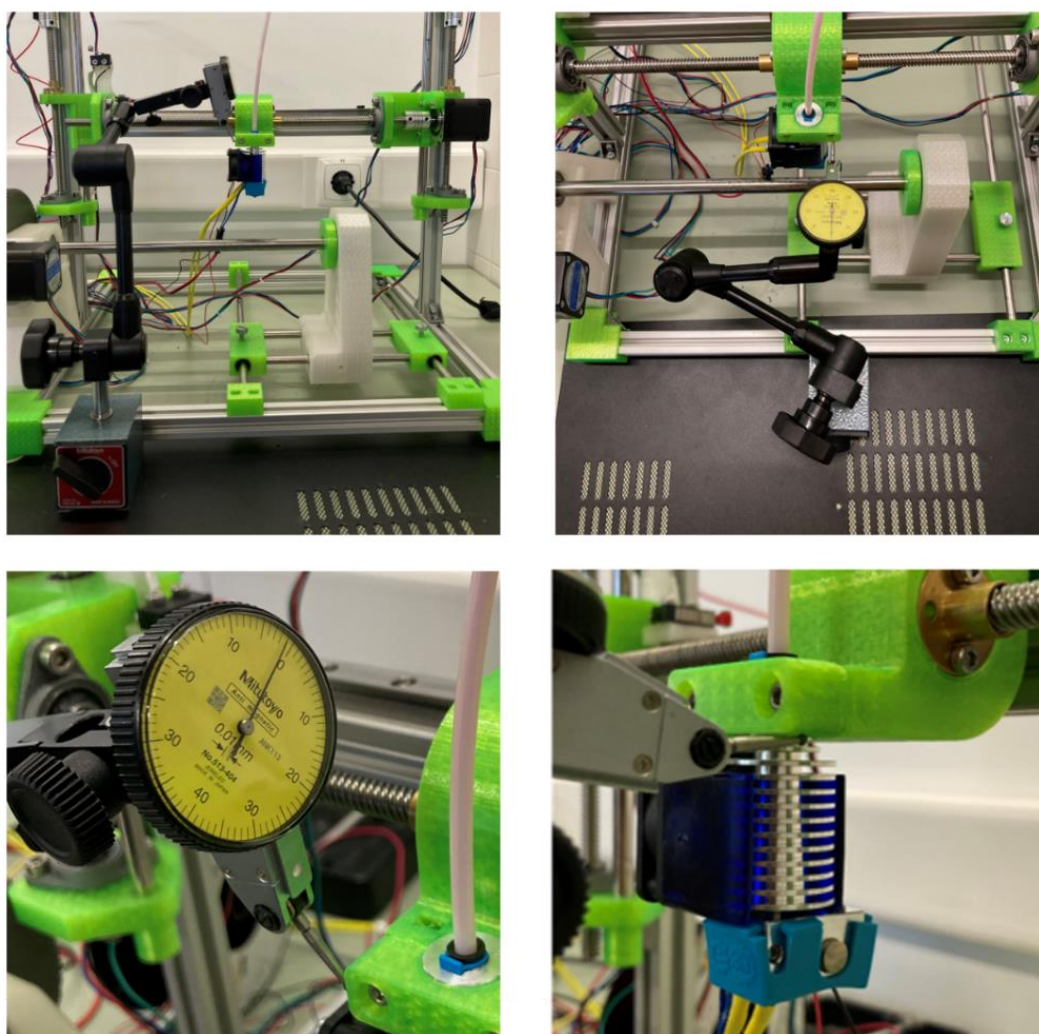


Figura 5.6 Montagem correspondente à calibração dos eixos X e Z

Para efetuar a calibração dos eixos lineares, encostou-se a ponta de contacto ao suporte de extrusão (Figura 5.6), e foram comparados os valores registados no equipamento com o incremento introduzido na interface.

Para calibrar o motor de passo associado ao eixo de rotação (eixo Y), foi programado um código muito simples que pode ser resumido pela extrusão de uma linha reta de filamento sobre a plataforma seguida de uma revolução completa. O efeito de "escada" observado na Figura 5.7 a) representa uma configuração inadequada, enquanto que a união dos troços (Figura 5.7 b) representa o valor correto da configuração do motor de passo.

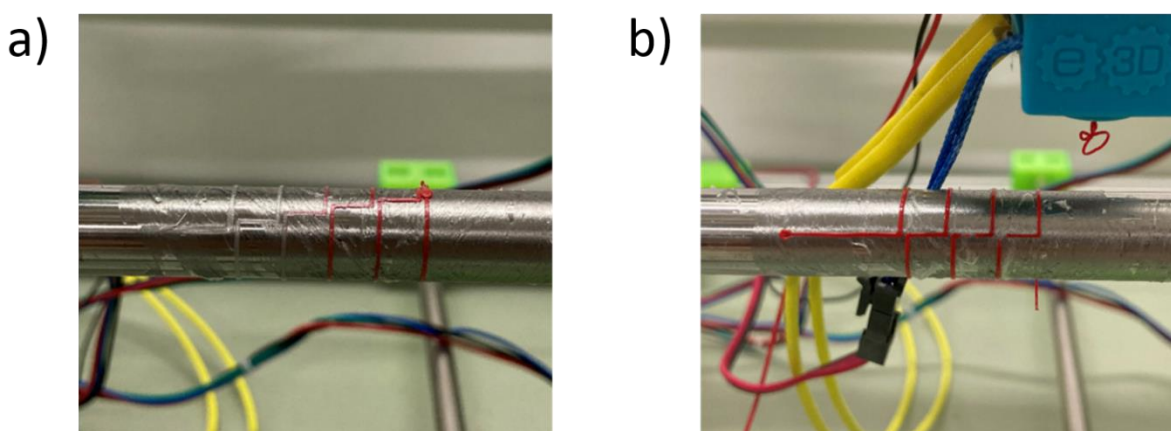


Figura 5.7 Calibração do eixo de rotação

5.4 Programação

Neste capítulo será abordada a estratégia traçada para a programação do provete em código G, uma vez que não foi utilizado um *slicer* dedicado para a conversão deste formato. Em primeiro lugar, é necessário analisar as limitações da linguagem em si para compreender o fundamento dos cálculos que se seguem. O código G é estruturado por linhas sequenciais de instruções e cada uma corresponde a uma tarefa específica que é posteriormente enviada à máquina. Essas linhas são designadas como comandos, que são executados um por um, até chegar ao final do código. As linhas de comando G, além de controlar os movimentos dos três eixos, segundo as variáveis X, Y, Z , também são responsáveis pela quantidade de filamento extrudido, representado pela variável E . A variável F remete para a velocidade associada aos elementos motores perante a tarefa desempenhada. Conforme foi estabelecido nas especificações, foi utilizado um valor padrão relativamente baixo, visto que velocidades de impressão elevadas comprometem a qualidade da peça:

$$F300 \Rightarrow 300 \text{ mm/min} = 5 \text{ mm/s} < 100 \text{ mm/s}$$

Para facilitar os cálculos associados a cada linha de comando, dividiu-se a estrutura do código em três partes mediante a geometria do provete: estrutura de suporte, malha cilíndrica e malha radial. Estas partes podem ser distinguidas na Figura 5.8.

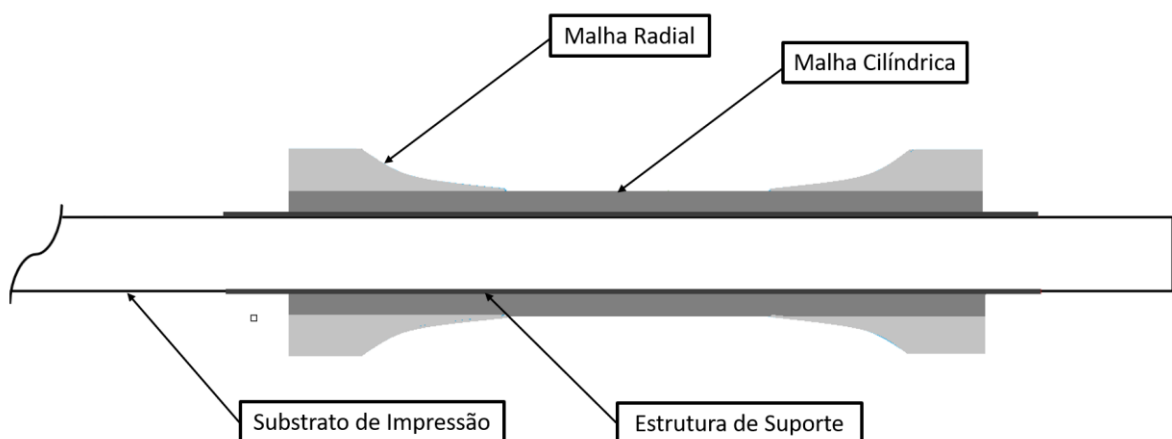


Figura 5.8 Ilustração representativa das malhas

Neste enquadramento, foi desenvolvido uma equação que relacionasse as variáveis associadas aos movimentos dos eixos:

perímetro percorrido $\times$ área da secção de filamento extrudido (líquido) = $E \times$ área da secção de filamento que entra na extrusora (sólido)

Uma vez que o equipamento é compatível apenas com filamento de 1,75 mm de diâmetro:

$$\text{perímetro percorrido} \times \text{área da secção filamento extrudido} = E \times \pi \times \left(\frac{1,75}{2}\right)^2$$

5.4.1 Malha de Suporte

Tendo em conta o efeito da contração térmica do filamento, após a sua extrusão, foi necessário recorrer a uma estrutura removível com o intuito de facilitar a remoção do provete inserido no varão de aço. Esta estrutura vai atuar como um suporte de construção que conecta a plataforma cilíndrica à superfície interior do provete.

Relembrando a importância da aplicação de esforços discutida na secção 2.4.3, foi decidido fabricar a malha de suporte transversalmente à direção de construção das camadas do provete. Deste modo, é possível aplicar um momento, M , no provete para quebrar as paredes desta estrutura e promover a remoção do mesmo após a conclusão de impressão, como sugere a Figura 5.9.

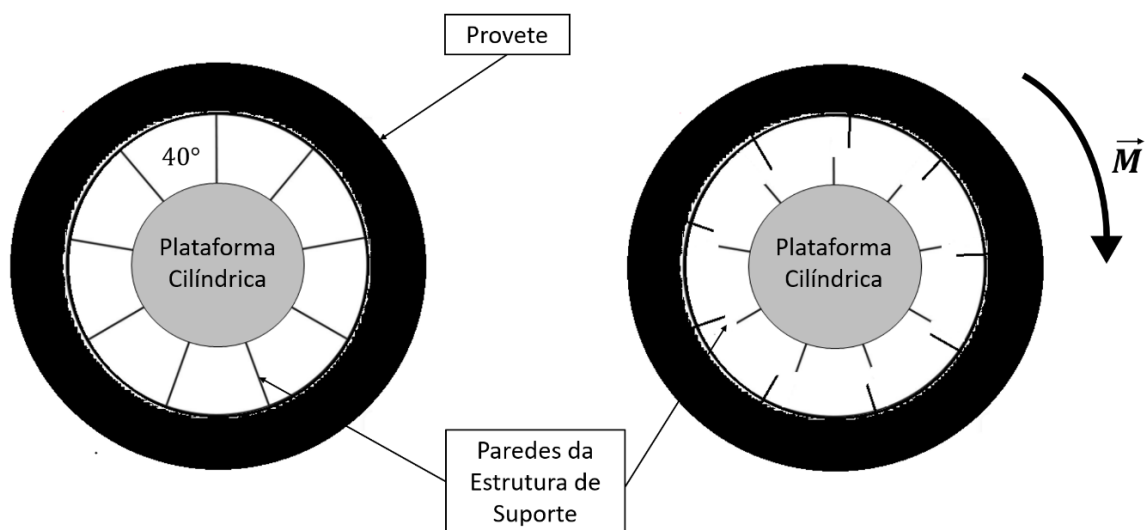


Figura 5.9 Ilustração representativa das paredes da estrutura do suporte

No entanto, é relevante notar que a altura das camadas desta estrutura não só aumenta o diâmetro interior do provete, como também compromete a primeira camada da malha cilíndrica. Por esta razão, o seu valor (0,15 mm) é inferior à altura de construção das restantes camadas do provete (0,20 mm).

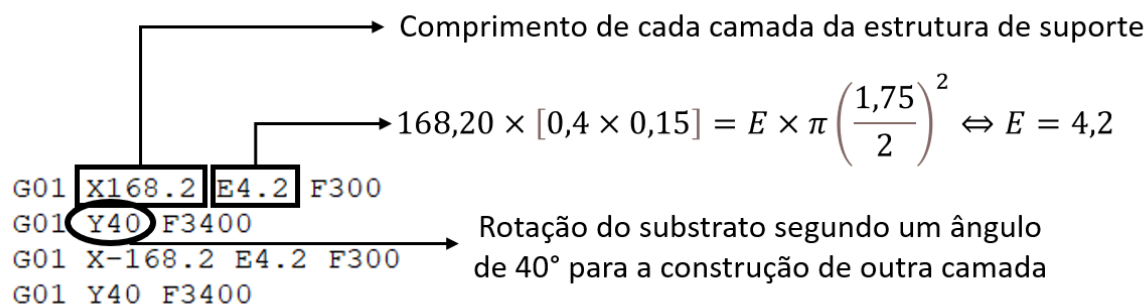


Figura 5.10 Excerto do código referente à malha de suporte

5.4.2 Malha Cilíndrica

A estrutura cilíndrica é essencialmente uma carcaça tubular formada pelo enrolamento de filamento durante a rotação da plataforma cilíndrica. Tal como já foi referido, é efetuado um cruzamento de filamento durante a construção de camadas, pois após concluir o enrolamento da primeira camada, o bocal efetua uma troca de sentido na sua trajetória, enquanto que a plataforma cilíndrica mantém a mesma direção de rotação (Figura 5.11). Para simplificar os cálculos que se seguem, foi utilizado a aproximação da elipse a uma circunferência perfeita, já que o ângulo associado ao enrolamento é aproximadamente nulo ($\alpha = 1,9^\circ$).

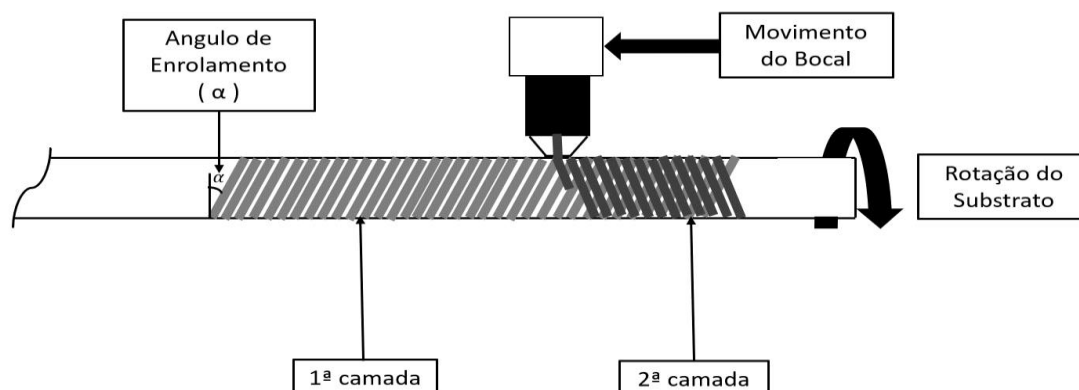


Figura 5.11 Ilustração representativa do angulo de enrolamento efetuado

A ideia é calcular o filamento despendido, E , para a extrusão de uma volta completa ao veio da plataforma ($Y = 360^\circ$), tendo em conta que a largura do cordão, no estado fundido, é restringida pelo diâmetro do bocal ($0,4 \text{ mm}$) e a altura de cada camada para a construção da malha cilíndrica é $0,2 \text{ mm}$. Substituindo as variáveis na equação deduzida anteriormente para o enrolamento de uma circunferência perfeita, vem:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Perímetro percorrido sobre} & & \text{Área do cordão de filamento} \\
 \text{uma circunferência} & & \text{que entra no bocal de extrusão} \\
 \\
 \overbrace{(2 \times \pi \times R)} & \times & \underbrace{(0,4 \times 0,2)} = E \times \overbrace{\left(\pi \times \frac{1,75}{2} \right)^2} \\
 & & \text{Área do cordão de filamento} \\
 & & \text{que sai do bocal de extrusão}
 \end{array}$$

Substituindo o raio, R , pelo raio da plataforma cilíndrica, $R = 6 \text{ mm}$, obtém-se:

$$(2 \times \pi \times 6) \times (0,4 \times 0,2) = E \times \left(\pi \times \frac{1,75}{2} \right)^2 \Leftrightarrow E = 1,26 \text{ mm}$$

Assim, os valores de referência para o enrolamento de uma elipse de filamento em torno da plataforma rotativa são dados por:

$X = 0,4 \text{ mm}$
$Y = 360^\circ$
$E = 1,26 \text{ mm}$

É crucial considerar o incremento da altura de camada ($0,2 \text{ mm}$) no raio, R , para todas as camadas que se seguem. Para exemplificar este efeito, é apresentado a seguir o cálculo do raio para a primeira e segunda camada da malha cilíndrica, respetivamente:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_{\text{substrato}} + \text{Altura}_{\text{suporte}} + (0,2 \times n^{\circ} \text{camadas antecedidas}) \\
 &= 6 + (3 \times 0,15) + (0,2 \times 0) = 6,45 \text{ mm} \\
 R_2 &= R_{\text{substrato}} + \text{Altura}_{\text{suporte}} + (0,2 \times n^{\circ} \text{camadas antecedidas}) \\
 &= 6 + (3 \times 0,15) + (0,2 \times 1) = 6,65 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Sabendo o número de revoluções, podemos calcular os parâmetros associados às linhas de comando para construção de cada camada da seguinte forma:

$$N^{\circ} \text{ de Revoluções} = \frac{\text{perímetro percorrido}}{0,4}$$

Uma vez que o comprimento da malha cilíndrica é o mesmo que o do provete, vem:

$$N^{\circ} \text{ de Revoluções} = \frac{148,2}{0,4} = 370,5 \text{ revoluções}$$

Donde é possível escrever as seguintes linhas de código disponibilizadas na figura Figura 5.12:

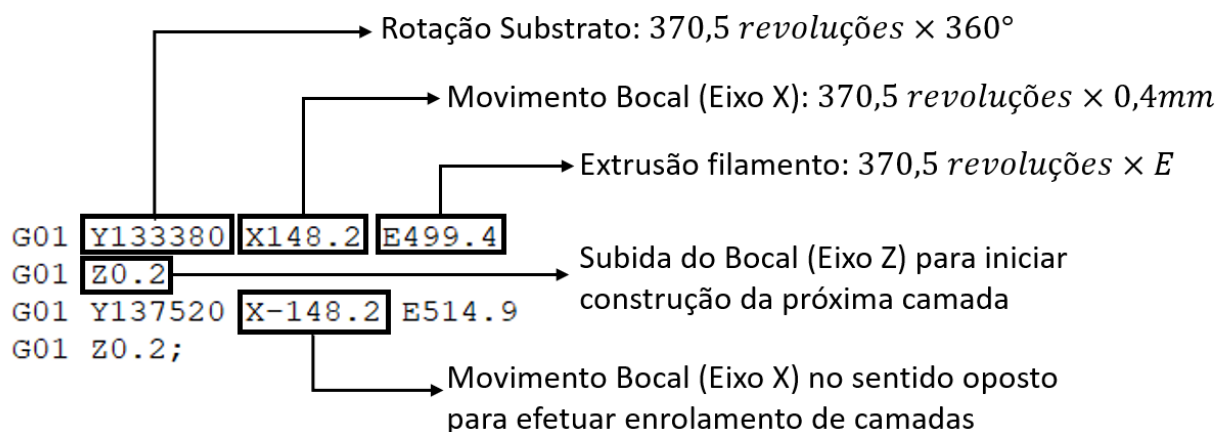


Figura 5.12 Excerto do código referente à malha cilíndrica

5.4.3 Malha Radial

O raciocínio aplicado na determinação das linhas de comando associadas à construção da malha radial é semelhante ao empregue na malha cilíndrica. O princípio passa por contabilizar o incremento de camada subjacente, na construção da próxima. Todavia, o perímetro percorrido da malha radial não corresponde ao comprimento do provete, como era o caso da malha cilíndrica. Neste caso, o perímetro vai variar consoante as curvas de transição conectadas às extremidades (Figura 5.13).

