

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATHEUS FISCHER

**ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE
BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS
DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO**

Florianópolis, Dezembro 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

MATHEUS FISCHER

**ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE
BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS
DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia de Mecatrônica do campus Florianópolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Aurélio da Costa Sabino Netto,
Dr. Eng.

Florianópolis, Dezembro 2018

MATHEUS FISCHER

ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO/ MATHEUS FISCHER. – Florianópolis, Dezembro 2018-

65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC
Campus Florianópolis
Engenharia Mecatrônica, Dezembro 2018.

1. Materiais poliméricos. 2. Alta temperatura de extrusão. 3. Impressora 3D. 4. Código Aberto. 5. ABS. 6. PLA. I. Orientador. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Campus Florianópolis. IV. ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO

MATHEUS FISCHER

ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, Dezembro de 2018:

Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.

Orientador

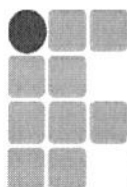
Instituto Federal de Santa Catarina

Diovani Castoldi Lencina, Dr. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

Cassiano Bonin, Dr. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **MATHEUS FISCHER**, matrícula nº **131004317-5**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **ESTUDO PARA READEQUAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D DE BAIXO CUSTO PARA IMPRESSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS DE ALTA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Aurélio da Costa Sabino Netto

Dedico o presente trabalho a Deus e aos meus pais, os quais sempre com muito carinho e dedicação, não mediram esforços para que pudesse realizar meus objetivos.

Em especial também os presentes e futuros professores e alunos do curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Santa Catarina, para que continuem repassando o conhecimento da maneira exemplar como sempre o fizeram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial toda minha família pelo suporte nos momentos de estresse e também ao professor orientador, o qual com algumas pequenas dicas fez o trabalho fluir da melhor maneira possível. Vale ressaltar a ajuda do aluno Gustavo, bolsista do laboratório PFBMat, o qual deu suporte na fabricação das peças.

"A persistência é o caminho do êxito"

Charles Chaplin

RESUMO

Juntamente com o advento da impressão 3D, a qual vem se popularizando no meio doméstico e industrial, surgem materiais poliméricos inovadores que possuem alta temperatura de processamento. Os polímeros usualmente utilizados em impressoras 3D comerciais, que utilizam temperaturas de até 240°C, como PLA (Poliácido Láctico) e ABS (Acrilonitrila butadieno estireno). A disponibilidade de novos filamentos de materiais criou a necessidade do desenvolvimento de impressoras 3D que suportem temperaturas de extrusão até 400°C. A quantidade de máquinas de manufatura aditiva de baixo custo disponíveis possibilita adaptações para aumentar a variedade de materiais poliméricos utilizados, deste modo, neste trabalho realizou-se um estudo sobre as características necessárias para impressão dos materiais de alta temperatura, como por exemplo PEEK. Subdividiu-se a readequação realizada na uma máquina de baixo custo em 4 principais conjuntos, a integração mecânica, onde se realizou a fixação do cabeçote de extrusão, a integração eletroeletrônica, que fez o comando e a aquisição dos dados de temperatura, o *software* que necessitou de pequenas alterações para calibração, e o enclausuramento, onde a máquina foi vedada para diminuir a troca de calor da peça impressa com o ambiente, possibilitando também o controle de temperatura interno. Para a validação da adequação proposta, foram realizados ensaios de impressão para verificação da melhoria da condição de empenamento nos polímeros, PLA e ABS, visto que os polímeros de alta temperatura possuem como maior dificuldade de impressão a condição citada acima. Observou-se que a tendência ao empenamento depende da taxa de expansão do material e o aumento da temperatura da câmara de impressão tem influência na adesão das peças na plataforma de construção da peça.

Palavras-chave: Materiais poliméricos, Alta temperatura de extrusão, Impressora 3D, Código Aberto, ABS, PLA.

ABSTRACT

Along with the advent of 3D printing, which has become popular in the domestic and industrial environment, there are innovative polymer materials that have high processing temperature. The polymers usually used in commercial 3D printers, which use temperatures up to 240°C, such as PLA (Polylactic Acid) and ABS (Acrylonitrile butadiene styrene). The availability of new material filaments has created the need for the development of 3D printers that support extrusion temperatures up to 400°C. The number of inexpensive additive manufacturing machines available enables adaptations to increase the variety of polymer materials used, so a study on the characteristics required for printing the high-temperature materials, as PEEK, was carried out in this thesis. The readjustment performed in a low-cost machine was subdivided in 4 main assemblies, the mechanical integration, where the extrusion head was fixed, the electro-electronic integration, which commanded and acquired the temperature data, the software, that required minor changes for calibration, and the enclosure, where the machine was sealed to reduce the heat exchange of the printed part with the environment, also allowing the internal temperature control. For the validation of the proposed suitability, printing tests were performed to verify the improvement of the warp condition of the polymers, PLA and ABS. It has been observed that the tendency to warp depends on the rate of expansion of the material and the increase of the temperature in the printing chamber influences the adhesion of the parts on the work platform of the part.

Keywords: Polymeric materials, High Extrusion temperature, 3D printer, Open-Source, ABS, PLA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação por temperatura de processamento dos principais termoplásticos	6
Figura 2 – Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.	7
Figura 3 – Comparação dos gráficos de tensão-deformação dos polímeros acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e polietereftercetona (PEEK) . . .	10
Figura 4 – Etapas necessárias para manufatura aditiva	16
Figura 5 – Processo de impressão 3D por Fusão de Filamento Fundido	18
Figura 6 – Quantidade de impressoras comerciais profissionais vendidas de 1998 a 2014	19
Figura 7 – Modelos de impressora F170	20
Figura 8 – Modelo de impressora 3D MakerBot Replicator Z18	21
Figura 9 – Número de impressoras 3D de baixo custo vendidas entre 2007 e 2014	22
Figura 10 – Modelo de impressora Prusa i3 MK3	23
Figura 11 – Modelo de impressora 3D Rise	24
Figura 12 – Impressora 3D Intamsys FUNMAT HT	26
Figura 13 – Impressora 3D HYREL3D SYSTEM 30M	27
Figura 14 – Fluxograma das atividades a serem realizadas	29
Figura 15 – (a) Projeto de código aberto da impressora Prusa i3 (b) Impressora 3D utilizada.	30
Figura 16 – Esquemático elétrico Impressoras de baixo custo	31
Figura 17 – Cabeçote de extrusão de alta temperatura Cobra	33
Figura 18 – Modelo CAD do cabeçote de extrusão de alta temperatura Cobra . .	34
Figura 19 – (a) Modelo de fixação apresentado pelo fabricante (b) Modelo de fixação desenvolvido pelo autor.	35
Figura 20 – Montagem do cabeçote de extrusão na impressora	36
Figura 21 – Esquemático elétrico para comunicação SPI da placa MAX6675 . .	37
Figura 22 – Esquemático elétrico da placa para controle de potência do bico extrusor	39

Figura 23 – (a)Projeto da placa de circuito impresso (b)Placa de circuito impresso desenvolvida	39
Figura 24 – <i>Firmware</i> Marlin para leitura do termistor de 100k Ω	40
Figura 25 – <i>Firmware</i> Marlin para comunicação SPI do termopar tipo K	40
Figura 26 – (a) Alteração dos passos por milímetro no <i>firmware</i> Marlin (b) <i>Firmware</i> Marlin da impressora base	41
Figura 27 – Projeto caixa Impressora 3D de baixo custo	42
Figura 28 – Relação resistência x temperatura dos termistores	43
Figura 29 – Peça padrão utilizada nos testes de impressão	44
Figura 30 – Resultados dos ensaios realizados com polímero PLA	47
Figura 31 – Comparação entre os testes 1 e 5	49
Figura 32 – Relação entre a temperatura da câmara de impressão e a massa da peça para PLA	50
Figura 33 – Resultados dos ensaios realizados com polímero ABS	51
Figura 34 – Resultado comparativo entre os testes 5 e 13	53
Figura 35 – Relação entre a temperatura da câmara de impressão e a massa da peça para ABS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de impressão utilizados nos principais materiais poliméricos	18
Tabela 2 – Parâmetros de impressão fixos	44
Tabela 3 – Ordem e variáveis utilizadas nos testes de impressão com PLA . . .	45
Tabela 4 – Ordem e variáveis utilizadas nos testes de impressão com ABS . .	45
Tabela 5 – Resultado da medição de temperatura próxima da peça teste fabricada em PLA	48
Tabela 6 – Resultado da medição dimensional e de massa das peças ensaiadas em PLA	49
Tabela 7 – Resultado da medição de temperatura próxima da peça teste fabricada em ABS	52
Tabela 8 – Resultado da medição dimensional e de massa das peças ensaiadas em ABS	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D Tridimensional

ABS Acrilonitrila Butadieno Estireno

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CAD *Computer-Aided Design*

CNC Comando Numérico Computadorizado

FDM Deposição de Material Fundido

FFF Fabricação por Filamento Fundido

LOM *Laminated Object Manufacturing*

MA Manufatura Aditiva

MJT *Multi Jet Modeling*

NTC *Negative Temperature Coefficient*

PA Poliamidas

PC Policarbonato

PEEK Poliéter-éter-cetona

PET Politereftalato de etileno

PID Proporcional Integral Derivativo

PLA Políácido Láctico

PTC *Positive Temperatura Coeficient*

PR Prototipagem Rápida

PWM *Pulse Width Modulation*

SLA Estereolitografia

SLS Sinterização Seletiva a Laser

STL *Standard Tessellation Language*

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência elétrica - ohm
€	Euro
\$	Dólar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos Específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Polímeros	5
2.1.1	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	7
2.1.2	Poliácido Láctico (PLA)	8
2.1.3	Poliamidas (PA)	8
2.1.4	Poliéter-éter-cetona (PEEK)	9
2.2	Manufatura Aditiva (MA)	10
2.2.1	Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	16
2.3	Impressoras 3D para Fabricação por Filamento Fundido (FFF)	19
2.3.1	Impressoras 3D profissionais	19
2.3.2	Impressoras 3D <i>desktop</i>	22
2.4	Impressão 3D com materiais poliméricos de alta temperatura	25
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	Seleção de uma Impressora 3D de baixo custo	30
3.2	Definição dos requisitos mínimos	31
3.3	Integração do cabeçote de extrusão de alta temperatura	32
3.3.1	Integração mecânica	34
3.4	Integração eletroeletrônica	36
3.4.1	Sensor de temperatura	36
3.4.2	Aquecimento do bico de extrusão	38
3.5	Integração do software	40
3.6	Enclausuramento	41
3.7	Definição dos testes	42

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Resultado dos testes com impressão em PLA	47
4.2	Resultado dos testes com impressão em ABS	50
5	CONCLUSÃO	55
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	56
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXOS	61
	ANEXO A – DATASHEET IRF3205	63
	ANEXO B – DATASHEET CI4069	65

1 INTRODUÇÃO

Em 1860, com o início da escassez do marfim nos Estados Unidos, crescentes foram as pesquisas por materiais capazes de solucionar de maneira satisfatória sua crescente demanda. O primeiro polímero naquela época, era conhecido como celuloide (Nitrato de celulose), este possibilitou a substituição de uma matéria-prima cara e de difícil extração (GUEDES; FILKAUSKAS, 1997). Desde então os materiais poliméricos vêm evoluindo e hoje são utilizados nas mais diversas aplicações.

Técnicas de processamento cada vez mais aperfeiçoadas devem-se ao progresso do conhecimento de estruturas e propriedades de materiais (AKCELRUD, 2007).

A Prototipagem Rápida (PR) teve seu advento na necessidade da indústria de possuir velocidade no desenvolvimento de produto, onde era realizada principalmente por métodos conhecidos como manufatura subtrativa, a qual se baseia na extração de material de um bloco sólido com o uso de ferramentas especiais, porém o grande desperdício de material e a demora para produção de peças com geometrias complexas, fez com que outros métodos tivessem destaque. O surgimento da Manufatura Aditiva, conhecida popularmente como impressão 3D, a qual apresenta a adição de algum material, normalmente polimérico, sobre uma plataforma de construção, vem provando sua usabilidade tanto para fabricação de protótipos quanto para produção de pequenos lotes (GALANTUCCI et al., 2015).

A Manufatura Aditiva se popularizou no meio doméstico, industrial e acadêmico, principalmente após as patentes do processo de fusão e deposição de material entrarem em domínio, onde surgem projetos de máquinas de código aberto que utilizam o método de fabricação por filamento fundido. Pesquisas sobre novos materiais se destacam e o surgimento de materiais poliméricos inovadores com temperatura de processamento mais altas que os materiais usualmente utilizados em máquinas de impressão Tridimensional (3D) comerciais, como o Políácido Láctico (PLA) e a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), os quais possuem temperaturas de extrusão de, aproximadamente, 200°C e 220°C, respectivamente.

Assim, a disponibilidade de materiais como as PA, o PEEK e o Policarbonato

(PC), criaram a necessidade do desenvolvimento de impressoras que trabalhem adequadamente com estes materiais.

1.1 Justificativa

A indústria atual vem crescendo significativamente, junto com a necessidade de melhoria dos métodos de produção, a influência desse crescimento nas pesquisas e avanços tecnológicos é indiscutível. A indústria 4.0 cria a necessidade de processos de produção adaptáveis a necessidade do consumidor. De acordo com Silva, Filho e Miyagi (2007), “(...) indústria 4.0, é considerada o futuro paradigma da produção. Novas tecnologias devem ser empregadas para integrar máquinas e humanos em cadeias de valor compondo uma rede de entidades(...)”, minimizando o tempo de produção, o desperdício de matéria-prima e consequentemente o custo de produção, como explica Hasan e Reis (2018).

De acordo com Silva e Maia (2014), o conceito de personalização em massa (*mass customization*) vem sendo alterado de forma significativa com o advento da impressão 3D, pois promove a diminuição de custos de artigos personalizados. Para melhor atender as necessidades do meio industrial, do mercado de peças e produtos personalizados, surgem pesquisas para encontrar novos materiais, capazes de superar as características encontradas nos materiais mais comuns utilizados na impressão 3D, como PLA e ABS.

“(...)a indústria aeroespacial cada vez mais recorre às potencialidades dos processos de fabrico aditivo, nomeadamente à tecnologia FDM, para obter peças de alta complexidade e ótimas propriedades mecânicas. Contudo, estas especificações implicam uma inovação nos polímeros depositados, juntamente com um acréscimo no rigor da tecnologia inerente ao processo de deposição destes plásticos e, consequentemente, do custo das peças produzidas.” (MOREIRA, 2016)

Com isso, o surgimento de novos materiais na forma de filamento, como PEEK (Poliéter-éter-cetona), PEI (Polieterimida), PI (Poliimida), PAI (Poliamida-imida), PPS (Polissulfeto de p-fenileno), PPSU (Polifenilsulfona), PPP (Poli-(para-fenileno)) e PA 66 (Poliamida) mais conhecido como Nylon 66. É necessário salientar que em contrapartida a um acréscimo das propriedades mecânicas dos materiais citados, é requerido um aumento significativo da temperatura do extrusor da impressora 3D, já que as temperaturas de processamento são igualmente superiores.

Grande parte das impressoras 3D comerciais possuem cabeçotes de extrusão capazes somente de atingir temperaturas até 240°C, a partir das propriedades térmicas dos materiais citados acima, a análise da temperatura de extrusão necessária para a impressão de cada um, os quais possuem temperaturas de extrusão superiores, podendo atingir até 400°C.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é adaptar uma impressora 3D de baixo custo para impressão de materiais poliméricos de alta temperatura de processamento.

1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Realizar estudo sobre os requisitos para impressão de materiais poliméricos de alta temperatura;
- b) Desenvolver integração mecânica, eletroeletrônica e de *software* para possibilitar a realização de testes de impressão;
- c) Realizar ensaios para validação do sistema desenvolvido;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros

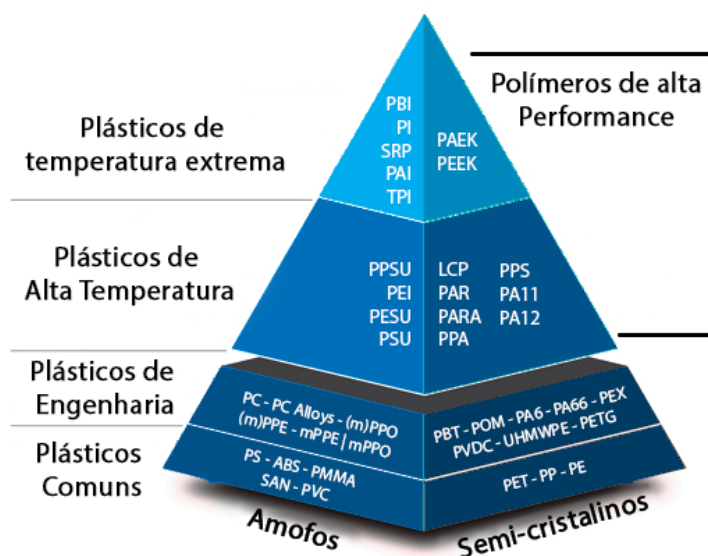
A utilização dos polímeros está diretamente ligada ao desenvolvimento científico e tecnológico da humanidade, destaca-se a invenção do pneu, por Robert William Thompson, onde a escassez de matéria prima fez surgir a borracha sintética, em meados do século XX, gerando a necessidade de produção em larga escala (HARADA; WIEBECK, 2005).

