

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

# **Estudo de viabilidade para aplicações espaciais da impressão 4D.**

**Autor: Tiago Rodrigues dos Santos**

**Orientador: Prof. Dr. Cristian Vendittozzi**

**Coorientador:**

**Brasília, DF**

**2023**



**Tiago Rodrigues dos Santos**

**Estudo de viabilidade para aplicações espaciais da impressão  
4D.**

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

Brasília, DF

2023

---

Tiago Rodrigues dos Santos

Estudo de viabilidade para aplicações espaciais da impressão 4D./ Tiago Rodrigues dos Santos. – Brasília, DF, 2023-

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

Orientador: Prof. Dr. Cristian Vendittozzi

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Caracterização termica 2. Impressão 4D 3. Atuadores aeronautico e aeroespacial  
4. Modelagem digital. 5. Otimização geométrica usando impressora 3D. I. Prof. Dr.  
Cristian Vendittozzi. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo  
de viabilidade para aplicações espaciais da impressão 4D.

---

**Tiago Rodrigues dos Santos**

**Estudo de viabilidade para aplicações espaciais da impressão  
4D.**

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, :

---

**Prof. Dr. Cristian Vendittozzi**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos  
Junior**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Maria Del Pilar Hidalgo Falla**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por possibilitar que eu realiza-se esse sonho que é ser Engenheiro Aeroespacial. A minha família e namorada Daniela, pelo apoio e compreensão em todos os momentos difíceis nessa longa jornada que passei, que só foi possível chegar até aqui com apoio deles. Gostaria também de fazer um agradecimento especial aos meus mentores e professores, Dr. Cristian Vendittozzi e Dr. Manuel Barcelos, que foram peças fundamentais na minha jornada acadêmica, por serem pessoas que acreditaram em minha capacidade e me deram a oportunidade de me desenvolver como profissional, que me aconselharam e me corrigiram quando necessário, possibilitando que eu consegui-se chegar até o fim desta longa e árdua jornada.

Gostaria também de agradecer para ter tido a oportunidade de participar do projeto intitulado: Fabricação e caracterização de material termoplástico de alta temperatura denominado PEEK, por manufatura aditiva, para aplicações aeroespaciais, financiado pela FAPDF e coordenado pelo Prof. Cristian Vendittozzi, por auxiliar no desenvolvimento desta pesquisa, com conhecimento técnico na área de manufatura aditiva e fornecimento de materiais.

# Resumo

A tecnologia de impressão 4D é um método que tem sua evolução direto da impressão 3D, tecnologia essa de manufatura aditiva bastante consolidada, no qual um objeto é fabricado através da sobreposição de camadas sucessivas de material (camada por camada). A característica distintiva da tecnologia de impressão 4D em comparação à impressão 3D é que, graças ao uso de materiais com propriedades de memória de forma, é possível que os objetos impressos 4D tenham a capacidade de mudar sua forma quando expostos a um estímulo externo muito específico, e de realizar uma certa ação quando impressos em certas configurações geométricas. Este método torna possível mudar a forma da geometria do objeto ao longo do tempo, e este é o quarto D na definição. O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de utilizar os materiais mais comum, e de baixo custo, que são comumente utilizados na impressão 3D, em aplicações 4D. Analisando os materiais que utilizamos diariamente na manufatura aditiva por deposição fundida tentaremos entender quais deles demonstram ter potencial para o uso na fabricação de “peças 4D”, com o intuito de escolher o material que mostra o desempenho melhor para um futuro utilize como atuador em uma específica aplicação aeroespacial. Além disto, será desenvolvida uma metodologia de fabricação, programação e desenvolvimento da geometria de teste para a produção de uma primeira peça manufaturada via impressão 4D. No desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado a impressora 3D ENDER 5 Plus da Creality da tecnologia de deposição de material fundido (ou FDM, pelo inglês Fusion Deposition Modelling), e os principais materiais estudados foram o Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Nylon e Ácido Polilático (PLA). Os principais resultados obtidos nesta pesquisa foram, a validação da metodologia de Fabricação 4D desenvolvida neste trabalho e a fabricação das primeiras peças 4D, usando dois dos materiais estudados.

**Palavras-chaves:** Impressão 4D, polímeros com memória de forma, Manufatura aditiva, Aplicações espaciais, Atuadores.

# Abstract

The 4D printing technology is a method that has its evolution directly from 3D printing, this well established technology of additive manufacturing, in which an object is manufactured through the superposition of successive layers of material (layer by layer). The difference between 4D printing and 3D printing is that, through the use of materials with shape memory properties and the development of special geometries, this technology allows objects to change their configuration when exposed to a very specific external stimulus. In a nutshell, this method allows the shape of the object geometry to be changed over time. The objective of this work is a feasibility study, through the analysis of the main low-cost materials used in 3D printing, of the development of parts fabricated by 4D printing, to determine what might be the most suitable material for the production of parts for future applications in the space sector. The main materials, whose properties were investigated, were acrylonitrile butadiene styrene (ABS), nylon, and polylactic acid (PLA). Furthermore, the methodology for the production, programming and development of a test geometry fabricated by 4D printing will be developed. The main results obtained in this research were the validation of the 4D manufacturing methodology and the production of the first 4D parts, using two of the materials studied.

**Key-words:** 4D Printing, Shape Memory Polymers, Additive Manufacturing, Space Applications, Actuators.

# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Sequência de operações realizadas para alcançar os objetivos, fonte: AUTOR   | 22 |
| Figura 2.1 – Esquemático da Modelagem por FDM fonte:3Dlab   | 25 |
| Figura 2.2 – Diagrama da impressora cartesiana fonte:3Dlab  | 26 |
| Figura 2.3 – Diagrama da impressora corre xy fonte:3Dlab  | 27 |
| Figura 4.1 – Diagrama de blocos comparativo entre impressão 4D e 3D   | 40 |
| Figura 4.2 – Esquemático do mecanismo de programação da Impressão 4D, fonte; adaptação (DIAS, 2020)   | 44 |
| Figura 4.3 – Esquemático do mecanismo molecular dos SMP's, fonte: adapatação (DIAS, 2020)   | 46 |
| Figura 5.1 – Geometria Desenvolvida no Solidworks   | 51 |
| Figura 5.2 – Vista Isometrica da caixa que foi desenvolvida no solidworks, usando as ferramentas de chapas metálicas                                    | 52 |
| Figura 5.3 – Desenho tecnico da caixa desenvolvido no solidworks  | 52 |
| Figura 5.4 – Equipamento usado no ensaio de DSC/TGA Fonte: Autor.   | 54 |
| Figura 5.5 – Parâmetros do Corpo de Prova de Tração. Fonte: (ASTM D638, 2014).  | 54 |
| Figura 5.6 – Sistema de Fabricação de Filamento Fonte: Autor.   | 57 |
| Figura 6.1 – Pellets de ABS com Pó de Titânio. Fonte: Autora.   | 58 |
| Figura 6.2 – Microscopia confocal: magnificação 10x do corpo de prova de ABS com alumínio 5%. valor de luminosidade fixada de: a) 0; b) 10000; c) 9800. | 59 |
| Figura 6.3 – Microscopia confocal: magnificação 40x do corpo de prova de ABS com alumínio 5%. valor de luminosidade fixada de: a) 0; b) 10000; c) 9800. | 60 |
| Figura 6.4 – Curvas de TGA e DSC dos CPs de ABS Com Alumínio  | 62 |
| Figura 6.5 – Curvas de TGA e DSC dos CPs de Abs com Titânio   | 63 |
| Figura 6.6 – Configuração dos CPS de ABS-alumínio e ABS-titânio, respectivamente, na máquina de tração. Fonte: Autor.                                   | 64 |
| Figura 6.7 – Estrutura 4D, fabricada, antes, durante e apos ativação da propriedade de memoria de forma. Fonte: Autor.                                  | 68 |
| Figura A.1 – Gráfico Tensão x Deformação do ABS Comercial. Fonte:Autora.  | 77 |
| Figura A.2 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra I. Fonte:Autor.   | 77 |
| Figura A.3 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra I. Fonte:Autor.   | 78 |
| Figura A.4 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra III. Fonte:Autor.   | 78 |
| Figura A.5 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra IV. Fonte:Autor.  | 78 |
| Figura A.6 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra VI. Fonte:Autor.  | 79 |



|   |    |
|---|----|
| Figura A.7–Curvas de TGA e DSC da Amostra 1 . . . . .   | 79 |
| Figura A.8–Curvas de TGA e DSC da Amostra 2 . . . . .   | 80 |
| Figura A.9–Curvas de TGA e DSC da Amostra 3 . . . . .   | 80 |
| Figura A.10–Curvas de TGA e DSC da Amostra 4 . . . . .  | 81 |
| Figura A.11–Curvas de TGA e DSC da Amostra 5 . . . . .  | 81 |
| Figura A.12–Curvas de TGA e DSC da Amostra 6 . . . . .  | 82 |
| <br>  |    |
| Figura B.1 – Montagem do Frame Estrutural da Ender 5 Plus . . . . .   | 83 |
| Figura B.2 – Cabagem do sistema eletrico da Ender 5 Plus . . . . .  | 84 |
| Figura B.3 – Foto do extrusor de plastico original da Ender 5 plus . . . . .  | 85 |
| Figura B.4 – Foto do extrusor de metal original instalado na Ender 5 plus . . . . .                                   | 85 |
| Figura B.5 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração do Fluxo de Filamento                               | 87 |
| Figura B.6 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração da velocidade de<br>passo do eixo xyz . . . . .     | 87 |
| Figura B.7 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração da folga e perca de<br>passo dos eixos xy . . . . . | 87 |
| <br>  |    |
| Figura C.1 – Diagrama da impressora Delta fonte:3Dlab . . . . .   | 88 |
| Figura C.2 – Diagrama da impressora SLS fonte:3Dlab . . . . .   | 89 |
| Figura C.3 – Diagrama da impressora SLA fonte:3Dlab . . . . .   | 90 |

# Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 5.1 – Parametros de fatiamento utilizados . . . . .   | 49 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros de Fatiamento Especiais. . . . .   | 49 |
| Tabela 5.3 – Dimensões conforme a Figura. Fonte: ASTM D638, 2014 . . . . .                                       | 54 |
| Tabela 5.4 – Configuração das Amostras. Fonte: Autor. . . . .  | 55 |
| Tabela 5.5 – Temperaturas de Extrusão das Amostras. Fonte: Autor. . . . .  | 56 |
| <br>   |    |
| Tabela 6.1 – Temperaturas obtidas através das curvas de DSC . . . . .  | 61 |
| Tabela 6.2 – Análise estatística dos resultados da DSC . . . . .   | 61 |
| Tabela 6.3 – Comparação da $\sigma_m$ e $E$ entre o ABS Comercial e os Filamentos Fabricados. . . . .            | 65 |
| Tabela 6.4 – Comparação da $\sigma_m$ e $E$ entre ABS Puro Fabricado e os Filamentos Aditivados. . . . .         | 65 |
| Tabela 6.5 – Comparação da Resposta da Memória de Forma do Material a Orientação de Impressão Diferente. . . . . | 67 |
| Tabela 6.6 – Efeito do Polímero Aditivado nas Propriedades de Memória de Forma. . . . .                          | 68 |

# Lista de quadros

# Lista de abreviaturas e siglas

## Processos

|     |  |
|-----|--|
| MA  | Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva)                                  |
| SLS | Selective laser sintering (Sinterização Seletivo a Laser)                    |
| SLM | Selective Laser Melting (Derretimento Seletivo a Laser)                      |
| FDM | Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida)                  |
| DAC | Desenho Assistido por Computador   |
| DSC | Differential Exploratory Calorimetry (Calorimetria Exploratória Diferencial) |
| TGA | Termogravimetria   |

## Propriedades

|              |                                 |
|--------------|---------------------------------|
| $T_m$        | Temperatura de Fusão Cristalina |
| $T_g$        | Temperatura de Transição Vítrea |
| $T_c$        | Temperatura de Cristalização    |
| $\Delta H_f$ | Entalpia de Fusão               |
| % C          | Grau de Cristalinidade          |

## Polímeros

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| PLA   | Poliácido Láctico                |
| PEEK  | Poli(éter-éter-cetona)           |
| ABS   | Acrilonitrila butadieno estireno |
| Nylon | Náilon                           |
| Al    | Alumínio                         |
| Ti    | Titânio                          |

