

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

FABIO MIGUEL RODRIGUES DA SILVA

PROJETO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO
PARA IMPRESSORA 3D

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

FABIO MIGUEL RODRIGUES DA SILVA

**PROJETO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO
PARA IMPRESSORA 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Laercio Javarez Junior

PONTA GROSSA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJETO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESSORA 3D

por

FABIO MIGUEL RODRIGUES DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 05 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Orientador

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Laercio Javarez Junior, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, bem como a inspiração para o tema escolhido.

Aos meus colegas de curso.

Ao departamento do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Tudo o que um sonho precisa para
ser realizado é alguém que acredite
que ele possa ser realizado.
(SHINYASHIKI, Roberto, 2004)

RESUMO

SILVA, Fabio Miguel Rodrigues. **Projeto de extrusora de filamento para impressora 3D**. 2018. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto e construção de uma extrusora para filamento de impressoras 3D que utilizam o método de impressão FDM (*Fused Deposition Modeling*). Seu início se deu a partir da constatação da necessidade de um sistema simples para produzir filamentos de impressora 3D sob demanda e com características desejadas, como por exemplo cor e material. Para atender essa necessidade citada, iniciou-se o projeto com um desenho em software CAD (*Computer Aided Design*), baseado no modelo Felfil. Uma breve explicação dos principais componentes utilizados, bem como suas funções foi apresentada. Como diferencial no projeto original, foi projetada uma matriz de extrusão capaz de manter uma temperatura de saída do filamento próximo a 100°C. Os resultados encontrados foram obtidos através de uma simulação térmica por elementos finitos da matriz de extrusão e também pela montagem física do modelo.

Palavras-chave: Extrusora. Impressão 3D FDM. Impressão 3D. Filamento. DIY.

ABSTRACT

SILVA, Fabio Miguel Rodrigues. **Project of filament extruder for 3D printer**. 58 p. Work of Conclusion Course Master Degree in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The present work aims to develop the design and construction of an extruder for filament of 3D printers that use the FDM (Fused Deposition Modeling) printing method. Its beginning occurred from the realization of the need for a simple system to produce 3D printer filaments on demand and with desired characteristics, such as color and material. To meet this need, the project was started with a drawing in CAD (Computer Aided Design) software, based on the Felfil model. A brief explanation of the main components used as well as their functions was presented. As a differential in the original design, an extrusion die capable of maintaining a filament outlet temperature close to 100°C was designed. The results were obtained through a thermal simulation by finite elements of the extrusion die and also by the physical assembly of the model.

Keywords: Extruder. FDM 3D Printing. 3D Printing. Filament. DIY.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Fused Depositing Modeling (FDM)</i>	17
Figura 2 - Extrusora do tipo rosca simples	20
Figura 3 - Fluxo do projeto	22
Figura 4 - Broca de pua.....	25
Figura 5 - Elementos da matriz de extrusão.....	26
Figura 6 - Representação da matriz	26
Figura 7 - Exemplos de sinais PWM	27
Figura 8 - Representação do regulador PWM.....	28
Figura 9 - Representação do SSR	29
Figura 10 - Representação do Pid REX D-100.....	30
Figura 11 - Renderização do projeto em CAD.....	33
Figura 12 - Projeto CAD em corte parcial.....	34
Figura 13 - Geometria considerada para simulação.....	35
Figura 14 - Região de contato entre a matriz e o suporte dos cartuchos	36
Figura 15 - Malha gerada	37
Figura 16 - Sólido Estrutural Tetraedro	37
Figura 17 - Região considerada para convecção	38
Figura 18 - Áreas consideradas para convecção e cálculo do h	43
Figura 19 - Resultados da simulação numérica	48
Fotografia 1 - Extrusora modelo <i>Lyman Filament Extruder</i>	23
Fotografia 2 - Extrusora modelo Felfil Evo	24
Fotografia 3 - Processo de impressão 3D	45
Fotografia 4 - Peças usinadas em latão	45
Fotografia 5 - Componentes eletrônicos utilizados.....	46
Fotografia 6 - Pré-montagem da extrusora	47
Fotografia 7 - Extrusora montada.....	47
Gráfico 1 - Características dos coolers escolhidos vs h	41
Gráfico 2 - Relação entre tempo e temperatura	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre tensão e rotação	28
Tabela 2 - Potência elétrica de cada componente	31
Tabela 3 - Características dos coolers disponíveis comercialmente	32
Tabela 4 - Propriedades do ar a 500K	39
Tabela 5 - Descrição dos elementos da matriz	42

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fórmula para cálculo da potência elétrica.....	31
Equação 2 – Equação para cálculo da velocidade de saída do ar	32
Equação 3 - Número de Reynolds	39
Equação 4 - Número de Prandtl	39
Equação 5 - Número de Nusselt para escoamento externo	40
Equação 6 - Número de Nusselt	40

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DIY	Do It Yourself
FDA	Food and Drug Administration
FDM	Fused Deposition Modeling
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSDS	Material Safety Data Sheets
PA	Poliamida
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PLA	Poliácido láctico
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Proportional–Integral–Derivative
SSR	Solid State Relay

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 FABRICAÇÃO DIY	15
2.2 MÉTODO FDM	16
2.2.1 Materiais Utilizados Para Prototipagem Rápida	17
2.3 MATÉRIA PRIMA	18
2.3.1 Extrusão de Materiais Poliméricos	19
2.3.1.1 Extrusão por Fusão	20
2.4 EXTRUSORA DE FILAMENTOS E SUA JUSTIFICATIVA	20
2.4.1 Segurança no Processo de Extrusão	21
3 METODOLOGIA	22
3.1 MODELO <i>LYMAN FILAMENT EXTRUDER</i>	22
3.2 MODELO FELFIL	23
3.3 COMPONENTES DO PROJETO DA EXTRUSORA	24
3.3.1 Motor de Corrente Contínua	24
3.3.2 Fuso	25
3.3.3 Matriz	25
3.3.4 Regulador PWM	27
3.3.5 SSR	29
3.3.6 Controlador de Temperatura PID REX D-100	29
3.3.7 Termopar tipo K	30
3.3.8 Fonte de Alimentação	31
3.3.9 Elemento aquecedor	31
3.3.10 <i>Cooler</i> para resfriamento da matriz	32
3.4 PROJETO EM CAD	32
3.5 ANÁLISE TÉRMICA DA MATRIZ POR ELEMENTOS FINITOS	34
3.5.1 Simulações computacionais	34
3.5.1.1 Geometria	35
3.5.1.2 Materiais	35
3.5.1.3 Região de contato	36
3.5.1.4 Malha	36
3.5.1.5 Parâmetros	38
3.5.1.6 Equação de transferência de calor por convecção (h)	38
3.6 CONSTRUÇÃO	44
3.6.1 Impressão de peças pelo método FDM	44
3.6.2 Fabricação do suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos e a matriz	45

3.6.3 Montagem dos componentes eletrônicos;	46
3.6.4 Montagem dos componentes mecânicos;	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	48
4.2 TESTE DE EXTRUSÃO.....	49
5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A - Detalhamento do bico de extrusão	54
ANEXO B - Detalhamento do suporte dos cartuchos aquecedores	55
ANEXO C - Detalhamento da câmara	56
ANEXO D - Detalhamento do conjunto da matriz em corte.....	57
ANEXO E - Detalhamento do esquema elétrico	58

1 INTRODUÇÃO

O mercado de impressoras 3D está em crescimento, tornando essa tecnologia mais popular e acessível para todos. Esse desenvolvimento acelerado, focado na inovação, torna essa tecnologia cada vez mais acessível, permitindo o empreendedorismo local (FOX, 2014).

Essa popularização de impressoras 3D se tornou possível devido a criação do método FDM (modelagem por depósito de material fundido) e através de projetos comunitários online, onde dicas e tutoriais ficam disponíveis para qualquer pessoa com interesse poder criar sua própria impressora.

Atualmente existem diversos materiais que podem ser utilizados para a impressão 3D, sendo os mais populares o PLA, ABS e Nylon, cada qual com suas características de impressão, qualidade e resistência. Partindo para o pensamento de construção DIY (faça você mesmo) para produtos, percebe-se que a maior restrição existente hoje para a livre fabricação de peças em 3D pelo método FDM está no filamento, o qual é comercializado na forma final para uso, com um custo alto e com propriedades e características limitadas (RAYNA; STRIUKOVA, 2016). Uma grande quantidade de novos materiais, sendo estes mais resistentes e mais leves, estão sendo desenvolvidos de modo a tornar a impressão 3D mais rápida e barata (“Researchers use 3D printer to make new materials”, 2016).

1.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir uma extrusora de filamentos poliméricos para impressão 3D.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Analisar a viabilidade da construção de uma extrusora polimérica para filamentos utilizando a metodologia DIY.
- Como diferencial do projeto inicial, pretende-se projetar um bico de extrusão aletado que seja capaz de resfriar o filamento na saída para uma temperatura próxima à 100°C.

- Avaliar a viabilidade da fabricação da extrusora utilizando partes feitas a partir de uma impressora 3D e componentes de baixo custo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FABRICAÇÃO DIY

O termo *Do It Yourself* (DIY) pode ser traduzido como “Faça você mesmo”, e mostra a ideia de que você mesmo pode construir bens e recursos, baseado em conhecimentos prévios e facilmente disponíveis para consulta.

De acordo com Toffler (1984), em seu livro “A Terceira Onda” existem três ondas da sociedade: Agricultura, Industrial e da Informação. Estamos exatamente nessa terceira “Onda”. A Informação torna-se acessível a todos, a popularização de softwares livres cresce em todas as áreas e comunidades espalhadas por todo o mundo. Focadas em resolver e otimizar problemas de um específico nicho de produto, mostram-se muito eficazes.

A democratização de tecnologias para fabricação pessoal, em paralelo com o aumento do desejo de pessoas quererem criar seus próprios produtos de forma personalizada trouxe ótimas oportunidades para experimentos em quase todas as áreas (ROGNOLI et al., 2015).

A tecnologia que mais se beneficiou disso e mais tem crescido ultimamente é a da impressão 3D. Essa revolução digital que torna possível a fabricação de quase qualquer coisa, começou em 1952 com pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), criando um equipamento controlado por sistema numérico (CNC). Hoje essas máquinas CNC estão presentes em quase todo produto comercial.

Na década de 1980 a impressão 3D começou a ser desenvolvida utilizando-se de uma estrutura CNC, com um sistema de fusão térmico de filamentos plásticos (GERSHENFELD, 2012).

Dentro da Era da Informação sugerida por Alfin Toffler englobando a impressão 3D, têm-se a internet como facilitadora dessa troca de informações, e como exemplo, desenhos em computador de diversos componentes, peças e objetos prontos para serem impressos e até projetos inteiros do tipo DIY para construção de impressoras caseiras.

Essas impressoras caseiras de baixo custo possuem um forte potencial na educação. Elas podem ser aplicadas desde as séries iniciais como incentivo à tecnologia, ou como ferramenta ao aprendizado na matemática, física, química,

biologia, informática, etc. Para uso na ciência, por exemplo, podem-se imprimir ilustrações de exercícios matemáticos resolvidos por métodos gráficos, ou elementos e ligações químicas que podem ser impressos em escalas macroscópicas. (FONDA, 2013).

2.2 MÉTODO FDM

Métodos de impressão conhecidos como prototipagem rápida não tiveram um impacto significativo no mercado logo após a sua invenção, na década de 1980. Máquinas muito grandes e caras, junto com processos muito demorados limitavam a sua utilização apenas para usos muito específicos.