Segundo Bathista e Silva (2003), polímero é uma palavra utilizada para classificar moléculas orgânicas formadas por muitas unidades moleculares repetidas, denominadas meros. “poli” significa muitos e “mero”, partes, logo a palavra polímero significa muitas partes. Também podem ser classificados em função da fusibilidade, grupos funcionais constituintes, estrutura molecular, aplicações, entre outras. A fusibilidade dos polímeros relaciona-se com as características termoplásticas ou termorrígidas (PITT; BOING; BARROS, 2011).

Os plásticos podem ser caracterizados também pela linearidade, ou não de suas moléculas. Onde os polímeros termoplásticos, possuem as cadeias de moléculas em forma linear ou ramificada e podem ser moldados e reprocessados sucessivamente, como por exemplo o polietileno, poliestireno, PVC, entre outros. Por outro lado, os polímeros termorrígidos, ao serem colocados sob temperatura próxima a temperatura de fusão não possuem a natureza de serem moldados quando ultrapassam essa temperatura (BATHISTA; SILVA, 2003).

Pela facilidade de se reprocessar, os termoplásticos são amplamente utilizados na indústria, principalmente no processo de injeção, porém o grande crescimento da tecnologia de impressão 3D, faz com que novas tecnologias e materiais sejam disponibilizados para atender as novas necessidades. A empresa Polymers International Australia (2018) separa os principais polímeros utilizados por temperatura de processamento, seguindo a pirâmide da Figura 1.

Figura 1 – Classificação por temperatura de processamento dos principais termoplásticos



Fonte: Adaptado de Polymers International Australia (2018).

Os polímeros conhecidos como polímeros de engenharia e de alta temperatura, segundo Harada e Wiebeck (2005), podem apresentar as seguintes características:

- Módulo de elasticidade elevado, mesmo a temperaturas relativamente elevadas;
- Boa resistência ao impacto;
- Boa resistência a tração;
- Boa resistência a flexão;
- Estabilidade dimensional a alta temperatura;
- Resistência a degradação térmica e a oxidação;
- Resistência a reagentes e solventes;
- Transparência à radiação eletromagnética;

Os plásticos de engenharia geralmente possuem:

- Temperatura de distorção térmica acima de 100 °C;
- Módulo de elasticidade acima de 1961 MPa;

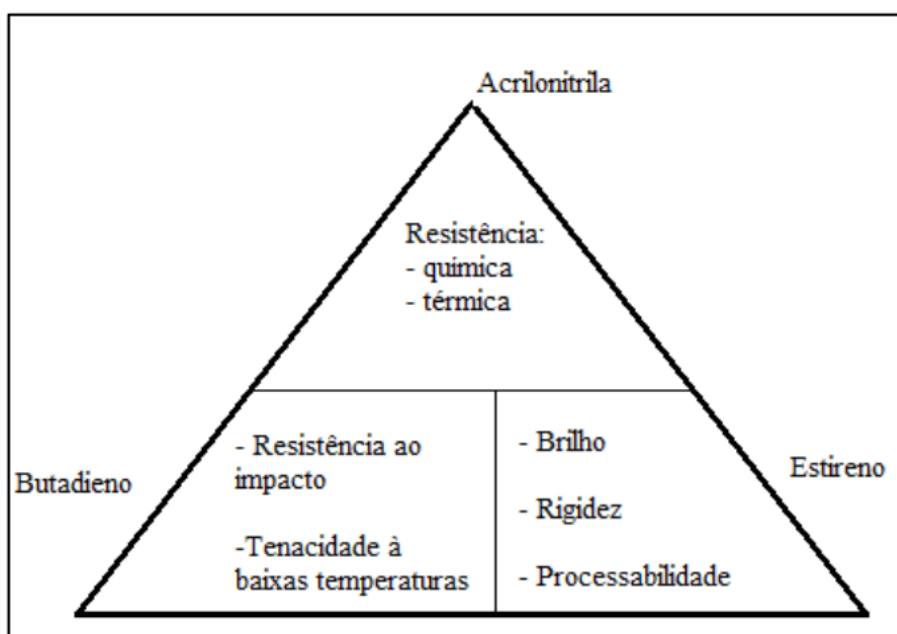
- Resistência de tensão a tração acima de 49 MPa;

A principal matéria-prima utilizada nos equipamentos de impressão por FFF são resinas termoplásticas com temperatura de extrusão entre 180°C e 270°C, entre eles estão o ABS e o PLA. (ABREU, 2015)

2.1.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O ABS é um polímero termoplástico composto de 3 monômeros diferentes, acrilonitrila, butadieno e estireno. Simielli e Santos (2010) afirmam que a concentração de cada um dos monômeros afeta as propriedades físicas e químicas da seguinte forma:

Figura 2 – Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.



Fonte: (SIMIELLI; SANTOS, 2010)

Albuquerque (2014) explica que, inicialmente, o ABS foi o material polimérico mais utilizado nas impressoras 3D de baixo custo, principalmente por suas boas propriedades mecânicas, o que possibilita alcançar diversas áreas de aplicação da indústria e no uso doméstico.

O ABS é um dos mais utilizados devido a sua resistência química e propriedades mecânicas, além da facilidade de extrusão em elevadas temperaturas. (ABREU, 2015)

O polímero tem uma tendência natural ao empenamento quando utilizado na Manufatura Aditiva (MA) por Fusão e Deposição de Material, devido a isso, Salinas (2014) recomenda a utilização de uma plataforma de impressão aquecida, a qual pode-se utilizar até 120°C, este autor também explica que o polímero, quando aquecido, libera componentes considerados tóxicos em grandes quantidades, como cianeto de hidrogênio e monóxido de carbono.

2.1.2 Políácido Láctico (PLA)

O Políácido Láctico, ou PLA, como é mundialmente conhecido, é um termoplástico, biodegradável, pertence a família dos poliésteres alifáticos. É fabricado principalmente de fontes renováveis, como milho e cana-de-açúcar (AURAS et al., 2011).

Os filamentos de PLA possuem também boas propriedades mecânicas, mas não comparadas ao ABS, porém a facilidade de impressão o fazem, atualmente, ser considerado o material mais utilizado atualmente nos processos de manufatura por Fabricação por Filamento Fundido (FFF), principalmente nas impressoras 3D de baixo custo e de código aberto, superando o ABS. (SALINAS, 2014).

Neste caso o material não possui uma tendência ao empenamento, ou seja, não necessita de uma mesa aquecida para possibilitar a impressão, facilitando também sua utilização, principalmente para máquinas de baixo custo. Entretanto é citado que o aumento da temperatura da plataforma de construção melhora a adesão na mesa, contribuindo também para a condição de empenamento. (SALINAS, 2014).

2.1.3 Poliamidas (PA)

As Poliamidas (PA), possuem estrutura cristalina e atualmente são os polímeros mais utilizados pela tecnologia de manufatura aditiva por sinterização a laser. O material mais utilizado da família das Poliamidas é o Nylon, entretanto para impressoras 3D por extrusão, porém de grande valia quando o projeto necessita de um material com elevada resistência ao desgaste e a corrosão, o nylon também possui como principais características, elevada dureza e resistência mecânica. Suas principais aplicações variam desde protótipos e modelos funcionais até peças de engenharia aeroespacial (3DSYSTEMS, 2018).

Trisciuzzi (2018) explica que a resistência a dissolução por acetona, pode ser considerada uma vantagem em algumas aplicações, assim como a grande aderência entre camadas, aumentando a estanqueidade do material. A faixa de temperatura de processamento do Nylon está entre 240 e 270°C e por ser considerado flexível, a principal dificuldade de impressão é o empenamento e a falta de adesão na plataforma. Vale ressaltar também que este material necessita de uma mesa aquecida. (MARTINS, 2016).

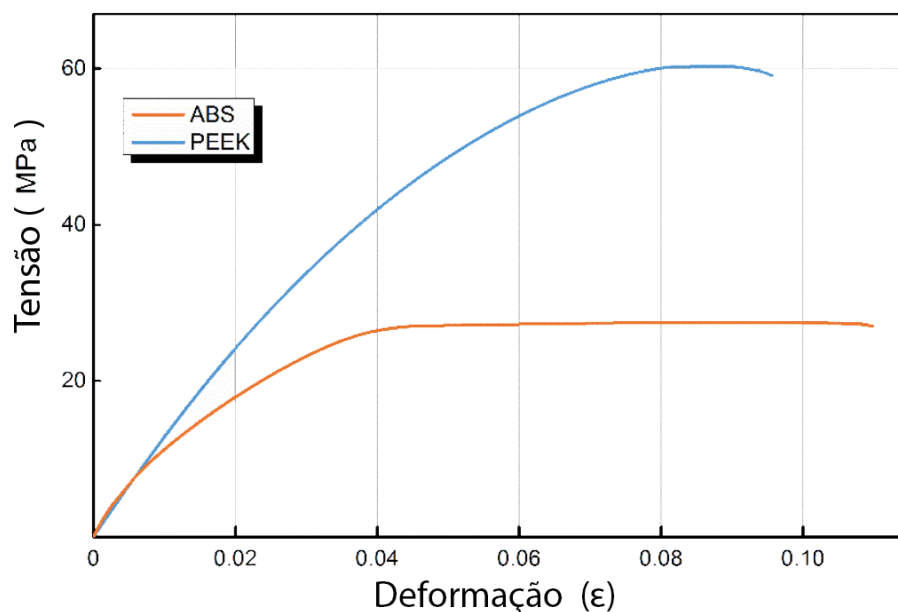
2.1.4 Poliéter-éter-cetona (PEEK)

É um polímero termoplástico semi-cristalino que possui excelentes propriedades mecânicas e por sua elevada resistência a fadiga, mesmo a altas temperaturas, suas aplicações tem crescido significativamente como material de alta performance. Entretanto, por possuir elevada resistência térmica, possui também alta temperatura de impressão, apresentando uma dificuldade extra no processo de impressão por manufatura aditiva (ZHANG et al., 2004).

De acordo com Jones, Leach e Moore (1985), a temperatura de fusão do PEEK é de aproximadamente 334°C, entretanto utiliza como temperatura de processamento, entre 370° e 400°C, este autor refere-se ao PEEK como material que possui alta resistência mecânica em temperaturas elevadas e também cita alguns estudos que utilizam fibras de carbono incorporadas ao polímero para melhorar ainda mais as propriedades.

Comparado com o ABS, em testes realizados por Wu et al. (2015) pode-se ver uma grande diferença na resistência a tração dos materiais, demonstrados na Figura 3.

Figura 3 – Comparação dos gráficos de tensão-deformação dos polímeros acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e polietereetercetona (PEEK)



Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2004)

2.2 Manufatura Aditiva (MA)

Segundo Cunha (2013), a Prototipagem Rápida (PR) era o termo utilizado, inicialmente, para a obtenção de protótipos por técnicas aditivas, porém o avanço da tecnologia possibilitou utilizá-la para obtenção da versão final de produtos, prontos para comercialização. Com a regulamentação pela ASTM (2012), houve a mudança da nomenclatura utilizada para “Manufatura Aditiva”, entretanto hoje o termo mais utilizado para se referir ao processo é impressão 3D.

De acordo com DEURSEN e BERNARDO (2013) a Manufatura Aditiva teve como marco inicial, a criação do processo de Estereolitografia (SLA), o qual originou-se nos Estados Unidos da América, em 1984, quando Charles “Chuck” Hull obteve êxito ao realizar a cura de resinas fotossensíveis a luz ultravioleta, estas se tornam sólidas em contato com este tipo de luz. A impressão 3D surgiu quando se movimentou a base de impressão no eixo Z, assim podendo ser feita a cura de uma nova camada de impressão. Este processo possibilitou a criação de objetos em três dimensões vindos de um arquivo digital. Assim que Charles Hull criou a empresa 3D Systems em 1986, a tecnologia se difundiu rapidamente, tornando-se conhecida mundialmente

(3DSYSTEMS, 2018).

Com a crescente necessidade do consumidor de se obter produtos novos, com novas funcionalidades, fez com que a indústria, de modo geral, avançasse na tecnologia e nos métodos de produção atuais. A manufatura aditiva surgiu com a necessidade de gerar velocidade no desenvolvimento de novos produtos, visto que quando o produto se encontra nas fases de produção e comercialização, alterações na funcionalidade ou no design normalmente implicam em elevados custos de implementação (WOHLERS, 2009).

Wohlers (2009) estima que estas alterações aumentem aproximadamente uma ordem de grandeza entre duas fases significativas do ciclo de desenvolvimento de um produto, quer dizer que se uma alteração é realizada quando o produto já está em fase de produção, isto acarretará em um custo cem vezes superior, ao que teria se o projeto fosse corrigido na fase de prototipagem e ensaios.

Os processos de manufatura atuais vêm inovando para não somente produzir da forma mais rápida possível, diminuindo tempo de produção, mas também está se preocupando com as pessoas e o planeta. Com isso o termo manufatura sustentável define de forma correta o que a indústria deve procurar em um futuro próximo. Uma infraestrutura sustentável, pode ser alcançada a partir de processos que utilizem matérias primas renováveis e biodegradáveis. O PLA, polímero mais utilizado na impressão 3D por Fabricação por Filamento Fundido (FFF), já é biodegradável e produzido a partir de fontes renováveis e de acordo com Casagrande (2013), o processo citado quase não gera desperdícios de matéria-prima, atendendo os requisitos da indústria.

De acordo com Schwab (2017), em seu livro *The Fourth Industrial Revolution*, são quatro as principais alterações esperadas para um futuro próximo na indústria em geral :

- Alterações nas expectativas dos clientes;
- Produtos mais inteligentes e mais produtivos;
- Novas formas de colaboração e parcerias;
- A transformação do modelo operacional e conversão em modelo digital;

A redução do número de etapas de projeto e processos de fabricação de um produto é considerado uma das maiores vantagens do processo de Manufatura Aditiva, pois diminui drasticamente o tempo de desenvolvimento de produto. Utilizando meios convencionais de fabricação, produzir uma única peça que possui geometrias complexas, ou até mesmo, superfícies não regulares, dependem do maquinário e ferramental necessários, que podem tornar a peça inviável, ou até mesmo impossível de ser fabricada. A manufatura aditiva possibilita a fabricação da peça e possivelmente diminui o tempo necessário para produção (GIORDANO; ZANCUL; RODRIGUES, 2016).

Conforme a norma reguladora dos termos e processos de manufatura aditiva, criada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), se divide a fabricação por manufatura aditiva em sete principais processos, entre os quais estão citados (ASTM, 2012):

- Impressão 3D por Jato de Tinta ou *Multi Jet Modeling* (MJT): o qual tem como princípio a deposição de um líquido aglutinante em um material em forma de pó.
- Impressão com energia diretamente depositada: onde uma grande quantidade de energia é utilizada para fundir o material enquanto é depositado sobre a mesa;
- Impressão com extrusão de material: processos mais utilizados hoje em dia, como o de Deposição de Material Fundido (FDM) e o método de Fabricação por Filamento Fundido (FFF), onde um material em forma de filamento é fundido e depositado sobre uma plataforma;
- Impressão por jato de material: processo no qual gotículas de material de construção são depositadas sobre uma base.
- Impressão por fusão de material em pó: melhor se encaixa neste processo, a tecnologia de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), neste caso é utilizado energia térmica para fundir regiões de um pó depositado anteriormente sobre a mesa;
- Impressão por laminação de material ou *Laminated Object Manufacturing* (LOM): processo realizado a partir da colagem de folhas de material, camada por camada, para formar objetos tridimensionais;

- Impressão por fotopolimerização: processo onde um polímero líquido dentro de um recipiente é curado seletivamente utilizando a fotopolimerização.

Junior, Junior e Neto (2007) também citam as principais técnicas de prototipagem rápida, entretanto, no Quadro 1, o mesmo traz um diferencial, que são as características e a comparação entre as técnicas mais difundidas e utilizadas na época.