PETG      Poli Tereftalato de Etileno Glicol

TPE      Elastômero Termoplástico

TPU      Poliuretano Termoplástico

PC      Policarbonato

]SMPs shape memory polymers

# Sumário

|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>16</b> |
| <b>1.1</b>     | <b>CONTEXTUALIZAÇÃO</b>   | <b>16</b> |
| <b>1.2</b>     | <b>MOTIVAÇÃO</b>  | <b>19</b> |
| <b>1.3</b>     | <b>JUSTIFICATIVA</b>  | <b>19</b> |
| <b>1.4</b>     | <b>OBJETIVOS</b>  | <b>20</b> |
| <b>1.4.1</b>   | <b>Objetivo geral</b>   | <b>20</b> |
| <b>1.4.2</b>   | <b>Objetivos específicos</b>  | <b>20</b> |
| <b>1.5</b>     | <b>ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b>  | <b>21</b> |
| <b>2</b>       | <b>IMPRESSÃO 3D</b>   | <b>23</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Contexto histórico</b>   | <b>23</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)</b>                            | <b>24</b> |
| <b>2.2.1</b>   | <b>Impressora 3D Cartesiana</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.2.2</b>   | <b>Impressora 3D Core XY</b>  | <b>26</b> |
| <b>2.3</b>     | <b>Vantagens da Impressão 3D</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.4</b>     | <b>Desvantagens da Impressão 3D</b>                                     | <b>27</b> |
| <b>2.5</b>     | <b>processo de Fabricação por Manufatura Aditiva</b>                    | <b>28</b> |
| <b>2.5.1</b>   | <b>Modelagem Computacional da Geometria</b>                             | <b>28</b> |
| <b>2.5.2</b>   | <b>Softwares de Fatiamento</b>  | <b>28</b> |
| <b>2.5.3</b>   | <b>Fabricação da peça nas Impressoras 3D</b>                            | <b>30</b> |
| <b>2.6</b>     | <b>Atual estado da tecnologia de Impressão 3D</b>                       | <b>30</b> |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAIS POLIMÉRICOS</b>  | <b>32</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>Termoplásticos</b>   | <b>32</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>Elastômeros Termoplásticos</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>3.3</b>     | <b>Polímeros com Memória de Forma</b>                                   | <b>33</b> |
| <b>3.3.1</b>   | <b>Classificação dos polímeros com Memória de Forma</b>                 | <b>34</b> |
| <b>3.3.1.1</b> | <b>Polímeros Termofixos Quimicamente Reticulados</b>                    | <b>34</b> |
| <b>3.3.1.2</b> | <b>Polímeros Termoplásticos Fisicamente Reticulados</b>                 | <b>35</b> |
| <b>3.3.2</b>   | <b>Polímeros com Memória de Forma Termossensíveis</b>                   | <b>35</b> |
| <b>3.3.2.1</b> | <b>Classificação dos polímeros Termossensíveis com Memória de Forma</b> | <b>36</b> |
| <b>4</b>       | <b>IMPRESSÃO 4D</b>   | <b>37</b> |
| <b>4.1</b>     | <b>Contexto histórico</b>   | <b>38</b> |
| <b>4.2</b>     | <b>Estado da Arte da impressão 4D</b>                                   | <b>41</b> |
| <b>4.2.1</b>   | <b>Métodos de estímulo para impressão 4D</b>                            | <b>41</b> |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1.1  | Água/Umidade . . . . .  | 42        |
| 4.2.1.2  | Luz . . . . .   | 42        |
| 4.2.1.3  | Campo elétrico . . . . .  | 43        |
| 4.2.1.4  | Campo magnético . . . . .   | 43        |
| 4.2.1.5  | temperatura . . . . .   | 43        |
| <b>5</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>                                  | <b>47</b> |
| 5.1      | Materiais . . . . .   | 47        |
| 5.2      | Metodologia . . . . .   | 48        |
| 5.2.0.1  | Fatiamento e Configurações dos Parâmetros de Impressão 3D . . . . .   | 48        |
| 5.2.1    | Desenvolvimento da Metodologia do Processo de Fabricação 4D . . . . . | 50        |
| 5.2.1.1  | Desenvolvimento das Geometrias para Teste da Impressão 4D . . . . .   | 51        |
| 5.2.2    | Microscópio Confocal . . . . .  | 53        |
| 5.2.3    | Termogravimetria (TGA-DSC) . . . . .                                  | 53        |
| 5.2.4    | Ensaio de Tração . . . . .  | 54        |
| 5.2.5    | Processo de Fabricação dos Filamentos . . . . .                       | 55        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>                              | <b>58</b> |
| 6.0.1    | Pellets Aditivados . . . . .  | 58        |
| 6.0.2    | Diâmetro dos Filamentos . . . . .                                     | 58        |
| 6.0.3    | Análise morfológica por microscopia confocal . . . . .                | 59        |
| 6.0.4    | Termogravimetria (TGA/DSC) . . . . .                                  | 60        |
| 6.0.5    | Ensaio de tração . . . . .  | 63        |
| 6.1      | Impressão 4D . . . . .  | 66        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>   | <b>70</b> |
| <b>8</b> | <b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>                                    | <b>71</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>  | <b>72</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – GRAFICOS . . . . .</b>                                | <b>77</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – MONTAGEM E CALIBRAÇÃO DA IMPRESSORA</b>               |           |
|          | <b>3D . . . . .</b>   | <b>83</b> |
| B.0.1    | Montagem da impressora 3D . . . . .                                   | 83        |
| B.0.1.1  | Manutenção preventiva . . . . .                                       | 84        |
| B.0.1.2  | Calibragem e Configuração da impressora 3D . . . . .                  | 86        |
|          | <b>APÊNDICE C – REFERENCIAL TEORICO COMPLEMENTA IMPRES-</b>           |           |
|          | <b>SORA 3D . . . . .</b>  | <b>88</b> |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>C.0.1</b> | <b>Impressora 3D Delta . . . . .</b>                 | <b>88</b> |
| <b>C.1</b>   | <b>Sinterização Seletiva a Laser (SLS) . . . . .</b> | <b>89</b> |
| <b>C.2</b>   | <b>Stereolithography (SLA) . . . . .</b>             | <b>89</b> |
| <b>C.3</b>   | <b>Digital Light Processing (DLP) . . . . .</b>      | <b>90</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, foi desenvolvida nos anos 80 e está hoje amplamente difundida em vários setores da indústria. A impressão 3D se distingue como um conjunto de tecnologias de fabricação de deposição de material, no qual as peças são formadas camada por camada. Entre as tecnologias que a MA inclui, uma das mais importantes é o processo chamado de Deposição de Material Fundido (ou pelo inglês Fused Deposition Modeling, FDM). (CALLISTER, 2006) (CANEVAROLO JR., 2006). A MA, desponta-se como uma grande vantagem quando comparada com outras tecnologias, como a Manufatura Subtrativa, por possuir a possibilidade de produzir peças de geometrias complexas em um único processo de fabricação, com um tempo reduzido e com um menor desperdício de matéria prima (SARTORI, 2019). Por se tratar de uma tecnologia de fabricação recente, a Impressão 3D ainda apresenta diversos desafios, dentre eles, o conhecimento à respeito da influência do processo de fabricação nas propriedades térmicas e mecânicas, da orientação das fibras, da anisotropia, da porosidade, da resistência à corrosão ou aos agentes químicos mais agressivos. Deste modo, percebe-se que para desenvolver um produto não basta apenas conhecer as propriedades dos materiais, uma vez que autores como (SANTANA et al., 2018) e (SANTOS et al., 2020) demonstram em seus trabalhos como o processo de fabricação interferem nas propriedades das peças fabricadas através da MA. Com o desenvolvimento do conhecimento acerca da MA, foi possível identificar como essa tecnologia influencia nas propriedades dos materiais, fazendo com que tornasse possível a sua utilização no Setor Aeroespacial. Isso possibilitou que grandes empresas como a Boeing, utilizassem a FDM na fabricação de peças de aviões. Outra área que vem crescendo significativamente é a dos Nanos-Satélites, que estão possibilitando a redução do custo das missões espaciais por reduzirem o tamanho das estruturas e padronizarem as peças. O uso de uma tecnologia de fabricação como o FDM, que permite o uso de materiais poliméricos de baixo custo, pode contribuir para uma redução adicional. A FDM, utilizada por empresas como a Boeing, é uma tecnologia de fabricação no qual um filamento de polímero termoplástico é extrudado pelo cabeçote de impressão. Quando se atinge a temperatura de derretimento do polímero, o mesmo passa a ser um líquido com uma viscosidade característica. A partir disso, ocorre a extrusão através do bico, sendo depositada camada por camada até que a peça esteja completa. Os Polímeros Termoplásticos, como o PEEK (Polyether Ether Ketone), vem sendo utilizados em componentes de Nano-Satélites feitos por MA (SIEMASZKO et al., 2022). Embora, ainda não seja popular o uso da impressão 3D para esse fim, a sua utilização está em ascensão, (CARVALHO, 2019). Esse aumento relaciona-se com o avanço das ciências dos materiais, que junto da MA vem permitindo que novas fronteiras

sejam exploradas, por exemplo, o uso dos polímeros com memória de forma, na fabricação de peças adaptativas. Os Polímeros com memória de Forma, são materiais que após sofrerem uma deformação permanente conseguem, através de um estímulo externo recuperarem a sua forma original. A utilização de Polímeros com Memória de Forma na MA, tornou-se bastante popular quando foi apresentado pela primeira vez no TED de 2013 pelo professor Tibbits. Nesta apresentação ele definiu essa técnica de "Impressão 4D", ou seja uma técnica que permite imprimir um novo design de uma estrutura "espontânea e complexa" que muda com o tempo devido as interações com o ambiente. Logo, a Impressão 4D, tornou-se uma metodologia de fabricação do tipo de Manufatura Aditiva que permite a criação e a modificação de peças tridimensionais mesmo após a sua produção. Essa característica peculiar, só é possível devido a exposição das peças a estímulos externos como mudanças na temperatura, exposição ao UV ou a água, dentre outros (TIBBITS, 2013). Para compreender um pouco mais sobre essa tecnologia revolucionária, é importante primeiro destacar que a Impressão 4D é totalmente dependente de alguns fatores para o seu funcionamento, como a utilização de materiais com propriedades e capacidade de memória de forma e de geometrias otimizadas, para fazer o uso dessas propriedades em regiões específicas das geometrias (TIBBITS C. MCKNELLY, 2014). Para que ocorra a união dessas propriedades específicas dos materiais em pontos definidos de suas geometrias, é necessário que haja um estudo detalhado para a implementação de uma modelagem matemática, que permita determinar em quais pontos a estrutura da geometria deve receber o material com propriedades de memória de forma. A Impressão 4D é uma consequência direta dos grandes avanços que sofreu a ciência dos materiais que permitiu a compreensão do comportamento e as propriedades dos Polímeros com Memória de Forma, tornando possível o desenvolvimento e a utilização desses materiais na produção de peças de geometrias complexas e adaptativas com o uso da MA. Para isso, a Impressão 4D faz uso de peças 3D fabricadas em polímeros com memória de forma (ou pelo inglês, Shape memory polymers, SMP), que após a sua fabricação passam por um processo chamado de "programação". Esse processo, consiste em submeter o material a um estímulo que irá ativar as propriedades da memória de forma que ele possui somado a uma carga que juntos irão formar uma deformação temporária, criando assim, a memória no material. Esse processo, pode ser conhecido também como Memorização. Os estímulos, podem ser diversos, sendo eles de características térmicas, elétricas, químicas, radioativas, entre muitos outros, sendo responsáveis por facilitarem a ativação de memória de forma do material (LENDLEIN, 2002). A etapa de programação na Impressão 4D, consiste no processo de submeter o material a um estímulo que ativa as suas propriedades de memória de forma, de modo que seja possível aplicar uma carga na estrutura para que ela sofra uma deformação temporária na sua forma geométrica, permitindo assim que a estrutura seja remodelada. Após, a estrutura passar pela etapa de programação, e for submetida novamente ao estímulo que ative as propriedades de memória de forma do material, ela voltará para a sua estrutura geométrica original. Na etapa de programação, é possível modificar a geometria de forma temporária, pois, os materiais que apresentam propriedades de memória de forma, são em sua maioria compostos por segmentos

flexíveis e pontos de reticulação, que quando ativados através de estímulos externos, ganham mobilidade, permitindo que os segmentos flexíveis se movimentem no sentido da deformação, modificando a localização dos pontos de reticulações. Diante disso, ao acessar o estímulo, o segmento perde mobilidade, ficando agora na sua nova posição "forma deformada" ou "forma programada". Deste modo, quando o material for submetido novamente ao estímulo, ele ganha mobilidade no segmentos flexivos, assim, os pontos de reticulações voltam para a sua posição original (geometria permanente). Os SMPs, são materiais poliméricos que possuem propriedades análogas as encontradas em Ligas Metálicas, nomeada em inglês como Shape Memory Alloys (SMA), que também possuem a funcionalidade de memória de forma (CHOWDHURY et al., 2021). Esses materiais, mostram a capacidade de retornar a sua forma original a partir de um estímulo térmico acima de sua temperatura de ativação. Para que o material volte a sua forma original, é necessário que seja aplicado novamente o estímulo externo. Como já citado, as SMA são materiais que mesmo após sofrerem uma deformação permanente, conseguem retornar ao seu formato original, com a ajuda de estímulos externos que podem ser do tipo térmico, magnético, entre outros (KUANG et al., 2019). No geral, as mudanças ocorrem nas estruturas cristalinas das ligas, por meio da transformação sólida do metal, intitulada como Transformação Martensítica. A Impressão 4D, permitiu a criação de diversas aplicações partindo de uma estrutura que pode ser ativada de modo a realizar automontagem, reconfiguração e auto-reparo, que podem ser replicadas por meio de estímulos externos e internos livres do ambiente (TIBBITS, 2014). Dessa forma, esse método de fabricação apresenta infinita vantagens, como a redução significativa do volume para o seu armazenamento e transformações que podem ser alcançadas com as estruturas impressas em 4D Flat-Pack. A impressão 4D Flat-Pack, são estruturas que podem ser enviadas e transportadas em pacotes planos e compactos, que ao chegar em seu local de destino podem ser ativada de modo que elas se automontam. A Impressão 4D Flat-Pack, pode incluir também transformações para estruturas 3D necessárias durante as aplicações reais. Um exemplo disso seria o envio de equipamentos para um missão de Colonização de Marte, no qual os mesmo irão compactados, com volume muito menor, permitindo o envio de mais carga, que ao chegar em solo marciano, poderia se automontar, sem a necessidade de astronautas e de atuadores pesados e complexos. Agregando assim, simplicidade e redução de carga aos componentes, que são fatores cruciais em uma missão deste tipo. Com a evolução da Impressão 4D, seria viável o desenvolvimento de atuadores mecânicos para a aplicação de Nano Satélites, como no Subsistema de Deorbiting, que é responsável por reduzir a altitude dos satélites, fazendo com que ele entre na atmosfera da terra e não seja destruído (VERDONCK et al., ). Devido a sua grande importância, em 2022, o Comitê Inter-Agências de Coordenação das atividades sobre os Detritos Espaciais (ou IADC, pelo inglês Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) elaborou o primeiro documento internacional para regulamentação no campo de detritos espaciais: IADC Space Debris Mitigation Guidelines, no qual, foi estabelecido que todos os satélites em órbita baixa (ou em inglês, Low Earth Orbit, LEO) devem ser capazes de realizar deorbiting em menos de 25 anos de operação (CAPPELLETTI; BATTISTINI; MALPHRUS, 2020).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O Setor Aeroespacial, vem desenvolvendo sistemas e processos de fabricação cada vez mais rápido, leves, descentralizados e integrados. Em paralelo, a 4ª Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, vem possibilitando o desenvolvimento desses sistemas, abrindo novos horizontes de possibilidades. Entre os novos processos de manufatura, o que mais vem se destacando no Setor Aeroespacial, é a Manufatura Aditiva, uma vez que ela possibilita a prototipagem rápida de modelos computacionais de alta acurácia e redução de custos em produção serial (MEHRPOUYA et al., 2019). Atrelado à Manufatura Aditiva, o desenvolvimento acelerado da Engenharia de Materiais permitiu a otimização de componentes e a criação de novas aplicações, bem como a de processos. As agências como a NASA investem em pesquisas na área, com a importante consideração da escassez de materiais de construção que podem ser encontrados no espaço hoje e os custos associados de transportá-los da Terra para o espaço que são proibitivos. Nisto, a Indústria Espacial poderia se beneficiar de outra vantagem trazida pela Manufatura Aditiva que está revolucionando a cadeia de suprimentos global. Essa vantagem, está ligada à conveniência de transportar matérias-primas na forma de pós ou líquidos, que são muito mais fáceis de transportar do que muito outros produtos semi-acabados até seu destino de uso, onde seriam transformados no produto final e, enfim, utilizados. Isto reduziria não apenas o desperdício causado pelas tecnologias de processamento mais tradicionais, como a fabricação subtrativa, mas também a necessidade de múltiplos armazéns para armazenar os produtos semi-acabados nas diferentes etapas de processamento. A Indústria Espacial se beneficiaria da possibilidade de transportar tanques de pós (ou líquidos) para processamento apenas até seu destino. Utilizar componentes poliméricos ao invés dos metálicos permite, além de reduzir o tempo de produção, reduzir o peso. Esses fatores têm como consequência a redução de custo, algo que qualquer projeto de engenharia almeja. Deste modo, o trabalho conjunto da MA e simulação computacional reduz custos e tempo de desenvolvimento, além de agregar valor ao produto, e possibilita a criação de novas tecnologias, que é o caso da impressão 4D. (ABREU et al., 2017).

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Ao discutirem a respeito da utilização de Impressoras 3D não só em peças estéticas, autores como Tibbits, acabam abrindo o leque de aplicações dessa tecnologia. Diante disso, com o avanço nessa tecnologia e no desenvolvimento da MA, várias empresas do Setor Aeroespacial começaram a utilizar as impressoras 3D em peças finais voltadas para projetos aeroespaciais, por exemplo, Fabricantes renomados do setor Aeroespacial, como Boeing tem setores Dedicados a fabricação de ferramentas e componentes através da manufatura aditiva desde 2018, setores que vem validando novos componentes e materiais para o uso MA no setor aeronáutico a cada ano. Além disso, com o avanço tecnológico na engenharia de materiais, envolvendo principalmente o desenvolvimento da Impressão 3D e dos Polímeros, abriu-se o caminho para que a Impressão

4D despontasse como uma tecnologia bastante promissora na confecção de novos componentes para o Setor Aeroespacial, abrindo, assim, a possibilidade de desenvolver componentes complexos como atuadores, para abertura de sistemas de antenas ou painéis solares para CubeSat, tornando estes componentes simples e mais confiáveis. A reflexão trazida a partir do desenvolvimento da Impressão 4D, está voltada para a construção de novos componentes para o Setor Aeroespacial, que sejam leves, simples, confiáveis, e de custo reduzido. Por ser uma ferramenta capaz de auxiliar nas novas necessidades do Setor Aeroespacial, fez-se relevante a realização de um estudo mais aprofundado sobre a viabilidade do uso e da aplicabilidade de materiais de baixo custo já usados na impressão 3D, para aplicações na tecnologia 4D, visando o possível uso no Setor Aeroespacial.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo principal, verificar a possibilidade de utilizar os materiais mais comuns e de baixo custo que são utilizados na Impressão 3D para aplicações em 4D, dando destaque aos materiais que são diariamente utilizados na FDM, com o intuito de entender quais deles demonstram potencial para o uso na fabricação de "peças 4D". Com isso, procura-se encontrar o material que atenda aos requisitos de projeto, para o desenvolvimento de um atuador para possíveis aplicações espaciais. Ao longo deste trabalho, serão avaliados também os Polímeros Compósitos, indicando com esta definição os Polímeros Aditivados por Nano-Pós-metálicos de Alumínio, de Titânio, e filamentos condutivos, com o objetivo de entender a influência desse reforço particulado nas propriedades de memória de forma que um material apresenta.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Além do objetivo principal, este trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de uma metodologia de fabricação para a Impressão 4D e a confecção de um primeiro protótipo fabricado através desta tecnologia. A fim de se atingir os objetivos apresentados, o trabalho é dividido em etapas de desenvolvimento apresentadas abaixo, que representam os objetivos específicos:

- Aprofundar o conhecimento sobre os SMPs conhecidos, a fim de determinar qual será o material mais promissor para as aplicações espaciais da Impressão 4D.
- Montar e adaptar uma metodologia para a análise da viabilidade do uso da Impressão 4D e, para conseguir este resultado,
- Realizar o estudo de otimização dos parâmetros de impressão 3D, a fim de obter os melhores resultados no 4D;

- Estudar e caracterizar os SMPs mais comuns (propriedades mecânicas e térmicas fundamentais) e os materiais produzidos no laboratório da faculdade;
- Estudar a influência do reforço de nanopartículas nas propriedades de memória de forma dos polímeros;
- Desenvolver uma metodologia de modelagem da estrutura via Desenho Assistido por Computador (DAC);
- Realizar o estudo de uma geometria simples mas útil para demonstrar o potencial dos SMPs na Impressão 4D;
- Manufaturar um protótipo utilizando os resultados do ponto anterior, para a realização de testes tecnológicos de Impressão 4D;
- Desenvolver uma metodologia para testar as peças impressas em 4D;
- Estudar o comportamento das estruturas 4D fabricadas no laboratório da faculdade.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado de forma a conduzir o leitor através de uma sequência lógica que passa pelos conhecimentos teóricos necessários para o desenvolvimento deste estudo, apresentando a metodologia desenvolvida, os materiais e processos utilizados, os resultados e discussões, chegando às conclusões que foram tiradas a partir desta pesquisa. A Parte I, que é a fundamentação teórica, apresenta e contextualiza os tipos de Manufaturas Aditivas, com ênfase na Manufatura Aditiva do tipo FDM, que é o tipo de tecnologia que será explorada na Impressão 4D neste trabalho e nos trabalhos futuros. Além disso, são apresentados assuntos como os fundamentos da teoria de propriedades dos materiais, Manufatura Aditiva, tecnologia de Impressão 4D, Desenho Assistido por Computador, com destaque para a produção de peças através da Manufatura Aditiva, bem como a teoria dos materiais com memória de forma que é aplicada na Impressão 4D. A Parte II, é focada na metodologia. Nesta parte, ocorre a descrição de como foi realizado o trabalho em sua totalidade de detalhes com o intuito de que se possa ser replicado por terceiros. Na metodologia, estão descritos os processos de modelagem computacional, montagem e configurações necessários para as impressoras 3D que serão usadas na Impressão 4D, a metodologia de pesquisa utilizada para a escolha dos materiais adequados para as aplicações em 4D, levando em considerações as limitações tecnológicas do equipamento escolhido, e do processo de fabricação. A Parte III, é onde os resultados obtidos e as respectivas discussões são apresentadas. Os resultados, são o desenvolvimento de duas geometrias com a capacidade de recuperar sua configuração original, sendo elas uma pequena viga retangular e uma caixa auto dobrável. Além disso, há a descrição de como se deu a fabricação e o processo de sua programação, e todos os desafios encontrados nesse processo de fabricação dessas estruturas que

já possibilitaram a validação da Impressão 4D com matérias de baixo custo. Por fim, na Parte IV, são apresentadas as conclusões desse trabalho bem como as perspectivas para um trabalho futuro.