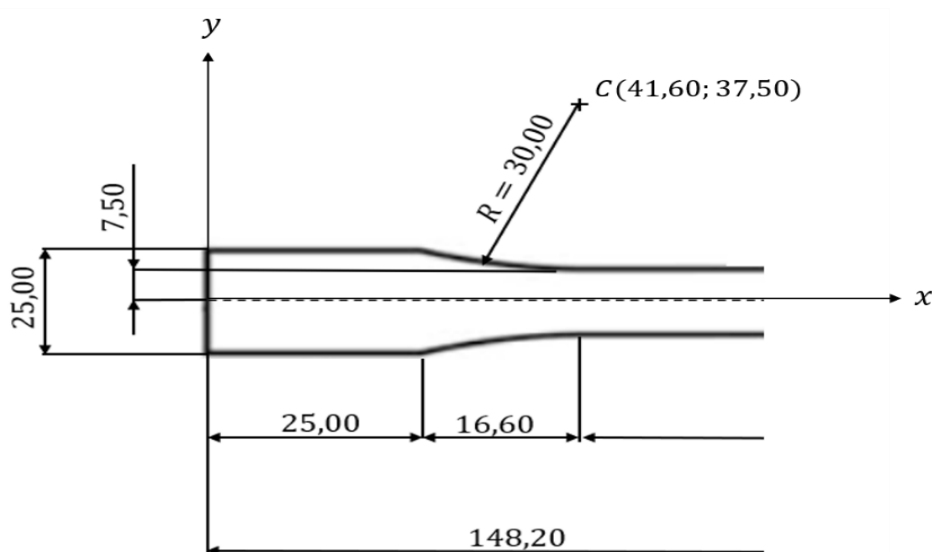


Figura 5.13 Localização das curvas de transição do provete

Lembrando que as curvas de transição correspondem a arcos de circunferência de raio, $r = 30 \text{ mm}$, é possível calcular o perímetro percorrido, x , através da equação desta circunferência. A equação reduzida de uma circunferência vem na seguinte forma:

$$r^2 = (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2$$

Transcrevendo o centro: $C(c_x; c_y) \rightarrow C(41,60; 37,50)$ e substituindo, vem:

$$30^2 = (x - 41,60)^2 + (y - 37,50)^2$$

Como se pode averiguar na Figura 5.14, o perímetro percorrido, x , associado a cada camada, é obtido substituindo a altura relativa da respetiva camada, y , na equação da circunferência deduzida em cima:

$$y = 7,65\text{mm} \rightarrow x = 38,61$$

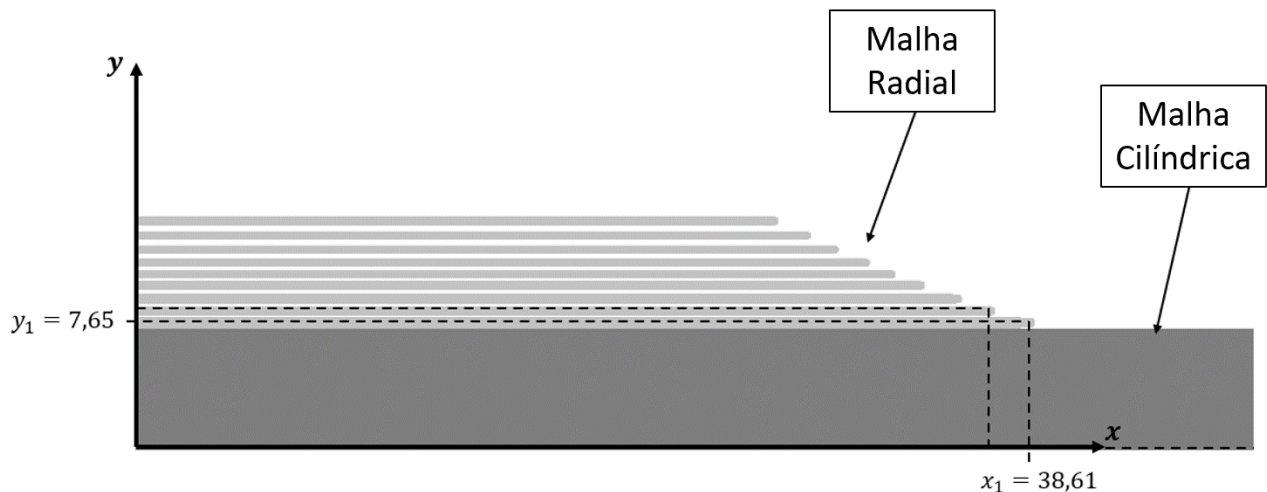


Figura 5.14 Ilustração do raciocínio para a construção da malha radial

Mais uma vez, é importante reter que a altura relativa, y , varia segundo incrementos correspondentes à altura de cada camada de construção da malha no valor de $0,20\text{ mm}$.

Então, seguindo a mesma lógica da malha cilíndrica, é possível escrever as linhas de código na Figura 5.15, através do número de voltas completas ou revoluções:

$$N^{\circ} \text{ de Revoluções} = \frac{\text{perímetro percorrido}}{0,4} = \frac{38,61}{0,4} = 96,6 \text{ revoluções}$$

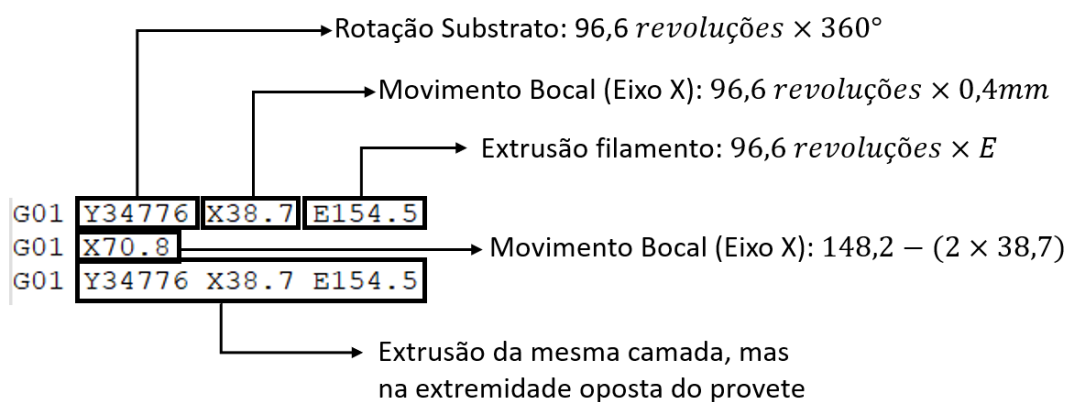


Figura 5.15 Excerto do código referente à malha radial

6 DESPESAS

Ainda que não tenha sido definido um orçamento limite para este projeto, é evidente que este deve ser tangível e exequível. Neste contexto, os custos associados ao equipamento concebido pela *Imperial London College* (capítulo 2.4.3), foram considerados como referência num valor aproximado de 600€.

Na Tabela 6.1 está representado o custo total do equipamento, dividido em cada um dos seus respetivos subconjuntos.

Tabela 6.1 Custo total de cada conjunto

Subconjunto	Custo (€)
Conjunto Rotativo	105,17
Conjunto de Extrusão	144,82
Conjunto Linear Horizontal	99,83
Conjunto Linear Vertical	66,91
Estrutura	2,20
Controlo	150,31
Total	569,24

Uma vez que foi disponibilizada uma Prusa i3 MK3S para o fabrico das peças destinadas à impressão 3D, foi possível calcular o custo individual das mesmas através do software *PrusaSlicer*.

Não são discriminados vários componentes como o perfil estrutural, alguns parafusos e porcas, pois foram adquiridos no departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da *Nova School of Science and Technology* e, portanto, não são consideradas no cálculo de custos, já que não foram faturados diretamente no projeto.

Apesar dos custos das transportadoras não estarem presentes na tabela, foram sempre requisitados fornecedores nacionais, ou dentro da União Europeia, sem exceção a fim de minimizar as despesas suplementares.

Mesmo depois de efetuadas as modificações em 4.3, que permitiram substituir soluções em alumínio por adaptações em PETg relativamente mais baratas, o orçamento foi cumprido por uma pequena margem. Por esta razão, é seguro afirmar que o projeto proposto inicialmente em 2020 compreende um custo de fabrico pouco recomendável (ainda que não tenha sido calculado) e que as alterações de projeto atuais obedecem o valor orçamental tido como referência (600€).

Na Figura 6.1 é possível observar o protótipo final do equipamento, juntamente com os seus componentes mecânicos e eletrónicos descritos.

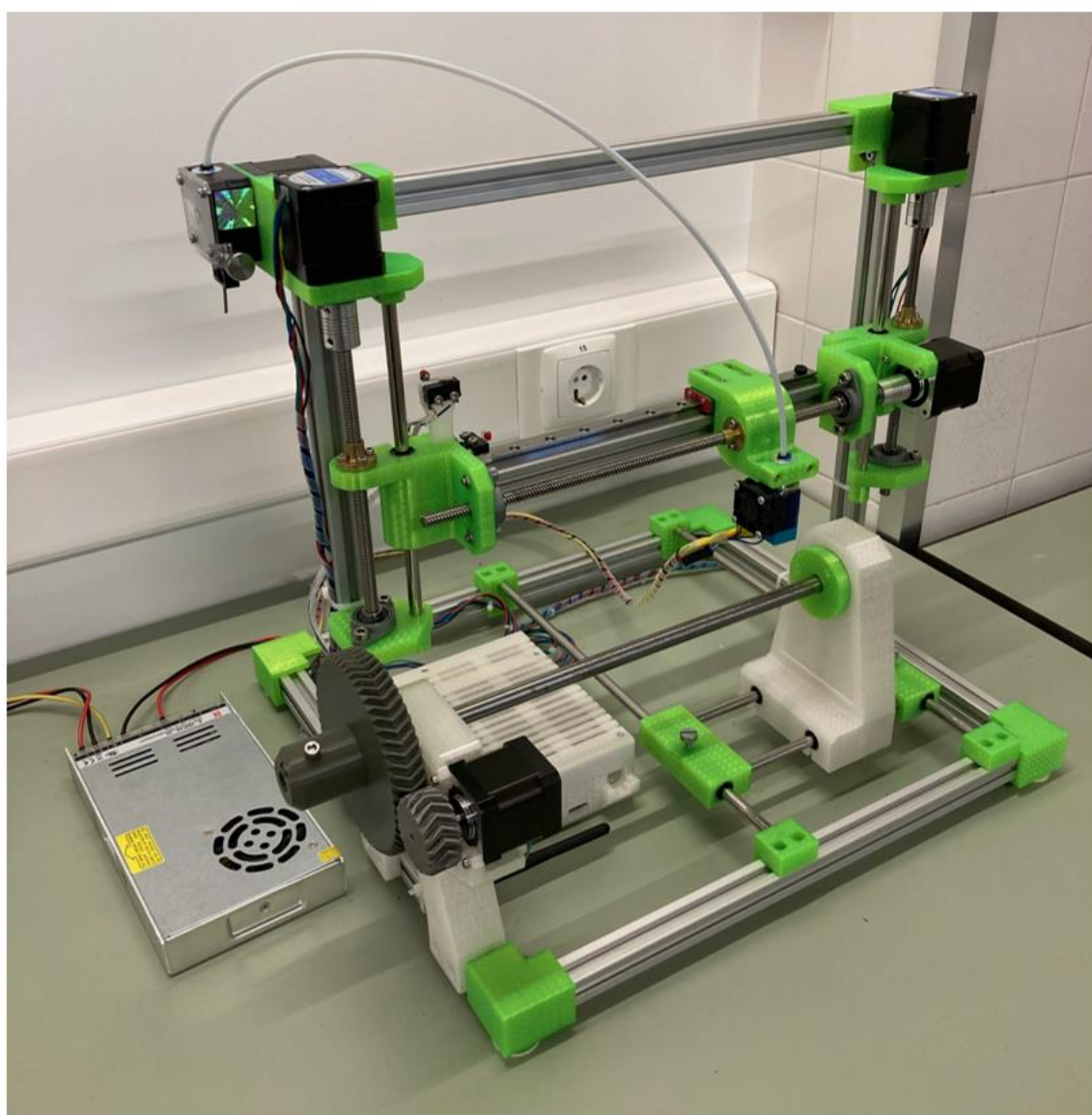


Figura 6.1 Protótipo físico do equipamento final

7 ANÁLISE DOS PROVETES DE ESTUDO

7.1 Preparação

Naturalmente que seria de maior interesse científico efetuar ensaios de torção a fim de estudar as propriedades mecânicas associadas ao enrolamento e cruzamento filamentar. Mas, infelizmente o laboratório de ensaios do departamento de Engenharia Mecânica e Industrial não proporciona os recursos para tal. Em alternativa, foram executados ensaios de tração uniaxiais, onde as amostras são submetidas a uma carga gradualmente crescente em uma única direção para avaliar a resposta do material a essa carga específica. Tendo em conta que as garras da máquina disponibilizada não permitem uma abertura igual ou superior à estabelecida para o diâmetro do provete de estudo definido em 4.2.3 (25 *mm*), foi necessário reduzir a sua espessura (Figura 7.1). Neste contexto, foram suprimidas várias linhas de código associadas à malha radial e cilíndrica, para reduzir o diâmetro, *D*. Foram desenvolvidos provetes de teste com um ângulo de enrolamento no valor de 45° e 60°.



Figura 7.1 Adaptação dos provetes de teste

É importante mencionar que todos os provetes foram fabricados em PLA e, apesar de alguns diferenciarem na cor, foi sempre utilizado o mesmo fabricante e modelo (*Form Futura ReForm rPLA*). Os resultados dos provetes de estudo referidos anteriormente serão comparados com valores de referência obtidos, através de ensaios realizados a amostras de geometria idêntica produzidas segundo as orientações horizontal e vertical (Figura 7.2), na máquina Original Prusa i3 MK3S.



Figura 7.2 Provetes de teste fabricados na Prusa

Adicionalmente, foram maquinados dois varões em alumínio de forma a serem inseridos nas extremidades dos provetes, permitindo assim uma distribuição uniforme das tensões axiais através de uma fixação segura e não invasiva, aplicada pelas garras de aperto (Figura 7.3).



Figura 7.3 Varões de alumínio para as extremidades dos provetes

7.2 Ensaio de Tração Uniaxiais

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, utilizando uma máquina servo-hidráulica MTS 312.21 com capacidade de carga no valor de 100 *kN*, e a tração foi efetuada com uma velocidade de 1 *mm/min* conforme a Norma TS EN ISO 6892-1.

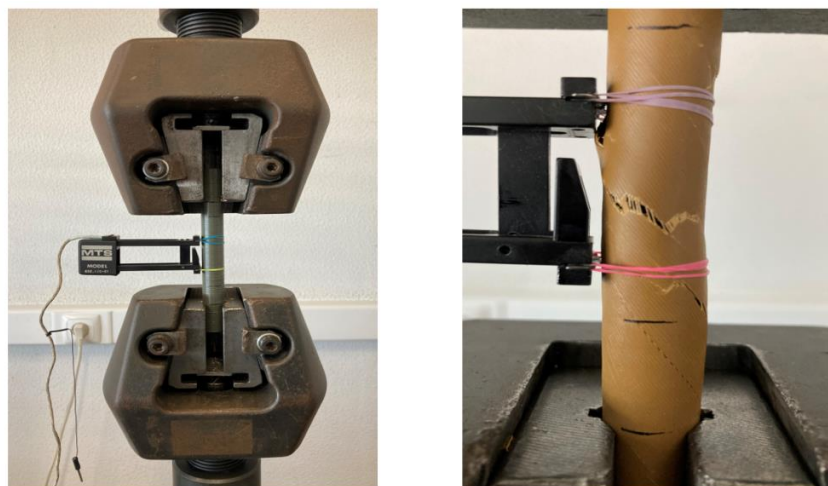


Figura 7.4 Montagem do Extensómetro

Como é possível observar na Figura 7.4, a realização dos testes foi auxiliada com a montagem de um extensómetro capaz de registar a elongação exibida pelas amostras durante os ensaios. Foi analisado um número mínimo de 3 espécimes para cada método de deposição, cujos resultados podem ser consultados na Tabela 7.1 e na Figura 7.5.

Tabela 7.1 Tratamento de resultados dos Ensaio de Tração Uniaxiais

Deposição	Tensão de Ruptura [MPa]			Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação	% do Máx	% de Variação
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3					
Horizontal	40,48	34,99	30,06	35	4,3	12,1 %	N/A	N/A
Vertical	8,60	9,16	11,25	10	1,1	11,8 %	27,5 %	263,8 %
Enrolamento 1,9°	14,24	11,71	15,10	14	1,4	10,5 %	38,9 %	157,1 %
Enrolamento 45°	20,06	21,13	18,57	20	1,0	5,3 %	56,6 %	76,6 %
Enrolamento 60°	12,83	13,29	14,14	13	0,5	4,0 %	38,2 %	162,1 %

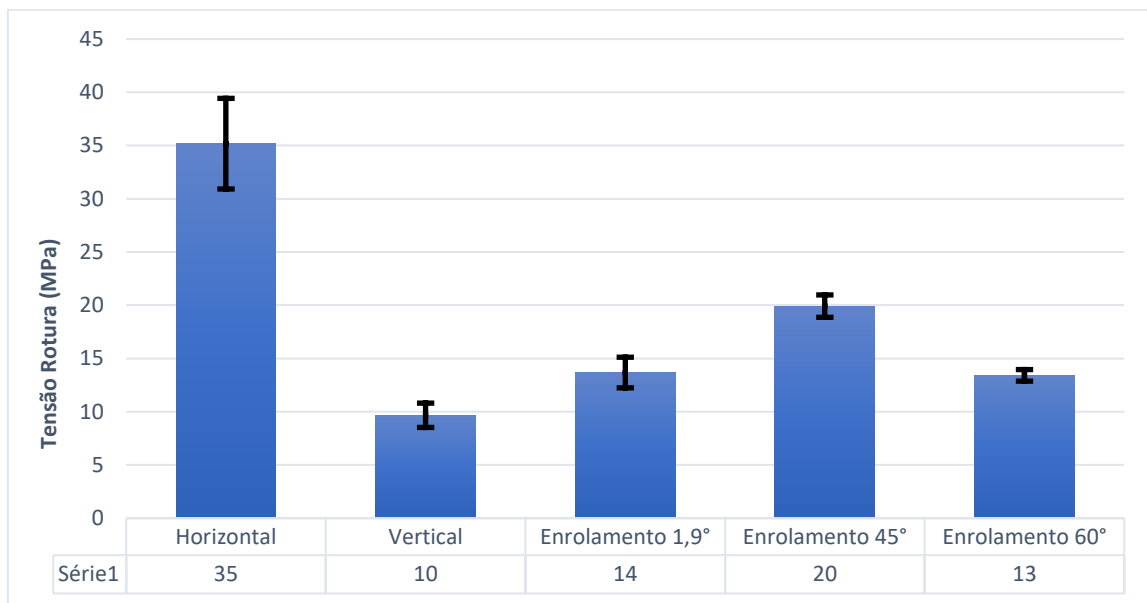


Figura 7.5 Desvio da média em relação ao valor mais elevado da tensão de rotura

Como seria de esperar, as amostras produzidas na Prusa com uma deposição horizontal apresentam valores significativamente mais elevados que os restantes, já que as direções dos esforços de tração são paralelas à orientação de construção das suas camadas. Ainda assim, é seguro inferir que o enrolamento e cruzamento filamentar confere maior resistência à tração, dado que todas as amostras assim produzidas registaram valores de tensão superiores comparativamente aos produzidos pelo método convencional da FDM, representado pelos espécimes fabricados na Prusa segunda uma orientação vertical.