Quadro 1 – Características dos principais métodos de manufatura aditiva

Processo/Característica	SLA	SLS	LOM	MJT	FDM
Variedade de materiais	Pequena	Grande	Pequena	Média	Média
Translucidez	Sim	Não	Não	Não	Sim
Qualidade Superficial	Regular	Boa	Regular	Boa	Regular
Pós-acabamento Superficial	Regular	Boa	Baixa	Boa	Regular
Precisão	Excelente	Boa	Baixa	Boa	Regular
Resistência ao impacto	Regular	Boa	Baixa	Baixa	Boa
Resistência a flexão	Baixa	Excelente	Baixa	Baixa	Excelente
Custo do protótipo (Brasil)	Alto	Médio	Alto	Médio	Médio
Pós-processo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Pós-cura	Sim	Não	Não	Não	Não

Fonte: Adaptado de Junior, Junior e Neto (2007)

Wohlers e Caffrey (2015) separam as impressoras 3D em dois principais grupos, profissionais e *desktop*, e são categorizadas pelo custo de aquisição, impressoras 3D profissionais tem custo superior a, aproximadamente, R\$19000, e as impressoras 3D *desktop* apresentam custos inferiores a este valor. De acordo com Abreu (2015), as impressoras 3D profissionais (industriais) tem como principais características:

- Preço: existe uma grande variedade de aplicações, as quais afetam significativamente o custo dessas impressoras, alguns modelos se aproximam dos 90 mil euros.
- Tamanho: impressoras deste tipo estão disponíveis em tamanhos variados, pesando desde 30 a 150kg, algumas impressoras podem pesar mais de mil quilos, como a 3D Systems Phenix PXL, a qual pesa, aproximadamente, 5000kg.
- Tecnologia: podem variar desde SLS, FDM, SLA, PolyJet, entre outras, variando muito com o fabricante.

- Volume de construção: esta especificação é o que define o tamanho possível de se imprimir, nas impressoras 3D profissionais há uma grande variedade de volumes.
- Materiais: a disponibilidade de materiais depende do fabricante da máquina, geralmente as impressoras 3D profissionais possuem uma gama maior de materiais possíveis de imprimir.
- Software: estas apresentam em sua maioria, softwares próprios do fabricante, como por exemplo 3D systems, Geomagic e Stratasys Object Studio.
- Resolução: aqui se define a qualidade das peças a serem produzidas, a Stratasys Object1000 possui resolução de 16 μ m.

Já os projetos de baixo custo, ou como Wohlers e Caffrey (2015) chamam, Impressoras 3D *desktop*, onde os fatores cruciais são preço e facilidade de aprendizado, geralmente seguem estas principais características (Xometry, 2015):

- Preço: o custo destes equipamentos variam conforme o fabricante, todavia, pode-se notar uma queda ao longo dos últimos anos, existem impressoras como as de código aberto, que diminuíram seus preços e disponibilizaram o projeto para a comunidade, impressoras como a Prusa i3 pode ser comprada por \$1000, contudo ainda existem alguns modelos mais baratos.
- Tamanho: também possuem um tamanho variado, entretanto mais limitado que as impressoras 3D profissionais.
- Tecnologia: por possuir baixo grau de complexidade, a maioria das impressoras 3D de baixo custo utilizam o processo de fabricação por filamento fundido.
- Volume de construção: comparado as impressoras profissionais, possuem o volume de trabalho bem reduzido, raramente ultrapassam as dimensões de 254 x 254 x 254mm.
- Materiais: Os principais materiais utilizados são PLA e ABS, porém são comercializados outros tipos de filamento, como Nylon, PETG, Ninja Flex, PVA, entre outros.

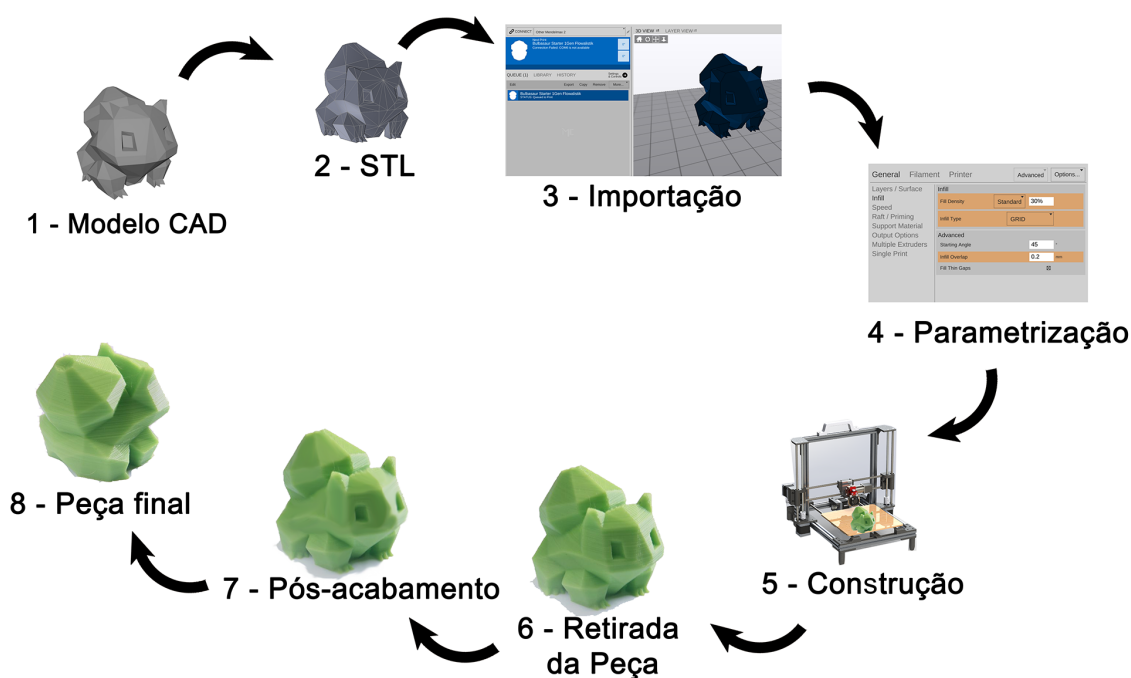
- Software: necessitam de uma simplicidade maior e algumas ainda utilizam softwares de código aberto.
- Resolução: frequentemente, a resolução de uma máquina de baixo custo atinge no máximo até 0,1mm.

Entendendo um pouco da história, da definição e das características dos processos de manufatura aditiva, Gibson, Rosen e Stucker (2014) simplificaram e definiram oito etapas necessárias para se fabricar uma peça utilizando os métodos citados acima. Demonstrados de maneira ilustrativa também na Figura 4.

1. Modelamento CAD: Para todos os processos de manufatura aditiva é necessário um modelo em 3D, realizado em praticamente qualquer software CAD.
2. Conversão para *Standard Tessellation Language* (STL): STL é um formato de arquivo, o qual quase todas as máquinas de manufatura aditiva suportam, este arquivo transporta todas as informações das superfícies externas do modelo CAD, quase todos os softwares CAD hoje em dia conseguem exportar neste arquivo.
3. Importação do arquivo STL para a máquina de MA: Nesta etapa o arquivo é importado para a máquina de manufatura aditiva, onde pode-se realizar alguma manipulação do objeto, como tamanho ou orientação.
4. Parametrização da máquina de MA: Esta é considerada uma etapa crucial, onde se definem os parâmetros que serão utilizados pela máquina, os quais influenciam diretamente na qualidade da peça final, como temperatura de impressão, temperatura da base, no caso das máquinas de FDM, velocidades e principalmente os parâmetros utilizados na peça, como preenchimento e espessura de camada.
5. Construção da peça: Esta etapa costuma ser completamente automatizada, sem a necessidade de nenhuma intervenção do operador, neste ponto a peça é "impressa", ou seja, construída.
6. Retirada da peça pronta: Finalizando a construção da peça, a mesma esta pronta para ser retirada, é necessário, neste momento, alguma interação com a máquina, a qual pode estar quente, por isso sempre essencial ter cuidado.

7. Pós-acabamento: Dependendo da aplicação da peça final, pode ser necessário algum tratamento especial após a impressão, para isso pode-se precisar de alguns cuidados especiais e principalmente experiencia.
8. Aplicação: Aqui a peça esta pronta para ser utilizada.

Figura 4 – Etapas necessárias para manufatura aditiva



Fonte: Acervo Pessoal

2.2.1 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

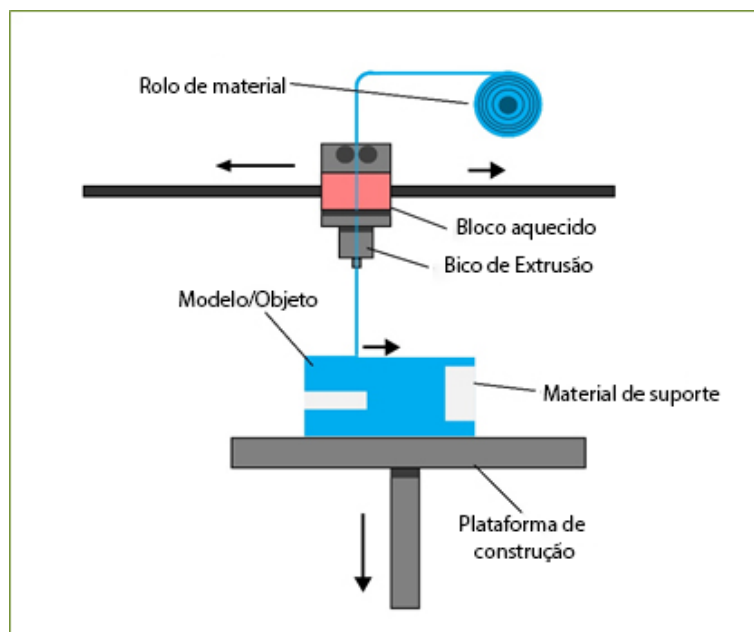
O processo de Deposição de Material Fundido, mais conhecido como Fused Deposition Modeling (FDM), teve sua patente registrada no ano de 1989, por Scott Crump. O aparato de Scott é descrito por Souza (2016) como uma plataforma capaz de se movimentar em duas coordenadas, X e Y, onde um bico extrusor aquecido recebe um material em forma de filamento e o deposita sobre a plataforma, ressalta também que o princípio básico da impressão em 3 dimensões são as camadas construtivas, utilizando a sobreposição de camadas até que a peça esteja finalizada.

Aguiar et al. (2014) compara, de maneira mais simples, o método de impressão 3D por FDM com uma impressora de jato de tinta, para impressão 2D, entretanto utilizando uma pistola de cola quente, ao invés de um cartucho de tinta, e ainda acrescenta que para se construir objetos tridimensionais é necessário adicionar um terceiro eixo para permitir a criação das camadas.

Com a expiração da patente de Scott, em meados dos anos 2000, surgiu uma grande quantidade de impressoras 3D de código aberto, principalmente por possuírem uma simplicidade maior que a estereolitografia, ou seja, se tornaram disponíveis para o público geral e rapidamente se difundiram entre as instituições de ensino e entusiastas da tecnologia. Deste modo, surgiu o processo de Fabricação por Filamento Fundido, (*Fused Filament Fabrication - FFF*), a nova nomenclatura surge pois a modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM), em inglês, *Fused Deposition Modeling*, é um termo registrado, mesmo após a expiração da patente. Portanto, hoje o método mais utilizado em impressoras 3D de uso pessoal é o processo de fabricação por filamento fundido, conhecido também por FFF. (AGUIAR et al., 2014; ABREU, 2015).

Baseia-se na deposição de camada por camada de filamentos feitos de resina termoplástica extrudadas por um bico aquecido, frequentemente utiliza-se uma matriz em forma de furo circular, com movimentações nos eixos X e Y. Este processo se assemelha a criação de enfeites para confeitos, onde é utilizado um saco de confeitar e uma matriz de extrusão em formatos variados. (FERNANDES; MOTA, 2016). A Figura 5 ilustra os princípios citados acima.

Figura 5 – Processo de impressão 3D por Fusão de Filamento Fundido



Fonte: Adaptado de *Additive Manufacturing Research Group (2018)*

Este método utiliza como matéria-prima um polímero termoplástico em forma de filamento, o qual normalmente possui entre 1,75mm e 3mm de diâmetro. Por suas facilidades de impressão, citados anteriormente estão o ABS e o PLA, os polímeros mais utilizados em impressoras 3D de baixo custo. Como matéria-prima se utiliza também o PETG, a PA e o PEEK, que são considerados polímeros de engenharia e de alta temperatura.

Estes materiais possuem propriedades térmicas diferentes sendo assim, citados na Tabela 1, estão os dados de temperatura do bico extrusor e temperatura da base aquecida necessárias para o processamento pelo método de fabricação por filamento fundido.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão utilizados nos principais materiais poliméricos

Materiais	Temperatura do bico Extrusor	Temperatura da base aquecida
PLA	190–220°C	45–60°C
ABS	220–250°C	95–110°C
PETG	230–250°C	75–90°C
PA	220–270°C	70–90°C
PEEK	360–400°C	110–130°C

Fonte: Adaptado de *Simplify 3D (2018)*

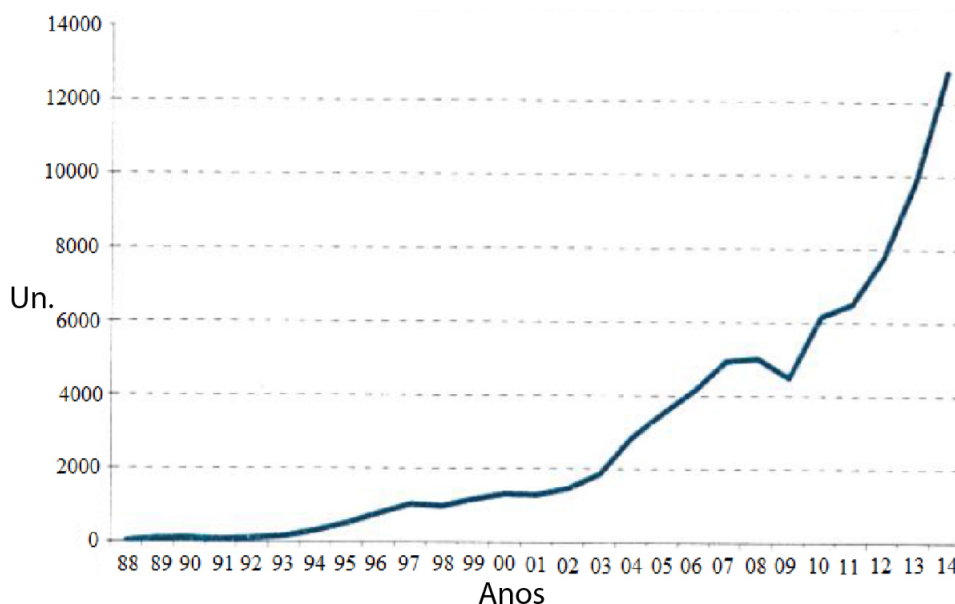
2.3 Impressoras 3D para Fabricação por Filamento Fundido (FFF)

Retratadas nesta seção estão as principais máquinas de impressão 3D, comerciais e de código aberto, que utilizam o processo de FFF/FDM. Para melhor compreender a variedade de impressoras e as necessidades de uma máquina de manufatura aditiva, inicia-se explanando um pouco sobre as características das impressoras 3D profissionais que utilizam o processo FFF.

2.3.1 Impressoras 3D profissionais

A quantidade de máquinas disponíveis no mercado, diminuem a distância entre o consumidor e o fabricante, aumentando a quantidade de impressoras vendidas, e consequentemente, o acesso à tecnologia se torna economicamente viável, Wohlers e Caffrey (2015) representam em forma de gráfico, disposto na Figura 6, a quantidade de impressoras comerciais vendidas por ano desde 1988.

Figura 6 – Quantidade de impressoras comerciais profissionais vendidas de 1998 a 2014



Fonte: (WOHLERS; CAFFREY, 2015)

As principais impressoras profissionais que utilizam a tecnologia de FDM/FFF disponíveis no mercado, se encontram entre estes dois principais fabricantes, a Stratasys, detentora do registro de nome do processo FDM, e a Makerbot. Na sequência estão relacionadas as principais impressoras com tecnologia FDM/FFF de cada fabricante.

- **Stratasys:**

Este modelo de máquina de manufatura aditiva da empresa Stratasys, possui 3 principais variantes, entre elas, a F170, F270 e F370. Apontados a seguir estão as características do modelo F170. (Stratasys, 2018).