O fluxograma apresentado na Figura 1.1 mostra a sequência de operações realizadas para alcançar os objetivos.

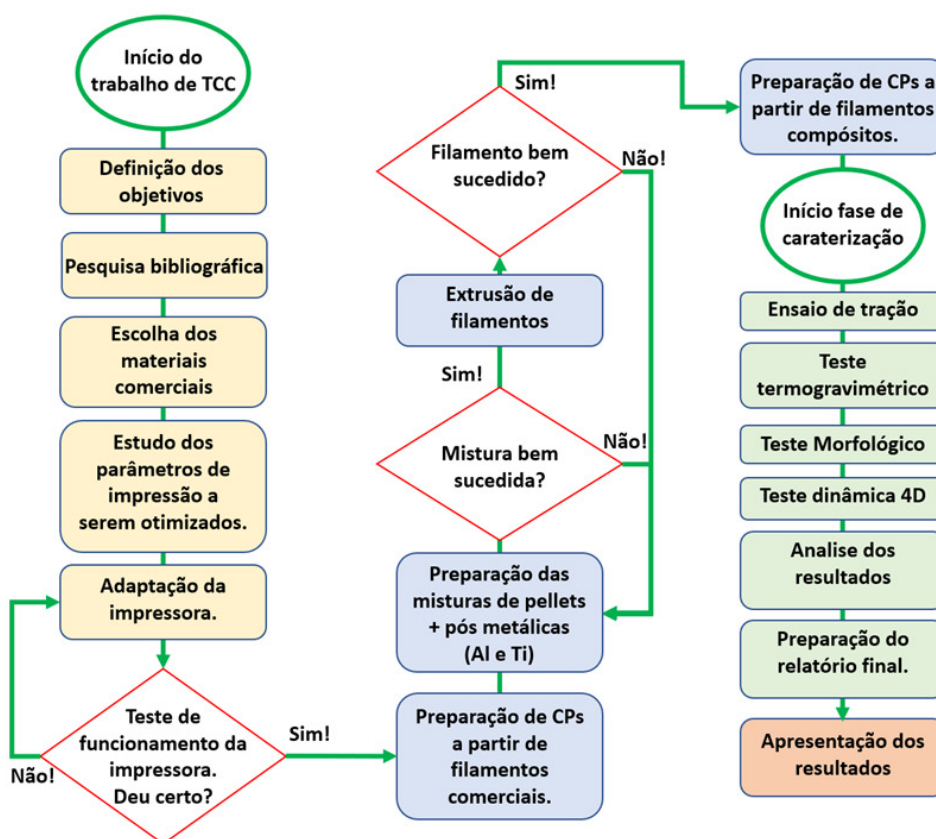


Figura 1.1 – Sequência de operações realizadas para alcançar os objetivos, fonte: AUTOR

## 2 Impressão 3D

A MA do tipo Prototipagem Rápida (Impressão 3D), é a manufatura de polímeros que mais ganhou destaque nos últimos anos devido a sua possibilidade em desenvolver produtos com geometrias complexas em apenas um único processo de fabricação. Ademais, é uma tecnologia que apresenta uma redução significativa no que tange ao desperdício de matérias primas quando comparadas com outras metodologias de produção tradicional, como as de subtração. A MA é uma tecnologia de fabricação, na qual, utiliza-se de um modelo tridimensional computacional, para a confecção de um produto no mundo real através da deposição sucessiva de camadas de polímeros depositadas (REICHENTAL, 2010) (MONTEIRO, 2015). Por muito tempo, diversos autores discutiam a respeito do principal benefício propiciado pela MA, e o resultado obtido por eles era o de que a MA proporcionava uma visão espacial dos modelos que estavam sendo projetados. Com base nisso, a Impressão 3D acabou sendo bastante utilizada nas indústrias apenas como uma ferramenta que poderia auxiliar na fase de projeto. Contudo, com os avanços conquistados pela ciência e o desenvolvimento da tecnologia, a Impressão 3D, acabou ganhando novos espaços, passando a fazer parte das linhas de produção, da confecção de componentes de engenharia de alto requisito e de geometrias complexas e de produtos finais, deixando assim, de ser apenas uma ferramenta auxiliadora e tornando-se uma metodologia de fabricação consolidada.

### 2.1 Contexto histórico

A Impressão 3D é uma tecnologia que surgiu na década de '90, como uma ferramenta que possibilitou a criação de modelos físicos através de um design digital. No entanto, segundo (VOLPATO, 2017), a jornada da manufatura aditiva tem seu começo na década de '80, com Charles W. Hull, quando ele desenvolveu as primeiras Impressoras 3D do tipo Estereolitografia, por isso ele atualmente é considerado *O Pai da Impressão 3D*. Existem diversos tipos de tecnologias de manufatura aditivas, cada uma delas com qualidades e restrições, porém, todas possuem como base a transformação de um modelo digital em uma peça física usando métodos de produção camada por camada de forma aditiva. A Impressão 3D, é uma tecnologia de fabricação que pode fazer uso de diversos tipos de matérias, como termoplásticos, resina, pó, metal e materiais compósitos (SANTOS et al., 2020). O surgimento da Impressão 3D, deu-se quando Charles W. Hull trabalhava para uma empresa que fazia a laminação de plásticos em mesas através de luz ultra violeta (UV). Nessa época, Charles idealizou que fosse possível empilhar milhares de camadas sucessivas de plásticos, usando o processo de cura UV para que os mesmos ficassem enrijecidos e mantendo um padrão. Dessa maneira, seria possível reproduzir basicamente, qualquer geometria imaginável. A partir dessa teoria, ele desenvolveu o protótipo do que seria a primeira Impressora 3D, dando início a tecnologia nomeada de Esteolitografia (GIBSON; RO-



SEN; STUCKER, 2015a). Deste primeiro protótipo, Charles desenvolveu em 1983, a patente para o "método, ou aparato, para a criação de objetos sólidos por *impressão* sucessiva de finas camadas de material curável por exposição à luz ultravioleta, no topo uma da outra". Por toda via, o que fez a manufatura aditiva ser conhecida como Impressão 3D, foi que Hull notou que a tecnologia que ele desenvolveu não se limitava apenas a materiais líquidos, e estendeu a patente para qualquer matéria que pode ser solidificada ou capaz de alterar seu estado físico. Dentre os diversos métodos de prototipagem rápida existentes, o mais difundido é o FDM, no qual, um termoplástico é aquecido em um bocal até que a temperatura permita que o material seja extrudado através de um bico. Nesse processo, o material é depositado camada por camada, com base em um desenho tridimensional feito pelo computador (ou seja via CAD) (GIBSON, 2016).

## 2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

A Impressão 3D do tipo FDM, segundo o autor Neri Volpato, é uma tecnologia patenteada por Scott Crump, fundador da Stratasys, uma das maiores empresas de Impressão 3D no nível mundial. Foi na Stratasys, que surgiu a metodologia e a tecnologia para o desenvolvimento de objetos sólidos por deposição sucessivas de camadas de material fundido (VOLPATO, 2017). Contudo, a sua popularização só ocorreu com a criação de projetos abertos do tipo Fabricação por Fusão de Filamento (FFF). Tal projeto, começou a se propagar nos anos 2000, junto dos equipamentos do modelo RepRap. Entretanto, devido ao fato, da patente da tecnologia de FDM ser da Stratasys, os projetos que utilizam o FFF foram vistos como a única saída para que as impressoras 3D pudessem ser comercializadas sem que fossem processados pela Stratasys (ABREU, 2015). A figura 2.1, representa um esquemático da tecnologia de FDM, em que a matéria prima mais utilizada consiste em termoplásticos em formato de filamento, onde normalmente, vem dispostos em rolos com os fios de diâmetros de 1,75 mm ou 3,00 mm, que são os modelos comerciais disponíveis. O funcionamento do equipamento, ocorre através de um sistema que traciona o filamento e o empurra contra um bico aquecido. O tracionamento do material, é realizado por motores de passo que guiam o material através da extrusora, no qual, o material é aquecido até sua temperatura de derretimento. Quando, o material é aquecido, ele deixa de ser um sólido e passa a ser um fluido com uma viscosidade específica. Desse modo, nesta etapa o material escoar até o bico, onde o mesmo é depositado na mesa aquecida, seguindo as coordenadas pré-determinadas na etapa de fatiamento, que será detalhado nos capítulos subsequentes. O material, após ser depositado, é resfriado por meio de ventoinhas ou de maneira natural, fazendo com que o mesmo solidifique-se na forma em que foi depositado. Esse processo, é repetido sucessivamente camada a camada, até que se forme o objeto desejado (VOLPATO, 2017). É vital destacar, que o mecanismo mais importante e também o mais crítico desta tecnologia é o conjunto do extrusor. Esse conjunto, é responsável pelo transporte do material, pelo seu derretimento e deposição nas posições desejadas. O Conjunto do Extrusor, pode ser dividido em duas partes, sendo uma delas definida como a parte fria e a outra como quente. A parte fria, é

composta pelo motor, engrenagens e tubo PTFE, que são responsáveis por empurrar o filamento até o bico. A parte quente, é composta pelo cartucho e aquecimento, sensores, ventoinha, bloco aquecido, radiador e a garganta de quebra de temperatura, é nesta parte que o material é derretido e depositado.

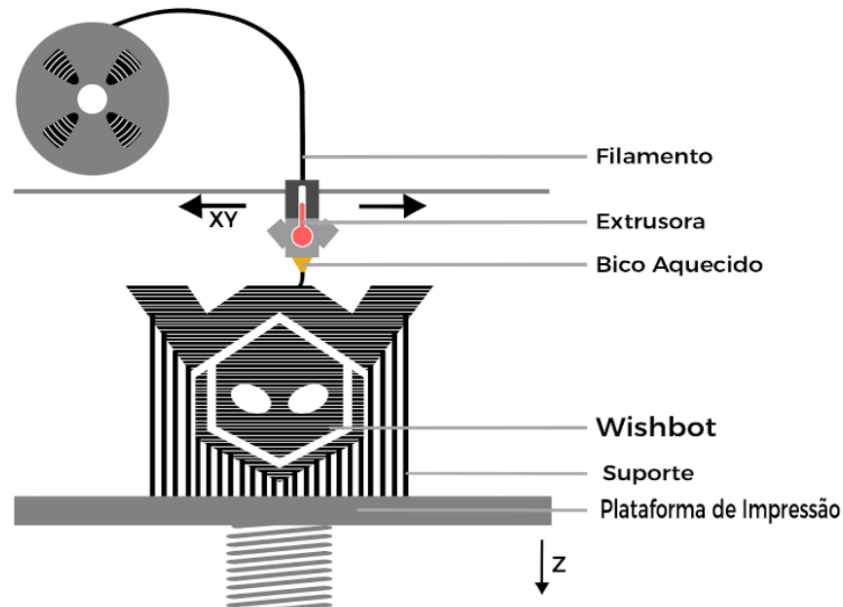


Figura 2.1 – Esquemático da Modelagem por FDM fonte:3Dlab

A tecnologia de Impressão 3D de tipo FDM, se apresenta vantajosa pois, o maquinário utilizado possui o custo de preço mais baixo dentre todos os processos de MA, além de sua matéria prima ser bastante acessível, o que possibilita que a sua tecnologia seja usada com diferentes matérias para uma mesma peça apresentando um acabamento final de alta qualidade. As impressoras 3D do tipo FDM, podem ser divididas em cinco modelos: Cartesianas, Core XY, Polar, Braço Robótico e Delta, cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015b).

### 2.2.1 Impressora 3D Cartesiana

As impressoras Cartesianas do tipo FDM, são o modelo mais difundido de Impressoras 3D. Isso ocorre, devido ao fato de seu equipamento apresentar diversas vantagens em suas características como ser de fácil utilização, ter um custo de aquisição baixo, possuir um mecanismo simples e apresentar a manutenção, a calibragem e a correção de falhas fáceis de serem realizadas. Esse modelo de maquinário, utiliza o eixo cartesiano X-Y-Z, com três eixos perpendiculares entre si e independentes que geram a obrigação de se ter um motor de passo para cada eixo, exemplos desse tipo de maquinários são as impressoras 3D Ender 3 e a Prusa I3 (COSTA; FERREIRA, 2021). Na figura 2.2 é possível ver o diagrama com as setas indicando os movimentos desses modelos de Impressoras 3D.

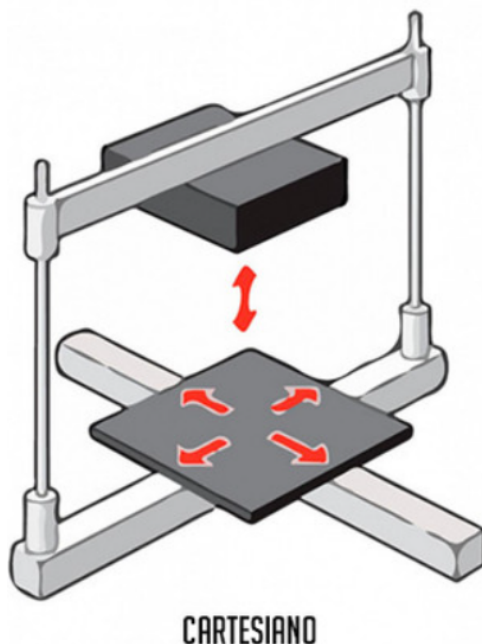


Figura 2.2 – Diagrama da impressora cartesiana fonte:3Dlab

### 2.2.2 Impressora 3D Core XY

As Impressoras 3D Core XY, apresentam características bastante semelhantes com as cartesianas. A diferença entre cada uma delas está voltada no fato de que na Core XY, é apresentado um eixo independente e dois eixos acoplados tracionados por uma correia, onde o sentido de giro combinado dos motores define em qual eixo o carro de impressão irá se movimentar. Nessas máquinas, o movimento no eixo Z (altura), é realizado pela cama aquecida da impressora e não pelo extrusor. Isso permite, uma maior velocidade de impressão e uma redução na inércia, tendo em vista que esse equipamento não possui a massa dos motores em movimento (SANTOS, 2020). Na figura 2.3 é possível ver o diagrama com as setas indicando os movimentos desse modelo de Impressora 3D.

