

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**ADRIEL MAIER FARIAS**

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS  
DE FIXAÇÃO PARA USINAGEM FABRICADOS PELA  
TECNOLOGIA DE MODELAGEM POR FUSÃO E  
DEPOSIÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**  
**2022**

**ADRIEL MAIER FARIAS**

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO  
PARA USINAGEM FABRICADOS PELA TECNOLOGIA DE  
MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO**

**STUDY ON THE USE OF MACHINING FIXTURES PRODUCED BY  
THE FUSED DEPOSITION MODELING TECHNOLOGY**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

**Orientador:** Prof<sup>a</sup> Dra. Sílvia do Nascimento Rosa

**Coorientador:** Me. Lucas Franco Wrege

**GUARAPUAVA  
2022**



[4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ADRIEL MAIER FARIAS**

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS  
DE FIXAÇÃO PARA USINAGEM FABRICADOS PELA  
TECNOLOGIA DE MODELAGEM POR FUSÃO E  
DEPOSIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07 de junho de 2022

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

---

Aldo Przybysz  
Doutorado em Química dos Recursos Naturais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

---

Carlos Eiji Hirata Ventura  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de São Carlos - DEMEC

**GUARAPUAVA**

**2022**

# Resumo

Dispositivos de fixação são usados com frequência na usinagem de peças complexas, ou na produção em série, porém adicionam custo e complexidade ao processo, pois podem exigir geometrias complexas e, portanto, demandam tempo de máquina e ferramental especializado. O processo de fabricação através da modelagem por deposição fundida apresenta uma alternativa de baixo custo que permite fabricar dispositivos de fixação complexos. Nesse trabalho, foram realizados estudos preliminares na forma de simulação de elementos finitos para verificar a viabilidade do uso de dois polímeros termoplásticos na fabricação de mordentes conformes. Após verificada a viabilidade, foram fabricados três conjuntos de mordentes conformes, um destes fabricado através dos métodos convencionais de usinagem, e os demais através da modelagem por deposição fundida. Com o objetivo de realizar um estudo comparativo, foram fabricados um conjunto de peças utilizando cada conjunto de mordentes. As dimensões destas peças foram medidas utilizando uma máquina de medição por coordenadas e uma análise comparativa baseada nas tolerâncias geométricas foi conduzida. Foi observado que, embora apresentem desempenho reduzido, os dispositivos de fixação fabricados através da modelagem por deposição fundida são uma opção viável para certas aplicações.

**Palavras-chaves:** fresamento; tolerância (Engenharia); impressão 3D.

# Abstract

Fixtures are commonly used in the manufacturing of complex parts, or in series production, but add cost and complexity to the process because they may require complex geometries and, therefore, demand machine time and specialized tooling. The fused deposition modeling process presents a low cost alternative that allows the production of complex fixtures. In this research, preliminary studies were conducted in the form of finite element simulations to verify the viability of the use of two thermoplastic polymers in the fabrication of soft jaws. Once the viability was verified, three sets of soft jaws were manufactured, one using traditional machining methods, and the rest through fused deposition modeling. With the objective of performing a comparative study, a set of parts were manufactured using each one of the sets of soft jaws. The dimensions of these parts were measured using a coordinate measuring machine and a geometric tolerance based comparative analysis was conducted. It was observed that, although they showed reduced performance, the fixtures produced through fused deposition modeling were a viable option for certain applications.

**Key-words:** milling; tolerance (Engineering); 3D printing.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Morsas de precisão . . . . .	13
Figura 2.2 – Ilustração da fabricação de peças com o processo FDM . . . . .	16
Figura 2.3 – Representação esquemática do processo FDM . . . . .	17
Figura 2.4 – Ilustração da tolerância geométrica de circularidade . . . . .	20
Figura 2.5 – Ilustração da interpretação superficial da tolerância de posição . . . . .	21
Figura 2.6 – Ilustração da interpretação de eixo da tolerância de posição . . . . .	21
Figura 3.1 – Geometria proposta para a peça a ser usinada, dimensões em mm . . . . .	22
Figura 3.2 – Geometria dos mordentes utilizados . . . . .	23
Figura 3.3 – Dimensões dos corpos de prova de compressão . . . . .	25
Figura 3.4 – Orientação dos corpos de prova impressos . . . . .	25
Figura 3.5 – Malha utilizada no estudo de elementos finitos . . . . .	27
Figura 3.6 – Localização dos carregamentos para o estudo de elementos finitos . . . . .	28
Figura 3.7 – Primeira operação da usinagem dos mordentes . . . . .	29
Figura 3.8 – Segunda operação da usinagem dos mordentes . . . . .	29
Figura 3.9 – Impressora 3D utilizada para a fabricação dos mordentes . . . . .	30
Figura 3.10–Diagrama da preparação do material . . . . .	32
Figura 3.11–Caminho da operação de desbaste . . . . .	36
Figura 3.12–Caminho da operação de acabamento . . . . .	37
Figura 3.13–Dispositivo de fixação para medição . . . . .	39
Figura 4.1 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de alumínio . . . . .	45
Figura 4.2 – Medições de posição, mordentes de alumínio . . . . .	45
Figura 4.3 – Medições de circularidade, mordentes de PETG XT . . . . .	46
Figura 4.4 – Medições de posição, mordentes de PETG XT . . . . .	47
Figura 4.5 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de TRITAN HT . . . . .	48
Figura 4.6 – Medições de posição, mordentes de TRITAN HT . . . . .	48
Figura 4.7 – Médias e desvios padrões, comparativo entre mordentes . . . . .	49
Figura 4.8 – Medições de posição, comparativo entre mordentes . . . . .	50

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do PETG . . . . .	18
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do TRITAN . . . . .	19
Tabela 3.1 – Parâmetros de impressão recomendados . . . . .	24
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados na impressão . . . . .	26
Tabela 3.3 – códigos dos corpos de prova . . . . .	26
Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados na impressão dos mordentes . . . . .	31
Tabela 3.5 – Especificações técnicas do centro de usinagem . . . . .	33
Tabela 3.6 – Parâmetros e dimensões da broca de centro . . . . .	34
Tabela 3.7 – Parâmetros e dimensões das brocas . . . . .	35
Tabela 3.8 – Parâmetros e dimensões das fresas . . . . .	36
Tabela 3.9 – Parâmetros e dimensões da fresa de chanfro . . . . .	38
Tabela 4.1 – Medidas dos corpos de prova . . . . .	41
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de compressão . . . . .	42
Tabela 4.3 – Resultados do estudo de elementos finitos . . . . .	43
Tabela 4.4 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de alumínio	44
Tabela 4.5 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de PETG XT	46
Tabela 4.6 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de TRITAN HT . . . . .	47
Tabela 4.7 – Médias e desvios padrões, comparativo entre mordentes . . . . .	49

# Lista de abreviaturas e siglas

MA	Manufatura Aditiva
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês, <i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>
CP	Corpo de Prova



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>10</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Dispositivos de fixação</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Tecnologias de manufatura aditiva</b>	<b>14</b>
2.2.1	Classificação dos processos de manufatura aditiva	14
2.2.2	Vantagens	14
2.2.3	Limitações	15
2.2.4	Processo FDM	15
<b>2.3</b>	<b>Polímeros utilizados na fabricação dos mordentes</b>	<b>17</b>
2.3.1	PETG	18
2.3.2	TRITAN	19
<b>2.4</b>	<b>Tolerâncias geométricas</b>	<b>19</b>
2.4.1	Circularidade	20
2.4.2	De posição	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Geometria de peça e mordentes</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Estudos preliminares</b>	<b>23</b>
3.2.1	Caracterização dos materiais	23
3.2.1.1	Materiais	23
3.2.1.2	Ensaio	24
3.2.2	Elementos finitos	26
3.2.2.1	Parâmetros de entrada	27
<b>3.3</b>	<b>Fabricação dos mordentes</b>	<b>28</b>
3.3.1	Mordentes Usinados	28
3.3.2	Mordentes Impressos	30
<b>3.4</b>	<b>Usinagem das peças</b>	<b>32</b>
3.4.1	Preparação de material	32
3.4.2	Centro de usinagem CNC e programação	33
3.4.3	Furação	33
3.4.4	Fresamento	35
3.4.5	Execução	38

---

<b>3.5</b>	<b>Medição</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>4 RESULTADOS</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados dos estudos preliminares</b> . . . . .	<b>41</b>
4.1.1	Ensaio de compressão . . . . .	41
4.1.2	Elementos finitos . . . . .	43
<b>4.2</b>	<b>Desempenho dos mordentes</b> . . . . .	<b>43</b>
4.2.1	Máquina de medição de coordenadas . . . . .	43
<b>5</b>	<b>5 CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>52</b>

# Introdução

Um dos maiores desafios da usinagem, desde os primórdios, tem sido o de fixar o material a ser usinado de maneira rígida, posicionando este material de maneira que esteja orientado a algum referencial conhecido, sem, por meio dessa estratégia de fixação, obstruir as áreas que necessitam ser usinadas. Na produção de grande volume, este desafio é acentuado pela necessidade de fixar o material de maneira a conceder uma excelente repetibilidade ao processo, com o objetivo de eliminar variações na posição do material, permitindo o uso de tarugos com dimensões e forma mais próximas da peça e permitindo a otimização das estratégias de usinagem (e.g. menor quantidade de passes de faceamento).

Para resolver este desafio, tradicionalmente, são fabricados dispositivos de fixação utilizando os processos convencionais de fabricação, como usinagem, soldagem e conformação, porém estes processos tem como desvantagem um custo de ferramental e consumíveis associados ao seu uso e a possível necessidade de interromper a produção para a fabricação destes dispositivos.

O desafio de fixação de material, e as desvantagens associadas aos processos convencionais, fazem parte do incentivo do desenvolvimento de tecnologias de ferramental rápido, ou *Rapid Tooling*, as quais utilizam tecnologias de manufatura aditiva para fabricar ferramental para produção. A tecnologia de ferramental rápido permite a fabricação de ferramental mais complexo, como moldes com passagens de resfriamento mais otimizadas, com um custo mais baixo, uma vez que não há custo de ferramental, somente de consumíveis, e em menos tempo, se comparado ao ferramental produzido por processos convencionais (LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Embora o uso de tecnologias de ferramental rápido seja uma boa solução para o uso industrial, muitas das soluções são produzidas com o uso de tecnologias de fusão de leito de pó metálico, como SLS - *Selective Laser Sintering*, DMLS - *Direct Metal Laser Sintering* e SLM - *Selective Laser Melting*, porém estes processos requerem maquinário e consumíveis de custo considerável. Uma alternativa mais barata e mais simples é o processo FDM - *Fused Deposition Modeling*, ou modelagem por fusão e deposição, também conhecido como FFF - *Fused Filament Fabrication* e possui um custo de material e maquinário muito mais

baixo, se comparado aos outros processos de manufatura aditiva.

O processo FDM consiste em depositar um material termoplástico, fornecido na forma de filamento, geralmente com diâmetro nominal de 1,75 mm, fundido em camadas que formam a peça sobre uma superfície de impressão. A desvantagem do uso desta tecnologia são os materiais disponíveis. Enquanto as tecnologias de leito de pó permitem o uso de pós metálicos, a tecnologia FDM está restrita a polímeros termoplásticos, exceto no caso de algumas máquinas especiais que permitem o uso de outros materiais como cerâmicas (VOLPATO et al., 2017). É com esta limitação em mente que este estudo foi realizado.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral comparar a efetividade de dispositivos de fixação fabricados nos termoplásticos PETG e em TRITAN através do processo de modelagem por fusão e deposição com dispositivos de fixação fabricados em materiais convencionais através do processo convencional de usinagem.

Afim de realizar este objetivo, também são objetivos deste trabalho:

- Verificar a resistência mecânica dos materiais poliméricos utilizados para fabricação dos dispositivos de fixação através de ensaios de tração e compressão uniaxiais.
- Realizar um estudo de elementos finitos para verificar a resistência dos materiais na aplicação considerada.
- Realizar a usinagem de três conjuntos de peças, utilizando dispositivos de fixação fabricados através de métodos convencionais e através de dispositivos de fixação fabricados através do processo FDM utilizando dois materiais diferentes.
- Realizar medições nas peças usinadas utilizando a máquina de medição por coordenadas.
- Analisar os resultados das medições e gerar conclusões sobre o desempenho dos dispositivos de fixação.

# Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados tópicos que auxiliam a compreensão deste trabalho e as suas implicações.

## 2.1 Dispositivos de fixação

Hoffman (2004) descreve dispositivos de fixação como dispositivos utilizados para produzir peças duplicatas de maneira precisa. Para manter a correta relação e alinhamento da peça com as ferramentas do processo de fabricação, um dispositivo, ou sistema de fixação é projetado e construído para fixar, suportar e localizar as peças para garantir que sejam fabricadas dentro da tolerância desejada.

De acordo com Gameros et al. (2017), são funções essenciais de um sistema de fixação:

1. Estratégia de localização: o sistema deve localizar e orientar a peça no espaço através da remoção dos graus de liberdade necessários. Quando todos os graus de liberdade forem removidos, a peça deve estar posicionada deterministicamente, de modo que, para que haja qualquer movimento da peça, esta necessite perder contato com, pelo menos, um elemento de localização.
2. Estratégia de fixação: a peça deve manter sua localização quando sujeita às forças do processo de fabricação.

E são funções opcionais:

1. Estratégia de suporte: o sistema deve minimizar a deflexão da peça durante o processo de fabricação.
2. Interação com a ferramenta: o sistema deve guiar ou interagir com as ferramentas utilizadas pelo processo.

Os sistemas de fixação, como morsas para fresamento e placas para torneamento, são classificados por Gameros et al. (2017) como dispositivos de fixação básicos, ou seja, são dispositivos que removem apenas alguns dos graus de liberdade e que dependem da fricção para fixar as peças nas demais direções.

Embora morsas e placas sejam dispositivos de fixação adequados para a usinagem de peças com faces paralelas e cilíndricas, respectivamente, estes não são capazes de localizar e fixar adequadamente peças com formas irregulares, visto que seus mordentes foram fabricados para fixar somente peças simples. Uma solução proposta por Hoffman (2004), para dispositivos de fixação de baixo custo, é a usinagem de mordentes apropriados para a fixação da peça, mas que acoplem a morsas ou placas comercialmente disponíveis.

Este conceito é chamado de mordentes conformes ou, no inglês, *soft-jaws*, e é algo comum para a produção de uma pequena quantidade de peças complexas ou uma grande quantidade de peças relativamente simples, visto que concede melhor fixação e localização à sistemas de fixação comumente disponíveis. O uso de mordentes conformes também é apresentado por Autodesk (2014) e Fitzpatrick (2013). A Figura 2.1 apresenta os exemplos de morsas dados por Fitzpatrick (2013), nela pode ser observado um exemplo de morsa convencional e dois exemplos de morsas equipadas com mordentes conformes.

**Figura 2.1 – Morsas de precisão**



Fonte – Fitzpatrick (2013)

Quanto aos materiais, como o nome inglês, *soft-jaws*, indica, os mordentes conformes são fabricados de materiais relativamente macios, quando comparados ao aço endurecido utilizado na fabricação de mordentes convencionais. Embora materiais mais macios possam apresentar maiores deformações quando submetidos aos esforços do processo e são mais suscetíveis à incrustação de cavacos em sua superfície, estes materiais são utilizados pois tendem a possuir características que facilitam sua usinagem, diminuindo o tempo necessário para usinar os mordentes e, portanto, seu custo. É desejável utilizar mordentes mais duros que o material a ser usinado, para evitar a incrustação de cavacos nos mordentes, no entanto, essa preocupação com a incrustação de cavacos leva a um aumento significativo de custo, que, muitas vezes, não é justificável (HAAS AUTOMATION, 2018).

A literatura em geral, recomenda o uso de alumínio ou aço de baixo carbono para a fabricação dos mordentes conformes (AUTODESK, 2014) (FITZPATRICK, 2013)(HAAS AUTOMATION, 2018).

## 2.2 Tecnologias de manufatura aditiva

As tecnologias de manufatura aditiva são definidas como processos que aplicam princípios de adição de material para construir geometrias tridimensionais através da adição sucessiva de material (ISO/ASTM, 2015). Nesta sessão serão apresentados alguns conceitos sobre estas tecnologias.

### 2.2.1 Classificação dos processos de manufatura aditiva

Os processos de manufatura aditiva são diversos, possuindo variações em princípio de funcionamento, materiais e características das peças produzidas. Para simplificar esta classificação, foram definidas 7 categorias de acordo com o princípio de funcionamento empregado, pela norma ISO/ASTM 52900:2015(E):

- Fotopolimerização em cuba, onde um polímero fotosensível é curado por luz, geralmente ultra-violeta.
- Extrusão de material, onde o material é extrudado através de um bico.
- Jateamento de material, onde o material é depositado em gotículas.
- Jateamento de aglutinante, onde um aglutinante é depositado sobre o material na forma de pó.
- Fusão de leito de pó, onde um leito de pó é seletivamente fundido.
- Adição de lâminas, onde lâminas de material são sobrepostas para formar a peça.
- Deposição com energia direcionada, onde o material é fundido à medida que é depositado.

Dentre estes processos, se destacam os processos de fotopolimerização em cuba e de extrusão de material, os quais possuem equipamentos de baixo custo e que são acessíveis à operações de pequena escala.