- Dimensões da máquina: 1626 x 864 x 711mm e 227kg;
- Mínima espessura de camada: 0,127mm;
- Precisão: 0,200mm;
- Materiais disponíveis no fabricante: PLA, ABS-M30, ASA, TPU 92A;
- Volume de construção: 254 x 254 x 254mm
- Preço: Aproximadamente \$18000

Figura 7 – Modelos de impressora F170



Fonte: (Stratasys, 2018)

- **MakerBot:**

As impressoras desta empresa possuem um público alvo voltado para pequenas empresas, a máquina selecionada é a MakerBot Replicator Z18. De acordo com o fabricante (MakerBot, 2018), as principais características desta impressora são:

- Dimensões da máquina: 493 x 565 x 861mm e 41kg;
- Mínima espessura de camada: 0,1mm;
- Precisão: 0,110mm;
- Materiais disponíveis no fabricante: PLA e ABS;
- Volume de construção: 254 x 254 x 254mm
- Preço: Aproximadamente R\$53000

Figura 8 – Modelo de impressora 3D MakerBot Replicator Z18



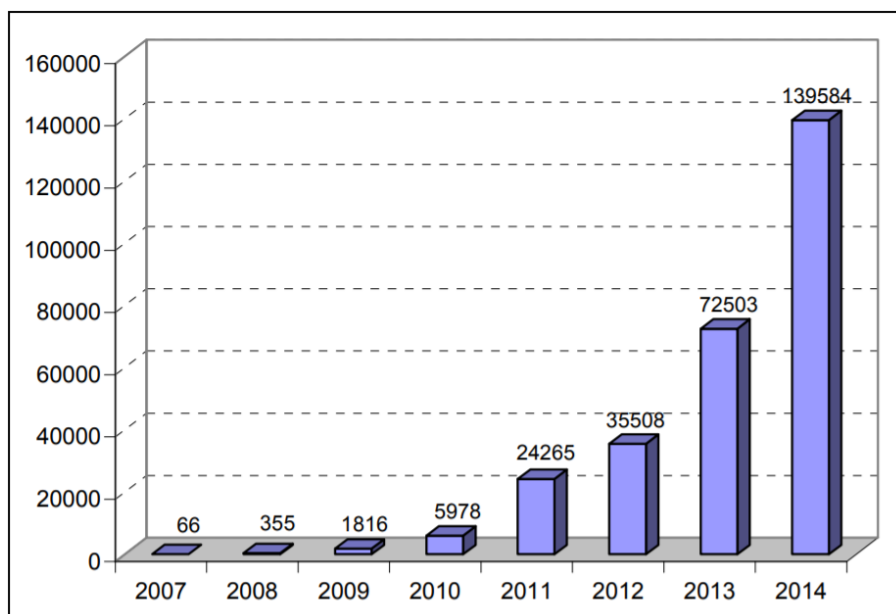
Fonte: (MakerBot, 2018)

2.3.2 Impressoras 3D *desktop*

Visto o grande avanço da tecnologia de manufatura aditiva, em especial o processo de fabricação por filamento fundido tem se tornado cada vez mais baratos, retrata-se a seguir o conceito inicial desta tecnologia, onde DEURSEN e BERNARDO (2013), com o livro *Theory of Self-Reproducing Automata*, deu origem ao conceito de máquinas auto-replicáveis. Entretanto, Sells (2009) explica que Adrian Bowyer, criador do projeto RepRap (**Replicating Rapid-prototyper**), iniciou o projeto com o objetivo de levar as máquinas de prototipagem rápida para dentro das casas, para isso desenvolveu primeira máquina capaz de se auto replicar, as quais conseguem fabricar peças para sua própria utilização ou para construção de outra igual, de maneira simples e fácil de se montar.

Wohlers e Caffrey (2015) notaram um grande aumento na venda de impressoras 3D de baixo custo, principalmente após 2009. Demonstra-se pela Figura 9 um crescimento de 92,5%, comparando os anos de 2014 e 2013.

Figura 9 – Número de impressoras 3D de baixo custo vendidas entre 2007 e 2014



Fonte: (WOHLERS; CAFFREY, 2015)

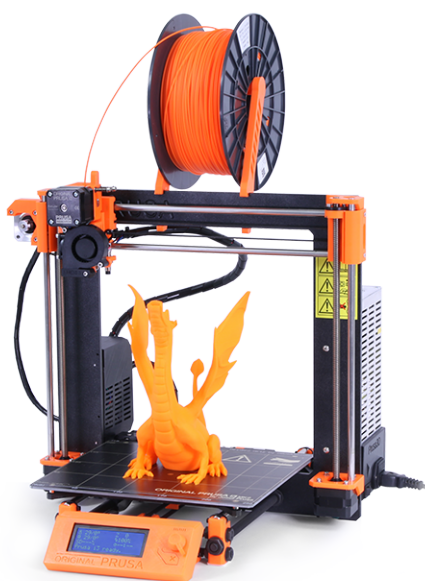
Adentrando os fabricantes destas máquinas, destacam-se principalmente a empresa Prusa Research e a 3DRise, as quais possuem impressoras com preços relativamente acessíveis, os modelos apresentados a seguir se enquadram nos conceitos de impressora 3D *desktop*, e utilizam peças fabricadas com impressão 3D em sua estrutura.

- **Prusa Research:**

Este modelo de máquina de manufatura aditiva, conhecido como Prusa i3 MK3, da empresa Prusa Research, possui as seguintes características (Prusa Research, 2018):

- Dimensões da máquina: 500 x 550 x 400mm e 7kg;
- Mínima espessura de camada: 0,05mm;
- Precisão: 0,200mm;
- Materiais disponíveis no fabricante: PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, entre outros;
- Volume de construção: 250 x 210 x 210mm
- Preço: Aproximadamente \$1000

Figura 10 – Modelo de impressora Prusa i3 MK3



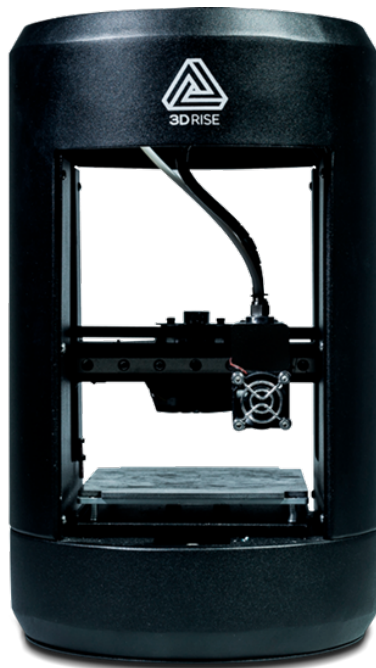
Fonte: (Prusa Research, 2018)

- **3DRise:**

Esta empresa nacional possui somente um modelo de máquina de impressão por FFF, sendo assim, utilizou-se deste para analisar as características da impressora (3DRise, 2018), como demonstrado abaixo.

- Dimensões da máquina: 275 x 260 x 500mm e peso 6kg
- Mínima espessura de camada: 0,1mm;
- Precisão: 0,200mm;
- Materiais disponíveis no fabricante: PLA;
- Volume de construção:
 - * Diâmetro: 205mm
 - * Altura: 330mm
- Preço: Aproximadamente R\$2500,00

Figura 11 – Modelo de impressora 3D Rise



Fonte: (3DRise, 2018)

2.4 Impressão 3D com materiais poliméricos de alta temperatura

De acordo com Gardner et al. (2016), a principal dificuldade para se imprimir com materiais que exigem uma alta temperatura de processamento, é manter a temperatura da peça durante a impressão. Impressoras 3D industriais possuem seu volume de impressão dentro de uma câmara aquecida, algo que o autor compara com um forno convencional.

Swanson et al. (2007) patenteou, em 2007, um aparato descrito como uma impressora 3D onde os equipamentos de movimentação, como motores e controladores, estão isolados do volume de impressão, assim o limite de temperatura da câmara interna, não seria a temperatura máxima de operação dos componentes de movimentação.

No mercado de manufatura aditiva utilizando o processo de FFF, poucas são as que trabalham com impressão de alta temperatura, contudo, foram encontrados dois modelos que possibilitam o processamento destes materiais, as quais, de acordo com Wohlers e Caffrey (2015), se encontram no grupo das impressoras 3D profissionais.

• INTAMSYS FUNMAT HT 3D Printer:

As principais características desta impressora, de acordo com INTAMSYS CO. (2018), estão listadas a seguir.

- Dimensões: 540mm x 500mm x 650mm e 43kg
- Volume de impressão: 260mm x 260mm x 260mm
- Plataforma de construção: Alumínio e Vidro
- Mínima espessura: 0,05mm
- Materiais suportados: PEEK, ULTEM, PPSU, PA/CF, PC, PC Alloys, PA, ABS, Carbon Fiber-Filled, Metal-Filled, Fiberglass-Filled, ASA, PETG, ESD-Safe, HIPS, TPU, PLA, PVA, etc.
- Temperatura máxima da câmara: 90°C
- Temperatura máxima do extrusor: 450°C
- Temperatura máxima da plataforma de construção: 150°C

- Preço: Aproximadamente \$6500

Figura 12 – Impressora 3D Intamsys FUNMAT HT

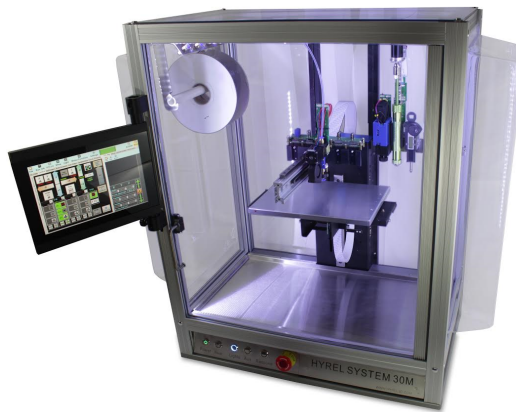


Fonte: (INTAMSYS CO., 2018)

- **HYREL 3D SYSTEM 30M**

- Dimensões: 970mm x 410mm x 790mm e 23kg
- Volume de impressão: 225mm x 200mm x 200mm
- Plataforma de construção: Alumínio e Vidro
- Mínima espessura: 0,025mm
- Materiais suportados: Plasticine, Sugru, Silicone RTV, porcelain, ABS, PLA, Nylon, NinjaFlex, FilaFlex.
- Temperatura máxima da câmara: 55°C
- Temperatura máxima do extrusor MK1-450: 450°C
- Temperatura máxima da plataforma de construção: 75°C
- Preço: Pode variar entre \$4000 e \$7000, dependendo dos opcionais.

Figura 13 – Impressora 3D HYREL3D SYSTEM 30M



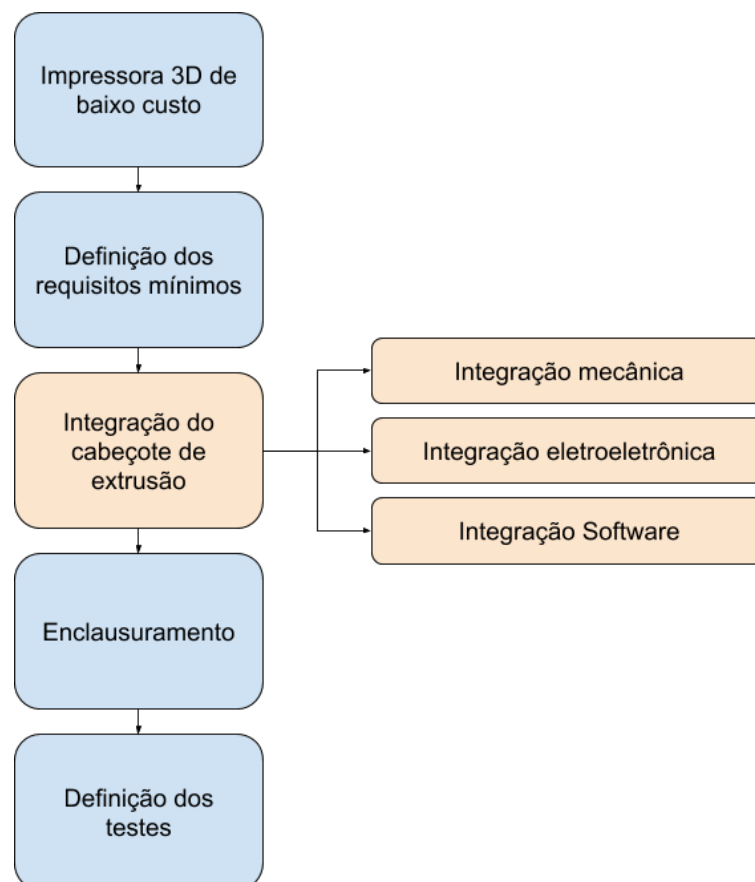
Fonte: (HYREL 3D CO., 2018)

A limitação das máquinas de manufatura aditiva de baixo custo para a impressão com materiais de alta temperatura, de acordo com Gardner et al. (2016), estão inteiramente ligadas as temperaturas máximas suportadas pelos componentes estruturais e eletrônicos, algumas alterações de componentes são necessárias para readequação de uma máquina de código aberto, ou seja, de baixo custo, para uma máquina capaz de imprimir polímeros com alta temperatura de processamento.

3 DESENVOLVIMENTO

Objetivando-se readequar uma impressora 3D de baixo custo para possibilitar a impressão de materiais poliméricos de alta temperatura de extrusão foram desenvolvidas ações conforme o fluxograma da Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma das atividades a serem realizadas



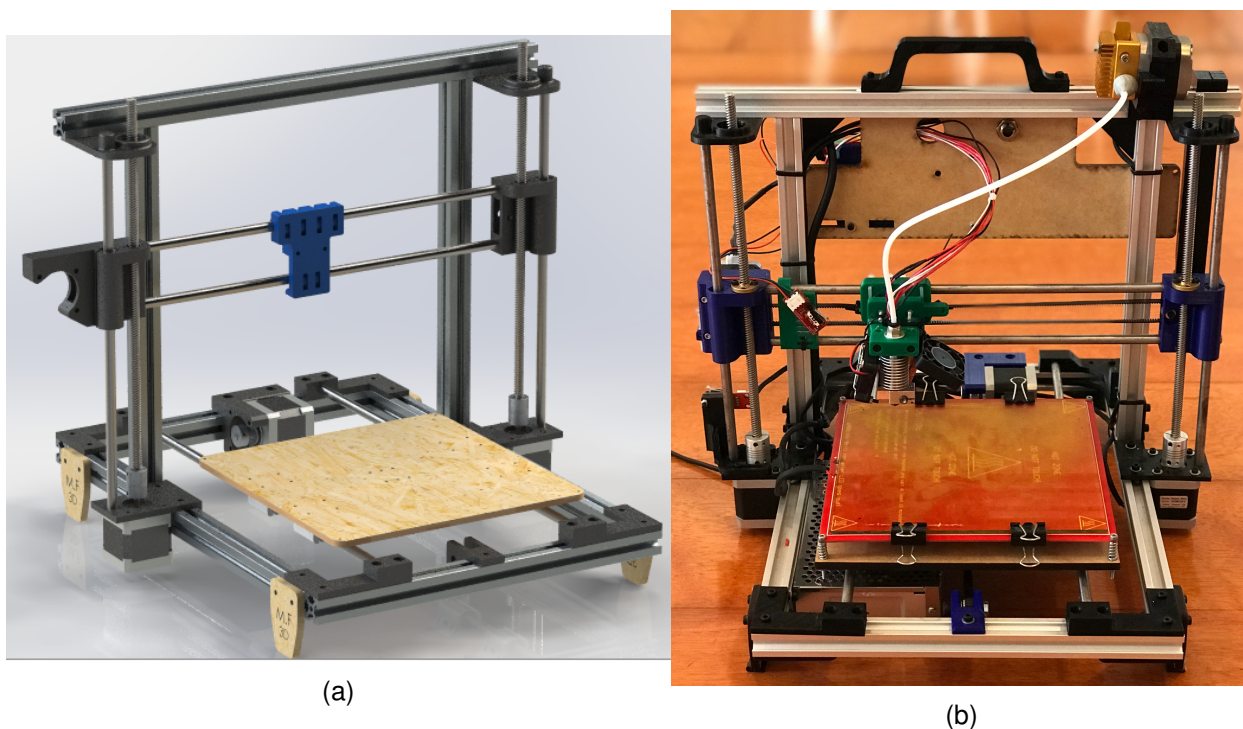
Fonte: Acervo Pessoal

O fluxograma explica que em primeiro momento, a obtenção de conhecimento sobre a impressora 3D de baixo custo selecionada e principalmente suas limitações, juntamente com os requisitos ideais para impressão com materiais de alta temperatura, encontrados na revisão bibliográfica, definiram os requisitos mínimos de impressão para processamento destes materiais, assim podendo ser realizada a integração necessária das partes mecânicas, eletroeletrônicas, de *software* e o enclausuramento, em seguida definiram-se os testes necessários para validação.

