



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO DE PEEK

Autor: Ramon Carim Bevilacqua

Orientador: Prof. Dr. Cristian Vendittozzi

Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Jr.

Brasília, DF

2018



Ramon Carim Bevilacqua

PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO DE PEEK

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Cristian Vendittozzi

Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Jr.

Brasília, DF

2018

Ramon Carim Bevilacqua
PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO
DE PEEK/ Ramon Carim Bevilacqua. – Brasília, DF, 2018-
74 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Jr.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2018.

1. PEEK. 2. Additive Manufacturing. I. Prof. Dr. Cristian Vendittozzi. II.
Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Jr.. III. Universidade de Brasília. IV.
Faculdade UnB Gama. V. PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D
PARA IMPRESSÃO DE PEEK

CDU 02:141:005.6

Ramon Carim Bevilacqua

PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO DE PEEK

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 04 de julho de 2018:

Prof. Dr. Cristian Vendittozzi
Orientador

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias
Barcelos Júnior, UnB/ FGA**
Coorientador

**Prof. Dr. Rodrigo Arbey Muñoz
Meneses, UnB/ FGA**
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Resumo

O amplo desenvolvimento de tecnologias de *additive manufacturing*, tem se mostrado uma alternativa para o desenvolvimento de peças e componentes nos mais variados segmentos industriais. Devido a sua intensa popularização e facilidade de manuseio, hoje podemos encontrar impressoras 3D, que utilizam a tecnologia de fabricação por adição de materiais, moldando peças que podem ser de brinquedos infantis, até componentes estruturais utilizados na indústria aeroespacial. A partir da utilização do meio espacial ser cada vez maior, e tendendo a se tornar ainda mais otimizada, faz-se necessária a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e técnicas de fabricação que resultem em características físicas e químicas cada vez mais especializadas de acordo com suas necessidades. No caso do PEEK, poliéter-éter-cetona, se trata de um polímero com características físicas e químicas importantes, que se manifestam apresentando melhores resistências mecânicas e térmicas, o que possibilita sua utilização em segmentos normalmente dominados por compósitos e ligas metálicas, entre outros. Com o intuito de estabelecer parâmetros de adaptação de uma impressora comercial, o presente trabalho explora as dificuldades e soluções que possibilitam a impressão de materiais inovadores que possuem maior complexidade, como PEEK e ULTEM.

Palavras-chaves: PEEK, manufatura aditiva, materiais inovadores, componentes aeroespaciais, Impressora 3D.

Abstract

The extensive development of additive manufacturing technologies has proven to be an alternative for the development of parts and components in the most varied industrial segments. Due to its intense popularization and ease of handling, today we can find 3D printers, which use the technology of manufacturing by adding materials, molding pieces that can be children's toys, to structural components used in the aerospace industry. Since the use of the space environment is increasing, and tending to become more and more optimized, it is necessary to research and develop new materials and manufacturing techniques that result in physical and chemical characteristics increasingly specialized of according to your needs. In the case of PEEK, polyetheretherketone, it is a polymer with important physical and chemical characteristics, which manifests itself with better mechanical and thermal resistance, which makes it possible to use it in segments usually dominated by composites and metal alloys, among others. In order to establish parameters for adapting a commercial version, the present work explores the difficulties and solutions that make possible the printing of innovative materials that are more complex, such as PEEK and ULTEM.

Key-words: PEEK, additive manufacturing, innovative materials, aerospace components, 3D printer.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Chuck Hull à esquerda, ao lado do protótipo de impressora 3D.	20
Figura 2 – Chuck Hull com sua impressora 3D.	20
Figura 3 – A impressora 3D Objet1000 é capaz de imprimir em escala real.	21
Figura 4 – Diagrama do processo de fusão e deposição de material. Adaptado.	25
Figura 5 – Modelo de impressão SLS. Adaptado.	25
Figura 6 – Modelo de funcionamento SLA. Adaptado (CustonPartNet, 2009).	26
Figura 7 – Impressão por FDM.	27
Figura 8 – Impressora 3D modificada para PEEK. Adaptado.	28
Figura 9 – Modelos produzidos por PLA.	29
Figura 10 – Seleção dos parâmetros de impressão no software CubePro.	30
Figura 11 – Modelo de peça alterada por otimização topológica.	31
Figura 12 – Estrutura química do PEEK, NOHARA, 2005	31
Figura 13 – Duto de admissão de combustível feito de PEEK.	32
Figura 14 – Suporte em Airbus A350, componente de estrutura primaria desenvol- vido pela empresa Victrex.	32
Figura 15 – PEEK sendo usado em Suportes para asas, caixa central e aplicações do tanque de combustível.	33
Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de tração, norma ISO527-1.	35
Figura 17 – Reconhecimento dos componentes necessários	38
Figura 18 – Reconhecimento dos componentes do frame	38
Figura 19 – Início da montagem do frame	39
Figura 20 – Frame completo	39
Figura 21 – Início da instalação da eletrônica	40
Figura 22 – Instalação da extrusora e seus componentes	40
Figura 23 – Presença do acoplador rígido de PLA	41
Figura 24 – Novo acoplador, de aço, que foi usado para a substituição	42
Figura 25 – Junções de eixos e fusos feitos de MDF	42
Figura 26 – Novas junções de eixos e fusos, feitos de PETG	43
Figura 27 – Modelo da caixa térmica com e sem a impressora, apresentados em escala 1:18 dos desenhos técnicos desenvolvidos para a produção da caixa	43
Figura 28 – Sistema completo com medidas em centímetro	44
Figura 29 – Sistema completo com enumeração de componente e vista explodida	44
Figura 30 – Duto de resfriamento onde se localiza a eletrônica	45
Figura 31 – Caixa montada	47
Figura 32 – Caixa montada	47
Figura 33 – Instalação do duto e da plataforma onde se fixa a impressora	48

Figura 34 – Instalação do vidro da porta e sua respectiva vedação com silicone	48
Figura 35 – Fixação da impressora no suporte e corte no duto	49
Figura 36 – Possibilidade de remoção da impressora	49
Figura 37 – Realojamento da fonte da impressora	50
Figura 38 – Realojamento da fonte da impressora	50
Figura 39 – Disposição dos componentes eletrônicos finalizada	51
Figura 40 – Sistema após realojar a eletrônica e retirar o visor	51
Figura 41 – Lateral esquerda da impressora, onde se localizava grande parte dos componentes eletrônicos	52
Figura 42 – Sistema completo e com o visor fixado acima do tudo de resfriamento .	52
Figura 43 – Dissipador recebe furos para alojar termistor	53
Figura 44 – Derretimento do carro de extrusão devido às altas temperaturas	54
Figura 45 – Sistema completo e com o visor fixado acima do tudo de resfriamento .	54
Figura 46 – Bico de impressão chegando à 418 °C	55
Figura 47 – Parede do ambiente de impressão à 64 °C	55
Figura 48 – Impressão de corpo de prova em PEEK	56
Figura 49 – Corpo de prova descolando da mesa de impressão	56
Figura 50 – Corpo de prova apresentando arqueamento e deformidade de camadas .	57
Figura 51 – Modelo desenvolvido em software Catia, própria autoria.	57
Figura 52 – <i>Mesh</i> do corpo de prova no software Ansys 16.0, própria autoria. . . .	58
Figura 53 – <i>Details of Mesh</i> do corpo de prova no software Ansys 16.0, própria autoria.	58
Figura 54 – Força 1 estabelecida (1 Newton), própria autoria.	59
Figura 55 – Força 2 estabelecida (-1 Newton), própria autoria.	59
Figura 56 – Criação de material PEEK dentro do software Ansys 16.0, própria au- toria.	60
Figura 57 – Tensão de Von-Mises, própria autoria.	60
Figura 58 – Corpos de prova de PEEK	61
Figura 59 – Corpo de prova de PEEK fixado e com o extensômetro posicionado . .	62
Figura 60 – Arqueamento do corpo de prova de PEEK após a ruptura	62
Figura 61 – Posição atual e padrão do sensor de temperatura	63
Figura 62 – Corpos de prova antes dos ensaios	65
Figura 63 – Corpos de prova após serem ensaiados	65
Figura 64 – Gráfico da Média dos corpos de prova de PLA (Tenção no eixo das coordenadas e Deformação no eixo das abscissas)	66
Figura 65 – Corpos de prova antes dos ensaios	67
Figura 66 – Corpos de prova após serem ensaiados	67
Figura 67 – Gráfico 1 do corpos de prova de PEEK ((Tenção no eixo das coorde- nadas e Deformação no eixo das abscissas)	68

Figura 68 – Gráfico 2 do corpos de prova de PEEK (Tensão no eixo das coordenadas e Deformação no eixo das abscissas) 68

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros para o corpo de prova, norma ISO527-1.	35
Tabela 2 – Pesquisa de mercado para impressoras completas	36
Tabela 3 – Pesquisa de kits e peças avulsas	37
Tabela 4 – Calibração das temperaturas de trabalho	64

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	Additive manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	computer-aided design
Pa	Pascal
PC	Polycarbonato
FDM	Fused Deposition Modeling
PEEK	poliéter-éter-cetona
PET	Politereftalato de etileno
PLA	Ácido Polilático
PR	prototipagem rápida
SLA	Stereolithography
SLS	selective laser synthering
ULTEM	polímero da família polieteterimida
3D	três dimensões
3DP	Impressora Tridimensional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.1.1	Desenvolvimento da tecnologia	19
1.1.2	Additive manufacturing (AM)	20
1.2	Motivação e justificativa	21
1.3	Objetivos Gerais	21
1.4	Objetivos específicos	22
1.5	Organização do estudo	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva	23
2.2	Principais tecnologias de manufatura aditiva presentes no mercado	24
2.2.1	Modelagem por deposição de materia fundido (FDM) (Base sólida)	24
2.2.2	sinterização seletiva por laser (Base em pó)	25
2.2.3	Foto-solidificação(Base líquida)	26
2.3	Fabricação por adição de material	27
2.4	Características de impressora 3D para imprimir PEEK	27
2.5	Materiais produzidos por FDM	28
2.5.1	Características estruturais de componentes feitos por FDM	29
2.6	Otimização topológica	30
2.7	Poliéter-éter-cetona	31
3	METODOLOGIA	35
3.1	Estudo de Corpos de prova	35
3.2	Método de caracterização de materiais impressos em 3D	36
3.3	Desenvolvimento do Sistema	36
3.3.1	Orçamentos e compra	36
3.3.2	Montagem da impressora 3D	37
3.3.3	Modificação de componentes	41
3.4	Montagem do ambiente isolado	46
3.5	Impressão de material PEEK	53
3.6	Simulação	57
3.7	Resultados de Simulação	60
3.8	Ensaio de tração para o PEEK	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63

4.1	Calibração do sensor de temperatura realocado	63
4.2	Análise dos Ensaio de Tração	64
4.2.1	Corpos de prova de material PLA	64
4.2.2	Corpos de prova de material PEEK	66
4.3	Proposições de Melhorias para o equipamento	69
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A ciência dos materiais, hoje, é considerada um promissor ramo de estudo, visto que sua importância reflete no desenvolvimento das mais variadas tecnologias, praticamente todo produto que é desenvolvido deve considerar os materiais que deverão ser utilizados para atingir as expectativas que se busca. De forma análoga, o estudo e desenvolvimento de materiais se mostra ainda mais importante no nicho aeroespacial, mesmo porque, devido ao seu alto grau de otimização, o peso, a resistência e outras diversas características dos materiais a serem utilizados são de primeira importância para o funcionamento de sistemas.

1.1.1 Desenvolvimento da tecnologia

O desenvolvimento da tecnologia de fabricação aditiva está totalmente atrelado ao que chamamos de prototipagem rápida. Assim, podemos dizer que a fabricação por adição é uma tecnologia matriz, que dá origem a tecnologias que seguem esse princípio de criação de objetos tridimensionais a partir da adição de materiais. Pode-se dizer que essas tecnologias tiveram real início com o surgimento da primeira impressora 3D, que foi inventada por Chuck Hull em 1984, na fotografia da Fig. 1 com o protótipo da sua impressora. No começo a tecnologia tinha muitas imperfeições, porém mesmo não sendo completamente fidedigna se mostrava uma ótima alternativa para confecção de polímeros, visto que os processos tradicionais levavam de 6 a 8 semanas, ao passo que a nova tecnologia se desenrolava de forma muito mais rápida (DUARTE, 2014).

Continuando seus trabalhos, Hull, pouco tempo depois já tinha resolvido os problemas de seu protótipo e continuou criando diversas formas de impressão, posteriormente patenteando sua criação e inicializando a comercialização da tecnologia (DUARTE, 2014). Na Fig. 2, Hull anos depois, com sua criação.

Desde 2009, muitas patentes de tecnologias de fabricação aditiva têm expirado e por consequência, muitas empresas têm aproveitado para desenvolver máquinas de impressão 3D, que rapidamente se disseminam por médias e pequenas empresas, além de se tornarem até mesmo máquinas pessoais, visto que a ampla concorrência promoveu um rápido desenvolvimento das tecnologias e o barateamento das mesmas (RONCOLATO, 2014).



Figura 1 – Chuck Hull à esquerda, ao lado do protótipo de impressora 3D.

(DUARTE, 2014)

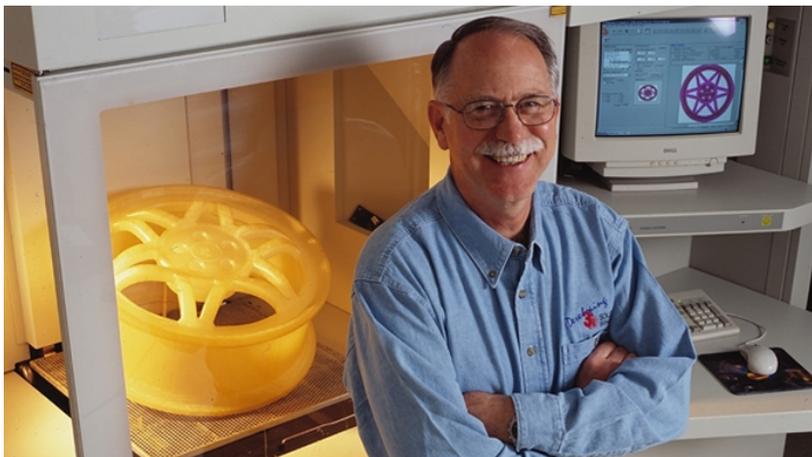


Figura 2 – Chuck Hull com sua impressora 3D.

(DUARTE, 2014)

1.1.2 Additive manufacturing (AM)

O processo de manufatura aditiva, ou fabricação por adição de material, se trata de um processo de criação de objetos pela deposição de camadas de determinados materiais a partir de um modelo previamente estabelecido por ferramentas e softwares de desenho assistido por computador (DAC) ou *computer-aided design* (CAD). Desta forma, o processo se mostra mais econômico que processos de usinagem no que diz respeito ao gasto de material, pois ao invés de gerar peças retirando material de um bloco maior, o que acarreta no gasto excessivo de materiais, no caso da fabricação por adição há uma perda de materiais muito menor por utilizar uma tecnologia que só usa o material que é necessário (VOLPATO, 2007). Na Fig. 3, exemplo de impressão 3D.



Figura 3 – A impressora 3D Objet1000 é capaz de imprimir em escala real.
(OBJECT, 2016)

1.2 Motivação e justificativa

Como justificativa desse trabalho, tem-se a possibilidade de inovação pela utilização de impressoras 3D de baixo custo para a manufatura de peças feitas de materiais plásticos de alta performance, como o PEEK e o ULTEM. Dessa forma, peças de materiais inovadores feitas com baixo custo, possibilitam o desenvolvimento de pesquisas no ramo de materiais aeroespaciais que poderão complementar a presente estudo.

Nesse sentido, busca-se desenvolver a metodologia de impressão dos referidos materiais, procurando fazer as mais simples modificações de sistema mas que beneficiem o mesmo de forma mais relevante. Devido a alta complexidade da impressão, a confecção de peças simples já é considerado um grande avanço pois envolve a solução de diversos problemas.

1.3 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo, montar e adaptar uma impressora 3D comercial, considerando todos os problemas que um usuário comum poderia enfrentar, além dos entraves com os quais poderia se deparar no que diz respeito a adaptação para impressão de materiais mais sofisticados. Além disso, busca avaliar e caracterizar o uso e fabricação de componentes aeroespaciais formados a partir do polímero Poliéter-éter-cetona – PEEK, um material ainda pouco conhecido, mas que se mostra bastante valioso graças às suas propriedades, podendo substituir outros materiais atualmente utilizados na industrial aeroespacial.