Ordinariamente, equipamento que adotam este tipo de tecnologia, apresentam a vantagem, de ter grandes áreas de impressão, é espaço suficiente para acomodar todo o hardware em seu interior. Além de ser uma tecnologia de fabricação que apresenta um estrutura bastante rígida, permitindo assim a fabricação de peças com melhor precisão dimensional e acabamento superficial, mesmo a velocidade mais altas. Deste modo este tipo de configuração na MA, tornou-se altamente popular no mundo acadêmico e nas grandes empresas. Consequentemente essa é umas das tecnologias de MA do tipo FDM, que mais apresenta acervo de pesquisas voltadas para otimização de parâmetros visando a melhoria estrutura dos produtos fabricado.

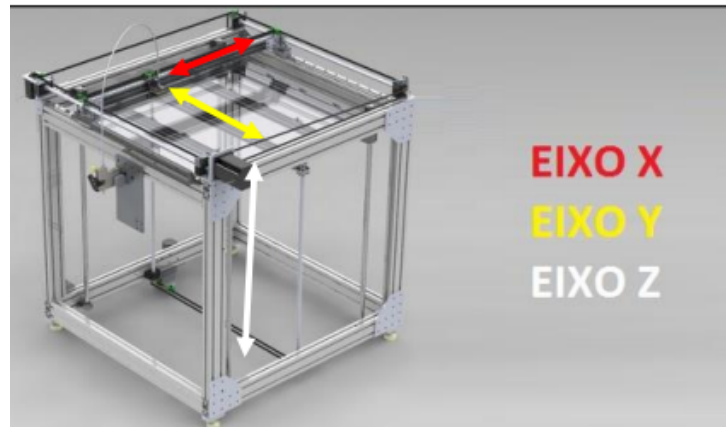


Figura 2.3 – Diagrama da impressora corre xy fonte:3Dlab

## 2.3 Vantagens da Impressão 3D

A Impressão 3D, destaca-se das demais tecnologias devido a sua grande vantagem no que refere-se a sua redução no desperdício do material caminhando para o lado oposto do processo de produção por usinagem a Controle Numérico por Computador (CNC), que faz produção das peças através de subtração de material, que gera muitos resíduos (VALENTE, 2022). Essa tecnologia apresentar diversos benefícios como:

- Prazos de entrega relativamente curtos;
- Capacidade de fazer à mão os produtos que até agora eram muito pequenos e precisos;
- Facilidade de uso;
- Sustentabilidade, ou seja, menos desperdício de matéria-prima;
- Combinação de diferentes materiais;
- Versatilidade de uso;
- Redução do tempo e dos custos de trabalho;
- Alto nível de personalização;
- Possibilidade de desenvolver peças de geometrias complexas em único processo de fabricação.

## 2.4 Desvantagens da Impressão 3D

Atualmente, a Impressão 3D, ainda não desponta como uma tecnologia que vem para propiciar uma substituição total em uma cadeia de produção, mas, sim para aplicações em pequenas escalas de produção e para a fabricação de peças que serão utilizadas para a validação de conceitos. Além disto esta tecnologia apresenta outras desvantagens como:

- O preço de equipamentos profissional ainda é bastante caro;
- Exige conhecimentos técnicos, sobre propriedade dos materiais e conhecimentos do processo de fabricação que não estão ao alcance de qualquer utilizador;
- Exige manutenção contínua, sendo que tem que se limpar a impressora após cada utilização;
- Exigem ainda um avanço na ciência dos materiais, afim que seja possível aplica melhor a tecnologia de manufatura aditiva.

## 2.5 processo de Fabricação por Manufatura Aditiva

O processo de fabricação via Impressão 3D, pode ser dividido em três principais etapas, sendo elas a:

- Modelagem Computacional utilizando software de Desenho Assistido por Computador (CAD, pelo inglês Computer Aided Design);
- Processamento e configurações das propriedades das peças no software de fatiamento 3D;
- Fabricação da peça nas Impressoras 3D.

(PINTO, 2018) (VALENTE, 2022).

### 2.5.1 Modelagem Computacional da Geometria

Para que o desenvolvimento de geometrias para a fabricação através da Prototipagem Rápida, é necessário levar alguns pontos em consideração. Primeiramente, se a curvatura da geometria é muito acentuada, ou existe grandes vãos suspensos, a geometria deverá ser projetada de forma que haja pontos de reforços estruturais para aplicações de suporte de fabricação. Segundamente, caso haja a necessidade, também pode ser considerada como uma possibilidade de fabricar as estruturas em partes, de modo à facilitar o processo de fabricação. Nessa etapa, é preciso levar em consideração as limitações da tecnologia de Manufatura Aditiva que foi escolhida e também as impostas pelo próprio material.

### 2.5.2 Softwares de Fatiamento

Na Prototipagem Rápida, é necessário que haja um software de tratamento para os Desenhos Assistidos por Computador para que a ocorra a implementação dos parâmetros que a Impressora 3D exige. Esses softwares, são conhecidos como Softwares de Fatiamentos, tendo como os mais utilizados os o Simplify3D, Ultimaker Cura, OctorPrint e Slic3r. O motivo pelo

qual esses softwares são necessários se dá pela razão das impressoras 3D trabalharem com arquivos Gcode, que é um arquivo que contém uma linguagem de programação padrão para a maioria das Impressoras 3D, no qual, contém a orientação da camada, da temperatura do bico da extrusora, da velocidade de deposição, da altura da camada e das coordenadas do objeto tridimensional.

O fatiamento, é a etapa mais significativa na produção de peças via MA, pois, é nessa etapa que são definidos todos os parâmetros de fabricação, como: altura da camada, temperatura do bico extrusor, temperatura da mesa de deposição, velocidade de deposição, preenchimento, sobreposição de camadas, velocidade de extrusão do termoplástico, número de camadas de acabamentos da peça, dentre outros (LISBOA, 2017). Essa parte é importante, devido ao destaque recebido em diversos trabalhos, por exemplo o dos autores Santos e Valente, no qual, eles abordam o tema, e apresentam em seus resultados, que demonstram o tanto que parâmetros como orientação de impressão, altura de camada e velocidade de deposição do material influencia nas propriedades mecânicas e na qualidade superficial das peças (SANTOS et al., 2020) (LANGE-LAAR, 2016) (VALENTE, 2022). A escolha do Software de Fatiamento, é uma etapa bastante importante e que pode influenciar nas propriedades e na qualidade nas peças que serão produzidas através da Impressão 3D, visto que alguns software já vem com uma pré configurações de fatiamento, que são pré determinadas para diversas marcas de impressoras. Entretanto muitas dessas pre configurações, são desenvolvidas para que os produtos atingir padrões estéticos, é não estrutural. Isso fica visível, quando se aborda um pouco mais sobre as características dos principais softwares, algo que pode ser visto abaixo. Um dos software mais utilizado na comunidade Maker e acadêmica, é o Cura 3D, que é um fatiador mantido pela empresa Ultimaker, sendo gratuito e de código livre. Ele possibilita o seu uso em diversas impressoras 3D, pois, tem diversos perfis de fatiamentos pré configurados. Ele permite também, que o usuário crie perfis personalizados para o seu uso. É um programa que permiti a instalação de plugins, com o intuito de complementar as ferramentas de fatiamento. Além do mais, é um software simples e de fácil entendimento para usuários iniciantes. Todavia, é um software que não possui tanta precisão no tempo de fatiamento, nem no cálculo de material gasto, tendo o seu processo de fatiamento lento quando comparado com os demais programas (ULTIMAKER, *release 19 de Março de 2019*). O Slic3r, é um Software de Fatiamento bastante utilizado por usuários iniciantes, pois, além dele ser um fatiador que já acompanha muitas Impressoras 3D, principalmente as de fabricação nacional, ele é um dos primeiros fatiadores de código livre. No entanto, o Slic3r, não possui uma interface muito amigável e não vem com perfis pré configurados, mas, é um software compatível com as Impressoras 3D do tipo FDM E DLP (LISBOA, 2017). Para usuários com perfil mais avançados na Impressão 3D, o Simplify3D é bastante recomendado por conter um leque muito maior de parâmetros que podem ser configurados quando se compara com os demais. Ele também, possibilita uma personalização maior que os programas citados anteriormente. Além de que, o mesmo possui algoritmos de correção de malha, corrigindo automaticamente erros do arquivos STL, que vem dificultando o processo de impressão. Outra grande vantagem, é a

possibilidade de obter-se uma qualidade superficial elevada das peças fatiadas nele. Além do Simplify, ter uma ótima qualidade de impressão, as informações de tempo e de custo de impressão são mais precisas, sua interface gráfica é rica, seus suportes são fáceis de se retirar após a impressão, e também possui uma grande variedade de algoritmos de tratamento de malha, tradução e simulação avançada de impressão.

### 2.5.3 Fabricação da peça nas Impressoras 3D

A fabricação das peças na Impressora 3D, é uma etapa bastante crítica, no qual deve ser realizado o nivelamento e a calibração da impressora, uma vez quando ignorados, as chances das peças saírem com defeitos no acabamento ou em sua estrutura são extremamente altas. Além disso, é nessa etapa que é realizado o pós processamento das estruturas fabricadas, no qual é feita não só, a retirada de estruturas de suporte, como também, o lixamento necessário para o acabamento das peças.

## 2.6 Atual estado da tecnologia de Impressão 3D

A indústria 4.0, vem demandando de processos e métodos de fabricação cada vez mais rápidos, precisos, descentralizados, integrados e computadorizados. Com isso, a MA foi uma tecnologia que se destacou nessa nova Revolução Industrial, uma vez que esse método de produção possibilita o desenvolvimento de protótipos de geometrias complexas, com modelos computacionais de alta acurácia e uma redução significativa nos custos. Além disso, os avanços sofridos por esta tecnologia possibilitaram que a indústria e os setores da engenharia de ponta, tivessem o acesso a Impressoras 3D, com maior precisão e replicabilidade, abrindo a possibilidade do uso deste método de fabricação não apenas para confecção de peças estéticas e protótipos, mas também em peças de aplicações de engenharia. Atualmente, diversos autores vem abordando como as diversas empresas do Setor Aeroespacial vem utilizando essa tecnologia para a produção de determinadas peças, um exemplo disso, é o caso da Boeing que em meados de 2021, que certificou a Burloak Technologies Inc. como a primeira empresa a atingir as especificações BAC 5673 da Boeing, para a fabricação de componentes feito via impressão 3D para uso em suas aeronaves(MEHRPOUYA et al., 2019).

Com os avanços tecnológicos dos equipamentos da MA, atualmente, é possível utilizar essa tecnologia na fabricação de componentes para Nano Satélites, CubeSat, dentre outros. Um grande exemplo dessa utilização é a missão TUPOD, que foi a primeira missão que ocorreu com um satélite impresso totalmente em 3D, lançado da Estação Espacial Internacional (ISS), sendo concluída com sucesso. Já o satélite chamado de Tubesat-Pod (TuPOD), foi desenvolvido através de uma colaboração entre a GAUSS, a Teton Aerospace, a CRP EUA e a JAXA (CAPPELLETTI; BATTISTINI; MALPHRUS, 2020). Um ponto importante de ser destacado e que possibilitou, que a Impressão 3D fosse utilizada em setores como esses, foi que em paralelo ao

conhecimento sobre a ciência dos materiais, houve também a criação de novos materiais que a MA pode começar a utilizar (SANTOS et al., 2018). Os termoplásticos, mais utilizados atualmente na produção de protótipos e produtos finais através da Impressão 3D do tipo FDM são: Poliláctico (PLA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) e Nylon, sendo o PETG pertencente à mesma família do PET e Politereftalato de trimetileno (PTT). Entre os termoplásticos mais utilizados, os que são considerados materiais flexíveis são: o Elastômero Termoplástico (TPE), o Poliuretano Termoplástico (TPU) e o Policarbonato (PC) (LU; LI; TIAN, 2015). Dentre os termoplásticos, uma família que é bastante utilizada no meio acadêmico, principalmente por engenheiros aeronáuticos e aeroespaciais, são os polímeros de engenharia, como os já mencionados o PEEK, a polieterimida (PEI), o poliéster éter-cetona (PEAK) (BÉLAND, 1990). Dentre as possibilidades apresentadas de Termoplásticos possíveis, alguns deles são mais utilizados que os outros devido às suas características e aplicações diversas. O PLA, é um polímero produzido a partir de moléculas do ácido láctico que é um ácido orgânico obtido por recursos renováveis, e devido a isto, é considerado um biopolímero biocompatível, bem como bioativo e biorreabsorvível. Esse tipo de material, apresenta características que possibilitam diversas aplicações no setor biomédico (SANT'ANA; GOMES; JUNIOR, 2019).



## 3 Materiais Poliméricos

Os polímeros, são compostos orgânicos que possuem sua composição química baseada no carbono, hidrogênio e outros elementos que não sejam metálicos. Esses materiais, tem estruturas moleculares bastante grandes e são normalmente, caracterizados como materiais de baixa densidade. Segundo (CALLISTER, 2006), os polímeros podem ser classificados de diversas maneiras, devido ao fato de que os materiais são desenvolvidos para um número significativo de aplicações, tornando-os possíveis de serem classificados de acordo com as principais estruturas químicas empregadas, ao seu método de preparação, as suas características tecnológicas e quanto ao seu comportamento mecânico. Além disso, sendo um pouco mais específico, (CALLISTER, 2006) classificou os polímeros em duas grandes categorias, sendo elas o plástico e a borracha. Os polímeros comumente são chamados de Plásticos. A origem etimológica da palavra Plástico, vem do grego *plastik*, palavra que representa a arte da 'modelagem' e hoje é referida a uma família de materiais fáceis de serem moldados. Essa característica, advém do fato dos Plásticos serem compostos por resinas, proteínas e outras substâncias, permitindo aos materiais que mudem a sua forma de maneira permanente a partir de uma certa compressão e temperatura. De uma forma geral, os Plásticos são materiais que se moldam a partir da pressão e do calor. Os Plásticos, são formados pela união de grandes cadeias de moléculas denominadas polímeros. Estes são produzidos, através de um processo químico denominado de polimerização, que consiste na união química de monômeros que formam polímeros. O tamanho e a estrutura da molécula do polímero, determinam as propriedades do material plástico (CALLISTER, 2006) (CANEVAROLO JR., 2006).

### 3.1 Termoplásticos

De acordo com o (CALLISTER, 2006), os termoplásticos, são materiais que ao sofrerem de um aumento substancial da temperatura e da pressão, acabam amolecendo e fluem possibilitando, assim, que eles sejam moldados e após a retirada da solicitação de temperatura ou pressão, solidificam-se na forma em que foi modelado. Este processo, pode ser repetido diversas vezes, possibilitando, assim, que os termoplásticos sejam reciclados. Além disso, os termoplásticos, possuem a grande vantagem de serem solúveis e possuírem cadeias lineares ou ramificadas como o PE, PP, PVC etc. Já de acordo com (CANEVAROLO JR., 2006), os termoplásticos são materiais que não sofrem alterações nas suas estruturas químicas durante o processo de aquecimento e podem ser fundidos e remodelados após o seu resfriamento. O autor cita, como exemplos destes materiais os Polipropileno (PP), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno Tereftalato (PET), Poliestireno (PS), Policloreto de Vinila (PVC) etc.

## 3.2 Elastômeros Termoplásticos

A Copolimerização, é a associação da borracha com um termoplástico, responsável por formar uma estrutura de blocos. Tal estrutura, apresenta regiões elásticas e possui a sua parte elastomérica com propriedades como das borrachas vulcanizadas, além de ter outros domínios bastante rígidos e coesos a temperatura ambiente, como é comum para os termoplásticos. Estes domínios, têm uma função semelhante à das ligações cruzadas formadas na vulcanização da borracha tradicional, que é impedir o deslocamento relativo completo das cadeias moleculares quando são aplicadas à forças externas. Porém, quando a temperatura é elevada acima de suas temperaturas de Transição Vítrea (T<sub>g</sub>, devido à versão em inglês glass-transition temperature) ou de Fusão (T<sub>m</sub>, pelo inglês melting temperature), essas ligações perdem a sua coesão e permitem que o material adquira uma certa fluidez e possa ser conformado pela ampla gama de processos industriais a que os polímeros Termoplásticos podem ser submetidos. Ao retornar à temperatura ambiente, essas regiões voltam a atuar novamente como se fossem ligações cruzadas, sendo essa versatilidade o segredo dos elastômeros dos Termoplásticos(CALLISTER, 2006)(CANEVAROLO JR., 2006).