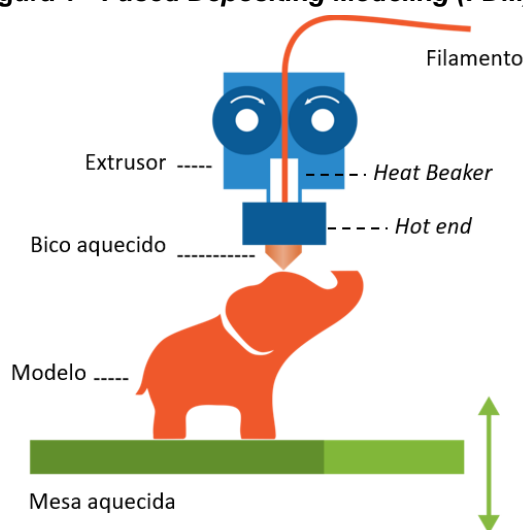
As primeiras impressoras que começaram a apresentar resultados satisfatórios começaram a partir dos anos 2000, e tiveram um grande aumento no ano de 2007, ano em que o método FDM tornou-se popular.

Trazendo a prototipagem rápida para as “massas”, o método FDM teve como vantagem o fato de mais pessoas trabalharem para o desenvolvimento de melhores produtos, e também soluções criativas para peças e objetos que poderiam ser impressos (RAYNA; STRIUKOVA, 2016).

O método FDM (modelagem por depósito de material fundido) consiste nas seguintes etapas:

- 1- O filamento é tracionado por um sistema chamado de extrusor. Esse filamento passa então por um tubo metálico chamado *Heat Breaker*, que serve como guia até o *HotEnd* (uma peça metálica, geralmente alumínio, o qual está a uma elevada temperatura para permitir a fusão do material de adição, filamento).
- 2- Após o filamento ser fundido, ele é forçado a passar pelo bico aquecido, finalmente sendo depositado na mesa aquecida, sempre em camadas e formando uma nova peça. Todos esses componentes podem ser facilmente visualizados na Figura 1.

Figura 1 - Fused Depositing Modeling (FDM)



Fonte: Adaptado de (JASTER, 2017)

Seguindo esse princípio, surgiram novas variações, tornando esse método o mais simples e acessível para a impressão 3D.

2.2.1 Materiais Utilizados Para Prototipagem Rápida

Existe uma grande variedade de materiais disponíveis e economicamente viáveis para serem utilizados em impressoras 3D. Os tipos mais comuns e preferíveis são: Ácido Polilático (PLA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Politereftalato de Etileno Glicol (PETG), Poliamida (PA) ou comercialmente conhecido como Nylon®.

Desses todos, os mais comuns e acessíveis são o PLA e ABS. O PLA é um polímero plástico, sem odor e que exige uma baixa energia térmica para fundir, quando comparado com o ABS. PLA entrou em muitas indústrias como implantes médicos biodegradáveis e embalagens para alimentos. Em contraste, o ABS é o material mais durável, e que pode suportar temperaturas mais elevadas.

O PA, mais conhecido como Nylon, é um tipo de polímero muito robusto e também flexível, quando utilizado em peças com paredes finas. O PETG, é uma combinação de PET com Glicol, em diferentes concentrações. Assim como o PLA, o PETG é um polímero *food-safe*, aprovado pela FDA (*Food and Drug Administration*), agência americana responsável pela proteção e promoção da saúde dos Estados Unidos. O PETG também tem característica de ser mais resistente mecanicamente em relação ao PLA, mas não é biodegradável (ALSSABBAGH et al., 2017).

Dentre as propriedades mais importantes para o material a ser extrudado têm-se densidade a granel, coeficiente de atrito, tamanho das partículas, formato das partículas. Através destas propriedades, o comportamento do material durante a extrusão pode ser descrito com uma precisão razoável (RAUWENDAAL C., 2014).

Apesar de ser possível, o comportamento do material na extrusão não será avaliado neste trabalho.

2.3 MATÉRIA PRIMA

Os polímeros utilizados como matéria prima comercial em extrusoras vem na forma de granulado (*pellets*), e possuem um custo inferior ao do filamento acabado. Além do preço, pode-se realizar a mistura de mais materiais, inclusive reciclados, desde que esses tenham afinidades em sua ligação química.

Dependendo dos requisitos do produto a ser impresso, alguns aditivos devem ser adicionados para a mistura adquirir as propriedades desejadas.

Alguns polímeros exigem estar secos antes da extrusão, para evitar a sua degradação e perda de propriedades como a aderência entre as camadas. Nylon[®], poliéster, ABS, acrílico, e policarbonato são exemplos de materiais altamente higroscópicos, absorvendo rapidamente a umidade encontrada no ar. A qualidade e as propriedades do produto final são altamente dependentes da quantidade de umidade presente na matéria prima.

Entre os principais defeitos encontrados pela alta umidade, pode-se destacar imperfeições na superfície como furos, descolamento, ou mesmo um material espumoso (GILES; M.; WAGNER, 2004).

Outra desvantagem desse método é o fato de que muitas marcas de filamentos tendem a possuir diferentes propriedades físicas ou mecânicas, quando comparadas entre si.

Apesar do FDM ser o método mais popular e barato para a impressão 3D, sendo muitas vezes a porta de entrada para essa tecnologia, percebe-se que ele apresenta algumas desvantagens, e todas essas citadas anteriormente podem ser minimizadas quando se tem um filamento produzido sob demanda.

2.3.1 Extrusão de Materiais Poliméricos

O processo de extrusão tem sido um dos mais utilizados na manufatura de polímeros. A gama de produtos é imensa sendo os principais produtos contínuos como tubos, monofilamentos, perfis, filmes, e também material granulado, podendo ser virgem ou reciclado.

Dentre os tipos construtivos de extrusoras, o mais aplicado para polímeros fundidos é do tipo rosca simples. Dentre suas principais vantagens, tem se:

- Design simples
- Robustez
- Confiabilidade
- Custo / benefício

Esta tipo também pode ser encontrada como de simples estágio, devido ao fato que a rosca tem apenas uma seção de compressão (RAUWENDAAL C., 2014).

A extrusão de materiais poliméricos para produzir produtos semiacabados para aplicações comerciais é um processo integrado. O início se dá com o extrusora comprimindo um componente através de um tubo. Em algumas aplicações, as linhas de produção são muito longas e com numerosas operações. O sucesso da operação de extrusão depende de vários fatores, como:

- Temperatura de fusão e extrusão correta;
- Temperatura de fusão e extrusão uniforme;
- Temperatura de resfriamento;
- Pressão constante de extrusão;
- Rotação do fuso, que está relacionada com a velocidade de extrusão, e vazão do material acabado constante.

Todos esses parâmetros devem ser monitorados e controlados em todo o processo.

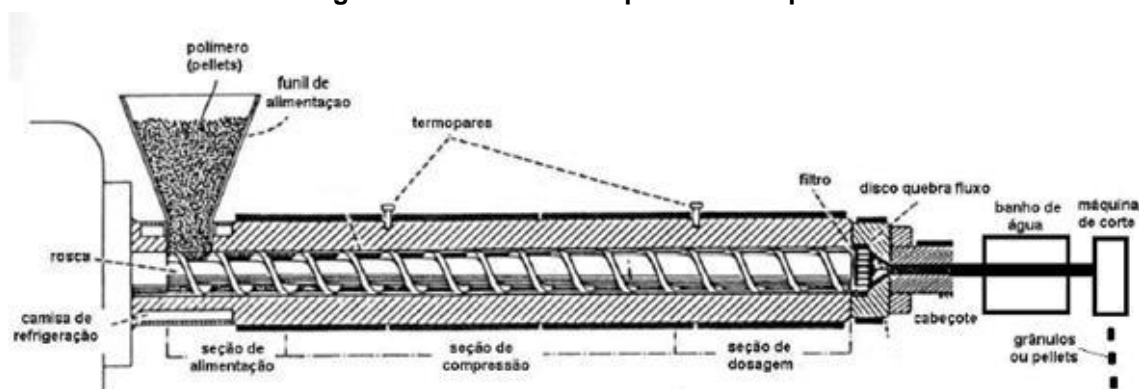
2.3.1.1 Extrusão por Fusão

A extrusão pode ser definida como um processo de modelagem de materiais para produzir um produto por forçar o material através de um orifício ou ferramental chamada matriz.

De forma resumida, uma extrusora se comporta como uma bomba que gera um polímero fundido, com pressão e temperatura uniformes para o molde (GILES; M.; WAGNER, 2004).

A Figura 2 mostra a representação de uma extrusora do tipo alimentação fundida.

Figura 2 - Extrusora do tipo rosca simples



Fonte: (SANTANA, R C; RIES, 2010)

Para a fusão uniforme do polímero, camisas de aquecimento necessitam ser aplicadas em torno do cilindro. Para controle uniforme de temperatura, termopares adicionados na entrada e na saída do material, devem ser ligados a um controlador eletrônico o tipo PID, o qual será explicado no item Controlador de Temperatura PID REX D-1003.3.6.

2.4 EXTRUSORA DE FILAMENTOS E SUA JUSTIFICATIVA

Como finalidade deste projeto, têm-se uma extrusora caseira acessível na qual pode-se fabricar filamentos com um preço mais baixo, devido à matéria prima ter

um custo inferior¹ quando comparado com um filamento comercial, bem como a possibilidade de mistura de materiais, criando um filamento híbrido com propriedades e características únicas, além da possibilidade de fabricar filamentos de diversas cores.

Ainda torna viável a fabricação de pequenas quantidades de filamento, sob demanda, para garantir suas propriedades logo após a fabricação, como por exemplo controle da umidade e flexibilidade.

2.4.1 Segurança no Processo de Extrusão

Muitos polímeros podem ser prejudiciais à saúde humana. Isto pode ser devido a sua interação com outros materiais, ou mesmo pelas altas temperaturas que eles podem atingir durante o processo de extrusão.

Utilizar uma base de dados do tipo MSDS (*Material Safety Data Sheets*), pode ser útil, principalmente porque uma operação inadequada ou com materiais errados podem ter sérias consequências.

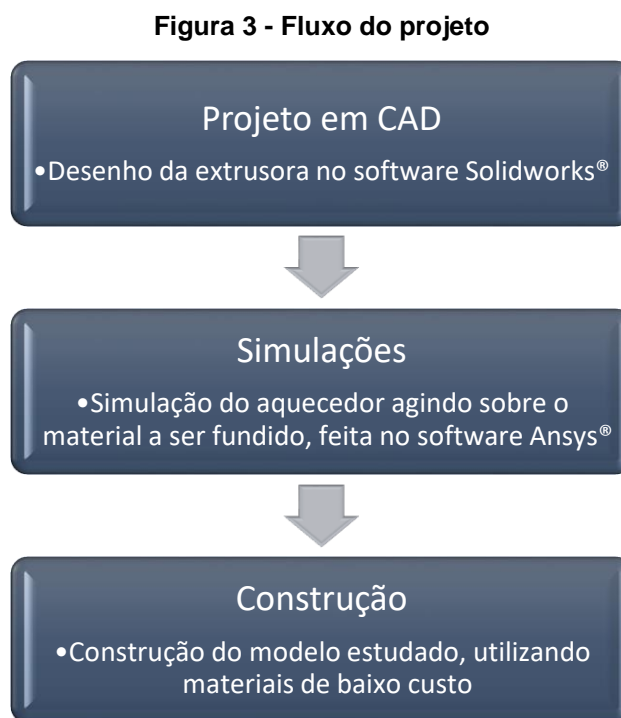
Por exemplo, ao aquecer policloreto de vinila (PVC), ácido clorídrico é formado e liberado, podendo atacar os pulmões de quem está próximo ao processo e ainda oxidar componentes do equipamento. A mistura de acetato com nylon, polímeros fluorados ou ionômero em uma extrusora pode reagir, desprendendo formaldeído, o qual é um gás inflamável, e que tem potencial cancerígeno (GILES; M.; WAGNER, 2004).

O operador da extrusora deve sempre considerar quais materiais está trabalhando, suas interações, e os limites máximos de temperatura que cada material pode chegar.