Além do interesse nas propriedades singulares encontradas no PEEK, um diferencial que reforça sua escolha é a sua possibilidade de fabricação de peças a partir da

aplicação por deposição de material fundido, ou *Fusion Deposition Modeling* (FDM), uma tecnologia de fabricação por adição de material em camadas sucessivas, mais conhecida por *additive manufacturing*.

Dessa forma, objetiva-se abordar os principais segmentos de tecnologias de fabricação por adição de materiais e suas principais características, além de desdobrar a utilização do PEEK, procurando mais informações sobre suas características químicas, físicas e mecânicas.

1.4 Objetivos específicos

Para a estruturação dos objetivos específicos que motivam este trabalho, destaca-se em primeiro plano o estudo bibliográfico para entendimento das técnicas já presentes no ramo, posteriormente avaliando possíveis soluções e adaptações que permitam a impressão de materiais de alta performance, dessa forma buscando:

- Desenvolver um sistema capaz de imprimir PEEK a partir da adaptação de uma impressora 3D comercial.
- Levantar possíveis características, problemas e soluções para conseguir impressões de boa qualidade.
- Fazer avaliações preliminares do material impresso.

1.5 Organização do estudo

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o manuscrito foi dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução como aonde nós nos encontramos. No segundo capítulo se evidencia a fundamentação teórica com a pertinente revisão bibliográfica sobre as tecnologias de prototipagem rápida, a técnica adotada no estudo e o material que foi tomado como objetivo de impressão. Já o terceiro capítulo é destinado a demonstrar a metodologia adotada para o trabalho em questão, onde pode-se encontrar o desenvolvimento do modelo, a montagem do sistema e a impressão do material. Para o quarto capítulo foi destinada a demonstração de resultados e suas respectivas discussões. Por fim, no quinto capítulo se encontram as conclusões adquiridas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo será abordada a fundamentação teórica e revisão bibliográfica pertinentes a elaboração de conceitos e tomada de decisões que serão elaboradas no decorrer do estudo. Para isso, encontram-se as principais tecnologias de prototipagem rápida e a técnica que foi escolhida para o estudo com suas configurações mais relevantes e a escolha do material.

2.1 Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva

Para avaliar as vantagens e desvantagens dessa tecnologia de fabricação, devemos ter em mente quais seriam as possibilidades para desenvolver peças ou protótipos que hoje em dia são utilizadas na indústria e ou em pesquisas acadêmicas. No caso, destacamos as técnicas padrão, onde é necessário fazer moldes de diferentes materiais para depois de trabalhar em diversas etapas, conseguir determinadas geometrias que algumas vezes ainda deverão ser novamente trabalhadas, fundidas, soldadas, coladas, etc. até adquirir um modelo final desejado. Em outro sentido, podemos situar as tecnologias ditas como de prototipagem rápida, onde por métodos de subtração, máquinas de usinagem esculpem blocos rígidos de material a partir de um modelo virtual previamente desenvolvido, dando origem a peças, ou por método de adição de materiais, onde peças podem ser formadas a partir da adição de camadas que são sucessivamente depositadas umas sobre as outras, novamente provenientes de modelos virtualmente elaborados.

No que diz respeito aos métodos de produção convencionais, uma grande desvantagem é o tempo de fabricação e o custo de desenvolvimentos de máquinas e moldes que devem ser manufaturados para cada geometria desejada. Isso faz com que produtos se tornem caros e mais difíceis de serem produzidos em pequena escala. Além disso, mais uma desvantagem é a de que normalmente não é viável produzir peças com geometrias mais complexas. No entanto, como vantagem das técnicas convencionais, podemos destacar o barateamento dos custos de produção quando se deseja produzir grandes números de peças, principalmente se as mesmas possuírem geometrias simplificadas.

Para o desenvolvimento de formas complexas, o uso de técnicas de CAD, simplificam bastante a manufatura de produtos. Porém, mesmo dentro das técnicas de prototipagem rápida, devemos destacar que a técnica de fabricação por adição se mostra mais econômica que a técnica de subtração, pois para a segunda, ocorrem grande perdas de material que normalmente poderiam ser utilizados. Já para a adição de material, a perda de materiais é praticamente insignificante, visto que só é adicionada a quantidade

de matéria que é necessária para a manufatura de cada modelo. Além do desperdício de material, é importante salientar que as técnicas de subtração normalmente tem algumas limitações para o desenvolvimento de certos modelos geométricos, visto que normalmente utilizam ferramentas que se encontram em altas rotações para o decorrer do processo, possuem barreiras físicas que dificilmente podem ser ultrapassadas, o que pode mais facilmente resolvido quando se utiliza técnicas de adição (deposição de camadas sucessivas).

Agora avaliando desvantagens da técnica de fabricação por adição, devemos considerar que os materiais utilizados na sua manufatura, como PLA, ABS ou PEEK, ainda são materiais considerados caros, o que desfavorece em linhas gerais a produção (VOLPATO, 2007).

2.2 Principais tecnologias de manufatura aditiva presentes no mercado

No ramo de *additive manufacturing* existem diversas tecnologias de produção, no entanto uma das maiores diferenças entre elas, está na forma na qual se encontra o material base, podendo ser visto em formato de base em pó, sólida ou até mesmo líquida. Sendo assim, aqui são descritos os princípios de funcionamento de uma tecnologia de cada seguimento de base.

2.2.1 Modelagem por deposição de materia fundido (FDM) (Base sólida)

A tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) é um método de manufatura aditiva patenteado pela Stratasys. A tecnologia FDM produz modelos conceituais, protótipos funcionais e peças para uso final em termoplásticos padrão, de engenharia e de alto desempenho. Para isso, a tecnologia usa temperaturas controladas onde filamentos de polímeros como o Ácido Polilático (PLA), a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o PEEK são fundidos e a partir de uma cabeça injetora móvel o material que é derretido e depositado camada por camada acima de uma plataforma normalmente fixa (ZEIN et al., 2002). Na Fig. 4 é descrito o processo de fusão e deposição do material.

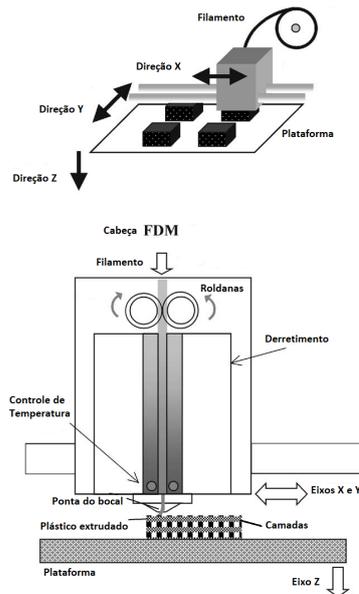


Figura 4 – Diagrama do processo de fusão e deposição de material. Adaptado.

(ZEIN et al., 2002)

2.2.2 sinterização seletiva por laser (Base em pó)

A tecnologia de sinterização seletiva por laser, ou *selective laser sintering* (SLS) é um processo de produção de peças e componentes a partir da fabricação de camadas obtidas de um modelo 3D previamente desenvolvido em computador. Dessa forma, o material base da construção se encontra em pó e é continuamente depositado em um anteparo, onde um laser incide de forma precisa, consolidando o modelo 3D (KRUTH et al., 2005). Na Fig. 5 é mostrado o seu funcionamento.

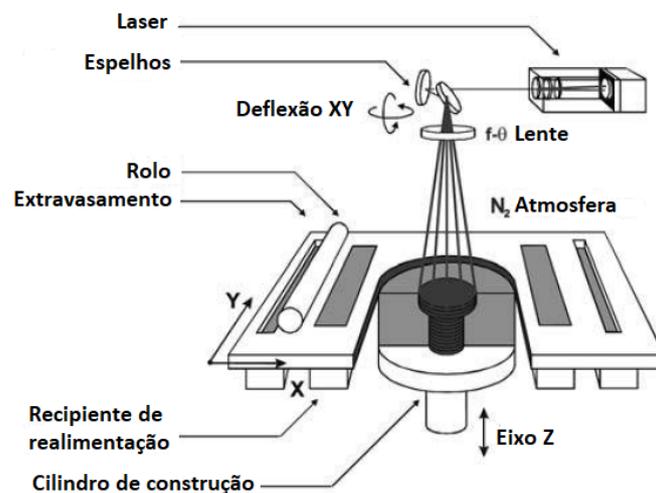


Figura 5 – Modelo de impressão SLS. Adaptado.

(KRUTH et al., 2005)

Como mostra o modelo, o sistema é alimentado por um cilindro de rolagem que é responsável pela correta deposição de pó acima da superfície onde ocorre a construção da peça, no caso o cilindro de construção. Enquanto isso o conjunto de laser e espelhos, se movimenta de acordo com a forma a ser produzida, consolidando o material e dando vida a novas peças.

2.2.3 Foto-solidificação(Base líquida)

A foto-solidificação, ou em inglês *Stereolithography* (SLA), é o processo onde a luz proveniente de um laser atinge o fundo transparente de um tanque onde se encontra uma resina fotopolimerizadora no estado líquido. O processo tem início com o tanque preenchido por uma resina líquida, em seguida um feixe de laser é direcionado ao tanque, de forma a incidir na resina líquida e de forma seletiva o laser promove a solidificação da mesma. Conforme as camadas e formas vão sendo criadas, a plataforma de construção vai sendo abaixada para dar início a novas camadas que vão sendo sucessivamente solidificadas (MARTINS, 2016). Na Fig. 6, modelo SLA.

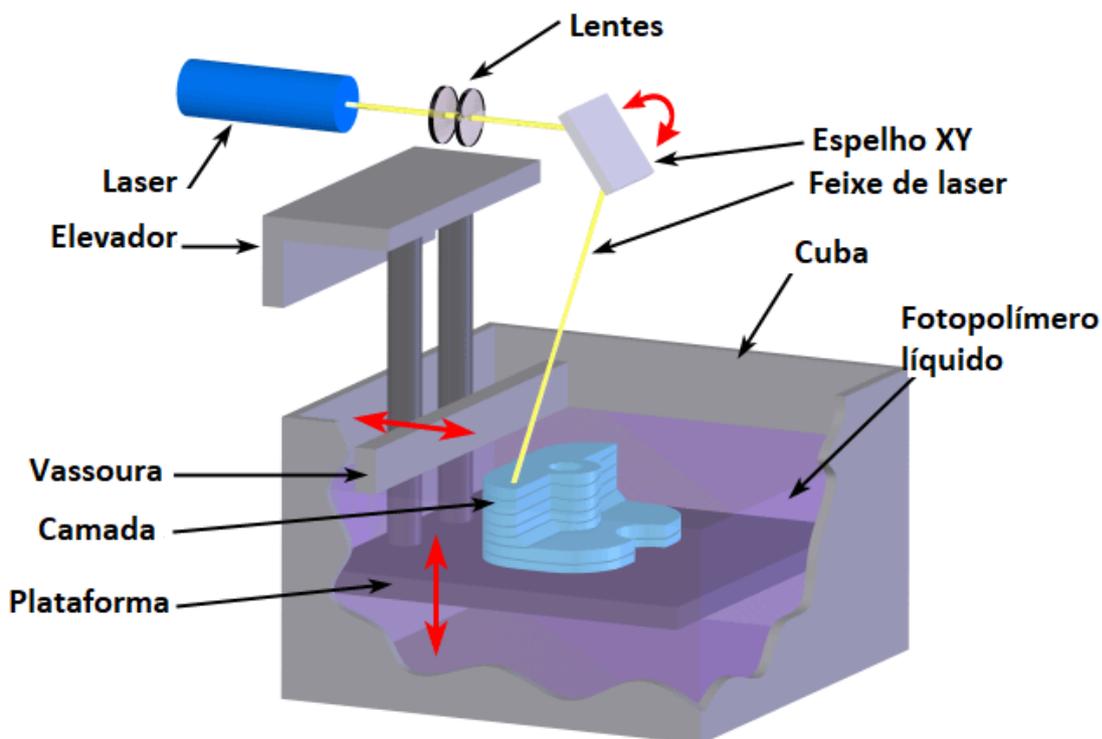


Figura 6 – Modelo de funcionamento SLA. Adaptado (CustonPartNet, 2009).

2.3 Fabricação por adição de material

Para o estudo em questão, será utilizada a tecnologia de *Fused Deposition Modeling* (FDM), também conhecida como modelização por deposição de material fundido. Nessa técnica, para a fabricação por adição de material, o que ocorre é o aquecimento de determinados materiais, normalmente utilizando polímeros que se encontram na forma de filamentos, os quais são gradativamente derretidos ao passo que são depositados em uma placa. A partir da utilização de um modelo previamente estabelecido virtualmente, as cabeças injetoras de material se movimentam acima da placa, onde vão adicionando o material em cada lacuna que deve ser preenchida, dessa forma sobrepondo camadas e formando o produto desejado.

Esse processo, mesmo podendo aparentar ser sofisticado, tem sido largamente disseminado pelo mundo pois se trata de uma tecnologia que se manteve durante muitos anos bloqueada por direitos de patente, hoje a patente caducou e barateou bastante o custo das chamadas impressoras 3D, podendo ser compradas por algumas centenas de reais. Na Fig. 7, exemplo da tecnologia.

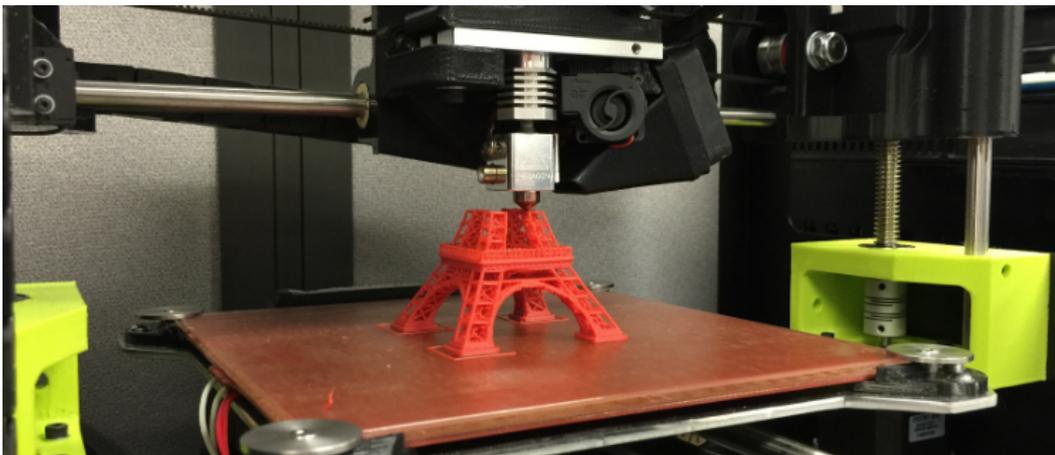


Figura 7 – Impressão por FDM.

(MARKETING, 2016)

2.4 Características de impressora 3D para imprimir PEEK

A princípio esperava-se que a forma de impressão para materiais poliméricos fosse a mesma, sejam eles de ABS, PLA ou até mesmo de PEEK, porém para o último material, devido suas singulares características térmicas, é necessário atentar para a grande diferença de temperatura de impressão em FDM. O PEEK é um material que possui um ponto de fusão de 334 °C, o que é consideravelmente superior ao ponto de fusão dos outros polímeros normalmente utilizados para a deposição de matéria fundido como PLA e ABS. Sendo assim, em uma impressão comum por FDM, usando ABS ou PLA, é necessário pro-

ver uma temperatura de impressão que se mostra próxima de 200 °C nos bicos de injeção, segundo o fabricante de filamentos Filament2print (FILAMENT2PRINT, 2015). Já para a impressão de peças formadas por PEEK, percebe-se que a temperatura de impressão é de 350°C à 450 °C nos bicos de injeção, sendo também necessário um maior aquecimento da placa de construção (chegando à 130°C) e ainda exigindo o uso de lâmpadas de aquecimento laterais responsáveis pelo controle térmico da área de construção a cerca de 80°C para evitar distorções severas e possíveis delaminações (VAEZI; YANG, 2015). Na Fig. 8, observa-se o modelo previamente descrito.

