

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTOS ACADÊMICOS DE ELETRÔNICA e MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

MARIARA LIMA DOS SANTOS
ROBISSON RODRIGUES DA SOUZA VIVIAN

**PROTÓTIPO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO DE ABS
ADEQUADA A MANUFATURA ADITIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2019

MARIARA LIMA DOS SANTOS
ROBISSON RODRIGUES DE SOUZA VIVAN

**PROTÓTIPO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO DE ABS
ADEQUADA A MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Grau de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica (DAELN) e Mecânica (DAMEC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Me. Sidney Carlos Gasoto

CURITIBA
2019

TERMO DE APROVAÇÃO

MARIARA LIMA DOS SANTOS
ROBISSON RODRIGUES DE SOUZA VIVIAN

PROTÓTIPO DE EXTRUSORA DE FILAMENTO DE ABS ADEQUADA A MANUFATURA ADITIVA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 5 de dezembro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Miraldo Matuichuk
Coordenador de Curso
Departamento de Eletrônica

Prof. M.Sc. Sérgio Moribe
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Sens Chang
UTFPR (DAELN)

Prof. Maro Roger Guéiros
UTFPR (DAMEC)

Prof. Dr. João Antônio Palma Setti
UTFPR (DAMEC)

Prof. Me. Sidney Carlos Gasoto
Orientador – UTFPR (DAMEC)

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ter nos dado forças para enfrentar as dificuldades e esperança nos momentos de pouca fé.

Aos pais, por sempre incentivarem o estudo sem jamais medirem os esforços para isso. Graças a vocês essa conquista hoje é possível.

Um agradecimento com muito carinho e admiração pelo orientador Sidney Carlos Gasoto, pela confiança e paciência na realização deste projeto no pouco tempo que lhe coube.

A UTFPR por fornecer dentro de suas limitações o melhor ensino possível.

Aos amigos e colegas de turma que fizeram parte direta ou indiretamente dessa conquista, em especial, Odilon da Silva Jr. por nos apoiar sempre, nos fornecer um lugar, ferramentas, materiais e caronas sempre que necessário para a realização do projeto

“Quem avança confiante na direção de seus sonhos e se empenha em viver a vida que imaginou para si encontra um sucesso inesperado em seu dia-a-dia.”

Henry Thoreau

RESUMO

SANTOS, Mariara Lima; VIVIAN, Robisson Rodrigues de Souza. **Protótipo de extrusora de filamento de ABS adequada a manufatura aditiva**. 2019. 48f. Trabalho de conclusão de curso – Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

O presente trabalho tem por objetivo fazer uma abordagem teórica e prática do processo de construção de uma extrusora de filamento plástico, especificamente o ABS, material amplamente utilizado nos processos de prototipagem rápida. Através da revisão de literatura realizada, foi construído o protótipo, fazendo uso, na medida do possível, de peças e materiais comerciais, visando assim a construção de um equipamento que não apresentasse grandes dificuldades de ser reproduzido, atendendo assim ao perfil das pessoas engajadas no movimento de manufatura aditiva de forma que poderiam extrudar o próprio filamento em casa, com custo reduzido. Através dos testes verificou-se que a qualidade final do filamento não depende apenas da calibração dos sistemas de controle. Mas também das condições internas do canhão como impurezas e material cristalizado, bem como de periféricos para auxiliar na linearidade do filamento. Sendo a extrusora incapaz de fazer isso isoladamente. Verificou-se ainda que apesar da dificuldade em encontrar a calibração correta, é possível obter bons resultados, como um dos testes apresentados no trabalho, que teve um desvio padrão de 0,023mm na amostra estudada. Contudo, ainda é recomendável o desenvolvimento de sistemas auxiliares mais precisos para a medição e controle, os quais poderão ser desenvolvidos em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Extrusora. Filamento. Manufatura aditiva. ABS. Custo reduzido.

ABSTRACT

SANTOS, Mariara Lima; VIVIAN, Robisson Rodrigues de Souza. **ABS Filament extruder prototype suitable for additive manufacturing**. 2019. 48f. Graduation Thesis – Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brazil, 2019.

The present paper aims to do a theoretical and practical approach of the construction process of a plastic filament extruder machine, popularly known as ABS and PLA, widely used by the rapid prototyping process. Through the bibliographic review performed, was built a prototype, using, as far as possible, commercial items and materials, thereby aiming the construction of a device which did not present major difficulties of being reproduced, in accordance to the profile of engaged people in additive manufacturing so that they could extrude their own filament at home, with a reduced cost. Tests have shown that the final quality of the filament does not depend solely on the calibration of the control systems. But also the internal conditions of the cannon as impurities and crystallized material, as well as peripheral to aid in the filament's linearity. The extruder is unable to do this itself. Despite the difficulty in finding the correct calibration, it is possible to obtain good results, such as hypothesis C, which had a standard deviation of 0.023mm in the studied sample. However, it is still advisable to develop more accurate auxiliary systems for measurement and control, which may be developed in future work

Keywords: Extruder. Filament. Additive manufacturing, ABS, Reduced cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processo de deposição de material	14
Figura 2: Compostos químicos que formam o ABS	15
Figura 3: Tensão x Deformação em uma peça de ABS	16
Figura 4: Gráfico do percentual de umidade no ABS	17
Figura 5: Filamento com alta taxa de umidade	18
Figura 6: Filamento produzido com material com baixa taxa de umidade..	18
Figura 7: Processo de extrusão	19
Figura 8: Fluxograma de um controle em malha fechada	20
Figura 9: Ação proporcional com diferentes valores de KP	21
Figura 10: Ação integral com diferentes valores de TI	22
Figura 11: Resposta característica da ação PID	23
Figura 12: Construção de uma resistência elétrica	24
Figura 13: Funcionamento de um relé	25
Figura 14: Malha de controle da extrusora projetada	26
Figura 15: Esquema de ligação do circuito de aquecimento	27
Figura 16: Broca de madeira Makita	28
Figura 17: Dimensões da matriz	32
Figura 18: Luva 1/2"	32
Figura 19: Conjunto luva e tampão	33
Figura 20: Fuso e canhão	33
Figura 21: Velocidade do motor de passo	34
Figura 22: Velocidade do motor DC	35
Figura 23: Características do motor Mabuchi	36
Figura 24: Conversor de condução contínuo	37
Figura 25: Conversor de condução não contínuo	37
Figura 26: Montagem final	38
Figura 27: Filamentos extrudados	39
Figura 28: Filamentos extrudados no segundo teste	40
Figura 29: Matéria prima empedrada	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Catálogo de tubos Cavsteel	29
Tabela 2: Propriedades do AISI 304	31
Tabela 3: Valores medidos das amostras	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

DC – CC – Corrente continua

DIY - *Do It Yourself* - Faça você mesmo

E - Espessura

Fc – Força Circunferencial

FDM – *Fused Deposition Modeling* – Modelagem por fusão e deposição
MA: Média aritmética dos dados

Mpa – Mega Pascal

n: Quantidade de dados

N.m – Newton por metro

PD – Controle proporcional e derivativo

PI – Controle proporcional e integral

PID – Controle proporcional integral e derivativo

PWM – *Pulse with modulation* – Pulso por modulação

V – Tensão elétrica

xi: Valor na posição i no conjunto de dados

°C – Graus Celsius

Øe - De – Diâmetro externo do tubo

Øi - Di – Diâmetro interno do tubo

σ_c – Tensão Circunferencial

Σ : Símbolo de somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	11
2.1	OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
3	METODOLOGIA	12
4	REVISÃO LITERÁRIA	13
4.1	HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA MANUFATURA ADITIVA	13
4.2	PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS NA MANUFATURA ADITIVA	14
4.2.1	Característica do ABS	15
4.2.2	Composição química	15
4.2.3	Propriedades mecânicas	16
4.2.4	Recomendações pré-extrusão	16
4.3	EXTRUSÃO DE POLÍMETROS	19
4.4	CONTROLE	20
4.4.1	Ação de controle proporcional	21
4.4.2	Ação de controle integral	22
4.4.3	Ação de controle derivativa	22
4.4.4	Ação de controle PID	22
5	DESENVOLVIMENTO	24
5.1	SISTEMA DE AQUECIMENTO E CONTROLE	24
5.1.1	Resistência elétrica	24
5.1.2	Sensor de temperatura	24
5.1.3	Relé de estado sólido (SSR)	25
5.1.4	Controlador de temperatura PID	26
5.1.5	Especificações Técnicas:	26
5.1.6	Esquemático	27
5.2	CONSTRUÇÃO MECÂNICA	27
5.2.1	Fuso	27
5.2.2	Escolha do canhão	28
5.2.3	Propriedades do canhão	30
5.2.4	Matriz	31
5.3	ROTAÇÃO DO FUSO	34
5.3.1	Escolha do motor	35
5.3.2	Controle do motor	36
6	RESULTADOS OBTIDOS	38
7	CONCLUSÃO	43
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
9	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Comercializada desde o final da década de 1980, as impressoras 3D atraem milhares de empresas pela flexibilidade e capacidade de impressões geométricas diferenciadas. Segundo Kleer et al. (2015), a impressão 3D possibilita a customização de produtos com baixas barreiras financeiras, já que o processo não necessita de máquinas (torno, fresa, retífica, etc.) ou moldes, possibilita a criação de um conjunto de objetos já montados, eliminando possíveis etapas de montagem. O avanço da tecnologia proporcionou a redução do preço e a cultura *open source* favoreceu para que também fossem utilizadas como *Hobbies*, sendo possível encontrar facilmente projetos *Do It Yourself*(DIY), ou faça você mesmo, que facilitam a construção de impressoras 3D por entusiastas desse seguimento. Atualmente a técnica mais utilizada é *Fused Deposition Modeling* (FDM), que consiste em depositar material camada por camada (VOLPATO, 2007). Contudo, o custo dos filamentos utilizados nas impressoras 3D encarece o produto final e limita a criação de pequenos projetos caseiros, segundo Costa (2015), o custo de 1kg de filamento chega a um décimo do valor da impressora. O preço do filamento ainda é considerado uma limitação para o processo. (KLEER, et al., 2015).

Desse modo, propõe-se o desenvolvimento de uma extrusora de baixo custo que produza filamentos de qualidade equiparável aos encontrados no comércio. O maior desafio apresentado no desenvolvimento das extrusoras "amadoras" é a manutenção da linearidade no diâmetro final do filamento (COSTA, 2015). Sabe-se que filamentos com diâmetro inconstante geram peças defeituosas, tanto na geometria quanto nas propriedades mecânicas, o que acaba por gerar um considerável desperdício de matéria prima e tempo de máquina.

Os materiais comumente utilizados no processo de impressão 3D por FDM são PLA e ABS (SOUZA e HUPPES, 2017). Apesar da aplicabilidade do PLA, este trabalho dará ênfase à construção de uma máquina para extrusão do material ABS. Posteriormente poderá ser considerada a possibilidade de utilizar o PLA como material a ser extrudado.

2 OBJETIVO

Desenvolver um equipamento de extrusão de termoplástico sob um menor custo e que seja capaz de controlar o diâmetro do filamento em 1,75mm com tolerância de 0,05mm.