¹ *Printing material suppliers*, disponível em: http://reprap.org/wiki/Printing_Material_Suppliers [acesso em 07/04/2017].

3 METODOLOGIA

Na Figura 3, pode-se verificar o fluxo das etapas básicas para o projeto da extrusora.



Fonte: Autoria própria

Após o projeto estar totalmente definido no formato CAD e validado pelo seu desempenho da simulação numérica, a etapa de construção teve início.

As dimensões, materiais utilizados, método para controle eletrônico, e demais definições do projeto serão descritos nas próximas etapas.

3.1 MODELO *LYMAN FILAMENT EXTRUDER*

Dentre os modelos DIY disponíveis, destaca-se o “*Lyman Filament Extruder*”, que atualmente está na sexta versão.

Este modelo é um dos mais antigos, com um custo benefício interessante. Ele é um projeto livre para ser compartilhado, copiado e distribuído em qualquer formato, físico ou digital. Também pode ser adaptado e melhorado², sendo que o único

² “Atribuição não comercial”, disponível em: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> [acesso em 12/05/2017].

requisito que autor original pede é que o projeto deve ter seus devidos créditos mencionados.

Na Fotografia 1, é possível verificar um exemplo da extrusora criada por Lyman, na sexta versão.

Fotografia 1 - Extrusora modelo *Lyman Filament Extruder*



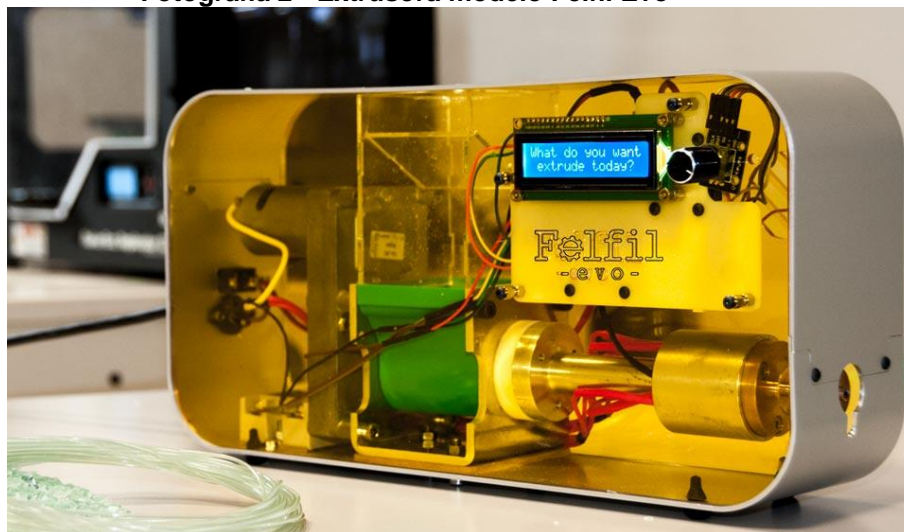
Fonte: (LYMAN, 2014)

Por ser livre, deve-se compartilhar seu projeto com as devidas modificações explicadas, e com a mesma licença que o original, já citado anteriormente.

3.2 MODELO FELFIL

Outro modelo DIY muito conhecido de extrusora, é a Felfil, onde o projeto nasceu em 2014, como um trabalho de conclusão de curso, na cidade de Turin, Itália e logo em 2015, nasce a *Felfil Evo Kickstarter*, responsável por comercializar o modelo mostrado na Fotografia 2.

Fotografia 2 - Extrusora modelo Felfil Evo



Fonte: (SEVERINI et al., 2017)

Apesar de existir a versão comercial, chamada de Felfil Evo, os criadores ainda disponibilizam em seu site uma versão inicial do projeto, e disponível para download gratuito e com os mesmos termos de uso citados na extrusora do modelo Lyman.

O modelo utilizado como referência para este trabalho foi a Felfil, principalmente devido à sua facilidade de operação, controle e custo.

3.3 COMPONENTES DO PROJETO DA EXTRUSORA

Abaixo estão listados os principais componentes utilizados para o projeto, além de uma explicação básica do funcionamento de cada item.

3.3.1 Motor de Corrente Contínua

A escolha deste tipo de motor no projeto foi devido ao custo, facilidade de controle, a sua alta durabilidade, baixa manutenção, e linearidade.

O modelo de motor escolhido foi 12 Volts, com rotação de 15 RPM, e caixa de redução, proporcionando 21 kgf.cm de torque.

3.3.2 Fuso

O fuso é um dos componentes mais importantes em uma extrusora. Ele é o responsável pela alimentação, mistura, transporte, fusão e compressão do polímero fundido.

A seção do fuso determina o seu comprimento, através da taxa de proporção entre o comprimento e o diâmetro, L/D.

Para este projeto, foi utilizado o valor L/D de 12,7, por ser uma recomendação para fusos de materiais poliméricos, e também como sugestão encontrada no modelo Felfil. Como o valor do diâmetro do fuso foi de 8mm, têm-se que o comprimento do mesmo vai ser igual a 101,6mm.

Figura 4 - Broca de pua



Fonte: Autoria própria

Seguindo essas especificações, optou-se por utilizar uma broca de pua como fuso. Ela mantém as características citadas anteriormente, e possui um custo muito inferior ao de um fuso usinado por encomenda.

3.3.3 Matriz

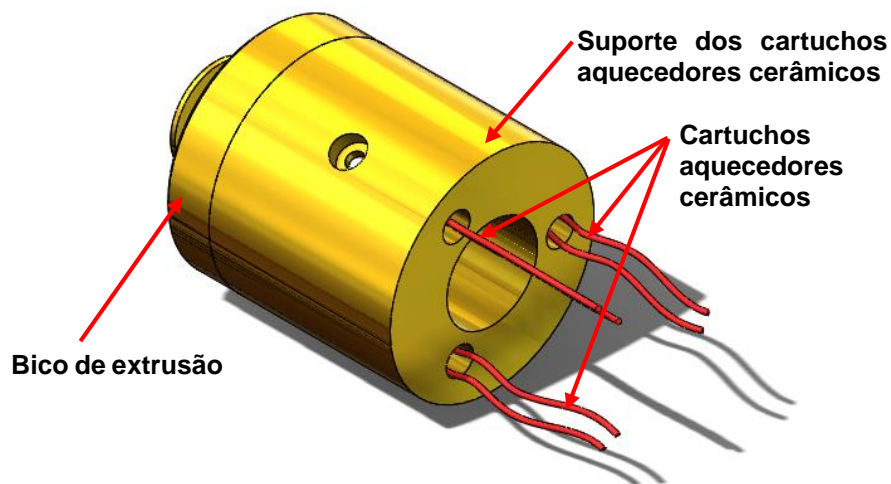
A matriz é o elemento responsável por dar o formato final do filamento.

Construída em latão, pelas suas propriedades de condução térmica, e resistência à corrosão.

A matriz utilizada contém dois componentes separados, sendo uma parte chamada de suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos, com a função de alocar os cartuchos aquecedores cerâmicos e manter a temperatura uniformemente distribuída, e a outra parte é o bico de extrusão, responsável por dar a forma circular do filamento, e garantir o diâmetro de 1,75mm, que é o tamanho mais popular de

filamento existente hoje. Esses componentes separados podem ser vistos na Figura 5.

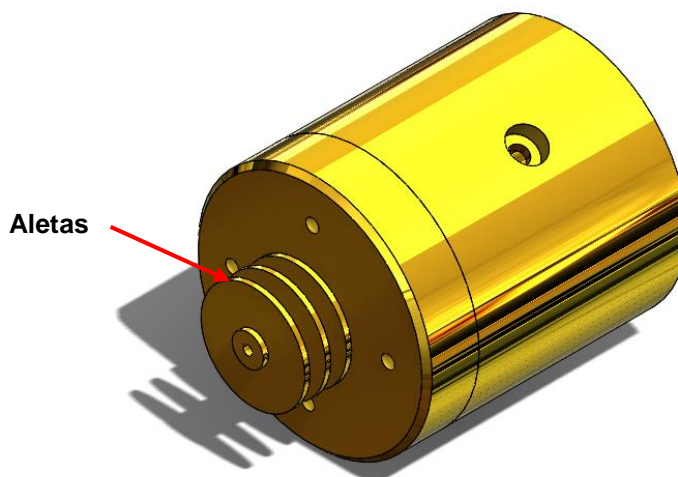
Figura 5 - Elementos da matriz de extrusão



Fonte: Autoria própria

As aletas na extremidade da matriz têm a função de resfriamento, conforme pode-se perceber na Figura 6, e serão analisadas no item 3.5.1.

Figura 6 - Representação da matriz



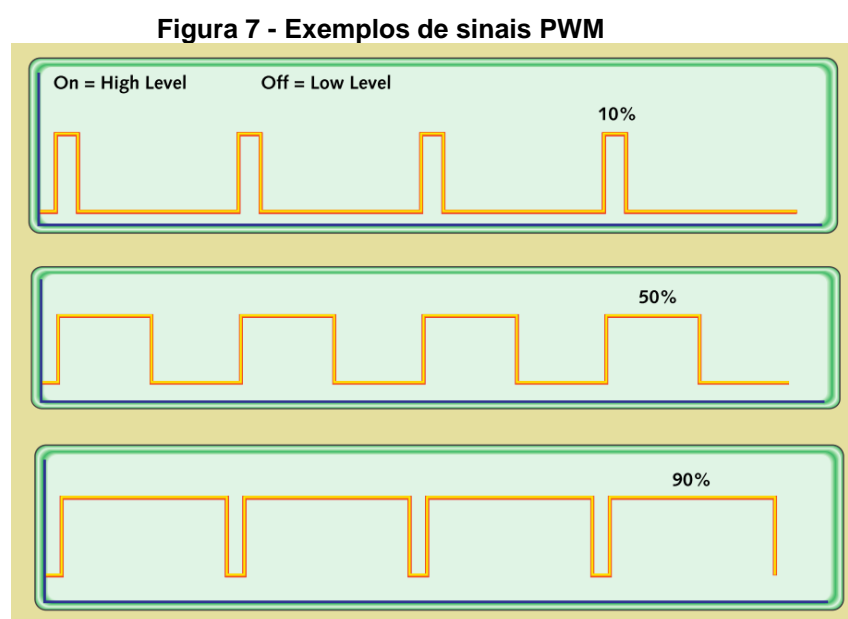
Fonte: Autoria própria

A vantagem em possuir dois componentes separados está na facilidade em substituir a matriz, considerando diâmetros diferentes de filamento, e também na facilidade de manutenção.

3.3.4 Regulador PWM

O regulador PWM é um dispositivo capaz de codificar digitalmente níveis de sinal analógico, através do uso de contadores de alta resolução, e desta forma, modular uma onda quadrada para níveis de sinal analógico específicos conforme a necessidade.

Na Figura 7 mostrada abaixo, pode-se verificar 3 exemplos de sinais PWM, com 10%, 50% e 90% da capacidade de funcionamento.

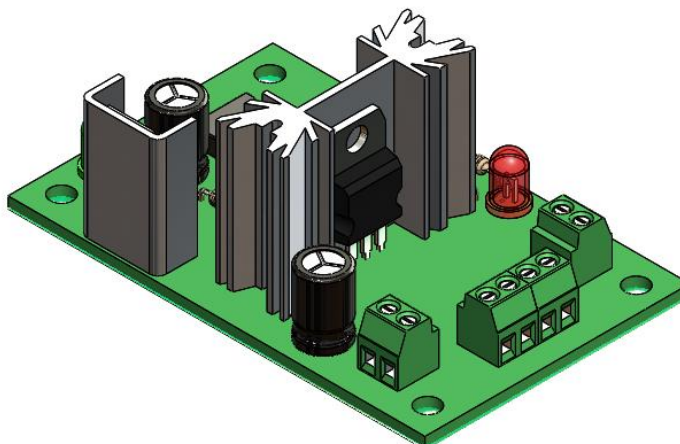


Fonte: Fonte: (BARR, 2001)

O eixo da ordenada representa o valor da tensão aplicada ao PWM. Percebe-se que ele é constante.