Relativamente ao ângulo de enrolamento, já era previsto que o valor ótimo seria de 45°, pois um enrolamento de 30° é equivalente a um de 60°.

A relação tensão-extensão é apresentada para cada variação de deposição cuja amostra se aproxima mais da média referente à tensão de rotura. Os gráficos correspondentes às restantes amostras podem ser consultados nos Anexos.

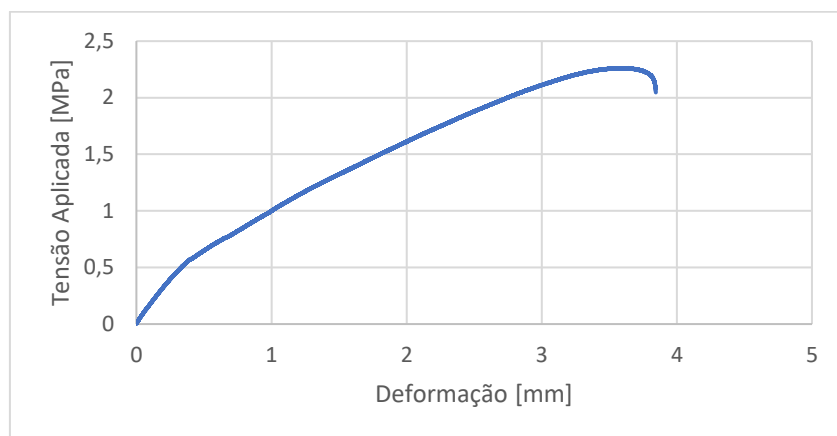


Figura 7.6 Deposição horizontal - Amostra 2

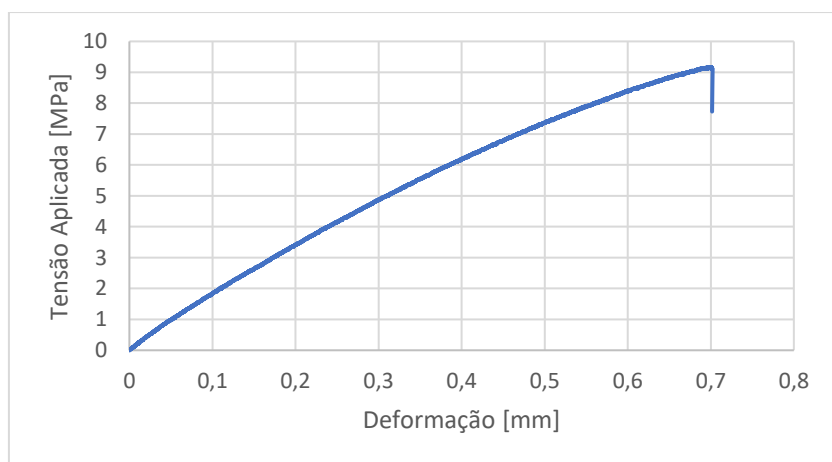


Figura 7.7 Deposição Vertical - Amostra 2

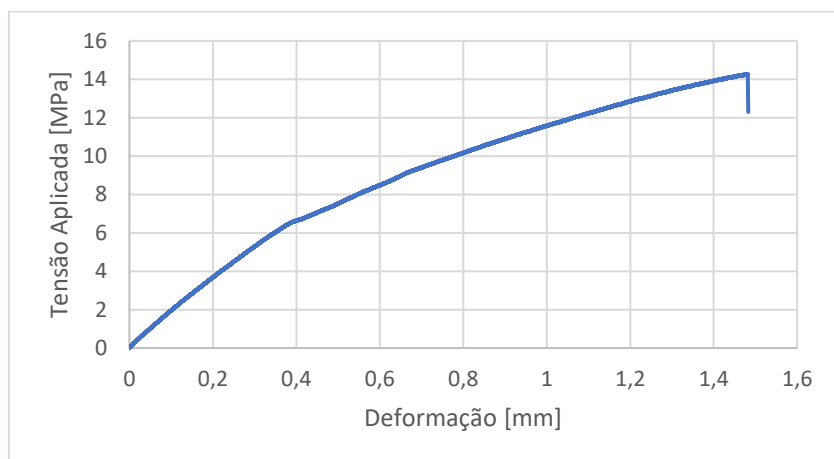


Figura 7.8 Deposição Rotativa segundo um ângulo mínimo de 1,9° - Amostra 1

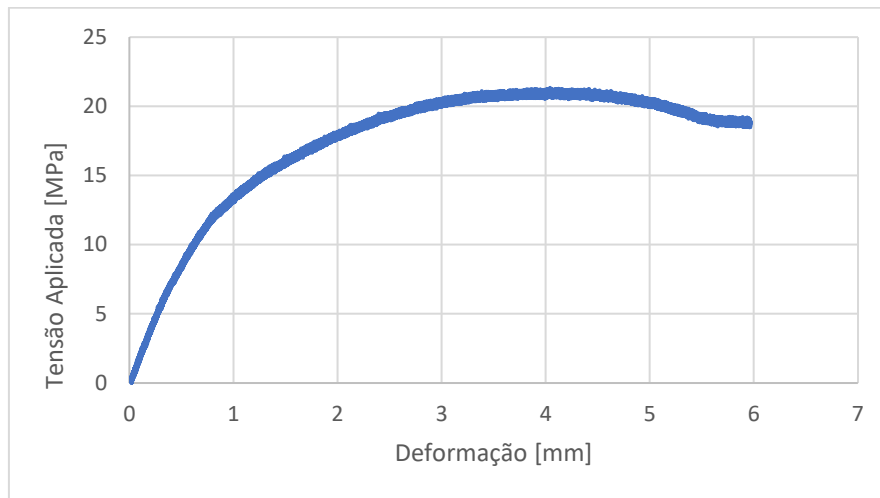


Figura 7.9 Deposição Rotativa segundo um ângulo ótimo de 45° - Amostra 1

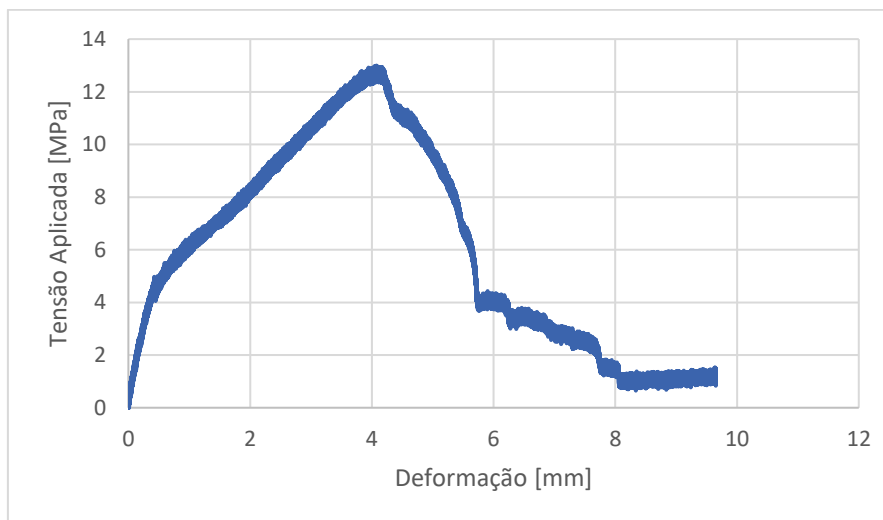


Figura 7.10 Deposição Rotativa através de um ângulo de construção de 60° - Amostra 1

8 CONCLUSÕES

Como resultado desta dissertação, foi construído com sucesso uma máquina FDM capaz de concretizar uma deposição de camadas poliméricas por revolução, atendendo as especificações impostas. Adicionalmente, foi possível reduzir substancialmente as despesas previstas na proposta inicial, através de várias metodologias relevantes, onde é legítimo destacar diversas adaptações pelo seu excelente desempenho:

- Configuração *Bowden*.
- Construção do conjunto rotativo em PETg, contrariamente ao alumínio.
- Realização de uma extrusão efetiva sem a necessidade de aquecer a plataforma.

Através de uma pequena amostra de espécimes submetidos a ensaios de tração uniaxiais, foi possível verificar um aumento das propriedades mecânicas das peças fabricadas segundo a deposição de camadas cruzadas. Adicionalmente, mesmo sem recurso a um *slicer* dedicado, a qualidade de impressão dos provetes revelou-se equivalente, ou até superior, à dos fabricados na máquina original Prusa i3 MKS. No entanto, esta dissertação representa apenas mais um contributo ao desenvolvimento de uma pesquisa que requer trabalhos futuros, nomeadamente:

- Desenvolvimento de um software próprio de fatiamento (*slicer*), permitindo uma otimização substancial de tempo, material e qualidade das peças impressas.
- Redução da estrutura e alguns componentes, de forma a conseguir uma geometria mais útil e compacta. Após a redução considerável do suporte de extrusão, é agora possível restringir os eixos lineares, mantendo o volume útil de extrusão.
- Aprofundamento e solidificação do conceito estabelecido por meio da realização de ensaios de torção aos provetes de estudo concebidos no equipamento construído.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus Horiz*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [2] U. Kalsoom, P. N. Nesterenko, and B. Paull, "Current and future impact of 3D printing on the separation sciences," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 105, pp. 492–502, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.TRAC.2018.06.006.
- [3] M. A. Hossain, A. Zhumabekova, S. C. Paul, and J. R. Kim, "A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market," *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 8492*, vol. 12, no. 20, p. 8492, Oct. 2020, doi: 10.3390/SU12208492.
- [4] T. P. Mpofu, C. Mawere, and M. Mukosera, "The Impact and Application of 3D Printing Technology," *International Journal of Science and Research*, 2014, Accessed: Mar. 31, 2023. [Online]. Available: www.ijsr.net
- [5] S. Belhouideg, "Impact of 3D printed medical equipment on the management of the Covid19 pandemic," *Int J Health Plann Manage*, vol. 35, no. 5, pp. 1014–1022, Sep. 2020, doi: 10.1002/HPM.3009.
- [6] M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Bus Horiz*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [7] "Autodesk's Project Escher Software is Super Fast 3D Printing for Large-Scale Objects - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing." <https://3dprint.com/127688/autodesk-project-escher/> (accessed Mar. 31, 2023).
- [8] R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, and B. Asiabanpour, "ANALYZING THE TENSILE, COMPRESSIVE, AND FLEXURAL PROPERTIES OF 3D PRINTED ABS P430 PLASTIC BASED ON PRINTING ORIENTATION USING FUSED DEPOSITION MODELING".
- [9] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", doi: 10.1108/13552540210441166.
- [10] Y. Tao, Q. Yin, and P. Li, "An Additive Manufacturing Method Using Large-Scale Wood Inspired by Laminated Object Manufacturing and Plywood Technology," 2020, doi: 10.3390/polym13010144.

- [11] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [12] S. C. Daminabo, S. Goel, S. A. Grammatikos, H. Y. Nezhad, and V. K. Thakur, "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems," *Materials Today Chemistry*, vol. 16. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2020. doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100248.
- [13] D. Vaes and P. Van Puyvelde, "Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers," *Progress in Polymer Science*, vol. 118. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2021. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101411.
- [14] R. Scaffaro, A. Maio, E. F. Gulino, G. Alaimo, and M. Morreale, "Green composites based on pla and agricultural or marine waste prepared by fdm," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/polym13091361.
- [15] J. O'Connell, "The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More | All3DP." <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/#i-6-scara> (accessed Jun. 08, 2023).
- [16] B. M. Schmitt, C. F. Zirbes, C. Bonin, D. Lohmann, D. C. Lencina, and A. Da Costa Sabino Netto, "A comparative study of cartesian and delta 3d printers on producing PLA parts," in *Materials Research*, Universidade Federal de Sao Carlos, 2017, pp. 883–886. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2016-1039.
- [17] D. Pereira de Brito Líbano Monteiro and M. Alexandre de Oliveira Leite António Manuel Relógio Ribeiro, "Development of a cylindrical coordinate based fused deposition modeling machine with multiple print heads Mechanical Engineering Examination Committee," 2018.
- [18] "Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015 - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing." <https://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [19] "Theta Printer | Hackaday.io." <https://hackaday.io/project/812-theta-printer> (accessed Jun. 16, 2023).
- [20] H. Gunaydin, Kadir & S. Türkmen, "Common FDM 3D Printing Defects," *International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*, no. April, pp. 1–8, 2018.
- [21] "3D Print Ghosting & Ringing: 3 Easy Fixes | All3DP." <https://all3dp.com/2/3d-printer-ringing-3d-print-ghosting/> (accessed Jun. 16, 2023).

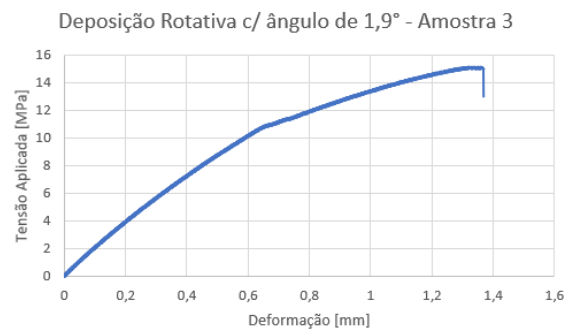
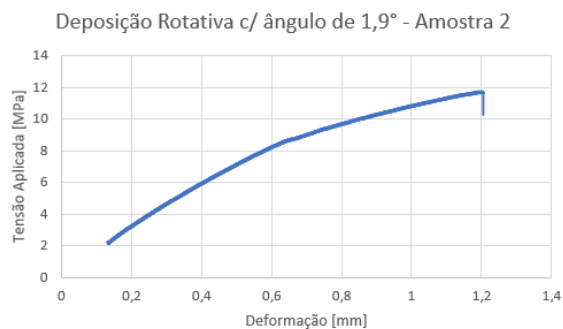
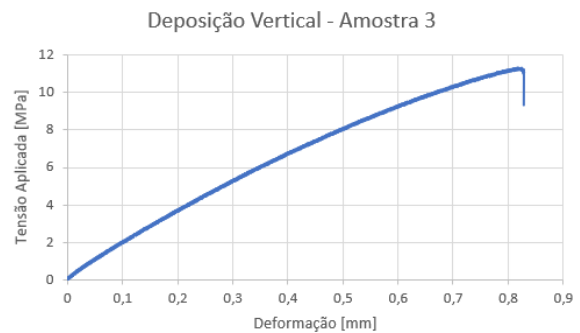
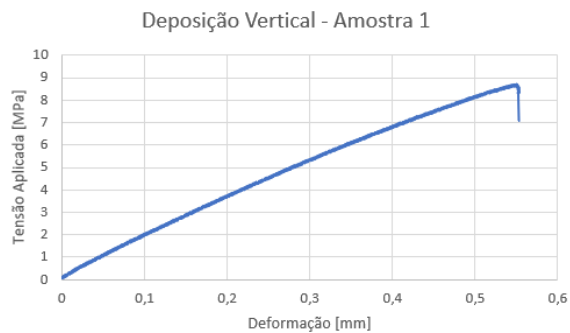
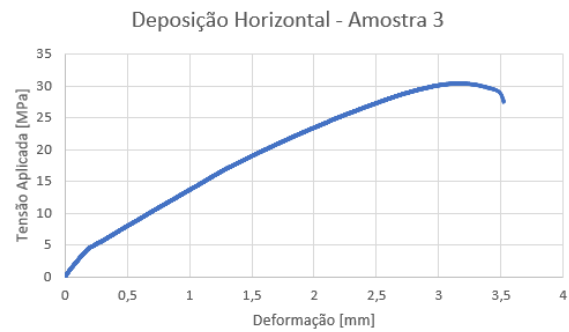
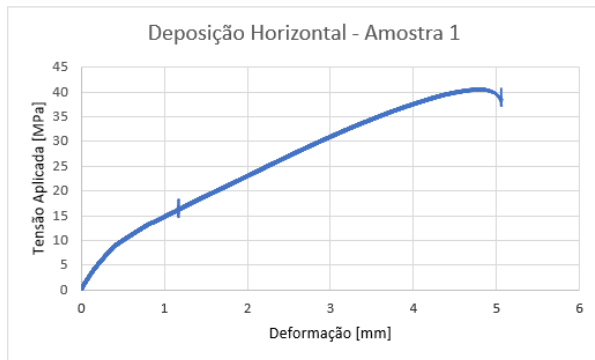
- [22] "Nozzle Dragging On 3D Print: Best Ways to Stop the Hit! -." <https://3dprintinggeek.com/nozzle-dragging/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [23] "Hoe voorkom je warping bij 3D printen met filament." <https://3dprintmagazine.eu/hoe-voorkom-je-warping/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [24] "Para que serve o Skirt, o Brim e o Raft." https://filament2print.com/pt/blog/23_skirt-brim-raft.html (accessed Jun. 09, 2023).
- [25] "Rafts, Skirts, and Brims Tutorial | Simplify3D." <https://www.simplify3d.com/resources/articles/rafts-skirts-and-brims/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [26] "3D printing trends for 2019." https://filament2print.com/gb/blog/48_3D-printing-trends-2019.html (accessed Jun. 16, 2023).
- [27] A. Bellini and S. Güçeri, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," *Rapid Prototyp J*, vol. 9, no. 4, pp. 252–264, 2003, doi: 10.1108/13552540310489631.
- [28] S. Garzon-Hernandez, A. Arias, and D. Garcia-Gonzalez, "A continuum constitutive model for FDM 3D printed thermoplastics," *Compos B Eng*, vol. 201, p. 108373, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108373.
- [29] B. Renwood, "How does part orientation affect a 3D print? | Hubs." 2021. [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>
- [30] "How to design parts for FDM 3D printing | Hubs." <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [31] "Lathe-Type 3D Printer," 2013, doi: 10.13140/RG.2.2.12190.05440.
- [32] "3D-Rotoprinter: What Is It? | All3DP." <https://all3dp.com/2/rotoprinter-rotary-3d-printer-simply-explained/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [33] R. Costa, "Concepção projecto mecânico de uma máquina de impressão 3D por revolução," 2020.
- [34] M. G. Rekoff and S. Member, "On Reverse Engineering."
- [35] G. Boothroyd, "DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY: THE BOOTHROYD-DEWHURST EXPERIENCE."
- [36] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development; Sixth Edition*. 2016. [Online]. Available: www.mhhe.com
- [37] K. S. Kumar, R. Soundararajan, G. Shanthosh, P. Saravanakumar, and M. Ratteesh, "Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and

- CFPETG composites fabricated by FDM," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2186–2191. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.078.
- [38] G.Q.Huang, "Design for X." [Online]. Available: <http://www.thomson.com>
- [39] R. Ponche, J. Y. Hascoet, O. Kerbrat, and P. Mognol, "A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 7, no. 2, pp. 93–105, Jun. 2012, doi: 10.1080/17452759.2012.679499.
- [40] H. I. Medellin-Castillo and J. Zaragoza-Siqueiros, "Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 32, no. 1. Chinese Mechanical Engineering Society, Dec. 01, 2019. doi: 10.1186/s10033-019-0368-0.
- [41] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [42] J. Bryła and A. Martowicz, "Study on the importance of a slicer selection for the 3d printing process parameters via the investigation of g-code readings," *Machines*, vol. 9, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/machines9080163.
- [43] "Everything you need to know about infills - Original Prusa 3D Printers." https://blog.prusa3d.com/everything-you-need-to-know-about-infills_43579/ (accessed Mar. 01, 2023).
- [44] "Layers and perimeters | Prusa Knowledge Base." https://help.prusa3d.com/article/layers-and-perimeters_1748 (accessed Mar. 01, 2023).
- [45] "E3D V6 All-Metal Hotend Direct Drive - 1,75 mm - 3DJake Portugal." <https://www.3djake.pt/e3d/v6-all-metal-hotend-direct-drive-175-mm> (accessed Jun. 16, 2023).
- [46] "Extrusora e3D Titan 1.75mm - impresoras3d.com." <https://www.impresoras3d.com/pt/producto/e3d-extrusor-titan-1-75-mm/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [47] "TÜRK STANDARDI METALİK MALZEMELER-ÇEKME DENEYİ-BÖLÜM 1: ORTAM SICAKLIĞINDA DENEY METODU," 2010.
- [48] W. Hardy, "Bowden vs Direct Drive - What do I need in my 3D printer? – E3D." <https://e3d-online.com/blogs/news/bowden-vs-direct-drive> (accessed Jun. 09, 2023).