2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Projetar e desenvolver estrutura mecânica.
- Projetar e desenvolver circuito elétrico.
- Calibrar a temperatura.
- Controlar o motor.
- Extrudar filamento com parâmetros de qualidade aceitáveis.

3 METODOLOGIA

Este projeto é de natureza aplicada, de caráter experimental, que explicará através das pesquisas e do protótipo realizado as principais características necessárias para produzir filamentos de qualidade (MORESI, 2003).

O projeto consistirá das seguintes etapas:

- a) Pesquisa descritiva e bibliográfica, sobre a extrusão de termoplásticos.
- b) Avaliação das informações obtidas através da pesquisa
- c) Análise dos dados coletados
- d) Desenvolvimento de um protótipo.
- e) Confrontar dados obtidos ao fim dos testes com os apontados durante a pesquisa bibliográfica.

4 REVISÃO LITERÁRIA

Neste tópico será realizada uma descrição analítica baseada no conhecimento científico que autores têm publicado a respeito do tema a ser estudado neste trabalho.

4.1 HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) pode ser caracterizada de forma abreviada como uma tecnologia em que um modelo tridimensional gerado em *software* CAD possa ser fabricado de maneira direta, sem a necessidade de um longo processo de planejamento. Embora não seja tão simples como possa parecer, MA com certeza facilita a produção de objetos 3D diretamente de um modelo CAD (GIBSON, ROSEN e SCRUCKER, 2010).

De acordo com Duarte (2014), a história das impressoras 3D começa a partir de 1983, quando o americano Chuck Hull criou a primeira impressora 3D utilizando a tecnologia de estereolitografia. Sua principal função era a de fazer protótipos de plástico de forma rápida, como alternativa ao processo tradicional, muito mais demorado e com muitas imperfeições (DUARTE, 2014). Portanto, ainda segundo o autor, já em seus primórdios a impressão em 3D demonstrava suas principais características que permaneceriam até hoje, a rapidez e a flexibilidade.

Segundo Ferreira e Silva (2014), o processo de prototipagem rápida é realizando em cinco etapas:

- 1) Modelagem 3D do protótipo fazendo uso de um software CAD;
- 2) Conversão dos dados obtidos na etapa anterior, para o formato de entrada do software do equipamento que realiza a preparação para a impressão, em seguida o software faz a emulação do ambiente de construção da máquina de prototipagem rápida;
- 3) Verificação, posicionamento e orientação do modelo 3D;
- 4) O modelo é fatiado em várias camadas bidimensionais em um plano cartesiano de coordenadas x, y.
- 5) E por fim, as informações são transferidas para a impressora 3D onde são reproduzidas as camadas até o objeto estar completamente confeccionado.

Os benefícios e aplicações da prototipagem rápida são inúmeros entre os quais destacam-se (VOLPATO, 1999):

- Agilidade na construção de protótipos, quando comparada com técnicas convencionais;
- Diminuição dos custos, já que a detecção de problemas se dá de forma precoce, permitindo reduzir o *time to market*, ou seja, o tempo útil que demora até se colocar um artigo no mercado;
- Os protótipos podem ter uma grande complexidade geométrica;

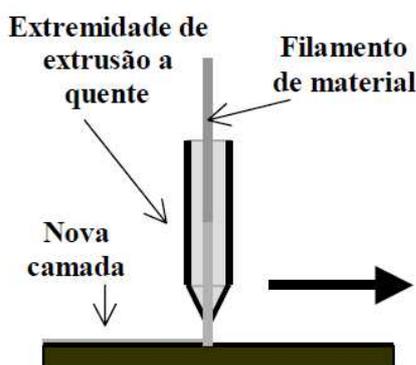
Com base nessas afirmações é possível dizer que a prototipagem rápida utilizada como ferramenta, apresenta características extremamente interessantes, bem como vantajosas para o âmbito industrial de forma que, com o passar do tempo e popularização da tecnologia, se torna mais comum o seu uso, assim como a melhora da relação custo-benefício.

4.2 PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS NA MANUFATURA ADITIVA

O processo de manufatura aditiva a ser investigado neste trabalho será o de Modelamento por deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling - FDM*) no qual os modelos são construídos através de finas camadas depositadas uma sobre as outras, de um material termoplástico, como o ABS com viscosidade controlada através de aplicação de calor. Este material devido as suas características de alta resistência, tenacidade e durabilidade, tornam-se um dos materiais mais utilizados na confecção de protótipos funcionais (KAMINSKI e OLIVEIRA, 2000).

Um esquema simplificado desse processo pode ser verificado de acordo com a figura 1.

Figura 1: Processo de deposição de material



Fonte: KAMINSKI e OLIVEIRA, 2000.

Outro material comumente utilizado em manufatura aditiva é o PLA e segundo Brito, Araújo e De Melo (2012), que trata-se de um polímero termoplástico obtido através de síntese química a partir de ácido láctico produzido por fermentação bacteriana de glicose extraída do milho, que é uma fonte renovável. É um polímero sem estrutura cristalina muito bem definida, biocompatível e biodegradável, possui aplicação potencial na confecção de embalagens, itens de descarte rápido, fibras têxteis e outras variadas aplicações na área médica. Entretanto, o PLA possui elevada fragilidade e rigidez o que o impede de ser utilizado em algumas aplicações, mas ainda assim segundo Hughes e Wilson (2015), é o material de escolha em grande parte das impressoras em projetos que requerem um alto grau de detalhes. Devido a praticidade do ABS e sua aplicação ser mais generalizada, optou-se por desenvolver o projeto com o foco direcionado para esse polímero.

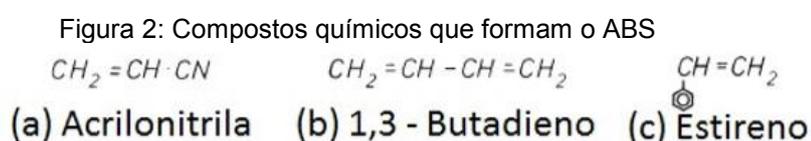
4.2.1 Característica do ABS

Além das características anteriormente citadas por Kaminski e Oliveira (2000) e Dominghaus et al. (2012), atribuem ao material as seguintes propriedades:

- Alta dureza e resistência a riscos;
- Altos valores de tensão e módulo de elasticidade;
- Alta resistência a impacto em baixas temperaturas;
- Alta estabilidade de forma para temperaturas;
- Baixa absorção de umidade;
- Alta estabilidade de forma.

4.2.2 Composição química

O plástico ABS é formado por 3 monômeros, sendo eles apresentados na figura 2.

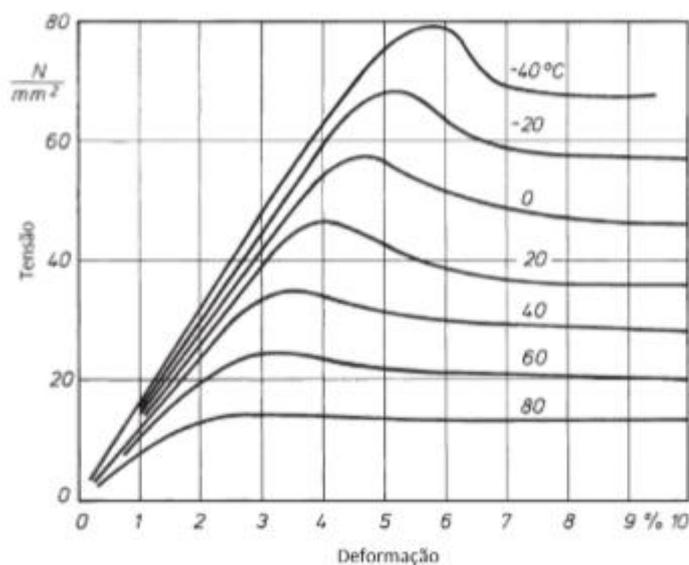


Cada um deles tem influência sobre a qualidade final do produto extrudado ou impresso. A acrilonitrila atribui ao material uma boa resistência mecânica, resistência a temperatura e intempéries. Já o 1,3 – Butadieno aumenta a capacidade de alongamento e a resistência à baixa temperatura e tenacidade. Enquanto o Estireno agrega a rigidez e transparência.

4.2.3 Propriedades mecânicas

As propriedades dos materiais plásticos variam de acordo com a temperatura a que são submetidos. Como apresentado na figura 3, quando submetido a altas temperaturas a tensão de escoamento diminui e o alongamento aumenta. (SCARPIN e BETTONI, 2006)

Figura 3: Tensão x Deformação em uma peça de ABS

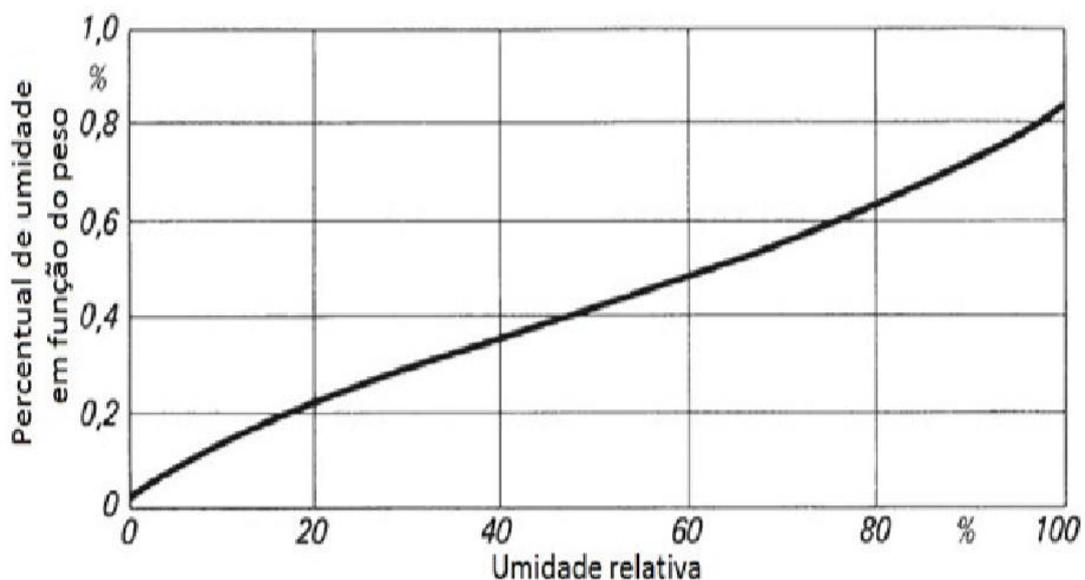


Fonte: SCARPIN & BETTONI, 2006

4.2.4 Recomendações pré-extrusão

Segundo Domininghaus et al. (2012) o ABS quando não é armazenado corretamente e fica exposto ao ambiente absorve a umidade do ar, como ilustrado na figura 4. Desse modo, é recomendado que o material passe pelo processo de secagem a temperatura de 85°C, por um período de 2 a 4 horas.

Figura 4: Gráfico do percentual de umidade no ABS



Fonte: COSTA, 2015.