Na Figura 8, pode-se verificar uma representação do regulador PWM utilizado neste projeto.

Figura 8 - Representação do regulador PWM



Fonte: Autoria própria

Para este projeto, o regulador PWM será utilizado para modular a largura de pulso da corrente que alimenta o motor de corrente contínua, e desta forma regular a rotação do motor, podendo variar de 0 RPM (0%) até 15 RPM (100%).

Esse ajuste da rotação será feito por um potenciômetro, e a rotação poderá ser encontrada pelo valor da tensão, mostrada no voltímetro instalado, e através da Tabela 1, mostrada abaixo:

Tabela 1 - Relação entre tensão e rotação

Tensão (V)	Rotação (RPM)
12	15
10	12,5
8	10
6	7,5
4	5

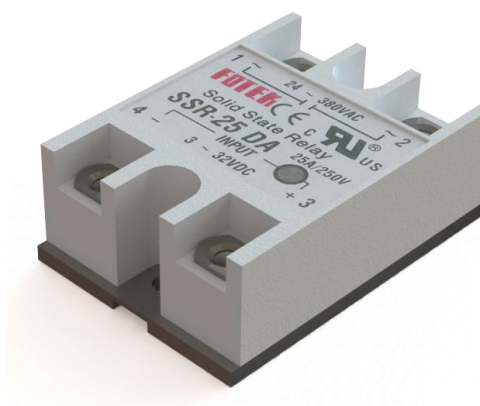
Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que essa tabela apresenta valores experimentais, e estão sujeitos a variações de acordo com a precisão do PWM, fonte, e carga no eixo do motor.

3.3.5 SSR

Um SSR - *Solid State Relay*, ou relé de estado sólido, é um dispositivo semicondutor capaz de causar uma modificação súbita em um circuito elétrico, abrindo ou fechando um contato. A Figura 9 mostra a representação do modelo de SSR utilizado no projeto da extrusora.

Figura 9 - Representação do SSR



Fonte: Autoria própria

Este modelo trabalha no controle de temperatura das resistências, e é ligado ou desligado pelo controlador PID.

3.3.6 Controlador de Temperatura PID REX D-100

O equipamento responsável por controlar a temperatura da extrusora, e mantê-la estável é o PID, do inglês *Proportional-Integral-Derivative*. Um controlador PID calcula continuamente a diferença entre um ponto desejado (no caso da extrusora esse ponto é a temperatura), e o ponto medido. Através dessa diferença, o PID aplica correções baseado em proporcional, integral e derivativa, tornando o erro entre o ponto desejado e o medido menor possível, a cada instante.

Após o controlador PID receber a informação de temperatura do termopar, ele envia um sinal para o SSR, o qual está ligado às resistências dos cartuchos aquecedores cerâmicos, ligando-as ou desligando-as, mantendo assim a temperatura sempre mais próxima da temperatura desejada possível.

Na Figura 10 é possível ver a representação de um PID, utilizado no projeto da extrusora.

Figura 10 - Representação do Pid REX D-100



Fonte: Autoria própria

O modelo REX D-100 trabalha com termopares do tipo K, possui taxa de leitura a cada 0,5 segundo, possui precisão de $\pm 0,3\%$ na leitura da temperatura, e ainda possui a função de *Autotune*, onde o próprio controlador encontra os melhores valores possíveis para cada coeficiente (PID).

3.3.7 Termopar tipo K

Termopar é um sensor de temperatura, construído de dois metais diferentes.

Seu princípio de funcionamento básico é baseado na leitura e interpretação de uma corrente elétrica, sendo esta gerada ao juntar dois fios de materiais diferentes, formando um circuito fechado e posteriormente submeter uma das junções dessa união em uma fonte de calor. Neste projeto, essa medição e interpretação é realizada pelo PID.

O termopar utilizado no projeto é do tipo K, constituído de Cromel e Alumel, suportando temperaturas entre -270°C e 1370°C Este modelo possui um custo baixo devido a sua simples construção e popularidade. Em geral é mais resistente à

oxidação em temperaturas mais altas, quando comparado com outros tipos de termopares.

A maior limitação do uso deste tipo de termopar é a exatidão, que muitas vezes é inferior a 1°C, porém essa precisão ainda é bem aceitável ao projeto.

3.3.8 Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação é o equipamento responsável por fornecer energia elétrica a todo o sistema da extrusora. Em tese, é ela que vai alimentar todos os componentes.

A fonte escolhida foi um modelo chaveado, com tensão contínua de 12V, 260W de potência e eficiência de 80%.

Na Tabela 2 pode-se verificar uma estimativa dos valores de potência consumida por cada componente.

Tabela 2 - Potência elétrica de cada componente

Componente	Tensão (V)	Corrente (A)	Quantidade	Potência total (W)
Cartucho aquecedor	12	3,4	3	120
Motor CC	12	1	1	12
PID Rex D-100	12	1,8	1	21,6
Drok Mini 0.28"	12	0,2	1	2,4
PWM	12	1	1	12

Fonte: Autoria própria

Vale lembrar que a potência pode ser calculada pela equação 1.

Equação 1 - Fórmula para cálculo da potência elétrica

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

A potência total teórica encontrada para a extrusora, pela Equação 1 foi de 168W.

3.3.9 Elemento aquecedor

A função do elemento aquecedor é converter energia elétrica em energia térmica, produzindo calor necessário para a fusão da matéria prima.

O elemento aquecedor escolhido foi um cartucho aquecedor de cerâmica, o qual é facilmente encontrado, possui um custo baixo e potência de 40W. A fim de aumentar a potência da extrusora foram utilizados 3 cartuchos aquecedores cerâmicos uniformemente distribuídos.

3.3.10 Cooler para resfriamento da matriz

O cooler tem função de resfriar a extremidade aletada da matriz. Isso acontece devido ao fluxo de ar que ele provoca e desta forma, têm-se uma convecção forçada.

Para determinar o tamanho do cooler necessário, foi considerado a sua área, e a vazão propriamente dita, encontrada na descrição dos fabricantes. É possível observar na tabela abaixo, os valores encontrados para cada componente, bem como a velocidade de saída de ar, calculado pela equação 2.

Tabela 3 - Características dos coolers disponíveis comercialmente

Tamanho (L) [mm]	30	40	60	80	120
Área [m²]	0,9.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	3,6.10 ⁻³	6,4.10 ⁻³	14,4.10 ⁻³
Vazão de ar (Q) [m³/s]	1,389.10 ⁻³	3,333.10 ⁻³	10,944.10 ⁻³	20,389.10 ⁻³	39,889.10 ⁻³
Velocidade de saída do ar (v) [m/s]	1,543	2,083	3,040	3,186	2,770

Fonte: Autoria própria

Equação 2 – Equação para cálculo da velocidade de saída do ar

$$v = \frac{Q}{L^2} \quad (2)$$

O valor da velocidade de saída do ar vai ser importante para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, mostrado no item 3.5.1.6.

3.4 PROJETO EM CAD

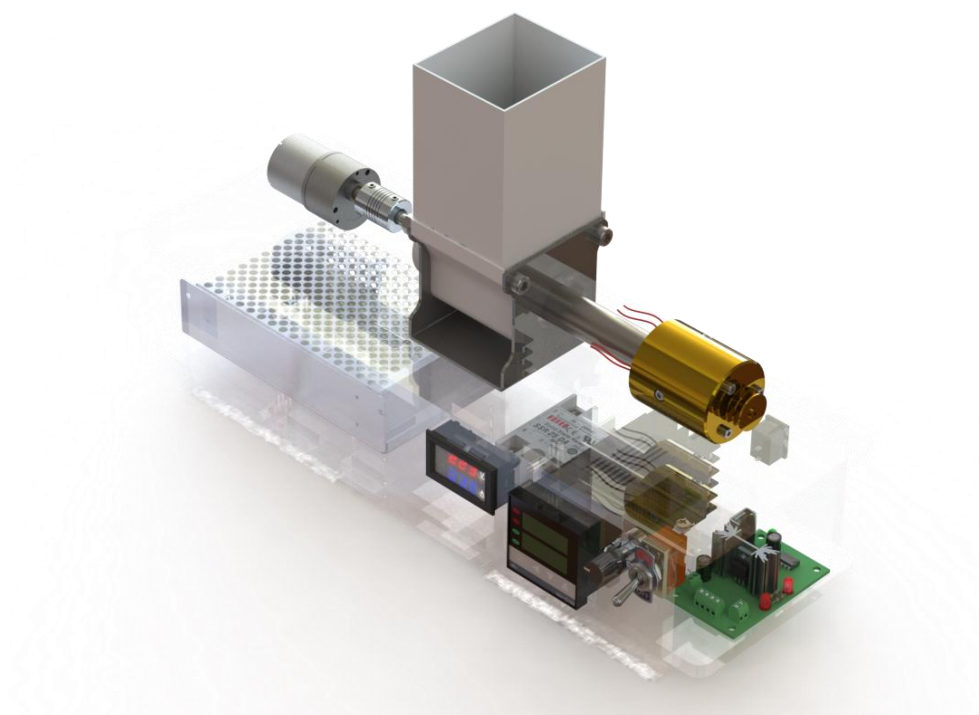
O desenho em CAD da extrusora foi feito para facilitar o projeto e para a construção de partes que serão fabricados pelo método FDM de impressão 3D.

A vantagem de um desenho CAD está na possibilidade de rápidas modificações, uma melhor visualização do conjunto completo, e por fim, melhorias no sistema como um todo antes da fase de construção.

Para esta etapa será utilizado o software Solidworks®, o qual está disponível em alguns laboratórios da UTFPR, e possui grande aceitação no mercado.

Na Figura 11 é possível visualizar uma renderização do projeto já concluído e montado.

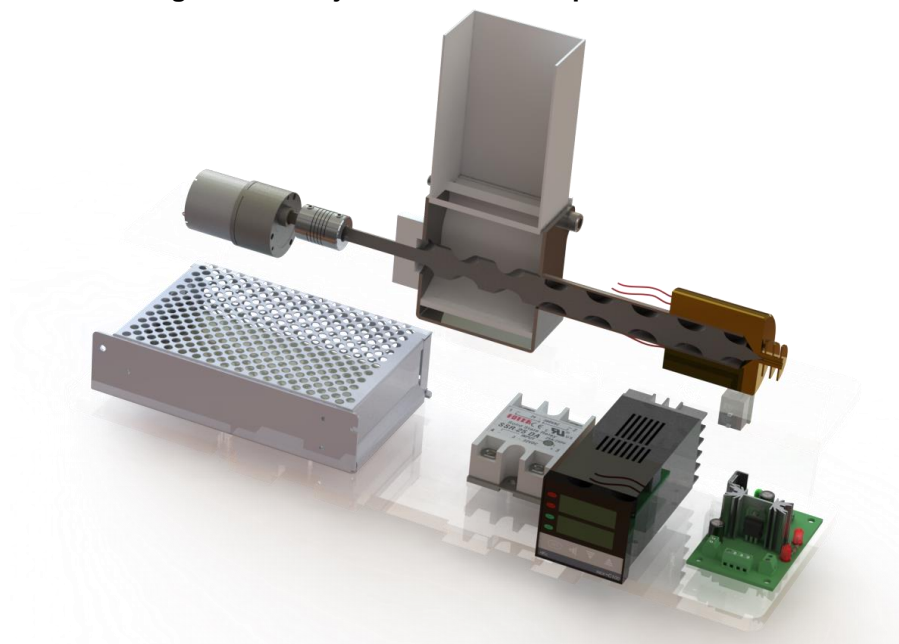
Figura 11 - Renderização do projeto em CAD



Fonte: Autoria própria

Na Figura 12 têm-se outra imagem com detalhe na vista em corte dos componentes mecânicos responsáveis pela extrusão.