## 3.3 Polímeros com Memória de Forma

Os polímeros com Memória de Forma, são materiais poliméricos, com propriedades análogas as encontradas nas SMAs. Esses materiais, são caracterizados pela sua capacidade de voltarem a sua forma original após sofrerem um estímulo térmico. Uma vez que o material é estimulado acima da temperatura de ativação, ele começa a sofrer deformações térmicas, acarretando assim, na mudança da sua forma. Quando a sua estrutura é estabilizada, em seu novo formato, é possível que ela volte novamente a sua forma original, mas, para que isso ocorra, é necessário que o mesmo procedimento seja realizado novamente (PAYES, 2021). As SMA, são materiais que mesmo após sofrerem de uma deformação permanente, eles conseguem a partir de estímulos externos, recuperarem a sua forma original. Os estímulos podem ser térmicos, magnéticos, dentre outros. Em geral, a maioria das mudanças ocorrem nas estruturas cristalinas das ligas, por meio da transformação sólida do metal, definida como *Transformação Martensítica*. Os efeitos encontrados nas SMAs podem ser achados em outros materiais, como é o caso dos polímeros, que tem como diferencial o custo muito menor, devido aos processos de manufaturas simplificadas que permitem a aditivação e facilitam as mudanças de composição dos copolímeros. Estas facilidades, são um grande diferencial, pois, permitem que algumas propriedades dos materiais possam ser geridas conforme a aplicação proposta, sendo um exemplo, a variabilidade da temperatura de mudança de forma conforme a composição dos monômeros, permitindo que essas possam variar de -30°C a 260°C, o que gera a possibilidade de inserir fibras para reforços, produzindo um compósito. Segundo o autor (LENDLEIN, 2002), o efeito de memória de forma, está relacionado à diversos aspectos, dentre eles de tecnologia de processamento, estrutu-

rais, morfológicos e outros. A programação dos materiais com essas propriedades, consiste em conformar um material na sua forma permanente, gerando em seguida, a sua deformação em uma forma temporária, criando assim, a memória no material. Esse processo, também é conhecido como *Memorização* (DUARTE, ). O interesse por essa categoria de polímeros, vem crescendo desde os anos de 1990, devido aos grandes desenvolvimentos nas aplicações biomédicas, nos setores têxteis e aeroespaciais. Devido a isso, existem diversas metodologias de ativação dessa programação do material, como a de estímulos térmicos, de radiação, de campos elétricos, de variação do pH, dentre outros. No entanto, o estímulo mais estudado e difundido é o térmico, no qual, o estímulo será apresentado detalhadamente nos capítulos subsequentes, em que será apresentado a metodologia de programação (JIMÉNEZ, 2017).

### 3.3.1 Classificação dos polímeros com Memória de Forma

Os SMPs, que se caracterizam por serem estimulados termicamente, se dividem em duas classes, sendo elas os polímeros termofixos quimicamente reticulados (PTQR) e os polímeros termoplásticos fisicamente reticulados (PTFR). Além disso, os SMPs, podem ser divididos conforme a sua estrutura e o seu arranjo molecular, sendo essas divisões dependentes deles serem amorfos ou semicristalinos, sendo eles associados a temperatura de Tg e Tm (MALMIERCA et al., 2012).

#### 3.3.1.1 Polímeros Termofixos Quimicamente Reticulados

Os PTQR, são um grupo de polímeros que possibilitam a fixação da forma permanente obtida no processamento do material a partir de uma rede de ligações covalentes, além de apresentar, uma transição de cristalização/fusão que permite que haja uma temperatura de transição na qual ocorre a fixação na forma temporária que o material irá assumir. No entanto, esse grupo de polímeros possui uma grande desvantagem, uma vez que a sua fase permanente não pode ser reprocessada devido a irreversibilidade das ligações covalentes que forma a rede tridimensional. Comumente, os materiais dessa categoria quando são baseados em *Transição Vítrea*, demonstram excelentes taxas de fixação e de recuperação, quando os altos valores de módulos estão abaixo da Tg. Já quando, os valores encontram-se acima da Tg, eles apresentam uma excelente elasticidade, sendo o exemplo mais comum deste grupo, os Sistemas Epóxi, que ao ter a sua composição de rede variando, pode modificar a temperatura de transição do mesmo. Os PTQR (semicristalinos), apresentam deformações quando atingem temperaturas acima da Tm em suas regiões cristalinas. ao serem resfriados em temperaturas abaixo de sua cristalização, ocorre a fixação temporária da forma do material. neste grupo, estão inclusos os copolímeros, borrachas semicristalinas, cristais líquidos elastoméricos e hidro-géis, como os micro domínios semicristalinos. Um exemplo, deste grupo de material é o copolímero de polietileno e poliacetato de vinil reticulado com peróxidos orgânicos. os copolímeros, apresentam taxas de recuperação de até 95% na peça, no qual a forma temporária é programada através da fixação por uma transição

vítrea, que necessita de temperaturas de ativações ligeiramente mais altas do que em casos de peças programadas através de cristalização, isso ocorre, devido à histerese térmica.

### 3.3.1.2 Polímeros Termoplásticos Fisicamente Reticulados

Os PTFR, podem ser divididos em dois tipos pela natureza, sendo ela física ou química. A reticulação do tipo física, ocorre quando existe domínios cristalinos, interações intermoleculares como pontes de hidrogênio ou algum tipo de separação de fases. Essa reticulação, demonstra ter uma natureza reversível que pode ser fundida ou dissolvida em certas soluções. Devido a estas características, essas reticulações podem ser denominadas de polímeros Termoplásticos com Memória de Forma.

Neste modelo de rede, a interação entre as cadeias pode ser formada de fases cristalinas ou amorfas (SOARES, 2019).

Os domínios flexíveis e longos, são responsáveis pela mudança da forma da original para uma forma temporária, permitindo que os materiais possuam uma determinada orientação quando são deformados. Caracterizam-se por ser bastantes sensíveis aos estímulos, de modo, que atuam como a fase reversível e estão relacionados com a temperatura de transição do material, na qual, os domínios flexíveis adquirem mobilidade molecular (GORNI, 2003).

### 3.3.2 Polímeros com Memória de Forma Termossensíveis

O Efeito de Memória de Forma Induzido Termicamente, é a mudança da forma ocasionada pela mudança da temperatura. Nesse contexto, de acordo com o autor Lendlein Kelch, afirma que esse efeito não está ligado a uma propriedade específica do polímero, mas, sim a uma estrutura molecular e morfológica. Assim, a combinação dessas características, é nomeada da nomeada da existência de duas fases (fase rígida e fase flexível), a existência de uma mudança térmica reversível de uma rede molecular reticulada (GORNI, 2003).

Com isso, percebe-se que tanto a metodologia de processamento, quanto da forma de programação que está sendo aplicada na obtenção da forma temporária, são fatores que influenciam diretamente no comportamento da memória de forma.

Os SMP termossensíveis, podem apresentar dois regimes de ativação de recuperação, sendo eles o aquecimento direto e o indireto. Na ativação direta, é feito por meio de três modos de transferência de calor: a condução, a convecção e a radiação. Os modos mais, amplamente, difundidos e utilizados são os de condução e o de convecção. O aquecimento indireto, é realizado usando cargas ou partículas incorporadas no polímero com memória de forma, que permitem o seu aquecimento por indução, efeito de joule, luz e laser.

### 3.3.2.1 Classificação dos polímeros Termossensíveis com Memória de Forma

Os polímeros termossensíveis com Memória de Forma, são classificados em quatro categorias pelo autor Liu, sendo elas determinadas conforme a natureza de suas reticulações e com a temperatura de ativação do efeito de memória nos materiais (LIU; QIN; MATHER, 2007). Entretanto este tipo de classificação, é consensual na literatura, sendo então as categorias:

- polímeros Amorfos Reticulados Covalente, nesta categoria a temperatura de transição é igual a temperatura de Transição Vítrea;
- polímeros Semi-Cristalinos Reticulados, nesta categoria a temperatura de transição é igual a Temperatura de Fusão;
- polímeros Amorfos Fisicamente Reticulados, nesta categoria a temperatura de transição é igual a temperatura de Transição Vítrea;
- polímeros Semi-Cristalinos Fisicamente Reticulados, nesta categoria a temperatura de transição é igual a Temperatura de Fusão;

O efeito de memória, é evidenciado nestes tipos de materiais devido ao fato deles possuírem uma arquitetura molecular espacial. Desse modo, a estrutura molecular de um SMP's, é formada por dois componentes: Pontos de Reticulação (segmentos rígidos) e Molecular Switches (VALIM et al., 2021).

Os Pontos de Reticulação, são responsáveis por determinarem a forma permanente que o material irá possuir. Podem possuir naturezas químicas (ligações covalentes) ou físicas (interações intermoleculares). Já os Segmentos Flexíveis, são considerados como cadeias entres os Pontos de Reticulação e são utilizados para forçar uma forma temporária. A sua mobilidade, modifica-se de acordo com o local em que a temperatura se encontra, podendo ficar acima ou abaixo da Temperatura de Transição.

A Temperatura de Transição ( $T_{trans}$ ), é a temperatura na qual, o material muda de um estado para o outro, correspondendo a  $T_g$  ou a  $T_m$ .

## 4 Impressão 4D

A impressão 4D é metodologia de fabricação do tipo manufatura aditiva, que permite a criação de peças tridimensionais, que mesmo após fabricada tem a capacidade de modificar a sua forma original, para uma forma pré-programada. Essa capacidade é ativada com uso de estímulos externos, que podem ser uma mudança de temperatura, exposição UV, exposição a água, dentre outros. Esta tecnologia é uma evolução direta da impressão 3D que foi desenvolvida em 2013 por um grupo de pesquisa do Instituto de tecnologia de Massachusetts (MIT) nos Estados Unidos. Autores como Momeni Seyed descrevem a impressão 4D como sendo a *impressão 3D + tempo*. Quando o autor descreveu a impressão 4d desta forma, ele estava tentando dizer, que a forma, propriedade ou funcionalidade de uma estrutura impressa em 3D pode mudar em função do tempo, a fim de realizar uma ação pré-determinada. Esta nova capacidade da estrutura de modificar sua forma, após fabricação, sem depender da impressora para conseguir isso, é o quarto D na definição, assumindo que os outros 3 Ds se referem à possibilidade de produzir as peças através da manufatura aditiva. (TIBBITS, 2014) (MOMENI SEYED M.MEHDI HASSANI, 2017)(TIBBITS, 2013) O Professor Tibbits, foi o responsável por difundir o conceito de impressão 4D, porém diversos outros autores já haviam relatado trabalhos que utilizavam metodologias de produção muito semelhantes ao conceito de impressão 4D, para a fabricação de estruturas com geometrias complexa e adaptativas. Porém após a apresentação do conceito de impressão 4D no TED de 2013, o tema ganhou bastante relevância no meio científico. Com esse crescente interesse pelo tema, por pesquisadores de diferentes áreas, fez que essa metodologia evoluísse bastante, é ganhou novas formas de descrevê-la (LEE et al., 2017). Outros autores como (LEIST S.K.; ZHOU, 2016) descreve essa tecnologia como uma estruturas 3D feitas de materiais inteligentes, contando com as funções desses materiais, podem evoluir ao longo do tempo de forma predeterminada. O (RAVIV D.; ZHAO, 2014) descreve a impressão 4D como uma evolução proposital da impressão 3D, estrutura em forma, estrutura e função, destinada a realizar efetivamente a auto-montagem, deformação, e auto-reparação. Os autores (KHOO Z.X.; TEOH, 2015) definiram a impressão 4D como o processo de AM que integra materiais inteligentes em uma forma inicial de materiais impressos para estruturas/componentes impressos em 3D (KHOO Z.X.; TEOH, 2015). Com o contínuo desenvolvimento de pesquisa e tecnologia, a definição de impressão 4D será mais abrangente. Atualmente a definição de impressão 4D que é mais consensual na literatura é, a que a define como uma evolução direcionada das estruturas fabricadas via MA, em termos de forma, propriedades e funcionalidade, no qual essa evolução permita que essas estruturas sejam capazes de alcançar automontagem, multifuncionalidade e auto-reparo, sem que seja necessário a modificação desta através de um novo processo de manufatura (CHU et al., 2020). O desenvolvimento tecnológico e conceitual da impressão 4D, está diretamente entrelaçado com os avanços nos conhecimentos da ciência dos materiais. Princi-

palmente do SMPs, tendo em vista que a Impressão 4D é uma tecnologia de manufatura, que combina a MA, com o uso de propriedades específicas dos materiais, para o desenvolvimento de estruturas adaptativas. Para que seja possível obter avanços significativos e consistentes para impressão 4D, é necessário que o conhecimento e desenvolvimento de novos materiais ocorra em paralelo ao desenvolvimento da impressão 4D, visto que esta tecnologia é intrinsecamente dependente de alguns fatores para o seu funcionamento, como a necessidade de materiais com propriedades de memória de forma, e desenvolvimento de geometrias que sejam otimizadas, para usufruir destas propriedades, de maneira que estruturas fabricadas por essa tecnologia, apresente a existência de pelo menos dois estados estáveis (TIBBITS, 2013) (CHU et al., 2020). Além da grande necessidade de um profundo conhecimento da ciências e propriedades dos materiais com memória de forma, a Impressão 4D necessita de uma modelagem matemática, que possibilite a união das propriedades do material, com o desenvolvimento de geometrias complexas, modelagem essa, que será a responsável por determinar a maneira que o material será distribuído em regiões específicas da estrutura, para que a mesma, possa exercer uma determinada ação, quando estimulada após seu processo de fabricação. Se a principal característica da impressão 4D, é a capacidade de alterar o formato das peças após impressas, ela oferece outras vantagens sobre a manufatura aditiva tradicional. Isso inclui minimização de uma variedade de fatores, como o tempo de montagem, o custo líquido, o número de componentes e a taxa de falhas, pois a produção de componentes como atuadores, fabricado de único componente, simplifica essas peças e reduz a possibilidade de falhas críticas de subsistemas deste mesmo atuador.

## 4.1 Contexto histórico

A origem da impressão 4d, Surgiu a partir da colaboração de pesquisas entre os departamento de Educação, Pesquisa e Desenvolvimento da Stratasys e o laboratório de Automontagem do MIT, (TIBBITS, 2014). Basicamente, essa tecnologia consiste em imprimir modelos em 3D utilizando materiais que tem a capacidade de alterar sua estrutura, através de deformações que podem ser reversíveis e programadas. É como se os materiais evoluíssem ao longo do tempo, respondendo ao ambiente ao qual estão submetidos.(TIBBITS, 2013). Segundo o autor (LEE et al., 2017) O processo de automontagem de peças impressas via manufatura aditiva, no qual estruturas adaptativas, apresentam mudanças da sua forma "original" para uma nova estrutura, através de estímulo externos, não é algo que surgiu da Impressão 4D (BAYLEY, 2013). Pode ser citado como exemplo peças de arquitetura, de estruturas que foram fabricadas através de MA, e posteriormente foram impressos padrões usando jato de tinta com capacidade de absorver a luz, de modo que a tinta neste processo tinha a função de induzir uma mudança de forma autônoma na estrutura. funcionando como se fosse uma dobradiça. Como supracitado, a Impressão 4D surgiu e evoluiu da impressão 3D, de materiais com memória de forma. Sendo ambos conhecimentos "recentes" mais já amplamente estudados e com anos de literaturas geradas. O conhecimento dos materiais com propriedade de memória de forma, foi amplamente explorado