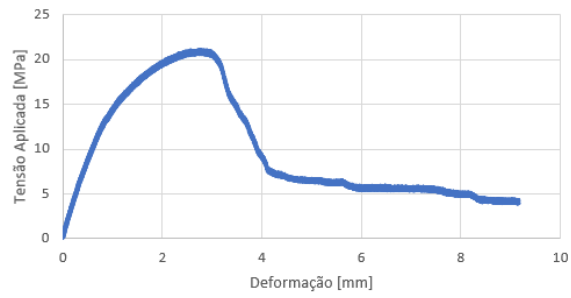
- [49] T. X. Xia, W. X. Yao, and J. G. Lu, "On the shear stress parameter of thin-walled tubular specimens under torsional loading," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 191–198. doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.249.
- [50] "Duet3D." <https://www.duet3d.com/duet3mini5plus> (accessed Jun. 16, 2023).
- [51] "RRF Config Tool." <https://configtool.reprapfirmware.org/General> (accessed Jun. 16, 2023).

ANEXO A

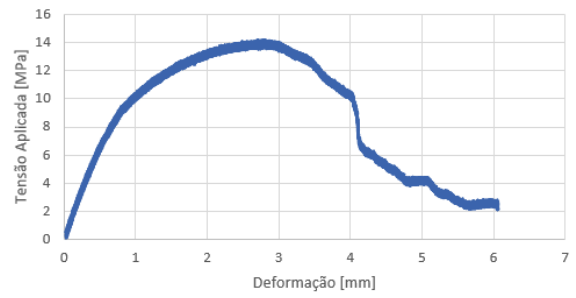
ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAIS



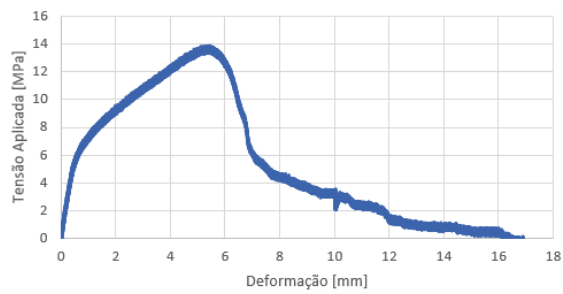
Deposição Rotativa c/ ângulo de 45° - Amostra 2



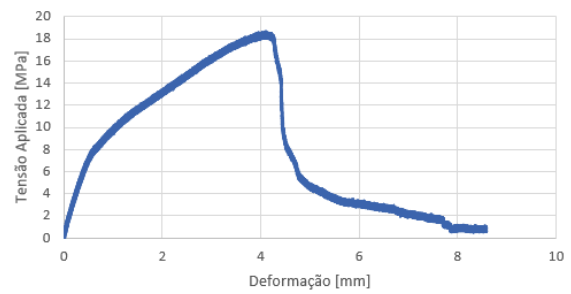
Deposição Rotativa c/ ângulo de 45° - Amostra 3



Deposição Rotativa c/ ângulo de 60° - Amostra 2



Deposição Rotativa c/ ângulo de 60° - Amostra 3



ANEXO B

LISTAGEM DE COMPONENTES

CONJUNTO DE EXTRUSÃO	
Componente	Qtd.
Hotend E3D v6	1
Suporte do Extrusor	1
Parafuso M3x16	6
Porca de Conexão	2
Parafuso M3x10	4
Porca Quadrada M3	6

CONJUNTO ROTATIVO	
Componente	Qtd.
Suporte Angular v2	1
Motor Nema 17	1
Roda v2	1
Espaçador	1
Pinhão	1
Rolamento SKF 6001	2
Parafuso M3x10	3
Porca-T 20x20 M4	12
Parafuso M4x8	12
Suporte de Contraponto v2	1
Cursor de Contraponto	2
Porca Quadrada M5	3
Parafuso Recartilhado M5x10	3
Varão 8x150	2
Varão 8x365	2
Rolamento LW8UU	8
Suporte do Perfil	4
Rolamento SKF 6005	1
Acoplador Auxiliar	1
Varão 12x380	1

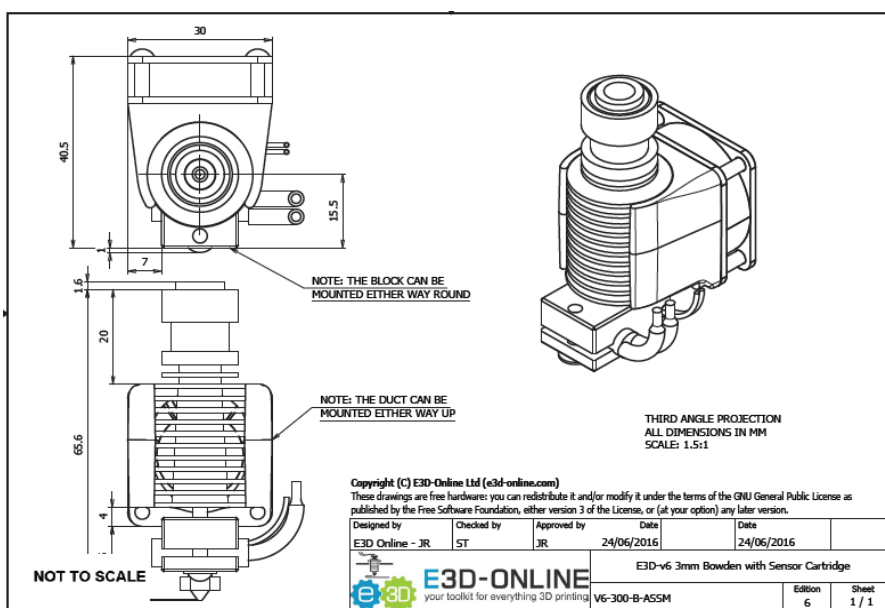
CONJUNTO LINEAR HORIZONTAL	
Componente	Qtd.
Perfil Estrutural 20x20x330	1
Motor Nema 17	1
Suporte Horizontal Direito	1
Suporte Horizontal Esquerdo	1
Parafuso M5x16	4
Rolamento KFL08	2
Porca Hexagonal M5	4
Parafuso M3x16	8
União Elástica	1
Porca de Conexão	2
Guia Linear	1
Carro Linear	1
Rolamento LM8UU	4
Varão Trapezoidal 8x8x400	2
Porca Hexagonal M3	12
Parafuso M3x14	7
Parafuso M3x10	4
Parafuso M3x8	11
Porca-T M3	11
Suporte de Sensores fim de curso	1
Sensores fim de curso	2

CONJUNTO LINEAR VERTICAL	
Componente	Qtd.
Extrusora E3D Titan	1
Motor Nema 17	3
Suporte Vertical Direito	1
Suporte Vertical Esquerdo	1
Parafuso M5x16	4
Rolamento KFL08	2
Porca Hexagonal M5	4
Parafuso M3x14	11
União Elástica	2
Porca-T M4	4
Bracket Angulado	2
Parafuso M4x8	4
Varão 8x230	2
Varão Trapezoidal 8x2x220	2
Suporte Radial Inferior Direito v2	1
Suporte Radial Inferior Esquerdo v2	1

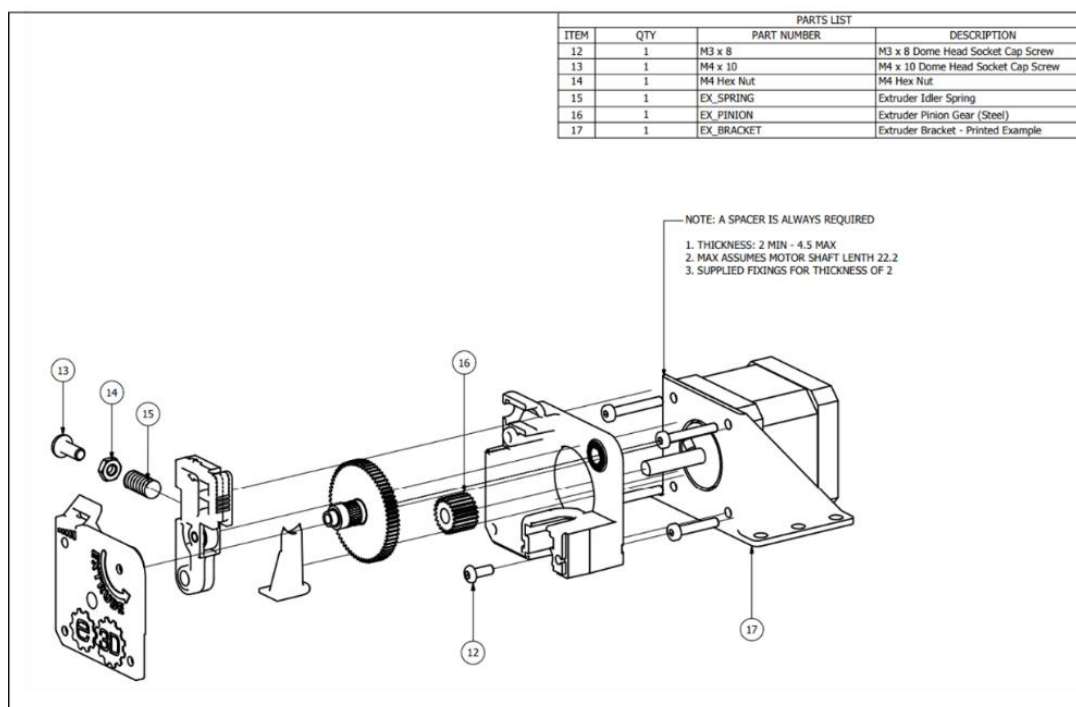
ESTRUTURA	
Componente	Qtd.
Perfil Estrutural 20x20x400	7
Bracket angulado	10
Parafuso M4x8	20
Porca-T M4	20

ANEXO C

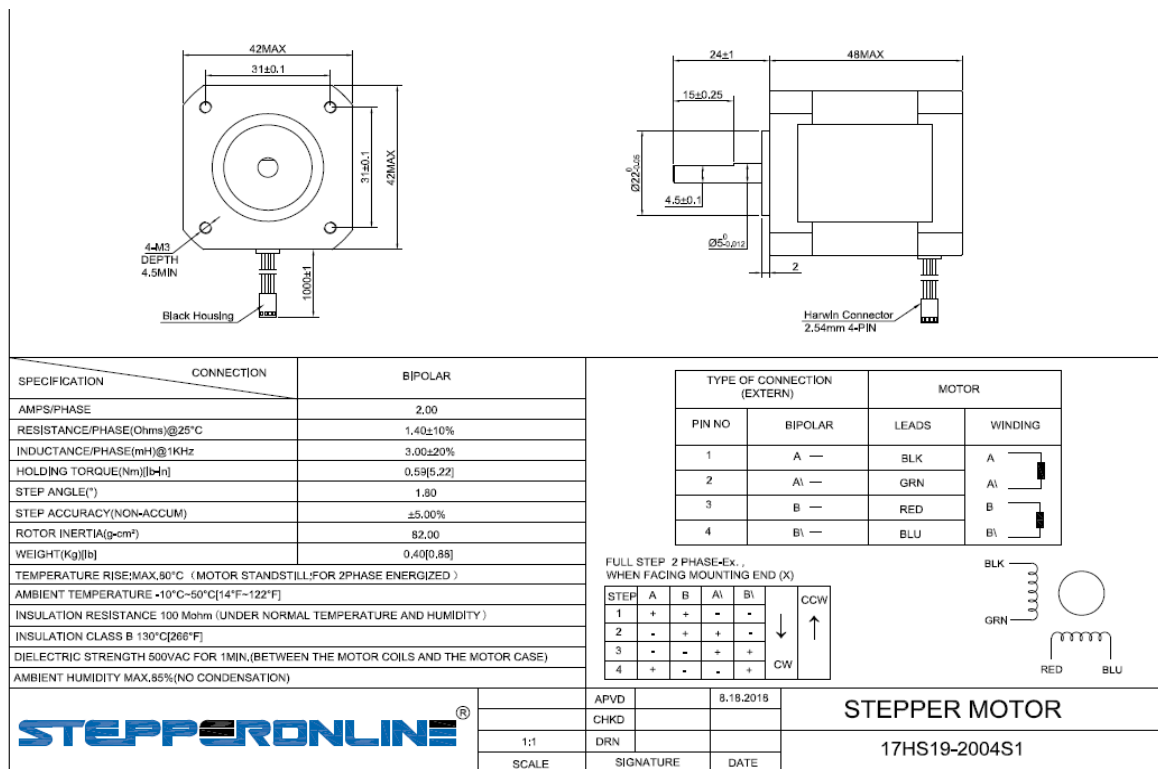
COMPONENTES ADQUIRIDOS



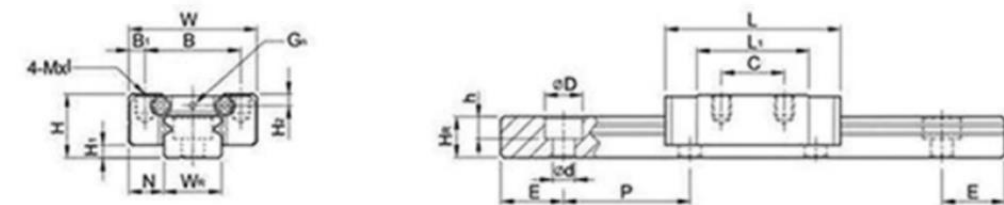
1 Hotend E3D V6 versão Bowden



2 Extrusora E3D Titan

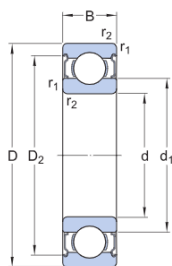


3 Motor de Passo Nema 17HS19



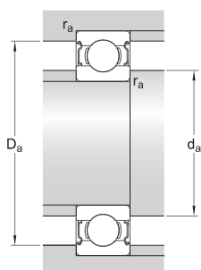
型号	组件尺寸 (mm)			滑块尺寸 (mm)										滑轨尺寸 (mm)							滑轨的 固定螺 栓尺寸	基本 动额定 负荷	基本 静额定 负荷	容许静力矩			重量	
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	G	G ₀	Mxd	H ₂	W ₀	H ₀	D	h	d	P	E	(mm)	C(kN)	C ₀ (kN)	M _x N-m	M _y N-m	M _z N-m	滑块 kg	滑轨 kg/m
MGN 5C	6	1.5	3.5	12	8	2	-	9.6	16	-	0.8	M2X1.5	1	5	3.6	3.6	0.8	2.4	15	5	M2x6	0.54	0.84	2	1.3	1.3	0.008	0.15
MGN 7C	8	1.5	5	17	12	2.5	8	13.5	22.5	-	Φ1.2	M2x2.5	1.5	7	4.8	4.2	2.3	2.4	15	5	M2x6	0.98	1.24	4.70	2.84	2.84	0.010	0.22
MGN 7H							13	21.8	30.8												M2x6	1.37	1.96	7.64	4.80	4.80	0.015	
MGN 9C	10	2	5.5	20	15	2.5	10	18.9	28.9	-	Φ1.4	M3x3	1.8	9	6.5	6	3.5	3.5	20	7.5	M3x8	1.86	2.55	11.76	7.35	7.35	0.016	0.38
MGN 9H							16	29.9	39.9												M3x8	2.55	4.02	19.60	18.62	18.62	0.026	
MGN 12C	13	3	7.5	27	20	3.5	15	21.7	34.7	-	Φ2	M3x3.5	2.5	12	8	6	4.5	3.5	25	10	M3x8	2.84	3.92	25.48	13.72	13.72	0.034	0.65
MGN 12H							20	32.4	45.4												M3x8	3.72	5.88	38.22	36.26	36.26	0.054	
MGN 15C	16	4	8.5	32	25	3.5	20	26.7	42.1	4.5	M3	M3x4	3	15	10	6	4.5	3.5	40	15	M3x10	4.61	5.59	45.08	21.56	21.56	0.059	1.06
MGN 15H							25	43.4	58.8												M3x10	6.37	9.11	73.50	57.82	57.82	0.092	

4 Guia e Carro Linear MGN 12H



Dimensões

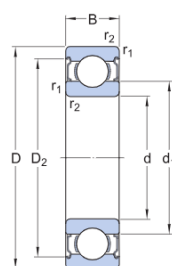
d	25 mm	Diâmetro do furo
D	47 mm	Diâmetro externo
B	12 mm	Largura
d ₁	≈ 32 mm	Diâmetro do ressalto
D ₂	≈ 42.2 mm	Diâmetro do rebaixo
r _{1,2}	min. 0.6 mm	Dimensão de chanfro



Dimensões do encosto

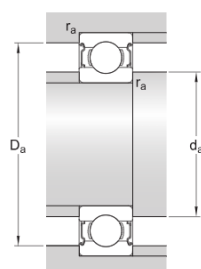
d _a	min. 28.2 mm	Diâmetro do encosto do eixo
d _a	max. 31.9 mm	Diâmetro do encosto do eixo
D _a	max. 43.8 mm	Diâmetro do encosto do mancal
r _a	max. 0.6 mm	Raio de concordância do eixo ou filete do mancal