### 2.2.2 Vantagens

Devido a adição sequencial de material empregada na manufatura aditiva, esta possui algumas vantagens, quando comparada com processos de fabricação convencionais. Algumas das mais relevantes a este trabalho, de acordo com Volpato et al. (2017), são:

- Liberdade geométrica: a forma de peças impressas possui menor impacto em sua fabricação, ou seja, geometrias impossíveis para processos convencionais são simples para a manufatura aditiva e não adicionam custo ou complexidade ao processo.

- Pouco desperdício de material: o material necessário para fabricação da peça é similar a seu volume. Somente é desperdiçado material utilizado para estruturas de suporte e material que é retirado da máquina juntamente com a peça, no caso do uso de pós e resinas.
- Dispensa dispositivos de fixação: as peças são fixadas diretamente na plataforma de construção, ou sobre material depositado pelo mesmo processo.
- Ausência de troca de ferramentas: excetuando alguns processos de vários estágios ou processos mais avançados, que combinam diferentes materiais, as peças podem ser construídas com um único processo, sem a necessidade de substituir componentes ou alterar o processo durante a fabricação.
- Produção de baixa quantidade: como as tecnologias de manufatura aditiva não necessitam de dispositivos de fixação, nem de ferramental especial para fabricação de peças complexas, a fabricação de poucas peças é rápida e barata.

Estas vantagens conferem aos processos de manufatura aditiva características únicas que os tornam atrativos em algumas aplicações.

### 2.2.3 Limitações

As mesmas características dos processos de manufatura aditiva que lhes conferem vantagens sobre os processos convencionais também lhes conferem limitações. Algumas das limitações relevantes a este trabalho, de acordo com Volpato et al. (2017), são:

- Propriedades mecânicas: devido a adição de material camada sobre camada, as peças impressas possuem propriedades mecânicas diferentes do material original, em geral, possuem características anisotrópicas.
- Precisão e acabamento: As peças impressas possuem uma menor precisão e acabamento superficial inferior, se comparadas com peças convencionais.
- Poucos materiais: os processos de manufatura aditiva são desenvolvidos para o uso de uma seleção de materiais específicos, sendo difícil, senão impossível, o uso de materiais que não sejam compatíveis com o processo.

Por mais versáteis que sejam os processos de manufatura aditiva, estas limitações restringem sua viabilidade em muitas aplicações.

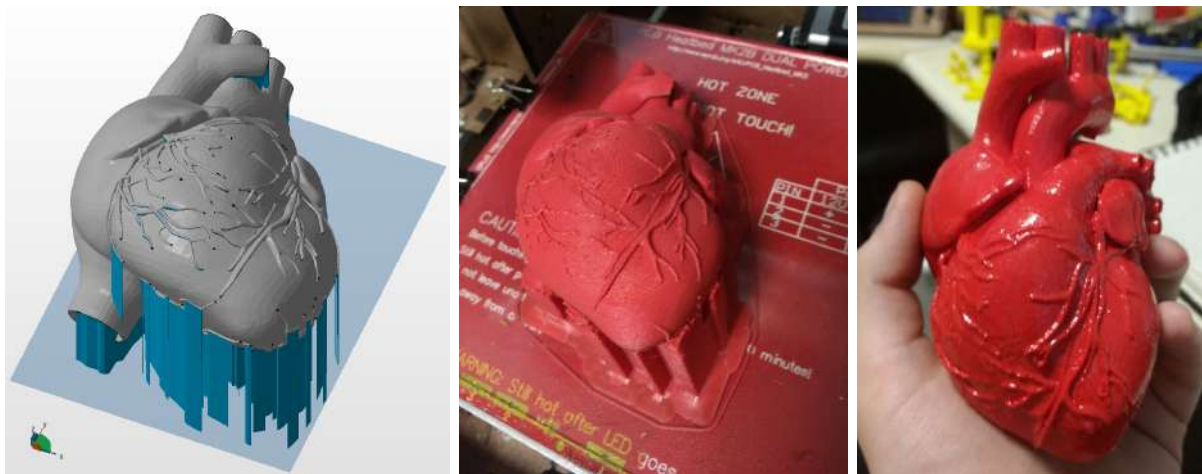
### 2.2.4 Processo FDM

Neste trabalho, será utilizado o processo FDM - *Fused Deposition Modeling*, ou modelagem por fusão e deposição, para fabricar as peças utilizadas. O processo FDM



se enquadra na categoria de processos de extrusão de material e é um dos processos de manufatura aditiva mais simples e de menor custo. Neste processo, um polímero termoplástico na forma de filamento é alimentado por rodas tracionadoras para um bico extrusor que aquece o material e o deposita através de um orifício. Para construir a geometria da peça, o bico extrusor é movimentado em relação à plataforma de construção, depositando camada sobre camada de material. O processo FDM se destaca dentre os processos de manufatura aditiva por sua simplicidade, pois não é necessário tratamentos da peça, como sinterização ou cura, após a impressão, somente a remoção de material de suporte, caso tenha sido utilizado (VOLPATO et al., 2017). Um exemplo de uma peça onde foi utilizada grande quantidade de material de suporte se encontra na Figura 2.2, onde pode ser observado o material de suporte no software de preparação e na peça impressa.

**Figura 2.2 – Ilustração da fabricação de peças com o processo FDM**

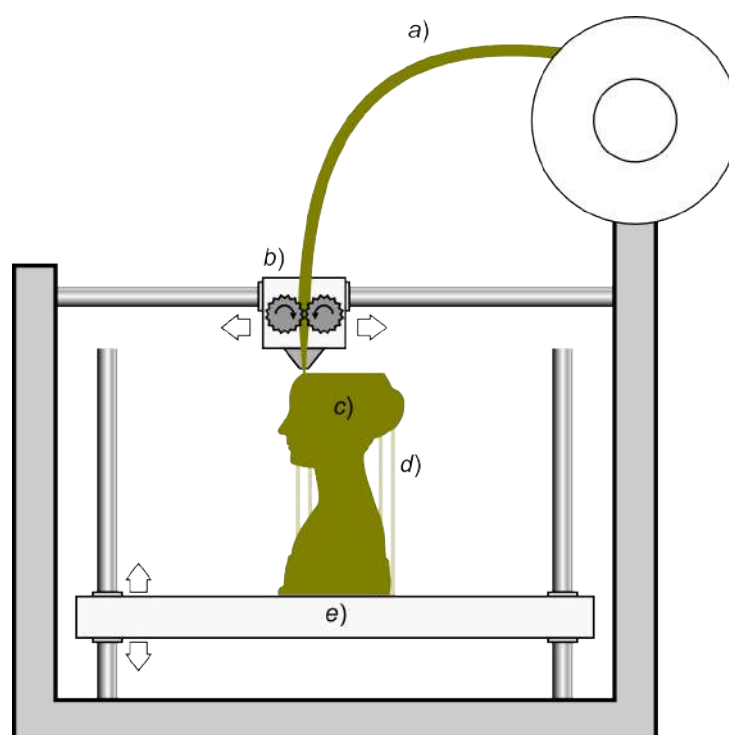


Fonte – Autoria própria

A Figura 2.3 ilustra o processo FDM, destacando os seguintes componentes;

- a) O material, em forma de filamento, sendo alimentado ao processo
- b) O cabeçote móvel e as rodas tracionadoras que alimentam o bico aquecido
- c) O material depositado no formato na peça
- d) Material excedente, depositado para agir como material de suporte
- e) A superfície de impressão que se movimenta em relação ao bico extrusor.

**Figura 2.3 – Representação esquemática do processo FDM**



Fonte – Adaptado de Scopigno et al. (2017)

A simplicidade do processo FDM contribui para a sua versatilidade, permitindo o uso de muitos polímeros termoplásticos comercialmente disponíveis, visto que não há polimerização durante o processo, somente a fusão do material.

### 2.3 Polímeros utilizados na fabricação dos mordentes

O processo FDM admite o uso de diversos polímeros termoplásticos, como PLA (ácido polilático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PVA (Poliacetato de Vinila), HIPS (Poliestireno de alto impacto), entre outros.

Para os fins deste trabalho, serão relevantes dois polímeros, um conhecido como PETG e o outro como TRITAN. Algumas características destes materiais são apresentadas a seguir.

### 2.3.1 PETG

O PETG é uma forma de PET (*Polyethylene terephthalate*) com glicol modificado para melhoria das propriedades mecânicas do material (3D FILA, 2019).

Um dos fabricantes do PETG é a Eastman Chemical, a qual se refere ao PETG como Eastman Spectar 14417 copolyester. Segundo a EASTMAN CHEMICAL (2019a), o PETG é um copoliéster que possui boa resistência química, excelentes características relacionadas a termoformagem, não possui odor, notável resistência ao impacto, notável resistência mecânica e é um material versátil, podendo ser trabalhado com os mesmos processos e ferramentas utilizados para outros plásticos.

Algumas das aplicações recomendadas para este material são:

- Prateleiras de exposição
- Sinalização interna/externa
- Claraboias
- Iluminação
- Industrial
- Marketing visual

As propriedades mecânicas do PETG se encontram na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do PETG**

Propriedade	Norma utilizada	valor típico
Densidade	ASTM D1505	1,27 g/cm <sup>3</sup>
$\sigma_{esc}$	ASTM D638	53 MPa
$\sigma_{falha}$	ASTM D638	26 MPa
Módulo de young	ASTM D638	2200 MPa
Módulo de flexão	ASTM D790	2100 MPa
Dureza, Rockwell R	ASTM D785	115
Resistência ao impacto Izod 23°C	ASTM D256	88 J/m

**Fonte – EASTMAN CHEMICAL (2019a)**

É importante ressaltar que estas propriedades mecânicas se referem à peças injetadas, e não à peças fabricadas através da manufatura aditiva, logo espera-se que as peças fabricadas através do processi FDM apresentem propriedades mecânicas alteradas, devido às defeitos inerentes do processo como a fraca adesão entre camadas e possível deterioração do polímero durante o aquecimento, além de aditivos adicionados ao material de modo a facilitar o uso e manuseio.

### 2.3.2 TRITAN

O TRITAN é um copoliéster amorfo fabricado pela Eastman Chemical sob vários nomes e composições, entre elas a mais básica o Eastman TRITAN Copolyester TX1000. Segundo a EASTMAN CHEMICAL (2019b), o TRITAN é de fácil processamento, possui excelente estabilidade hidrolítica, boa resistência química e térmica e notável resistência ao impacto.

Algumas das aplicações recomendadas para o TRITAN são:

- Eletrodomésticos que tenham contato com alimento
- Materiais de construção
- Itens domésticos
- Iluminação
- Produtos eletrônicos
- Componentes de embalagens
- Garrafas esportivas/ garrafas para água

As propriedades mecânicas do TRITAN se encontram na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do TRITAN**

Propriedade	Norma utilizada	valor típico
Gravidade específica	ASTM D792	1,18
$\sigma_{esc}$	ASTM D638	43 MPa
$\sigma_{falha}$	ASTM D638	53 MPa
Módulo de young	ASTM D638	1550 MPa
Módulo de flexão	ASTM D790	1550 MPa
Dureza, Rockwell R	ASTM D785	112
Resistência ao impacto Izod 23°C	ASTM D256	980 J/m

Fonte – EASTMAN CHEMICAL (2019b)

Novamente, assim como citado anteriormente, estas propriedades mecânicas se referem à peças injetadas, logo não necessariamente representam as propriedades mecânicas das peças produzidas através do processo FDM.

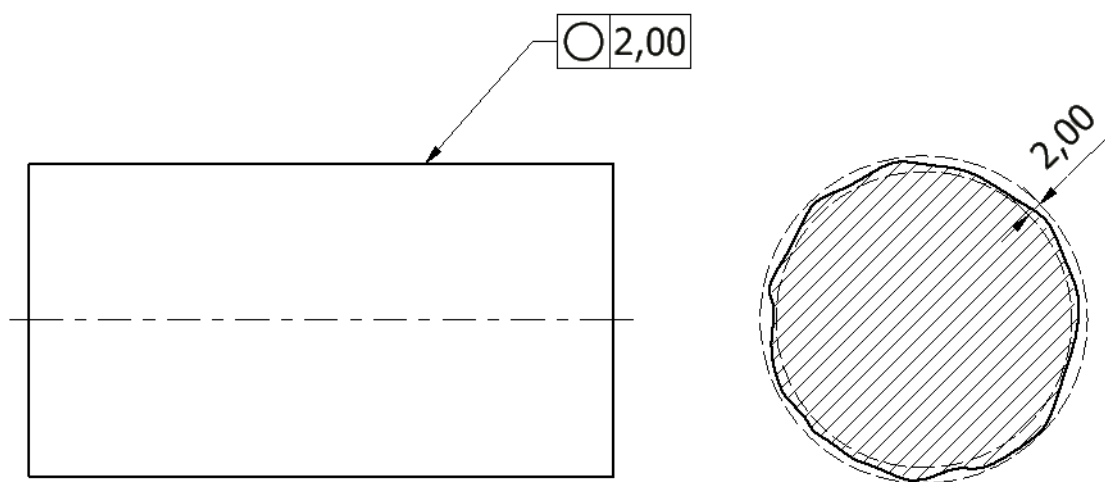
## 2.4 Tolerâncias geométricas

Neste trabalho serão avaliadas as tolerâncias geométricas obtidas com o uso de mordentes conformes fabricados com diferentes materiais e através de diferentes processos de fabricação. Nesta seção serão apresentadas algumas definições das tolerâncias geométricas utilizadas, de acordo com as normas ASME Y14.5 e ASME Y14.5.1M.

### 2.4.1 Circularidade

De acordo com a norma ASME Y14.5, a tolerância geométrica de circularidade, para elementos não esféricos, se define como uma condição de uma superfície onde todos os seus pontos contidos em qualquer plano ortogonal a um eixo ou curva são equidistantes deste eixo ou curva. A zona de tolerância é definida por dois círculos concêntricos, onde o raio do círculo exterior é maior que o raio do círculo interior pela quantidade indicada na tolerância. Diferente da tolerância de cilindricidade, a circularidade é avaliada independentemente em cada plano do elemento. A Figura 2.4 apresenta uma ilustração para circularidade.

**Figura 2.4 – Ilustração da tolerância geométrica de circularidade**



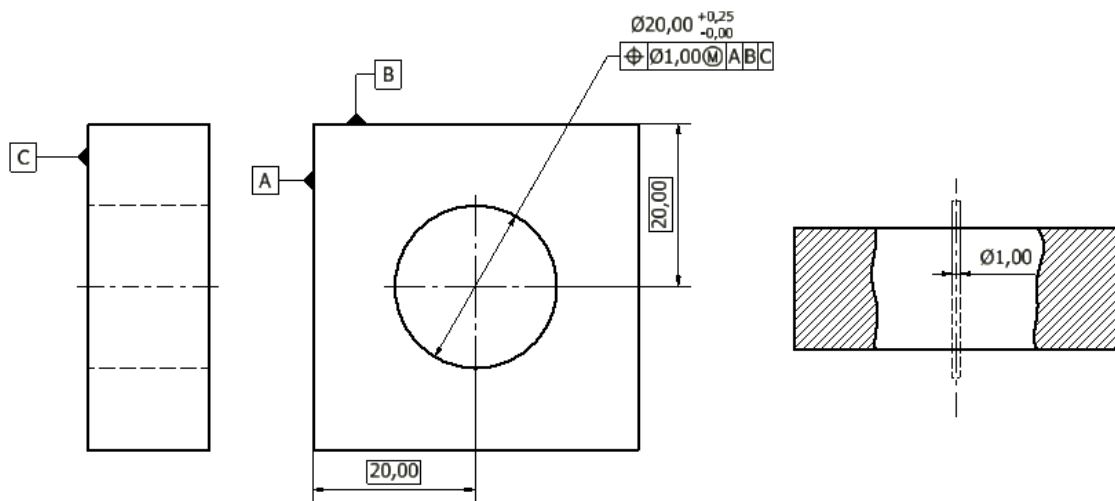
Fonte – Autoria Própria

Segundo a norma ASME Y14.5.1M, o valor real da circularidade de um elemento é o menor valor de tolerância para qual o elemento é conforme.

### 2.4.2 De posição

A norma ASME Y14.5 possui duas interpretações para tolerância de posição, a interpretação de superfície e a interpretação de eixo ou plano de centro. Na interpretação de superfície, nenhum ponto da superfície do elemento, dentro dos seus limites dimensionais, poderá violar uma barreira virtual localizada na posição teórica exata. Por exemplo, no caso de um furo na condição de máximo material, há uma barreira virtual cilíndrica localizada na posição teórica exata que não deve ser violada por qualquer ponto na superfície interna do furo. A Figura 2.5 ilustra a zona de tolerância desta interpretação.