no anos '60, quando foi criada uma liga metálica denominada de Nitinol (Níquel-Titânio) que veio revolucionar a forma e a aplicação desta categoria de materiais no cotidiano. Porém já existiam outras ligas metálicas que apresentavam este tipo de propriedade. Porém atualmente umas das linhas de pesquisa que mais vem se desenvolvendo dentro da impressão 4D e 3D é a que faz uso dos polímeros como matéria prima. A sintetização em laboratório do primeiro polímero ocorreu na década de '30 em uma indústria na Inglaterra, mas esse polímero só ficou conhecido anos depois durante a Segunda Guerra Mundial. Material esse que foi utilizado em aplicações bastante relevante para época; como isolante elétrico de radares militares. Porém a dos SMPs é uma categoria de materiais muito mais recente, que ganhou bastante relevância no meio acadêmico e científico apenas nas últimas décadas (LENDLEIN, 2002). Tibbits apresentou o conceito de impressão 4D, em um contexto histórico das sociedades, que ela vem passando por um processo de revoluções industriais e culturais, e técnico-científico, extremamente rápidos e densos, no qual novos desafios tecnológicos surgem e são solucionados diariamente. Contexto esse que foi também um fator bastante influente por essa metodologia tem ganhado bastante relevância científica, após a apresentação do Professor Tibbits, como supracitado. Essa influência se deu através das grandes mudanças que a sociedade vem vivendo na última década, no qual surgiu a necessidade de desenvolver meios de otimizar o setor logístico de cargas, consumo e de modo que fosse possível reduzir o custo e o consumo de material. Como supracitado, Tibbits apresentou a impressão 4D no TED de 2013, como metodologia de fabricação que poderia solucionar esse problemas (TIBBITS, 2013). Em paralelo a esse contexto histórico no qual surgiu o conceito de impressão 4D. A humanidade vem vivendo uma nova corrida Espacial, na qual agencias governamentais, e empresas privadas do mundo todo apresentam o objetivo de colonização de novos mundos, e a ambição de realizar viagens interplanetárias tripuladas. Um grande exemplo disto é a empresa SpaceX que em 2016, por meio do diretor executivo (ou CEO, pelo inglês Chief Executive Officer), Elon Musk, revelou sua grande ambição de criar colônias humanas em Marte. Naquela época, o empresário esperava ver uma missão tripulada para o *planeta vermelho* acontecer logo em 2024. Mais adiante, ele recalculou seus planos para 2026. Já a Nasa pretende que colônias humanas em planetas como Marte, ou mesmo na Lua, aconteçam até o 2050. Porém para que isso seja viável é necessário o desenvolvimento de tecnologias, que possibilite reduzir o custo e volume das cargas que necessitam serem enviadas para essas novas colônias (GONÇALVES; NASCIMENTO-DIAS, 2021) (BERTUSSI, ). Desde os primórdios da exploração espacial, a indústria teve que trabalhar para reduzir o peso e o tamanho das estruturas que foram lançadas no espaço. Isto porque os lançadores têm que superar a força da gravidade e passar pela atmosfera antes de alcançar órbitas operacionais e, por esta razão, sempre tiveram uma forma afunilada e pouco espaço de carga. É aqui que entra a impressão 4D, que está se mostrando muito promissora e interessante para futuras missões espaciais, pois permite a criação de estruturas compactas e mais leves, que podem ser enviadas ao seu destino em uma configuração mais compacta, apenas para desdobrar e assumir sua configuração final, mais volumosa, uma vez que tenham chegado ao seu destino, por exemplo, nas novas colônias. Além disso, o pro-



cesso de abertura e montagem de certas estruturas também seria facilitado, evitando processos de montagem complexos e trabalhosos, pois só seria necessário ativar os estímulos que acionam o mecanismo de memória de forma. Como supracitado, esta tecnologia, permitiria a fabricação de estruturas dinâmicas com formas, propriedades ou funcionalidades que podem ser ajustadas no tempo. (TIBBITS, 2014). Porém esta capacidade depende principalmente de combinação de propriedades que são intrínsecas dos materiais inteligentes (GLADMAN E.A. MATSUMOTO, 2016). Além disso, esta tecnologia depende da otimização e exploração das propriedades dos materiais inteligentes, de modo que haja uma sinergia entre a combinação dos materiais e suas propriedades e a geometria que será desenvolvida. Deste modo, se torna necessária a modelagem matemática para o projeto da distribuição de vários (e talvez diferentes) materiais na estrutura. Existem pelo menos dois estados estáveis em uma estrutura impressa em 4D, e a estrutura pode mudar de um estado para outro sob o estímulo correspondente (ZHOU W.M. HUANG, 2015). As principais diferenças entre a impressão 3D e a impressão 4D são ilustradas na figura 4.1

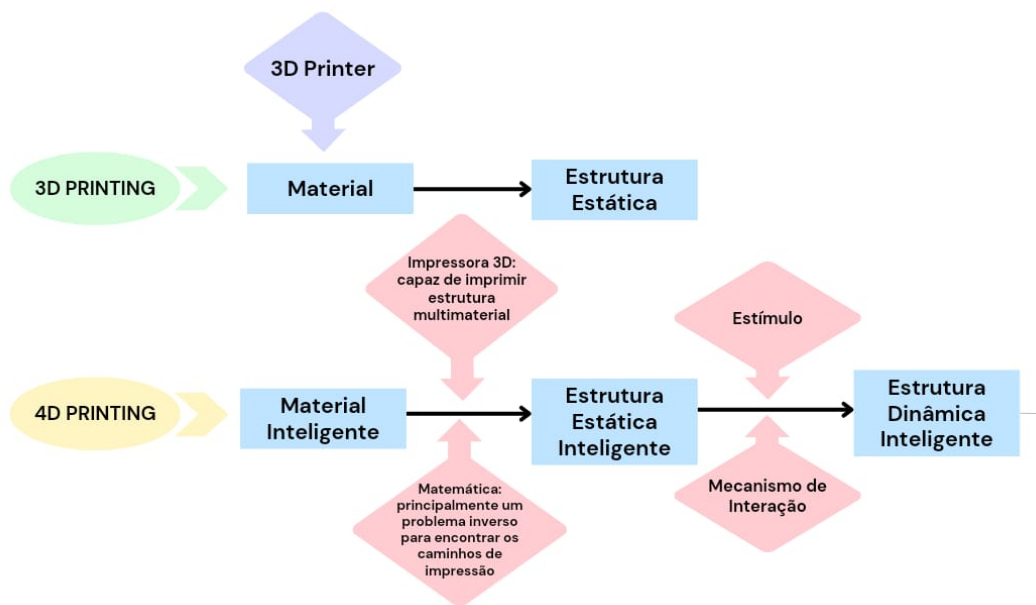


Figura 4.1 – Diagrama de blocos comparativo entre impressão 4D e 3D

## 4.2 Estado da Arte da impressão 4D

Há uma grande concentração de avanços recentes na impressão 3D e projetos que trabalham com impressão multicomponente SMP, com o objetivo de realizar geometrias 4D complexas com propriedades melhoradas devido ao efeito de memória de forma. Geralmente, em um sistema multicomponente, os polímeros são combinados com metais ou outros materiais inorgânicos para realizar novas funções ou melhorar as propriedades térmicas ou mecânicas. A fabricação de tais sistemas heterogêneos apresenta um desafio emocionante para a pesquisa fundamental e aplicada envolvendo conhecimentos de física, química, matemática, ciência dos materiais e engenharia de processos. Este método de produção tem, portanto, várias vantagens, tais como a significativa redução de volume para armazenamento e transformações que podem ser alcançadas com estruturas planas impressas 4D, um conceito apresentado na seção 1.1. No entanto, a impressão 4D não é utilizada apenas para estas funções. E alguns setores, como robótica, biomedicina e logística, começaram a testar esta tecnologia, sendo o mais promissor o setor médico. A aplicação do 4D na medicina se manifesta em produtos como drogas que são injetadas na corrente sanguínea em pontos específicos, ativando o material dentro do paciente, (LEE et al., 2017). Este tipo de aplicação utiliza diversos métodos de estímulo para ativar as propriedades de memória de forma. No entanto, os estímulos mais comumente relatados na literatura de impressão 4D são a absorção de água e a memória de forma induzida termicamente, mas eles demonstraram ser lentos na ativação da resposta dos materiais, mostram reversibilidade limitada e uma estrutura que tem pouca resposta geradora de força. Entretanto, como mencionado acima, existem diferentes formas de estímulos para a ativação das propriedades de memória de forma em polímeros e outros materiais, que serão discutidos em mais detalhes na próxima seção.

### 4.2.1 Métodos de estímulo para impressão 4D

Como supracitado na impressão 4D, a forma e a função das estruturas fabricadas, podem ser alteradas de acordo com um ou mais estímulos. Estes estímulos podem ser classificados em duas categorias, dos estímulos externos e internos. Os estímulos externos mais utilizados são umidade, temperatura, luz, campo elétrico e campo magnético, enquanto o principal estímulo interno é a força de tração da célula, (CHU WENQUANG YANG; LIU, 2014). Esta seção apresenta uma série de exemplos para cada estímulo, obtidos a partir da pesquisa bibliográfica. Os princípios físicos, vantagens e desvantagens de cada método estão ilustradas na tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 - Métodos de estímulos para impressão 4D.

| Estimulo Externo              |                                |                            |  |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--|
| Método do estímulo            | Princípio físico               | Vantagens                  | Desvantagens   |
| Umidade                       | Inchaço/encolhimento           | Limpo/conveniente          | Resposta Lenta   |
| Temperatura                   | Desigualdade de tensão Interna | Controladamente Ajustável  | Resposta lenta/ Complicada                               |
| Luz                           | Efeito fototérmico             | controle de alta resolução | Complicada   |
| Campo elétrico                | Efeito eletrotérmico           | Rápido                     | Operador inconveniente                                   |
| Campo magnético               | Acionamento magnético          | Acionamento Remoto         | Operador inconveniente                                   |
| Estimulo Interno              |                                |                            |  |
| Força de tração celular (CTF) | Ligação de ação e interação.   | Compatibilidade biológica  | Força de tração da célula pequena e difícil de controlar |

#### 4.2.1.1 Agua/Umidade

Materiais sensíveis à água ou à umidade são de grande interesse por causa de sua ampla aplicabilidade. Ao usar a água como estímulo externo, a estrutura pode ser deformada debaixo d'água e restaurada ao seu estado original (forma original) após a secagem. No entanto, o material tem um alto grau de expansão/contração, gerando a degradação do mesmo. Deste modo o material deve ser controlado com precisão durante o processo de programação e de transição para que as propriedades estruturais do material impresso sejam mantido, além de necessita de um controle dos parâmetros ambientais, principalmente da umidade na etapa de impressão 3D. Neste mecanismo, uma estrutura inteligente impressa é composta por um material ativo hidrofílico expansível e um material rígido. A água é utilizada como um estímulo externo para que a estrutura possa mudar de forma quando molhada (imersa) e possa retornar à sua forma original após a secagem. Este mecanismo é impulsionado pelas diferentes razões de inchamento entre os materiais ativos e rígidos. A expansão do material inteligente gera uma força que leva à mudança de forma. Quando o material expansível é adequadamente arranjado com o material rígido, um comportamento complexo de mudança de forma pode ser alcançado. A magnitude e direção da mudança de forma depende dos arranjos espaciais dos dois materiais, (TIBBITS, 2013)

#### 4.2.1.2 Luz

O estímulo luminoso, é comumente utilizado para ativação de forma remota do polímeros. A forma do polímero pode ser alterada usando um gatilho de luz com diferentes comprimentos de onda. Já que não trazer qualquer dano às células como o aumento da temperatura do material, este estímulo pode ser usado em biomedicina para entrega de drogas in vivo (ZHOU et al., 2015). Este método também é amplamente usado no campo da bio-impressão 4D, especialmente na fabricação de estruturas carregadas de células 4D auto-dobráveis. Ao contrário da temperatura e da umidade, a luz é um estímulo indireto. O autor Kuksenok usou a luz como um gatilho para a deformação de uma maneira muito diferente (LIU Y.; BOYLES, 2012). Ele utilizou blocos de gel poliméricos impregnados com uma porcentagem de cromóforos, que são moléculas responsivos a luz, que quando recebem o estímulo, o material incha, modificando a sua forma. A reticulação progressiva em profundidade pode ser alcançada projetando a luz UV no líquido (a resina), onde a anisotropia ajuda a dobrar a estrutura impressa em 4D (HU et al.,

2017). A luz é vantajosa porque pode exercer controle sobre o espaço e o tempo. Outra aplicação interessante está relacionada ao uso do estímulo luminoso para mudar a cor dos objetos impressos, referimo-nos aqui ao uso da absorção seletiva da luz em função da cor e do aquecimento em compósitos multicoloridos SMP. (KLOUDA L.; MIKOS, 2008).

#### 4.2.1.3 Campo elétrico

Semelhante à luz, o campo elétrico também pode ser usado como estímulo no controle remoto. Quando usado como um estímulo, o campo elétrico produz um impulso resistivo para preencher um SMP com um enchimento condutor. (MIRIYEV A.; STACK, 2017) descreveu um músculo artificial macio e impresso, feito de uma mistura de elastômero de silicone e etanol. Quando um campo elétrico é aplicado, o calor é gerado por resistência, fazendo com que o etanol evapore. Esta mudança de fase de líquido para gás aumenta muito o volume do etanol, expandindo assim toda a matriz (MARTIN C.A.; SANDLER, 2005).

#### 4.2.1.4 Campo magnético

Estímulos de Campo Magnético A recuperação de forma induzida magneticamente pode ser alcançada pela dopagem de SMP com nanopartículas (como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). A recuperação da forma de compósitos SMP pode ser induzida por aquecimento em um campo magnético alternado. O PLA dopado de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> não só melhora as propriedades mecânicas e a recuperação da forma do material, mas também introduz uma resposta magnética à estrutura impressa em 4D, (MIRIYEV A.; STACK, 2017).

#### 4.2.1.5 temperatura

Um dos estímulos mais utilizado para ativar os materiais com memória de forma é a temperatura. Exemplo bastante famosos de SMP ativado por temperatura é a flor do autor (GE et al., 2016), que poderia florescer ao ser aquecido. A tecnologia também é usada para fazer garras inteligentes que não requerem montagem ou eletromecânica componentes. A última descoberta de Bodaghi et al., (TIBBITS C. MCKNELLY, 2014), mostra que as estruturas SMP podem ser pré-programadas aproveitando ao máximo o processo de aquecimento em impressoras FDM. Hu, em (KLOUDA L.; MIKOS, 2008), descreveu uma estrutura bi-piezoelétrica à base de grafeno que se expande em uma placa quando aquecida e rola de volta em um cilindro quando resfriado. Wang estabeleceu um modelo fenomenológico e introduziu o conceito de evolução de fase para descrever o comportamento de transição vítrea do SMP. Em um ciclo típico de memória de forma, a amostra de SMP primeiro se deforma de sua forma original a uma temperatura superior à sua temperatura de transição e, em seguida, esfria a uma temperatura mais baixa sob a condição de manter as restrições externas (LEIST S.K.; ZHOU, 2016). A partir de estudos, Lendlein e Kelch puderam concluir que o efeito da memória pode ser algo controlado através de um ciclo termomecânico. Este ciclo, é responsável por controlar diversos parâmetros, por

exemplo, o alongamento, a tensão, a deformação, a força de recuperação.(LENDLEIN, 2002) O ciclo, funciona da seguinte maneira: - Primeiro, a amostra é aquecida em uma temperatura superior a sua  $T_g$ , sendo deformada de uma maneira diferente. - Em seguida, ao ser aplicada uma tensão constante, a amostra é arrefecida em uma temperatura menor que a  $T_g$ , tendo como consequência, a deformação fixada. - A força aplicada é removida, fazendo com que a deformação obtenha uma forma temporária. Nesta parte, o material obtém uma forma rígida, fazendo com que as cadeias poliméricas fiquem imóveis. - Por último, ocorre a recuperação do formato original a partir do aquecimento do material ( $T > T_g$ ), resultando na liberação da energia armazenada na deformação. Este processo pode ser repetido diversas vezes sem que haja a degradação do material. A quantidade do número de formas que um material pode assumir está relacionado com o número de transições de fases. Os SMPs, estão configurados para memorizar apenas uma forma permanente, correspondendo a um estado mais relaxado de seus segmentos de comutação nomeados de Efeito de memória de forma unidirecional (One-Way Shape Memory Effect). No entanto, a sua utilização apresenta como desvantagem a irreversibilidade. Já o efeito de memória de forma unidirecional (Two-Way SME), não exige uma reprogramação de sua forma temporária, despontando como uma grande vantagem quando comparado ao primeiro (CHOI O.-C. KWON, 2015). Na figura 4.2, podemos ver como funciona a metodologia de programação da impressão 4D usando a temperatura como estímulo. A fase de programação é uma etapa crítica no funcionamento da tecnologia de impressão 4D, especialmente quando o estímulo é a temperatura, pois a variação incorreta deste estímulo pode fazer com que o efeito de memória de forma seja ativado incorretamente.

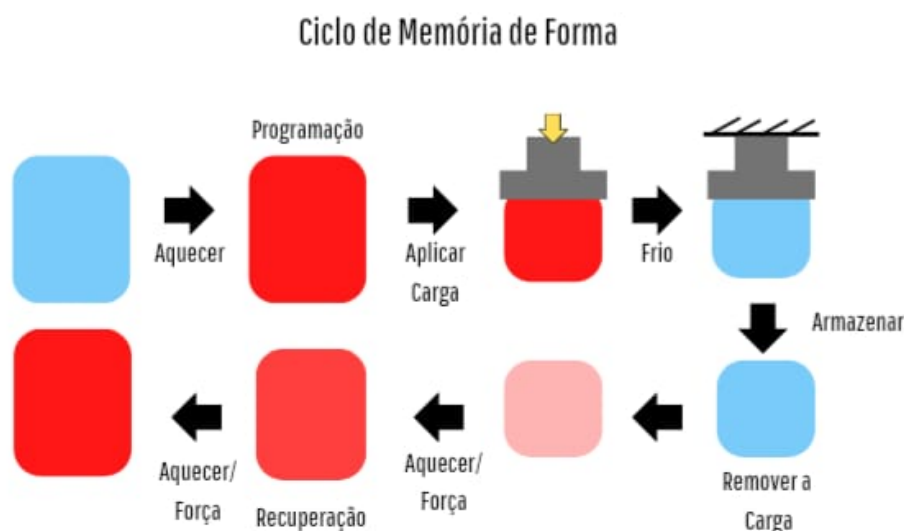


Figura 4.2 – Esquemático do mecanismo de programação da Impressão 4D, fonte; adaptação (DIAS, 2020)

Quando o material é aquecido acima da temperatura de transição para programação, os

segmentos flexíveis do material adquirem comportamento elástico, de modo que quando uma carga externa é aplicada ao material, este segmento se alinha na direção da deformação, gerando assim o deslocamento dos pontos da malha; quando o material é resfriado a temperaturas abaixo da temperatura de transição, ele adquire um estado rígido, retendo a forma adquirida quando sofreu deformação. Portanto, quando o material é aquecido a temperaturas acima da temperatura de transição sem carga de deformação, os pontos reticulados tendem a retornar ao seu estado original ao lado dos segmentos flexíveis. O principal requisito para que um material polimérico exiba propriedades de memória de forma é a capacidade de formar fortes interações reversíveis entre segmentos, permitindo assim que ele exiba fixação temporária da forma, (DIAS, 2020).