Segundo Costa (2015), uma vez dentro do tubo de extrusão, ao ser submetido à altas temperaturas, essa umidade tende a sair do polímero causando bolhas no mesmo. Com isso gerando graves defeitos estruturais nas peças impressas ocasionados pela falta de material. Um exemplo pode ser visto na figura 5 que apresenta um filamento produzido sem a preparação do plástico, portanto contendo alto teor de umidade. Enquanto o filamento da figura 6 foi produzido com o material preparado. Costa (2015) ressalta que nenhum parâmetro foi alterado no processo de extrusão dos filamentos. A diferença consiste apenas na preparação correta do material.

Figura 5: Filamento com alta taxa de umidade.



fonte: COSTA, 2015.

Figura 6: Filamento produzido com material com baixa taxa de umidade.



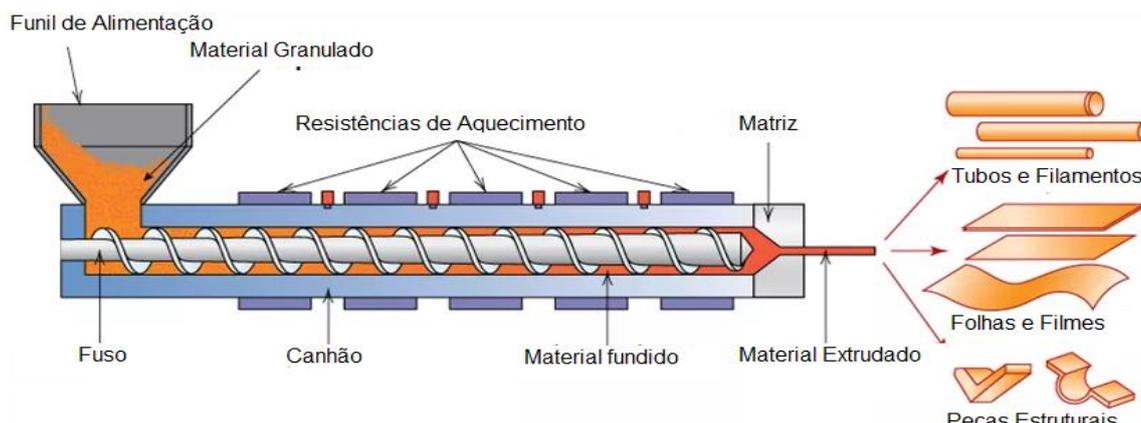
Fonte: COSTA, 2015.

4.3 EXTRUSÃO DE POLÍMETROS

O processo de extrusão se inicia com a alimentação do funil da extrusora com o material granulado ou moído, o qual através da gravidade cairá sobre o fuso que o transportará dentro de um canhão aquecido por resistências elétricas, parte desse calor é provido pelo atrito do próprio material com as paredes do canhão. Nessa fase, o material passa por três zonas: alimentação, compressão e dosagem conforme mostrado na figura 7:

- Zona de Alimentação: O fuso tem sulcos profundos, pois a intenção é apenas aquecer o material próximo a seu ponto de fusão e transportá-lo a próxima zona.
- Zona de Compressão: existe uma diminuição progressiva dos sulcos do fuso, comprimindo o material contra parede do cilindro promovendo sua plastificação.
- Zona de dosagem: Os sulcos do fuso são continuamente rasos, fazendo com que o material se misture de maneira mais consistente e auxiliando a manutenção da vazão através da pressão gerada.

Figura 7: Processo de extrusão



Fonte: Adaptado de THEODORO, 2016.

Ao final do cilindro o material é forçado contra a matriz onde tomará a forma final. A partir desse ponto o processo segue um rumo diferente de acordo com o produto a ser fabricado.

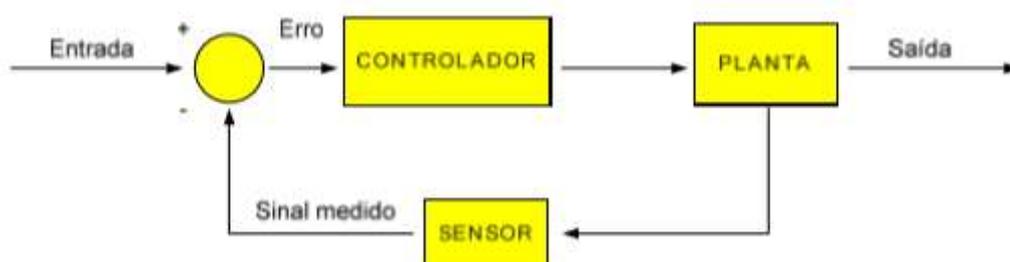
Segundo Harold Jr & Wagner Jr (2005), logo após o material ser extrudado, ele sofre o fenômeno *die swell*, que é o inchamento devido a mudança da pressão e temperatura. Dessa maneira, é inviável o controle do diâmetro do filamento apenas escolhendo o diâmetro do bico. No intuito de produzir filamentos de diâmetro contínuo, será necessário a adição de um sistema tracionador (*puller*) ao final do processo. O sistema tracionador tem como finalidade puxar o filamento de forma que a vazão de saída de filamento do tracionador seja maior do que a de saída da extrusora, diminuindo assim a secção transversal do filamento (COSTA, 2015).

Em todas as partes do processo é necessário controlar a velocidade de rotação do fuso, temperatura e vazão, pois esses fatores influenciam diretamente nas características no material extrudado. Com tudo, o controle da temperatura é extremamente crítico, pois influencia diretamente na maleabilidade, resistência a torção e tração, aspecto visual e alongamento (BRIDGE, 1997). Como se pretende desenvolver filamentos de qualidade equiparável aos produzidos industrialmente, um ótimo controle da temperatura se faz ainda mais necessário.

4.4 CONTROLE

O sistema de controle é responsável por manter a temperatura do processo de extrusão um determinado valor (SetPoint). Como é apresentado na figura 8, em um sistema de malha fechada, é possível calcular o erro do sistema (SetPoint – Sinal medido). Através de um elemento sensor é possível saber o valor real (Sinal medido) da variável controlada (temperatura)

Figura 8: Fluxograma de um controle em malha fechada



Fonte: Adaptado PINTO, 2005

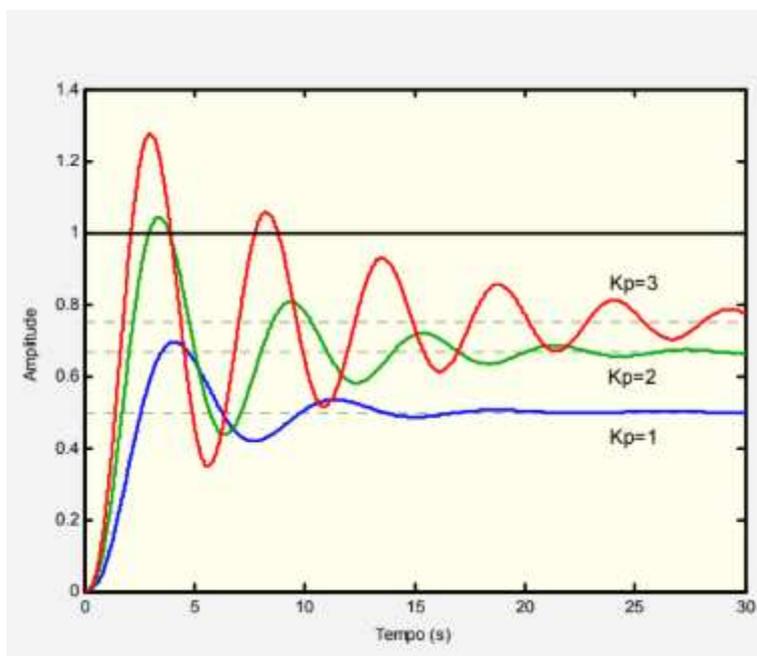
Com essa informação são tomadas decisões de controle, o sistema envia sinais de correção, a fim de limitar o erro ou desvio do sinal medido. Segundo Giles

Jr. et al (2005) o tipo de controle utilizados em extrusoras é o PID (Proporcional Integral Derivativo), pois possibilita um controle com baixo erro de offset e boa estabilidade, e por isso é bastante utilizado em projetos acadêmicos e na indústria. O PID combina três ações básicas de controle, P (proporcional), I (integral) e D (derivativo) (GUERRA, 2009).

4.4.1 Ação de controle proporcional

A componente proporcional depende apenas da diferença entre o ponto de ajuste (Set Point) e a variável de processo. Essa diferença é referida como erro. O ganho proporcional K_p é proporcional a amplitude do erro. Como mostrado na figura 9, ao aumentar o ganho proporcional o tempo de resposta do sistema diminui. Entretanto quanto maior o ganho, maior é a oscilação do sistema. Sendo assim, o aumento do K_p deve ser ponderado devido ao risco do sistema ficar instável.

Figura 9: Ação proporcional com diferentes valores de K_p

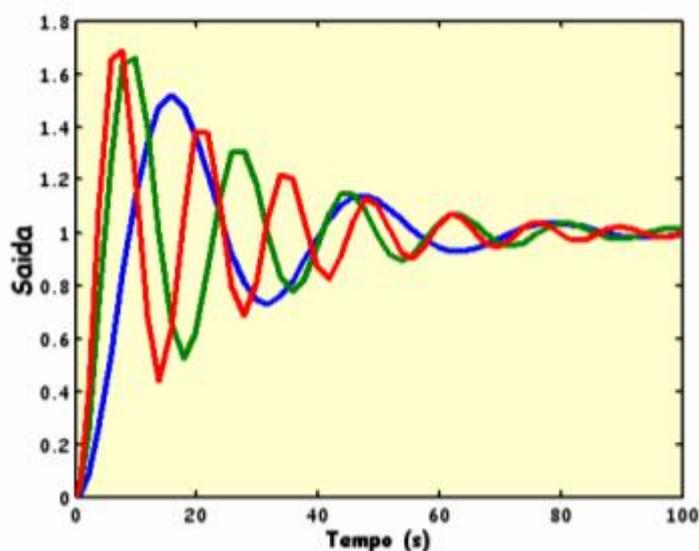


Fonte: FILETE & SILVA, 2007

4.4.2 Ação de controle integral

A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. Conforme a figura 10 a resposta integral vai aumentando ao longo do tempo, conduzindo o erro de estado estacionário para zero. Portanto, a ação integral, está diretamente ligada a melhoria da precisão do sistema.