5 Rolamento SKF 6005



Dimensões

d	12 mm	Diâmetro do furo
D	28 mm	Diâmetro externo
B	8 mm	Largura
d ₁	≈ 17 mm	Diâmetro do ressalto
D ₂	≈ 24.72 mm	Diâmetro do rebaixo
r _{1,2}	min. 0.3 mm	Dimensão de chanfro



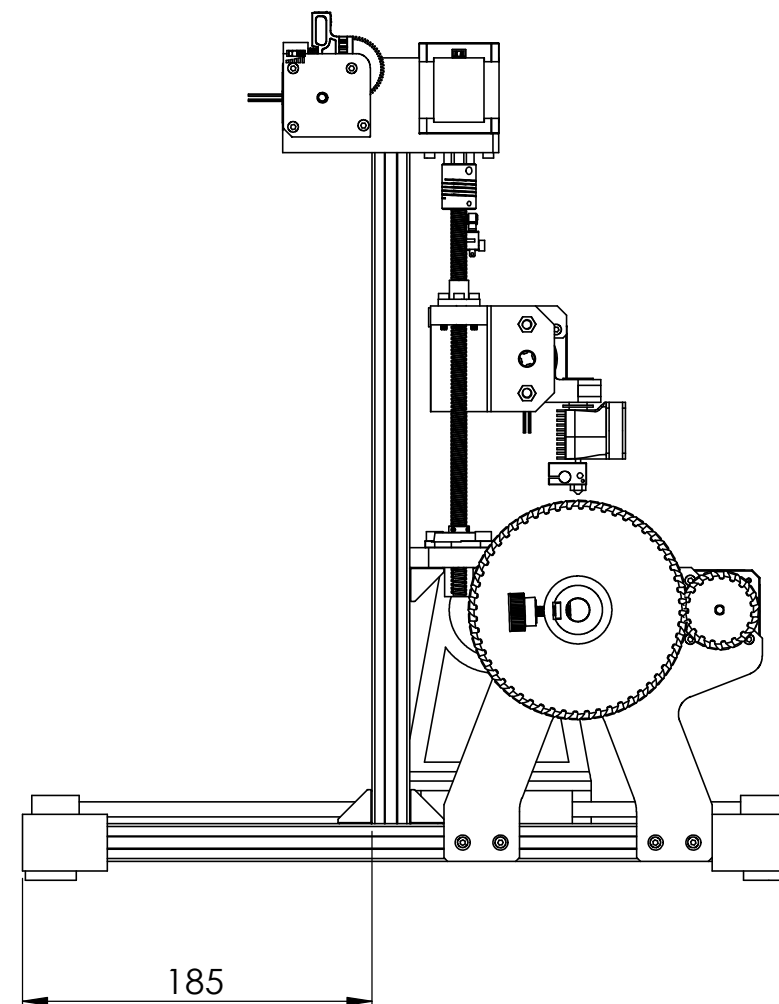
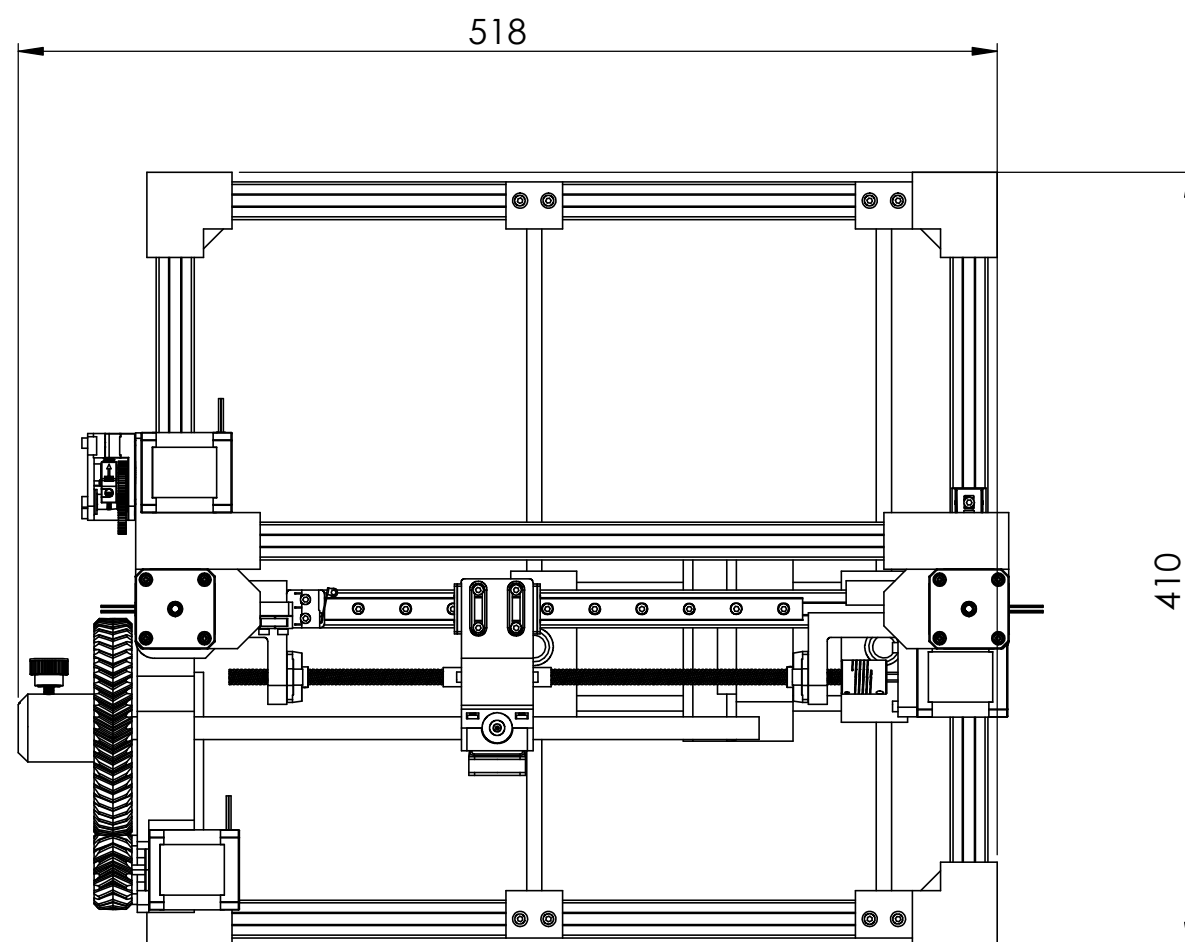
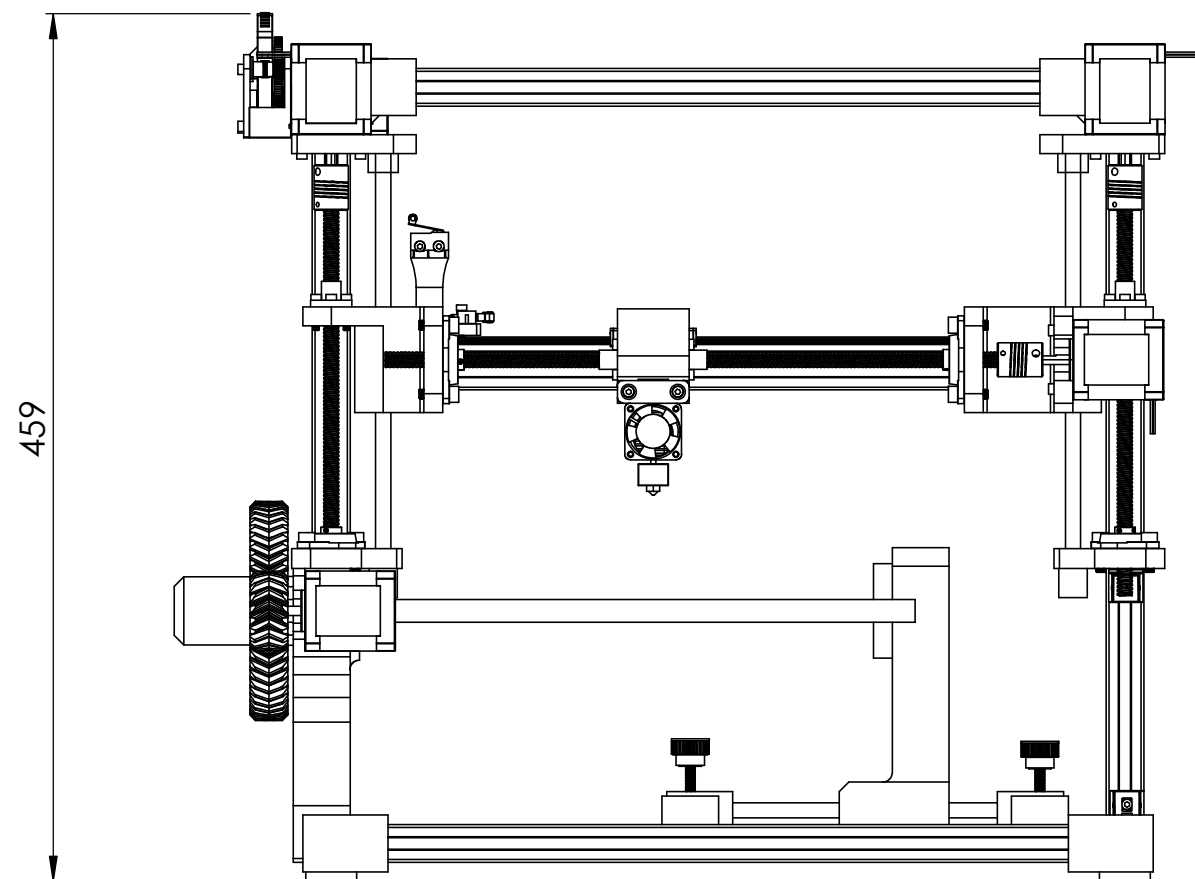
Dimensões do encosto

d _a	min. 14 mm	Diâmetro do encosto do eixo
d _a	max. 16.9 mm	Diâmetro do encosto do eixo
D _a	max. 26 mm	Diâmetro do encosto do mancal
r _a	max. 0.3 mm	Raio de concordância do eixo ou filete do mancal

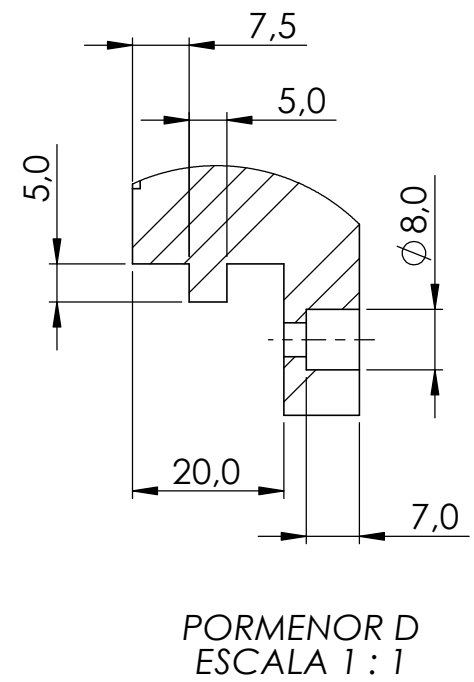
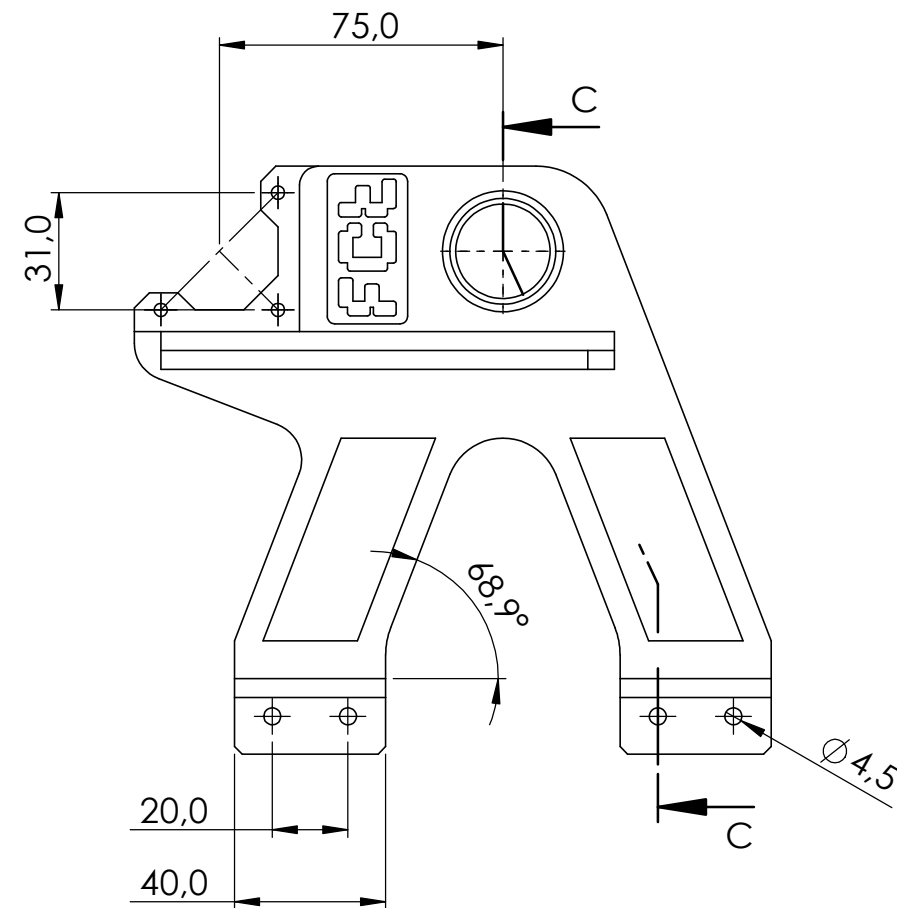
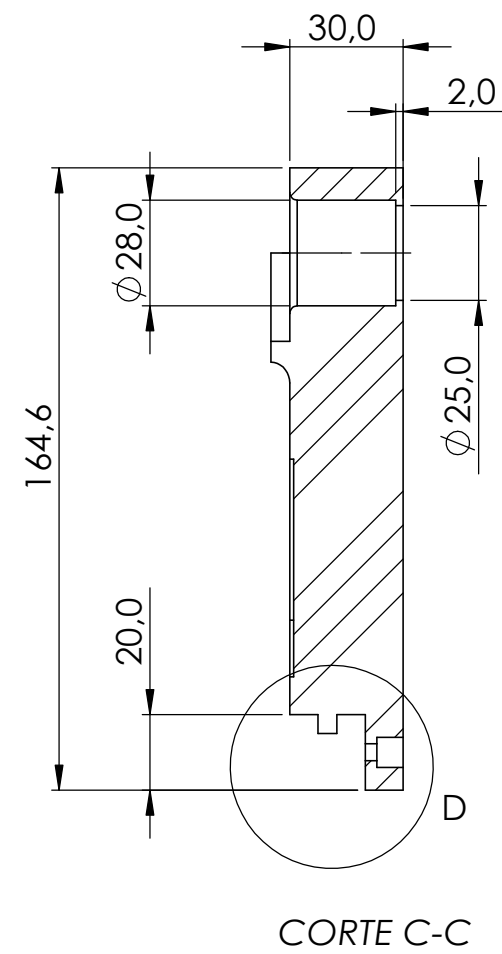
6 Rolamento SKF 6001

ANEXO D

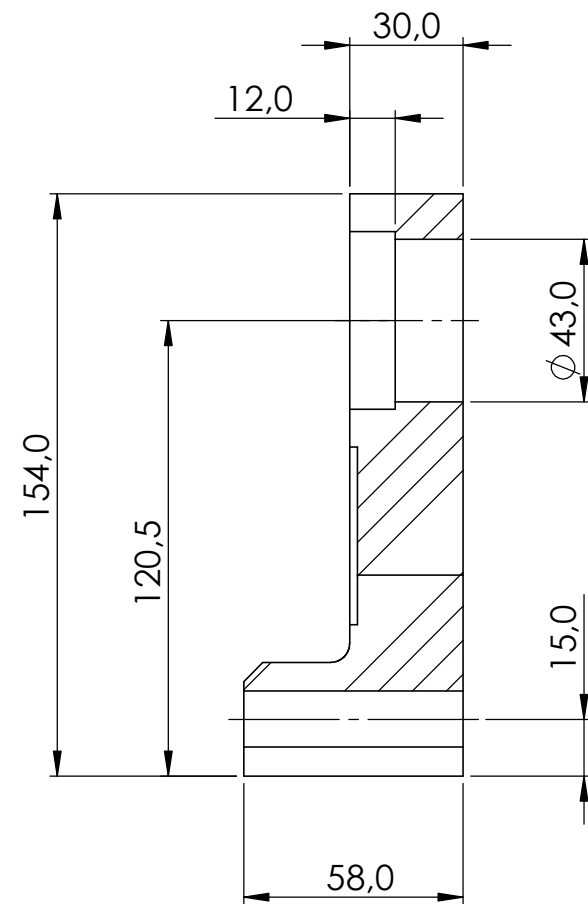
DESENHOS TÉCNICOS



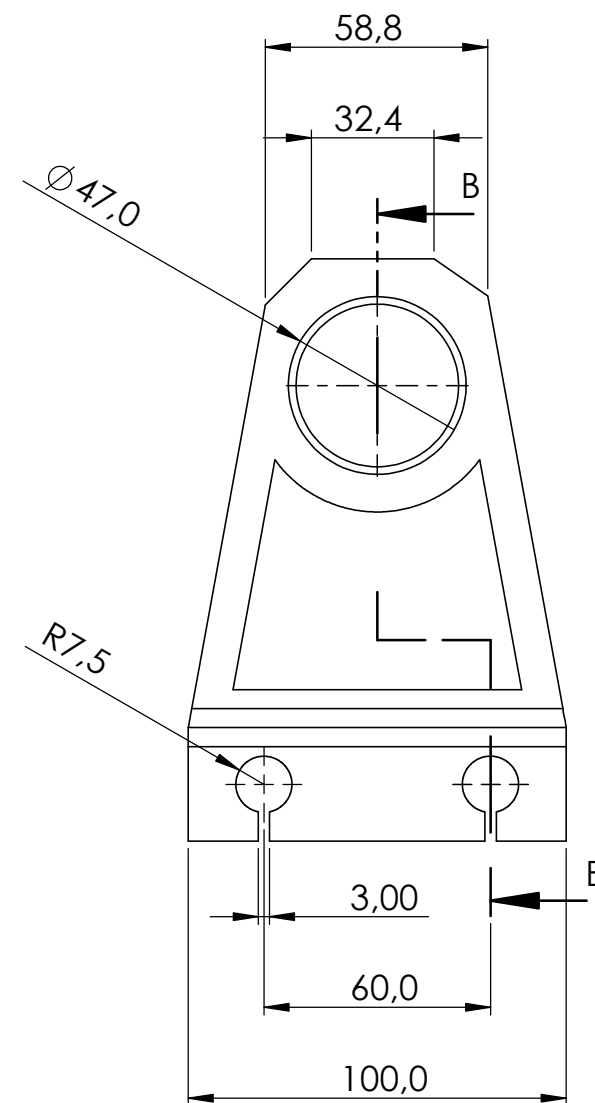
Observações: 2ª Revisão	Proj.				NOVA - S.S.T			
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha					
	Cop.							
	Visto							
	1:4	IMPRESSORA 3D POR REVOLUÇÃO			C11			
Toleran. ISO 2768-mK								
Substitui: C01								