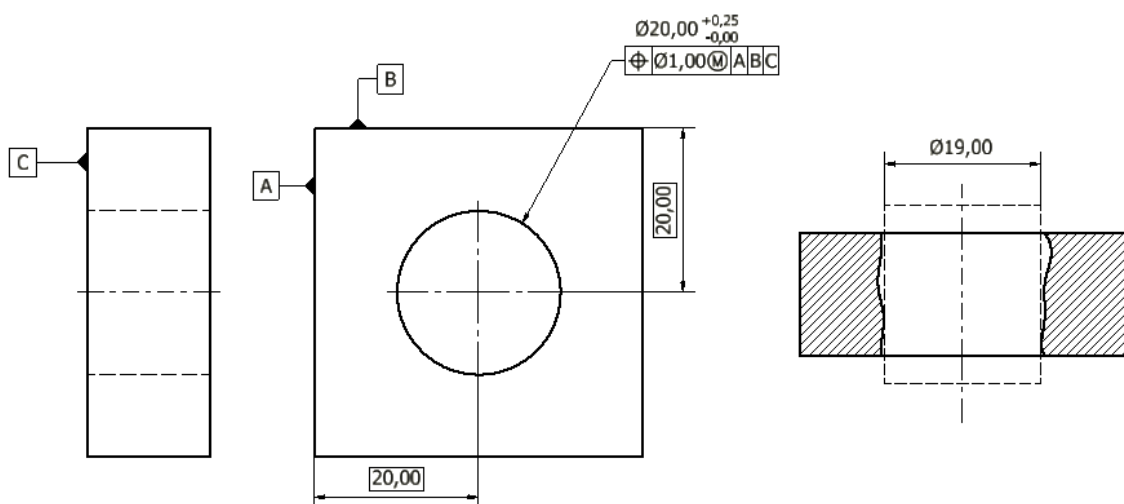
Figura 2.5 – Ilustração da interpretação superficial da tolerância de posição



Fonte – Autoria própria

Na interpretação de eixo ou plano de centro, o eixo ou plano de centro de um elemento na condição de máximo material deve estar contido em uma zona de tolerância localizada na posição teórica exata que possui dimensões dadas pela tolerância de posição. No caso de um furo, o seu eixo central deve estar contido por uma zona de tolerância cilíndrica localizada na posição teórica exata, podendo estar inclinado ou fora de centro, desde que não exceda a zona de tolerância. A Figura 2.6 ilustra a zona de tolerância desta interpretação.

Figura 2.6 – Ilustração da interpretação de eixo da tolerância de posição



Fonte – Autoria própria

Segundo a norma ASME Y14.5.1M, o valor real do desvio da posição de um componente é a dimensão da menor zona de tolerância para a qual o elemento é conforme.

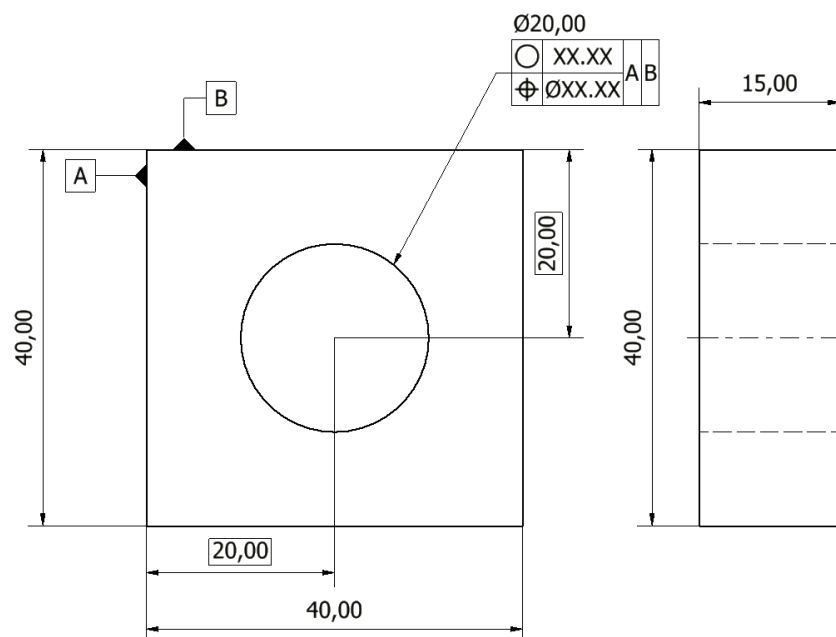
# Metodologia

Este capítulo discorre sobre os materiais e métodos utilizados durante este trabalho, a fim de cumprir os objetivos propostos.

## 3.1 Geometria de peça e mordentes

Para verificar o desempenho de dispositivos de fixação fabricados através do processo FDM, foi proposta a fabricação de uma peça, com a forma de um prisma retangular de base quadrada com um furo cônico localizado no eixo de simetria da peça. Esta geometria é melhor ilustrada na Figura 3.1

**Figura 3.1 – Geometria proposta para a peça a ser usinada, dimensões em mm**



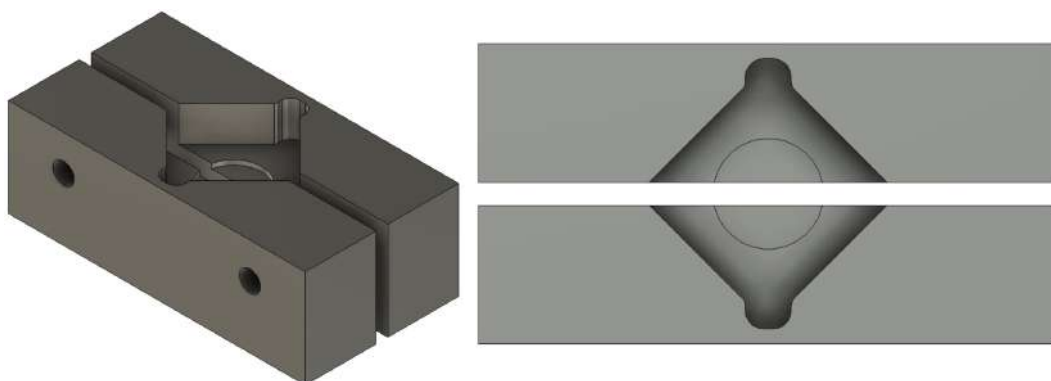
Fonte – Autoria própria

Para fixar a peça durante a usinagem, foi proposto o uso de mordentes conformes, devido as vantagens explanadas na seção 2.1, entre elas, a simplicidade de fabricação e facilidade de uso.

Derivado da forma da peça, foi definida a geometria dos mordentes, os quais fixam a peça em um ângulo de 45° em torno do eixo Z para permitir localizar ambas as arestas de

referência contra o mordente fixo e evitar falhas na fixação e localização devido à variações nas dimensões das peças. A geometria dos mordentes é ilustrada na Figura 3.2, nela é possível observar que foi tomado cuidado para evitar que quaisquer arestas que pudessem apresentar rebarbas não entrassem em contato com os mordentes, para que a peça não viesse a ser fixada fora de posição.

**Figura 3.2 – Geometria dos mordentes utilizados**



Fonte – Autoria própria

A partir destas definições de geometria, foi possível prosseguir com as demais etapas do trabalho

## 3.2 Estudos preliminares

Para verificar a viabilidade do uso dos mordentes impressos, optou-se por realizar um estudo de elementos finitos para verificar se os materiais seriam capazes de suportar os esforços presentes. Para que este estudo fosse realizado, tornou-se necessário conhecer as propriedades mecânicas dos materiais impressos. O estudo de elementos finitos e a caracterização dos materiais são considerados como estudos preliminares ao estudo principal e serão discutidos nessa seção.

### 3.2.1 Caracterização dos materiais

Para verificar se os materiais escolhidos seriam resistentes o suficiente para a aplicação estudada, e a força que poderia ser exercida sobre os mordentes, foi proposto a realização de um estudo de elementos finitos para verificar as tensões que os mordentes estariam submetidos. Para este fim, foram realizados ensaios mecânicos para obter as propriedades mecânicas dos materiais. Esta seção trata dos ensaios realizados.

#### 3.2.1.1 Materiais

Para o uso nesse trabalho, foram escolhidos dois materiais poliméricos para serem testados, sendo eles o PETG e o TRITAN. Estes materiais foram escolhidos pois são



disponíveis na forma de matéria prima para o processo de modelagem por fusão e deposição, possuem boa resistência química, permitindo o uso de fluidos de corte na usinagem, possuem temperatura de amolecimento relativamente alta e possuem boa resistência ao impacto.

Ambos os materiais foram fornecidos, na forma de filamento com diâmetro de 1,75mm e na coloração transparente, pela empresa brasileira 3D fila, localizada em Belo Horizonte - MG e que produz filamentos para MA desde 2013. Mais especificamente, foram utilizados os filamentos PETG XT e TRITAN HT. Os parâmetros de impressão recomendados pela 3D fila para estes materiais estão na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Parâmetros de impressão recomendados**

Parâmetro	PETG XT	TRITAN HT
Temperatura de impressão(°C)	230-260	260-290
Temperatura da superfície de impressão(°C)	70-85	110-120
Velocidade de impressão (mm/s)	10-120	40-60

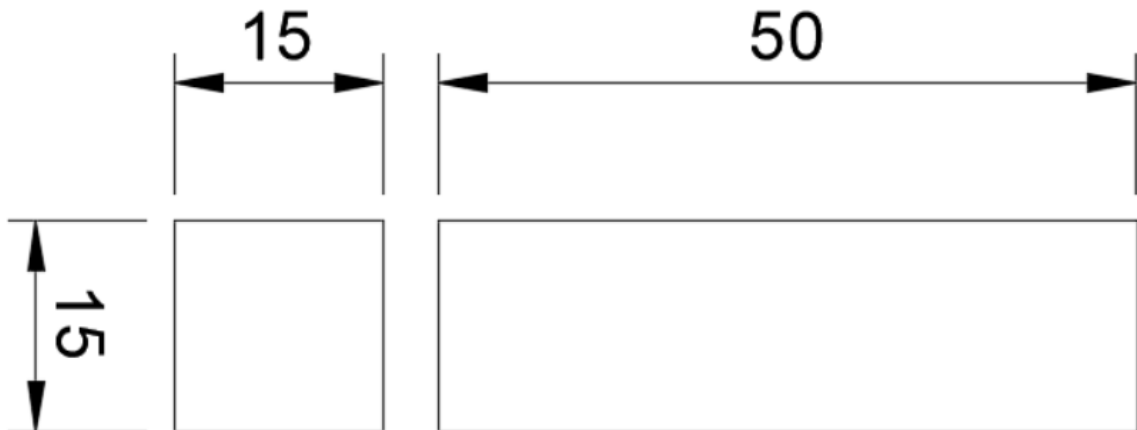
Fonte – 3D FILA (2019)

A partir destes parâmetros, foram realizados testes empíricos guiados pela experiência dos autores para definir os parâmetros utilizados na fabricação dos mordentes conformes.

### 3.2.1.2 Ensaios

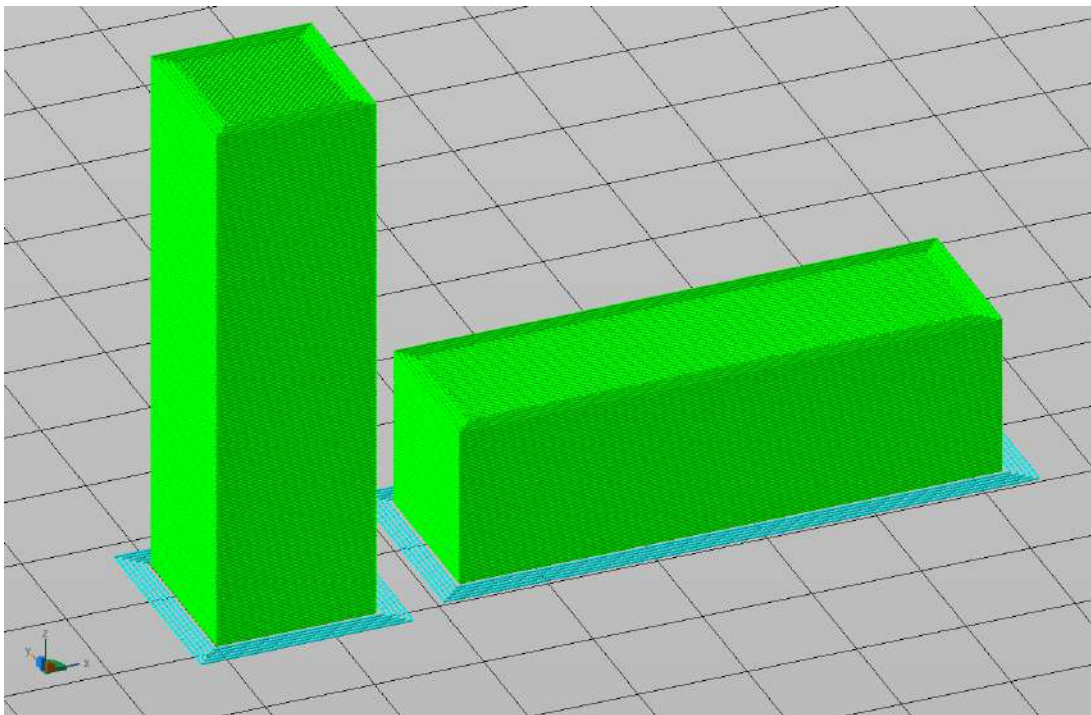
Para estudar a resistência mecânica dos materiais, foi escolhida a norma ASTM D695, que contempla ensaios de compressão em plásticos rígidos. Foi escolhido o ensaio de compressão devido à expectativa que a força compressiva da morsa seja o maior esforço que os mordentes estariam sujeitos. Devido a anisotropia das peças fabricadas com o processo FDM, que já foi estudada em diversos trabalhos, entre eles Ahn et al. (2002), Lee et al. (2007) e Szykiedans, Credo e Osiski (2017), foram fabricados 10 corpos de prova para cada material, sendo 5 peças fabricadas com as camadas orientadas na direção do ensaio e 5 peças fabricadas com as camadas ortogonais à direção do ensaio. As dimensões dos corpos de prova para ensaio de compressão se encontram na Figura 3.3. Na Figura 3.4, podemos ver a orientação em que foram impressos os corpos de prova.

Figura 3.3 – Dimensões dos corpos de prova de compressão



Fonte – Autoria Própria

Figura 3.4 – Orientação dos corpos de prova impressos



Fonte – Autoria Própria

A Tabela 3.2 indica os parâmetros utilizados para a impressão dos corpos de prova. Destes vale a pena ressaltar que todos os corpos de prova foram impressos com 3 perímetros e preenchimento interno de 100%, ou seja, foram impressos com pouco ou nenhum espaço vazio em seu interior.

**Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados na impressão**

Parâmetro	PETG XT	TRITAN HT
Temperatura de extrusão (°C)	240	260
Temperatura da superfície (°C)	80	110
Altura de camada (mm)	0,2	0,2
Diâmetro do bico (mm)	0,4	0,4
Largura de extrusão (mm)	0,45	0,45
Quantidade de perímetros	3	3
Quantidade de preenchimento (%)	100	100
Estratégia de preenchimento	Rectilinear	Rectilinear
Velocidade de impressão (mm/s)	40	40

**Fonte – Autoria Própria**

Os 20 corpos de prova impressos foram marcados com um marcador permanente utilizando um código composto por uma letra e um número, de modo que a letra identifica o material e a orientação e o número identifica o corpo de prova dentre os demais com as mesmas condições. A Tabela 3.3 mostra os códigos de identificação utilizados.

**Tabela 3.3 – códigos dos corpos de prova**

Código	Material	Orientação
Ax	PETG XT	Normal às camadas
Bx	PETG XT	Paralela às camadas
Cx	TRITAN HT	Normal às camadas
Dx	TRITAN HT	Paralela às camadas

**Fonte – Autoria Própria**

A largura e espessura, ou seja, as dimensões ortogonais à direção do ensaio, dos corpos de prova foram medidas com o auxílio de um micrômetro com faixa de medição de 0 a 25 mm e resolução de 1  $\mu$ m, fabricado pela Mitutoyo Corporation. Para cada dimensão, foram utilizados três pontos e estes foram medidos três vezes.

Os ensaios de compressão foram realizados de acordo com a norma ASTM D695 com o auxílio de uma máquina de ensaios universal fabricada pela EMIC, modelo DL30000, presente no laboratório de ensaios mecânicos do campus Guarapuava da UTFPR.

### 3.2.2 Elementos finitos

Com o intuito de verificar se os mordentes impressos suportariam a força exercida sobre eles pela morsa e a força de fixação que poderia ser utilizada, foi realizado um estudo de elementos finitos com o auxílio do software ANSYS versão 2019 R3 em sua licença acadêmica.

### 3.2.2.1 Parâmetros de entrada

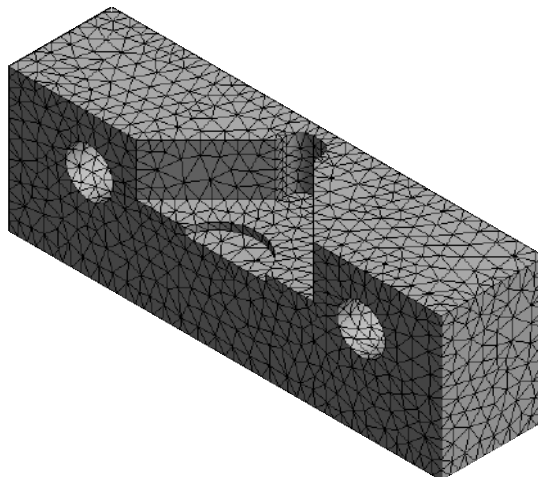
Para a realização da análise de elementos finitos, foram necessárias algumas informações, dentre elas:

- Propriedades mecânicas dos materiais:
  - Tensão limite de escoamento sob compressão
  - Tensão limite de ruptura sob compressão
  - Módulo de elasticidade
  - Coeficiente de Poisson
- Geometria dos mordentes.
- Força exercida pela morsa.
- Restrições e apoios exercidos pela morsa.