Figura 10: Ação integral com diferentes valores de TI



Fonte: FILETE & SILVA, 2007

4.4.3 Ação de controle derivativa

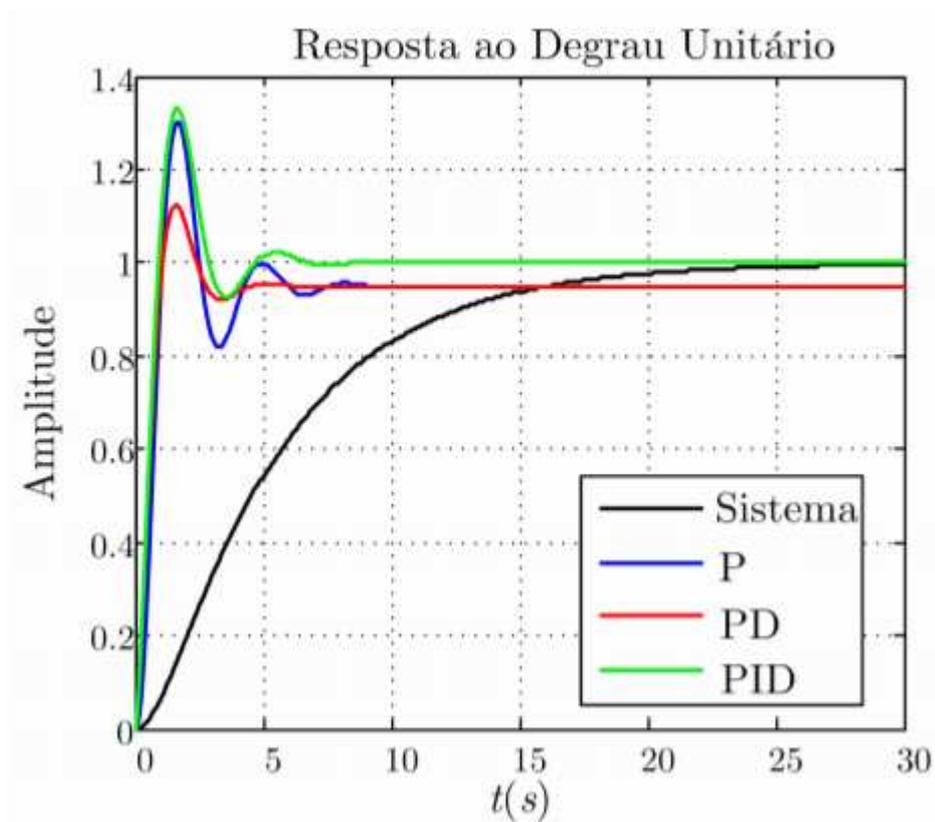
Já a ação proporcional à derivada do sinal de erro (PD) é equivalente a aplicar uma ação baseada na tendência de evolução do erro. A ação derivativa é então dita antecipatória ou preditiva e tende a fazer com que o sistema reaja mais rapidamente. Este fato faz com que a ação derivativa seja utilizada para a obtenção de respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para a melhora do comportamento dinâmico do sistema em malha fechada, otimizando o funcionamento do sistema.

4.4.4 Ação de controle PID

O resultado da combinação das 3 ações de controle é apresentado na Figura 11. Resumidamente, o sinal de erro é minimizado pela ação proporcional, zerada

pela ação integral e obtido com uma velocidade maior, pois é antecipada pela ação derivativa.

Figura 11: Resposta característica da ação PID.



Fonte: FILETE & SILVA, 2007

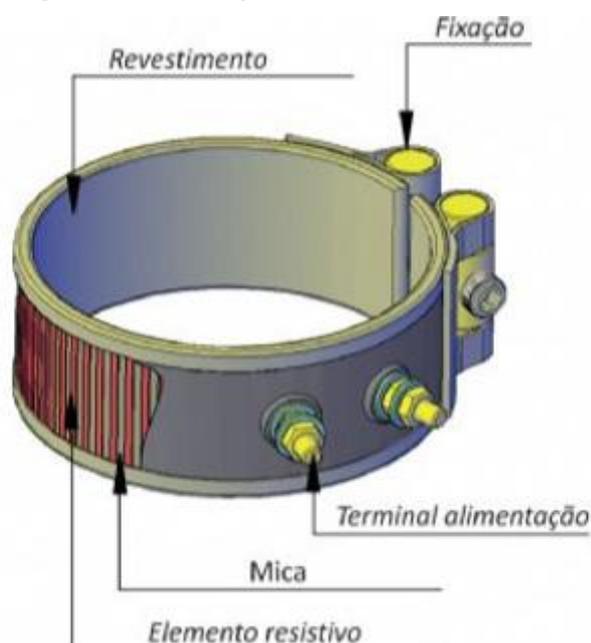
5 DESENVOLVIMENTO

5.1 SISTEMA DE AQUECIMENTO E CONTROLE

5.1.1 Resistência elétrica

Para o aquecimento do tubo será utilizado uma resistência elétrica coleira. Usualmente, é utilizada uma fita metálica composta por níquel cromo como elemento resistivo, responsável pelo efeito joule. É possível observar na figura 12 que esse tipo de resistência possui uma camada de mica, responsável por isolar a fita resistiva e toda a carcaça, protegendo o circuito elétrico de possíveis curtos circuitos. O revestimento tem a função de encapsular o elemento resistivo e o isolante de mica. Inclusive, a fixação tem como objetivo tracionar o revestimento, deixando-o mais justo ao tubo, maximizando a troca de calor entre a resistência e o tubo.

Figura 12: Construção de uma resistência elétrica



Fonte: ANLUZ, 2016

5.1.2 Sensor de temperatura

A fim de controlar a temperatura do canhão, será utilizado um termopar básico do tipo k, o qual é utilizado em larga escala em processos industriais, dessa

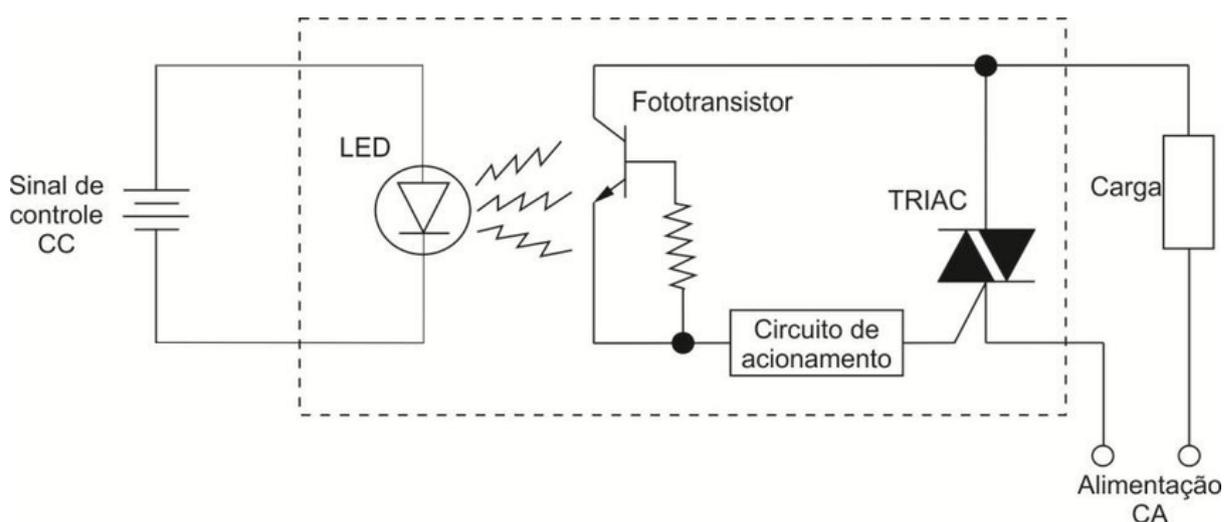
maneira sendo fácil de ser encontrado devido ao seu custo ser relativamente baixo (DESMARAIS, 1996).

O termopar tipo K, tem seu uso restrito somente em ambientes sulfurados e oxidantes, pois é composto de Fe+/Cu-Ni (EXACTA, 2005). A faixa de temperatura de operação do termopar é entre 0~750°C, sendo o limite de erro $\pm 2,2^\circ\text{C}$. Diante desse fato, é adequada a aplicação no projeto proposto.

5.1.3 Relé de estado sólido (SSR)

Os relés de estado sólido ou SSRs, são semicondutores utilizados para chaveamento de alimentação em cargas de alta potência. Conforme é demonstrado na figura 13, é possível observar que o relé é composto unicamente por componentes eletrônicos de estado sólido, isentos de elementos mecânicos que geralmente se desgastam ao longo do tempo. Outras vantagens relevantes atribuídas ao relé de estado sólido é a capacidade de chaveamento em altas frequências, elevado isolamento elétrico, reduzida corrente de acionamento. (SCARPIN e BETTONI, 2006)

Figura 13: Funcionamento de um relé



Fonte: ZAMBALDI, 2016.

Nesse projeto, o valor medido pelo termopar será utilizado como referência pelo controlador de temperatura PID. Sendo o controlador o responsável por enviar o sinal de controle para o chaveamento ou não do relé de estado sólido. Dessa

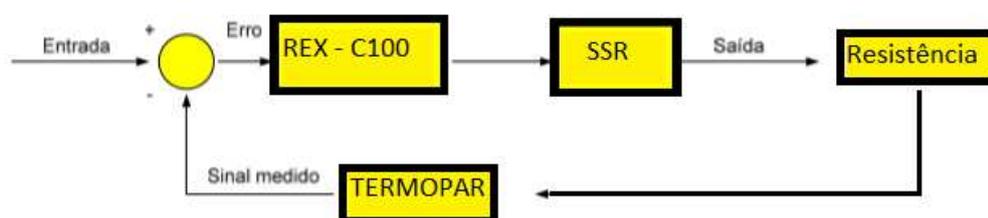
maneira, controlando a alimentação da resistência elétrica e, portanto, o aquecimento do canhão.

5.1.4 Controlador de temperatura PID

Conforme citado anteriormente, o chaveamento do relé de estado sólido é regulado pelo controlador, no caso o PID Rex-C100. Optou-se por utilizar esse controlador devido a praticidade e baixo custo. Visto que é possível encontrar o Kit PID + SSR + Termopar por volta de R\$124,90.

O controlador possui um Auto Ajuste do PID, sendo necessário configurar apenas a temperatura de *setpoint*. Facilitando a aplicação no projeto e garantindo um controle satisfatório da temperatura. Utilizando a figura 8 como referência, foi possível definir a malha de controle utilizado nesse projeto conforme a demonstrado na figura 14.