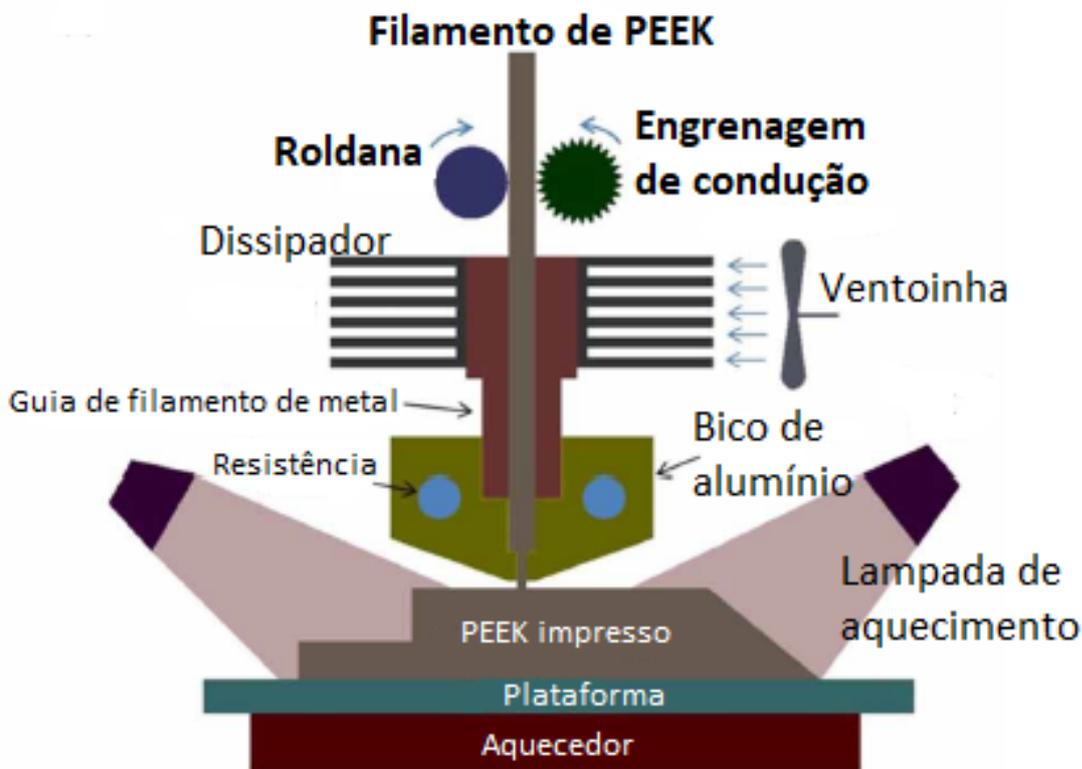


Figura 8 – Impressora 3D modificada para PEEK. Adaptado.
(VAEZI; YANG, 2015)

2.5 Materiais produzidos por FDM

A tecnologia de FDM é caracterizada por ter uma grande versatilidade no que diz respeito a fabricação de componentes, visto que a impressão por prototipagem rápida (PR) se desenvolve a partir de um modelo CAD tridimensional, a liberdade de produção de formas mais elaboradas é um grande atrativo para a tecnologia. No entanto, além da liberdade na criação de formas, essa tecnologia ainda possui outro grande pilar, a possibilidade de utilização de variados materiais. Atualmente, entre as matérias mais comuns em uso nessa tecnologia se destacam ABS e PLA, como modelo na Fig. 9, que mesmo cada um

tendo diversas variações de propriedades, de acordo com cada produtor, estes ainda são os dois mais fáceis de serem produzidos, com um custo benefício atraente. Ainda assim, quando há diferentes preocupações com características químicas e físicas para solicitações de uso, pode-se encontrar uma gama de alternativas de materiais, sendo eles o Nylon, Polycarbonato (PC), ULTEM (polímero da família polieterimida), o Politereftalato de etileno (PET) ou o PEEK (NOVAKOVA-MARCINCINOVA; KURIC,), (STRATASYS, 1999).



Figura 9 – Modelos produzidos por PLA.
(3DERS, 2016)

2.5.1 Características estruturais de componentes feitos por FDM

Procurando caracterizar o comportamento mecânico de modelos desenvolvidos e FDM, observa-se que existem algumas preocupações principais durante o processo de fabricação. Primeiramente deve-se quantificar a densidade de vazios nos planos principais de deposição do material fundido e em seguida administrar as ligações de filamentos entre filamentos que ocorre entre as sucessivas camadas de impressão. Dessa forma é necessário o correto controle de temperatura de extrusão, dos espaçamentos entre filamentos, da vazão do bico de injeção e da translação entre camadas (MARTÍNEZ et al., 2013).

Entre as características demonstradas pelos componentes, percebe-se uma grande diferença de propriedades mecânicas, dependendo da orientação das forças de solicitação. A principal diferença entre a resistência à solicitações mecânicas se dá pela orientação de impressão da peça, onde espera-se que a orientação vertical de impressão sempre tende a apresentar mais problemas, visto que devido ao procedimento de impressão se desenvolver em camadas, a interação entre as mesmas é mais fraca que nas outras direções, o que é justificado pelo fato de a camada precedente já se encontrar em estado de solidificação quando a seguinte é depositada (MARTÍNEZ et al., 2012).

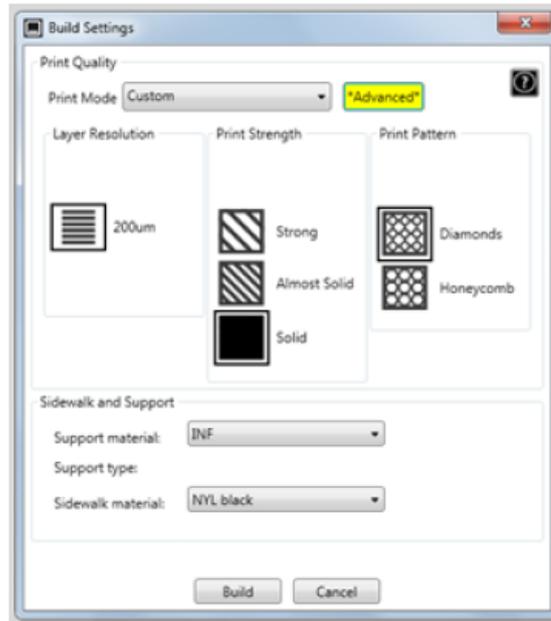


Figura 10 – Seleção dos parâmetros de impressão no software CubePro.

Além disso, outra característica das peças impressas por FDM é que dependendo da forma como elas são depositadas o produto da impressão pode ficar com características ainda mais assimétricas de acordo com a orientação, densidade das camadas e formato (MAGALHÃES; VOLPATO; LUERSEN, 2010). Na Fig. 10, mostra-se a escolha de parâmetros de impressão.

Sendo assim, pode-se dizer que materiais impressos por FDM não apresentam isotropia de forças, se mostrando anisotrópico e por consequência precisando ser caracterizado para cada direcionamento do corpo. Isso faz com que os resultados de simulação isotrópica não sejam totalmente acertados como se esperaria para outros materiais.

2.6 Otimização topológica

A otimização topológica é um método que busca definir numericamente a forma básica de uma certa estrutura mecânica para que a mesma consiga responder aos requisitos de projeto previamente estabelecidos de forma a atribuir o menor peso e o menor consumo de materiais, um exemplo é mostrado na Fig. 11. Desta maneira, a partir de uma forma básica estabelecida, chegamos a uma estrutura melhor dimensionada para os requisitos que deve atender (STUMP, 2006).

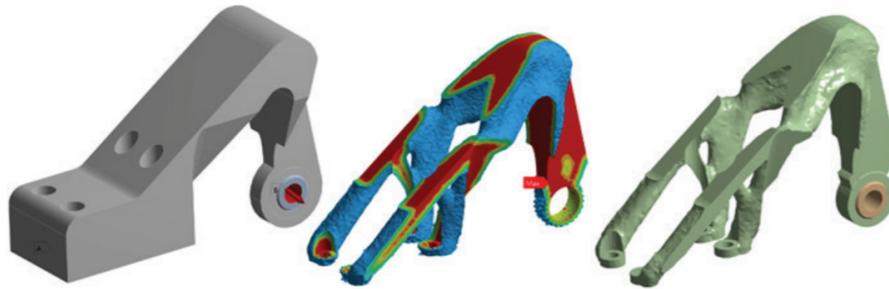


Figura 11 – Modelo de peça alterada por otimização topológica.

(STUMP, 2006)

2.7 Poliéter-éter-cetona

O PEEK é um polímero termoplástico que se caracteriza por uma alta temperatura de fusão, 334 °C, podendo ainda ser utilizado a temperaturas de até 250 °C por longos períodos sem apresentar mudanças significativas de propriedade (JONES; LEACH; MOORE, 1985). Apresenta ótima resistência química e relevantes propriedades mecânicas como boa resistência ao desgaste, rigidez importante, resistência à tração de 90 à 100 Mpa, baixo coeficiente de atrito e modulo de elasticidade de gira entorno de 4 à 24GPa (MAKEITFROM, 1999). A estrutura química está apresentada na Fig. 12.

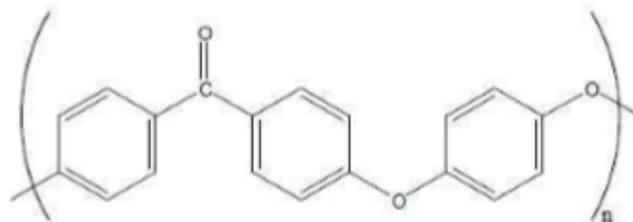


Figura 12 – Estrutura química do PEEK, NOHARA, 2005 .

Ademais das suas propriedades mecânicas interessantes para a utilização na engenharia, o PEEK se mostra como uma boa alternativa para a diminuição do tempo de produção de peças, visto que tecnologias de prototipagem rápida simbolizam um menor tempo de produção se comparado com outros materiais mais comumente utilizados, como ligas metálicas.

Ainda por consequência dessa substituição das ligas metálicas devemos destacar que as mesmas peças formadas por PEEK conseguem diminuir seu peso correspondente, podendo chegar a economia de 40% do peso de portas, suportes hidráulicos ou até mesmo em peças de junção, o que é uma grande preocupação quando falamos da indústria aeroespacial.

Como exemplo de sua utilização na indústria aeroespacial podemos citar a fabricação de um duto de admissão de combustível a partir de impressão 3D feito pela Solvay no ano de 2015. Fig. 13.



Figura 13 – Duto de admissão de combustível feito de PEEK.

([MARTENDAL, 2016](#))

Essa peça normalmente é feita de liga de alumínio, porém com a utilização de PEEK reforçado com 10% de fibra de carbono, alcançou-se aproximadamente 50% de economia de peso ainda tendo um bom desempenho mecânico ([MARTENDAL, 2016](#)).

Outros exemplos da utilização de componentes aeroespaciais feitos de PEEK estão começando a ser inseridos na produção dos aviões Airbus A350. Como mostrado nas Fig. 14 e 15, esse material tem sido empregado na manufatura de elementos de ligação como conectores, suportes, fixadores e grampos. dessa forma, reduzindo o peso, diminuindo os custos de desenvolvimento de componentes, aumentando a produtividade e em alguns casos diminuindo o tempo de montagem de sistemas ([BRADY, 2016](#)).



Figura 14 – Suporte em Airbus A350, componente de estrutura primaria desenvolvido pela empresa Victrex.

([BRADY, 2016](#))



Figura 15 – PEEK sendo usado em Suportes para asas, caixa central e aplicações do tanque de combustível.

(BRADY, 2016)

Baseado no sucesso dos componentes feitos de PEEK, alguns tipos desse material começam a ser produzidos em massa por empresas aeroespaciais como a Airbus, ajudando a diminuir peso, atingindo menores custos e aumentando a velocidade de produção.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será abordada a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos. Dessa forma, encontra-se a elaboração dos corpos de prova, o desenvolvimento do sistema com suas modificações pertinentes, a montagem do ambiente isolado para atingir as especificações do material e a impressão de material PEEK com seus respectivos ensaios de tração.

3.1 Estudo de Corpos de prova

Para a simulação de solicitação mecânica, adota-se um corpo de prova para ensaios de tração, conforme a padronização ASTM, designação D638. Dessa forma, busca-se definir primeiramente em software, propriedades de material, como coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Assim, os corpos de prova têm espessura de 7 milímetros, sendo rígidos ou semirrígidos, utilizamos o ensaio tipo 1 como mostrado na Fig. 16 e na Tab. 1 (STANDARD et al., 2003).

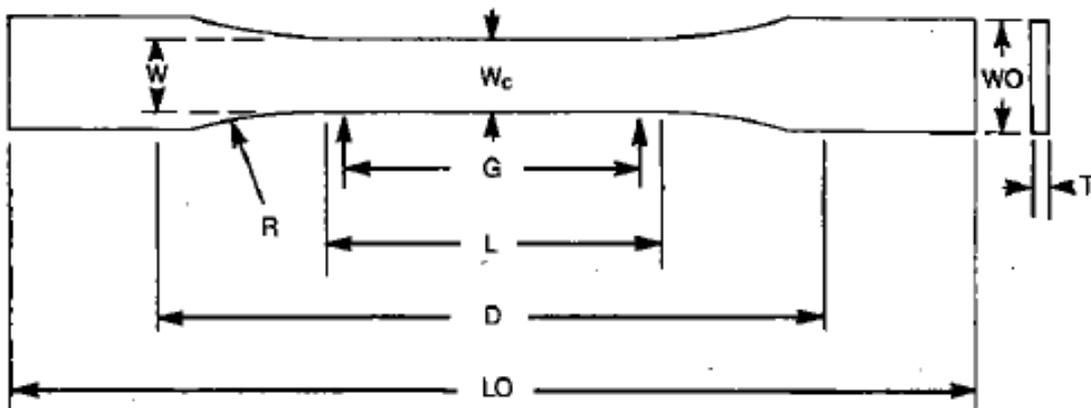


Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de tração, norma ISO527-1.

Tabela 1 – Parâmetros para o corpo de prova, norma ISO527-1.

Dimensões	Tipo 1
W (Largura da seção estreita)	13 (0,50)
L (Comprimento da seção estreita)	57 (2,25)
WO (Largura geral)	19 (0,75)
LO (Comprimento geral)	165 (6,5)
G (Comprimento do calibre)	50 (2,00)
D (Distância entre apertos)	115 (4,5)
R (raio da faixa)	76 (3,00)

3.2 Método de caracterização de materiais impressos em 3D

De acordo com o formato padrão anteriormente citado, modela-se o corpo de prova osso de cachorro em software Catia, utilizado para testes experimentais de tração. Em seguida importa-se a geometria para o software ansys, define-se as condições de malha, atribui-se uma força em umas das extremidades longitudinais e coloca-se a força igual e com direção oposta na extremidade longitudinal contrária. Em seguida faz-se a simulação das solicitações.

3.3 Desenvolvimento do Sistema

3.3.1 Orçamentos e compra

Para um melhor aproveitamento dos recursos empregados no projeto, a primeira medida a ser tomada foi pesquisar de forma eficiente quais eram os fornecedores presentes no Brasil que poderiam atender as demandas para a compra de kit para montagem de impressora 3D, de peças avulsas e de impressoras montadas. Feito isso, os mesmos foram contatados para a apresentação de orçamentos e prazos de entrega. Já no começo das pesquisas de preço, as opções de impressoras montadas foram descartadas pois apresentavam grandes aumentos de preço quando comparadas as outras opções. Tab. 2.

Tabela 2 – Pesquisa de mercado para impressoras completas

Modelo	Preço	Frete	Total	Prazo de entrega	País
Prusa I3 M201	1187,82	1844,22	3032,04	11/abr	China
Graber I3	1789	Grátis	1789	4 dias úteis	Brasil
XYZ DAVINCI	2975	-	2975	-	-
GRABER PRÓ	2013	38,8	-	10 dias úteis	Brasil
Graber i3 R2t2	2299	Aguardo resp.	-	-	Brasil
Anet A8	1900	Grátis	1900	3 à 6/04	Brasil
Prusa i3	1900	Grátis	1900	27 à 29/03	Brasil
Graber i3	1698,97	Grátis	1698,97	-	Brasil
Prusa i3	1115,97	Grátis	1115,97	10 à 20 dias úteis	China
RepRap i3 Graber	1899	Grátis	1899	-	Brasil
RepRap Prusa	1800	Aguardo resp.	-	-	Brasil
Prusa i3 Pro	945,99	Grátis	945,99	10 à 20 dias úteis	Brasil

Dessa forma, como ilustrado na Tab. 3, foram feitos levantamentos dos preços de kits e de peças avulsas, que manifestavam características semelhantes por custos comparáveis.

Por fim, a opção considerada mais interessante para o projeto foi um kit Graber i3 completo no valor de 1700,00 reais, onde estaria contemplada a estrutura em MDF cru, Kit de nivelamento automático da mesa e display com entrada para cartão SD, eixos,

hotend, placa controladora Ramps 1.4 com dissipadores, Drivers A4988 com dissipadores e Arduino mega 2560, 5 motores Nema 17 com 4kgf, mesa aquecida, parafusos, porcas e demais componentes necessários. Como informações adicionais a impressora selecionada apresenta volume de impressão 200 X 200 X 180 mm (L X C X A) e uma resolução de impressão de até 0.05mm.