As tensões limites dos materiais e o módulo de elasticidade foram obtidos através dos ensaios de compressão descritos na seção 3.2.1. Devido à impossibilidade de determinar os coeficientes des Poisson com o equipamento disponível, os coeficientes foram tomados de tabelas de propriedades dos materiais injetados. Esta substituição não é ideal, pois é esperado uma variação no Poisson comparado ao injetado devido à anisotropia do material impresso. Neste caso, devido à simplicidade do estudo e ao carregamento uniaxial dos mordentes, espera-se um resultado aproximado da tensão nos mordentes.

Quanto à geometria dos mordentes, esta foi definida na seção 3.1. A peça foi importada para o software no formato .STEP e foi gerada uma malha com cerca de 17 mil nós e 10 mil elementos. Uma visualização da malha pode ser vista na Figura 3.5.

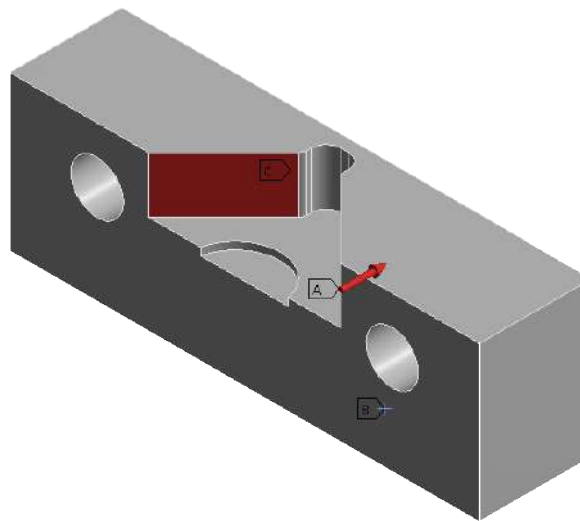
**Figura 3.5 – Malha utilizada no estudo de elementos finitos**



Fonte – Autoria própria

Quanto à força exercida sobre os mordentes, a morsa utilizada permite o ajuste da força numa faixa de 0 (zero) a 4 (quatro) toneladas-força em incrementos de uma tonelada-força. Considerando isso, supôs-se que uma tonelada força seria o suficiente para fixar a peça, considerando as estratégias de usinagem que seriam utilizadas. Partindo dessa suposição, foi informado ao programa que uma força de uma tonelada-força seria exercida nas faces internas dos mordentes, assim como ilustrado na Figura 3.6.

**Figura 3.6 – Localização dos carregamentos para o estudo de elementos finitos**



Fonte – Autoria própria

Por fim, quanto às restrições e apoios aplicados pela morsa, foi considerado que a superfície vertical dos mordentes em contato com a morsa estava engastada e que a superfície inferior dos mordentes poderia deslizar livremente sob o plano do fundo da morsa. Os resultados obtidos a partir do estudo de elementos finitos se encontram na seção 4.1.2.

### 3.3 Fabricação dos mordentes

Nessa seção serão apresentados os meios pelos quais foram fabricados os mordentes conformes utilizados neste trabalho.

#### 3.3.1 Mordentes Usinados

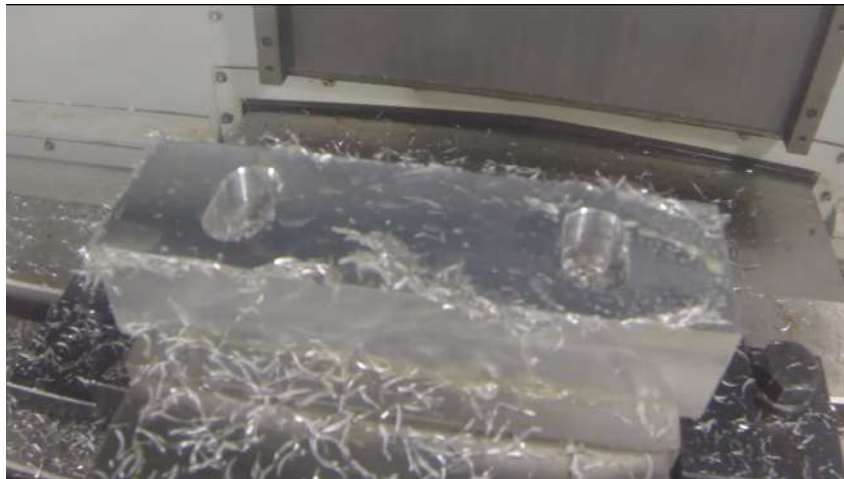
Os mordentes usinados foram fabricados a partir de tarugos de alumínio com diâmetro de 2,25". A escolha deste formato de material foi devido às limitações no material disponível localmente, pois tarugos retangulares de 1,75"x1,25"x5" (45x35x130 mm) seriam mais adequados e teriam menos desperdício de material.

O material foi esquadrejado nas suas dimensões finais em uma fresadora manual utilizando uma fresa de insertos intercambiáveis com diâmetro de 50 mm e uma fresa inteiraça de aço rápido com diâmetro de 14 mm.

Os tarugos esquadrejados foram então usinados no mesmo centro de usinagem CNC utilizado para a usinagem das peças sob estudo, porém utilizando brocas de aço rápido, uma fresa com diâmetro de 6 mm de carbeto de tungstênio com 3 dentes e canal polido indicada para usinagem de alumínio, fabricada pela AHNO Cutting Tools Company, e uma fresa para chanfrar, fabricada pela mesma empresa.

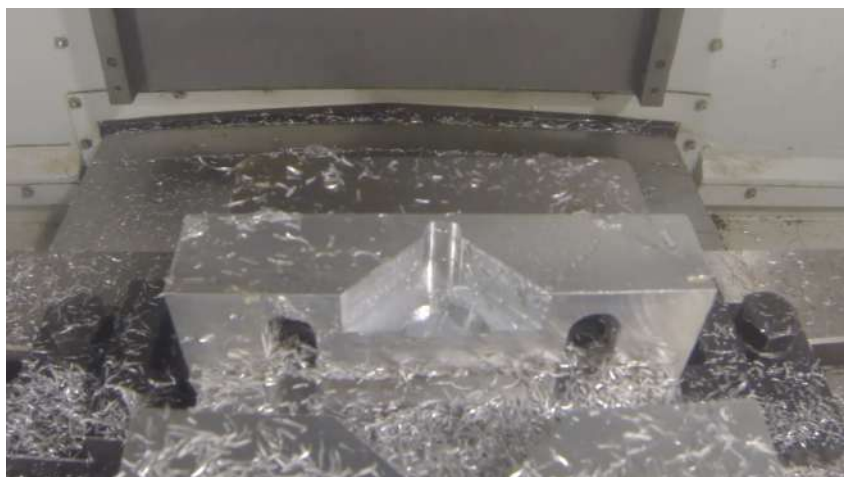
Duas operações foram necessárias para cada uma das peças que formam o par de mordentes. A primeira para gerar os furos e rebaixos para permitir a fixação na morsa e a segunda para criar a cavidade que recebe as peças a serem usinadas. A primeira operação é ilustrada na Figura 3.7 e a segunda na Figura 3.8.

**Figura 3.7 – Primeira operação da usinagem dos mordentes**



Fonte – Autoria própria

**Figura 3.8 – Segunda operação da usinagem dos mordentes**



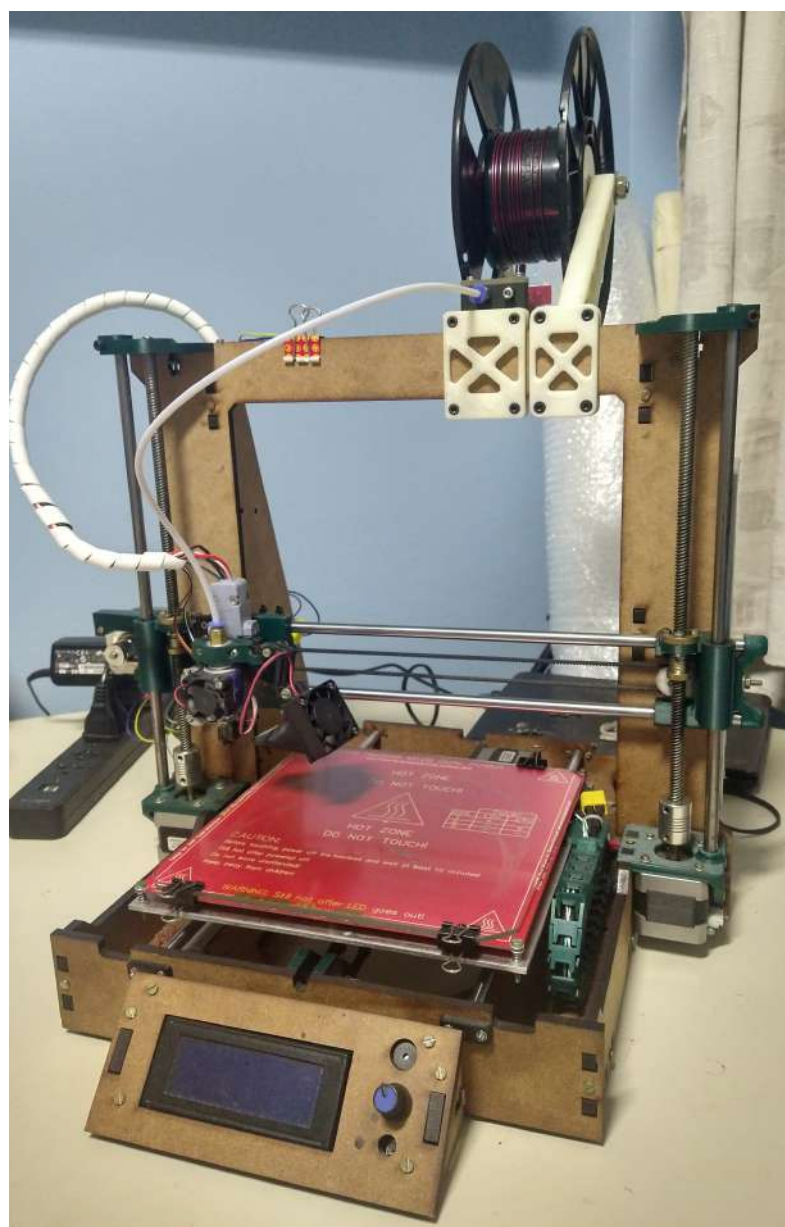
Fonte – Autoria própria

Após finalizada a usinagem, os mordentes foram removidos do centro de usinagem e foram removidas as rebarbas com ferramentas manuais. Feito isso, os mordentes foram armazenados para uso posterior.

### 3.3.2 Mordentes Impressos

Para a fabricação dos mordentes impressos, foi utilizada uma impressora 3D de baixo custo fabricada com base em projetos de código aberto pertencente ao autor. Esta impressora 3D é equipada com uma superfície de impressão que é capaz de atingir 120 °C e um bico extrusor que é capaz de atingir 260 °C, equipado com bicos intercambiáveis com diâmetro de 0,4, 0,6, 0,8 e 1 mm. A impressora 3D utilizada é representada na Figura 3.9.

**Figura 3.9 – Impressora 3D utilizada para a fabricação dos mordentes**



Fonte – Autoria própria



Cada peça dos mordentes foi impressa de modo a ser totalmente preenchida, ou seja, sem vazios no seu interior. Embora o uso de material é muito maior dessa maneira, essa abordagem permite realizar um estudo de elementos finitos com melhor representação do mordente real, pois não são necessárias considerações quanto às estratégias e quantidade de preenchimento.

Para reduzir o tempo de impressão, o qual seria excessivo com o uso de um bico extrusor comum com diâmetro de 0,4 mm, foi utilizado um bico com diâmetro de 1,0 mm, o qual, em conjunto com o restante do sistema de extrusão, permite extrusão volumétrica de até  $40 \text{ mm}^3/\text{s}$ , em contraste com cerca de  $15 \text{ mm}^3/\text{s}$  obtidos com bicos extrusores convencionais. Para ilustrar a diferença no contexto deste trabalho, a impressão de um dos mordentes com um bico de diâmetro de 0,4 mm levaria cerca de nove horas e trinta minutos enquanto que a impressão com o bico utilizado levou pouco mais de duas horas.

Foram impressos dois pares de mordentes, sendo um par em PETG XT e outro em TRITAN HT. As peças foram impressas individualmente para limitar o desperdício de material caso houvessem falhas na impressão. Os parâmetros utilizados na impressão dos mordentes se encontram na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados na impressão dos mordentes**

	Material	PETG XT	TRITAN HT
Altura de camada (mm)		0,5	0,5
Largura de extrusão (mm)		1,125	1,125
Preenchimento (%)		100	100
Número de perímetros		4	4
Velocidade de impressão dos perímetros (mm/s)		40	40
Velocidade de impressão no preenchimento (mm/s)		50	50
Temperatura do bico (°C)		240	260
Temperatura da superfície de impressão (°C)		80	110

**Fonte – Autoria própria**

Estes parâmetros foram escolhidos com base nas recomendações do fabricante dos filamentos, na experiência dos autores e com base no trabalho de Kuznetsov et al. (2018), o qual indica que a relação entre o diâmetro do bico e a altura de camada afeta a resistência mecânica das peças fabricadas. De acordo com os autores, razões diâmetro do bico/altura de camada menores que 2 (dois) apresentam propriedades mecânicas significativamente inferiores. Como foi mantida a relação entre o diâmetro do bico e a altura de camada, espera-se que os mordentes fabricados apresentem propriedades mecânicas similares ou superiores, se comparados aos corpos de prova ensaiados nos estudos preliminares, devido ao número reduzido de pontos de falha ocasionados pela interface entre camadas.



### 3.4 Usinagem das peças

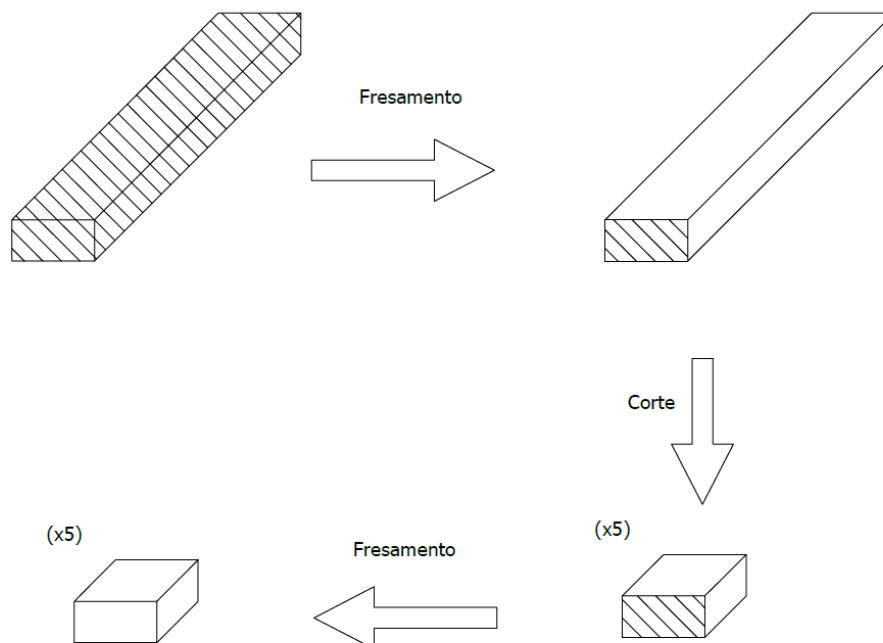
Nessa seção serão discutidas os passos tomados, bem como os materiais, equipamentos, parâmetros e estratégias utilizados na usinagem das peças estudadas neste trabalho.

#### 3.4.1 Preparação de material

Antes que fosse realizada a usinagem das peças sob estudo no centro de usinagem CNC, era necessário selecionar e preparar o material, pois somente o furo central seria usinado no centro de usinagem.

O material utilizado foi aço de baixo carbono na forma de chapas de espessura de 3/4" (19,05 mm). O material foi seccionado, com o auxílio de uma serra fita horizontal presente no laboratório de processos de fabricação do campus Guarapuava da UTFPR. As barras tinham aproximadamente 45 mm de largura, as quais foram usinadas em fresadora manual de modo a formar barras com seção de 40x15 mm. Estas barras foram novamente seccionadas em segmentos de 45 mm e usinadas para formar peças de 40x40x15 mm. Após a usinagem manual, as rebarbas foram removidas com o auxílio de limas e um esmeril equipado com pedra abrasiva e escova de cerdas metálicas. Este processo é ilustrado pela Figura 3.10.

**Figura 3.10 – Diagrama da preparação do material**



Fonte – Autoria própria

Foram preparadas peças suficientes para que fossem usinadas cinco peças em cada

par de mordentes, com algumas excedentes para teste de programa e possíveis erros do operador.