Figura 12 - Projeto CAD em corte parcial



Fonte: Autoria própria

3.5 ANÁLISE TÉRMICA DA MATRIZ POR ELEMENTOS FINITOS

Nesta etapa foi realizado um estudo do comportamento térmico da matriz da extrusora. Este estudo teve como objetivo avaliar se as aletas instaladas na ponta da matriz seriam suficientes para manter a temperatura de saída do filamento baixo o suficiente para ele não sair pastoso, ou ainda líquido.

3.5.1 Simulações computacionais

As simulações computacionais podem proporcionar de maneira rápida e precisa, resultados confiáveis tanto para análises mecânicas, estruturais, e térmicas da extrusora. Todas as simulações serão feitas no software Ansys®.

Esta etapa também está relacionada com a otimização do sistema originalmente utilizado, e será trabalhada juntamente com a etapa do projeto em CAD. Muitas vezes o desenho do componente simulado passa por alterações, de acordo com os resultados da simulação, e após essas alterações, uma nova simulação é realizada.

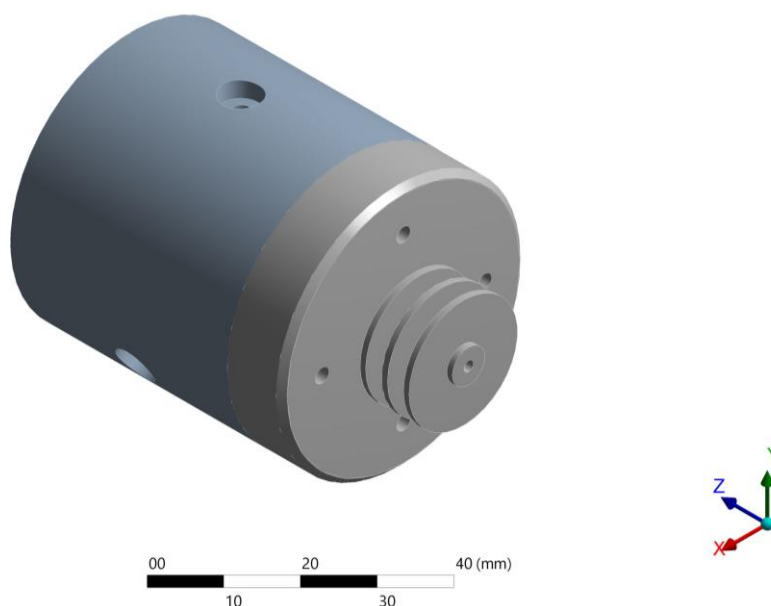
A fim de otimizar a fusão do material e o gasto energético da extrusora, será feita uma análise da localização para os cartuchos aquecedores cerâmicos para validar a sua eficácia.

Para avaliar a troca térmica na região de saída da matriz, será feita uma análise considerando o desempenho das aletas e do fluxo de ar promovido pelo *cooler* instalado.

3.5.1.1 Geometria

A geometria considerada para a simulação foi o suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos, junto com a matriz de extrusão, conforme Figura 13.

Figura 13 - Geometria considerada para simulação



Fonte: Autoria própria

A simulação será realizada considerando os dois elementos simultaneamente.

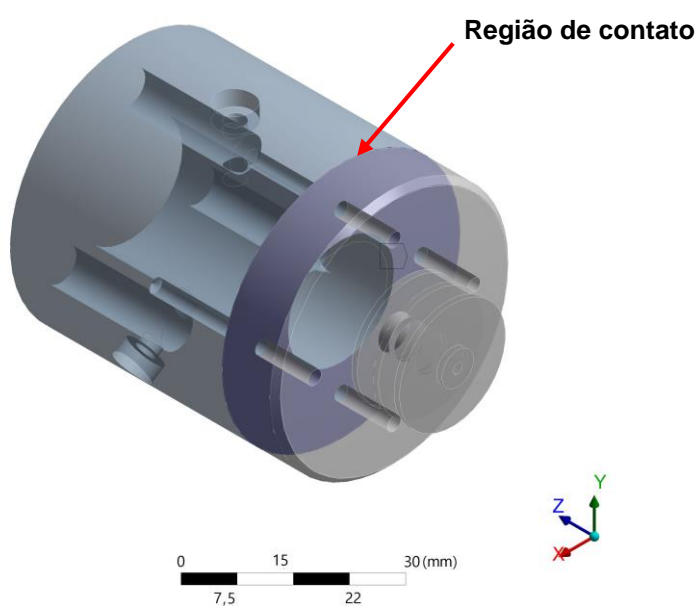
3.5.1.2 Materiais

Ambos os componentes foram definidos como latão, com densidade de 8600Kg/m^3 , condutividade térmica de 111W/m.K e calor específico igual a 385J/Kg.K . Esses valores foram retirados da base de dados do software Ansys®.

3.5.1.3 Região de contato

Considerou-se como região de contato entre a matriz e o suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos, a face que toca os dois componentes conforme Figura 14.

Figura 14 - Região de contato entre a matriz e o suporte dos cartuchos



Fonte: Autoria própria

Não foi considerada a resistência térmica de contato entre os dois componentes, e, desta forma, o contato entre as peças pode ser considerado como perfeito, teoricamente.

Isso implica em maior transferência térmica para a matriz da extrusora e não afeta os resultados na prática.

3.5.1.4 Malha

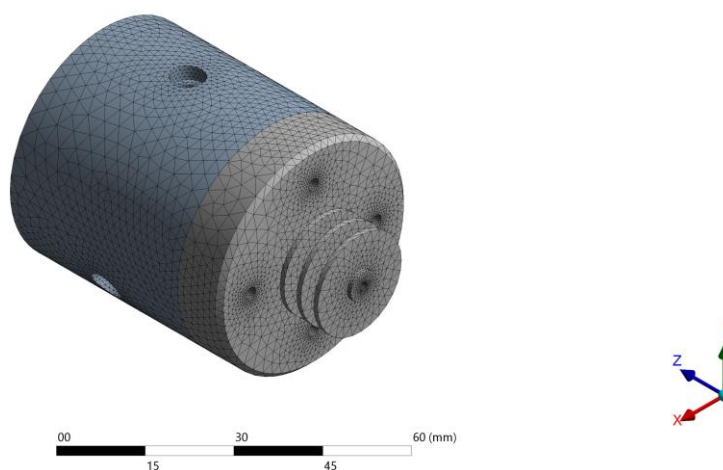
Dá-se o nome de malha para o conjunto de pontos nodais que formam a geometria analisada pela simulação numérica. Ela é um modelo geométrico

discretizado que um software de elementos finitos trabalha para solucionar os equacionamentos apropriados para o modelo utilizado.

Para este trabalho, a malha foi gerada automaticamente pelo software Ansys®, e conseguiu-se uma qualidade média igual a 0,835 pelo método *Element Quality*. Esse valor pode ser considerado excelente, e não houve a necessidade de mais refinamento ou utilização de métodos manuais de geração.

Na Figura 15, pode-se verificar a malha gerada.

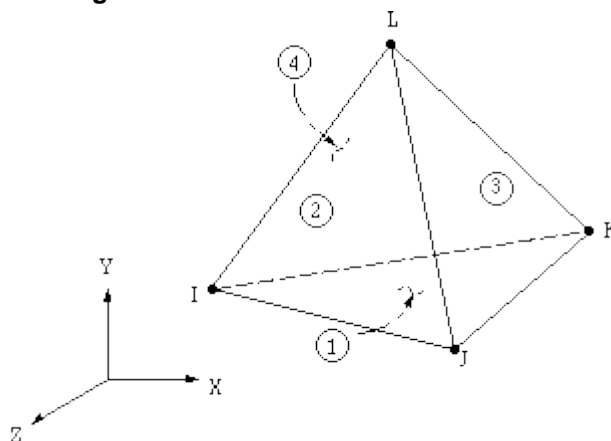
Figura 15 - Malha gerada



Fonte: Autoria própria

Todos os elementos finitos foram gerados como tetraedros, com geometria semelhante à Figura 16:

Figura 16 - Sólido Estrutural Tetraedro



Fonte: (KICKO J., 2017)

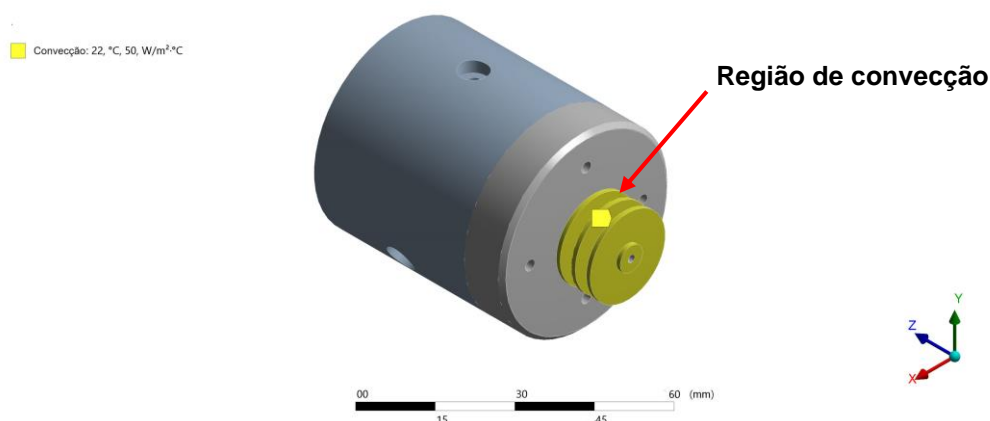
Este tipo de estrutura para malha repousa numa maior simplicidade e menor demanda computacional quando comparada a outros tipos de malha. As malhas não estruturadas (formadas por elementos que podem ter diversas formas) conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas (MALISKA, 1995).

3.5.1.5 Parâmetros

Considerou-se a temperatura inicial dos dois componentes igual a 22°C, e o tempo total de simulação igual a 300 segundos.

A convecção forçada foi considerada na região da superfície do corpo da matriz, na superfície das aletas e na superfície alongada de saída, destacados em amarelo na Figura 17.

Figura 17 - Região considerada para convecção



Fonte: Autoria própria

Para cada região citada, foi calculado um novo coeficiente de transferência de calor por convecção (h).

3.5.1.6 Equação de transferência de calor por convecção (h)

Para encontrar o h , pode-se utilizar os conceitos de transferência de calor por convecção em escoamento externo, mostrados a seguir.

A Equação 3 permite encontrar o número de Reynolds, através do diâmetro da geometria analisada, e de constantes encontradas na Equação 3 - Número de Reynolds

$$Re = \frac{vD}{\vartheta} \quad (3)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

Tabela 4.

Equação 3 - Número de Reynolds

$$Re = \frac{vD}{\vartheta} \quad (3)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

Tabela 4 - Propriedades do ar a 500K

Propriedade [unidade]	Símbolo	Valor
Calor específico [J/Kg.K]	C_p	1030
Condutividade térmica [W/m.K]	k	$40,70 \cdot 10^{-3}$
Velocidade de saída do ar [m/s]	v	3,19
Viscosidade cinemática [m ² /s]	ϑ	$38,79 \cdot 10^{-6}$
Viscosidade dinâmica [N.s/ m ²]	μ	$56,70 \cdot 10^{-6}$

Fonte: Tabela A.4 (BERGMAN, 2014)

A Equação 4 permite calcular o número de Prandtl, com constantes também encontradas na Equação 3 - Número de Reynolds

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

Tabela 4.

Equação 4 - Número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (4)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

A Equação 5 permite encontrar o valor do número de Nusselt para escoamento externo.

Equação 5 - Número de Nusselt para escoamento externo³

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \left\{ \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr^{2/3}} \right) \right]^{1/4}} \right\} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (5)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

A Equação 6 também é utilizada para calcular o número de Nusselt, porém, como o número de Nusselt foi encontrado pela Equação 5, ela servirá para encontrar o valor de h, isolando os outros termos.