Tabela 3 – Pesquisa de kits e peças avulsas

Equipamento	Quantidade	Valor unitário R\$	Valor total R\$
Kit: Arduino + Ramps 1.4 + Drivers	1	189,9	189,9
Kit: Arduino + Ramps 1.4 + Drivers	1	127,45	127,45
Motores de Passo	5	62,7	313,5
Cooler 60mm com suporte em ABS	1	25,99	25,99
Endstop Mecânico com conectores	3	9,9	29,7
Mesa MK2B com resistor, termister, cabos e molas	1	109,9	109,9
Sensor Nivelamento de precisão detecção 10mm	1	49,9	49,9
Fonte 12V 30A Bivolt	1	117,99	117,99
Kit: Rolamentos, correias, polias e acopladores	1	115	115
Kit: 12x Rolamento Linear LM8UU	1	54,9	54,9
Correia GT2 para o eixo X e Y	1	11,8	11,8
Polia GT2 em Alumínio	1	14,9	14,9
Acoplamento Flexível para eixo Z em Alumínio	1	15,9	15,9
Kit: 4x Rolamento 608zz Blindado	1	7,99	37,89
Kit: 6x Guias Lineares 8mm	1	98	133,9
Barra Roscada M5 em INOX 300mm	1	15	49,9
Barra Roscada M5 em INOX 300mm	1	49,9	49,9
Kit: 2x Barra Roscada, 6 Guias + parafusos, porcas e arruelas	1	175,9	175,9
Hotend compl. em metal e Extrusora 1,75	1	169	169
Frame/Estrutura em alumínio + parafusos	1	499	547
Frame/Estrutura em mdf	1	98,8	98,8
Suporte da mesa em alumínio	1	70	99,9
Carrinho Eixo X em Alumínio	1	140	140
Kit Graber i3 completo	1	1700	1700

3.3.2 Montagem da impressora 3D

A impressora 3D foi adquirida desmontada, sendo encontrado o kit com todos os seus componentes. Sendo assim, foi necessário fazer todo o reconhecimento e levantamento

de componentes antes de sua montagem. Em seguida iniciou-se o trabalho de montagem do frame de MDF. Fig. 17 e 18.



Figura 17 – Reconhecimento dos componentes necessários

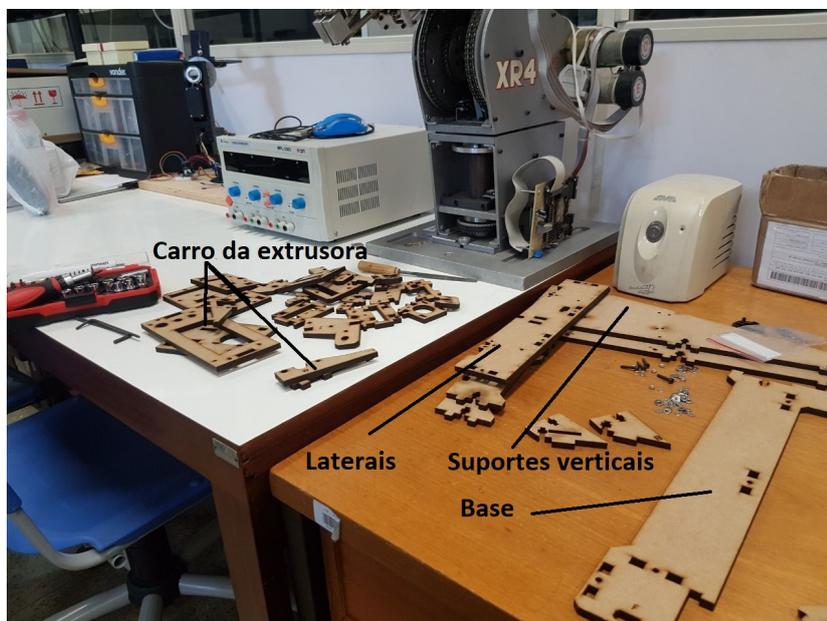


Figura 18 – Reconhecimento dos componentes do frame

Para o reconhecimento dos componentes foi feita a listagem de eletrônica, peças do frame, contagem de parafusos e porcas, entre outros. Em seguida, iniciou-se a montagem da impressora, começando pelo frame de MDF como mostra a Fig. 19 e após sua estruturação, montagem dos motores e display. Fig. 20.



Figura 19 – Início da montagem do frame

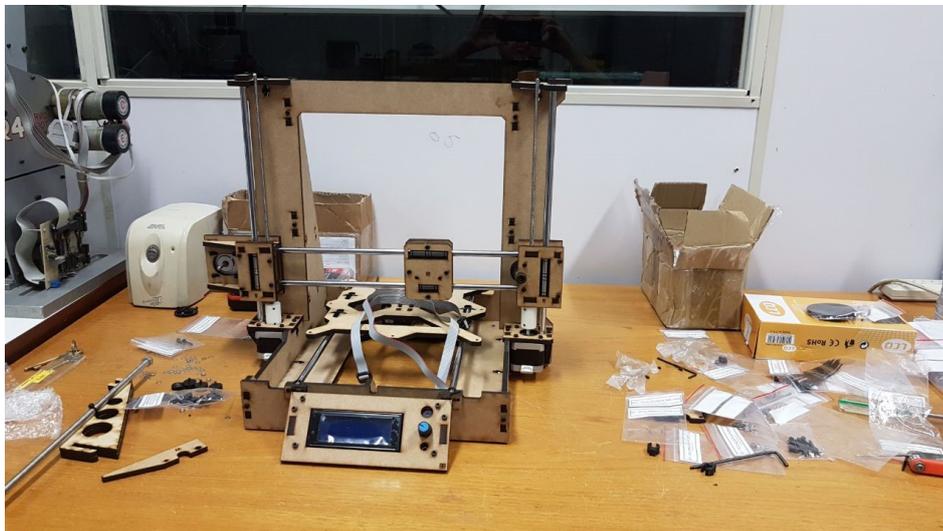


Figura 20 – Frame completo

Continuando a montagem, deu-se a instalação da eletrônica, distribuição dos fios e conectores, além da fixação das placas arduino e ramps, Fig. 21. Posteriormente sendo fixada a extrusora, fusos e eixos. Fig. 22.

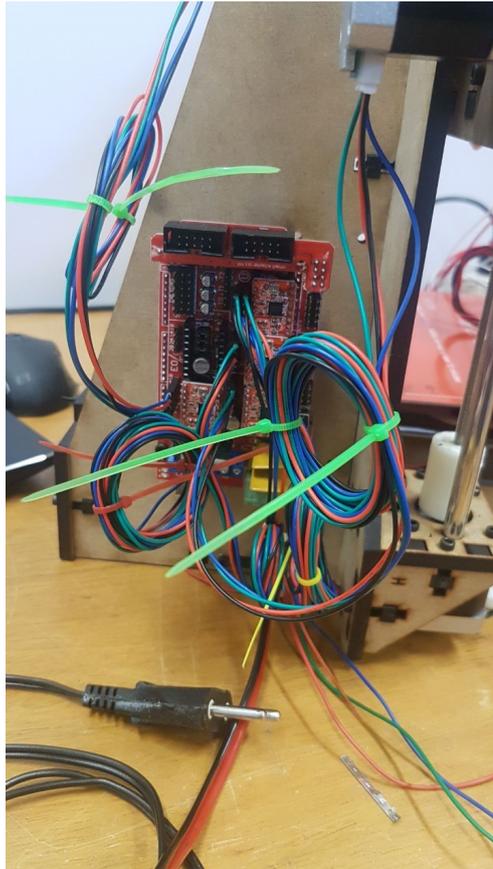


Figura 21 – Início da instalação da eletrônica

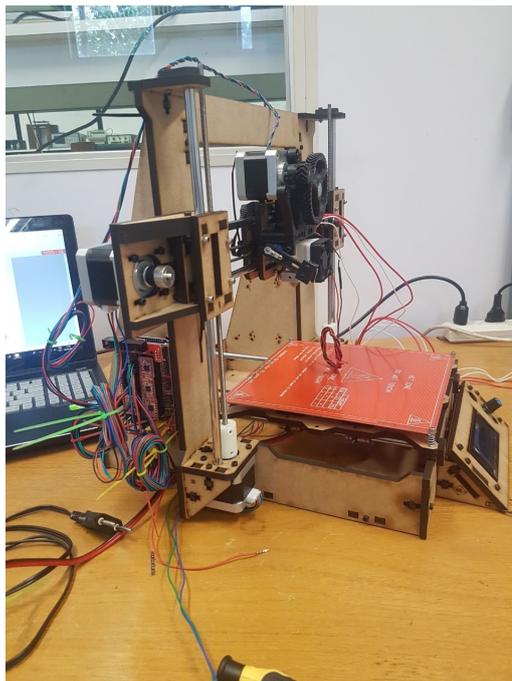


Figura 22 – Instalação da extrusora e seus componentes

3.3.3 Modificação de componentes

Para o sistema em questão, identificou-se que a impressão apresentava certas inconsistências e instabilidades no que concerne a deposição do material fundido. Sendo assim, o sistema responsável pela modificação de valores verticais de posicionamento do bico extrusor foi investigado e remontado diversas vezes com o intuito de solucionar o problema. Como o problema não apresentava grande melhora, a primeira medida a ser tomada foi a substituição dos acopladores rígidos feitos de PLA por acopladores de metal com o centro flexível, que aumentam a correção de diferenças entre os dois fusos e barras de eixo presentes no eixo z da impressora. Fig. 23 e 24.



Figura 23 – Presença do acoplador rígido de PLA

Com a troca dos acopladores a impressora apresentou melhora na impressão, porém ainda não se fazia completamente correta, fazendo com que a investigação de problemas continuasse. Quando se dava a remontagem e aperto de parafusos do eixo x, o sistema apresentava certa melhora de estabilidade, porém a mesma voltava a apresentar problemas pouco tempo depois. Os motores responsáveis por elevar e abaixar o carro extrusor não conseguiam trabalhar de forma sincronizada e então o sistema apresentava inclinações laterais que comprometiam a qualidade da impressão. Fig. 25.

Como forma de solucionar problema, foi pensado um jeito de substituir as junções dos fusos e eixos para que os mesmos conseguissem trabalhar de forma mais estável. Por fim, foram adquiridos modelos em formato CAD que pudessem substituir as junções de forma que seria necessária a mudança do menor número de peças do sistema. Assim, as peças selecionadas foram impressas em uma impressora 3D alternativa com o material



Figura 24 – Novo acoplador, de aço, que foi usado para a substituição

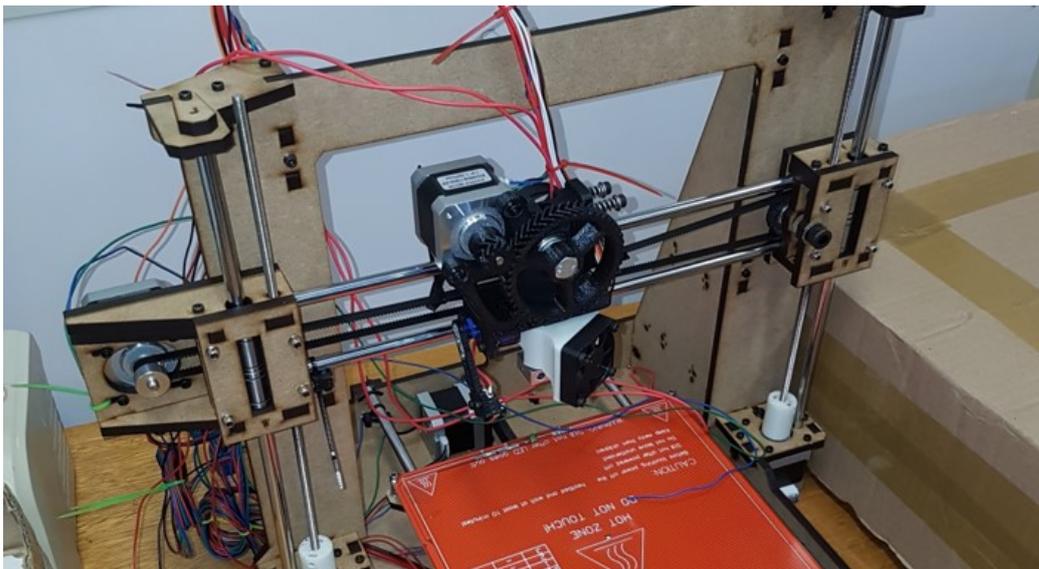


Figura 25 – Junções de eixos e fusos feitos de MDF

PETG, dessa forma proporcionando grande melhora da rigidez e estabilidade das referidas junções, ainda conseguindo alcançar boas temperaturas como é necessário no sistema. Fig. 26.

Como conclusão da montagem das novas peças percebeu-se que os problemas que acometiam a impressão foram sanados e pode-se dizer que até mesmo a qualidade das impressões foi melhorada se compararmos aos resultados de quando o sistema de madeira ainda estava estável.

De forma paralela às mudanças de peças e calibrações que foram feitas na impressora, também foi desenvolvido o trabalho de desenho em CAD, desenho técnico, elabora-

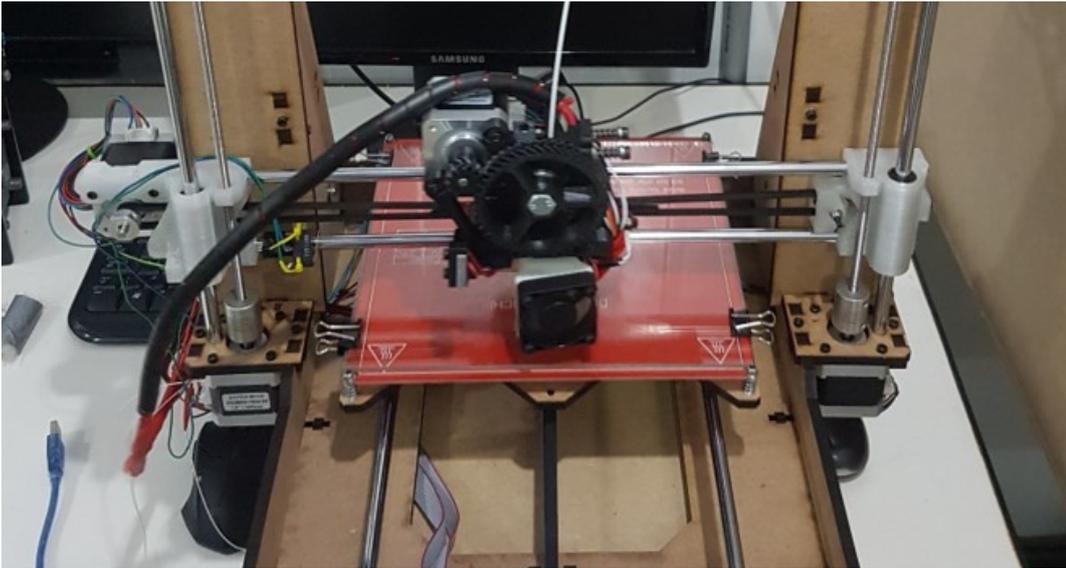


Figura 26 – Novas junções de eixos e fusos, feitos de PETG

ção de cálculos e montagem do sistema de controle térmico, onde a impressora deve ser estabelecida para a impressão do material PEEK. Assim, como mostra nas Fig. 27, o sistema elaborado, foi pensado para envolver toda a impressora e manter a temperatura ambiente estável e em torno de 80°C.

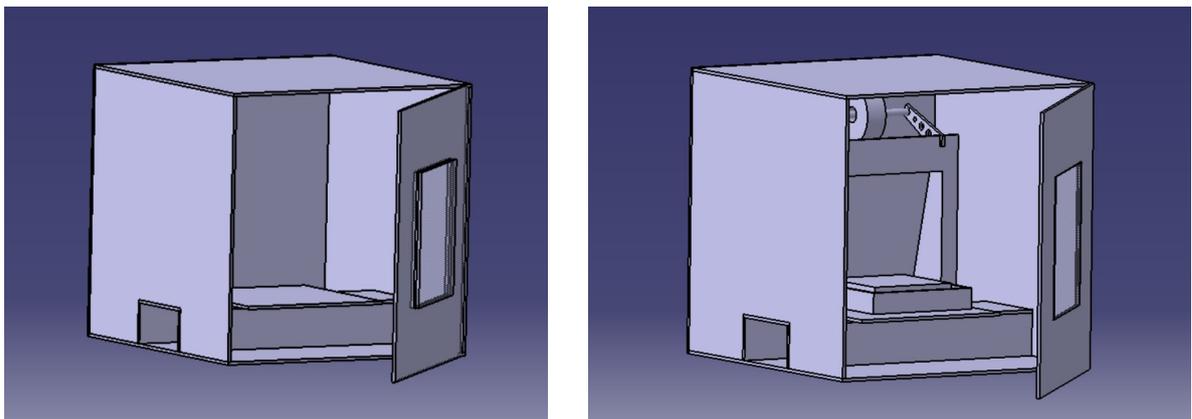


Figura 27 – Modelo da caixa térmica com e sem a impressora, apresentados em escala 1:18 dos desenhos técnicos desenvolvidos para a produção da caixa

Como desenhos técnicos desenvolvidos para o modelo, se encontram as Fig. 28 e 29, apresentadas em escala 1:18 e com medidas em centímetros.