### 3.4.2 Centro de usinagem CNC e programação

Para a usinagem dos corpos de prova analisados neste trabalho, foi utilizado o centro de usinagem presente no laboratório de usinagem da UTFPR campus Guarapuava. O centro de usinagem em questão, Marca ROMI, modelo D600, conta com as especificações técnicas da Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 – Especificações técnicas do centro de usinagem**

Característica	Valor associado
Cone	ISO 40
Rotação máxima do eixo árvore	8000 rpm
Avanço rápido	30 m/min
Capacidade do carrossel	20 ferramentas
Potência do motor principal	20 hp/15 kW

**Fonte – (ROMI S.A., 2022)**

Para realizar a programação do código G a ser executado pelo centro de usinagem, foi utilizado o software Autodesk Fusion 360 em sua licença educacional. O Autodesk Fusion 360 foi utilizado devido ao seu sistema CAD/CAM/CAE integrado, seu sistema CAM avançado e a familiaridade dos autores com o software.

Para a geração do código G, foi utilizado o pós processador "FANUC/fanuc", o qual é incluso no software e é indicado para a geração de código G para centros de usinagem com controle FANUC, assim como o centro de usinagem utilizado. As únicas modificações necessárias no código gerado para a utilização no centro de usinagem são alterações simples no código de troca de ferramentas.

Durante todo o processo de usinagem foi utilizado fluido de corte sintético na forma de um sistema de mínima quantidade de lubrificação, também conhecido como névoa. O sistema utilizado foi fabricado na própria universidade utilizando peças de baixo custo e a impressão 3D. Este tipo de sistema possui a vantagem de utilizar uma pequena quantidade de fluido de corte e auxiliar a evacuação dos cavacos.

### 3.4.3 Furação

Para evitar o uso de estratégias de entrada em rampa ou em hélice no início da usinagem, optou-se por realizar a abertura de um furo com diâmetro superior ao da fresa utilizada para permitir que a mesma iniciasse a usinagem radialmente. Esta abordagem tem a vantagem de submeter os mordentes a esforços, em maior parte, verticais, permitindo uma análise subjetiva do desempenho dos mesmos nestas condições. Nesta seção serão apresentadas as ferramentas e os parâmetros de corte utilizados.

Foram utilizadas 3 (três) brocas para a abertura do furo inicial, sendo elas uma broca de centro com diâmetro de 2 mm e haste com diâmetro de 5 mm seguida de duas brocas de uso geral, primeiramente uma broca com diâmetro e haste de 5 mm, seguida de uma broca com diâmetro e haste de 10 mm.

Para iniciar a furação, foi utilizada uma broca de centro de aço rápido marca Rocast. O propósito de utilizar uma broca de centro é de produzir uma marca na superfície do material que guie as brocas seguintes para garantir o correto posicionamento do furo. Uma broca de centro foi utilizada para essa tarefa devido à sua relação diâmetro comprimento, o qual confere maior rigidez que uma broca de uso geral.

Embora os fabricantes das brocas possuam catálogos, estes não contêm informações a respeito de parâmetros de corte recomendados. Devido a isto, os parâmetros de corte utilizados são embasados na experiência dos autores no uso de ferramentas similares. Os parâmetros de corte utilizados e as dimensões da broca de centro se apresentam na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Parâmetros e dimensões da broca de centro**

Item	Valor
Diâmetro de ponta (mm)	2,00
Diâmetro de fixação (mm)	5,00
Comprimento total (mm)	25,00
Ângulo de ponta	118°
Material	Aço rápido
Revestimento	Nenhum
Número de arestas	2
Rotação (rpm)	2000
Avanço por dente (mm)	0,1

**Fonte – Autoria Própria**

Após a broca de centro seguiram duas brocas, com diâmetros de 5 mm e 10 mm respectivamente. Estas brocas são indicadas para uso geral na usinagem de materiais ferrosos fabricadas pela Dormer, modelo A100. No catálogo consultado não se encontram parâmetros de corte para brocas. Devido a isto, os autores se basearam em sua experiência com ferramentas similares para definir os parâmetros de corte utilizados. A Tabela 3.7 apresenta as dimensões e parâmetros de corte para as brocas utilizadas.

**Tabela 3.7 – Parâmetros e dimensões das brocas**

Broca	5 mm	10 mm
Diâmetro de ponta (mm)	5,00	10,00
Diâmetro de fixação (mm)	5,00	10,00
Comprimento total(mm)	65	130
Ângulo de ponta	118°	118°
Material	Aço rápido	Aço rápido
Revestimento	Tratamento a vapor	Tratamento a vapor
Número de arestas	2	2
Rotação(rpm)	2000	2000
Avanço por dente (mm)	0,0125	0,0125

**Fonte – Autoria Própria**

A Furação inicial com a broca de centro foi realizada através de um ciclo de furação simples (G81) com profundidade de 1 mm a partir da superfície da peça e a furação com as demais brocas foi realizada com um ciclo de furação com retração parcial (G73) com profundidade suficiente para gerar um furo passante.

#### 3.4.4 Fresamento

Seguindo a furação foi realizado o fresamento do furo central das peças sob estudo. Nesta seção serão apresentadas as ferramentas, estratégias e parâmetros de corte utilizados para o fresamento.

O fresamento foi realizado em três etapas, sendo elas, desbaste, acabamento e chanframento. Foi utilizada a mesma fresa para o desbaste e acabamento, enquanto que foi utilizada uma fresa com o ângulo de ponta apropriado para o chanframento.

Para o desbaste e acabamento das peças usinadas, foram utilizadas fresas com diâmetro de 6 mm, código BRGM-4E-D6.0, fabricadas pela AHNO Cutting Tools Company. Foram utilizadas 3 (três) fresas idênticas ao todo, pois foi realizada a substituição da ferramenta para cada par de mordentes com o intuito de estudar possíveis avarias ou desgaste da ferramenta devido aos dispositivos de fixação.

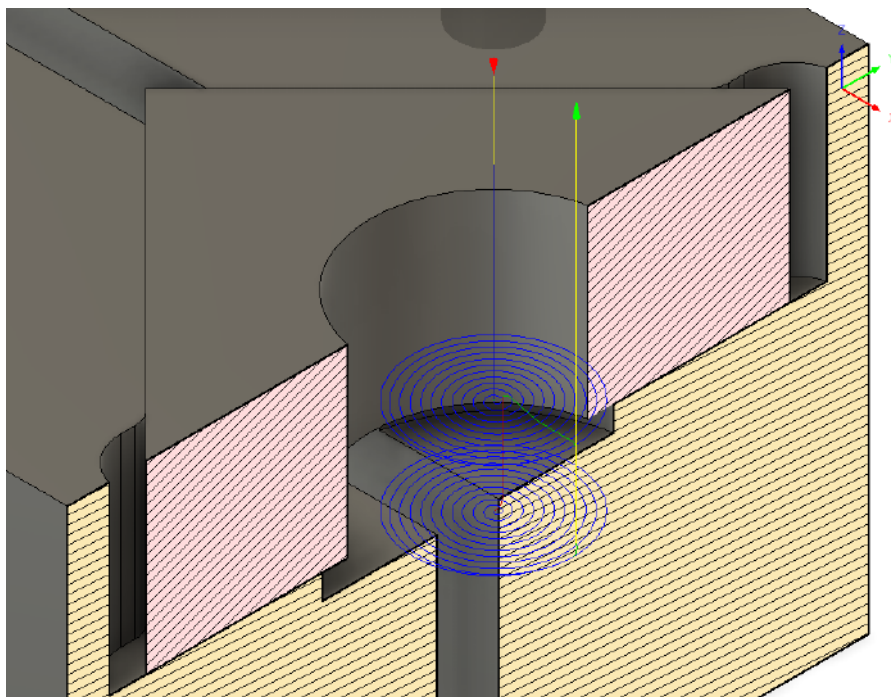
Os parâmetros de corte utilizados foram baseados nos parâmetros informados pelo fabricante no catálogo fornecido pelo mesmo. A Tabela 3.8 apresenta as dimensões da ferramenta e os parâmetros de corte utilizados no desbaste e acabamento.

**Tabela 3.8 – Parâmetros e dimensões das fresas**

Parâmetro	Valor
Diâmetro de corte (mm)	$6,00^{+0}_{-0.02}$
Diâmetro de fixação (mm)	6,00 h6
Comprimento total (mm)	50
Comprimento de corte (mm)	16
Ângulo de hélice	45°
Número de dentes	4
Material	Carbeto de Tungstênio
Revestimento	TiAlN
Dureza máxima recomendada do material usinado	HRC50
Rotação (rpm)	6000
Avanço por dente (mm)	0,05

Fonte – Catálogo AHNO Cutting Tools Company

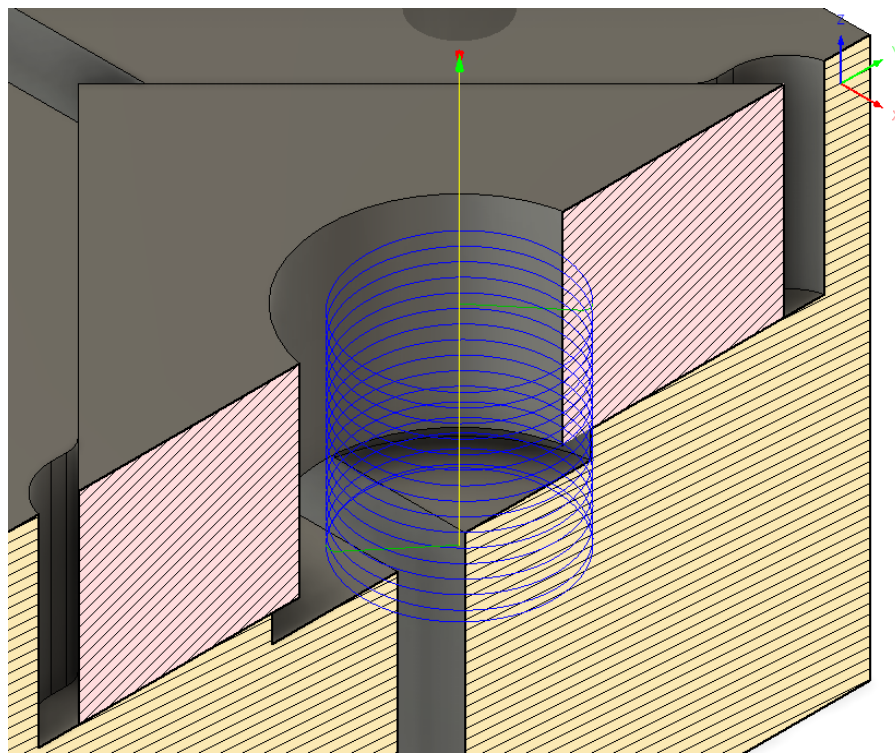
Para realizar o desbaste, foi utilizada uma estratégia de engajamento radial constante intitulada *2D Pocket*, a qual busca manter um ângulo de engajamento constante para evitar variações rápidas nos esforços sofridos pela ferramenta. Esta operação foi programada para fresamento concordante, um passe radial de 0,6 mm, ou 10% do diâmetro da ferramenta, um passe axial de 7,5 mm, o que resultou em dois passes, e um sobremetal para acabamento de 0,5 mm. O caminho programado para essa operação é representado na Figura 3.11.

**Figura 3.11 – Caminho da operação de desbaste**

Fonte – Autoria Própria

Para realizar o acabamento, foi utilizada uma estratégia de fresamento helicoidal intitulada *Bore*, a qual movimenta a ferramenta em um caminho circular enquanto movimenta simultaneamente o eixo vertical de modo a formar um caminho helicoidal. Esta estratégia é comumente utilizada em conjunto com um pequeno incremento axial para o acabamento de furos, pois o pequeno engajamento em conjunto com o uso da parte superior da aresta de corte nos passes subsequentes diminui ou elimina defeitos causados pela deflexão da ferramenta. Para o acabamento do furo, esta estratégia foi programada para fresamento concordante com um passe radial de 0,5 mm, o sobremetal restante da operação anterior, e um incremento axial de 1 mm. O caminho programado se encontra na Figura 3.12.

**Figura 3.12 – Caminho da operação de acabamento**



Fonte – Autoria Própria

Para eliminar possíveis rebarbas geradas pela usinagem, foi utilizada uma fresa para chanfro fabricada pela AHNO Cutting Tools Company para aplicar um pequeno chanfro, com medida de 0,5 mm, na extremidade superior do furo usinado. As rebarbas da extremidade inferior foram removidas manualmente devido a sua pequena quantidade, tamanho e a complexidade adicionada por uma operação subsequente para a chanfragem.

É importante a remoção de rebarbas para evitar ferimentos durante o manuseio das peças e a possível interferência do material excedente durante a medição e análise realizadas após a usinagem. Os parâmetros de corte utilizados foram baseados na experiência dos autores no uso de ferramentas similares, pois os parâmetros de corte para fresas de chanfro

não constam no catálogo fornecido. Os parâmetros utilizados no chanframento na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9 – Parâmetros e dimensões da fresa de chanfro**

Parâmetro	Valor
Diâmetro (mm)	4,00
Diâmetro de ponta (mm)	0
Comprimento total (mm)	20
Ângulo de ponta	90°
Número de dentes	2
Material	Carbeto de tungstênio
Revestimento	nenhum
Rotação (rpm)	5000
Avanço por dente(mm)	0,05

**Fonte – Autoria própria**

#### 3.4.5 Execução

Para a usinagem dos corpos de prova, se prosseguiu da seguinte maneira;

1. Instalação dos mordentes
2. Referenciamento da máquina
3. Instalação de ferramentas
4. Rotina de *Warm-up*
5. Fixação do material preparado anteriormente
6. Definição do zero peça (G54)
7. Definição dos *offsets* das ferramentas
8. Carregamento do programa
9. Teste do programa em *dry-run*
10. Execução do programa
11. Remoção do corpo de prova usinado
12. Usinagem de mais 4 (quatro) corpos de prova
13. Limpeza da máquina
14. Substituição dos mordentes

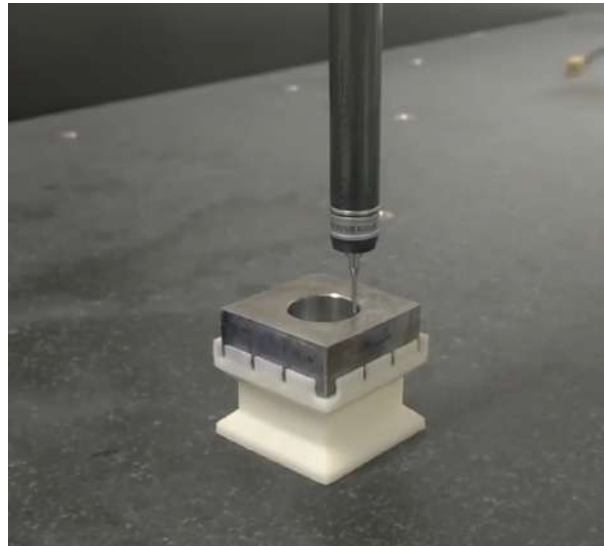
Este procedimento foi repetido três vezes, uma para cada um dos mordentes fabricados, resultando em um total de quinze corpos de prova para análise.

### 3.5 Medição

Para analisar as peças usinadas e, através desta análise, tirar conclusões sobre o desempenho dos mordentes, foram realizadas medições do furo central das peças com o auxílio de uma máquina de medição por coordenadas tridimensional, modelo Crysta Apex série S574, fabricada pela Mitutoyo Corporation, presente no laboratório de metrologia do campus Guarapuava da UTFPR.

Com o intuito de facilitar o processo de medição das peças e garantir a consistência do processo, foi fabricado um dispositivo de fixação utilizando o processo FDM. Pode se observar este dispositivo na Figura 3.13.

**Figura 3.13 – Dispositivo de fixação para medição**



Fonte – Autoria Própria

Para realizar as medições, foi utilizada uma rotina de medição automática utilizando a função *Teach* do software que acompanha a máquina. Esta rotina procedeu da seguinte forma:

- Formação de plano de referência na superfície superior da peça através de medição de três pontos.
- Formação de plano de referência na superfície lateral esquerda através de medição de três pontos.
- Formação de plano de referência na superfície lateral traseira através de medição de três pontos.
- Medição de circularidade através de medição multi-pontos na parte inferior do furo central ( $Z=-11,75$  mm).
- Medição de circularidade através de medição multi-pontos na parte intermediária do furo central ( $Z=-7,5$  mm).
- Medição de circularidade através de medição multi-pontos na parte superior do furo central ( $Z=-3,75$  mm).

Executada a rotina de medição, um relatório foi emitido pelo software contendo os dados de circularidade e de posição, os quais foram utilizados posteriormente para analisar o desempenho dos mordentes.



Finalizadas as medições, foram calculadas as médias e os desvios padrão para a circularidade, a posição em X e a posição em Y, primeiramente peça a peça e em seguida de acordo com o conjunto de mordentes utilizados.

Esta abordagem tem a vantagem de resumir um grande número de medições em poucos indicadores de desempenho, os quais representam o resultado obtido como um todo (média) e a variação entre as amostras do conjunto (desvio padrão).

## 4 Resultados

Este capítulo trata dos resultados obtidos ao decorrer deste trabalho e discussão sobre as implicações dos mesmos na viabilidade do uso dos mordentes impressos

### 4.1 Resultados dos estudos preliminares

Esta seção trata dos resultados obtidos nos estudos realizados previamente ao estudo principal, os quais foram realizados para estudar a viabilidade do mesmo.