Figura 14: Malha de controle da extrusora projetada



Fonte: Adaptado PINTO, 2005

5.1.5 Especificações Técnicas:

Tensão: AC100-240V

Faixa de temperatura: 0-400 ° C

Entrada: Tipo K Sonda de Temperatura

Relé: Max. 40A SSR

Corrente de saída: 40A

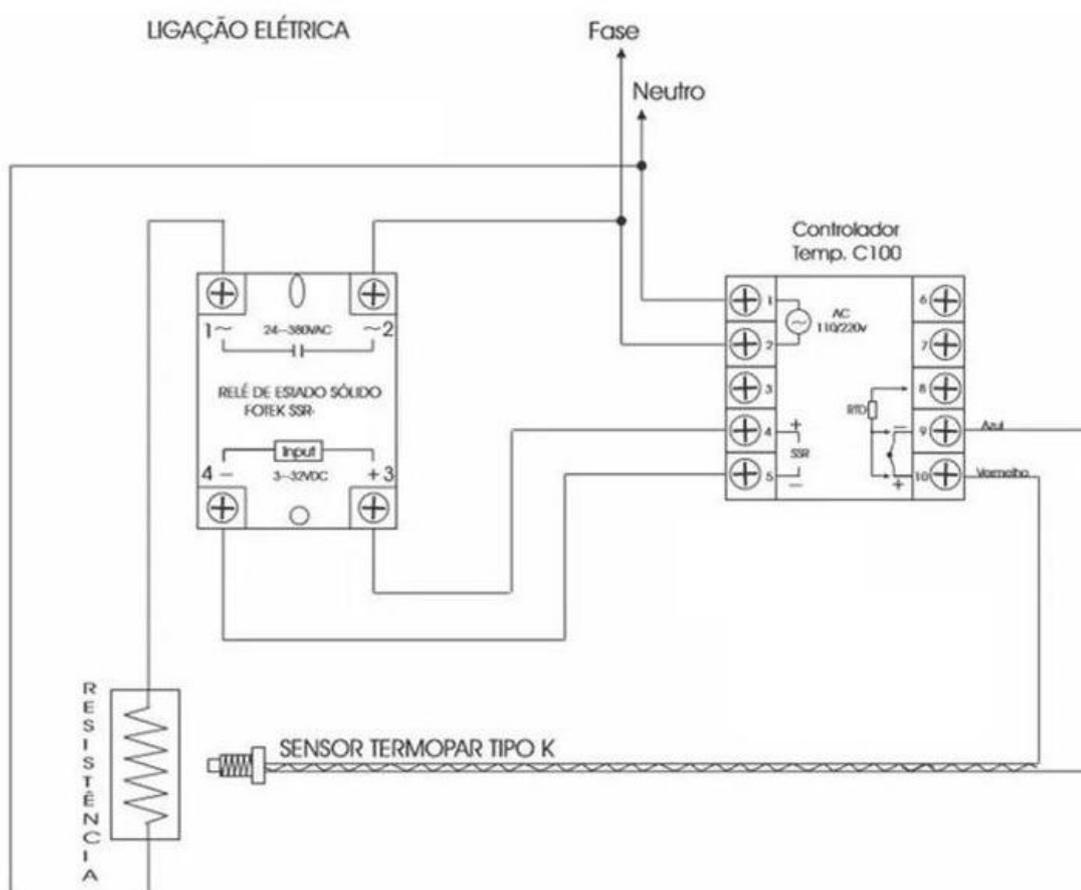
Tensão de entrada: DC 3-32 V

Tensão de saída: 24-380 V AC

5.1.6 Esquemático

Conforme pode-se observar na figura 15, o esquema de ligação é simples e pode ser facilmente reproduzido, o que por sua vez, auxilia a sua utilização no mercado de *hobbie* e sua construção por amadores ou adeptos do movimento “*Do it yourself*”

Figura 15: Esquema de ligação do circuito de aquecimento



Fonte: Mercado Livre, 2019

5.2 CONSTRUÇÃO MECÂNICA

5.2.1 Fuso

A fim de manter a pretensão de um projeto de baixo custo, optou-se por utilizar uma broca de madeira da marca Makita apresentada na figura 16 como fuso.

A broca possui 250mm de comprimento e 16mm de diâmetro fabricado em aço carbono. Essa escolha foi necessária, pois a produção de um fuso específico para o projeto acarretaria em um alto custo de produção.

Figura 16: Broca de madeira Makita



Fonte: Casa das furadeiras, 2019

As folgas existentes entre o fuso e a parede do cilindro devem ser pequenas para evitar o contra fluxo do material fundido e a possível alteração na vazão da extrusora.

5.2.2 Escolha do canhão

Para escolher o canhão que mais se adéqua ao projeto foram levados em consideração os seguintes parâmetros:

- Diâmetro interno com menor folga em relação a broca;
- Diâmetro externo dentro dos padrões comerciais;
- Facilidade para encontrar/reproduzir;
- Bom coeficiente de aquecimento.

Utilizando o catálogo da empresa Cavsteel apresentado na tabela 1 abaixo, foram calculados os possíveis diâmetros internos do tubo. A fim de encontrar a medida que ficaria mais justa à broca escolhida que possui 16mm de diâmetro.

Tabela 1: Catálogo de tubos Cavsteel

Tubos Inoxidáveis Redondos com Costura			
Diam. mm	Parede mm	Peso kg/mt	Den.
6,35	0,4	0,06	
6,35	0,5	0,07	
6,35	0,6	0,09	
6,35	0,7	0,10	
6,35	0,8	0,11	
6,35	1	0,13	
7,5	0,4	0,07	
7,5	0,5	0,09	
7,5	0,6	0,10	
7,5	0,7	0,12	
7,5	0,8	0,13	
7,5	1	0,16	
8	0,5	0,09	
8	0,6	0,11	
8	0,7	0,13	
8	0,8	0,14	
8	1	0,18	
8	1,2	0,20	
8	1,5	0,24	
9,53	0,5	0,11	
9,53	0,6	0,13	
9,53	0,7	0,15	
9,53	0,8	0,17	
9,53	1	0,21	
9,53	1,2	0,25	
9,53	1,5	0,30	
10	0,5	0,12	
10	0,6	0,14	
10	0,7	0,16	
10	0,8	0,18	
10	1	0,23	
10	1,2	0,26	
10	1,5	0,32	
10,5	0,5	0,13	
10,5	0,6	0,15	
10,5	0,7	0,17	
10,5	0,8	0,19	
10,5	1	0,24	
10,5	1,2	0,28	
10,5	1,5	0,34	
12,7	0,5	0,15	
12,7	0,6	0,18	
12,7	0,7	0,21	
12,7	0,8	0,24	
12,7	1	0,29	
12,7	1,2	0,35	
12,7	1,5	0,42	
12,7	2	0,54	
15,87	0,7	0,27	
15,87	0,8	0,30	
15,87	1	0,37	
15,87	1,2	0,44	
15,87	1,5	0,54	
19,05	0,8	0,37	
19,05	1	0,45	
19,05	1,2	0,54	
19,05	1,5	0,66	
19,05	2	0,85	
21,34	1,65	0,81	1/2" SCH 5 S
21,34	2,11	1,02	1/2" SCH 10 S
21,34	2,77	1,29	1/2" SCH 40 S
22,22	0,7	0,38	
22,22	0,8	0,43	
22,22	1	0,53	
22,22	1,2	0,63	
22,22	1,5	0,78	
22,22	2	1,01	
25,4	1	0,61	
25,4	1,2	0,73	
25,4	1,5	0,90	
25,4	2	1,17	
26,67	1,65	1,03	3/4" SCH 5 S
26,67	2,11	1,30	3/4" SCH 10 S
26,67	2,77	1,66	3/4" SCH 20 S
31,75	1	0,77	
31,75	1,2	0,92	
31,75	1,5	1,14	
31,75	2	1,49	
38,1	1	0,93	
38,1	1,2	1,11	
38,1	1,5	1,37	
38,1	2	1,81	
42,16	1,65	1,67	1 1/4" SCH 5 S
42,16	2,77	2,73	1 1/4" SCH 10 S
42,16	3,56	3,44	1 1/4" SCH 40 S
44,45	1	1,09	
44,45	1,2	1,30	
44,45	1,5	1,61	
48,26	1,65	1,93	1 1/2" SCH 5 S
48,26	2,77	3,16	1 1/2" SCH 10 S
48,26	3,56	3,98	1 1/2" SCH 40 S
50,8	1	1,25	
50,8	1,2	1,49	
50,8	1,5	1,85	
50,8	2	2,44	
60,33	1,65	2,42	2 SCH 5 S
60,33	2,77	3,99	2 SCH 10 S
60,33	3,91	5,52	2 SCH 40 S
63,5	1,2	1,87	
63,5	1,5	2,33	
63,5	2	3,08	
73,03	2,11	3,75	2 1/2" SCH 5 S
73,03	3,05	5,34	2 1/2" SCH 10 S
73,03	5,16	8,77	2 1/2" SCH 40 S
76,2	1,2	2,25	
76,2	1,5	2,81	
76,2	2	3,72	
88,9	2,11	4,59	3 SCH 5 S
88,9	3,05	6,56	3 SCH 10 S
88,9	5,49	11,47	3 SCH 40 S
101,6	2,11	5,26	3 1/2" SCH 5 S
101,6	3,05	7,53	3 1/2" SCH 10 S
101,6	5,74	13,78	3 1/2" SCH 40 S
114,3	2,11	5,93	4 SCH 5 S
114,3	3,05	8,50	4 SCH 10 S
114,3	6,02	16,32	4 SCH 40 S
141,3	2,77	9,61	5 SCH 5 S
141,3	3,4	11,74	5 SCH 10 S
141,3	6,55	22,10	5 SCH 40 S
168,28	2,77	11,48	6 SCH 5 S
168,28	3,4	14,04	6 SCH 10 S
168,28	7,11	28,89	6 SCH 40 S
219,08	2,77	15,00	8 SCH 5 S
219,08	3,76	20,27	8 SCH 10 S
219,08	8,18	43,20	8 SCH 40 S

Fonte: CAVSTEEL

Para calcular o diâmetro interno foi utilizada a fórmula apresentada a seguir:

$$\phi_i = \phi_e - 2xE \quad (1)$$

Onde:

ϕ_i = Diâmetro interno

ϕ_e = Diâmetro externo

E = espessura

Foram consideradas as seguintes opções de tubo:

Opção 1: DE= 19,05; E=1

Opção 2: DE = 19,05; E=1,2;

Opção 3: DE= 19,05; E=1,5;

Substituindo os valores na fórmula, o tubo da opção 2 foi o que mais se adequou a proposta conforme apresentado nos cálculos abaixo:

$$D_i = 19,05 - 2 \times 1,2 = 16,65\text{mm}$$

Sabendo que o diâmetro interno do tubo possui 16,65mm e a broca possui 16mm. A folga será de 0,325 mm.

5.2.3 Propriedades do canhão

Segundo Giles Jr. et al. (2005) o aço inox é uma das opções utilizadas como material do tubo. Dessa maneira foi adquirido o tubo feito de aço AISI 304. O aço inox ou inoxidável é uma liga metálica composta de ferro, cromo, carbono e níquel bastante resistente à corrosão e ao calor. A principal diferença entre o aço comum e o aço inox é o fato de que o último não sofre corrosão. Isso quer dizer que em contato com o oxigênio, o material não sofrerá oxidação, ou seja, não enferrujará. Essa propriedade é atribuída à adição de cromo em sua composição. Já a adição do níquel lhe confere uma maior ductilidade e resistência a altas temperaturas. As propriedades físicas e mecânicas do AISI 304 podem ser verificadas mais detalhadamente na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades do AISI 304

PROPRIEDADES FÍSICAS	Estrutura	Austenítica
	Densidade (g/cm ³)	8,00
	Calor Específico	0,29
	Coefficiente Médio de Dilatação Térmica 0 – 300 C	17,90
	(Um/m C) 0 – 650 C	18,80
	Intervalo de Fusão C	1398 1454
	Magnetismo em Estado	Não Magnético
	Resistividade Elétrica Específica a Temperatura Ambiente (UW – cm)	70,00
	Condutividade Térmica a 100 C (cal/s cm C)	0,033
	Módulo de Elasticidade (Gpa)	200,00
	Módulo de Rigidez (Gpa)	86,20
PROPRIEDADES MECÂNICAS REPRESENTATIVAS	Limite de Resistencia (Mpa)	530 / 770
	Limite de Escoamento (Mpa)	240 / 350
	Alongamento 50mm – (%)	50 / 65
	Dureza RockWell – B	75 / 85
	Limite de Fadiga (Mpa)	241,00
	Dobramento a Frio (Graus)	180,00
	Embutimento Erichsen	12,00
	Embutibilidade	Ótima
TRATAMENTOS TÉRMICOS	Temperatura inicial de Forjamento (C)	1150 1260
	Temperatura formação de Carepa (C)	840,00
	Recozimento Contínuo (C)	1010 1120
	Resfriamento	Rápido
	Temperatura de Têmpera (C)	Não Temperável
	Soldabilidade	Ótima