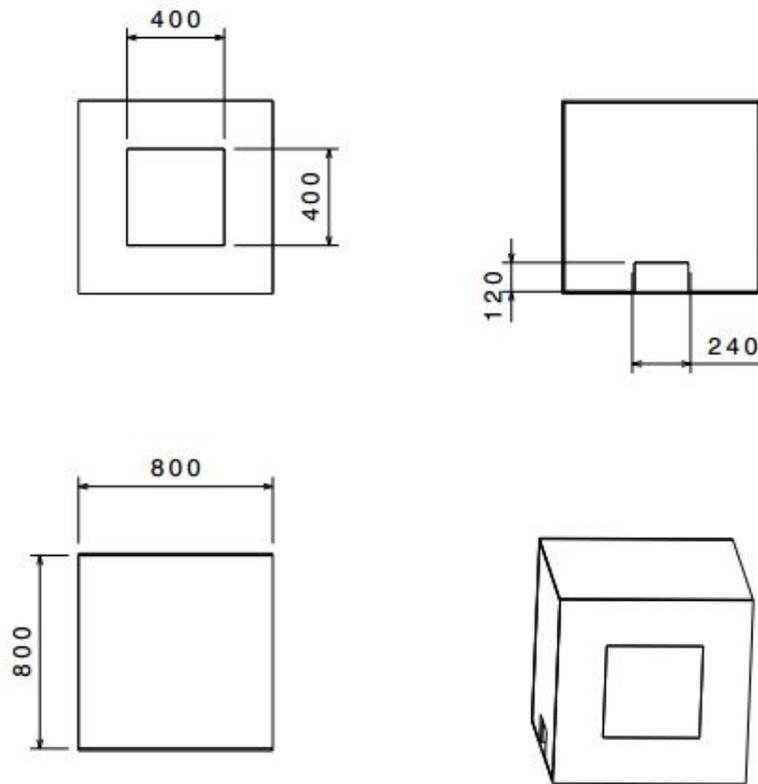
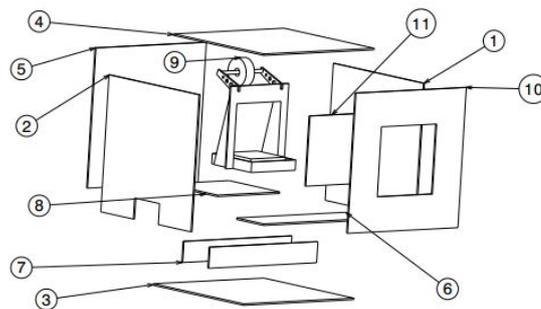


Figura 28 – Sistema completo com medidas em centímetro



Bill of Material: Product1

Quantity	Part Number	Number
1	Menor 2	1
1	menor	2
1	Part3	3
1	Part4	4
1	Part5	5
1	mesa	6
1	Lateral mesa	7
1	Segunda mesa	8
1	Impressora	9
1	Porta	10
1	Vidro	11

Figura 29 – Sistema completo com enumeração de componente e vista explodida

Como a impressora tinha sua eletrônica muito exposta ao ambiente e o mesmo terá sua temperatura elevada, foi criado o duto que se localiza abaixo da impressora e é onde se aloja toda a eletrônica que poderia ser removida do ambiente aquecido. Dessa forma, além de retirar a eletrônica mais sensível à altas temperaturas do ambiente aquecido, também se promove um ambiente onde a mesma pode fazer suas trocas de temperatura de forma eficiente. Fig. 30.

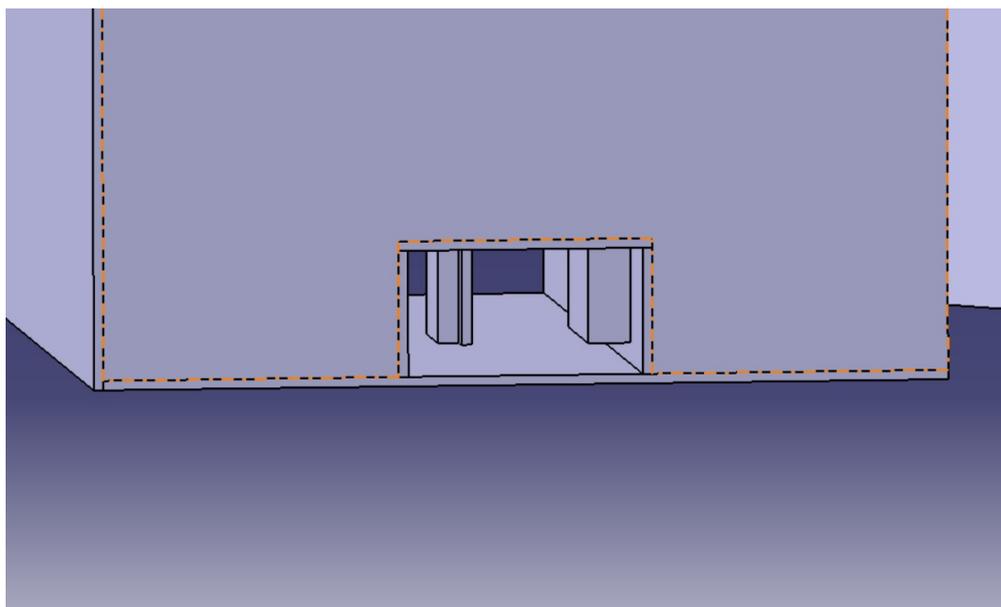


Figura 30 – Duto de resfriamento onde se localiza a eletrônica

Como forma de avaliar o desempenho da caixa térmica, foi calculado o tempo que a mesma demoraria para ser aquecida até os 80°C solicitados pelo material. Dessa forma foi considerado o formato apresentado anteriormente.

Considerando que o sistema em questão está com sua porta fechada, e que devido ao fato de ser feito de madeira e vidro, que são materiais isolantes térmicos, podemos considerar que não haverá perdas significativas de calor a partir da parede e da janela para o meio, podemos determinar o tempo necessário para que o sistema atinja a temperatura ideal.

As dimensões internas da caixa são $78,2\text{ cm} \times 78,2\text{ cm} \times 80\text{ cm}$, totalizando $489,22\text{ cm}^3$ ou $0,48922\text{ m}^3$. Além disso, a caixa está no laboratório demSistemas Espaciais do campus Gama, apresentando 100 KPa de pressão e temperatura inicial 23°C . Para o secador, seguimos as especificações de que o mesmo dissipe 800W . Usando o valor R de tabela para essa situação.

Sendo assim, considerando que não há entrada nem saída de ar, nem transferência de calor por condução, convecção nem radiação, temos os seguintes cálculos:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sistema} \quad (3.1)$$

$$W_{in} = m(u_2 - u_1) = mc_v(T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

A massa do ar:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{(100kPa) * (0.48922m^3)}{(0.287kPa * \frac{m^3}{kg} * k)(273 + 23)K} = 0.5759 \quad (3.3)$$

Utilizando o C_v , o trabalho elétrico desempenhado pelo secador é:

$$W_e = (0.5759kg)(0.718 \frac{kJ}{kg * ^\circ C})(80 - 23)^\circ C = 23kJ \quad (3.4)$$

Por fim, para encontrar o tempo necessário, temos:

$$W_e = \dot{W}_e * t \Rightarrow 23kJ = (0.8 \frac{kJ}{s})(t) \quad (3.5)$$

$$t = 28.75s \quad (3.6)$$

3.4 Montagem do ambiente isolado

Tendo então os cálculos e modelo do sistema bem definidos, foi feita a compra de MDF de 9 mm e dobradiças para a porta, possibilitando a montagem do mesmo. A primeira etapa foi fazer os cortes desejados utilizando serra rotativa e a serra tico-tico. Seguindo com o trabalho, foi feita a montagem da caixa por meio de parafusos para madeira. Fig. 31 e 32.



Figura 31 – Caixa montada



Figura 32 – Caixa montada

Depois da montagem da caixa, foram feitas as modificações que eram necessárias para a instalação do duto de resfriamento da eletrônica, como pode ser observado na Fig. 33. Além do duto, foi instalado o vidro da porta que facilita a visualização durante a impressão de peças. Fig. 34.



Figura 33 – Instalação do duto e da plataforma onde se fixa a impressora

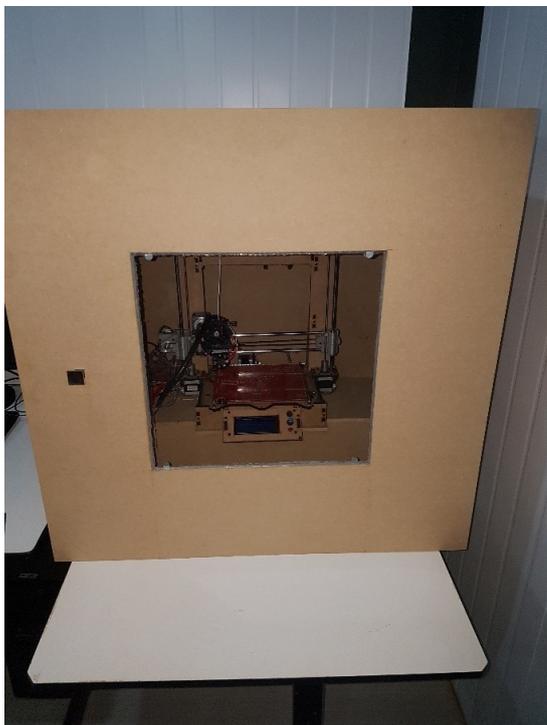


Figura 34 – Instalação do vidro da porta e sua respectiva vedação com silicone

Com o duto bem estruturado, foi feita a fixação da impressora no suporte, conferiu-se as medidas e a ergonomia da mesa e foi considerada satisfatória para a impressão de peças, além de possibilitar a manutenção e potenciais trocas de peças.

Em seguida foi feito o corte da madeira que suporta a impressora para facilitar a remoção e manuseio do sistema. Fig. 35.

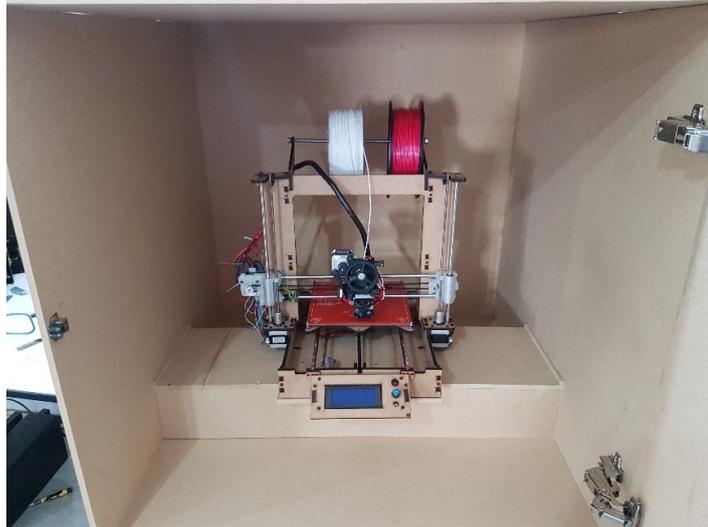


Figura 35 – Fixação da impressora no suporte e corte no duto

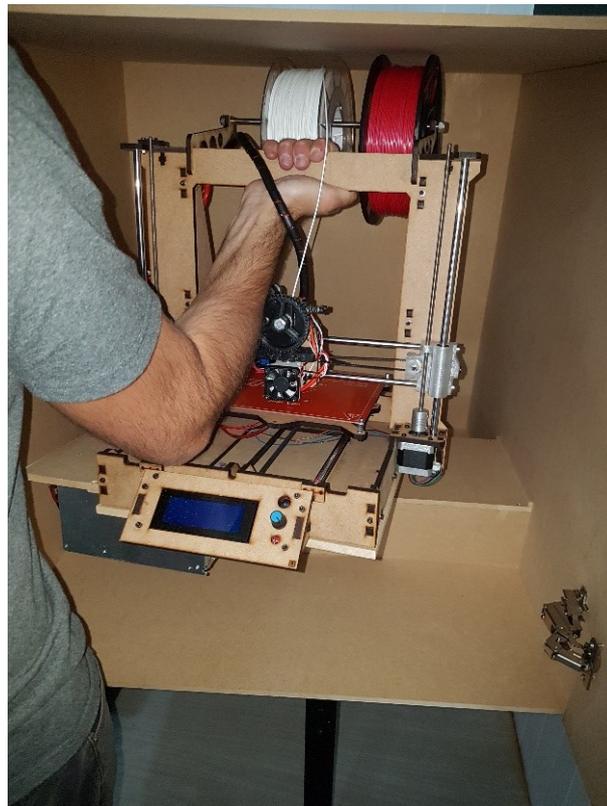


Figura 36 – Possibilidade de remoção da impressora

Como mostra a Fig. 36, a impressora pode ser completamente removida da caixa de forma relativamente simples. Dessa forma, favorecendo possíveis manutenções.

Depois que o sistema se encontrava completamente definido, a impressora foi retirada e realojou-se a eletrônica na parte inferior do suporte. Fig. 37, 38 e 39.

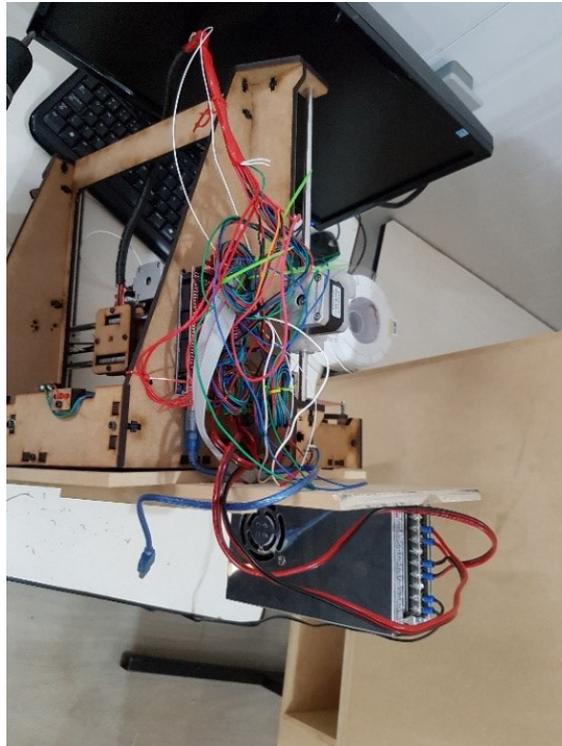


Figura 37 – Realojamento da fonte da impressora



Figura 38 – Realojamento da fonte da impressora



Figura 39 – Disposição dos componentes eletrônicos finalizada

Como resultado do realojamento da impressora pode-se perceber que o sistema ficou mais organizado e visualmente mais limpo. Dessa forma, além de favorecer um melhor resfriamento da eletrônica que é uma parte sensível a altas temperaturas, também evita possíveis choques mecânicos. As Fig. 40 e 41 mostram a conclusão do trabalho.