#### 4.1.1 Ensaio de compressão

Como indicado na figura 3.3, os corpos de prova tem dimensões nominais de 15mm de largura e de espessura. Com a finalidade de verificar a variação dimensional dos corpos de prova, foram tomadas três medições da largura e três da espessura em diferentes pontos. Desta medição dos corpos de prova, foram obtidos os resultados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Medidas dos corpos de prova**

Corpo de prova	Largura(mm)	Espessura(mm)
A1	15,09 ± 0,019	15,122 ± 0,018
A2	15,094 ± 0,002	15,123 ± 0,005
A3	15,154 ± 0,019	15,166 ± 0,011
A4	15,133 ± 0,037	15,094 ± 0,020
A5	15,087 ± 0,034	15,010 ± 0,036
Média Ax	15,112 ± 0,030	15,103 ± 0,012
B1	15,083 ± 0,023	15,105 ± 0,007
B2	15,131 ± 0,045	15,155 ± 0,006
B3	15,189 ± 0,010	15,145 ± 0,007
B4	15,123 ± 0,029	15,416 ± 0,345
B5	15,115 ± 0,013	15,080 ± 0,004
Média Bx	15,128 ± 0,039	15,180 ± 0,135
C1	15,008 ± 0,018	15,002 ± 0,010
C2	15,031 ± 0,031	15,145 ± 0,028
C3	14,989 ± 0,006	14,924 ± 0,001

**Tabela 4.1 – Medidas dos corpos de prova, continuado**

Corpo de prova	Largura(mm)	Espessura(mm)
C4	15,000 ± 0,009	15,000 ± 0,002
C5	14,982 ± 0,017	14,977 ± 0,003
Média Cx	15,002 ± 0,019	15,010 ± 0,082
D1	15,094 ± 0,028	15,116 ± 0,011
D2	15,155 ± 0,028	15,075 ± 0,005
D3	15,324 ± 0,018	15,180 ± 0,008
D4	15,094 ± 0,033	15,155 ± 0,009
D5	15,118 ± 0,021	15,117 ± 0,003
Média Dx	15,157 ± 0,097	15,128 ± 0,040

**Fonte – Autoria própria**

Embora o estudo dimensional das peças impressas não seja um dos objetivos deste trabalho, ao analisar os dados da Tabela 4.1, foi constatado que todas as dimensões medidas dos corpos de prova apresentaram um desvio do valor nominal menor que 0,2 mm.

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos através dos ensaios de compressão. Estes estão separados por material utilizado e por orientação do ensaio, se ensaiado na direção normal às camadas, ou paralela às mesmas. Também foi calculada a variação percentual dos valores de referência dos materiais, sendo estes 53 MPa para o PETG (EASTMAN CHEMICAL, 2019a) e 43 MPa para o TRITAN (EASTMAN CHEMICAL, 2019b).

**Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de compressão**

Medição	PETG XT		TRITAN HT	
	Normal	Paralela	Normal	Paralela
Resistência à compressão (MPa)	51,58	54,59	48,07	52,23
Desvio padrão	1,284	1,212	1,446	1,398
Variação do valor de referência (%)	-2,75	+2,91	+10,55	+17,83

**Fonte – Autoria Própria**

Comparando os dados da Tabela 4.2 com os dados dos materiais na forma injetada, das Tabelas 2.1 e 2.2, foi constatado que os corpos de prova fabricados em PETG XT apresentaram uma resistência similar ao material virgem e que os corpos de prova fabricados em TRITAN HT apresentaram uma resistência maior que o material virgem. É improvável que uma peça impressa apresente resistência mecânica maior que o material injetado, devido a falhas e lacunas na estrutura interna causadas pelo processo de impressão. Uma possível explicação para o aumento da resistência mecânica é que o filamento utilizado foi fabricado com o uso de outros aditivos ou até mesmo outra variação do TRITAN que a

utilizada como referência. Vale ressaltar que o fabricante do filamento não fornece dados sobre a resistência mecânica do material, nem sobre os polímeros e aditivos utilizados. Também foi observada a anisotropia das peças impressas, a qual é uma propriedade conhecida das peças fabricadas através do processo FDM (AHN et al., 2002), (LEE et al., 2007), (SZYKIEDANS; CREDO; OSISKI, 2017) .

Os gráficos tensão deformação e os resultados na forma que foram apresentados pela máquina universal de ensaios se encontram no Apêndice A.

#### 4.1.2 Elementos finitos

Utilizando os parâmetros de entrada definidos na seção 3.2.2, foram obtidos resultados da tensão equivalente de von Misses e da deformação aproximada dos mordentes quando sujeitos à força exercida pela morsa. Os resultados principais se encontram na Tabela 4.3, enquanto que as distribuições de tensão e deformação estão presentes no Apêndice B.

**Tabela 4.3 – Resultados do estudo de elementos finitos**

Material	Tensão máxima equivalente simulada(MPa)	Deformação máxima(mm)	Tensão de escoamento(MPa)	Fator de segurança
PETG XT	18,45	0,177	51,58	2,795
TRITAN HT	18,06	0,067	48,07	2,662
Alumínio	18,09	0,00429	276	15,26

**Fonte – Autoria própria**

Observando os dados da Tabela 4.3, percebe-se que os mordentes devem suportar um carregamento de uma tonelada-força com um fator de segurança de aproximadamente 2,7, ou seja, teoricamente, os mordentes poderiam suportar uma força aproximadamente 2,7 vezes maior que a simulada.

Embora os mordentes impressos apresentem um fator de segurança inferior ao dos mordentes fabricados em alumínio, estes devem suportar o esforço exercido sobre eles pela morsa sem sofrer deformação permanente.

## 4.2 Desempenho dos mordentes

Esta seção apresenta os resultados obtidos de medições realizadas após a usinagem das peças sob estudo.

### 4.2.1 Máquina de medição de coordenadas

Realizadas as medições com o auxílio da máquina de medição por coordenadas tridimensional, foram obtidos três valores para a circularidade, a posição em X e a posição

em Y para cada peça, referentes a planos posicionados 11,75 mm, 7,5 mm e 5,75 mm abaixo da superfície superior das peças.

A partir destes dados, para cada peça, foram calculados a média e o desvio padrão da circularidade, da posição em X e da posição em Y. Feito isso, obteve-se os resultados das tabelas abaixo. Os resultados das medições por completo se encontram no apêndice C.

Dos resultados das medições das peças fabricadas utilizando os mordentes de alumínio, resumidos na Tabela 4.4, observa-se que as medições de todas as peças apresentaram um desvio padrão pequeno, com o maior deles sendo de 0,018 mm, referente ao desvio padrão das medidas de posição em X da Peça 1. Também se observa que houve um erro sistemático no posicionamento da peça, necessitando de correção de cerca de -0,33 mm em X e de cerca de 0,27 mm em Y. Com relação à circularidade, as peças 3 e 4 apresentaram o maior valor de erro geométrico.

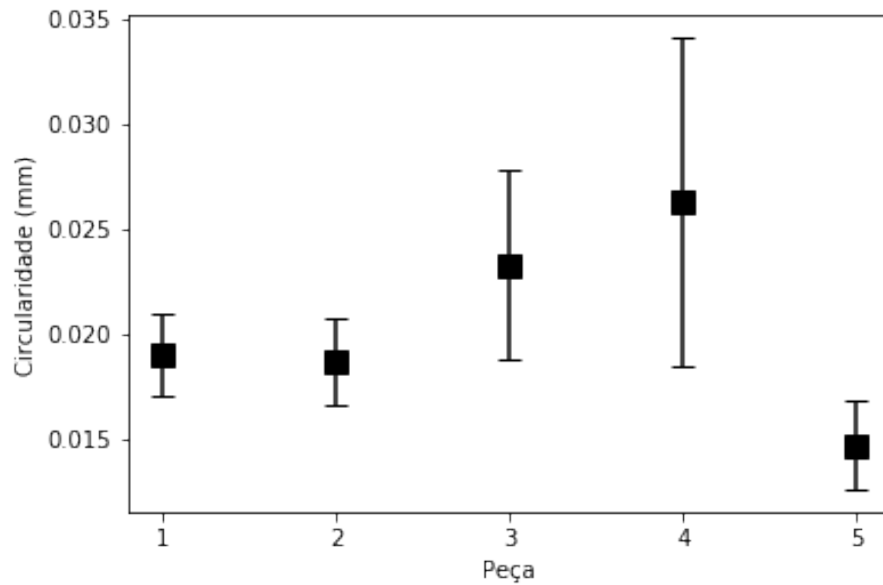
**Tabela 4.4 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de alumínio**

Peça	Circularidade		Posição em X		Posição em Y	
	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio
Peça 1	0,0190	0,0020	20,3693	0,0180	19,7023	0,0170
Peça 2	0,0187	0,0021	20,3507	0,0050	19,7023	0,0012
Peça 3	0,0233	0,0045	20,3080	0,0010	19,7800	0,0056
Peça 4	0,0263	0,0078	20,2827	0,0012	19,7083	0,0076
Peça 5	0,0147	0,0021	20,3477	0,0060	19,7270	0,0100

**Fonte – Autoria própria**

A Figura 4.1 apresenta os dados da circularidade de forma gráfica. Observa-se que as peças três e quatro tiveram os maiores valores de circularidade e, também, a maior variação entre medições. Observa-se também que a peça cinco apresentou o menor valor de circularidade dentre as peças usinadas utilizando os mordentes de alumínio.

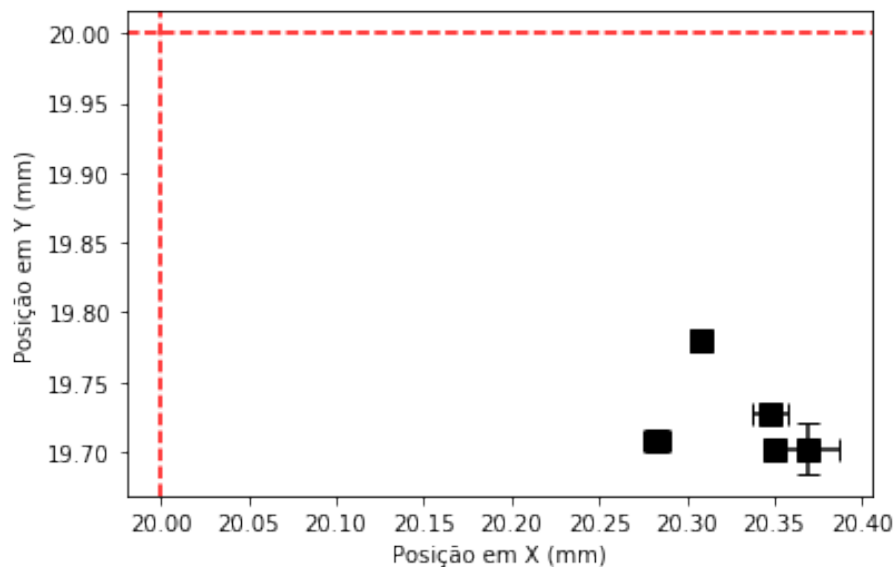
**Figura 4.1 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de alumínio**



Fonte – Autoria própria

A Figura 4.2 apresenta os dados de posição de forma gráfica, com as linhas vermelhas representando a posição teórica exata. Pode se observar que, embora agrupadas com uma dispersão relativamente pequena, as peças se encontram distantes da posição teórica exata.

**Figura 4.2 – Medições de posição, mordentes de alumínio**



Fonte – Autoria própria

Dos resultados das medições das peças fabricadas utilizando os mordentes fabricados em PETG XT, resumidos na Tabela 4.5, observa-se que o desvio padrão das medições

de circularidade se manteve pequeno, porém o desvio padrão das medições de posição foi maior, em alguns casos, se comparado com as medições das peças da Tabela 4.4. Também se observa o mesmo erro sistemático nas medições da posição em X, necessitando correção de cerca de -0,58 mm. Nas medições da posição em Y, o erro sistemático é demasiado pequeno para ser representado pelo número de amostras presentes.

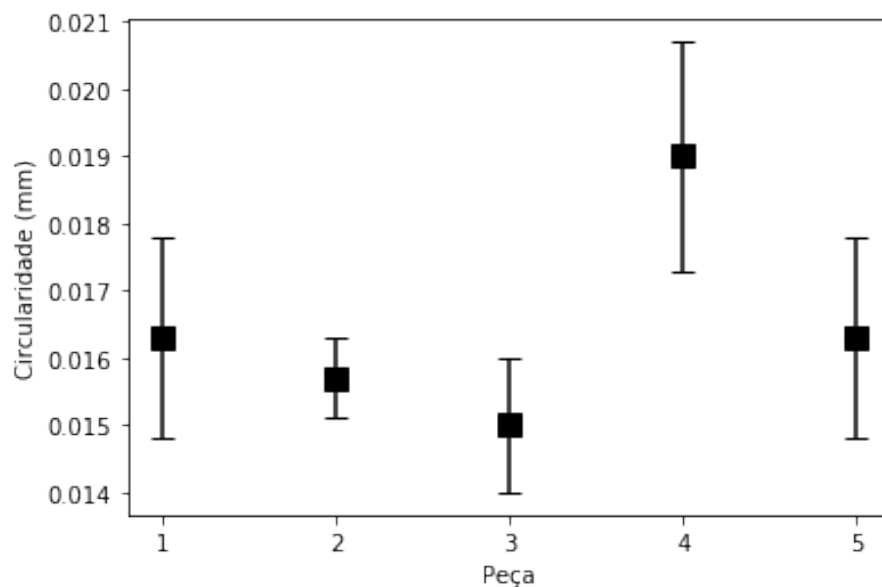
**Tabela 4.5 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de PETG XT**

Peça	Circularidade		Posição em X		Posição em Y	
	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio
Peça 1	0,0163	0,0015	20,5030	0,0095	19,9523	0,0205
Peça 2	0,0157	0,0006	20,4163	0,0023	19,9553	0,0131
Peça 3	0,0150	0,0010	20,5797	0,0080	20,1073	0,0155
Peça 4	0,0190	0,0017	20,6543	0,0091	20,0973	0,0190
Peça 5	0,0163	0,0015	20,7323	0,0035	20,1080	0,0285

Fonte – Autoria própria

A Figura 4.3 apresenta os dados de circularidade de forma gráfica. Observa-se que a peça quatro apresentou a maior variação e o maior valor de circularidade, enquanto que a peça três apresentou o menor valor para a circularidade e a peça dois a menor variação.

**Figura 4.3 – Medições de circularidade, mordentes de PETG XT**

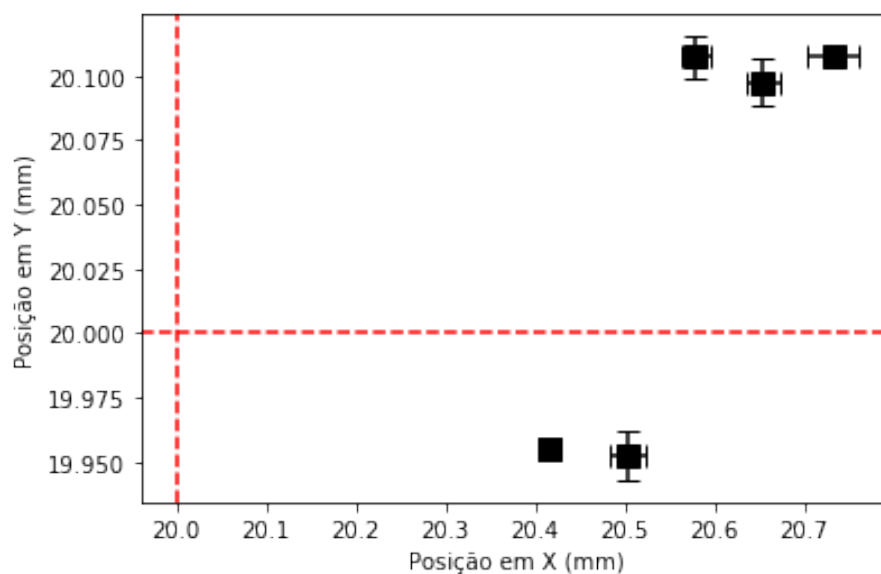


Fonte – Autoria própria

A Figura 4.4 apresenta os dados de posição de forma gráfica, com as linhas vermelhas representando a posição teórica exata. Pode se observar que as peças se apresentam agrupadas em dois grupos, isto pode indicar que houve alguma mudança na posição ou geometria dos mordentes durante o processo de usinagem. Porém observa-se que, embora

separadas em dois grupos, as peças se encontram em grupos pequenos, indicando a repetibilidade do dispositivo de fixação se tratado o defeito que causou esta separação, o qual pode ter sido causado pela temperatura da peça durante a usinagem ou por um deslocamento do conjunto relativo ao zero peça.

**Figura 4.4 – Medições de posição, mordentes de PETG XT**



Fonte – Autoria própria

Dos resultados das medições das peças fabricadas utilizando os mordentes fabricados em TRITAN HT, resumidos na Tabela 4.6, observou-se que os desvios padrão das medições de circularidade das peças 1, 4 e 5 foram muito pequenos, enquanto que o desvio padrão da peça 2 foi o maior de todas as peças medidas. Nas medições de posição, novamente, observou-se a necessidade de uma correção de cerca de -1,25 mm em X e de cerca de -0,44 mm em Y.