Equação 6 - Número de Nusselt

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (6)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

Em resumo:

\overline{Nu}_D = Número de Nusselt

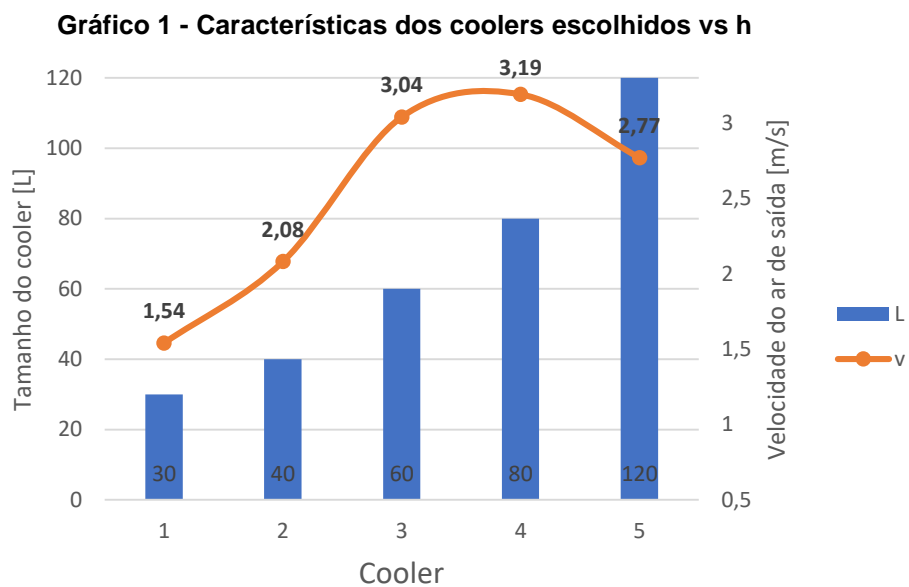
Re = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

Todas essas constantes adimensionais.

Para a escolha do *cooler*, foram analisados 5 modelos com dimensional “L” (largura do *cooler*) igual a 30, 40, 60, 80 e 120cm. Os valores de velocidade para cada modelo estão apresentados no Gráfico 1.

³ Considerando as aletas, o suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos e a superfície de sustentação das aletas como cilindros, utilizando regime médio, temperatura de filme T_f , e $Re_D.Pr \geq 0,2$.



Fonte: Autoria própria

Para o projeto foi escolhido o *cooler* 4, com dimensão 80x80mm, por apresentar a maior velocidade de saída do ar, v , igual a 3,19m/s.

Substituindo os valores da Equação 3 - Número de Reynolds

$$Re = \frac{vD}{\vartheta} \quad (3)$$

Fonte: (BERGMAN, 2014)

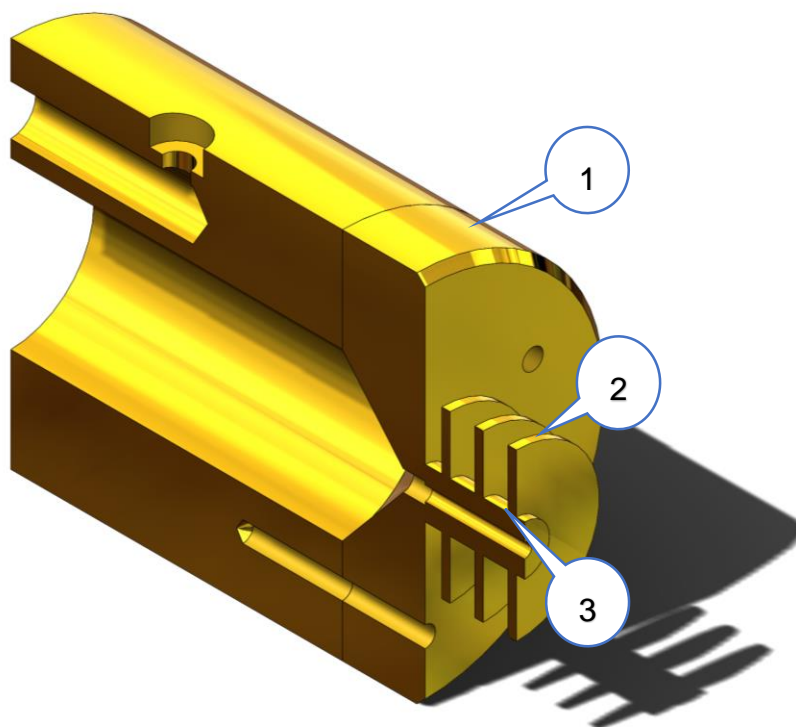
Tabela 4 nas equações 3 até 6, pode-se encontrar os valores de h conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos elementos da matriz	
Elemento	h [W/(m²K)]
1 – Superfície do suporte das aletas	37,02
2 – Superfície das aletas	201,65
3 – Superfície alongada de saída	108,74

Fonte: Autoria própria

Na Figura 18 pode-se verificar a representação dos elementos mostrados na Tabela 5.

Figura 18 - Áreas consideradas para convecção e cálculo do h



Fonte: Autoria própria

A vista foi representada em corte para facilitar a visualização interna de cada componente.

3.6 CONSTRUÇÃO

O processo de construção foi dividido da seguinte forma:

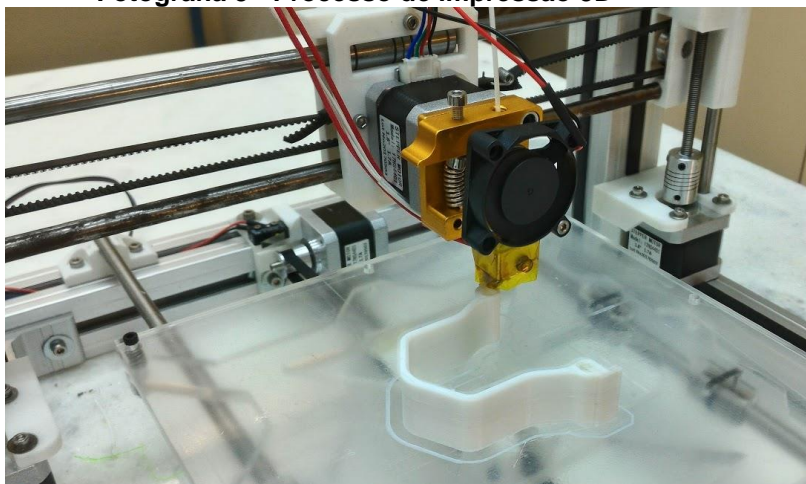
1. Compra de componentes eletrônicos, broca de pua e matéria prima para outros componentes;
2. Confeção de placas laterais da caixa onde os componentes eletrônicos ficarão alojados foram confeccionadas por corte a laser em uma placa de acrílico de 8mm de espessura;
3. Impressão de peças pelo método FDM
4. Fabricação do suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos e a matriz;
5. Montagem dos componentes eletrônicos;
6. Montagem dos componentes mecânicos;
7. Ajustes e testes.

As principais etapas da construção podem ser verificadas nos itens subsequentes.

3.6.1 Impressão de peças pelo método FDM

Nesta etapa, a impressora 3D modelo Prusa i3, do laboratório de extensometria da UTFPR, campus Ponta Grossa foi utilizada.

Todas as peças foram impressas em PLA, com as configurações padrão da impressora, e com preenchimento de malha igual a 15%. Abaixo pode-se observar na uma parte do funil sendo impresso.

Fotografia 3 - Processo de impressão 3D

Fonte: Autoria própria

3.6.2 Fabricação do suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos e a matriz

Utilizando o processo de torneamento, pode-se usinar as peças conforme especificado em desenho nos anexos A e B, utilizando liga de bronze como material. Na Fotografia 4 pode-se verificar como as peças ficaram após finalizadas.

Fotografia 4 - Peças usinadas em latão

Fonte: Autoria própria

Para melhorar a transferência de calor entre a matriz e o suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos, uma fina camada de pasta térmica, comumente utilizada em processadores de computador, foi utilizada.

Com o uso da pasta térmica, existe uma diminuição considerável da resistência térmica de contato, melhorando assim a eficiência da troca térmica.

3.6.3 Montagem dos componentes eletrônicos;

Todos os componentes eletrônicos foram previamente montados para serem testados, conforme visto na Fotografia 5:

Fotografia 5 - Componentes eletrônicos utilizados



Fonte: Autoria própria

O esquema elétrico usado para a montagem pode ser visualizado no Anexo E.

3.6.4 Montagem dos componentes mecânicos;

Todo o conjunto mecânico foi pré-montado somente na chapa superior de acrílico, e após ser realizado o alinhamento dos eixos, todo o conjunto foi reapertado em sua posição final, conforme pode-se ver na Fotografia 6.

Fotografia 6 - Pré-montagem da extrusora

Fonte: Autoria própria

Por fim, a parte inferior do acrílico com os componentes eletrônicos foi parafusada junto à parte superior, finalizando a montagem da extrusora.

Na Fotografia 7, pode-se verificar a montagem da extrusora finalizada.

Fotografia 7 - Extrusora montada

Fonte: Autoria própria

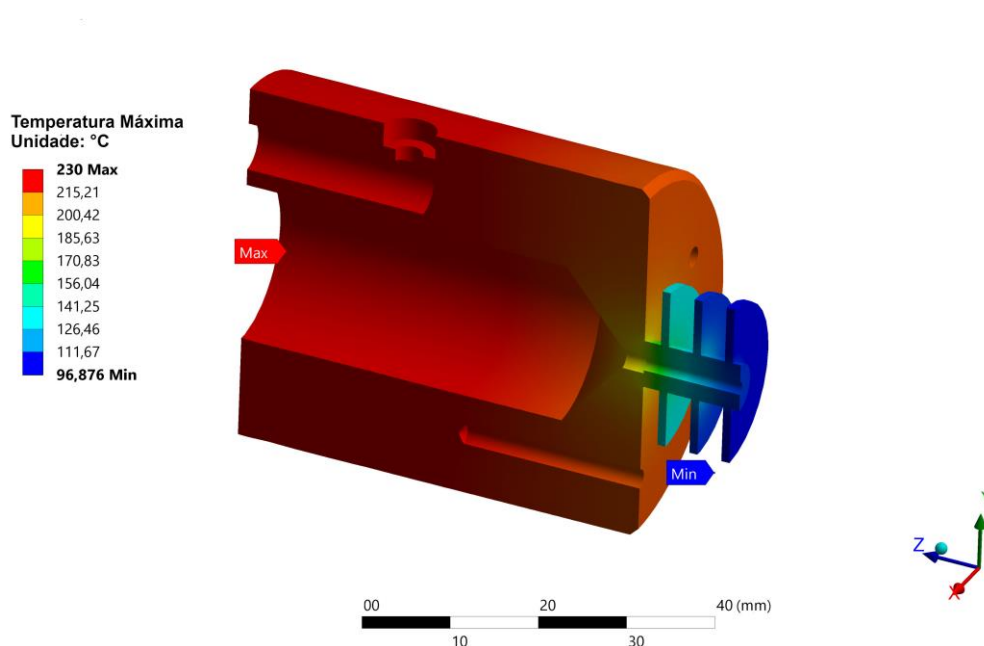
As dimensões finais ficaram em: 400mm de comprimento, 140mm de largura e 275mm de altura. A massa total ficou em aproximadamente 3,5Kg.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Abaixo pode-se verificar os resultados obtidos com a simulação numérica, considerando os parâmetros citados na seção 3.5.1.5.