Os pontos de reticulação, são responsáveis por determinarem a forma que o material irá possuir de forma permanente. Podem possuir naturezas químicas (ligações covalentes) ou físicas (interações intermoleculares). Os segmentos flexíveis, são considerados como cadeias entres os pontos de reticulação, e são utilizados para forçar uma forma temporária. A sua mobilidade, modifica-se de acordo com o local em que a temperatura se encontra, podendo ficar acima ou abaixo da  $T_{trans}$ , que é a temperatura na qual o material muda de um estado para o outro, correspondendo a  $T_g$  ou a  $T_m$ .

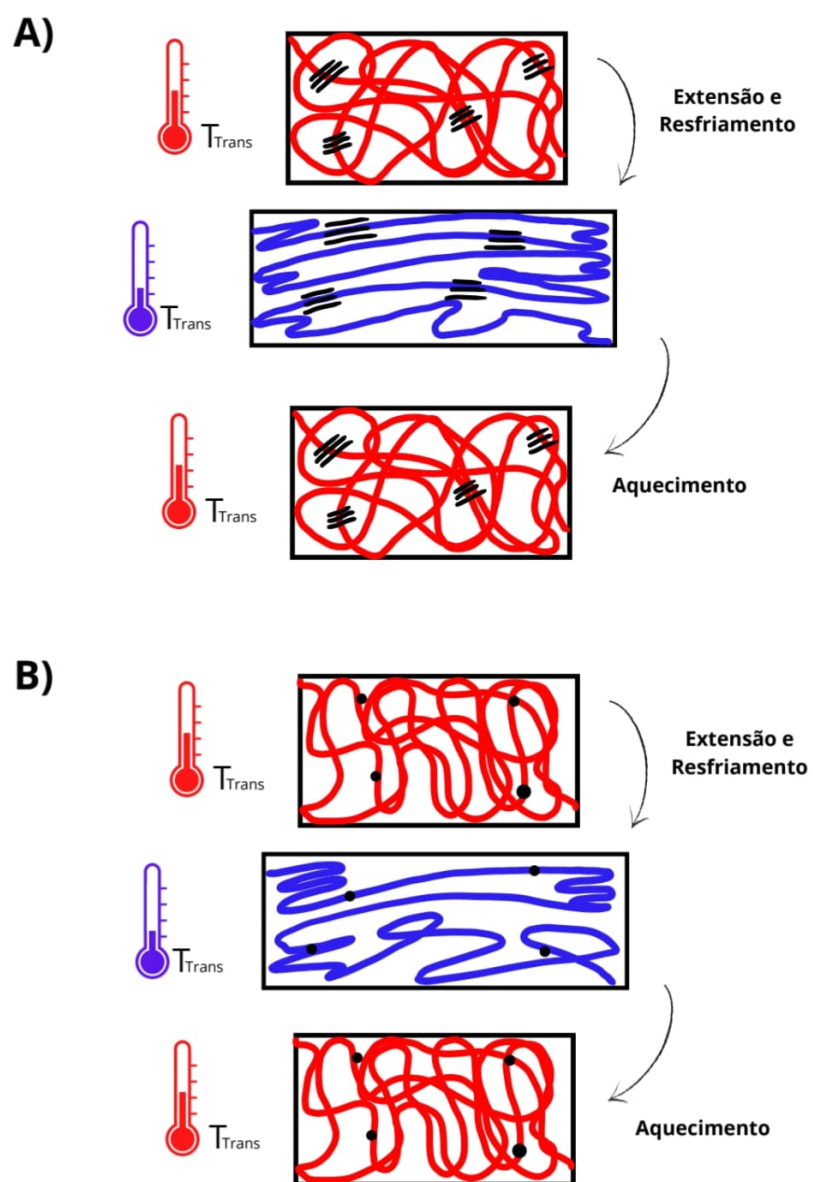


Figura 4.3 – Esquemático do mecanismo molecular dos SMP's, fonte: adaptação (DIAS, 2020)

# 5 Materiais e Métodos

## 5.1 Materiais

Para tornar esta pesquisa possível, foi utilizado a Impressora 3D Ender 5 Plus da marca Creality, pertencente ao Laboratório de Materiais e de Estruturas Aeroespaciais - LEA, localizado no edifício LDTEA na Universidade de Brasília - Campus Gama. O equipamento em questão, foi escolhido devido as suas características especiais como uma acurácia extremamente alta, uma área de impressão de 350x350x400 mm e a capacidade de atingir em torno de 260°C em seu bloco de aquecimento. Além disso, o equipamento tinha todos os requisitos necessários para a conversão de uma impressora comercial 3D em uma impressora 3D capaz de imprimir polímeros de engenharia, tais como PEEK, ou filamentos compósitos, com matriz polimérica adicionada de nanopartículas metálicas, tais como as de interesse em impressão 4D, se customizada adequadamente. Para a transformação da impressora foi necessário a fabricação de uma estrutura que serviria como caixa para controlar a temperatura do ambiente em torno da sua área de impressão. Essa estrutura foi fabricada, em alumínio de espessura 1,5 mm em camada dupla, com um isolamento interno em lã de rocha de espessura em torno de 10 mm. Toda a sua parte eletrônica foi retirada da impressora e colocada fora da caixa de controle térmico. Além disto, foi desenvolvido um sistema de aquecimento composto por uma resistência de forno com um sistema controlador específico para esse sistema de aquecimento. Também, foi necessário a modificação do software embarcado da impressora de modo que permitisse que as temperaturas máximas do bico chegassem a 500°C, e a 150°C a da mesa, com uma temperatura de estufa capaz de chegar até 120°C, permitindo assim, o processo de impressão de polímeros especiais, a programação das peças 4D e o tratamento térmico das peças dentro da própria impressora. Neste projeto, foram utilizados os softwares de fatiamento Simplify3D, e softwares de programação Visual Studio Code, IDE Arduino, Platformio e Aut Build Marlin, e o software de Desenho Assitido por Computador Solidworks 2018. Todas as licenças, foram fornecidas pela empresa Spac3D Tecnologia. Ademais, empregou-se o uso dos seguintes equipamentos de medição como a Balança de Precisão da SHIMADZU, do modelo ATC224, que possui uma precisão de quatro casas decimais e um Paquímetro Digital VONDER, com precisão de duas casas decimais, utilizados para medir a massa e as dimensões dos corpos de prova (CPs). Além do mais, também, foi-se aproveitada a estufa de esterilização e de secagem de 280 litros, com uma circulação de ar forçada, pertencente ao Laboratório de Estruturas Aeroespaciais - LEA. Os filamentos utilizado nesta pesquisa foram:

- O Nylon (tipo "max natural", da fabricante Printlot, de fabricação argentina, lote DF4402/1), filamento de 1,75 mm de diâmetro. Os parâmetros de impressão recomendados pelo fa-



bricante são os seguintes: temperaturas do bico de 240°C a 260°C, e temperatura de mesa de impressão de 80°C a 100°C;

- Filamento ABS Cristal (da fabricante 3D vale, lote não informado pelo fabricante), de 1,75 mm de diâmetro, parâmetros de impressão: temperaturas do bico de 225°C a 240 °C, e temperatura de mesa de 90°C a 110 °C;
- Nylon na cor preta (da fabricante UP3D RoHS, lote UP3D001), filamento de 1,75 mm de diâmetro, com a temperatura do bico de 210°C a 260 °C;
- Filamento PLA Natural (da fabricante 3Dlab, lote não informado pelo fabricante) de diâmetro de 1,75 mm, com a temperatura do bico de 200°C a 220 °C, e temperatura de mesa de 0°C a 70 °C;
- Filamento Flex Max branco (da fabricante Printlot, lote DF4505/1, de fabricação a argentina), de 1,75 mm de diâmetro, com temperaturas do bico de 240°C a 260°C, e temperatura de mesa de 80°C a 100° °C.

Para a fabricação dos novos materiais, utilizou-se o equipamento da Filmaq3D, que é uma fabricante nacional de extrusoras e de equipamentos para a fabricação de filamentos. O equipamento é composto por 3 máquinas:

- O *Extrusor*, que tem a capacidade de alcançar até 400°C, com bico de 1,75mm, com uma taxa de extrusão de 2,2 m/min, ou 3g de filamento por hora, e uma velocidade da rosca de alimentação de 0 a 30 RPM;
- O *Tracionador*, que possui um sistema de resfriamento composto por 6 ventoinhas que podem ser controladas; e por último
- o Sistema de *Bobinamento do Filamento*.

Na figura 5.6, é mostrada a composição do sistema de fabricação de filamentos. Para fabricar o filamento, foram utilizadas pastilhas virgens de ABS e PLA virgem do fabricante 3DLAB, bem como aditivos metálicos em pó, neste caso específico nanopartículas de alumínio e titânio da Sigma Aldrich.

## 5.2 Metodologia

### 5.2.0.1 Fatiamento e Configurações dos Parâmetros de Impressão 3D

A princípio, é importante destacar que para o fatiamento das peças, foi utilizado o software da Simplify3d versão 4.1, com um conjunto de parâmetros de fatiamentos básicos, apresentados pelo autor (SANTOS et al., 2020), nos quais se destacam a temperatura e a retração

do filamento, que variavam de material para material. Os parâmetros de fatiamento que foram utilizados e adotados como o padrão nesta pesquisa se encontra na 5.1. Além dos parâmetros apresentados na tabela, fez o uso da retração de 5,2 mm e a velocidade de retração de 2800 mm/minuto, em todos os materiais.

Tabela 5.1 – Parametros de fatiamento utilizados

|            | Temperatura do Bico (°C) | Temperatura da mesa (°C) | Velocidade de impressão (mm/min) | Preenchimento interno (%) | Paredes externas | Altura de camada (mm) |
|------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|
| ABS        | 240                      | 110                      | 3600                             | 100                       | 3                | 0,200                 |
| PLA        | 200                      | 60                       | 3600                             | 100                       | 3                | 0,200                 |
| TPU        | 225                      | 50                       | 1800                             | 100                       | 3                | 0,200                 |
| Nylon up3D | 235                      | 90                       | 3600                             | 100                       | 3                | 0,200                 |
| Nylon Max  | 240                      | 110                      | 3600                             | 100                       | 3                | 0,200                 |

Para fabricação das estruturas em Nylon, o fatiamento padrão não gerou resultados satisfatório, tornando impossível imprimir as peças, deste modo foi necessário o uso de parâmetros especiais de fatiamento. Sendo necessário para esse material o uso das ferramentas skirt/brim, a ferramenta Oze shield e a retração foi desligada. O parâmetro de fatiamento intitulado de retração é o movimento de retrocesso do filamento necessário para evitar pingas de material durante os movimentos e deslocamentos que realiza o extrusor em vazio durante a impressão 3D. o Oze shield é uma ferramenta que gera uma parede de material, que é usada como vedação térmica, gerando assim, uma "câmara de impressão" com temperatura "controlada", evitando a criação de correntes de ar na peça. O Skirt/Brim são um conjunto de ferramentas usadas no processo de fatiamento, que permitir implementar uma técnica especial que é anexada às bordas do modelo. Normalmente, ele é impresso com um número maior de contornos para criar um grande anel em torno da peça. Assim, assemelhando-se à borda de um chapéu. As bordas do Brim costumam ser usadas para segurar as bordas da peça, o que pode impedir o empenamento e ajudar na adesão à mesa. Já o Skirt é uma técnica que consiste em imprimir uma "saia" ao redor de onde ficará a peça, e tem como finalidade regular o fluxo de filamento e garantir que, ao imprimir a peça, o material esteja de acordo. Então, o skirt/brim permite criar uma maior superfície de contato com a mesa de impressão, evitando assim que o material deforma-se termicamente, gerando o efeito de "embanamento" da peça. Como no caso do Oze Shield, essa ferramenta gera uma "câmara de impressão" com temperatura "controlada", evitando a criação de correntes de ar na peça. Na tabela 5.2 encontra-se os valores utilizados destes parâmetros.

Tabela 5.2 – Parâmetros de Fatiamento Especiais.

|            | Skirt/brim voltas (und) | Skirt/brim distancia da peça (mm) | Skirt/brim camadas (und) | Oze shield vertical offset (mm) | Oze shield vertical Angulo de inclinação |
|------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|
| Nylon up3D | 30                      | 0                                 | 2                        | 2                               | 30                                       |
| Nylon Max  | 30                      | 0                                 | 2                        | 2                               | 30                                       |

Desenvolve-se nesta pesquisa o estudo da influência que a orientação do preenchimento

exerce nas propriedades de memória de forma do material. Dois conjuntos de amostras foram fabricados para impressão 4D, com a orientação do padrão retilíneo da impressão de preenchimento alterada de -45/45 para 0/90.

### 5.2.1 Desenvolvimento da Metodologia do Processo de Fabricação 4D

A metodologia utilizada para a fabricação em 4D, abrange desde a parte dos parâmetros de fatiamento na Impressora 3D, à escolha dos materiais. Contudo, a parte mais crítica é a programação do polímero para a ativação da memória de forma. Nesta pesquisa, foram empregados a ativação de Polímeros Termossensíveis uma vez que, estes apresentam-se com uma metodologia mais consolidada, podendo se encontrar mais referenciais. A metodologia, dividiu-se em três etapas de programação do material, sendo elas a "programação", "armazenamento" e "recuperação". Inicialmente, após ser processado em uma determinada forma, o SMP, adquire uma forma permanente. Em seguida, o material é deformado mecanicamente à uma temperatura um pouco acima da  $T_{trans}$ . Porém, quando o arrefecimento fica abaixo da Temperatura de Transição, a forma temporária é fixada e, quando exposto a uma temperatura acima da  $T_{trans}$ , o material retorna à forma inicial (forma permanente). A programação dos materiais, foram realizadas usando uma estufa auxiliada com um suporte de alumínio, que foi empregado para gerar uma carga no material. A programação, ocorreu conforme as categorias apresentadas anteriormente. As propriedades térmicas dos materiais, foram obtidas junto as dos fabricantes. A primeira etapa da programação, deu-se pelo aquecimento da estufa até 10% acima da temperatura da  $T_g$  do material, tendo o PLA e o Nylon um aquecimento de 60°C. Após o aquecimento da estufa, foram inseridos os CPs, que permaneceram um tempo de 20 minutos, sendo posteriormente submetidos a uma carga para gerar uma deformação nas peças. Em seguida, as peças retornaram para a estufa por um período de 30 minutos, tendo a sua temperatura desligada após transcorrido o tempo descrito, deixando assim, as peças atingirem, dentro da estufa, a temperatura ambiente. Depois disso, a estufa foi aberta e as cargas foram retiradas dos CPs. Nesse caso, o ABS foi utilizado em uma temperatura de 96°C. Nessa metodologia de programação, o material levou cerca de 120 minutos para chegar à temperatura ambiente, que nos dias que o estudo foi realizado, se encontrava em torno de 25°C. Além disso, foram realizados também o estudo do efeito do processo de resfriamento na etapa da programação do material, analisando as propriedades de memória de forma. Nesse estudo, experimentou-se duas metodologias, sendo elas, uma resfriamento lento, que foi apresentado anteriormente, e uma de resfriamento rápido, no qual o material após ser retirado da estufa, foi deixado resfriando em temperatura ambiente. Posteriormente, foi submetido a análise os efeitos que a memória de forma dos materiais pode sofrer devido a temperatura de programação e pela espessura. Para isso, foram fabricados setenta CPs de cada material, sendo separados em conjuntos de cinco, no qual cada um destes era composto por peças de espessura que variava de 1 a 4 mm, sendo que essa variação se dá em escala de 0,5 mm. Para esse estudo, cada conjunto de CPs foram submetidos a uma temperatura de programação que iniciava-se a 20º graus abaixo da  $T_g$  teórica do material, até os 20º graus acima da  $T_g$  teórica do material,

tendo um intervalo de 10º graus de diferença entre cada temperatura utilizada. O método utilizado para compreender os efeitos que a variação destes parâmetros exercia nas propriedades de memória de forma dos polímeros, foi a análise da velocidade de recuperação de cada amostra, verificando assim, se diferentes parâmetros de programação poderiam influenciar ou não essa característica. Para a realização desta análise, foi preparado um recipiente com água aquecida à uma temperatura de ativação, tendo um cronômetro acionado no instante em que a amostra foi inserida no recipiente. É válido destacar que, o estudo supracitado, foi realizado apenas com o Nylon 3D MAX, TPU, PLA, e o ABS.