3.1 Seleção de uma Impressora 3D de baixo custo

A máquina de manufatura aditiva selecionada no presente trabalho, foi uma impressora de código aberto (em inglês *open-source*), conhecida como Prusa i3, neste caso, fabricada com estrutura em perfis de alumínio (Figura 15a), diferentemente do modelo comercial, citada na revisão bibliográfica, a qual a fabricação é com chapas de alumínio anodizado. A Figura 15b expõe a impressora 3D utilizada para adaptação.

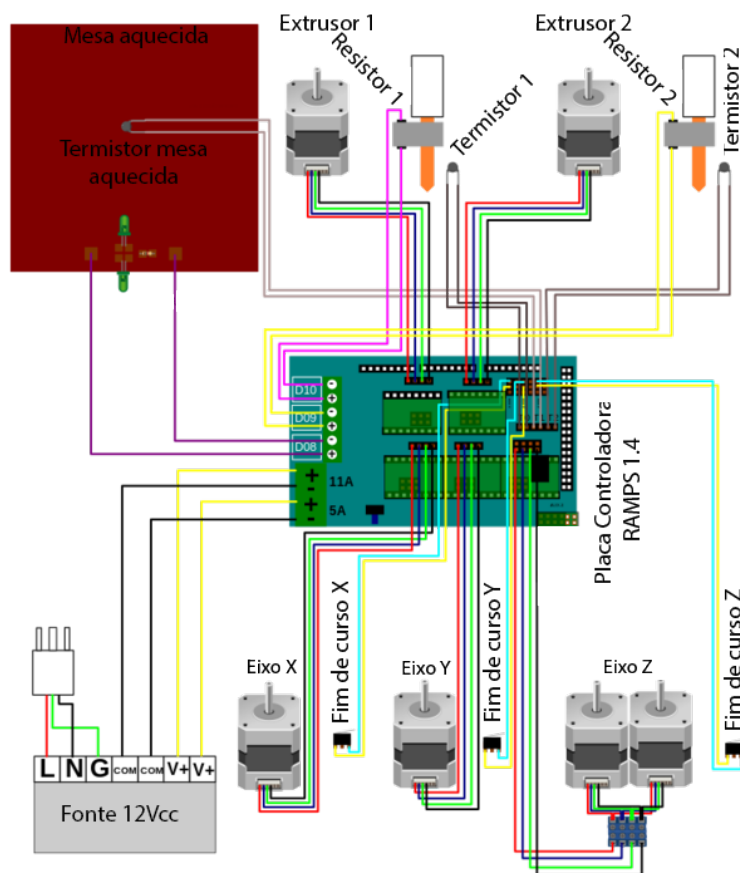
Figura 15 – (a) Projeto de código aberto da impressora Prusa i3 (b) Impressora 3D utilizada.



Fonte: Acervo Pessoal

A impressora 3D utilizada neste trabalho, bem como grande parte das impressoras 3D de código aberto utilizam como placa controladora o Arduino que utiliza, microcontroladores baseados na arquitetura ATmega328 e uma placa controladora para impressora 3D, conhecida como RAMPS 1.4. O sistema de movimentação contempla 5 motores modelo NEMA 17, com capacidade de torque de 4kgf.cm, e utiliza como alimentação uma fonte chaveada de tensão 12Vcc e corrente máxima 20A. As ligações elétricas frequentemente utilizadas para estes tipos de impressoras 3D seguem o esquemático contemplado na Figura 16.

Figura 16 – Esquemático elétrico Impressoras de baixo custo



Fonte: Adaptado de RepRap (2018)

Nota-se também, que grande parte das peças desta máquina são fabricadas utilizando o método de manufatura por filamento fundido, juntamente com isso os sistemas de movimentação de cada eixo estão relativamente próximos do volume de trabalho (volume de impressão), dificultando assim controle de temperatura deste volume, pois as temperaturas limites destes sistemas, podem prejudicar a integridade e o funcionamento da máquina, como explica Gardner et al. (2016).

3.2 Definição dos requisitos mínimos

Analisando os estudos realizados anteriormente e as máquinas comerciais, inicialmente foram definidos os requisitos necessários para se realizar impressões 3D com materiais de alta temperatura, os mais relevantes são:

- Temperatura de extrusão: até 400°C
- Temperatura da plataforma: até 160°C
- Enclausuramento
- Controle de temperatura da câmara: até 90°C

Considerando as limitações iniciais da máquina disponível, como por exemplo a temperatura de plastificação dos materiais utilizados na impressora, foram definidos os requisitos mínimos para implementação neste trabalho de conclusão de curso.

- Possuir cabeçote de extrusão capaz de atingir temperaturas de até 400°C: foi utilizado o cabeçote de extrusão *High Temperature Cobra Extruder*, o qual já se encontrava disponível na instituição;
- Dispor de uma plataforma de impressão com aquecimento até 100°C: Alcançada com a plataforma já disponível na impressora 3D de baixo custo utilizada;
- Enclausurar ambiente de impressão: desenvolvimento de uma estrutura com vedação, onde, internamente, será alocada a impressora 3D para evitar variações de temperatura;
- Controle de temperatura interno: sistema de controle de temperatura, possivelmente composto por uma resistência controlada e um sensor de temperatura, o qual não foi implementado por questões de prazo e fatores limitantes da máquina utilizada, como os citados acima.

A partir dos requisitos mínimos estabeleceu-se a ordem de integração dos componentes necessários para atendê-los, como tratadas a seguir, os itens foram realizados seguindo o fluxograma apresentado na Figura 14.

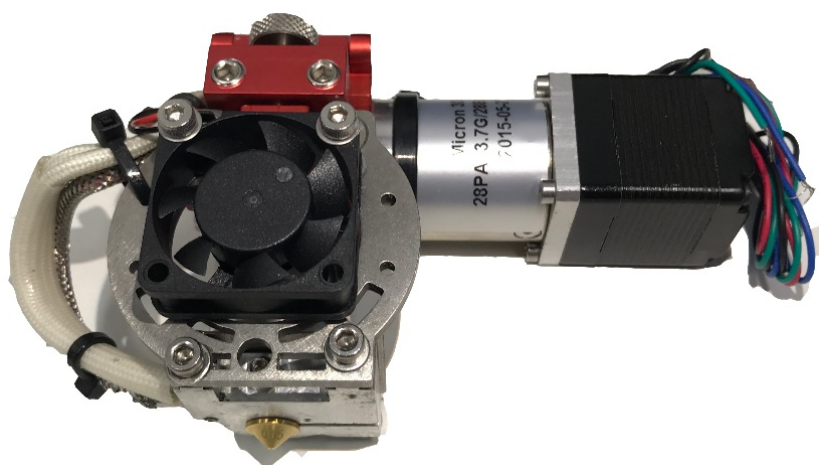
3.3 Integração do cabeçote de extrusão de alta temperatura

Cabeçotes de extrusão comuns, como o utilizado com a impressora 3D base deste trabalho, possuem em seu interior um tubo de Teflon, localizado antes do bico

extrusor, para minimizar a troca de calor entre o filamento e o dissipador de calor, entretanto, o teflon possui temperatura de fusão de 327°C, com isso, o extrusor escolhido não pode possuir partes que não suportem a temperatura de processamento desejada.

O cabeçote de extrusão Cobra (Figura 17) é fornecido pela empresa Micron E.M.E que realiza o design e manufatura de extrusores, bicos aquecidos e partes de impressoras 3D. O cabeçote é fabricado somente com materiais metálicos, com exceção do ventilador responsável pelo resfriamento da parte superior do equipamento. O fabricante separa o cabeçote extrusor em duas partes principais, elétrica e mecânica. A elétrica é constituída de um motor de passo modelo Nema 11, um ventilador 30 x 30mm, um resistor de aquecimento de 100 watts e um termopar tipo K. Já a parte mecânica é formada por um redutor planetário de 1:13, o bloco aquecido, o qual é fabricado em alumínio anodizado, onde é realizado o aquecimento do bico extrusor, fabricado de latão (MICRON E.M.E. ltd, 2018).

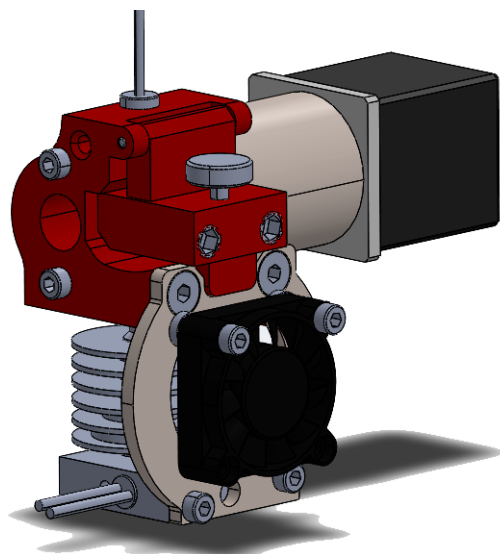
Figura 17 – Cabeçote de extrusão de alta temperatura Cobra



Fonte: Acervo Pessoal

Este cabeçote de extrusão possibilita o aquecimento até uma temperatura de 400°C, viabilizando assim a impressão de materiais poliméricos que necessitem de uma temperatura de extrusão maior, como por exemplo PEEK e Policarbonato. A empresa fabricante também disponibiliza, no site, o modelo CAD do cabeçote de extrusão (Figura 18), este permitiu a fabricação de peças necessárias para a integração do trabalho.

Figura 18 – Modelo CAD do cabeçote de extrusão de alta temperatura Cobra



Fonte: Acervo Pessoal

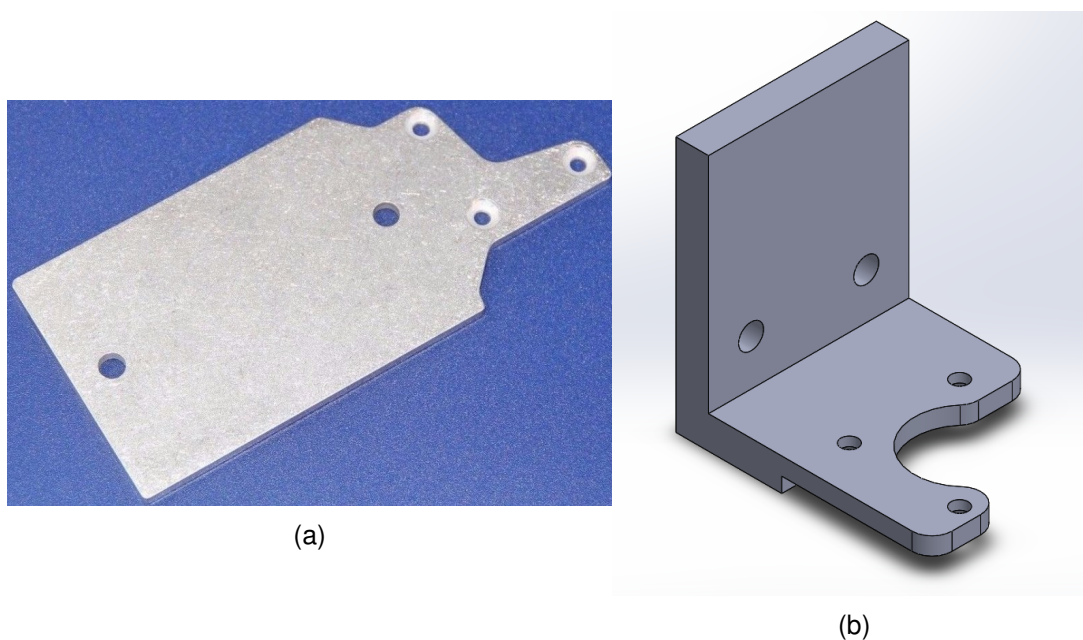
Para melhor demonstrar as etapas realizadas, separou-se a integração do cabeçote em 3 subseções, as quais estão dispostas a seguir.

3.3.1 Integração mecânica

Para dimensionar a fixação do cabeçote de extrusão na impressora, primeiramente realizou-se uma pesquisa com o fabricante para verificar a existência de uma fixação padrão, encontrou-se uma espécie de chapa metálica com 3 furações para acoplamento do extrusor (Figura 20a), porém a impressora base para o projeto possui furações diferentes, sendo assim, não foi possível utilizar a peça recomendada pelo fabricante. Utilizou-se então o modelo CAD do cabeçote extrusor COBRA, disponibilizado na Figura 18, para desenvolver uma peça (Figura 20b) que facilite a fixação na impressora.

Para a fabricação da peça, em primeiro momento, pensou-se em utilizar o processo de manufatura aditiva por filamento fundido, para possibilitar a fabricação de forma rápida, porém as temperaturas na região de fixação do cabeçote podem atingir temperaturas maiores que as temperaturas de distorção dos materiais e inviabilizar seu uso, como explicado por Bevilacqua (2015).

Figura 19 – (a) Modelo de fixação apresentado pelo fabricante (b) Modelo de fixação desenvolvido pelo autor.

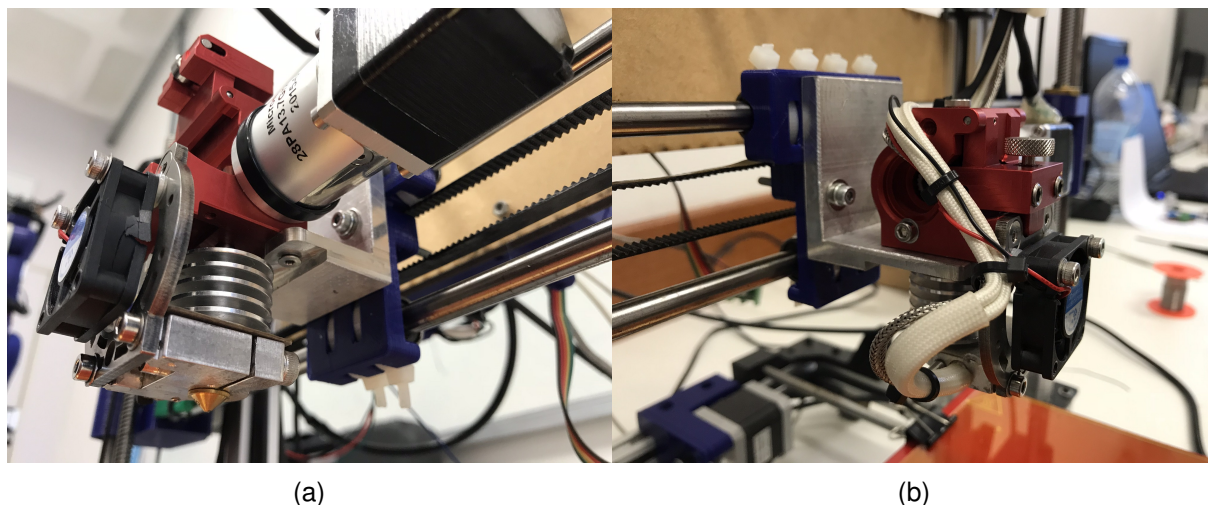


Fonte:(a) (MICRON E.M.E. Ltd, 2018) (b) Acervo Pessoal

Juntamente com isso, a disposição de equipamentos de usinagem por Comando Numérico Computadorizado (CNC) no Instituto Federal de Santa Catarina, possibilitou a fabricação da peça em material metálico, no caso, alumínio, que possui uma temperatura de fusão bem mais alta que os materiais poliméricos, aproximadamente 660°C (Associação Brasileira do Alumínio, 2018).

Após a usinagem, iniciou-se a etapa de montagem do cabeçote na extrusora, como mostra a Figura 23.