Figura 19 - Resultados da simulação numérica

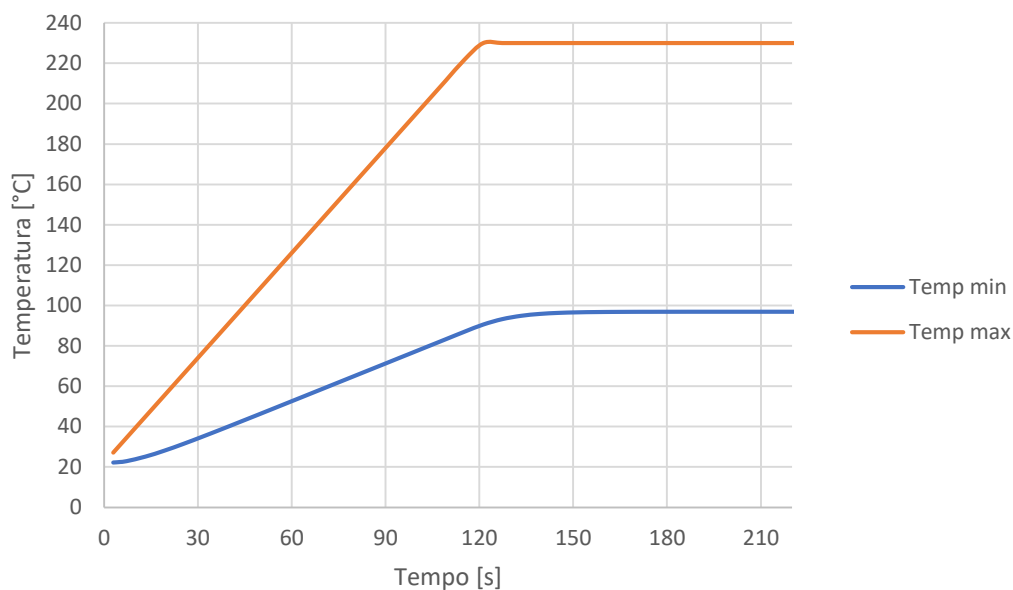


Fonte: Autoria própria

Percebe-se que na região interna do suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos permanece uniforme, sendo suas respectivas posições consideradas adequadas.

Na região de saída do filamento, a temperatura é mínima e igual a 96,87°C. Esse valor pode ser ajustado experimentalmente, com o uso de um potenciômetro, o qual modifica a tensão disponível no cooler e, desta forma, a diminuição do fluxo de ar sobre a matriz irá proporcionar um aumento da temperatura de saída.

No Gráfico 2, têm-se uma representação visual do comportamento teórico obtido pela simulação, com relação ao tempo decorrido até ocorrer um equilíbrio térmico em um sistema termicamente isolado, e sem perdas expressivas de calor por outros meios.

Gráfico 2 - Relação entre tempo e temperatura

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o sistema começa a se estabilizar após 120 segundos aproximadamente tanto para a temperatura máxima, quando para a mínima.

Com esses resultados encontrados pela simulação numérica, a geometria do suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos e das aletas pode ser considerada adequada para o projeto.

4.2 TESTE DE EXTRUSÃO

Ao ligar a extrusora pela primeira vez, o primeiro fator notado foi o tempo necessário para aquecer todo o conjunto da matriz até a temperatura aproximada de extrusão do ABS, 200°C. Ele ficou cerca de 6 minutos a mais que o esperado pela simulação, mostrando a necessidade de revestir a matriz de extrusão com um material isolante, além de, corrigir os valores de PID de forma iterativa.

Outro fator observado foi a baixa potência do motor que aciona o fuso. Apesar do mesmo ter sido comprado com a especificação de 21kg.cm de torque, ficou claro que este valor não é suficiente. Quando o filamento é comprimido, antes de ser fundido, ele exerce uma grande resistência no fuso, necessitando de um motor com um torque mais elevado para ser capaz de extrudar o material inserido.

5 CONCLUSÃO

Após testar a extrusora na prática, ficou claro que algumas alterações serão necessárias para o correto funcionamento. Dentre as modificações necessárias, a principal está no motor de corrente contínua, o qual apresentou torque insuficiente para comprimir os *pellets*, e proporcionar uma extrusão contínua. Por esse motivo não foi possível realizar mais testes na extrusora.

Dentro os outros resultados obtidos, pode-se afirmar:

- Verificando os modelos de extrusoras disponíveis na internet, pode-se perceber uma melhora significativa a cada novo projeto que surge, indicando um crescimento do mercado na área DIY. Isso reflete no barateamento da tecnologia usada, e gera uma tendência natural do custo do filamento comercial reduzir, considerando a lei da oferta e demanda.
- Como diferencial e melhoria do projeto original, foi projetado um novo bico de extrusão, o qual foi capaz de manter a temperatura na extremidade de saída do filamento próximo aos 100°C. Esse valor é importante para garantir que o filamento não saia fundido, garantindo assim sua geometria e dimensões.
- Após o projeto em CAD ser concluído, percebeu-se que com simples componentes mecânicos, e controladores eletrônicos comuns, pode-se ter um equipamento para extrusão de filamentos para impressora 3D com um baixo custo. Com exceção do bico e suporte dos cartuchos aquecedores cerâmicos, todas as peças podem ser facilmente encontradas em lojas especializadas.

Como desvantagem de um sistema tão simples, têm-se que para cada tipo de novo material a ser extrudado, deve-se avaliar a melhor temperatura de trabalho, para evitar problemas dimensionais e de qualidade do filamento.

Como melhoria, deve-se utilizar um motor com um torque superior ao atual. Além disso, pode-se isolar o conjunto da matriz com uma camada de isolante térmico, mantendo assim o calor gerado pelos cartuchos aquecedores cerâmicos e diminuindo o tempo de início de ciclo.

REFERÊNCIAS

ALSSABBAGH, M. et al. Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 135, n. September 2016, p. 106–112, jun. 2017.

BARR, M. Pulse width modulation. **Embedded Systems Programming**, v. 14, n. 10, p. 103–104, 2001.

BERGMAN, T. L. [ET AL. . **Fundamentos de transferencia de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FONDA, C. **A Practical Guide to Your First 3D Print**. 1. ed. Trieste: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013.

FOX, S. Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure. **Technology in Society**, v. 39, p. 18–30, 2014.

GERSHENFELD, N. How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution. **Foreign Affairs**, v. 91, n. 6, p. 43–57, 2012.

GILES, H. F.; M., M. E.; WAGNER, J. R. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. New York: Plastic Design Library, 2004. v. 1

JASTER, M. **PrintSpace3D**. Disponível em: <<https://www.printspace3d.com/>>. Acesso em: 24 maio. 2017.

KICKO J. **3-D 4-Node Tetrahedral Structural Solid with Rotations**. Disponível em: <http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-72.htm>. Acesso em: 5 jun. 2017.

LYMAN, H. **DIY 3D Filament – Lyman Filament Extruder**. Disponível em: <<https://blog.adafruit.com/2014/08/21/lyman-filament-extruder/>>. Acesso em: 30 maio. 2017.

LYMAN, H. **LYMAN FILAMENT EXTRUDER V6 Construction and Operating Manual**. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:1199870>>. Acesso em: 30 maio. 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

RAUWENDAAL C. **Polymer Extrusion**. 5. ed. Auburn: Hanser, 2014.

RAYNA, T.; STRIUKOVA, L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, p. 214–224, 2016.

Researchers use 3D printer to make new materials. **Metal Powder Report**, v. 71, n. 1, p. 56, jan. 2016.

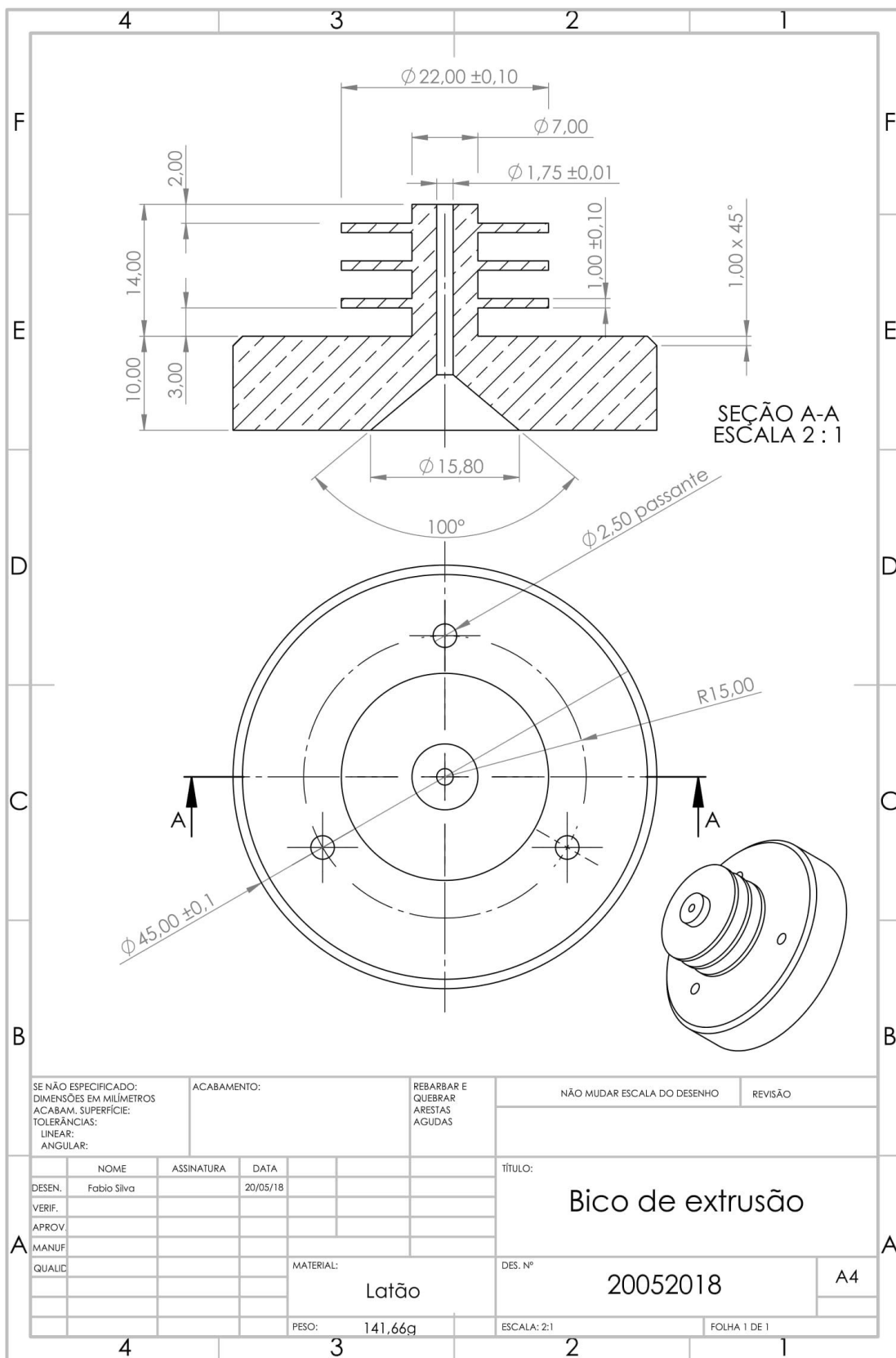
ROGNOLI, V. et al. DIY materials. **Materials and Design**, v. 86, p. 692–702, 2015.

SANTANA, R C; RIES, M. G. **Reologia de polímeros**. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/reologia/Páginas/10_Aplicacao.html>. Acesso em: 8 maio. 2017.