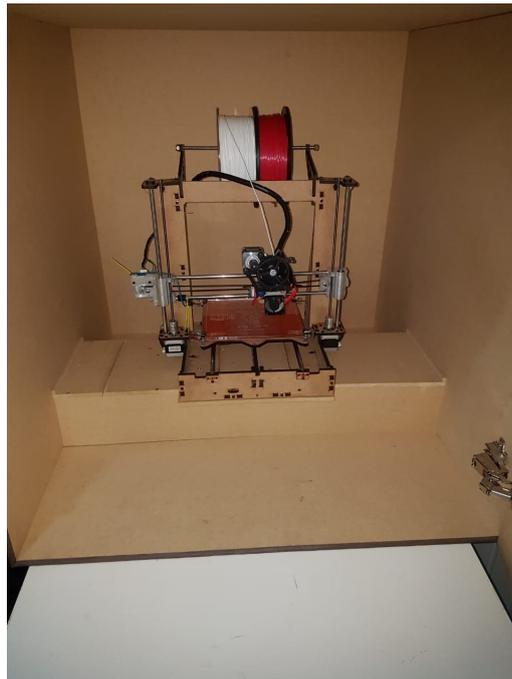


Figura 40 – Sistema após realojar a eletrônica e retirar o visor

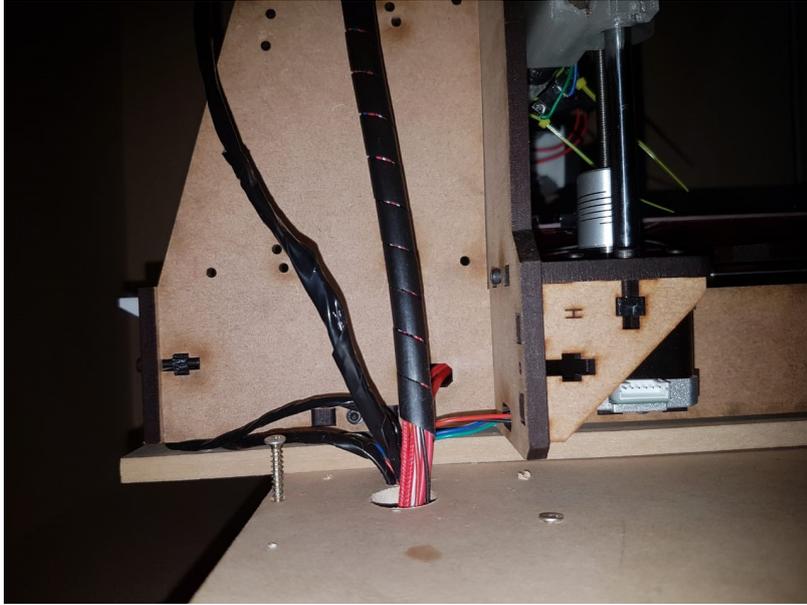


Figura 41 – Lateral esquerda da impressora, onde se localizava grande parte dos componentes eletrônicos

Por fim, na Fig. 42 pode-se visualizar a instalação do visor na parede externa da caixa e a porta do duto de resfriamento, que pode ser fechada quando o sistema não está operando.

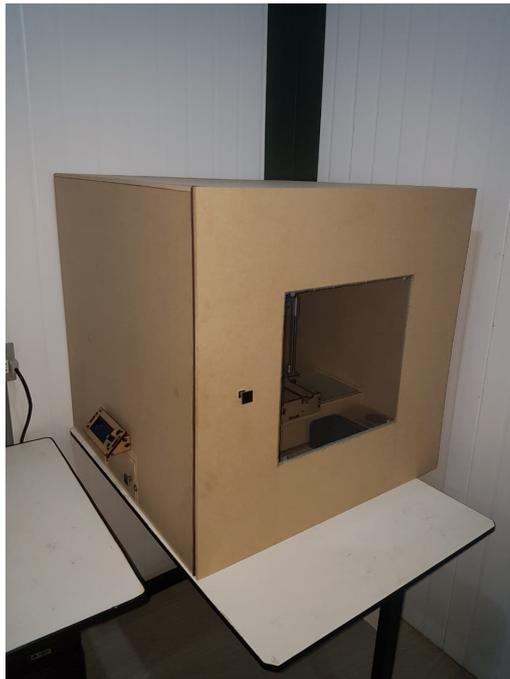


Figura 42 – Sistema completo e com o visor fixado acima do tudo de resfriamento

3.5 Impressão de material PEEK

Para a impressão do PEEK, buscou-se respeitar as características que o fabricante informava. Sendo assim, o mesmo deveria apresentar uma temperatura de 420 °C no bico de impressão, 120 °C na mesa de deposição do material e 80 °C no ambiente em que se dá a impressão. Para alcançar a referida temperatura na mesa de deposição foi necessário fazer uma pequena alteração nos parâmetros de impressão do software Repetier, no entanto para as demais não foi tão simples. Primeiramente, deve-se notar que o alcance máximo de medição do termistor presente no sistema, modelo Ntc 3950 é de 300 °C o que inviabiliza uma possível configuração para extrapolar em cerca de 50% seu ambiente de atuação. Pensando nisso, a atitude adotada para substituir o menor número de componentes presentes, foi modificar o local de medição da temperatura e desse modo não extrapolar os referidos 300 °C. Como mostra a Fig. 43 foram feitos furos para alojar o termistor no meio do dissipador de temperatura que dessa forma exerceria seu papel sujeito a temperaturas mais baixas.



Figura 43 – Dissipador recebe furos para alojar termistor

A princípio a medida de realojar o sensor, seguida de sua correta fixação para promover uma boa condução de calor seria suficiente para solucionar a questão. Quando foram realizados testes de temperatura sem a atuação do cooler, o sistema conseguia atingir seus 420 °C sem maiores problemas. No entanto, o mesmo se comportava de forma incontrolável quando recebia influência de sua ventilação, não conseguindo se manter estável nas temperaturas e não atingindo os 420 °C por perder muito calor no dissipador. Uma medida que foi então adotada a título de teste, foi a tentativa de impressão com o cooler desligado, o que fez com que o sistema atingisse sua temperatura ótima, porém derreteu parte do carro de impressão que era feito de PLA. Fig. 44.

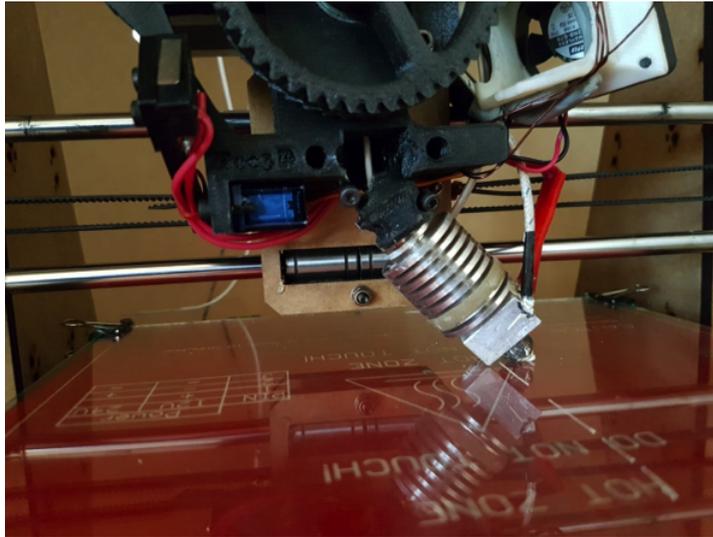


Figura 44 – Derretimento do carro de extrusão devido às altas temperaturas

A medida seguinte, foi pensar em uma forma de conseguir fixar o dissipador com materiais que poderiam ser submetidos a temperaturas mais altas e elaborar uma forma de distanciar o cooler do dissipador circular, de forma que a resistência que aquece o bico extrusor não fosse atingida pela ventilação. Como mostra na Fig. 45 foi usado um novo dissipador e dessa forma o sistema obteve sucesso ao atingir a temperatura necessária.

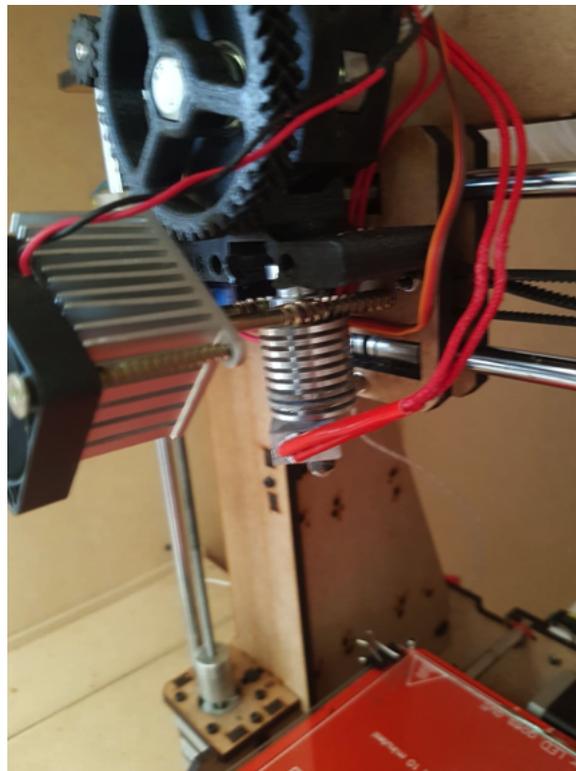


Figura 45 – Sistema completo e com o visor fixado acima do tudo de resfriamento

Como mostra na Fig. 46 foi instalado um termopar adicional que faz a medição da

temperatura no bico extrusor, assim pode-se notar que agora o sistema possui a medição de temperatura em dois locais pertinentes, evitando problemas e assegurando que atinja a temperatura que se deseja.



Figura 46 – Bico de impressão chegando à 418 °C

Através de um outro sensor de temperatura foram feitas várias medições durante a impressão do PEEK. Essa medições não foram completamente fidedignas pois sofria muita influência da temperatura refletida no vidro, no entanto, Como mostra a Fig. 47 os 80 °C ainda assim não foram atingidos, o que provavelmente afetou a qualidade de impressão



Figura 47 – Parede do ambiente de impressão à 64 °C

Mesmo não atingindo todas as especificações do fabricante, foi possível adquirir impressões como mostra a Fig. 48.

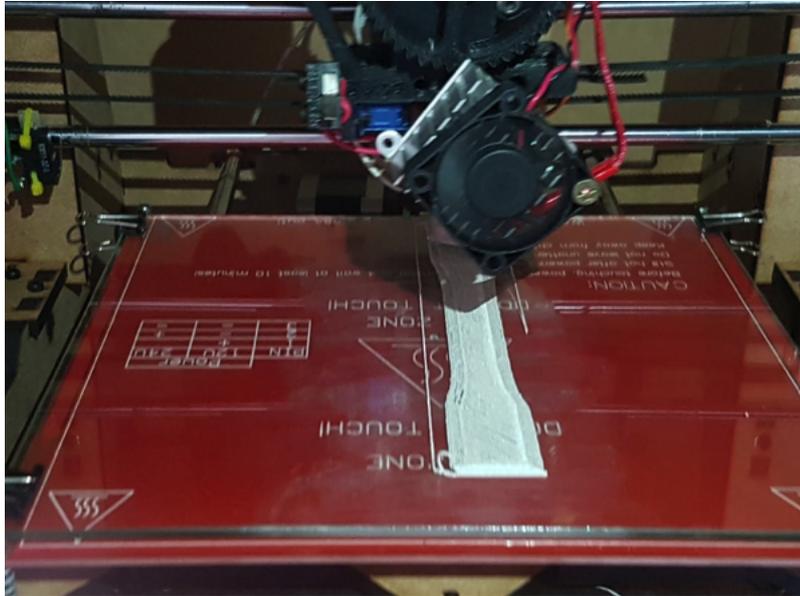


Figura 48 – Impressão de corpo de prova em PEEK

Devido a impossibilidade de atingir as especificações do fabricante, verificou-se que a qualidade das impressões foi gravemente atingida. Como mostra nas Fig. 49 e 50 a peça se descola da mesa de impressão e apresenta deformações provavelmente inerentes a retração do material, que é causada pela baixa temperatura do ambiente.

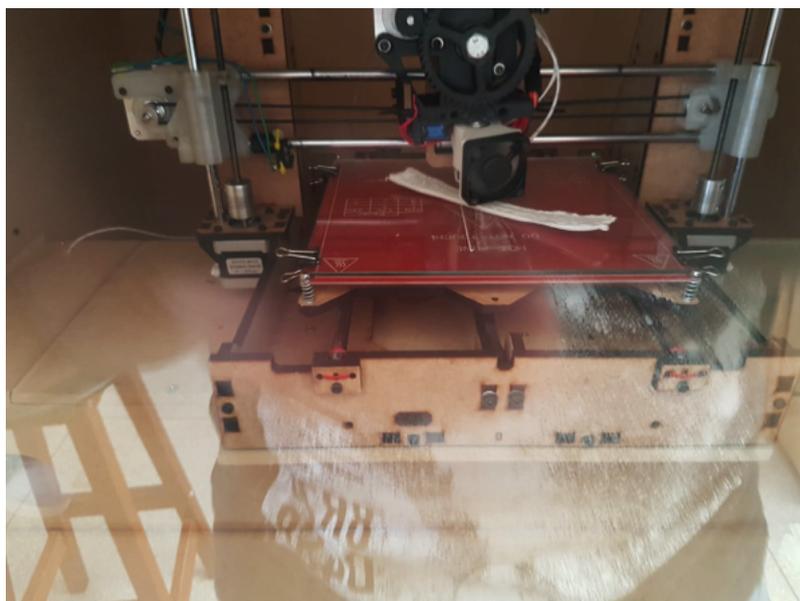


Figura 49 – Corpo de prova descolando da mesa de impressão



Figura 50 – Corpo de prova apresentando arqueamento e deformidade de camadas

3.6 Simulação

De acordo com o modelo previamente definido no estudo de corpo de prova para ensaios de tração, o corpo de prova foi desenvolvido em software e Catia, Fig. 51, e em seguida importado para Ansys 16.0.

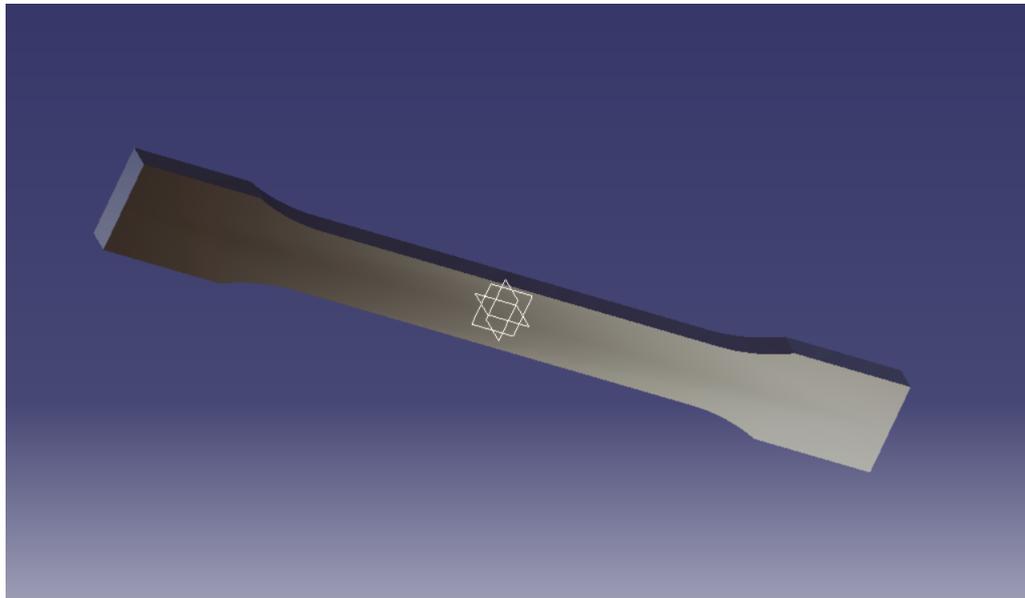


Figura 51 – Modelo desenvolvido em software Catia, própria autoria.

Para o estudo da malha do modelo, Fig.52. Para os tipo de elemento, o programa considerou: 1728 SOLID186, 24 SURF154 24 e 24 COMBIN14. Já o de tamanho do elemento utilizado foi o tipo fino para criar uma malha que fosse mais uniforme e por

consequência mais bem calculada pelo programa. A mesma apresentou características de 9527 nós e um total de 1728 elementos. Outros detalhes da malha se encontram na Fig. 53.

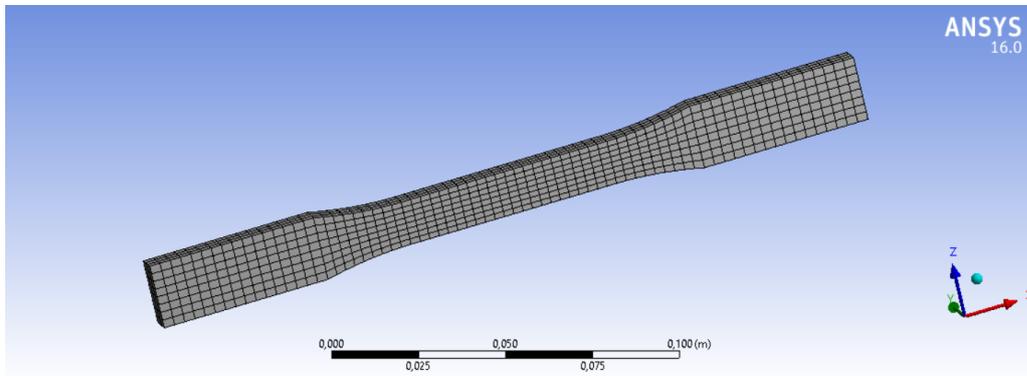


Figura 52 – *Mesh* do corpo de prova no software Ansys 16.0, própria autoria.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Fun...	Off
Relevance Center	Fine
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	7,e-003 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Pa...	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assem...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refr...	No
Automatic Mesh Based...	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing Toleran...	Default
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	9527
<input type="checkbox"/> Elements	1728
Mesh Metric	None

Figura 53 – *Details of Mesh* do corpo de prova no software Ansys 16.0, própria autoria.