Figura 20 – Montagem do cabeçote de extrusão na impressora



Fonte: Acervo Pessoal

3.4 Integração eletroeletrônica

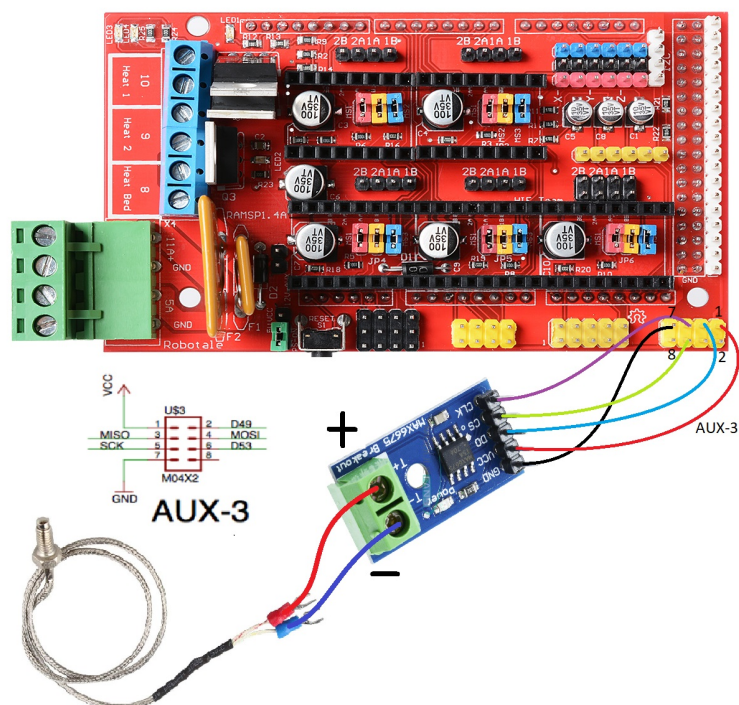
Com a mecânica implementada, deu-se início a integração eletroeletrônica do cabeçote de extrusão, o qual utiliza um termopar tipo K, ou seja, difere dos cabeçotes de extrusão comuns em impressora, os quais utilizam termístores NTC de 100k Ω . Os termístores NTC (*Negative Temperature Coefficient*), diferentemente dos PTC (*Positive Temperatura Coefficient*), diminuem sua resistência com o aumento da temperatura, ou seja, tem suas variáveis inversamente proporcionais (SARKAR; DEY; MUNSHI, 2013)

3.4.1 Sensor de temperatura

A controladora utiliza como sensor de temperatura do bico e da mesa aquecida, os termístores tipo NTC de 100k Ω , citados anteriormente, porém o cabeçote de extrusão utiliza um termopar tipo K. Moreira (2002) explica que um termopar é constituído de dois metais desiguais, unidos por somente uma das extremidades, quando existe uma diferença de temperatura entre os dois, é gerada uma diferença de potencial, em razão disto existe a necessidade de uma placa externa a controladora para converter o sinal em tensão vindo do termopar, para uma comunicação SPI, possibilitando assim a comunicação com a controladora Ramps 1.4 e o Arduino. A placa encontrada para viabilizar esta comunicação, foi a MAX6675, a qual o esquemático elétrico para

comunicação com a controladora difere do citado acima, e está retratado na Figura 21.

Figura 21 – Esquemático elétrico para comunicação SPI da placa MAX6675



Fonte: Acervo pessoal

O sistema de controle de temperatura utilizando o termopar foi testado em bancada, onde a medição de temperatura se apresentou satisfatória. Com a integração do cabeçote de extrusão com a Ramps da impressora 3D selecionada, pode-se visualizar um grande problema na aquisição da temperatura utilizando o sensor termopar, onde é utilizada uma pequena variação de tensão entre os terminais para medição, sofrendo grande influência do sistema de potência da máquina, o que inclui os motores e principalmente o resistor de potência próximo do sensor.

Para solucionar este problema, visto que os fios do sensor estavam invólucros por uma malha de aterramento, pensou-se em algumas alternativas, como por exemplo, aterrar a malha já disponível em volta dos fios e distanciar o sensor de temperatura do resistor responsável pelo aquecimento do bico.

Entretanto, ao desenrolar do desenvolvimento da impressora, o prazo estava se tornando um fator crucial, com isso para resolver o problema e conseguir prosseguir com a calibração e os testes, foi-se necessário a substituição do termopar integrado ao

bico extrusor, por um termístor de 100k Ω , o qual já estava contemplado anteriormente na impressora conforme o esquemático composto na Figura 16.

3.4.2 Aquecimento do bico de extrusão

Implementada a aquisição dos dados de temperatura do extrusor, se iniciou uma série de testes de aquecimento com o bico em vazio, ou seja, sem utilizar material. Foi realizada então a ligação elétrica do resistor de potência encontrado no cabeçote com a placa controladora, a qual daqui para frente será chamada apenas de RAMPS, onde por meio de um controle Proporcional Integral Derivativo (PID) e um atuador com PWM (*Pulse Width Modulation*), aquece o bico de extrusão gradativamente.

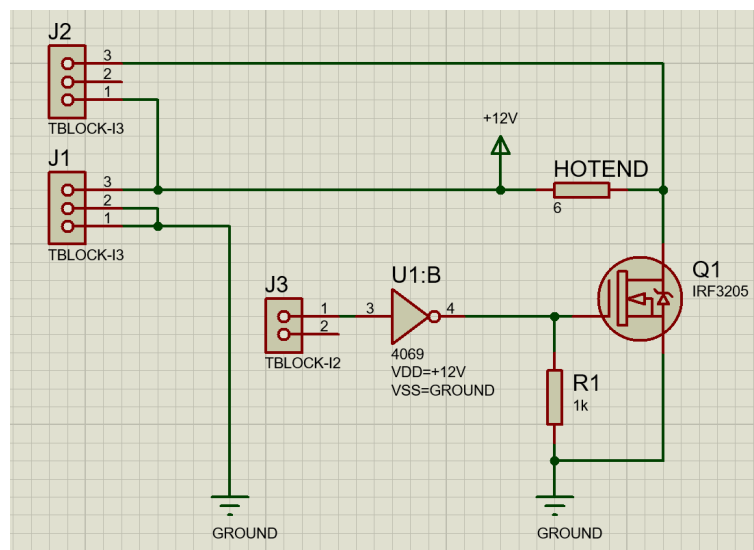
Contudo, após inserir um *preset* de temperatura, notou-se uma falha no aquecimento, um circuito de proteção contra sobrecorrente localizado dentro da Ramps foi acionado, ocasionado por uma elevada corrente solicitada pelo resistor, por esta razão, se realizou o cálculo da corrente necessária para acionar o resistor de potência do extrusor, utilizou-se a equação básica da potência elétrica, disposta a seguir, visto que o fabricante do cabeçote de extrusão disponibiliza a potência do resistor e é conhecida a tensão máxima injetada no mesmo (FOWLER, 2013).

$$P = vi \quad (3.1)$$

Dado que a corrente necessária calculada é, aproximadamente 9 Amperes, projetou-se um circuito elétrico capaz de comandar e suportar a corrente necessária capaz de aquecer o bico extrusor, disposto na Figura 22, utilizou-se um MOSFET IRF3205, o qual suporta correntes de até 100 Amperes, juntamente com uma porta lógica inversora, o circuito integrado 4069, os quais as folhas de dados (*datasheets*), encontram-se nos anexos 1 e 2, respectivamente.

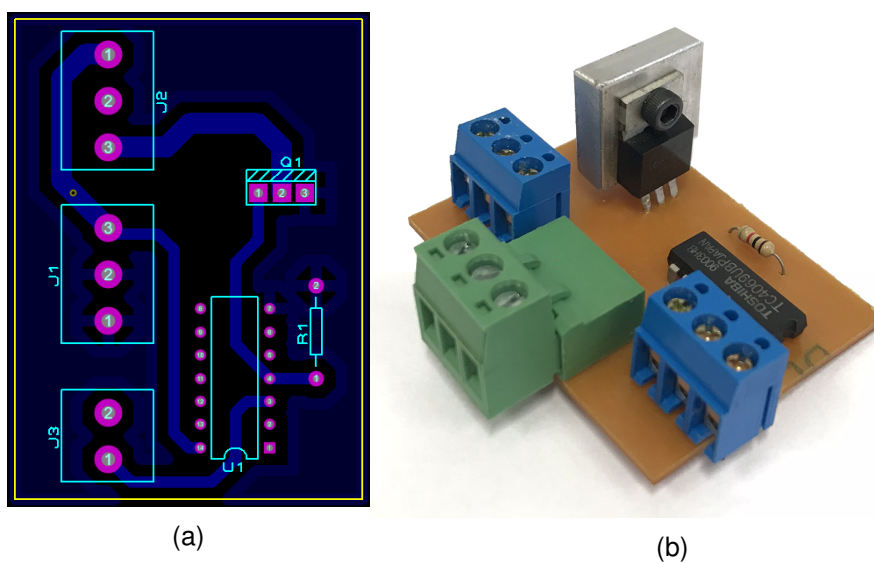
Optou-se por testar o circuito em uma matriz de contato utilizando uma ventoinha para validação, com o funcionamento adequado do sistema, deu-se a criação da placa de circuito impresso (Figura 23a). Neste caso a placa foi fabricada utilizando uma máquina específica para usinagem de PCI, conhecida como LPKF ProtoMat, em seguida soldou-se os componentes eletrônicos e finalizou-se a PCI (Figura 23b).

Figura 22 – Esquemático elétrico da placa para controle de potência do bico extrusor



Fonte: Acervo pessoal

Figura 23 – (a)Projeto da placa de circuito impresso (b)Placa de circuito impresso desenvolvida



Fonte: Acervo Pessoal

Com a integração realizada, se realizou novamente um teste de aquecimento do bico, e se obteve êxito.

3.5 Integração do software

Inicialmente, com a utilização do termopar tipo K como sensor de temperatura, o *firmware* utilizado, conhecido como Marlin, necessitou de algumas alterações para os testes, principalmente pois a comunicação do termopar difere da medição de temperatura realizada pelo termistor. Entretanto a substituição do termopar, por um termistor, ocasionou na não necessidade de se realizar alterações no *firmware*.

Todavia, as alterações realizadas para leitura de temperatura utilizando o termopar, foram significativamente pequenas e estão localizadas no arquivo *configuration.h*, a Figura 24 mostra a linha de código inicial, sem alteração, e a Figura 25 demonstra a linha de código alterada para leitura do termopar com a placa MAX6675.

Figura 24 – *Firmware* Marlin para leitura do termistor de 100kΩ

```
//1 : 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
#define TEMP_SENSOR_0 1
```

Fonte: Acervo pessoal

Figura 25 – *Firmware* Marlin para comunicação SPI do termopar tipo K

```
// -2 : thermocouple with MAX6675 (only for sensor 0)
#define TEMP_SENSOR_0 -2
```

Fonte: Acervo pessoal

A alteração do motor do extrusor, o qual utiliza uma redução planetária com taxa de redução 1:13, alterou também a quantidade de passos por milímetro, a qual é pré-estabelecida no Marlin. Os dados de passos por milímetro do cabeçote de extrusão foram alterados de acordo com os disponibilizados pelo fabricante, e a alteração no Marlin é retratada na Figura 26 (MICRON E.M.E. Ltd, 2018).

Figura 26 – (a) Alteração dos passos por milímetro no *firmware* Marlin (b) *Firmware* Marlin da impressora base

```

/**
 * Default Axis Steps Per Unit (steps/mm)
 * Override with M92
 *
 *                               X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,400,93}

```

(a)

```

/**
 * Default Axis Steps Per Unit (steps/mm)
 * Override with M92
 *
 *                               X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 400, 1600 }

```

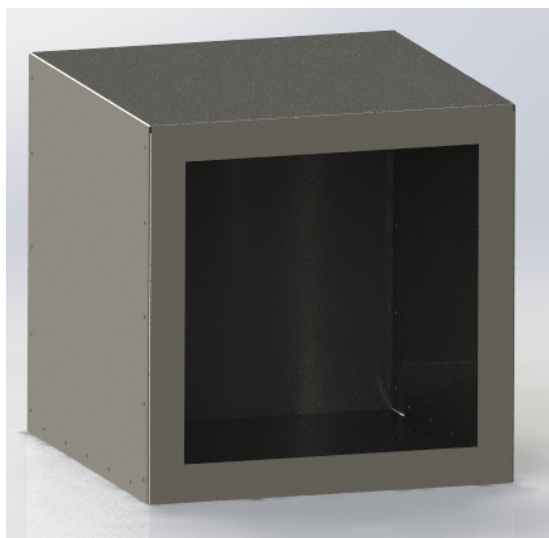
(b)

Fonte: Acervo pessoal

3.6 Enclausuramento

Com base na revisão bibliográfica realizada, definiu-se a necessidade de se enclausurar a máquina para possibilitar a impressão 3D de materiais com alta temperatura de processamento, tendo em vista a diminuição da variação de temperatura durante o processo. Desta maneira optou-se por projetar uma caixa, demonstrada na Figura 27a, capaz de isolar a máquina da temperatura ambiente, diminuindo assim a troca de calor e a convecção do ar próximos da peça produzida. (GARDNER et al., 2016).

Figura 27 – Projeto caixa Impressora 3D de baixo custo



(a) Enclausuramento sem impressora 3D



(b) Enclausuramento com impressora 3D

Fonte: Acervo Pessoal

A caixa projetada possui as dimensões de 502mm x 500mm x 501mm, tamanho suficiente para, internamente, acomodar a máquina de impressão 3D (Figura 27b), fabricada com chapas de aço 1020 e espessura de 1,5mm, cortadas com máquina de corte a laser, e posteriormente dobradas utilizando uma máquina de dobra CNC, a qual permite dobras com precisão de até 0,5°. Para melhor acabamento e prevenção de oxidação, as chapas foram lixadas e pintadas.

3.7 Definição dos testes

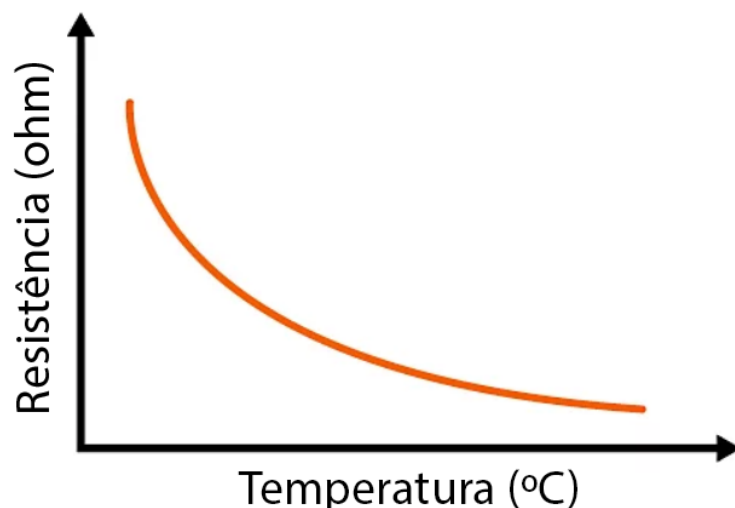
A maior dificuldade da impressão 3D por FFF, principalmente para materiais com alta temperatura de processamento, é a adesão na plataforma de construção, como explica Gardner et al. (2016).

Devido principalmente as contrações térmicas que ocorrem no material após a extrusão em alta temperatura, estes materiais possuem uma alta taxa de expansão e contração térmica, dificultando ainda mais a qualidade da manufatura.

O termopar tipo K fornecido com o cabeçote de extrusão, tem capacidade de

medição de temperaturas entre -180°C e 1300°C (MICRON E.M.E. ltd, 2018), entretanto, a troca do sensor de temperatura para o termistor de $100\text{k}\Omega$, o qual tem como principal desvantagem a faixa de medição reduzida, que de acordo RepRap (2018), variam entre -55°C e $+250^{\circ}\text{C}$, com erro de aproximadamente 1%, e não são considerados lineares, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Relação resistência x temperatura dos termistores



Fonte: Adaptado de Corleto (2018)

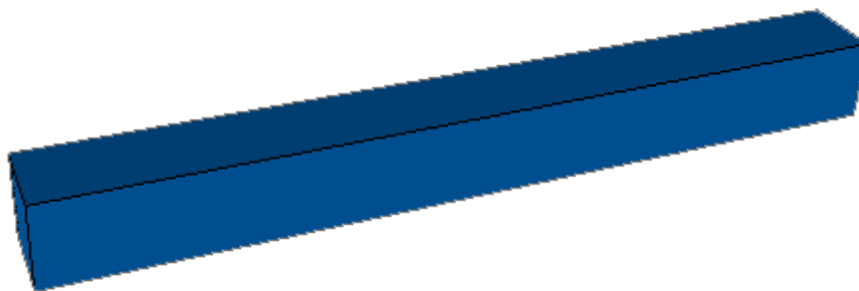
Deste modo a faixa de temperatura de processamento possível para se trabalhar foi limitada, então se optou por realizar os ensaios com dois materiais poliméricos que possuam temperatura de processamento dentro da faixa limitada pelo termistor. O PLA, escolhido por sua facilidade de impressão e maior utilização, e o ABS, que possibilita verificar a melhoria da condição de empenamento e adesão na plataforma de construção. Os ensaios foram realizados variando somente três parâmetros possibilitando a comparação com resultados e conhecimentos adquiridos na revisão bibliográfica.

- Condição da impressora:
 - Sem enclausuramento;
 - Com enclausuramento;
- Materiais utilizados:
 - PLA;

- ABS;
- Temperatura da plataforma de construção
 - PLA: de 30 a 60°C
 - ABS: de 50 a 95°C

Utilizou-se como peça padrão deste teste um modelo CAD demonstrado na Figura 30, o modelo desta peça possui as dimensões de 100mm x 10mm x 10mm, por seu comprimento ser maior que as outras duas dimensões, este formato possibilita testar de maneira abrupta a retração térmica dos materiais escolhidos.