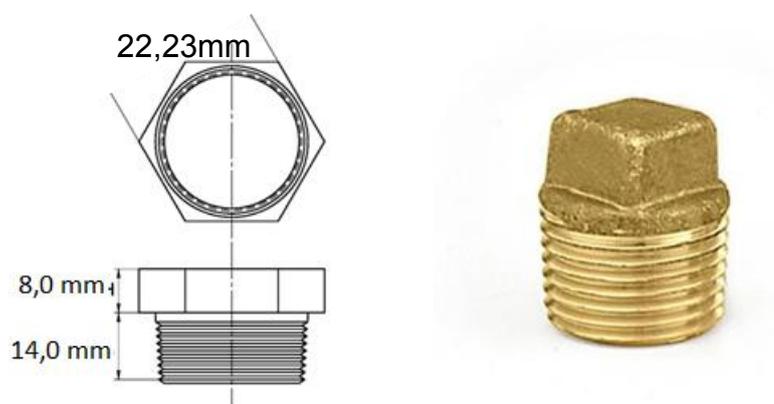
Fonte: SIDACOINOX, 2019

5.2.4 Matriz

A matriz da extrusora foi composta por um tampão roscável, geralmente utilizado em instalações hidráulicas de água quente, que pode ser facilmente encontrado em lojas de materiais de construção. Apresentado na figura 17 está o

tampão escolhido para o projeto, o qual possui diâmetro nominal de 15mm (1/2") e é composto por uma liga metálica conhecida por latão. Seguindo a recomendação de Costa (2015), o tampão foi perfurado com uma broca de 1,5mm de diâmetro, pouco menor do que o diâmetro do filamento desejado, que é de 1,75mm, pois já é esperado que o material dilate após sair do canhão de extrusão

Figura 17: Dimensões da matriz



Fonte: TUPY, 2019

Para adequar a espessura do canhão a do tampão, foi utilizada uma luva de 1/2" mostrada na figura 18. Como o canhão não possui rosca, foi necessário soldar a luva ao canhão para proporcionar a fixação adequada.

Figura 18: Luva 1/2"



Fonte: LEROY Merlin. 2019

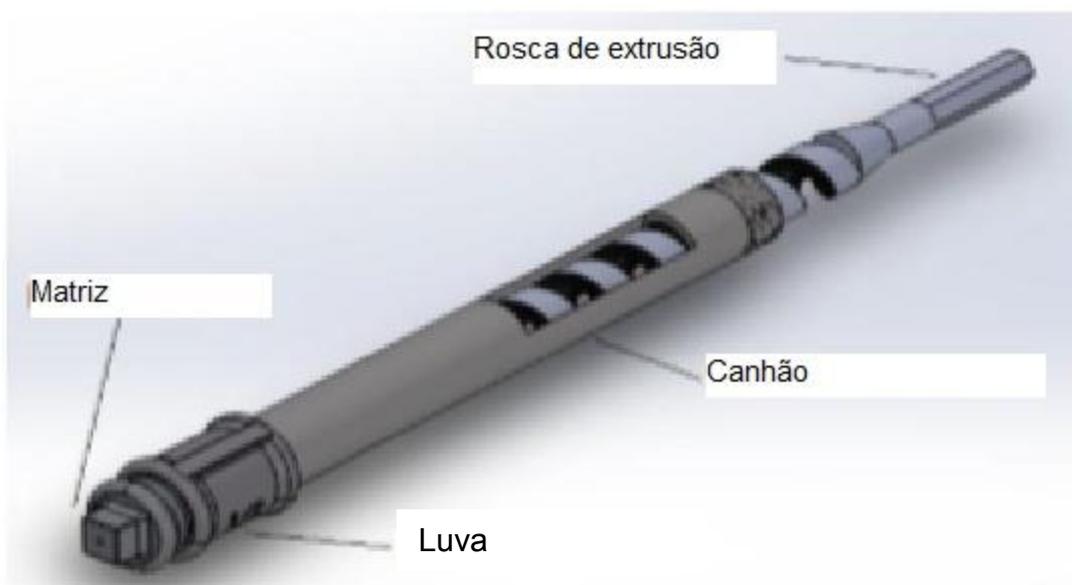
Ao adaptar a luva ao tubo, criou-se a possibilidade de trocar a matriz quando necessário. Sendo possível extrudar filamentos com diferentes diâmetros. Sendo assim, a aparência final da montagem pode ser vista na Figura 19. A montagem foi inspirada no projeto proposto por Rodrigues (2017) como demonstrado na figura 20. No entanto, foram necessárias alterações no projeto para se adequar à broca escolhida para ser utilizada como fuso.

Figura 19: Conjunto luva e tampão



Fonte: Autoria própria

Figura 20: Fuso e canhão

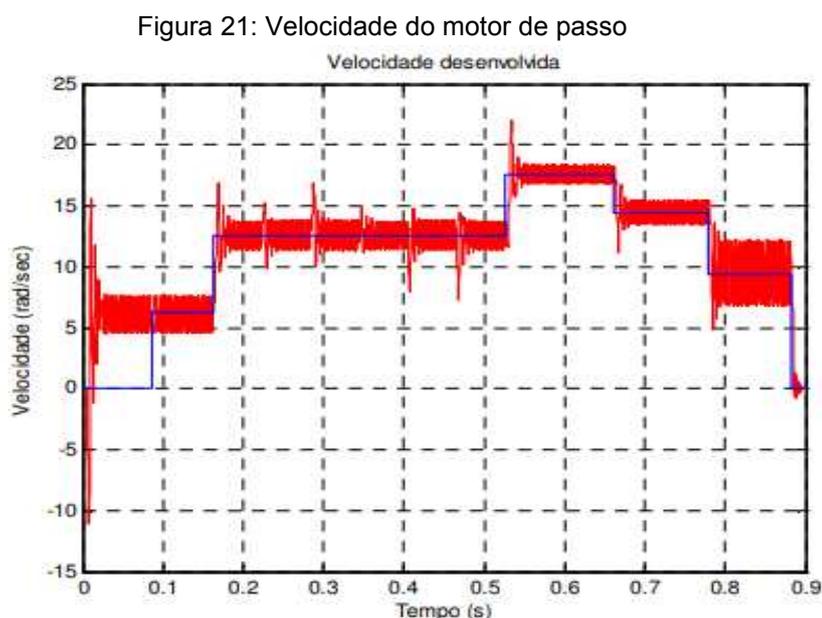


Fonte: Adaptado RODRIGUES, 2017.

5.3 ROTAÇÃO DO FUSO

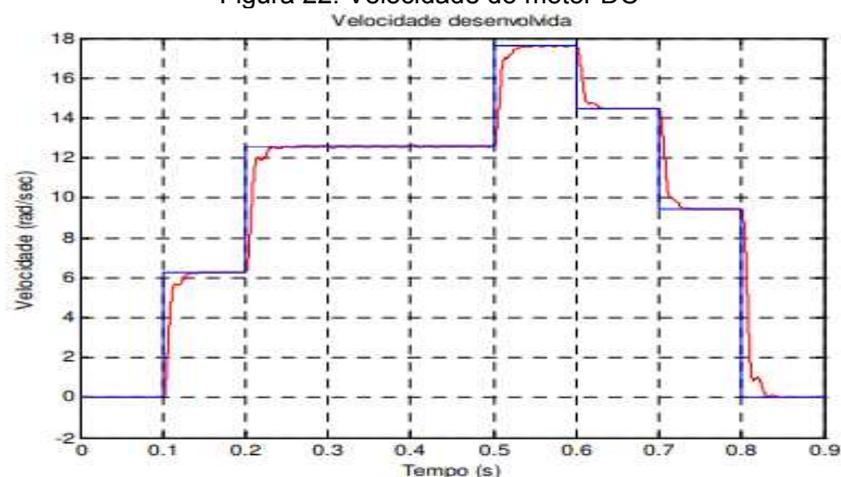
Para manter a linearidade do filamento, é necessário um motor que tenha um bom controle de velocidade e torque para rotação.

Contrariando a maioria do material estudado, optamos por escolher um motor DC para o controle da rotação do fuso, devido à possibilidade de controlar o torque necessário, através da corrente, a fim de compensar a pressão dentro do canhão da extrusora. Essa alternativa justifica-se já que não seria possível controlar o torque em motores de passo, que são os mais comuns nesse tipo de aplicação. Além do mais, com motor DC é possível desenvolver melhor a velocidade e o torque conforme as figuras 21 e 22, onde o perfil aplicado está em azul e o resultado em vermelho, (FARIAS & RAUNHEITTE).



Fonte: FARIAS e RAUNHEITTE 2007.

Figura 22: Velocidade do motor DC

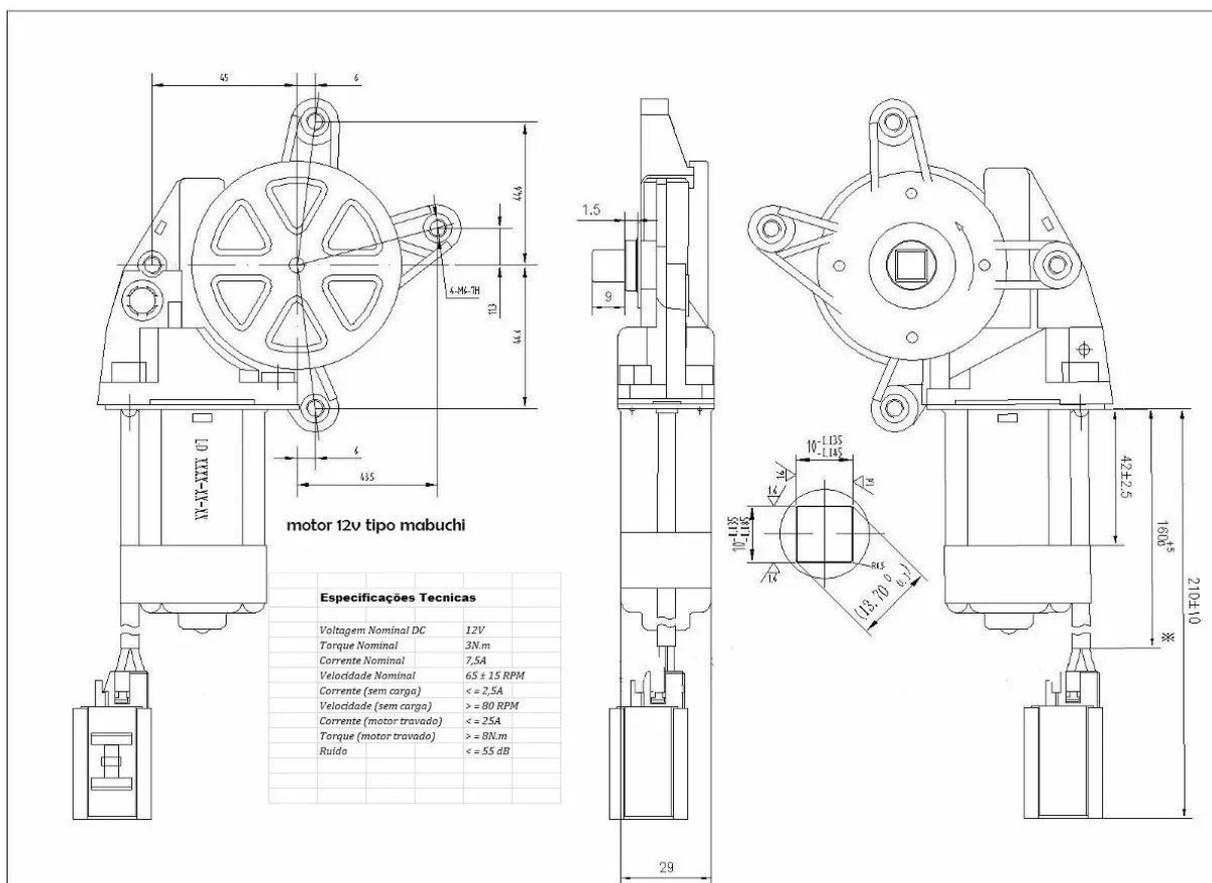


Fonte: FARIAS e RAUNHEITTE, 2007.