Continuando a simulação, optou-se por utilizar duas forças que apresentassem mesmo valor, conforto mostra-se nas Fig. 54 e 55 , porém direções opostas, localizadas

nas extremidades longitudinais do corpo de prova, o que imita as solicitações de um ensaio de tração, onde o corpo de prova é tracionado dessa maneira. Para o teste foram escolhidas as forças de 1 Newton. Vale ressaltar que as Fig. 54 e 55 se tratam da mesma simulação, o que também poderia ser feita com uma extremidade fixada e sendo tracionada de apenas um lado.

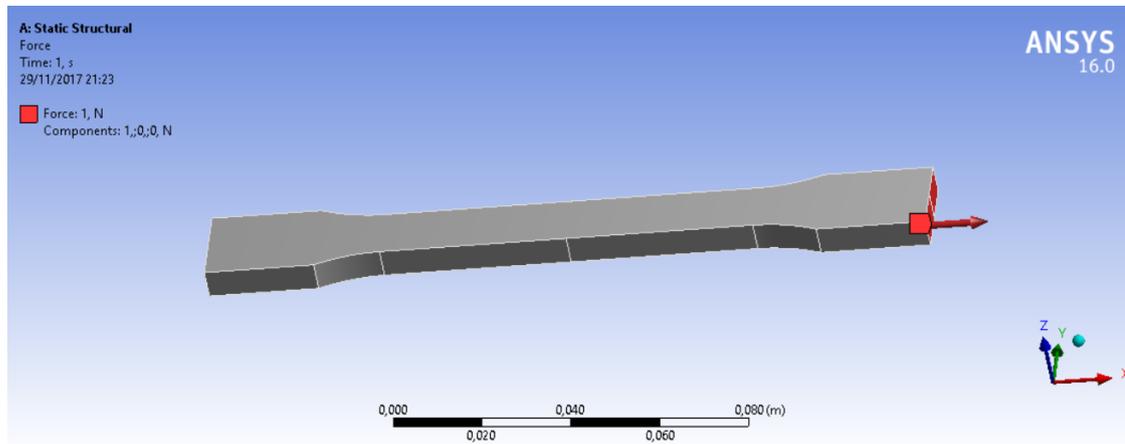


Figura 54 – Força 1 estabelecida (1 Newton), própria autoria.

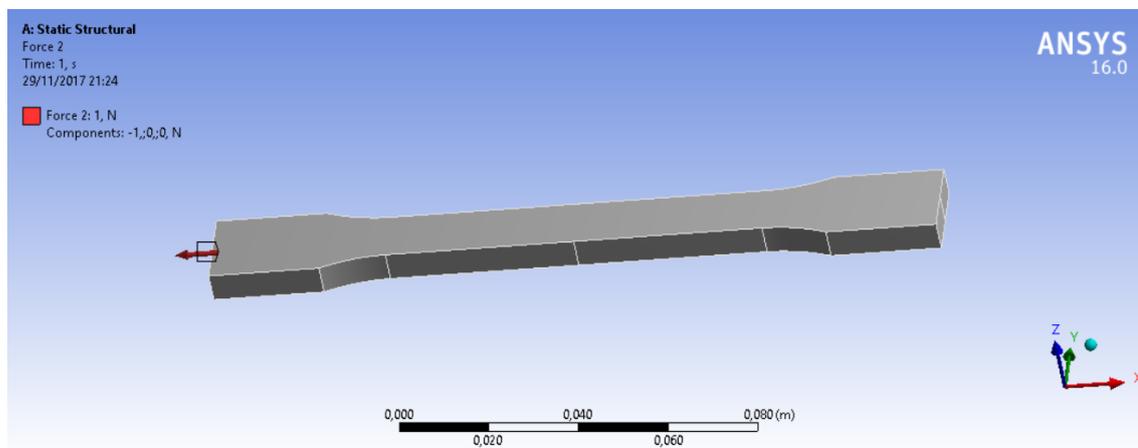


Figura 55 – Força 2 estabelecida (-1 Newton), própria autoria.

Além da atuação das forças, foi necessário criar um novo material dentro do programa, para isso foi usada a configuração de material isotrópico, o que simplifica a simulação porém continua gerando uma resposta quantitativa boa para prever a atuação das forças no corpo. Para a caracterização do material, foi necessário entrar com as grandezas de densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson do material, Fig. 56, os quais foram encontrados no catálogo de venda de materiais da empresa Goodfellow. (GOOD-FELLOW, 2017).

Densidade de $1,32 \text{ g/cm}^3$, módulo de Young de 3950 Mpa e Coeficiente de Poisson de 0,3931.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
A	B	C	D	
1	Contents of Engineering Data		Description	
2	Material			
3	PEEK		PEEK ISOTROPIC	
4	Structural Steel		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: PEEK				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1,32	g cm ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus ...		
5	Young's Modulus	3950	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,3931		
7	Bulk Modulus	6,158E+09	Pa	
8	Shear Modulus	1,417E+09	Pa	
9	Field Variables			
10	Temperature	Yes		
11	Shear Angle	No		
12	Degradation Factor	No		
13	Orthotropic Elasticity			

Figura 56 – Criação de material PEEK dentro do software Ansys 16.0, própria autoria.

3.7 Resultados de Simulação

Como já era esperado para a simulação, percebe-se que o corpo de prova é solicitado longitudinalmente, imitando o que aconteceria em um teste de tração. Além disso, observa-se que a tensão máxima acomete a parte central da peça, o que é justificado pelo propoital estreitamento da seção transversal e é desejado para o melhor desenvolvimento dos testes. De acordo com a simulação obtida, Figura 57, pela tensão de Von-Mises, conclui-se que a tensão máxima é de 11395 Pa e a tensão mínima é de 5427,3 Pa.

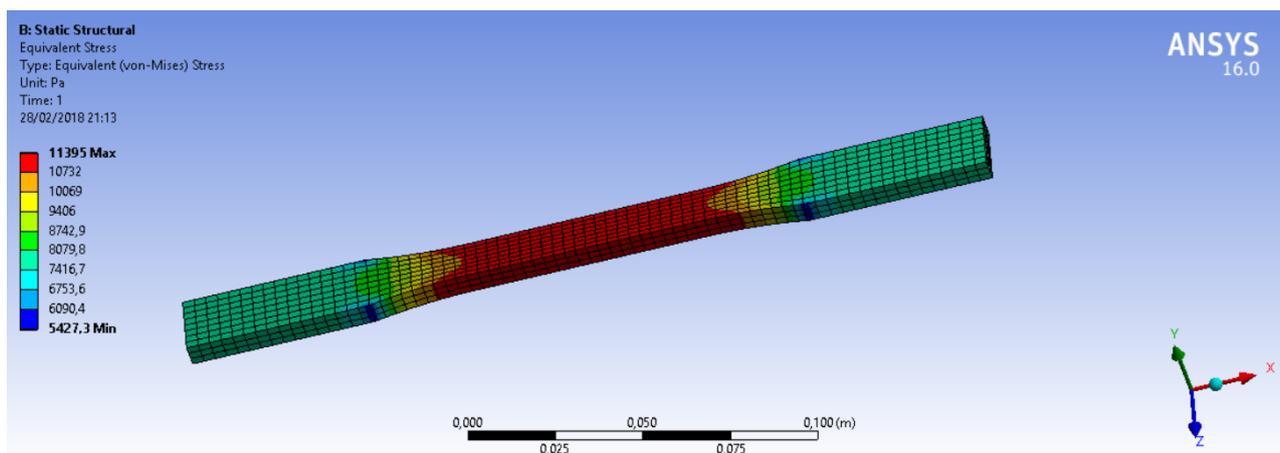


Figura 57 – Tensão de Von-Mises, própria autoria.

Deve-se ter em mente que os valores alcançados na simulação possuem divergências qualitativas de comparados com os corpos ensaiados, visto que as forças atribuídas não

são as mesmas providas pela máquina de tração. Isso não foi uma preocupação pois como se trata de uma simulação isotrópica, que possui as mesmas características mecânicas em todas as direções, a mesmas já deveria divergir seus valores do teste real. Todavia, as maiores tensões se mostram no meio da peça e dessa forma podemos esperar sua ruptura real na mesma região.

3.8 Ensaios de tração para o PEEK

Mesmo apresentando problemas na impressão, os corpos de prova adquiridos foram testados com ensaios de tração que são mostrados a seguir. Para isso, como mostrado na Fig. 58 foram usados 2 corpos, devidamente marcados para os ensaios.

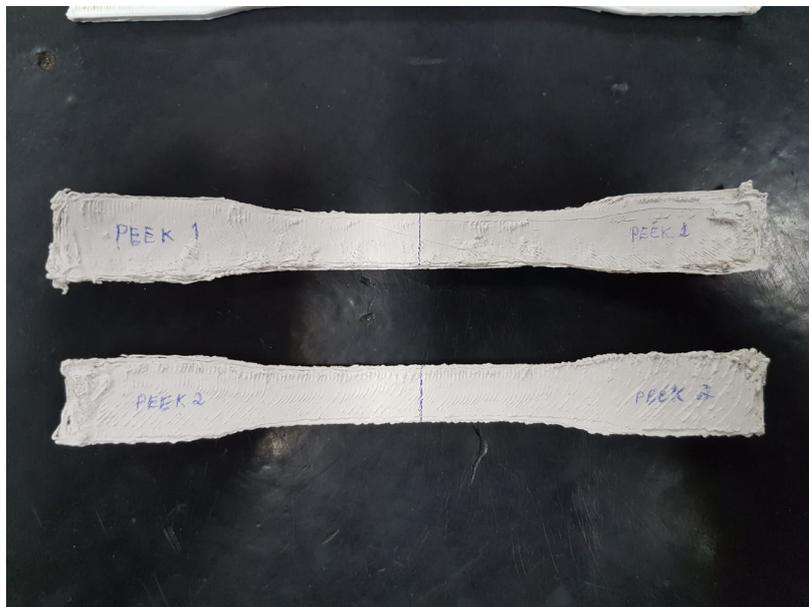


Figura 58 – Corpos de prova de PEEK

Para os testes em questão, os corpos foram devidamente fixados e com o extensômetro posicionado, foram rigorosamente tracionados. Como mostram as Fig. 59 e 60 percebe-se a deformidades que podem afetar os resultados.

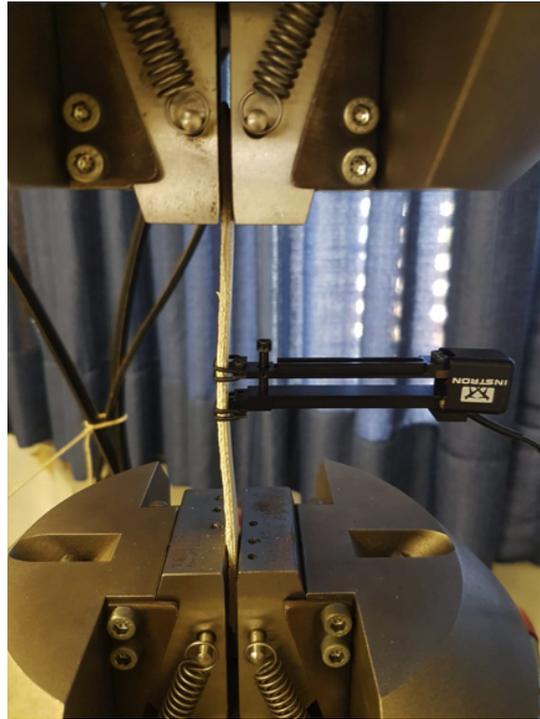


Figura 59 – Corpo de prova de PEEK fixado e com o extensômetro posicionado



Figura 60 – Arqueamento do corpo de prova de PEEK após a ruptura

Além do arqueamento dos corpos, também percebe-se que os mesmos possuem espessuras menores do que é previsto pela norma, o que pode ter ocasionado menores resistências e afetado os dados recebidos pelos testes de tração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo será abordada a apresentação de resultados e suas respectivas discussões. Dessa forma, calibração do sensor de temperatura após o mesmo ser realocado, a análise dos ensaios de tração e as proposições de melhorias para o equipamento.

4.1 Calibração do sensor de temperatura realocado

Após o distanciamento da ventoinha e como resultado da modificação do local de medição da temperatura da impressora, percebeu-se que quando o sensor foi posicionado mais distante do bico de extrusão, o software e hardware da impressora eram suficientes para possibilitar a elevação de temperatura. Assim, quando o software apresentava temperaturas mais baixas, o local de derretimento do material atingia as temperaturas necessárias para favorecer a deposição de material. Essa forma foi adotada pois se mostrou ser a mais barata e de simples adesão, não tendo necessidade imediata de modificar configurações do Arduino, nem acrescentar componentes como amplificadores. Assim, como já abordado, foram feitos furos no dissipador para possibilitar a instalação do sensor na nova posição, e conforme mostra a Fig. 61, o sensor da impressora se encontra na posição atual destacada, enquanto um sensor termopar adicional é usado para aferir a temperatura efetiva do bico.

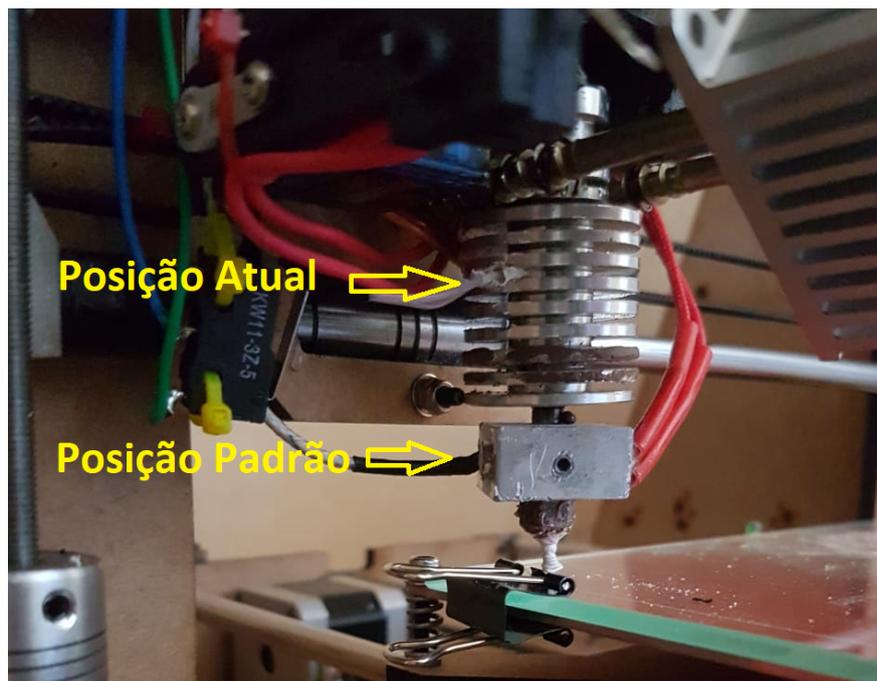


Figura 61 – Posição atual e padrão do sensor de temperatura

Com o novo posicionamento do sensor de temperatura, foi feita uma tabela, Tab. 4, com as principais temperaturas de utilização da impressora, para as temperaturas desejadas para impressão de PEEK e PLA, além de suas temperaturas próximas. Pode-se perceber que há grande diferença entre os locais de aquisição de dados, o que se justifica pela dificuldade de transferência de calor por condução do primeiro para segundo local, o que no caso é explorado por esse estudo.

Tabela 4 – Calibração das temperaturas de trabalho

Temperatura apresentada no visor	Temperatura efetiva
80 °C	210 °C
85 °C	220 °C
90 °C	230 °C
95 °C	240 °C
100 °C	250 °C
150 °C	380 °C
155 °C	390 °C
160 °C	400 °C
165 °C	410 °C
170 °C	420 °C
175 °C	430 °C
180 °C	440 °C

Como o sistema recebe interferência da temperatura da mesa e do aquecimento do ambiente, julga-se necessário o uso do segundo sensor de temperatura para as impressões em ambiente fechado, evitando assim, que o mesmo se comporte de forma errônea e gere resultados indesejados.