Figura 29 – Peça padrão utilizada nos testes de impressão



Fonte: Acervo pessoal

Os parâmetros que foram mantidos fixos para possibilitar a análise do comportamento de cada material estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de impressão fixos

Espessura de camada	0,3mm
Espessura da primeira camada	0,2mm
Número de perímetros	3
Camadas sólidas inferiores	3
Camadas sólidas superiores	2
Preenchimento	30%
Velocidade de impressão	25mm/s
Velocidade de impressão da primeira camada	15mm/s
Espessura do filamento	1,75mm
Resfriamento de camada	Sem resfriamento

Fonte: Acervo pessoal

Os parâmetros utilizados na realização dos testes foram definidos utilizando a Tabela 1, juntamente com as limitações pré-estabelecidas da impressora 3D de baixo custo. Os parâmetros utilizados nos testes com PLA seguiram a Tabela 3, e os testes realizados com o polímero ABS, seguem a Tabela 4. Utilizou-se um termopar tipo J, ligado a um multímetro que possibilita a aquisição dos dados de temperatura, podendo-se analisar o que acontece com a temperatura próximo da peça a ser impressa.

Tabela 3 – Ordem e variáveis utilizadas nos testes de impressão com PLA

	Temperatura Mesa (°C)	Temperatura Bico (°C)	Condição da impressora
1	30	200	Aberta
2	40	200	Aberta
3	50	200	Aberta
4	60	200	Aberta
5	30	200	Fechada
6	40	200	Fechada
7	50	200	Fechada
8	60	200	Fechada

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 4 – Ordem e variáveis utilizadas nos testes de impressão com ABS

	Temperatura Mesa (°C)	Temperatura Bico (°C)	Condição da impressora
1	50	220	Aberta
2	60	220	Aberta
3	70	220	Aberta
4	75	220	Aberta
5	80	220	Aberta
6	85	220	Aberta
7	90	220	Aberta
8	95	220	Aberta
9	50	220	Fechada
10	60	220	Fechada
11	70	220	Fechada
12	75	220	Fechada
13	80	220	Fechada
14	85	220	Fechada
15	90	220	Fechada
16	95	220	Fechada

Fonte: Acervo pessoal

Para os testes, o *software* de controle utilizado na máquina é conhecido como Matter Control, é um *software* de código aberto que possibilita realizar as configurações de impressão e possui seu próprio fatiador (*slicer*), o qual separa a peça em fatias, denominadas camadas, as quais são impressas na plataforma de impressão uma em cima da outra. Vale ressaltar também que os testes foram realizados em uma sala climatizada a 23°C, garantindo assim uma melhor confiabilidade dos resultados obtidos.

Com os ensaios de impressão realizados as peças foram medidas utilizando um paquímetro digital com para avaliação dimensional e também foram pesadas para verificar se houve alguma variação utilizando uma balança de precisão.

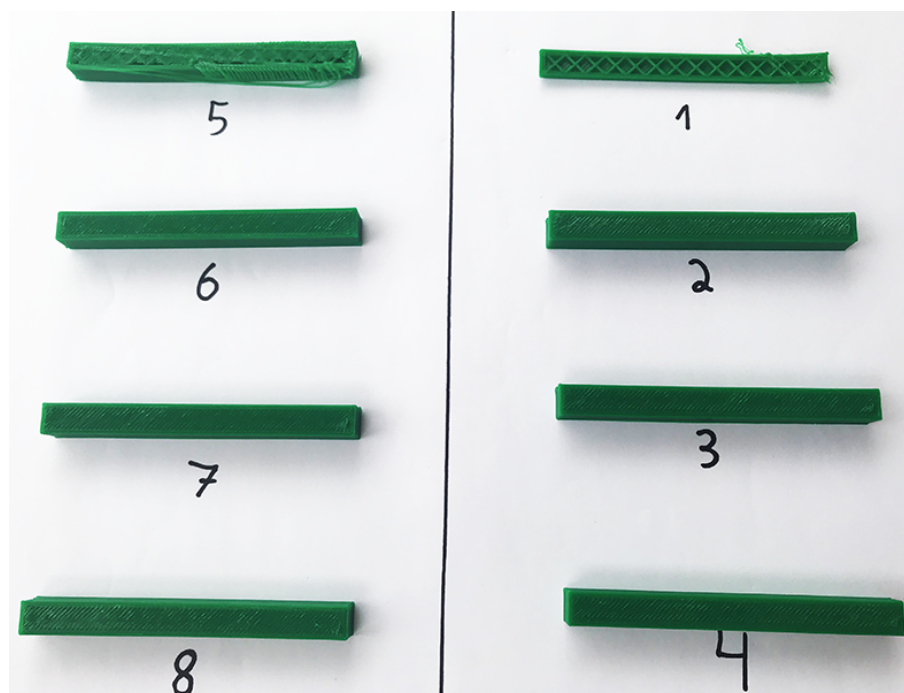
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo tem como objetivo complementar o conhecimento a respeito dos materiais poliméricos de alta temperatura, além do que acrescentar informações sobre a adaptação de uma impressora de baixo custo para possibilitar o processamento destes materiais, juntamente com as características necessárias para manufatura aditiva por meio do método de Fabricação por Filamento Fundido destes polímeros. Analisando as configurações disponibilizadas na máquina e as necessárias para impressão, foi possível gerar comparações entre as peças que utilizaram as características recomendadas, e as que não utilizaram.

4.1 Resultado dos testes com impressão em PLA

Inicialmente os resultados obtidos com a impressão de peças com PLA, podem ser visualizados na Figura 30, em seguida, a temperatura adjacente a peça é apresentada na Tabela 5.

Figura 30 – Resultados dos ensaios realizados com polímero PLA



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 5 – Resultado da medição de temperatura próxima da peça teste fabricada em PLA

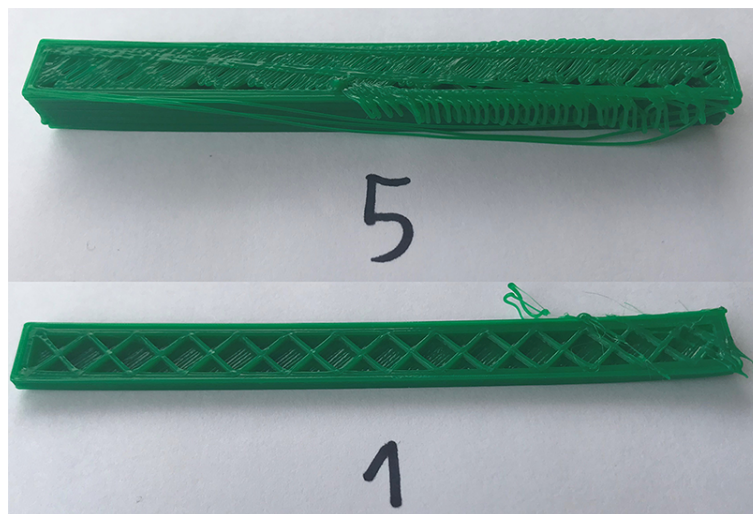
	Temperatura Mesa (°C)	Condição da impressora	Temperatura próxima da peça (°C)
1	30	Aberta	23
2	40	Aberta	24
3	50	Aberta	25
4	60	Aberta	27
5	30	Fechada	25
6	40	Fechada	27
7	50	Fechada	29
8	60	Fechada	32

Fonte: Acervo pessoal

Analisando as diferenças entre as peças produzidas com a impressora enclausurada e sem enclausuramento, pode-se visualizar pouca distinção, isso deve-se ao fato de o PLA, possuir entre suas principais características, um coeficiente de expansão térmica baixo, em torno de $68 \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, de acordo com Simplify 3D (2018), ocasionando pouca diferença dimensional entre as partes quentes, recém extrudadas pelo bico aquecido, e as partes mais frias em contato com a plataforma de impressão.

Entretanto, se compararmos diretamente o teste 1 e 5, realizadas com a impressora aberta e fechada, respectivamente, demonstrados na Figura 31, visualiza-se uma grande diferença na adesão da peça na plataforma, principalmente pois a mesa aquecida está a uma temperatura próxima à temperatura ambiente, diminuindo substancialmente a adesão do material a mesa. Vale ressaltar também que a temperatura próxima da peça variou um pouco com o enclausuramento.

Figura 31 – Comparação entre os testes 1 e 5



Fonte: Acervo pessoal

Conforme a revisão bibliográfica, a temperatura da mesa aquecida também é um fator crucial para a impressão de peças utilizando polímeros com alta temperatura de processamento, neste caso, com o PLA pode-se observar que mesmo algumas referências concordando com a possibilidade de impressão deste polímero sem a existência de uma plataforma de impressão aquecida, o controle de temperatura da mesa ajuda de forma significativa na adesão, melhorando também a qualidade da peça final.

Tabela 6 – Resultado da medição dimensional e de massa das peças ensaiadas em PLA

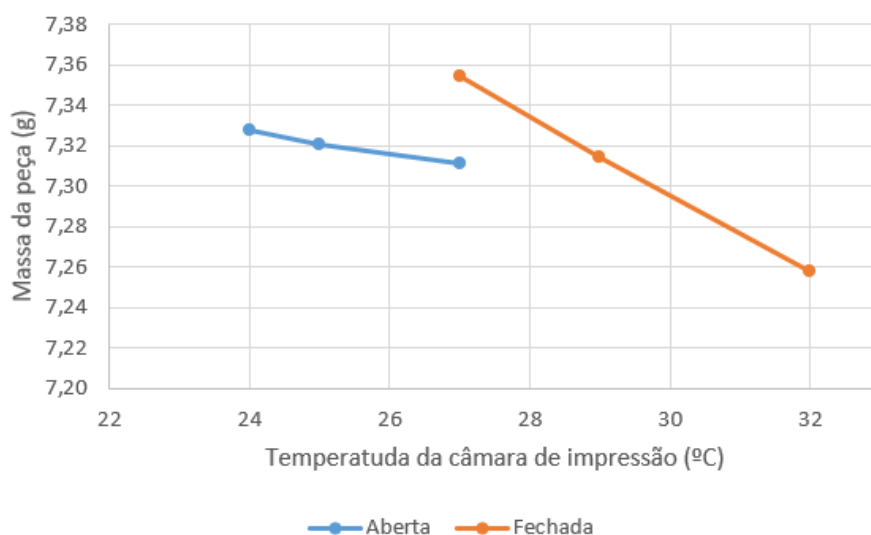
	Situação da impressora	Peso (g)	Dimensional(mm)			Peça pronta
			X	Y	Z	
1	Aberta	1,99	99,51	10,00	2,50	NÃO
2	Aberta	7,33	100,11	10,14	10,04	SIM
3	Aberta	7,32	99,82	10,00	9,97	SIM
4	Aberta	7,31	99,93	9,92	9,87	SIM
5	Fechada	6,82	99,79	10,07	9,63	NÃO
6	Fechada	7,35	99,98	10,01	10,09	SIM
7	Fechada	7,31	100,00	9,96	9,91	SIM
8	Fechada	7,26	99,98	10,05	10,10	SIM

Fonte: Acervo pessoal

Observando a Tabela 6, pode-se concluir que todas as peças ensaiadas foram aferidas, todavia devem ser consideradas exclusivamente as peças as quais completaram o ciclo de impressão, pois as incompletas sofreram maiores deformações durante a impressão, impossibilitando assim a medição correta das dimensões.

Desta forma, considerando somente as peças que finalizaram a impressão, a Figura 32 demonstra uma leve diminuição na massa conforme há um aumento da temperatura próxima da peça, devido a contração térmica do material. O dimensional das peças nos 3 eixos se mantiveram praticamente constantes, considerando a precisão da impressora 3D, a qual é de 0,2mm.

Figura 32 – Relação entre a temperatura da câmara de impressão e a massa da peça para PLA



Fonte: Acervo pessoal

4.2 Resultado dos testes com impressão em ABS

Para os testes realizados com ABS, os resultados estão apresentados da seguinte maneira, a Figura 33 demonstra a qualidade das peças e a principal diferença entre os testes com e sem enclausuramento, já com a Tabela 7 são apresentados os dados de temperatura próximas da peça teste.

Nesse caso, pode-se visualizar com mais clareza a diferença das peças testes produzidas, como citado anteriormente, o coeficiente de expansão térmica do material tem grande influencia no empenamento, assim afetando a adesão na base onde é

feita a impressão, no caso do ABS, este coeficiente está em torno de $90 \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, ou seja, quando o material sai do bico de extrusão, aquecido a 220° , o mesmo é resfriado na mesa aquecida, com isso se gera uma tensão no material, o que ocasiona o empenamento da peça.

Figura 33 – Resultados dos ensaios realizados com polímero ABS



Fonte: Acervo pessoal

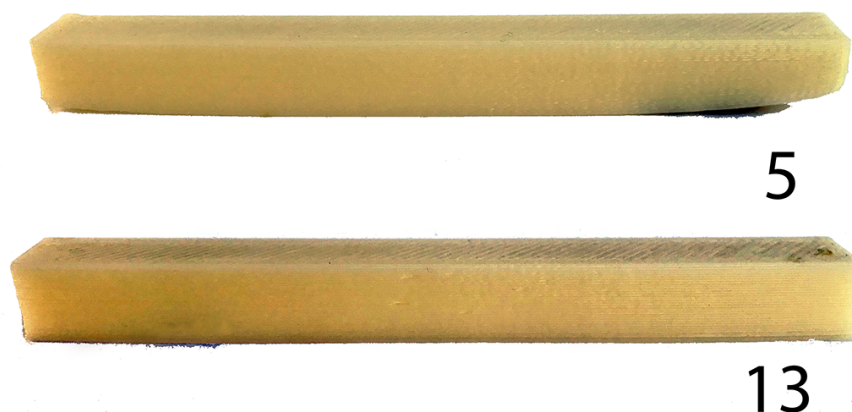
Tabela 7 – Resultado da medição de temperatura próxima da peça teste fabricada em ABS

	Temperatura Mesa (°C)	Condição da impressora	Temperatura próxima da peça (°C)
1	50	Aberta	25
2	60	Aberta	25
3	70	Aberta	27
4	75	Aberta	28
5	80	Aberta	29
6	85	Aberta	30
7	90	Aberta	32
8	95	Aberta	34
9	50	Fechada	30
10	60	Fechada	33
11	70	Fechada	35
12	75	Fechada	37
13	80	Fechada	40
14	85	Fechada	43
15	90	Fechada	45
16	95	Fechada	48

Fonte: Acervo pessoal

Pode-se realizar uma análise entre dois ensaios que variam somente a condição da impressora 3D, como é o caso dos testes 5 e 13, os quais em ambos a impressão conseguiu ser finalizada, porém a peça sem o enclausuramento empenou de maneira severa, e a peça enclausurada não teve nenhum sinal de empenamento, como mostra a Figura 34, nota-se claramente uma diferença entre as qualidades de impressão e a adesão na mesa, demonstrando a eficiência do enclausuramento, mesmo que sem um controle de temperatura interno.

Figura 34 – Resultado comparativo entre os testes 5 e 13



Fonte: Acervo pessoal

A análise das massas e das condições dimensionais das peças ensaiadas com ABS também foram realizadas e estão demonstradas a seguir na Tabela 8.

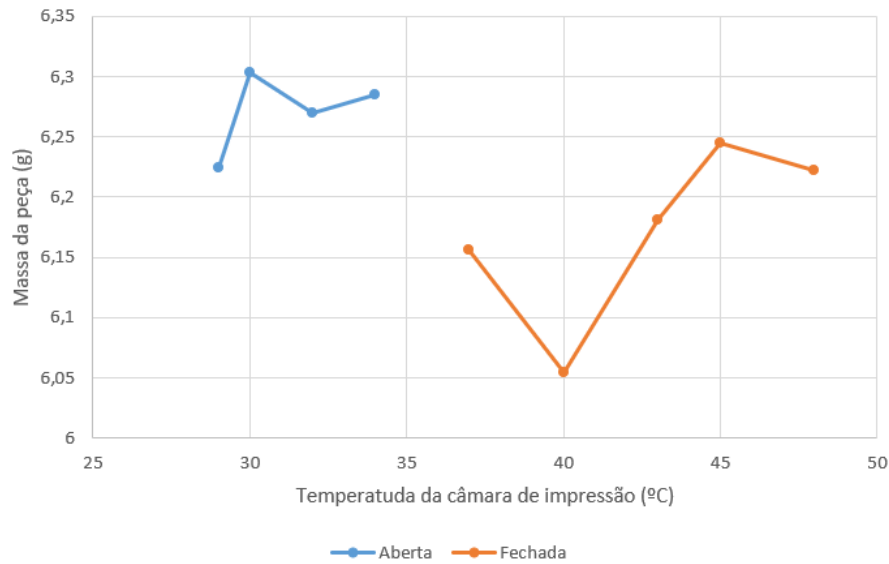
Tabela 8 – Resultado da medição dimensional e de massa das peças ensaiadas em ABS

	Situação da impressora	Peso (g)	Dimensional (mm)			Peça completa
			X	Y	Z	
1	Aberta	0,70	99,28	10,06	0,80	NÃO
2	Aberta	2,95	99,59	10,15	4,64	NÃO
3	Aberta	1,95	98,79	10,18	2,81	NÃO
4	Aberta	5,11	99,45	10,08	8,34	NÃO
5	Aberta	6,22	99,03	9,99	10,13	SIM
6	Aberta	6,30	99,05	10,08	9,88	SIM
7	Aberta	6,27	98,93	9,98	10,27	SIM
8	Aberta	6,28	98,84	10,25	10,01	SIM
9	Fechada	1,01	98,75	10,10	1,34	NÃO
10	Fechada	5,11	99,48	10,13	8,13	NÃO
11	Fechada	3,78	99,30	10,06	6,35	NÃO
12	Fechada	6,15	99,58	10,11	10,09	SIM
13	Fechada	6,05	99,70	10,04	9,86	SIM
14	Fechada	6,18	99,03	9,98	9,96	SIM
15	Fechada	6,24	99,27	10,00	9,84	SIM
16	Fechada	6,22	99,08	9,96	10,04	SIM

Fonte: Acervo pessoal

A partir da Figura 35 pode-se verificar que, ao contrário do PLA, O ABS tem um comportamento mais homogêneo considerando sua massa em relação a temperatura de processamento, com uma variação máxima de 0,2g.