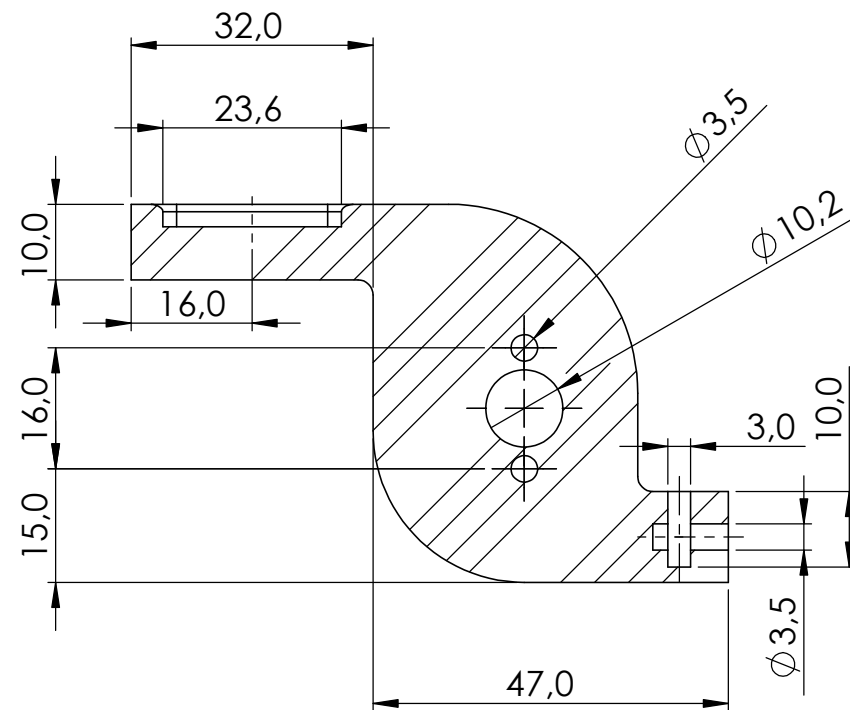
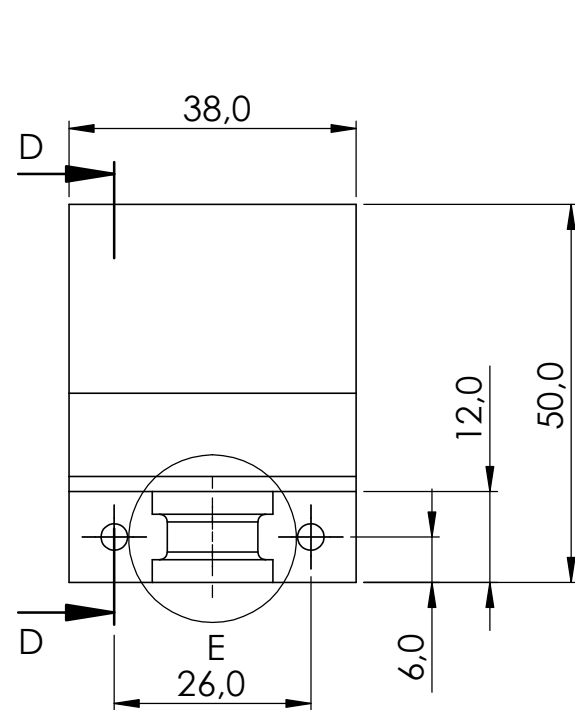
Observações:	Proj.										
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha								
	Cop.										
	Visto										
1:2		SUPORTE ANGULAR v2					CR01				
Toleran. ISO 2768-mK											
					Substitui: Suporte Angular 1 e Suporte Angular 2						



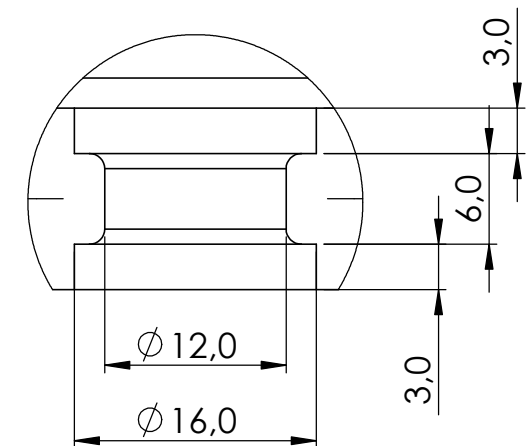
CORTE B-B



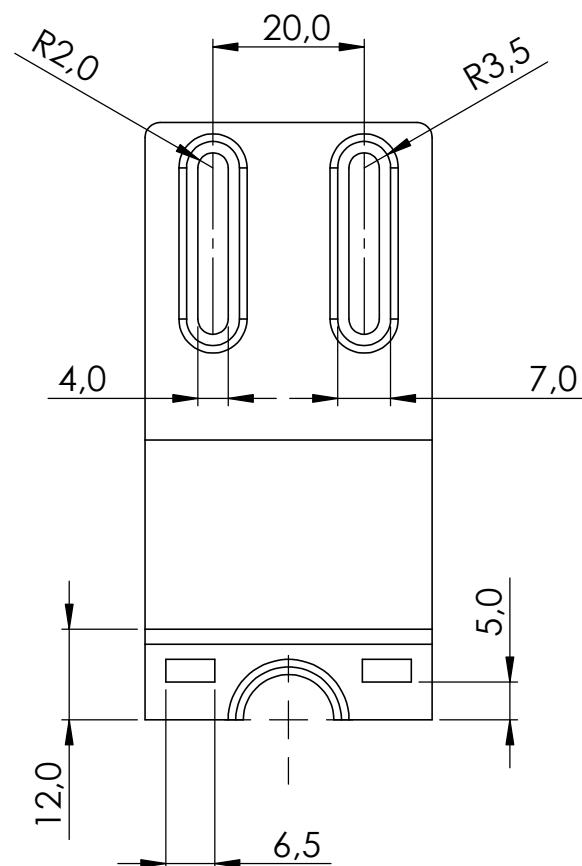
Observações:	Proj.								NOVA - S.S.T					
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha											
	Cop.													
	Visto													
	1:2	SUPORTE DE CONTRAPONTO v2					CR02							
Toleran. ISO 2768-mK														
					Substitui: Suporte do Contraponto									



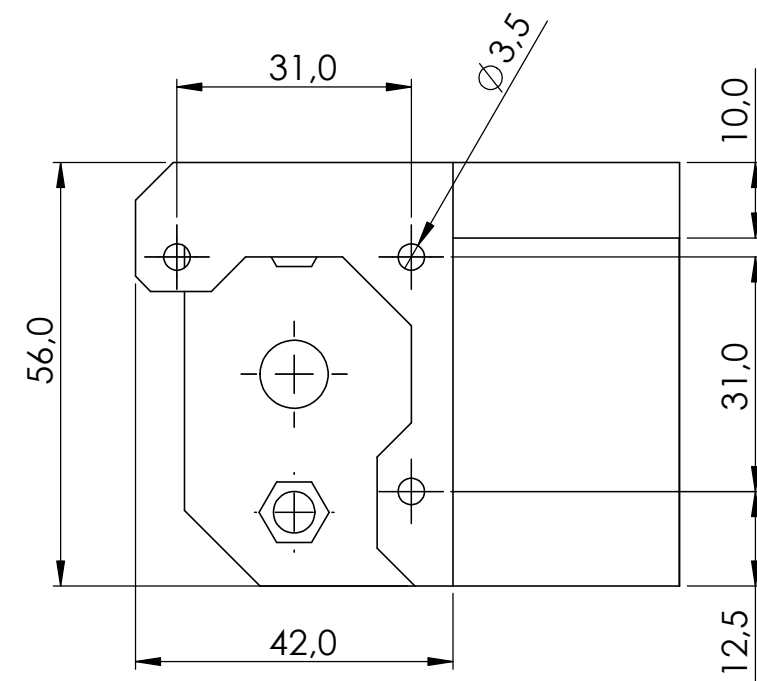
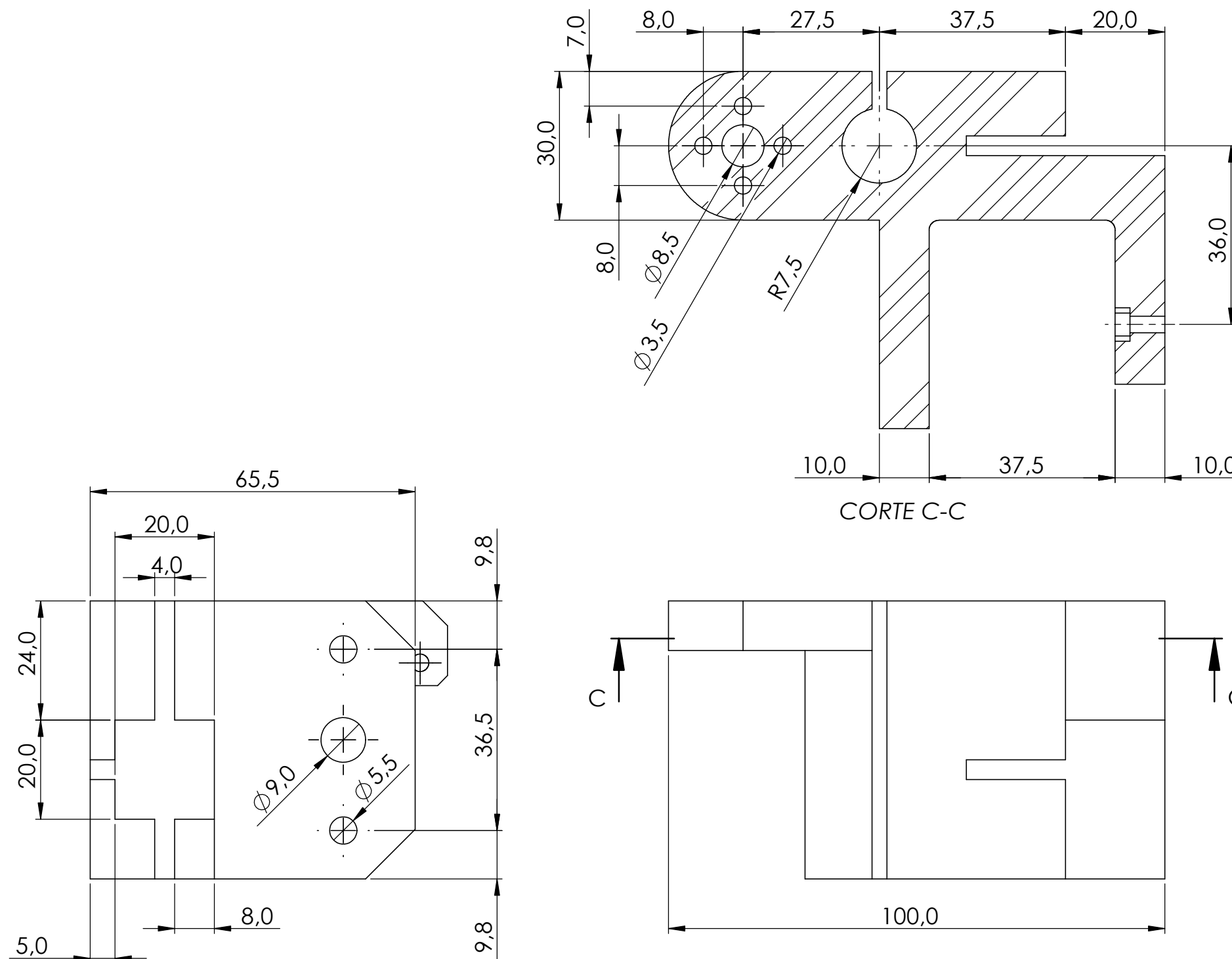
CORTE D-D



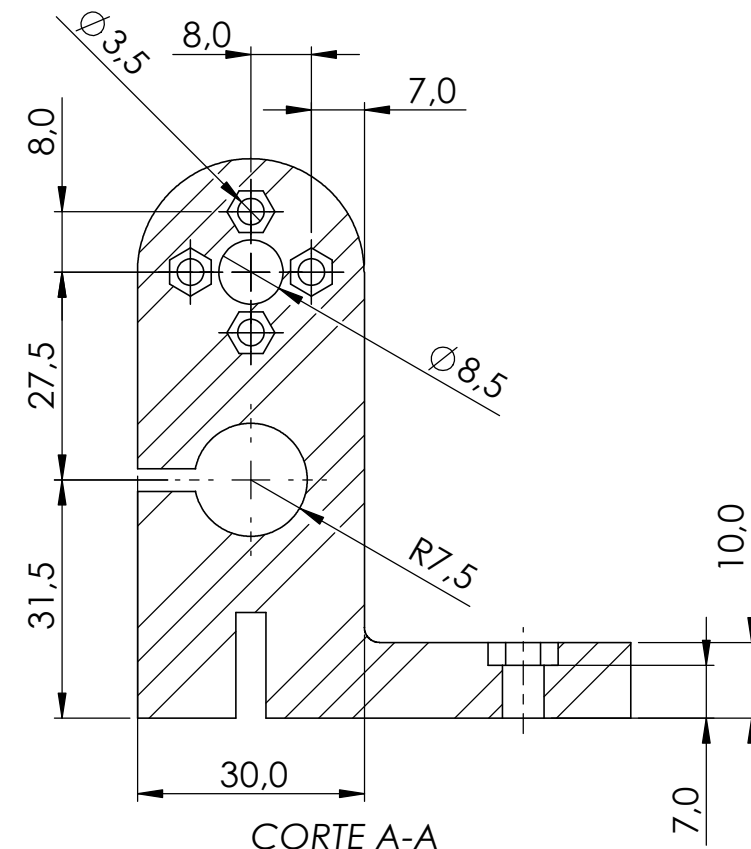
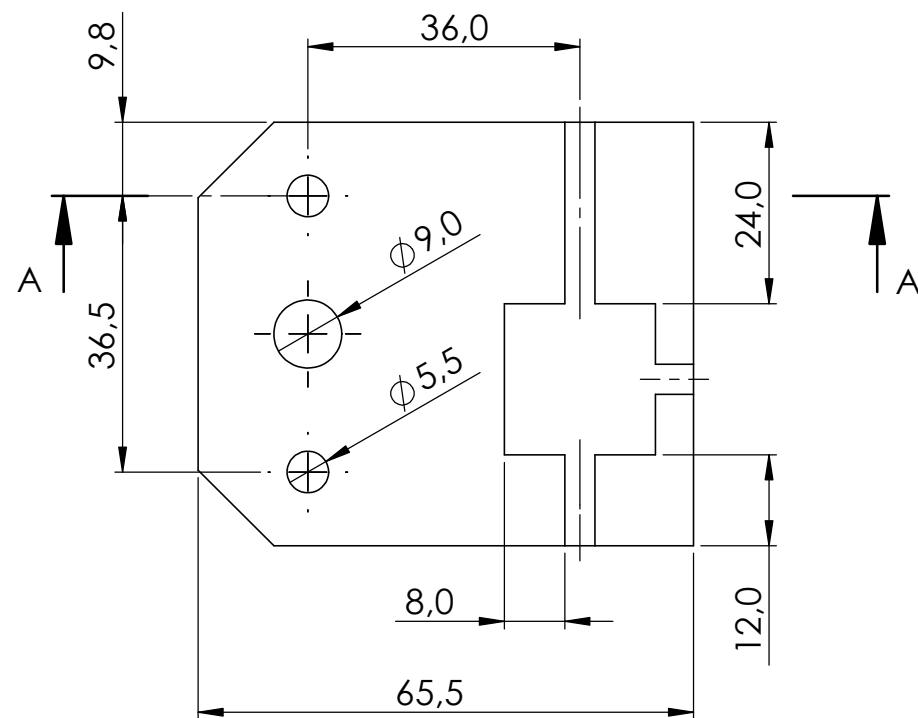
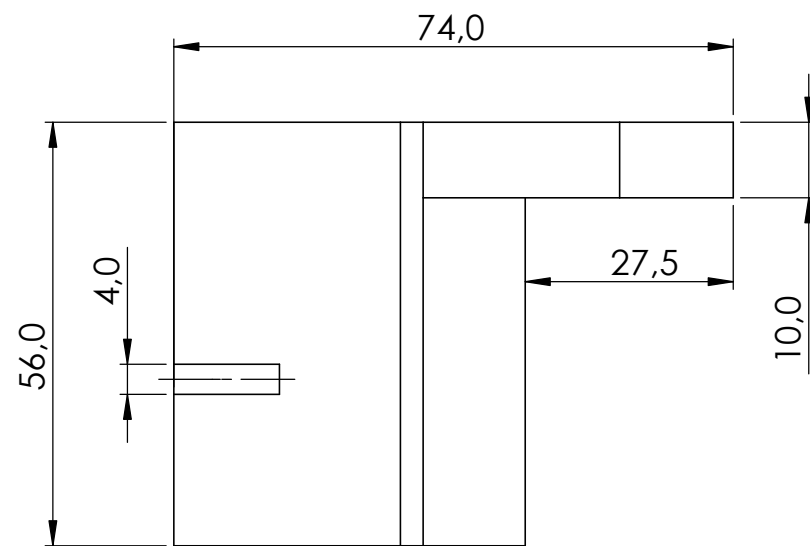
PORMENOR E
ESCALA 2 : 1



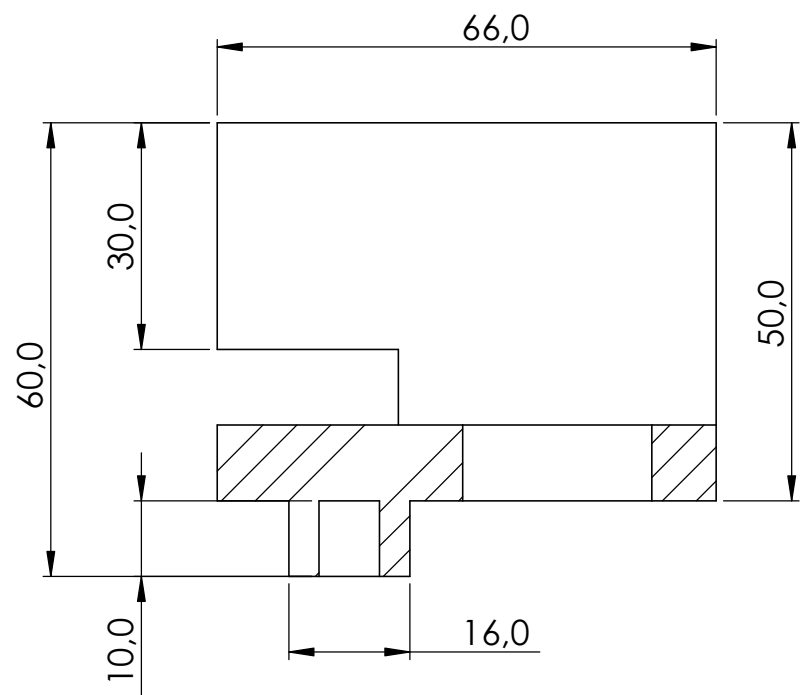
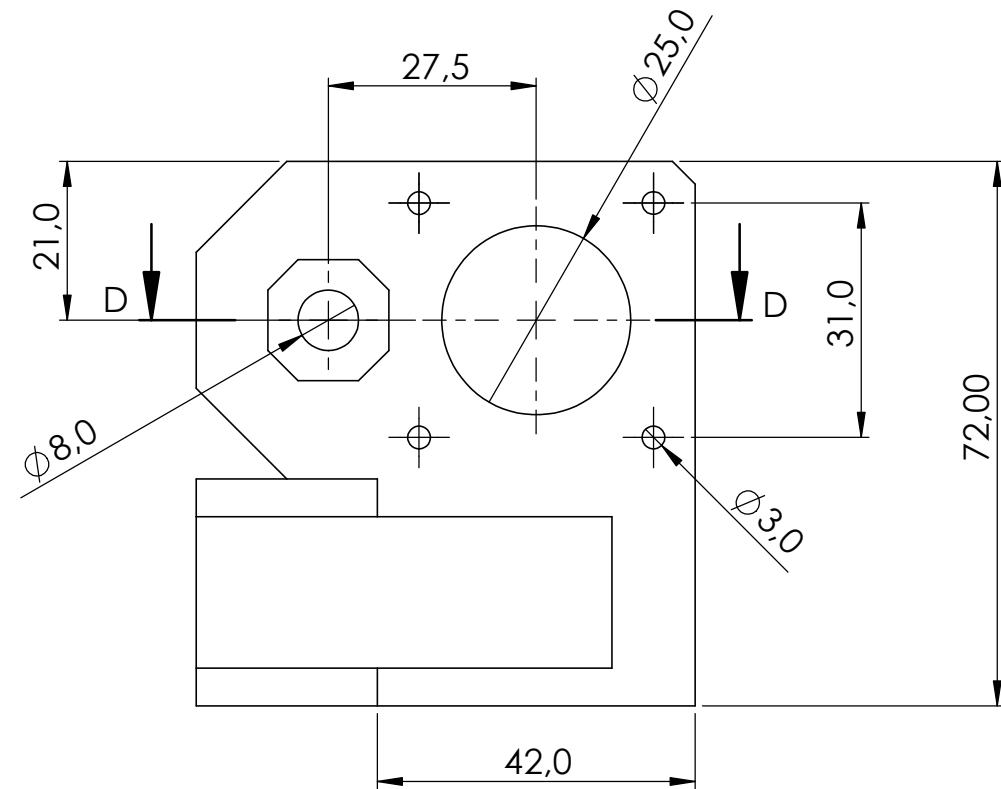
Observações:	Proj.			NOVA - S.S.T	
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
	Cop.				
	Visto				
	1:1	SUPORTE DO EXTRUSOR v2			CLH03
	Toleran. ISO 2768-mK				
				Substitui: Suporte do Extrusor	