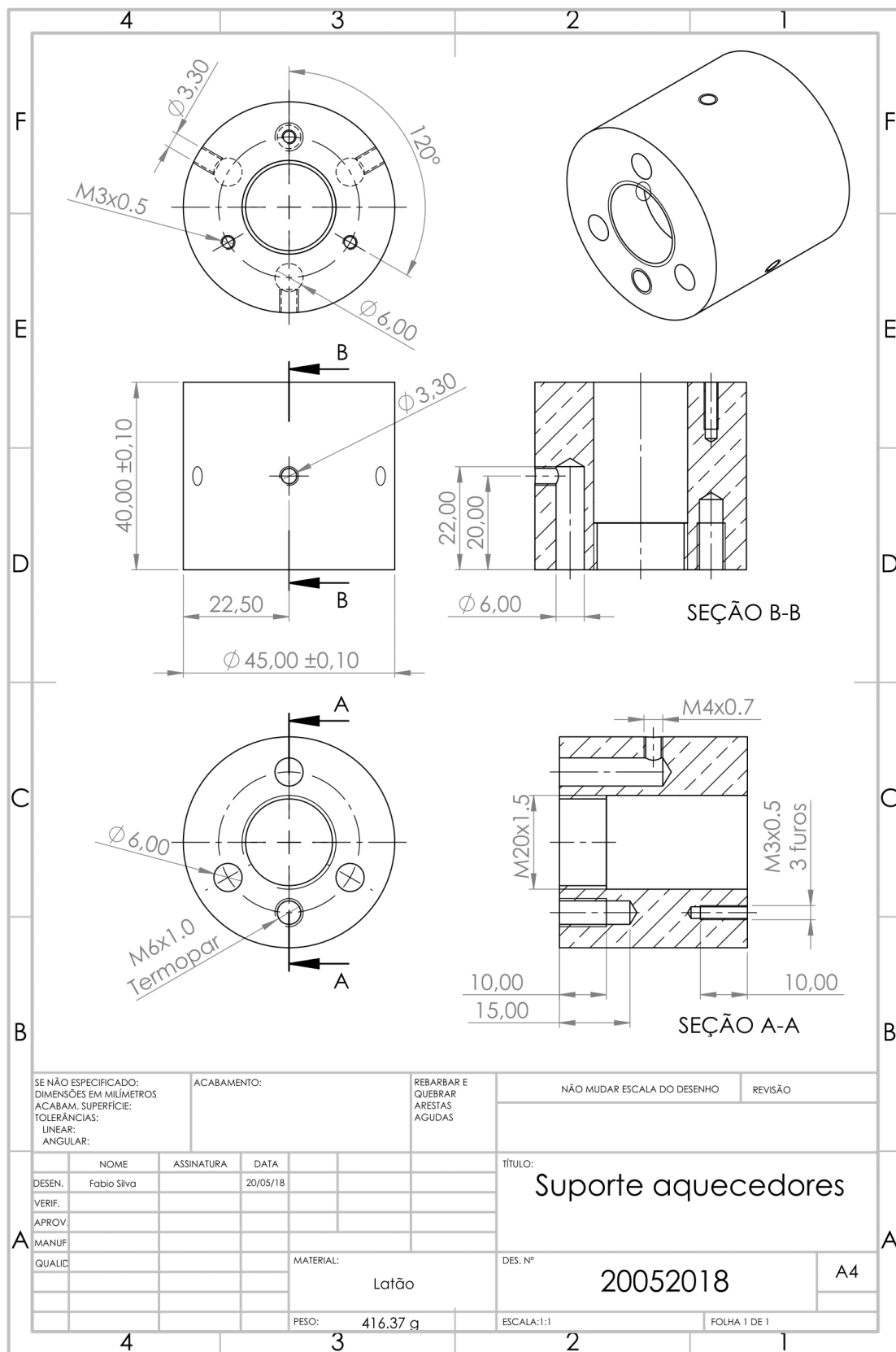
SEVERINI, A. et al. **Felfil**. Disponível em: <<https://felfil.com/>>. Acesso em: 30 maio. 2017.

TOFFLER, A. **The Third Wave**. 1. ed. New York: Bantam Books, 1984.

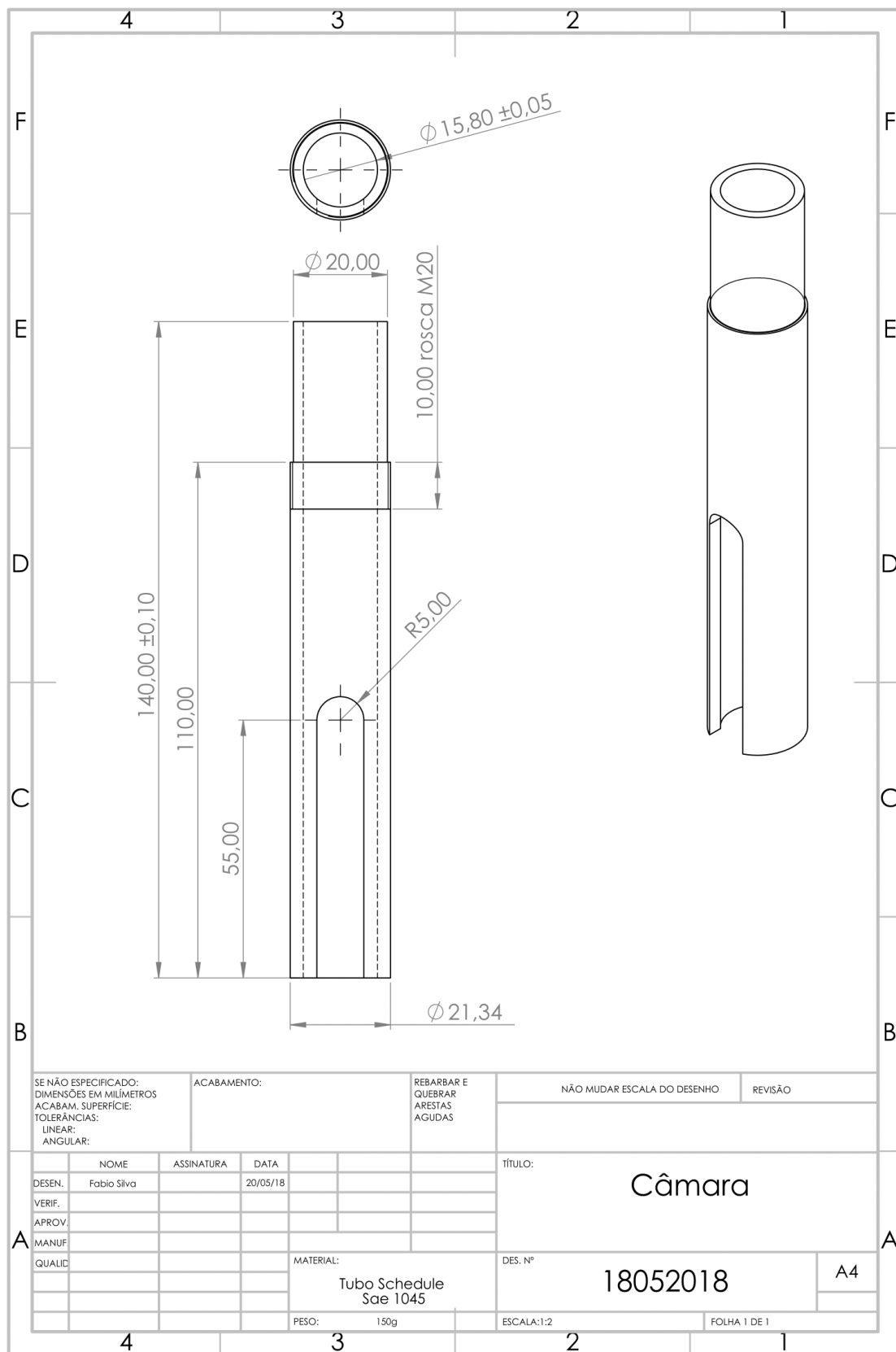
ANEXO A - Detalhamento do bico de extrusão



ANEXO B - Detalhamento do suporte dos cartuchos aquecedores

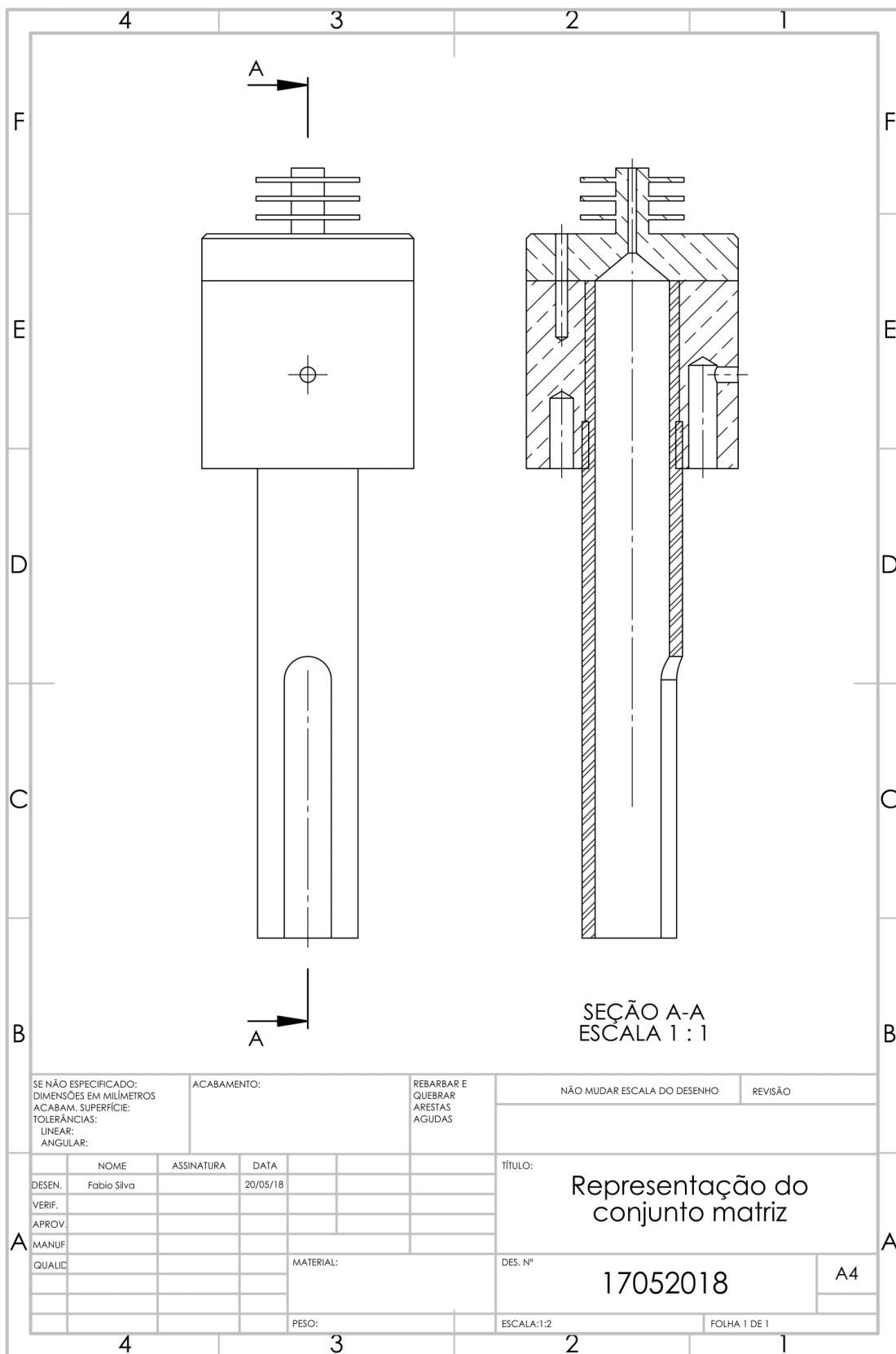


ANEXO C - Detalhamento da câmara



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Câmara		
VERIF.	Fabio Silva		20/05/18			
APROV.						
MANUF.						
QUALID.				MATERIAL:	DES. Nº	A4
				Tubo Schedule Sae 1045	18052018	
				PESO: 150g	ESCALA:1:2	FOLHA 1 DE 1

ANEXO D - Detalhamento do conjunto da matriz em corte



ANEXO E - Detalhamento do esquema elétrico