Figura 35 – Relação entre a temperatura da câmara de impressão e a massa da peça para ABS



Fonte: Acervo pessoal

5 CONCLUSÃO

Para a impressão 3D por FFF de materiais de alta temperatura utilizando impressoras 3D de baixo custo, é necessário o enclausuramento do volume de impressão para possibilitar temperaturas internas estáveis e principalmente um cabeçote de extrusão capaz de atingir as temperaturas necessárias.

Conforme os estudos realizados, pode-se perceber que a grande variedade de parâmetros passíveis de alteração, afetam significativamente a qualidade do produto final. Contudo para impressões 3D com materiais poliméricos de alta temperatura alguns parâmetros específicos alteram positivamente a qualidade da impressão, como a temperatura do ambiente de impressão, a qual quanto maior melhor é adesão na mesa e menor é o empenamento.

A partir dos ensaios, pode-se confrontar os resultados com algumas literaturas que citam a facilidade de impressão do Políácido Láctico (PLA) e a não necessidade de uma mesa aquecida, neste estudo, se verificou certa dificuldade de impressão do PLA com a mesa aquecida a temperaturas próximas da temperatura ambiente, entretanto obteve-se a impressão corretamente com a temperatura da mesa próxima de 60°C, sem empenamento. Com o PLA, se verificou pouca alteração das peças em relação a condição da impressora 3D, com e sem o enclausuramento, durante o processamento do material.

Todavia com a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o enclausuramento melhorou o empenamento e possibilitou a impressão do polímero com uma temperatura menor da plataforma aquecida. Neste polímero também pode-se verificar uma melhoria na qualidade visual da peça, onde as peças impressas com maior temperatura da mesa e, conseqüentemente, maior temperatura do ambiente de impressão, resultaram em superfícies mais lisas.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

A partir da melhoria das peças impressas com o aumento da temperatura interna da câmara, pode-se pontuar algumas recomendações para possíveis trabalhos futuros, como por exemplo:

- Adição de um controle de temperatura para o volume de impressão, melhorando a estabilidade térmica do ambiente e aumentando sua temperatura.
- Analisar as melhorias obtidas com novos materiais.
- Verificar a possibilidade de adaptação de outro sensor de temperatura no bico de extrusão

REFERÊNCIAS

- 3DRise. Modelo 3d rise. 2018. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. Disponível em: <<https://www.3drise.com.br/3d-rise>>. 24
- 3DSYSTEMS. *Nossa história*. 2018. <<https://br.3dsystems.com/our-story>>. [Online; Acesso em: 19/Novembro/2018]. 8, 11
- ABREU, S. A. C. Impressão 3d baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. 2015. 7, 13, 17
- Additive Manufacturing Research Group. *About Additive Manufacturing*. 2018. <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>>. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. 18
- AGUIAR, L. d. C. D. et al. Construção de instrumentos didáticos com impressoras 3d. *IV Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia. Ponta Grossa (PR)*, 2014. 17
- AKCELRUD, L. *Fundamentos da ciência dos polímeros*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2007. 1
- ALBURQUERQUE, A. J. *Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas*. Dissertação (B.S. thesis), 2014. 7
- Associação Brasileira do Alumínio. *Características Químicas e Físicas*. 2018. <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. [Online; Acesso em: 23/Novembro/2018]. 35
- ASTM, S. F2792, 2012. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM, West Conshohocken, PA, 2012. 10, 12
- AURAS, R. A. et al. *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 10. 8
- BATHISTA, A. L. B.; SILVA, S. E. O. da. Conhecendo materiais poliméricos. 2003. 5
- BEVILACQUA, R. C. Projeto de adaptação de impressora 3d para impressão de peek. Universidade de Brasília, 2015. 34
- CASAGRANDE, M. V. S. Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida fdm. *Projeto de graduação–UFRJ/Escola Politécnica*, 2013. 11
- CORLETO, J. *Measuring Temperature with an NTC Thermistor*. 2018. <<https://www.allaboutcircuits.com/projects/measuring-temperature-with-an-ntc-thermistor/>>. [Online; Acesso em: 25/Novembro/2018]. 43
- CUNHA, H. A. d. Impressoras 3d: o direito da propriedade intelectual precisará alcançar novas dimensões? 2013. 10
- DEURSEN, F. V.; BERNARDO, A. A revolução das impressoras 3d. *Revista Super Interessante. São Paulo, Janeiro*, 2013. 10, 22

- FERNANDES, A. V. S.; MOTA, F. A. O. Impressoras 3d: Uma compreensão da evolução e utilização. *Anais dos Simpósios de Informática do IFNMG-Campus Januária*, n. 2, 2016. 17
- FOWLER, R. *Fundamentos de Eletricidade-Volume 1-: Corrente Continua e Magnetismo*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. v. 1. 38
- GALANTUCCI, L. M. et al. Analysis of dimensional performance for a 3d open-source printer based on fused deposition modeling technique. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 28, p. 82–87, 2015. 1
- GARDNER, J. M. et al. High temperature thermoplastic additive manufacturing using low-cost, open-source hardware. 2016. 25, 27, 31, 41, 42
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2014. 15
- GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. de S.; RODRIGUES, V. P. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, p. 499–523, 2016. 12
- GUEDES, B.; FILKAUSKAS, M. E. *O plástico*. [S.l.]: Erica, 1997. 1
- HARADA, J.; WIEBECK, H. Plásticos de engenharia-tecnologia e aplicações. São Paulo, SP: Ed. Artliber Ltda, 2005. 5, 6
- HASAN, N. M.; REIS, J. D. da S. Organizações inovadoras que utilizam a revolução 4.0. *Interfaces Científicas-Exatas e Tecnológicas*, v. 2, n. 3, p. 9–20, 2018. 2
- HYREL 3D CO. System 30m. 2018. [Online; Acesso em: 21/Novembro/2018]. Disponível em: <<http://www.hyrel3d.com/core-suystems/system-30m/>>. 27
- INTAMSYS CO. Funmat ht 3d printer. 2018. [Online; Acesso em: 21/Novembro/2018]. Disponível em: <<https://www.intamsys.com/product/funmat-ht/>>. 25, 26
- JONES, D.; LEACH, D.; MOORE, D. Mechanical properties of poly (ether-ether-ketone) for engineering applications. *Polymer*, Elsevier, v. 26, n. 9, p. 1385–1393, 1985. 9
- JUNIOR, O. C.; JUNIOR, A. S.; NETO, A. I. Processos de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos—uma abordagem comparativa. *Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu: ENEGEP*, 2007. 13
- MakerBot. *Impressora 3D MakerBot Replicator Z18*. 2018. <<https://www.stratasys.com/3d-printers#manufacturing>>. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. 21
- MARTINS, J. D. *Análise ao comportamento mecânico de estruturas de suporte produzidas por fdm*. Tese (Doutorado), 2016. 9
- MICRON E.M.E. Ltd. *High Temperature Cobra Extruder*. 2018. <<https://micron-eme.com/collections/all-metal-extruders/products/high-temperature-cobra-1-75mm-extruder-up-to-400-degrees-c>>. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. 33, 35, 40, 43

MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002. 36

MOREIRA, R. M. D. Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3d fdm. 2016. 2

PITT, F. D.; BOING, D.; BARROS, A. A. C. Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis. *Revista da UNIFECE*, v. 1, n. 09, 2011. 5

Polymers International Australia. *Thermoplastics*. 2018. <<https://polymers.com.au/thermoplastics/>>. [Online; Acesso em: 29/Novembro/2018]. 5, 6

Prusa Research. Original prusa i3 mk3 3d printer. 2018. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. Disponível em: <<https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3-3d-printer.html>>. 23

RepRap. *Ramps 1.4*. 2018. <https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4>. [Online; Acesso em: 19/Novembro/2018]. 31, 43

SALINAS, R. *3D printing with RepRap cookbook*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2014. 8

SARKAR, A. R.; DEY, D.; MUNSHI, S. Linearization of ntc thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier. *IEEE Sensors J*, v. 13, n. 12, p. 4621–4626, 2013. 36

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. [S.l.]: Crown Business, 2017. 11

SELLS, E. *Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine*. Tese (Doutorado) — University of Bath, 5 2009. 22

SILVA, J. V. L. da; MAIA, I. A. Desenvolvimento de dispositivos de tecnologia assistiva utilizando impressão 3d. *CNRTA-CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIA ASSISTIVA (Organizador)*, p. 33, 2014. 2

SILVA, R. M. D.; FILHO, D. J. S.; MIYAGI, P. E. Modelagem de sistema de controle da indústria 4.0 baseada em holon, agente, rede de petri e arquitetura orientada a serviços. *Analytica chimica acta*, v. 597, n. 2, p. 179–86, 2007. 2

SIMIELLI, E. R.; SANTOS, P. Plástico de engenharia, principais tipo e sua moldagem por injeção. *São Paulo: Artiliber*, 2010. 7

Simplify 3D. *Properties Table*. 2018. <<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table>>. [Online; Acesso em: 24/Novembro/2018]. 18, 48

SOUZA, J. Impacto da evolução da manufatura aditiva sobre o desenvolvimento de produto. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. 16

Stratasys. *Products*. 2018. <<https://www.stratasys.com/3d-printers#manufacturing>>. [Online; Acesso em: 20/Novembro/2018]. 20

SWANSON, W. J. et al. *High-temperature modeling method*. [S.l.]: Google Patents, 2007. US Patent 7,297,304. 25

- TRISCIUZZI, L. *APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NO SETOR NAVAL*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. 9
- WOHLERS, T. Wohlers report, 2008. state of the industry, annual worldwide progress report—wohlers associates. *Inc., Colorado*, 2009. 11
- WOHLERS, T.; CAFFREY, T. Wohlers report, 2015. *Inc., Colorado*, 2015. 13, 14, 19, 22, 25
- WU, W. et al. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3d-printed peek and a comparative mechanical study between peek and abs. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 9, p. 5834–5846, 2015. 9
- Xometry. *3D Printing: Consumer vs Professional*. 2015. Jornal periódico. 14
- ZHANG, Z. et al. Wear of peek composites related to their mechanical performances. *Tribology International*, Elsevier, v. 37, n. 3, p. 271–277, 2004. 9, 10

Anexos

ANEXO A – DATASHEET IRF3205

IRF3205

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	$^\circ\text{C}^{-1}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	8.0	m Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 62A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	44	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 62A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	146	nC	$I_D = 62A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	35		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	54		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	101	—		$I_D = 62A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	50	—		$R_G = 4.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	65	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	3247	—		$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	781	—		$V_{DS} = 25V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	211	—	pF	$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	1050 ⑥	264 ⑦	mJ	$I_{AS} = 62A, L = 138\mu H$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	110	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	390		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 62A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	69	104	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 62A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	143	215	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	—	—	—		Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 138\mu H$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 62A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 62A$, $di/dt \leq 207A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.
- ⑥ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑦ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

Absolute Maximum Ratings

DC Supply Voltage Range, (VDD) -0.5V to +20V
 (Voltage Referenced to VSS Terminals)
 Input Voltage Range, All Inputs -0.5V to VDD +0.5V
 DC Input Current, Any One Input $\pm 10\text{mA}$
 Operating Temperature Range -55°C to +125°C
 Package Types D, F, K, H
 Storage Temperature Range (TSTG) -65°C to +150°C
 Lead Temperature (During Soldering) +265°C
 At Distance 1/16 $\pm$ 1/32 Inch (1.59mm $\pm$ 0.79mm) from case for
 10s Maximum

Reliability Information

Thermal Resistance θ_{JA} θ_{JC}
 Ceramic DIP and FRIT Package 80°C/W 20°C/W
 Flatpack Package 70°C/W 20°C/W
 Maximum Package Power Dissipation (PD) at +125°C
 For TA = -55°C to +100°C (Package Type D, F, K) 500mW
 For TA = +100°C to +125°C (Package Type D, F, K) Derate
 Linearity at 12mW/°C to 200mW
 Device Dissipation per Output Transistor 100mW
 For TA = Full Package Temperature Range (All Package Types)
 Junction Temperature +175°C

TABLE 1. DC ELECTRICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS (NOTE 1)	GROUP A SUBGROUPS	TEMPERATURE	LIMITS		UNITS
					MIN	MAX	
Supply Current	IDD	VDD = 20V, VIN = VDD or GND	1	+25°C	-	0.5	μA
			2	+125°C	-	50	μA
			3	-55°C	-	0.5	μA
Input Leakage Current	IIL	VIN = VDD or GND	VDD = 20	1	+25°C	-100	nA
				2	+125°C	-1000	nA
				3	-55°C	-100	nA
Input Leakage Current	IIH	VIN = VDD or GND	VDD = 20	1	+25°C	-	100 nA
				2	+125°C	-	1000 nA
				3	-55°C	-	100 nA
Output Voltage	VOL15	VDD = 15V, No Load	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	-	50	mV
Output Voltage	VOH15	VDD = 15V, No Load (Note 3)	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	14.95	-	V
Output Current (Sink)	IOL5	VDD = 5V, VOUT = 0.4V	1	+25°C	0.53	-	mA
Output Current (Sink)	IOL10	VDD = 10V, VOUT = 0.5V	1	+25°C	1.4	-	mA
Output Current (Sink)	IOL15	VDD = 15V, VOUT = 1.5V	1	+25°C	3.5	-	mA
Output Current (Source)	IOH5A	VDD = 5V, VOUT = 4.6V	1	+25°C	-	-0.53	mA
Output Current (Source)	IOH5B	VDD = 5V, VOUT = 2.5V	1	+25°C	-	-1.8	mA
Output Current (Source)	IOH10	VDD = 10V, VOUT = 9.5V	1	+25°C	-	-1.4	mA
Output Current (Source)	IOH15	VDD = 15V, VOUT = 13.5V	1	+25°C	-	-3.5	mA
N Threshold Voltage	VNTH	VDD = 10V, ISS = -10 μA	1	+25°C	-2.8	-0.7	V
P Threshold Voltage	VPTH	VSS = 0V, IDD = 10 μA	1	+25°C	0.7	2.8	V
Functional	F	VDD = 2.8V, VIN = VDD or GND	7	+25°C	VOH > VDD/2	VOL < VDD/2	V
		VDD = 20V, VIN = VDD or GND	7	+25°C			
		VDD = 18V, VIN = VDD or GND	8A	+125°C			
		VDD = 3V, VIN = VDD or GND	8B	-55°C			
Input Voltage Low (Note 2)	VIL	VDD = 5V, VOH > 4.5V, VOL < 0.5V	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	-	1.0	V
Input Voltage High (Note 2)	VIH	VDD = 5V, VOH > 4.5V, VOL < 0.5V	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	4.0	-	V
Input Voltage Low (Note 2)	VIL	VDD = 15V, VOH > 13.5V, VOL < 1.5V	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	-	2.5	V
Input Voltage High (Note 2)	VIH	VDD = 15V, VOH > 13.5V, VOL < 1.5V	1, 2, 3	+25°C, +125°C, -55°C	12.5	-	V

NOTES: 1. All voltages referenced to device GND, 100% testing being implemented.
 2. Go/No Go test with limits applied to inputs.
 3. For accuracy, voltage is measured differentially to VDD. Limit is 0.050V max.

ANEXO B – DATASHEET CI4069