**Tabela 4.6 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de TRITAN HT**

Peça	Circularidade		Posição em X		Posição em Y	
	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio
Peça 1	0,0203	0,0006	21,1723	0,0090	20,3990	0,0010
Peça 2	0,0257	0,0107	21,2167	0,0100	20,3637	0,0015
Peça 3	0,0190	0,0017	21,2600	0,0140	20,4470	0,0026
Peça 4	0,0200	0,0000	21,2843	0,0155	20,4707	0,0015
Peça 5	0,0160	0,0000	21,3060	0,0010	20,5093	0,0015

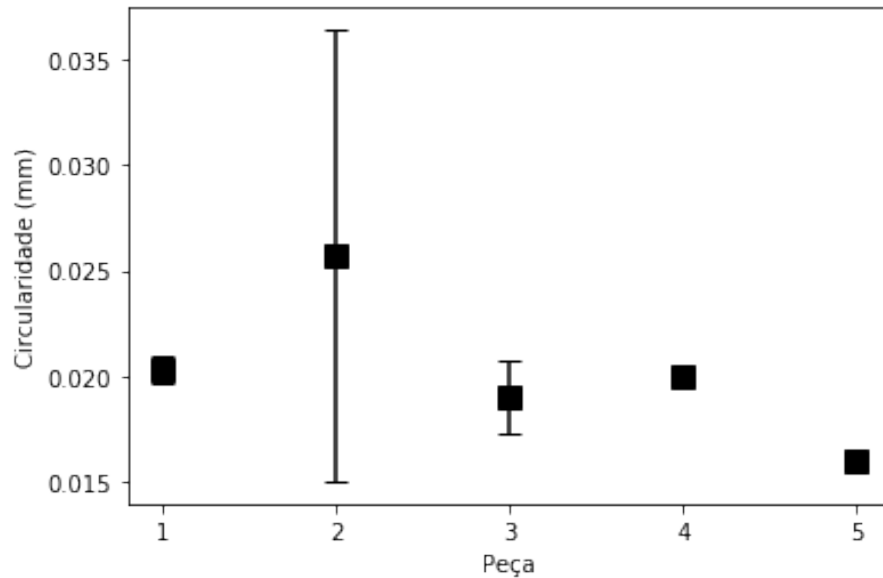
Fonte – Autoria própria

A Figura 4.5 apresenta os dados de circularidade de forma gráfica. Observa-se que houve pouca variação nas medições de cada peça, exceto na peça dois, a qual apresentou



grande variação.

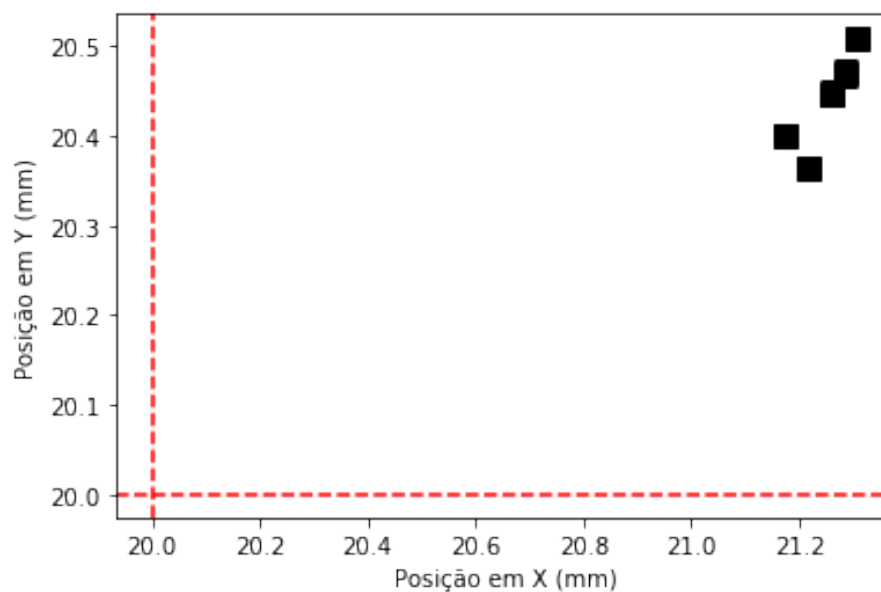
**Figura 4.5 – Médias e desvios padrões tomados peça a peça, mordentes de TRITAN HT**



Fonte – Autoria própria

A Figura 4.6 apresenta os dados de posição de forma gráfica, com as linhas vermelhas representando a posição teórica exata. Pode se observar que, embora deslocadas da posição teórica exata, as peças se encontram agrupadas e com pouca variação, indicando a repetibilidade do dispositivo de fixação.

**Figura 4.6 – Medições de posição, mordentes de TRITAN HT**



Fonte – Autoria própria

Vistos estes resultados, observou-se que os resultados para a posição do furo central se desviaram do valor exato teórico de 20 mm, porém, para cada mordente, este erro foi similar entre as peças, indicando um erro sistemático nas medições.

Finalmente, foram tomadas as médias destes resultados para fornecer uma visão geral dos resultados de cada mordente.

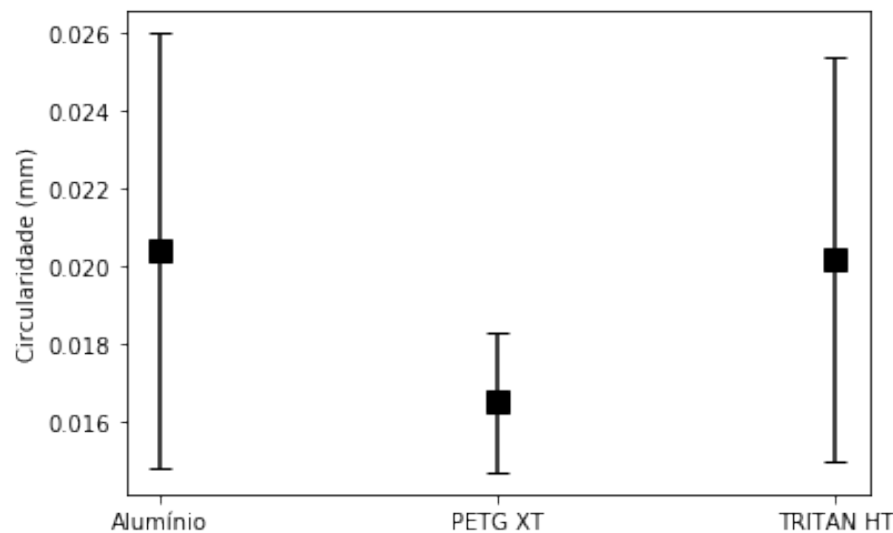
**Tabela 4.7 – Médias e desvios padrões, comparativo entre mordentes**

Material dos mordentes	Circularidade		Posição em X		Posição em Y	
	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio	Média(mm)	Desvio
Alumínio	0,0204	0,0056	20,3317	0,0336	19,7240	0,0316
PETG XT	0,0165	0,0018	20,5771	0,1149	20,0441	0,0782
TRITAN HT	0,0202	0,0052	21,2479	0,0506	20,4379	0,0534

Fonte – Autoria própria

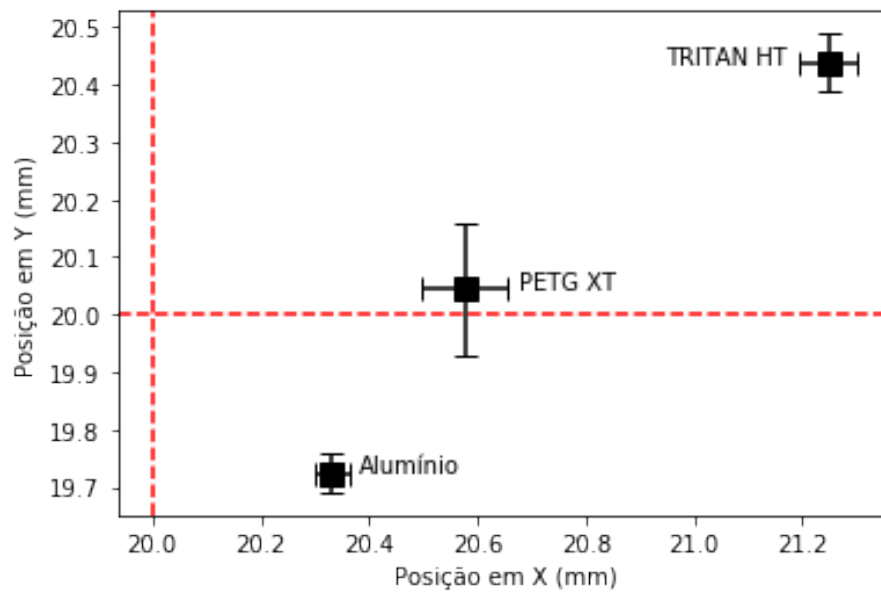
A Figura 4.7 apresenta os dados de circularidade de forma gráfica. Nela, observa-se que os mordentes de TRITAN HT apresentaram um desempenho similar aos mordentes de alumínio, enquanto que os mordentes de PETG XT apresentarem menor valor de circularidade e menor variação entre peças.

**Figura 4.7 – Médias e desvios padrões, comparativo entre mordentes**



Fonte – Autoria própria

A Figura 4.8 apresenta os dados de posição de forma gráfica, com as linhas vermelhas representando a posição teórica exata. Nela, pode se observar que, embora se apresentem o mais próximo da posição teórica exata, as peças usinadas nos mordentes de PETG XT apresentaram a maior variação, enquanto que as peças usinadas nos mordentes de alumínio apresentaram a menor variação.

**Figura 4.8 – Medições de posição, comparativo entre mordentes**

Fonte – Autoria própria

Observando estes resultados mais concisos, observamos que os mordentes impressos em TRITAN HT apresentaram um desempenho similar aos mordentes usinados em alumínio, no que se refere à circularidade das peças obtidas. Os mordentes impressos em PETG XT apresentaram um erro um pouco menor, uma diferença de cerca de 3  $\mu\text{m}$ , se comparados com os demais.

Dos resultados da tolerância de posição, observa-se novamente que houve um erro sistemático no posicionamento das peças. Este pode ter sido causado por erros no referenciamento do zero peça e/ou devido à movimentação da peça com relação à morsa devido à deformação elástica dos mordentes.

Considerando os valores de desvio padrão, os quais representam a repetibilidade no posicionamento da peça, observa-se que, como esperado, os mordentes usinados em alumínio ofereceram a menor variação, com os mordentes impressos em TRITAN HT oferecendo uma variação um pouco maior. Já os mordentes impressos em PETG XT apresentaram uma variação mais que três vezes maior que os mordentes usinados em alumínio.

Visto estes resultados, conclui-se que os mordentes fabricados em TRITAN HT através do processo de deposição de material fundido ofereceram um desempenho similar aos mordentes usinados em alumínio, enquanto que os mordentes impressos em PETG XT ofereceram um desempenho um pouco inferior, porém estes podem ser viáveis para o uso na fabricação de dispositivos de fixação, em especial em casos onde o referenciamento é realizado peça por peça ou onde a variação encontrada não é significativa como, por exemplo, na usinagem de peças fundidas ou de pouca precisão.

## 5 Conclusão

Dos ensaios preliminares, foram obtidos dados sobre a resistência mecânica dos materiais impressos. A partir destes dados, foi realizado um estudo de elementos finitos que indicou a viabilidade teórica do uso de dispositivos de fixação fabricados através do processo de modelagem por fusão e deposição. Em seguida, foram fabricados três conjuntos de mordentes, um deles usinado e outros dois fabricados através do processo de modelagem por fusão e deposição. O conjunto de mordentes usinados demandou de mais tempo, ferramental e planejamento se comparado aos demais. Utilizando cada conjunto de mordentes, um conjunto de cinco peças foram fabricadas, as quais foram medidas com o auxílio da máquina de medição por coordenadas para obter valores do desvio da circularidade e posição. O desvio da circularidade serviu para analisar a estabilidade da peça durante a usinagem, pois uma variação maior indicaria a movimentação da peça durante o processo, enquanto que o desvio de posição serviu para estudar a repetibilidade de posicionamento conferida pelos mordentes. Por fim, as medições obtidas foram analisadas e indicaram que, embora apresentem desempenho inferior comparados aos mordentes usinados, os mordentes fabricados através da tecnologia de modelagem por fusão e deposição são uma opção viável para algumas aplicações, como a usinagem de baixo volume de peças fundidas ou de baixa precisão. Também se observou que, utilizando os materiais e estratégias empregados, foi possível fabricar peças com uma circularidade média de 0,0204 mm utilizando os mordentes de alumínio, com uma circularidade média de 0,0165 mm utilizando os mordentes de PETG XT e com uma circularidade média de 0,0202 mm utilizando os mordentes de TRITAN HT. Quanto à repetibilidade, foram observadas variações de cerca de 0,03 mm utilizando os mordentes de alumínio, de cerca de 0,01 mm utilizando os mordentes de PETG XT e de cerca de 0,05 mm utilizando os mordentes de TRITAN HT.

# Referências

- 3D FILA. *Filamento PETG XT Glass Colorless*. 2019. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/produto/filamento-petg-xt-glass-colorless/>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.
- AHN, S.-H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping Journal*, Oct 2002. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 43.
- AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS TESTING. *ASTM D695-15*: Standard test methods for compressive properties of rigid plastics. [S.l.], 2015. Nenhuma citação no texto.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Y14.5.1M - 1994*: Mathematical definition of dimensioning and tolerancing principles. New York, NY, 1994. Nenhuma citação no texto.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Y14.5 - 2009*: Dimensioning and tolerancing. New York, NY, 2009. Nenhuma citação no texto.
- AUTODESK. *Fundamentals of CNC machining: a practical guide for beginners*. [S.l.]: Autodesk Inc., 2014. Citado na página 13.
- EASTMAN CHEMICAL. Technical data sheet eastman spectar copolyester 14471. 2019. Disponível em: <<https://www.eastman.com/Pages/ProductHome.aspx?product=71002011>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 42.
- EASTMAN CHEMICAL. Technical data sheet eastman tritan copolyester tx1000. 2019. Disponível em: <<https://www.eastman.com/Pages/ProductHome.aspx?product=71068024>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.
- FITZPATRICK, M. *Introdução aos processos de usinagem*. [S.l.]: AMGH editora, 2013. Citado na página 13.
- GAMEROS, A. et al. State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 123, p. 121, Dec 2017. Citado na página 12.
- HAAS AUTOMATION. *Mill Soft Jaws: The Proper Way to Make and Use Them Haas Automation Tip of the Day*. YouTube, 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0ppYjZ4So6c>>. Citado na página 13.
- HOFFMAN, E. G. *Jig and fixture design*. 5. ed. [S.l.]: Delmar, cengage learning, 2004. (Delmar learning drafting). Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION AND AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS TESTING. *ISO/ASTM 52900:2015(E)*: Standard terminology for additive manufacturing - general principles - terminology. [S.l.], 2015. Citado na página 14.

KUZNETSOV, V. et al. Strength of pla components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3d printer as a function of geometrical parameters of the process. 2018. Citado na página 31.

LEE, C. et al. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 43.

LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J. P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (lm) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP annals*, v. 52, n. 2, p. 589609, 2003. Citado na página 10.

ROMI S.A. *ROMI D Series Machining Centers*. 2022. Disponível em: <<https://www.romi.com/en/produtos/romi-d-series/>>. Citado na página 33.

SCOPIGNO, R. et al. Digital fabrication techniques for cultural heritage: A survey. *Computer Graphics Forum*, v. 36, n. 1, p. 6–21, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.12781>>. Citado na página 17.

SZYKIEDANS, K.; CREDO, W.; OSISKI, D. Selected mechanical properties of petg 3-d prints. *Procedia Engineering*, v. 177, n. 2017, p. 455461, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 43.

VOLPATO, N. et al. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Blucher, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 11, 14, 15 e 16.