4.2 Análise dos Ensaios de Tração

4.2.1 Corpos de prova de material PLA

Como resultados preliminares desse trabalho, mostra-se a qualidade e uniformidade com a qual foram impressos diversos corpos de prova de PLA, que são exemplificados pela Fig. 62. Dessa forma, pode-se dizer que a montagem e adequação da impressora se deram de forma satisfatória, viabilizando o uso da mesma para testes de materiais



Figura 62 – Corpos de prova antes dos ensaios

Após o ensaio dos referidos corpos, percebeu-se grande uniformidade de parâmetros, dando origem a dados que convergem entre si. Pela Fig. 63 mostra-se que com exceção de um corpo, todos os demais sofreram ruptura nos locais esperados, no entanto a presença dessa exceção não inviabiliza o teste pois a ruptura se deu no estreitamento da seção, como os demais.

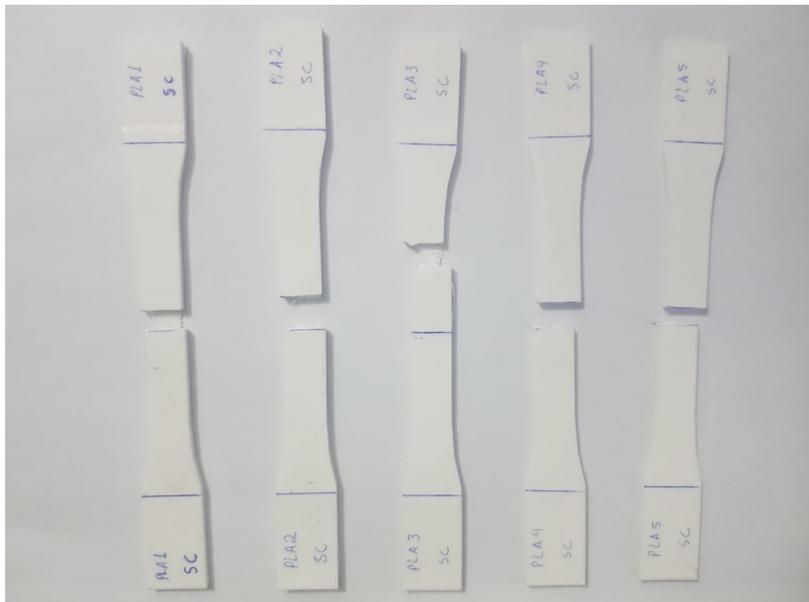


Figura 63 – Corpos de prova após serem ensaiados

Como resultado dos ensaios efetuados, foram adquiridos dados e após serem comparados e tratados, foi possível confluir para o gráfico de tensão pela deformação apresentado na Fig. 64. Os dados adquiridos mostram que os corpos tiveram um comportamento

predominantemente linear para sua deformação, apresentando uma grande área de deformação elástica. Dessa forma pode-se dizer que a deposição de camadas se deu de forma regular. Outra característica que pode ser observada no gráfico é a de que o material rompe de forma abrupta e frágil, o que já era esperado para o comportamento do material.



Figura 64 – Gráfico da Média dos corpos de prova de PLA (Tensão no eixo das coordenadas e Deformação no eixo das abscissas)

Pelos valores adquiridos, também notou-se que o limite de ruptura dos corpos de PLA ensaiados foi muito estável e no valor de 2 GPa, o que é um valor esperado para o mesmo. Vale ressaltar que o intervalo considerado mais relevante para o estudo foi o período elástico.

4.2.2 Corpos de prova de material PEEK

Algo notório na impressão do material é que o mesmo não demonstra a mesma qualidade e uniformidade que estavam presentes nos feitos de PLA, Fig. 65, no entanto os mesmos tiveram a maior parte de sua impressão concretizada, o que viabiliza os testes de tração, ainda que não gerem resultados completos.



Figura 65 – Corpos de prova antes dos ensaios

Após o ensaio dos corpos, percebe-se certa uniformidade de parâmetros e por consequência revelando dados equiparáveis. Pela Fig. 66 mostra-se que um corpo sofreu ruptura onde era esperado porém o outro não. Ainda assim não inviabiliza o teste pois a ruptura se deu no estreitamento da seção, como é esperado.

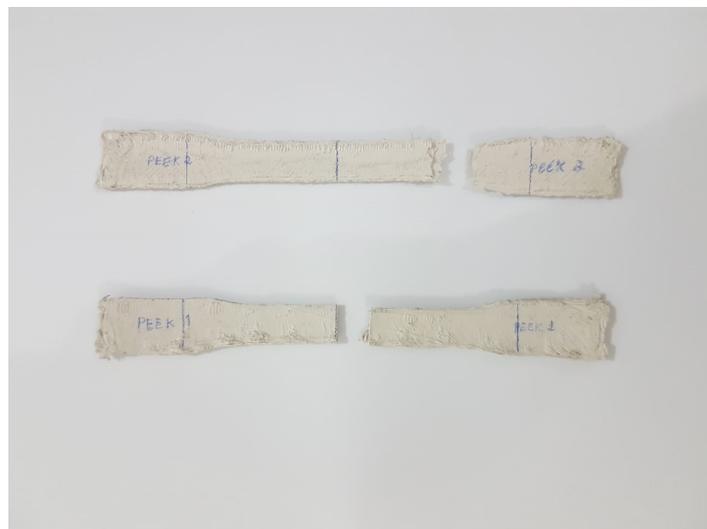


Figura 66 – Corpos de prova após serem ensaiados

Sobre a avaliação do tratamento de dados adquiridos nos testes, os corpos mostram que houve um comportamento predominantemente linear para sua deformação, apresentando uma grande área de deformação elástica, da mesma forma que o PLA e outros materiais impressos. Dessa forma pode-se dizer que a deposição de camadas se deu de forma relativamente regular. Outra característica que pode ser observada no gráfico é a de que o material rompe de forma abrupta e frágil, o que já era esperado pelos dados

bibliográficos. Percebe-se pelos gráficos 67 e 68 que mesmo com baixa qualidade, regaram quase o mesmo resultado entre carga sustentada e deformação.

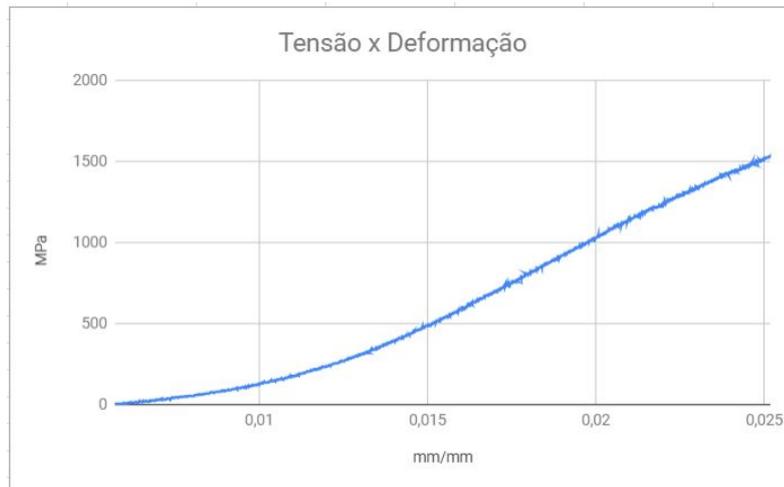


Figura 67 – Gráfico 1 do corpos de prova de PEEK ((Tensão no eixo das coordenadas e Deformação no eixo das abscissas)

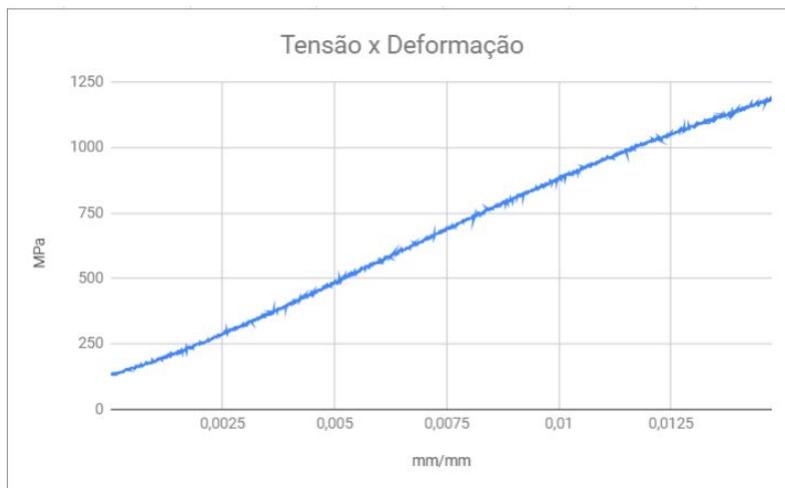


Figura 68 – Gráfico 2 do corpos de prova de PEEK (Tensão no eixo das coordenadas e Deformação no eixo das abscissas)

No caso dos corpos de prova de PEEK, a ruptura ocorreu quando submetidos a 1,5 GPa, um resultado abaixo do esperado. Isso provavelmente se deve aos problemas de impressão. Primeiramente, podemos deixar que como o sistema falhava na sustentação da temperatura certas vezes, pode ter havido deposição de camadas quando as mesmas já estivessem enrijecidas, dessa forma prejudicando a resistência do material. Outro problema que pode justificar essa medida inferiores ao PLA, é a constatação de que o corpo de PEEK tinha espessura 25% menor que os de PLA. Uma outra característica aplicada nos gráficos de PEEK é que os mesmos possuem zonas de deflexão que não são típicas

de materiais frágeis, no entanto, acredita-se que essa característica se fez presente pelo arqueamento das peças, bem nítido na Fig. 60.

4.3 Proposições de Melhorias para o equipamento

Mesmo sendo considerado um trabalho com ampla relevância e gerador de conhecimento, outros objetivos podem ser alcançados ou melhorados a partir de mudanças no sistema. Dentre as possíveis mudanças, algumas das mais promissoras seriam:

- utilização de carro extrusor feito de materiais termicamente mais resistentes como o alumínio
- Utilização de lâmpadas infravermelhas para o aquecimento mais eficiente do sistema.
- Utilização de placas de MDF mais espessas que 15 milímetros, o que pode conferir maior isolamento ao sistema.
- Aquisição de aquecedor do bico extrusor mais potente.
- Utilização de materiais que possibilitem redução de umidade do sistema (gel de sílica), bem como melhoras no armazenamento e manuseio do material que pode ser prejudicado por umidade.
- Utilização de maiores saias de impressão para melhorar a fixação das peças na mesa, além da aquisição de colas mais fortes

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou o desdobramento de um estudo com o material PEEK e seus processos de fabricação para a aquisição de componentes da indústria aeroespacial, avaliando a viabilidade de sua utilização, além de mapear suas características mecânicas. Dada a complexidade de impressão do material, os testes físicos de ensaio de corpos de prova foram relativamente comprometidos, no entanto o material PEEK se aproximou bastante dos dados adquiridos para o PLA, que por sua vez tinha corpos de boa qualidade e espessura maior que os de PEEK.

O trabalho desenvolvido traz resultados promissores pois deixa um legado substancial para a construção de um sistema isolado, dados pertinentes à montagem e adaptação de impressoras 3D, além de reportar problemas e suas possíveis soluções.

Por fim, ainda falta dados para uma correta caracterização do material em questão, porém já se percebe pela revisão bibliográfica feita que o poliéter-éter-cetona tem grande potencial de utilização, isso devido ao seu alto desempenho para solicitações mecânicas, alta resistência química e alto ponto de fusão, baixa densidade e possibilidade de impressão por FDM. Conclui-se que de acordo com o plano de atividades estipulado e com o desenvolvimento do sistema conforme o previsto, que o presente trabalho atingiu os objetivos almejados.

Como perspectivas de trabalhos futuros destaca-se que os estudos de caracterização do material PEEK impresso que pode ser continuada com a melhora na qualidade dos corpos de prova, além de poder ser estendida para ensaios de flexão e torção e avaliação das impressões em diferentes planos. Como segunda possibilidade de continuação de trabalhos, também podem ser inseridos outros materiais como o ULTEM, que se apresenta igualmente promissor. Além das possibilidades citadas acima, vale lembrar que este estudo viabiliza a construção de inúmeras peças de materiais termoplásticos que poderão ser exploradas em pesquisas aeroespaciais.

Referências

- 3DERS. *Polymaker launches PolySupport filament, aiming to revolutionize 3D printing support material*. 2016. <<https://www.3ders.org/articles/20150707-polymaker-launches-polysupport-filament-3d-printing-support-material.html>>. [Online; acessado-dezembro-2017]. Citado na página 29.
- BRADY, R. The future of flight looks bright for peek. *JECMAGAZINE COMPOSITES*, JECMAGAZINE, v. 106, p. 43–45, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- DUARTE, H. *Descubra como surgiu a impressora 3D*. 2014. <<http://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/37115/MONOGRAFIA19-2014-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Online; acessado 20-Julho-2017]. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- FILAMENT2PRINT. *DÚVIDAS HABITUAIS SOBRE A TEMPERATURA E A VELOCIDADE DE IMPRESSÃO DO PLA E ABS*. 2015. <https://filament2print.com/pt/blog/9_Dudas-habituales-sobre-la-temperatura-y-la-ve.html>. [Online; acessado-Julho-2017]. Citado na página 28.
- GOODFELLOW. *Información sobre el Material*. 2017. <<http://www.goodfellow.com/S/Polietereetercetona.html>>. [Online; acessado 29-Julho-2017]. Citado na página 59.
- 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. Citado na página 31.
- KRUTH, J.-P. et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, Emerald group publishing limited, v. 11, n. 1, p. 26–36, 2005. Citado na página 25.
- MAGALHÃES, L. C.; VOLPATO, N.; LUERSEN, M. A. A influência dos parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas pela técnica de modelagem por fusão e deposição (fdm). In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 30.
- MAKEITFROM. *Polyetheretherketone (PEEK)*. 1999. <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polyetheretherketone-PEEK>>. [Online; acessado-Julho-2017]. Citado na página 31.
- MARKETING, P. *Impressora 3D*. 2016. <<http://publicidademarketing.com/wp-content/uploads/2017/05/impressora-3d-capa.jpg>>. [Online; acessado-dezembro-2017]. Citado na página 27.
- MARTENDAL, V. K. F. . C. P. *PEEK: O polímero de alta performance*. 2016. <<http://engenheirodemateriais.com.br/2016/05/04/peek-o-polimero-de-alta-performance/>>. [Online; acessado-Novembro-2017]. Citado na página 32.
- MARTÍNEZ, J. et al. Comparative between fem models for fdm parts and their approach to a real mechanical behaviour. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 878–884, 2013. Citado na página 29.

- MARTÍNEZ, J. et al. Modelization and structural analysis of fdm parts. In: AIP. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2012. v. 1431, n. 1, p. 842–848. Citado na página 29.
- MARTINS, J. D. *Análise ao comportamento mecânico de estruturas de suporte produzidas por fdm*. Tese (Doutorado), 2016. Citado na página 26.
- NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L.; KURIC, I. Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology. *Manuf. and Ind. Eng.* Citado na página 29.
- OBJECT. *Objet lança a Objet1000, sua maior impressora 3D*. 2016. <http://www.tibahia.com/tecnologia_informacao/conteudo_unico.aspx?c=PROD_DES&fb=B_FULL&hb=B_CENTRA&bl=LAT1&r=PROD_DES&nid=20342>. [Online; acessado-dezembro-2017]. Citado na página 21.
- RONCOLATO, M. *Fim de patentes impulsionará mercado da impressão 3D*. 2014. <<http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI340645-17770,00-FIM+DE+PATENTES+IMPULSIONARA+MERCADO+DA+IMPRESSAO+D.html>>. [Online; acessado 20-Agosto-2017]. Citado na página 19.
- STANDARD, A. et al. Standard test method for tensile properties of plastics. *ASTM International. Designation: D*, v. 638, p. 1–13, 2003. Citado na página 35.
- STRATASYS. *Termoplásticos FDM*. 1999. <<http://www.stratasys.com/br/materiais/fdm>>. [Online; acessado-Julho-2017]. Citado na página 29.
- STUMP, F. V. *Otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas tradicionais e estruturas com gradação funcional sujeitas a restrição de tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- VAEZI, M.; YANG, S. Extrusion-based additive manufacturing of peek for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 123–135, 2015. Citado na página 28.
- VOLPATO, N. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. [S.l.]: Edgard Clucher, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.
- ZEIN, I. et al. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials*, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 1169–1185, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.