Observações:	Proj.						
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha				
	Cop.						
	Visto						
	1:1	SUPORTE HORIZONTAL DIREITO			CLH01		
Toleran. ISO 2768-mK							
Substitui:Suporte Axial Direito							

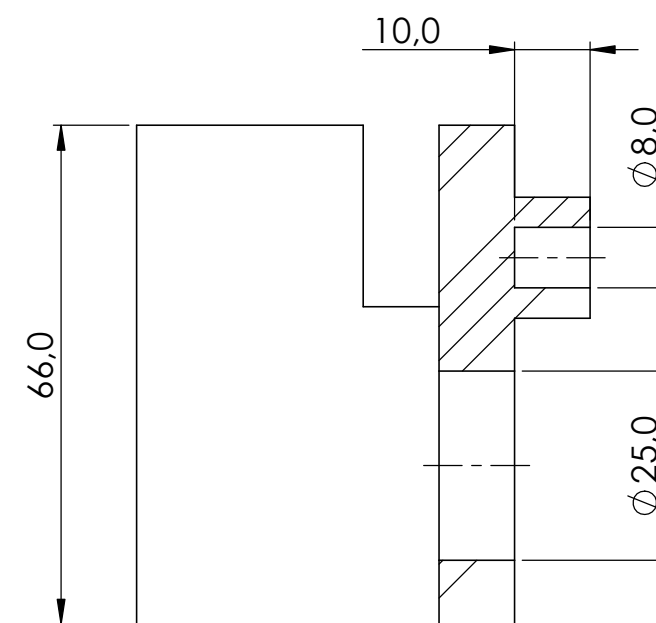
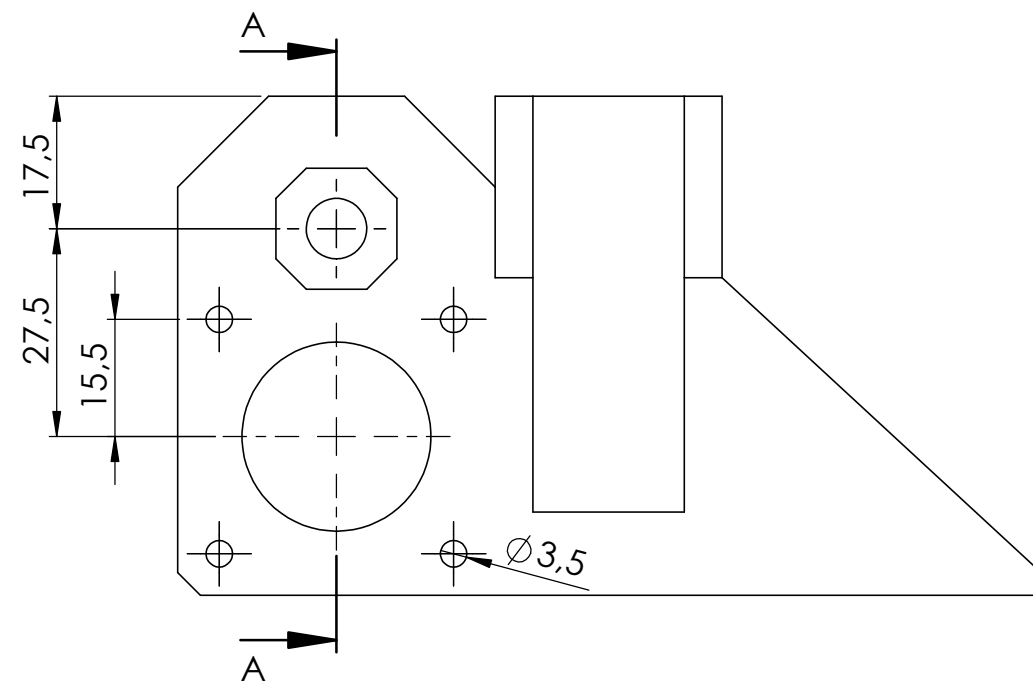


Observações:	Proj.								NOVA - S.S.T				
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha										
	Cop.												
	Visto												
	1:1			SUPORTE HORIZONTAL ESQUERDO					CLH02				
Toleran. ISO 2768-mK													
									Substitui: Suporte Axial Esquerdo				

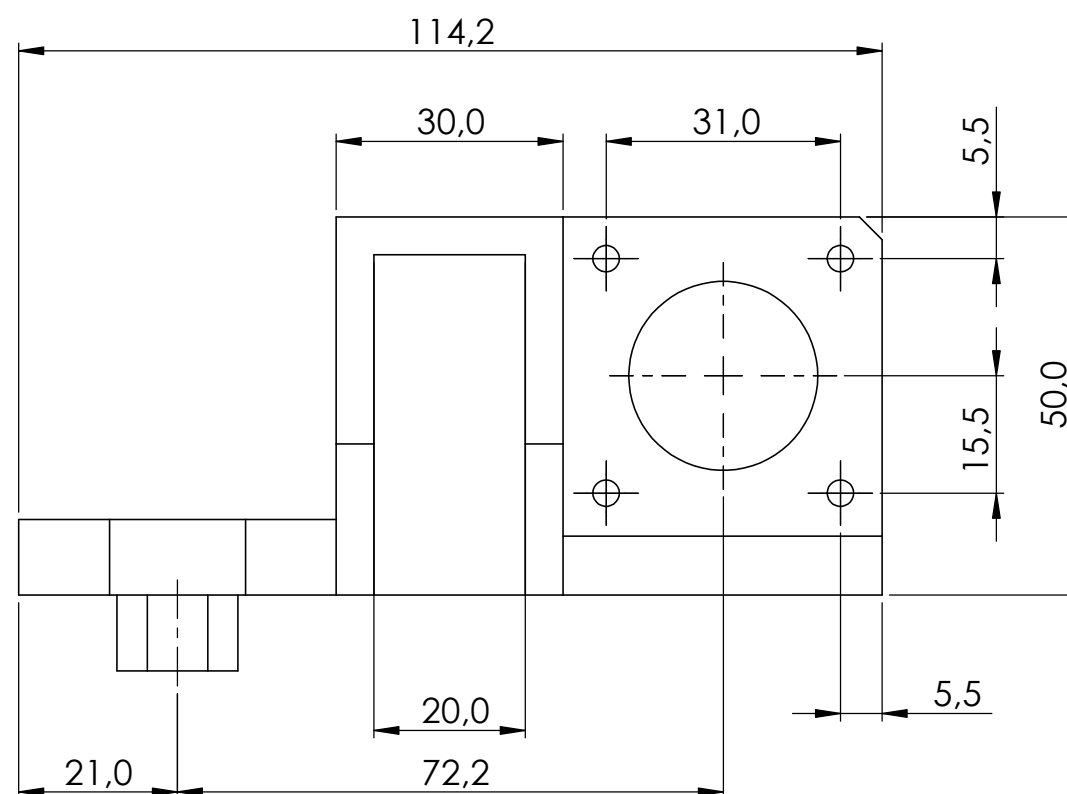


CORTE D-D

Observações:	Proj.				NOVA - S.S.T						
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha								
	Cop.										
	Visto										
	1:1	SUPORTE VERTICAL DIREITO				CLV02					
Toleran. ISO 2768-mK											
Substitui: Suporte Radial Superior Direito											

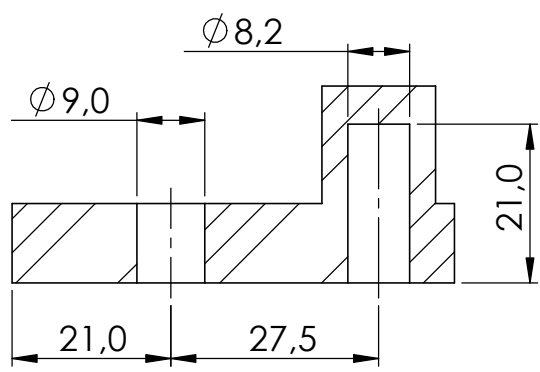


CORTE A-A

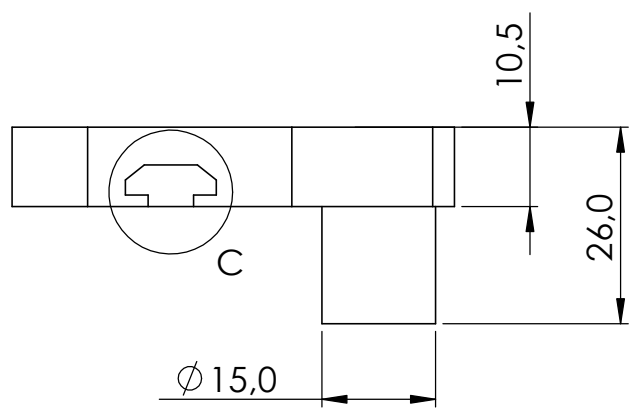
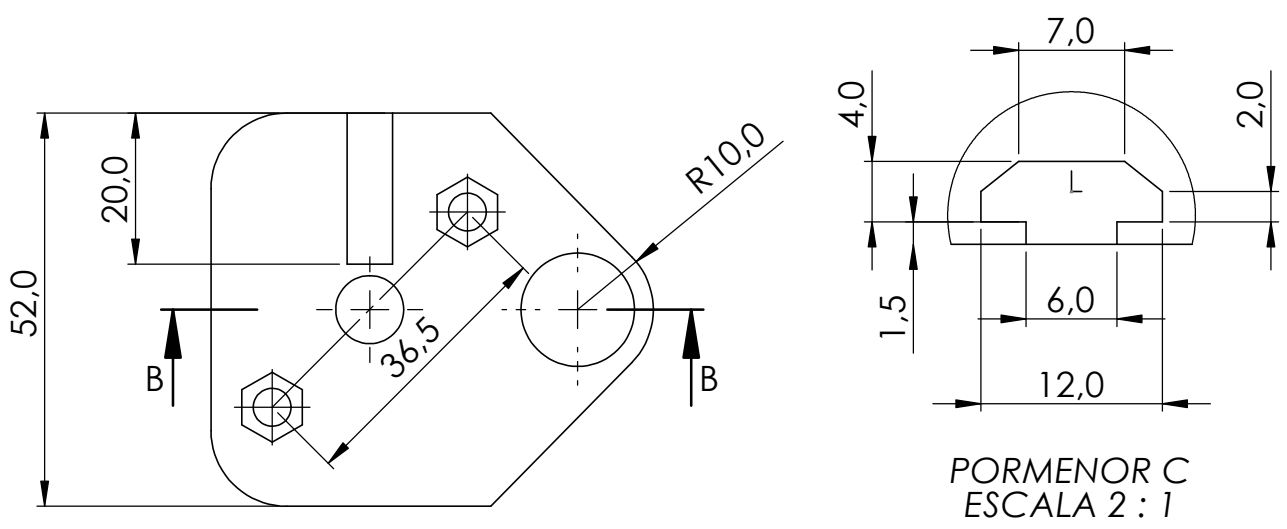


Observações:	Proj.						NOVA - S.S.T			
	Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha							
	Cop.									
	Visto									
	1:1	SUPORTE VERTICAL ESQUERDO			CLV01					
Toleran. ISO 2768-mK										
Substitui: Suporte Radial Superior Esquerdo										

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				



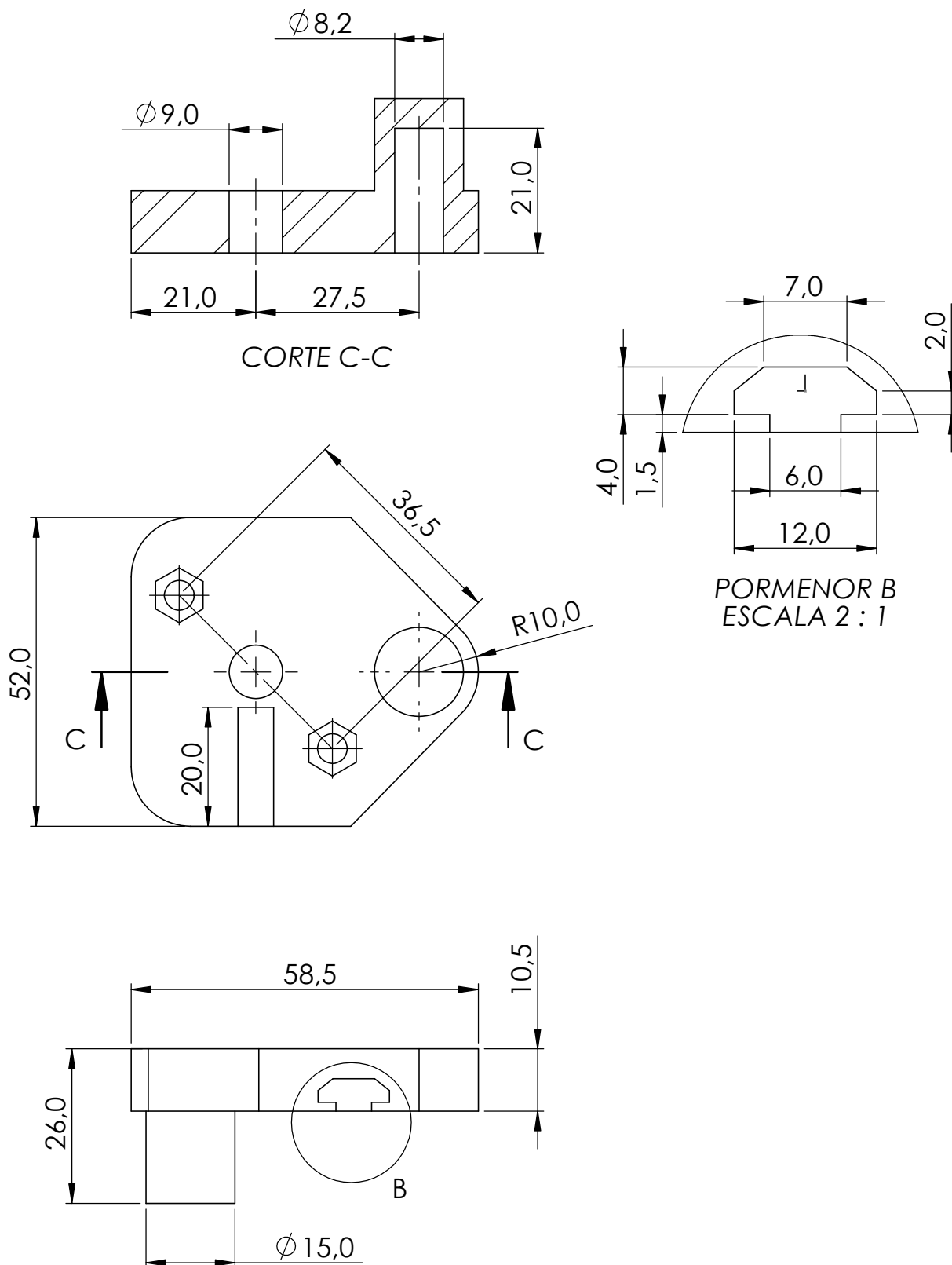
CORTE B-B



Observações:	1:1	SUPORTE RADIAL INFERIOR DIREITO v2	CLV04				
	Toleran. ISO 2768-mk						
			Substitui: Suporte Radial Inferior Direito				

Proj.		
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha
Copiou		
Visto		

NOVA - S.S.T.