## APÊNDICE A - Resultados dos ensaios de compressão





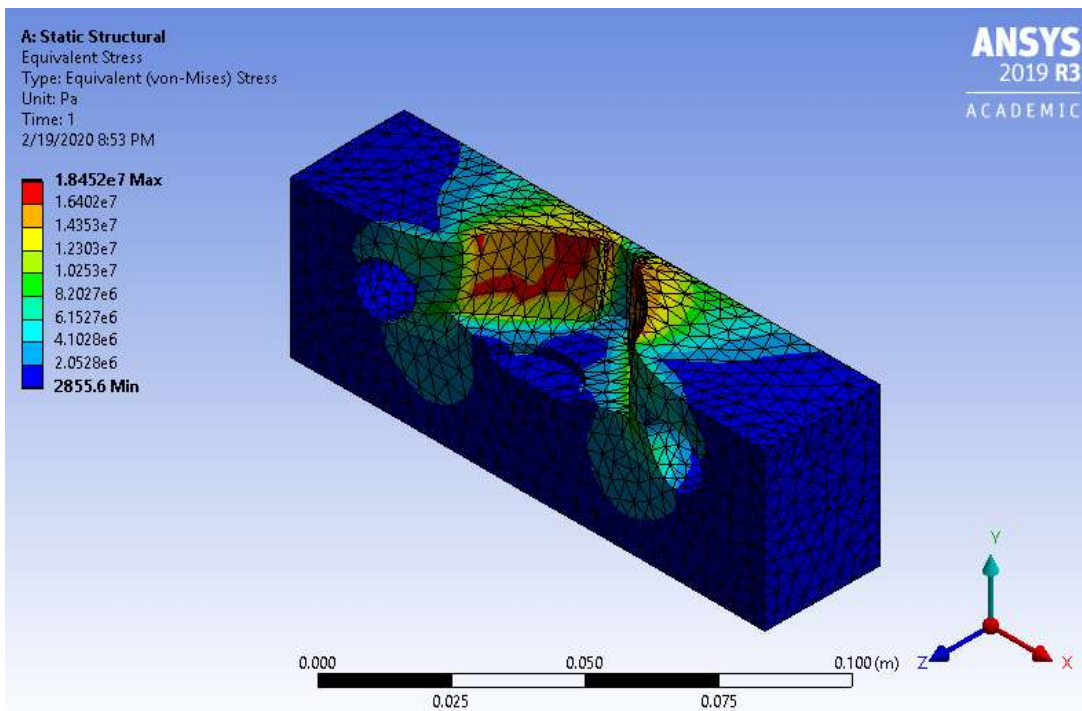






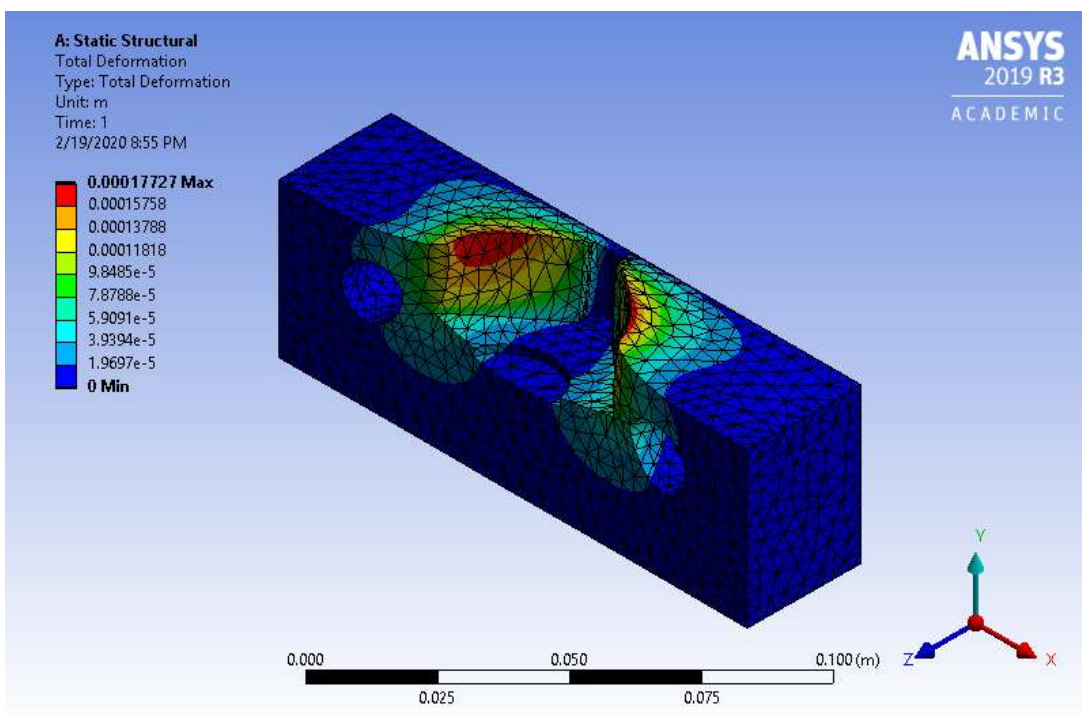
## APÊNDICE B - Resultados do estudo de elementos finitos

### Tensão equivalente de Von Misses, PETG



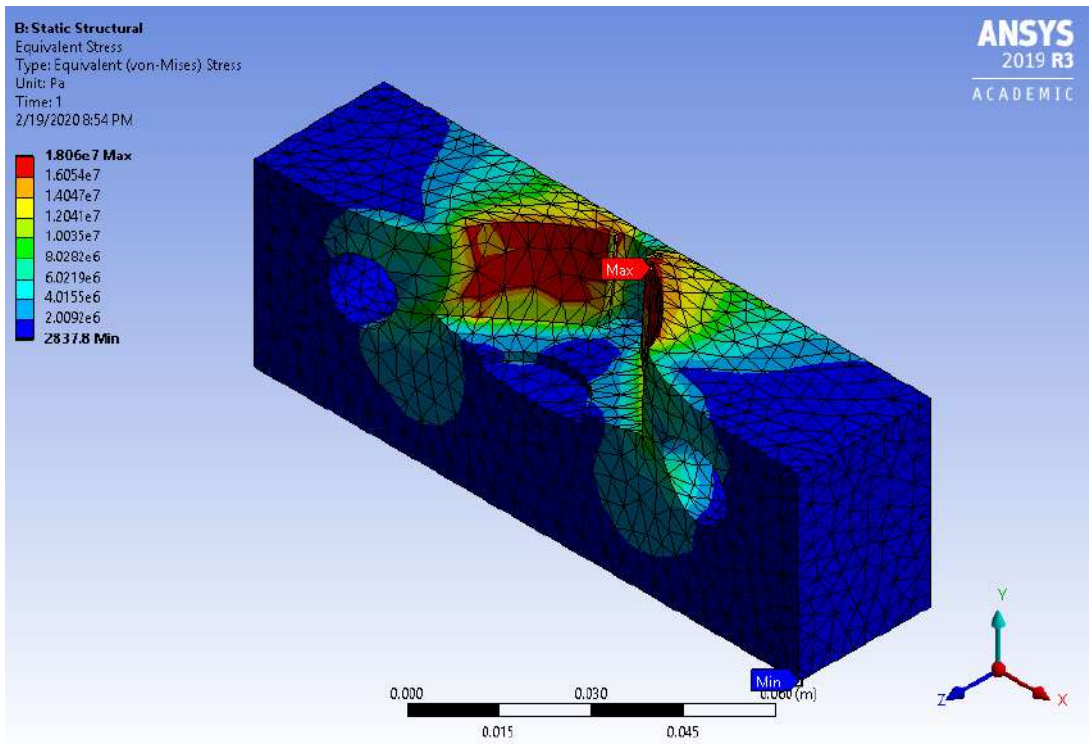
Fonte – Autoria própria

### Deformação esperada, PETG



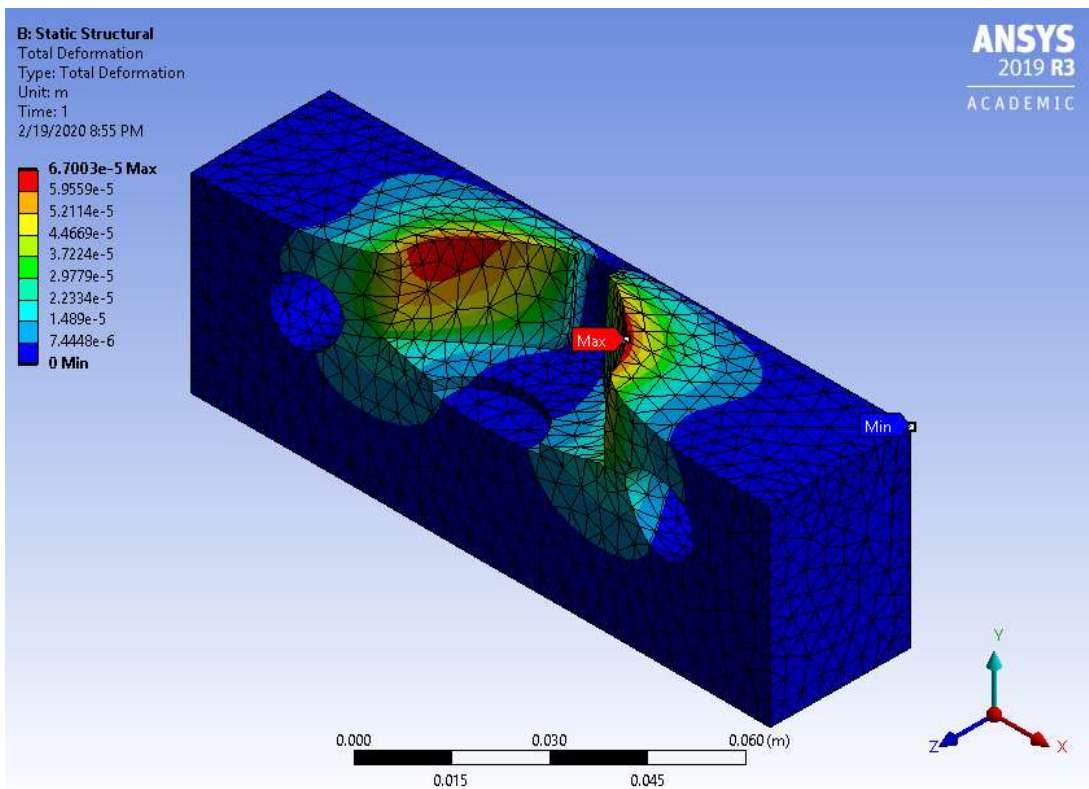
Fonte – Autoria própria

### Tensão equivalente de Von Misses, TRITAN



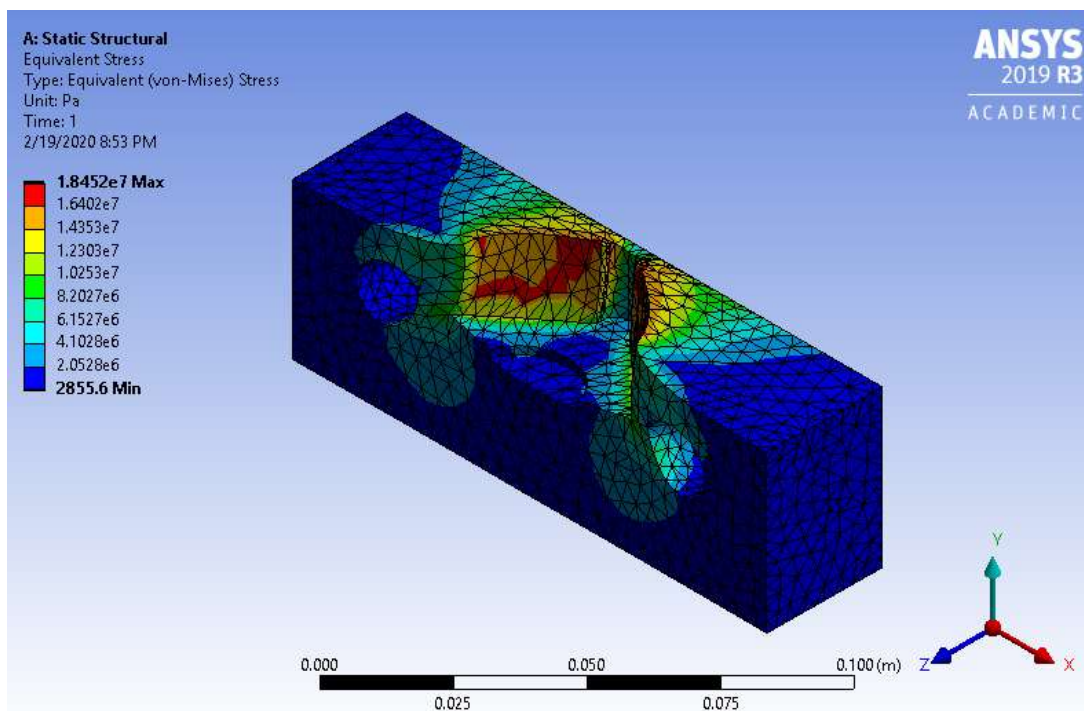
Fonte – Autoria própria

### Deformação esperada, TRITAN



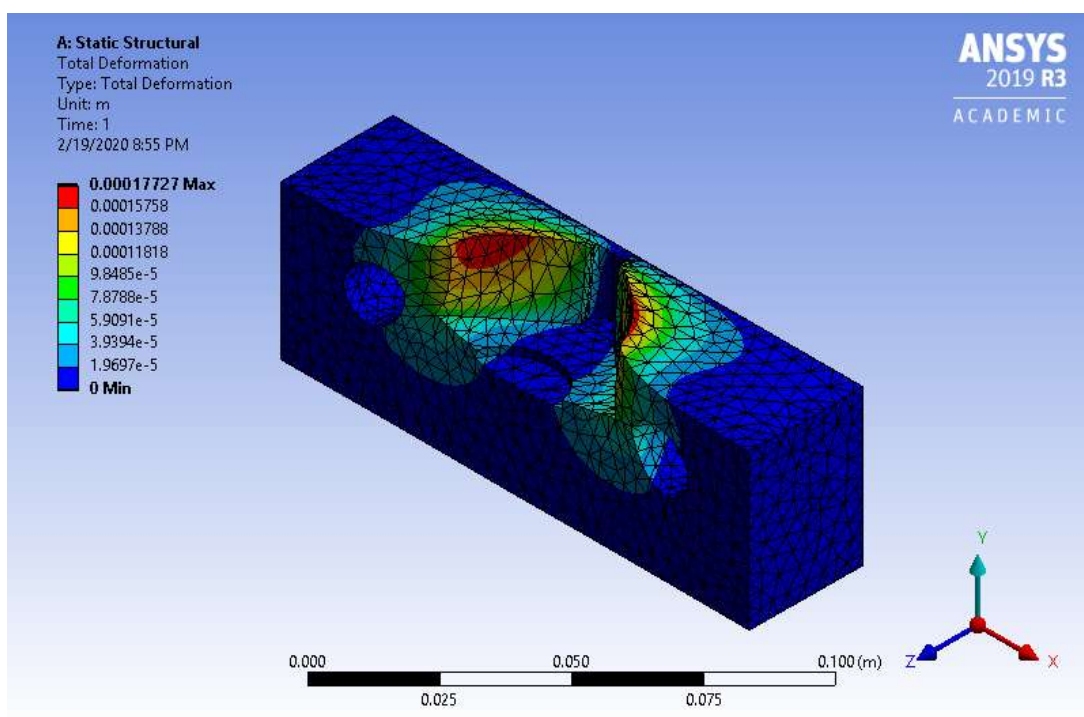
Fonte – Autoria própria

### Tensão equivalente de Von Misses, Alumínio



Fonte – Autoria própria

### Deformação esperada, Alumínio



Fonte – Autoria própria

## Apêndice C - Resultados da máquina de medição por coordenadas



### Resultados das medições, mordentes de alumínio

		Circularidade(mm)	Posição em X(mm)	Posição em Y(mm)
Peça 1	Z=-11,75 mm	0,021	20,351	19,686
	Z=-7,5 mm	0,019	20,370	19,701
	Z=-3,75 mm	0,017	20,387	19,720
Peça 2	Z=-11,75 mm	0,021	20,346	19,703
	Z=-7,5 mm	0,017	20,350	19,703
	Z=-3,75 mm	0,018	20,356	19,701
Peça 3	Z=-11,75 mm	0,028	20,309	19,775
	Z=-7,5 mm	0,023	20,308	19,779
	Z=-3,75 mm	0,019	20,307	19,786
Peça 4	Z=-11,75 mm	0,035	20,282	19,700
	Z=-7,5 mm	0,024	20,282	19,710
	Z=-3,75 mm	0,02	20,284	19,715
Peça 5	Z=-11,75 mm	0,017	20,354	19,717
	Z=-7,5 mm	0,013	20,347	19,727
	Z=-3,75 mm	0,014	20,342	19,737

Fonte – Autoria própria

### Resultados das medições, mordentes de PETG XT

		Circularidade(mm)	Posição em X(mm)	Posição em Y(mm)
Peça 1	Z=-11,75 mm	0,018	20,494	19,932
	Z=-7,5 mm	0,015	20,502	19,952
	Z=-3,75 mm	0,016	20,513	19,973
Peça 2	Z=-11,75 mm	0,015	20,415	19,943
	Z=-7,5 mm	0,016	20,415	19,954
	Z=-3,75 mm	0,016	20,419	19,969
Peça 3	Z=-11,75 mm	0,016	20,572	20,092
	Z=-7,5 mm	0,015	20,579	20,107
	Z=-3,75 mm	0,014	20,588	20,123
Peça 4	Z=-11,75 mm	0,017	20,646	20,079
	Z=-7,5 mm	0,02	20,653	20,096
	Z=-3,75 mm	0,02	20,664	20,117
Peça 5	Z=-11,75 mm	0,016	20,729	20,079
	Z=-7,5 mm	0,018	20,732	20,109
	Z=-3,75 mm	0,015	20,736	20,136

Fonte – Autoria própria

### Resultados das medições, mordentes de TRITAN HT

		Circularidade(mm)	Posição em X(mm)	Posição em Y(mm)
Peça 1	Z=-11,75 mm	0,021	21,163	20,398
	Z=-7,5 mm	0,020	21,173	20,400
	Z=-3,75 mm	0,020	21,181	20,399
Peça 2	Z=-11,75 mm	0,038	21,207	20,365
	Z=-7,5 mm	0,019	21,216	20,364
	Z=-3,75 mm	0,020	21,227	20,362
Peça 3	Z=-11,75 mm	0,021	21,246	20,449
	Z=-7,5 mm	0,018	21,260	20,448
	Z=-3,75 mm	0,018	21,274	20,444
Peça 4	Z=-11,75 mm	0,020	21,269	20,469
	Z=-7,5 mm	0,020	21,284	20,471
	Z=-3,75 mm	0,020	21,300	20,472
Peça 5	Z=-11,75 mm	0,016	21,306	20,508
	Z=-7,5 mm	0,016	21,305	20,509
	Z=-3,75 mm	0,016	21,307	20,511

Fonte – Autoria própria