5.3.1 Escolha do motor

Como citado no item anterior, é necessário que o motor tenha um bom torque para compensar a pressão gerada dentro do tubo. Ao procurar por motores com essas características e que fossem fáceis de ser encontrados e substituídos se necessário, optamos pelo motor Mabuchi, geralmente utilizado em máquinas de vidro elétrico para automóveis. Conforme a figura 23, o motor possui torque nominal de 3 N.m podendo chegar a 8 N.m caso o motor trave.

Figura 23: Características do motor Mabuchi



Fonte: Mercado Livre. 2019

5.3.2 Controle do motor

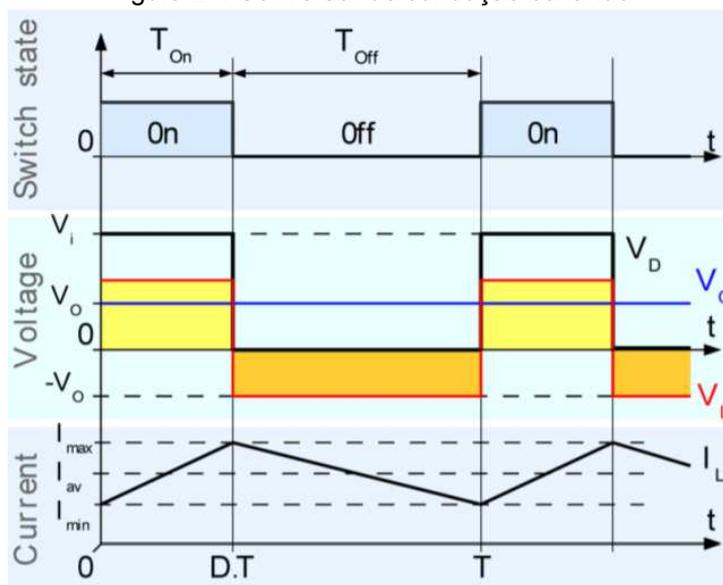
Para controlar a rotação do motor foi utilizado um conversor *buck* ou *stepdown* (conversor abaixador). Que é um conversor CC/CC que diminui a tensão enquanto aumenta a corrente de sua entrada (alimentação) para sua saída (carga).

Esses tipos de conversores fornecem uma alta eficiência energética se comparada aos reguladores lineares, que são circuitos mais simples que reduzem as tensões dissipando a energia como calor, mas não aumentam a corrente na saída.

É possível encontrar dois tipos de conversores CC/CC, os de condução contínua, apresentado na figura 24, que são os mais utilizados e o de condução não

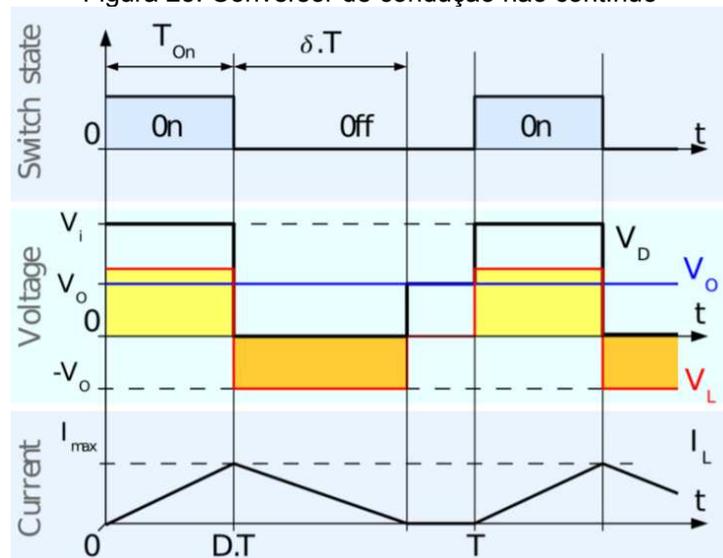
contínua conforme a figura 25. Foi escolhido o conversor de condução contínuo visto que dessa maneira, a corrente necessária para manter o torque do motor não ficará em zero por muito tempo. Sendo assim, o motor não deve sofrer grandes perdas no torque devido à placa de controle.

Figura 24: Conversor de condução contínuo



Fonte: PETRY, 2012

Figura 25: Conversor de condução não contínuo



Fonte: PETRY, 2012

6 RESULTADOS OBTIDOS

A aparência final do protótipo com todos os equipamentos montados pode ser verificada na Figura 26.

Figura 26: Montagem final

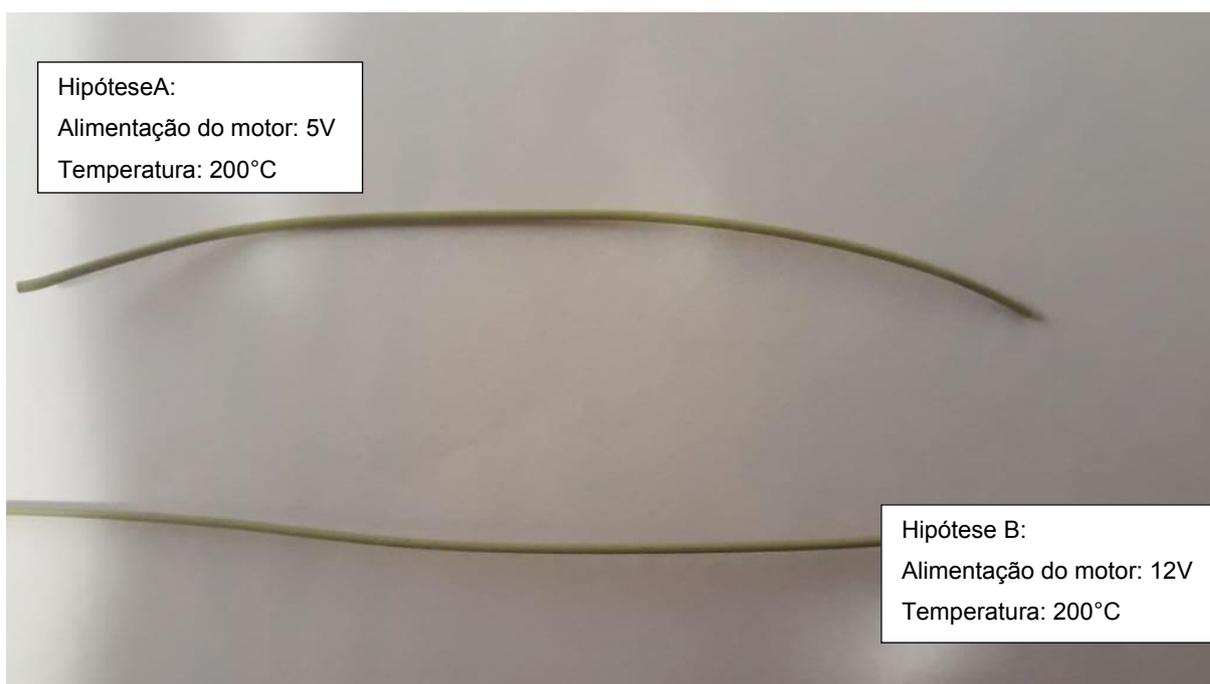


Fonte: Autoria Própria

O equipamento foi conectado à rede elétrica e primeiramente foi testado o sistema de movimentação, constatando a movimentação do fuso a diferentes velocidades. Na sequência o sistema de aquecimento foi acionado, e a temperatura de 200°C foi configuradora. Após o acionamento a temperatura no display do controlador de temperatura eleva-se até estabilizar em 200°C. Uma pausa de 5 minutos foi feita após o sistema atingir a temperatura configurada com o intuito do calor se espalhar até a zona de compressão. Posteriormente foi inserido material pellet ABS no funil de alimentação resultando na saída de filamento no orifício da matriz.

A fim de testar quais parâmetros de velocidade / temperatura teria um melhor resultado foram levantadas 2 hipóteses para as configurações dos parâmetros, apresentadas na figura 27.

Figura 27: Filamentos extrudados



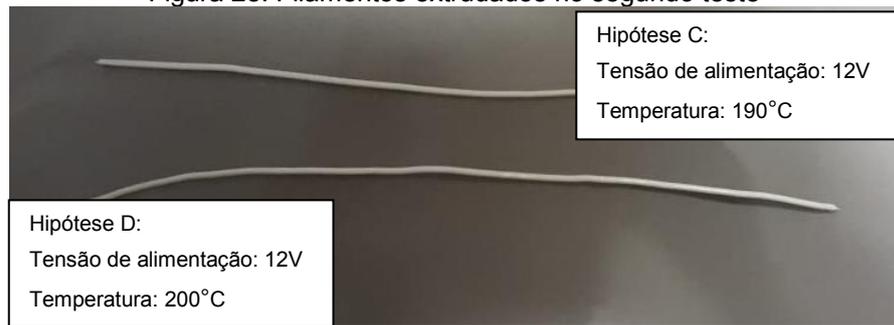
Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que o filamento obteve uma cor escura após o processo de extrusão, foi levantada a hipótese de que a temperatura estaria muito alta a ponto de queimar o filamento. Contudo, foi testado com a temperatura mínima de fusão do material e uma maior velocidade do motor, a fim de deixar o material o menor tempo possível sobe a ação do aquecimento. Mesmo assim não foi possível manter a coloração original da matéria prima.

Por isso, o protótipo foi desmontado para remover todo o resquício de material dos testes anteriores. Para auxiliar na limpeza do tubo foi utilizado uma solução de acetona, que amolece o plástico, facilitando a sua limpeza.

Novos testes foram realizados alimentando o motor com 12V e utilizando uma espécie de guia para o material recém extrudado. Conforme demonstrado na figura 28, o filamento da hipótese C trouxe um resultado excelente na dimensão do filamento, tendo variações dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. Variando entre 1,60 e 1,79mm.

Figura 28: Filamentos extrudados no segundo teste



Fonte: Autoria Própria.