Observações:

1:1

Toleran.
ISO
2768-mK

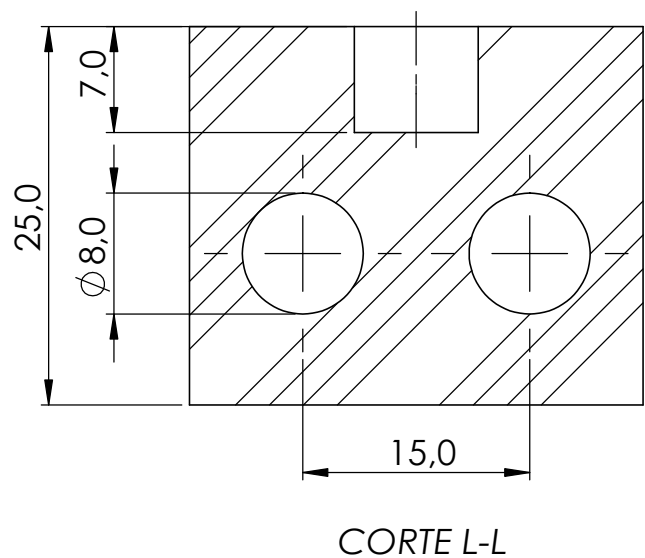
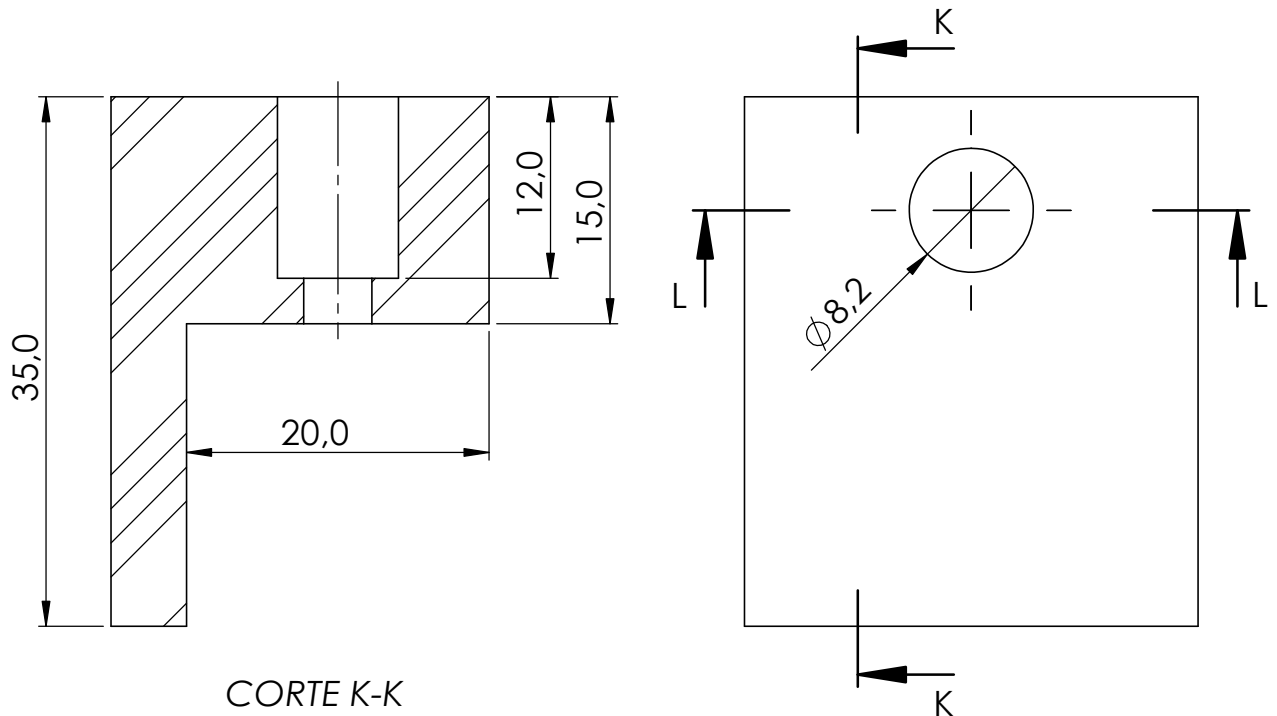
SUPOORTE RADIAL
INFERIOR ESQUERDO v2

CLV03

Substitui: Suporte Radial Inferior Esquerdo

Proj.		
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha
Copiou		
Visto		

NOVA - S.S.T.



Observações:

2:1

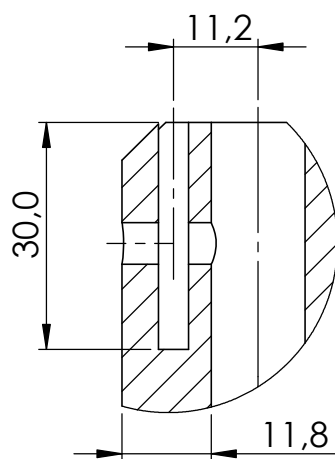
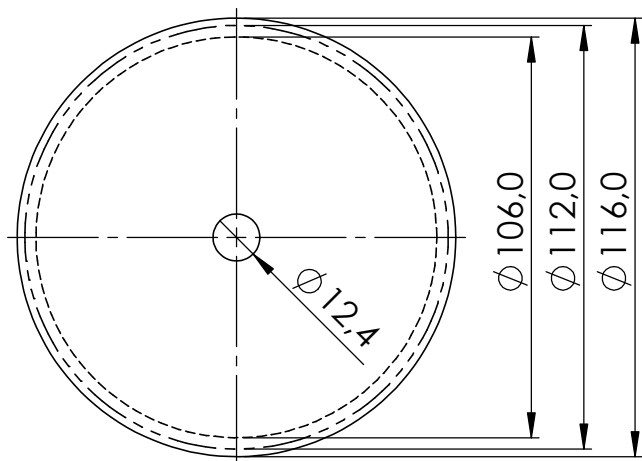
Toleran.
ISO
2768-mK

SUPORTE DO
PERFIL v2

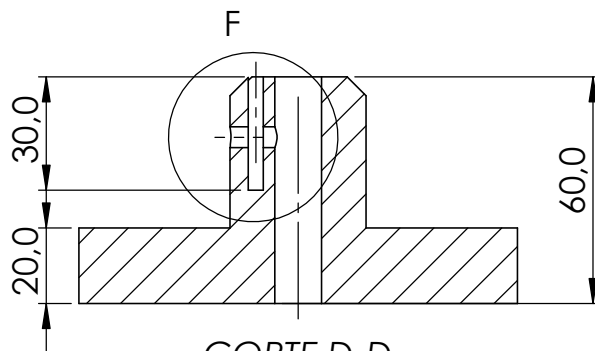
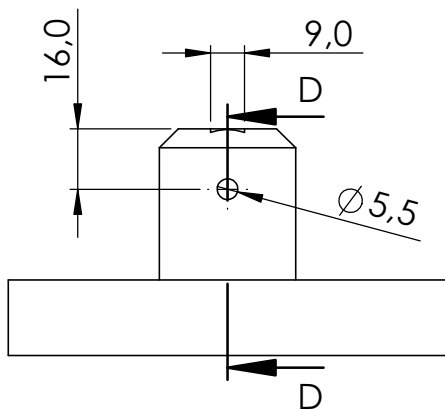
CR06

Substitui: Suporte do Perfil

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				



PORMENOR F
ESCALA 1 : 1



CORTE D-D

Observações:	1:1	RODA v2	CR03				
	Toleran. ISO 2768-mK						
			Substitui: Roda				

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				

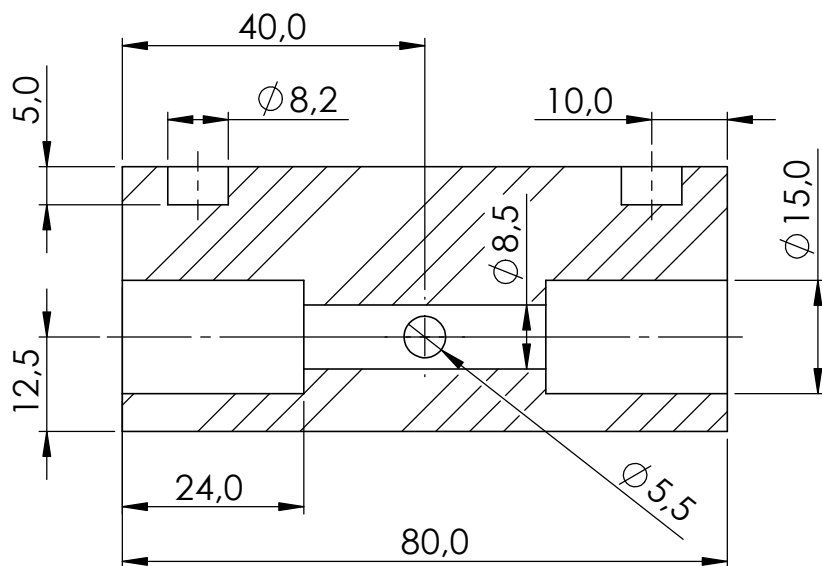
The drawing shows a pinhão (gear) with the following dimensions:

- Front view (left): A rectangle with a width of 20,0.
- Side view (right): A circular profile with a central hole. The outer diameter is $\phi 42,0$. The inner diameter of the gear teeth is $\phi 38,0$. The diameter of the central hole is $\phi 32,0$. The thickness of the gear is 3,0. The fillet radius at the base of the teeth is R2,5.

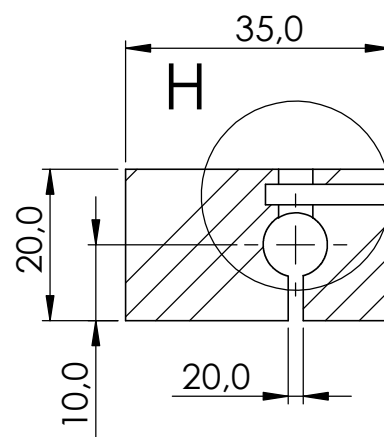
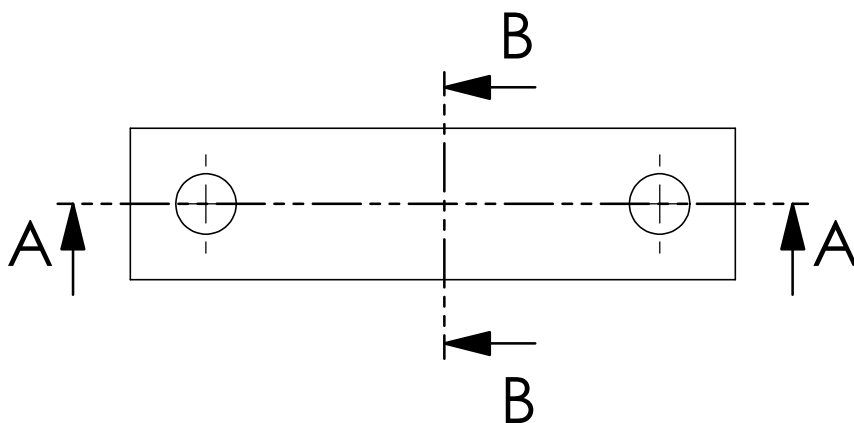
Observações:	1:1	PINHÃO	CR04
	Toleran. ISO 2768-mK		

Proj.		
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha
Copiou		
Visto		

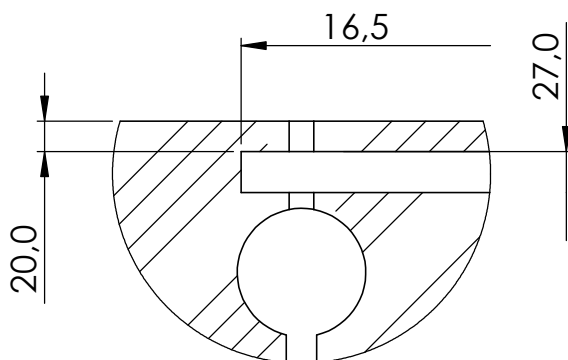
NOVA - S.S.T.



CORTE A-A



CORTE B-B



PORMENOR H
ESCALA 2 : 1

Observações:

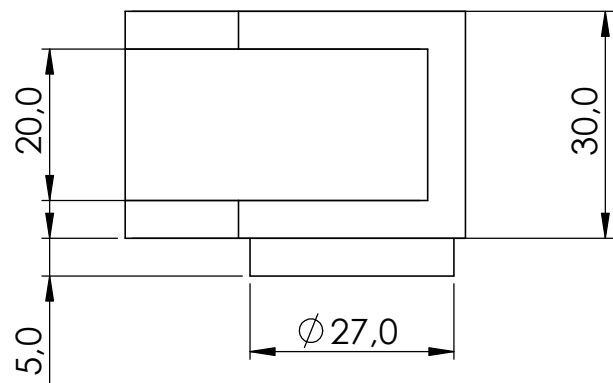
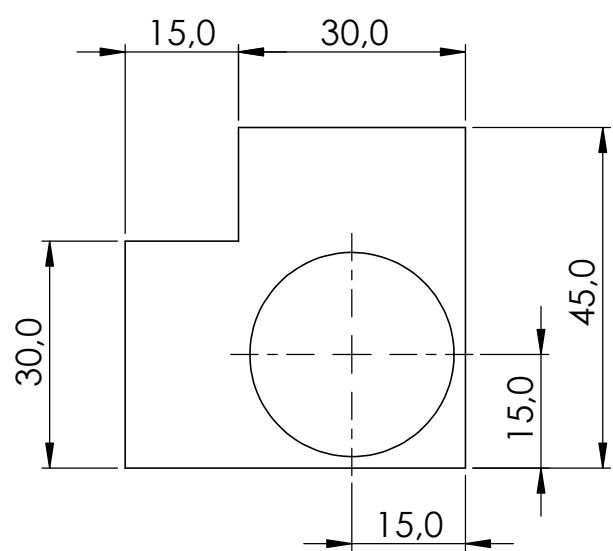
1:1

Toleran.
ISO
2768-mK

CURSOR DO
CONTRAPONTO

CR05

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				



Observações:	1:1	PÉ v2	E01				
	Toleran. ISO 2768-mK						
			Substitui: PÉ				

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				

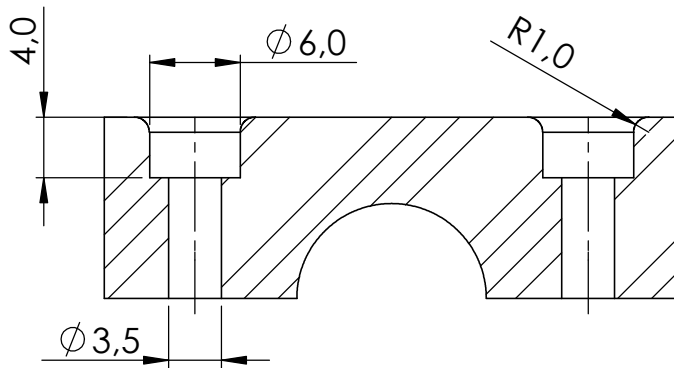
10,0 30,0 R5,0 $\phi 25,0$ $\phi 12,3$ $\phi 50,0$ C C

CORTE C-C

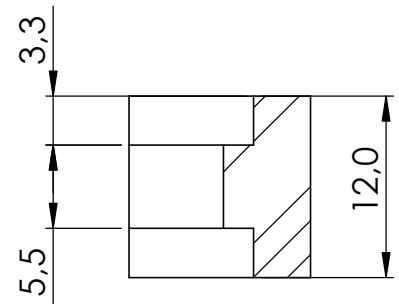
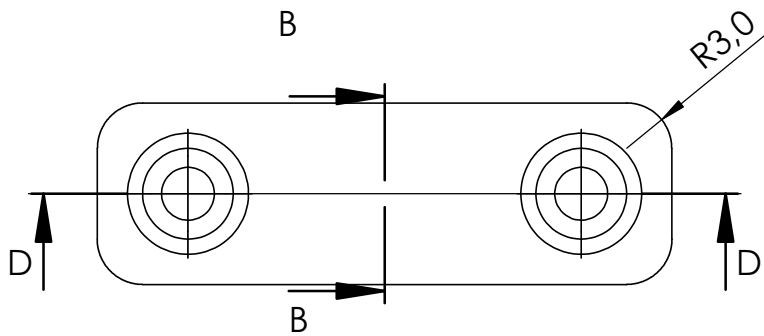
Observações:	1:1	ACOPLADOR AUXILIAR	CR08
	Toleran. ISO 2768-mK		

Proj.		
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha
Copiou		
Visto		

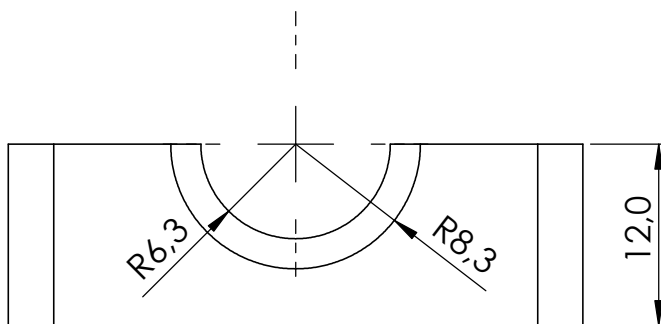
NOVA - S.S.T.



CORTE D-D



CORTE B-B



Observações:

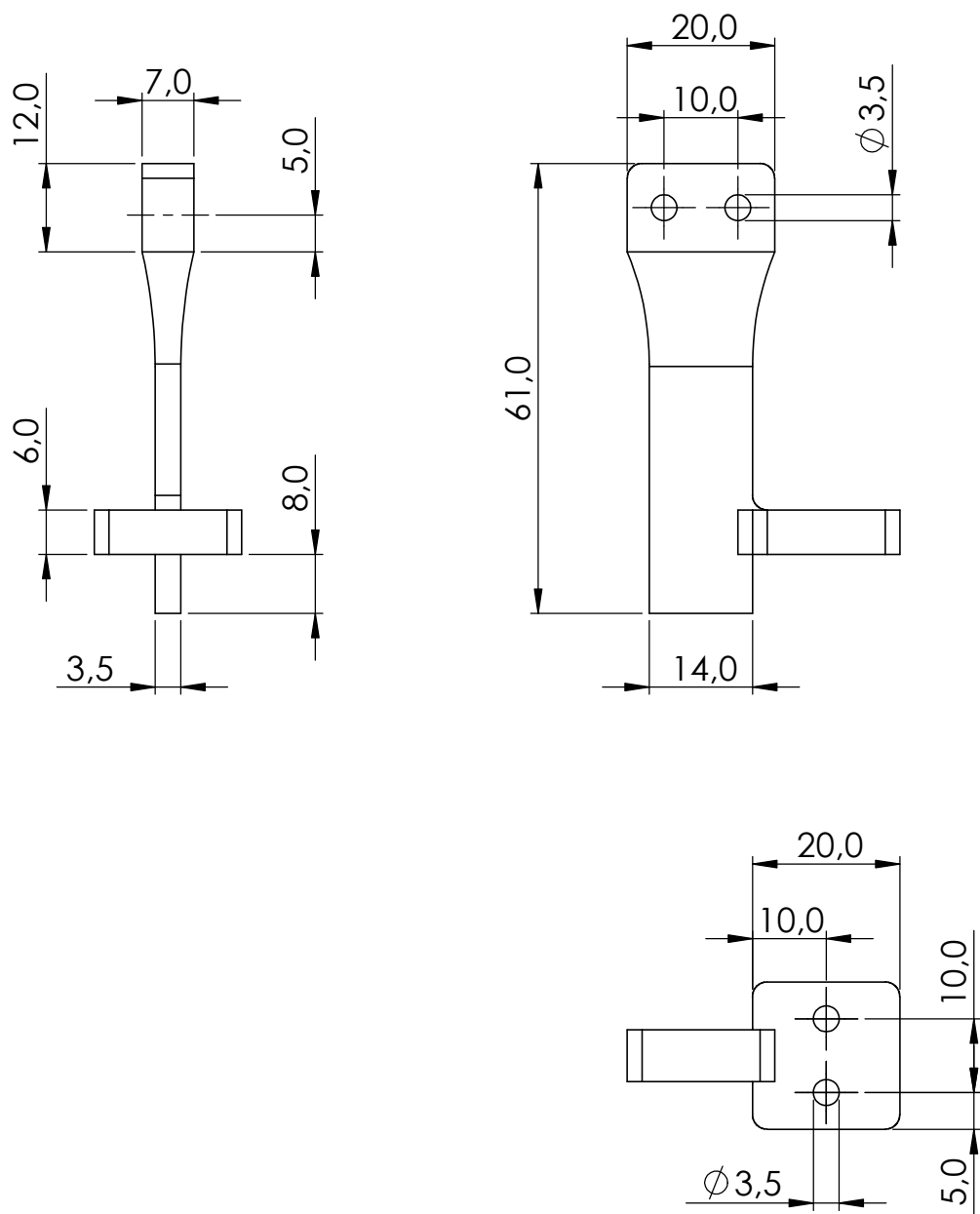
2:1

Toleran.
ISO
2768-mK

**BRAÇADEIRA
DE REFORÇO**

CLH04

Proj.			NOVA - S.S.T.	
Des.	30/03/23	Gonçalo Rocha		
Copiou				
Visto				



Observações:	1:1	SUPOORTE SENSOR FIM DE CURSO	CLH05
	Toleran. ISO 2768-mK		