Para obter valores mais concretos foi calculado o grau de dispersão dos valores obtidos através da fórmula do desvio padrão apresentada abaixo.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_A)^2}{n}} \quad (3)$$

Onde:

Σ : Símbolo de somatório. Indica que devem ser somados todos os termos, desde a primeira posição ($i=1$) até a posição n ;

x_i : Valor na posição i no conjunto de dados;

M_A : Média aritmética dos dados;

n : Quantidade de dados.

Foram selecionadas duas amostras de 10cm uma da hipótese C e outra da hipótese D. Com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01mm foram avaliados os diâmetros dos filamentos a cada 1cm das amostras, totalizando 20 medições. OS resultados podem ser observados na tabela 3 apresentada abaixo.

Tabela 3: Valores medidos das amostras

Hipótese C		Hipótese D	
Posição	Diâmetro (mm)	Posição	Diâmetro (mm)
1	1,79	1	1,86
2	1,71	2	1,83
3	1,73	3	1,82
4	1,74	4	1,83
5	1,7	5	1,83
6	1,75	6	1,79
7	1,71	7	2,02
8	1,75	8	2,03
9	1,73	9	1,83
10	1,74	10	2,04
Média Aritimética	1,735	Média Aritimética	1,888
Desvio Padrão C	0,025927249	Desvio Padrão D	0,099532239

Fonte: Autoria própria

Outra dificuldade encontrada durante os testes foi o “empedramento” da matéria prima dentro funil conforme a figura 29, apresentada em seguida.

Figura 29: Matéria prima empedrada



Fonte: Autoria própria.

Durante um dos testes a resistência foi ligada com o funil alimentado. Aguardando a temperatura ideal para ligar o motor. Ao iniciar os testes foi verificado que alguns pedaços da matéria prima se fundiram durante o tempo em que o sistema chegava a temperatura ideal, gerando pedaços maiores que do que o canhão foi projetado para tolerar. Desse modo, ao entrar pedaços muito grandes de matéria prima no canhão causava o travamento do fuso e super aquecimento do motor. Com isso, recomenda-se que a alimentação do funil seja feita por último, após o sistema atingir a temperatura recomendada e o motor ser acionado.

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do protótipo proporcionou a experimentação prática de conceitos aprendidos ao longo do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Englobando desde o estudo da matéria prima a ser extrudada, desenvolvimento do protótipo e aplicação de conceitos de eletrônica e controle.

O protótipo foi efetivamente confeccionado considerando a fabricação mecânica da extrusora, seleção e instalação dos elementos de controle e sensoriamento. A confecção dos elementos mecânicos partiu do estudo do processo de extrusão junto à observação de projetos de extrusoras caseiras que tiveram sucesso na extrusão. Enquanto alguns elementos de instrumentação foram adotados como única alternativa viável, como as resistências de aquecimento, outros contaram com opções exaustivamente analisadas antes da efetiva adoção. A concepção do controle de temperatura contou com diversas versões preliminares, algumas descartadas e outras aprimoradas gradativamente. Aspectos técnicos e comerciais influenciaram na preferência pela compra do controlador PID ao invés de seu desenvolvimento em um microcontrolador.

O campo das análises práticas e teóricas convergiu, como proposto, para o controle do processo de extrusão focado na qualidade do material extrudado. Foram observadas e confirmadas as características do processo, como a forte influência do aquecimento do canhão sobre a matriz e a fraca influência do efeito recíproco.

Testes práticos favoreceram a seleção do conjunto de parâmetros mais adequados para a estabilidade do filamento. Esses mesmos testes possibilitaram a análise de aspectos importantes para o processo, como a limpeza do canhão após a extrusão, condição antes ignorada, que só foi proporcionada pela prática.

Levando-se em conta os aspectos mencionados, bem como os objetivos inicialmente propostos, pode-se concluir que:

- A estrutura foi projetada e construída com sucesso;
- A integração entre os componentes elétricos e eletrônicos foi realizada de maneira satisfatória;

- Os testes realizados com temperaturas entre 190°C e 200°C foram os que alcançaram os melhores resultados;
- O controle do motor através do conversor stepdown se mostrou aceitável. Vale ressaltar o sobreaquecimento ocorrido no motor após períodos entre 30 e 60min de funcionamento contínuo, o que algumas vezes resultou em parada de funcionamento, sendo necessário esperar alguns minutos até que resfriasse para então acioná-lo novamente;
- Foi possível realizar a extrusão de filamentos de diâmetros bem próximos ao sugerido inicialmente e com propriedades físicas um pouco inferiores quando comparados aos filamentos comerciais. Contudo, o aspecto do filamento que mais se afastou do ideal foi a sua linearidade, ficando este com muitas curvas devido ao sistema puxador não ter se demonstrado bom o suficiente.

Portanto, é possível dizer que o trabalho atingiu quase que em totalidade os objetivos propostos, ficando as possíveis melhorias sugeridas para realização em trabalhos futuros, que serão mencionadas logo a seguir.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver um sistema em malha fechada para medição, tração e controle do diâmetro do filamento;
- Avaliar vazão volumétrica de material, eficiência energética do equipamento para diferentes materiais;
- Desenvolver um sistema de resfriamento para a zona de alimentação
- Desenvolver um mecanismo eficiente que tracione o filamento de forma a preservar a sua linearidade.

Citam-se aqui apenas algumas ideias cogitadas durante o desenvolvimento desse protótipo. Basta envolver-se com o processo para perceber que pela sua complexidade é possível pensar em inúmeras alternativas.

9 REFERÊNCIAS

ANLUZ. **Solução em Aquecimento Elétrico para Qualquer Aplicação. Catálogo resistência elétrica tipo coleira.** Disponível em:

<<https://www.anluz.com.br/coleira>>. Acesso em: 21 Setembros 2019.

BRIDGE, Ralph. **Polymer extrusion.** SALS Polymer, 1997.

BRITO, G. F., ARAÚJO, E. M., & DE MELO, T. J. (2012). **Tenecificação do Poli(Ácido Lático) pela Adição do Terpolímero (Etileno/Acrilato de Metila/Metacrilato de Glicidila).** Polímeros Ciência e Tecnologia.

CAMTEC. **Catálogo de Termopares.** Disponível em

<http://camtec.com.br/conteudo/upload/files/camtec_nv.pdf> Acesso em 08 de Fevereiro de 2019

CASA, Furadeiras. **Broca de Madeira.** Disponível em <

<https://casadasfuradeiras.com.br/broca-t-pua-ht-hex-1-4-16x250mm-makita>>

Acessado em 22 de Agosto de 2019.

CAVSTEEL. **Catálogo de Tubos.** Disponível em

<<http://www.cavsteel.com.br/arquivos/tubos.pdf>> Acessado em 15 de Setembro de 2019.

COSTA, G. M. **Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D.** Trabalho de Conclusão de Cuso. Minas Gerais. 2015.

DOMININGHAUS, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.; **Propriedades e aplicações de plásticos:** Editora Springer, 2012.

DUARTE, H. (2014). **Descubra como surgiu a impressora 3D.** Retrieved 05 07,

2018, from Tech Tudo. Disponível em < <http://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2014/04/descubra-como-surgiu-impressora-3d.html>> Acesso em 28

de Maio de 2019.

FARIAS, Rafael; RAUNHEITTE, Luís T. M. **Estudo comparativo entre Servo Motor DC e Motor de Passo.** Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo. 20??.

Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/44509730/Diferenca-Step-x-Servo>>.

Acesso em: 17 de julho de 2018.

FILET, Ana Maria Frattini; SILVA, Flávio Vasconcelos. **Controle de Processos-Material de Apoio.** Acesso Restrito. UNICAMP, 2018.

FERREIRA, M. E., & SILVA, L. F. (2014, Maio 07). **A aplicação das tecnologias de prototipagem rápida na confecção de matrizes táteis**. Boletim de Ciências Geodésicas, 20, pp. 411-423.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., & SCRUCKER, B. (2010). **Additive Manufacturing Technologies**. New York: Springer.

GILES JR., H. F.; WAGNER JR., J. R.; MOUNT III, E. M.; **Extrusion: The Definitive Processing Guide an Handbook**. Estados Unidos da America: Editora William Andrew, Inc., 2005.

GUERRA, W.A. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Recife, 2009.

HAROLD JR., G.; WAGNER, J. R. J. **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook**. 1. ed. [S.l.]: William Andrew, 2005.

HUGHES, B., & WILSON, G. . **3D/additive printing manufacturing: a brief history and purchasing guide**. Gale A Cengage Company , 2015.

KAMINSKI, P. C., & OLIVEIRA, J. H. (2000). **A Prototipagem rápida inserida nas diferentes fases de um projeto como instrumento de inovação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

LEROY Merlin. **Luva de Latão**. Disponível em <https://www.leroymerlin.com.br/luva-latao-roscavel-agua-quente-e-fria-15mm-ou-1-2-ramo_86815330> Acessado em 01 de Outubro de 2019.

RODRIGUES, Luis Felipe Birmann. **Análise do aproveitamento de polímeros recicláveis para obtenção de filamentos para impressora 3D**. Disponível em <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12579/TCCE_EEAPP_EaD_2017_RODRIGUES_LUIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acessado em 20 de Março de 2019.

MERCADO Livre **Controlador de temperatura PID**. Disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-787027904-controlador-temperatura-rex-c100-pid-sensor-rele-40a--_JM> Acessado em 19 de Junho de 2019.

MERCADO Livre. **Motor de vidro elétrico** Disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-903074613-motor-par-vidro-eletrico-mabuchi-12v-8d-universal-esq-e-dir-_JM> Acesso em 29 de Junho de 2019.

MORESI, Eduardo. **Metodologia da Pesquisa**. Disponível em:

<http://ftp.unisc.br/portal/upload/com_arquivo/1370886616.pdf>. Acesso em 20 julho 2018.

SIDACOINOX. **Propriedades das Ligas**. Disponível em <<http://sidacoinox.com.br/tabela-de-propriedades/>> Acessado em 15 de Setembro de 2019.

PETRY, Antonio Carlos. **Conversores CC-CC**. Acesso restrito. Florianópolis. 2012.

SCARPIN, E. L., & BETTONI, M. M. **Extrusora Miniaturizada de polimeros: Confecção, controle e supervisão**. Curitiba.2006.

SOUZA, D., & HUPPES, F. **Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D** Trabalho de conclusão de curso. 2017.

THEODORO, Thais Silva. **Processos Injecao-x-Extrusao-de-Polimeros**. Disponível em <<https://betaeq.com.br/index.php/2016/04/20/processos-injecao-x-extrusao-de-polimeros/>> Acessado em 15 de Agosto de 2018.

TUPY. **Catálogo de Produtos**. Disponível em <<https://tupy.collabo.com.br/pt/catalog/roscaveis-178/plug-sextavado-tupyforged-thr-6939/>> Acessado em 06 de julho de 2019.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida**. Ferramental rápido no processo de desenvolvimento de produto. Máquinas e Metais, v. 401, Jun, 1999.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. 2007.

PINTO, F. D. C. **Sistemas de Automação e Controle**. CST, 2005.

ZAMBALDI, Edimilson. **Controle automatizado de fornos para tratamento térmico em aços**. 2016.