### 5.2.1.1 Desenvolvimento das Geometrias para Teste da Impressão 4D

O desenvolvimento das geometrias para teste da Impressão 4D, foi realizado com o software Solidworks 2018, em que foi confeccionado um conjunto de peças retangular de 16 mm de largura, 80 mm de comprimento, com a sua espessura variando entre 1 e 4 mm. No centro da peça, foi feito um entalhe com um ângulo de 45º, e que varia de 0,5 á 2 mm de profundidade. A fabricação do entalhe teve como objetivo, possibilitar a mobilidade da peça, formando em sua forma já deformada um formato de "L". Na figura 5.1, é apresentado a geometria descrita.

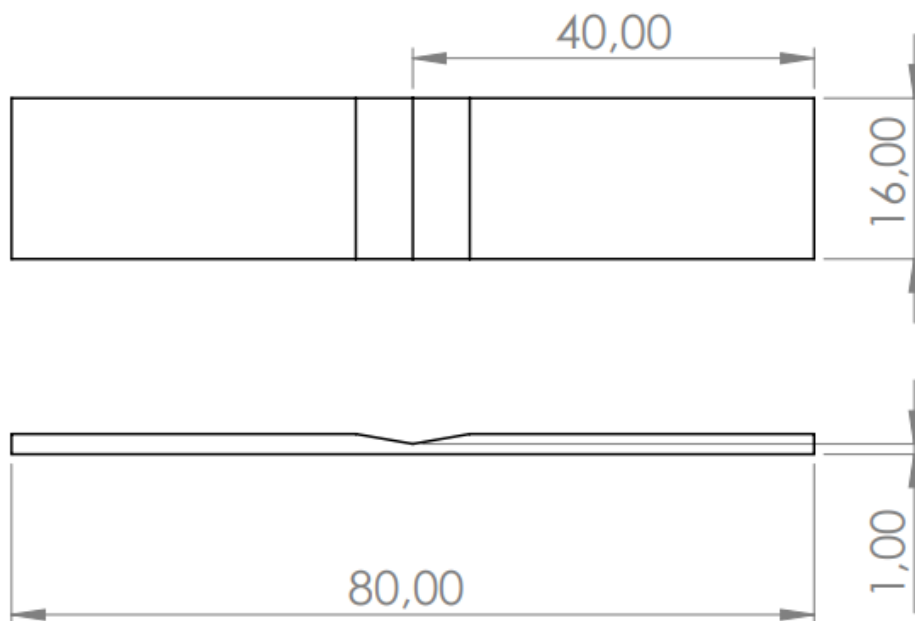


Figura 5.1 – Geometria Desenvolvida no Solidworks

Como segunda geometria, foi projetada e produzida uma caixa de 50x50x50 mm (estas dimensões não levam em conta a perda devida a cortes e rasgos gerados), com uma espessura de parede de 2 mm, utilizando as ferramentas de chapa do software acima mencionado para criar

as curvas e rasgos necessários para que a caixa pudesse ser programada e dobrada. Na figura 5.2 é mostrada a segunda geometria desenhada.

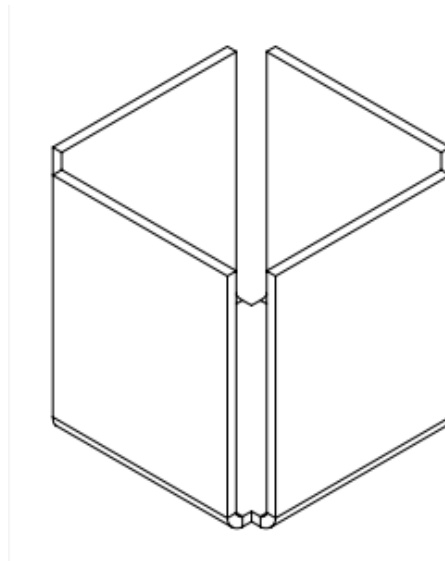


Figura 5.2 – Vista Isometrica da caixa que foi desenvolvida no solidworks, usando as ferramentas de chapas metálicas

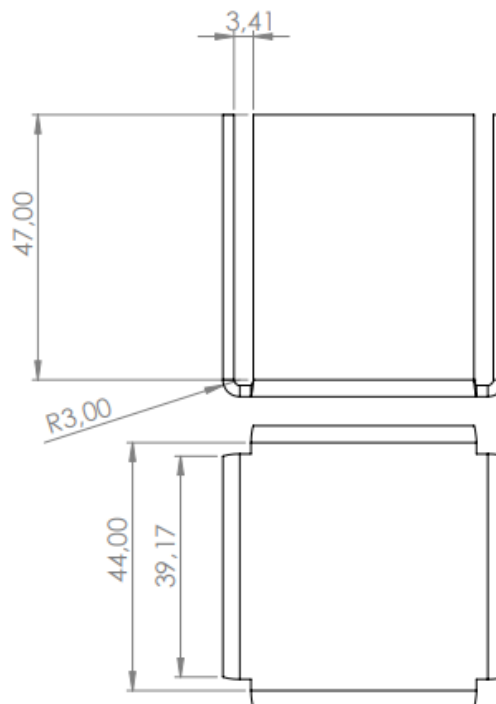


Figura 5.3 – Desenho tecnico da caixa desenvolvido no solidworks

A figura 5.3 mostra as dimensões e cortes que a ferramenta de chapa metálica gera na estrutura da caixa; estes rasgos e curvas foram gerados com o objetivo de facilitar a fase de programação, facilitando a deformação do material por sua forma temporária, sem que se acumulem tensões ou deformações.

### 5.2.2 Microscópio Confocal

Para a realização deste ensaio, utilizou-se de pequenos pedaços de estruturas impressas em 3D, somados ao material aditivado com partículas de alumínio, no qual o processo de preparo seguiu os seguintes passos:

- Passo 1, cortar a superfície da peça o mais reto e plano possível;
- Passo 2, embutir a amostra em um cano de pvc com resina incolor;
- Passo 3, lixar a superfície da peça de modo a retirar qualquer resíduo de resina que venha a ficar na área que será estudada;
- Passo 4, realizar o polimento da superfície, para que ela fique o mais lisa e reta;
- Passo 5, submeter as amostras no equipamento de Microscopia.

### 5.2.3 Termogravimetria (TGA-DSC)

Foi realizado um teste de termogravimetria para caracterizar as propriedades térmicas do material utilizado. Para a realização do ensaio termogravimétrico, foi utilizado um analisador simultâneo TGA-DSC da TA-Instruments, modelo SDT-Q600, com uma massa aproximada de 10 mg de amostra, submetidas a uma faixa de temperatura de 30 a 600 °C, com uma rampa de aquecimento de 20°C/min, sob a atmosfera de N<sub>2</sub> (fluxo de 100 mL/min). Para a concretização desse ensaio, foram utilizadas amostras de filamentos cortadas em lascas em torno de 0,4 mm, sendo pesadas separadamente, e levadas para uma estufa, para remover toda a umidade que o polímero tem absorvido desde a produção. As amostras de filamento, ficaram 12 horas na estufa, secando em uma temperatura em torno de 80°C. Após a secagem do material, ele foi retirado e colocado em potes, que foram vedados e posteriormente, colocados juntos de sílica, sendo levados diretamente para o equipamento no qual o ensaio foi realizado. A temperatura ambiente no dia do ensaio se encontrava em torno de 25°C. A Figura a seguir 5.4, apresenta o equipamento utilizado:



Figura 5.4 – Equipamento usado no ensaio de DSC/TGA Fonte: Autor.

### 5.2.4 Ensaio de Tração

Foi realizado um teste de tração para caracterizar as propriedades mecânicas do material utilizado. Para o ensaio de tração, foram produzidos cinco CPs de cada material, utilizando os seguintes parâmetros: Temperatura do bico extrusor à 240°C; Temperatura da mesa à 100°C, com uma velocidade de deposição de material por camada de 1800 mm/min; Diâmetro do bico de 0.4 mm; Altura da camada de 0,2 mm, e 100% de preenchimento.

Os CPs, foram modelados conforme a norma [ASTM](#). A geometria dos CPs, está disposta na figura 5.5.

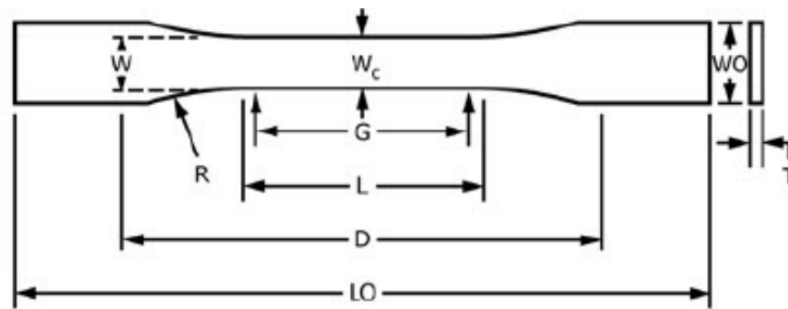


Figura 5.5 – Parâmetros do Corpo de Prova de Tração. Fonte: (ASTM D638, 2014).

Tabela 5.3 – Dimensões conforme a Figura. Fonte: ASTM D638, 2014

|                                   | Dimensões (mm) |
|-----------------------------------|----------------|
| W - Largura da seção estreita     | 13             |
| L - Comprimento da seção estreita | 57             |
| WO - Largura total                | 19             |
| LO - Comprimento total            | 165            |
| G - Comprimento de calibração     | 50             |
| D - Distância entre pinças        | 115            |
| R - Raio do contorno              | 76             |
| T - Espessura                     | 3.2            |

Antes da realização dos ensaios, todas as amostras foram pesadas e tiveram as suas medidas conferidas. Além disso, elas passaram por um processo de secagem de 4 horas em uma estufa de 80°C. Transcorrido o tempo descrito, as amostras foram retiradas da estufa e foram colocadas em um recipiente vedado. No dia do ensaio, as amostras foram marcadas para garantir, que as garras do equipamento fossem colocadas sempre no mesmo local nas amostras.

É válido apontar, que todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições de temperatura ambiente e umidade no Laboratório de Materiais da Faculdade do Gama. Para tal ensaio foi utilizado o equipamento Instron 8801, que é um instrumento com um funcionamento hidráulico, performando ensaios mecânicos, estáticos e dinâmicos. A velocidade do teste foi definida em 1,2 mm/min. Extensômetros foram acoplados na seção central dos CPs, de modo a mensurar as variações das dimensões. Os ensaios foram realizados com base nas normas ASTM d638 (ASTM, 2014).

### 5.2.5 Processo de Fabricação dos Filamentos

Para iniciar o processo de fabricação dos filamentos, foram separados os Pellets de ABS, denominados Amostras 1 à 6. As Amostras 2-4 contém variações de pó de alumínio, bem como as Amostras 5-6 contém variações de nanopartículas de titânio, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Configuração das Amostras. Fonte: Autor.

| Corpos de prova | ABS  | % Alumínio | % Titânio |
|-----------------|------|------------|-----------|
| 1               | 100g | -          | -         |
| 2               | 100g | 2,5        | -         |
| 3               | 100g | 5          | -         |
| 4               | 50g  | 7,5        | -         |
| 5               | 100g | -          | 2,5       |
| 6               | 100g | -          | 5         |

A quantidade de cada grupo de amostra, foi determinada levando em consideração a limitação das nanopartículas de alumínio e titânio que se tinha a disposição para esta pesquisa. Além disso, foi preciso levar em consideração a quantidade mínima de filamentos necessários para se realizar a caracterização dos polímeros através de ensaios mecânicos, e desenvolver um estudo que foca na influência dos particulados nas propriedades de memória de forma.

Após serem separadas, as amostras foram misturadas ao particulado nanométrico com os pellets. Para isso, realizou-se uma mistura mecânica seca, com o auxílio de um moinho de esferas de aço, sendo ele um dispositivo que, por meio de rotação, promove sucessivas colisões de esferas, proporcionando a miscibilidade dos materiais. Com isso, os Pellets de ABS e os aditivos, foram colocados dentro de um recipiente fechado, sendo inseridos no moinho, juntamente com 1 kg de esferas de aço. Como o espaço do recipiente precisou ser reduzido para que o processo



da mistura mecânica fosse mais eficiente, o recipiente que continha as amostras foi menor que o moinho em si, sendo necessário preencher os espaços excedentes. Para esse preenchimento, utilizou-se lã de rocha, pois, é um excelente isolante térmico, além de ser quimicamente neutro, o que evitaria qualquer acidente por composto pirotécnico caso os aditivos vazassem dos recipientes durante o processo de rotação do moinho. Os materiais ficaram em rotação no moinho por 36 horas. Esse tempo de rotação, foi determinado através de testes empíricos no qual, a cada 6 horas verificava-se como estava ocorrendo o processo de mistura. Após os Pellets serem misturados, iniciou-se o processo de extrusão do material usando a Filmaq3D. As temperaturas de extrusão das amostras estão dispostas na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Temperaturas de Extrusão das Amostras. Fonte: Autor.

|           | Temperatura °C |
|-----------|----------------|
| Amostra 1 | 220            |
| Amostra 2 | 210            |
| Amostra 3 | 205            |
| Amostra 4 | 195            |
| Amostra 5 | 203            |
| Amostra 6 | 197            |

As temperaturas foram obtidas, através dos parâmetros de extrusão indicados no equipamento, que no caso do filamento ABS é de 220º graus, sendo regulado conforme a viscosidade do material. O manual do equipamento, indica também, a redução ou o aumento de temperatura até a obtenção do diâmetro do filamento mais consiste e preciso. Para a fabricação de novos materiais, utilizou-se o equipamento da Filmaq3D, que é uma fabricante nacional de extrusoras e equipamentos para a fabricação de filamento. O equipamento é composto por 3 máquinas: o extrusor que tem a capacidade de alcançar até 400º °C com bico de 1,75mm, a segunda parte do equipamento é o tracionador com sistema de resfriamento composto por 6 ventoinhas que tem sua velocidade controlada e a última parte do equipamento é o sistema de bobinamento do filamento, que também tem sua velocidade controlada. Na figura 5.6 pode ser visto como era composto o sistema de fabricação de filamento. De acordo com o fabricante, a taxa de extrusão é de 2,2 m/min ou 350 g de filamento por hora e a velocidade da rosca de alimentação é de 0 a 30 RPM. Para fabricação do filamento utilizou-se os pellets de ABS Virgem e PLA Virgem da fabricante 3DLAB, e utilizou-se como aditivos nano partículas de alumínio, nano partículas de titânio.



Figura 5.6 – Sistema de Fabricação de Filamento Fonte: Autor.

## 6 Resultados e Discussões

### 6.0.1 Pellets Aditivados

Após, os ciclos de rotação no moinho das esferas, é possível notar que os Pellets possuem pequenas marcas de deformações, que foram geradas pelos atritos das esferas com material. Percebe-se, que isso indica que o material foi misturado, não apenas superficialmente, como também, é possível notar que houve uma boa aderência dos aditivos aos pellets de ABS, fato este que pode ser observado na Figura 6.1. Além disso, é importante destacar, que alcançar uma boa aderência do aditivo é um fator primordial e que afeta diretamente na fabricação via Impressão 4D, uma vez que caso não ocorra uma distribuição homogênea do aditivo no filamento, regiões saturadas de aditivo irão aparecer nas peças final. Por conseguinte, será gerado pontos de fragilidade, nos quais a peça perderá a sua propriedade de memória de forma.



Figura 6.1 – Pellets de ABS com Pó de Titânio. Fonte: Autora.

### 6.0.2 Diâmetro dos Filamentos

É importante destacar, que a produção de filamentos de materiais aditivados, demonstrou ser bastante complexa, tendo como maior dificuldade o controle do diâmetro do filamento. Devido a este fato, ao se tentar implementar os parâmetros recomendados pelo fabricante para o ABS, notou-se que a temperatura era mais alta do que necessário. Isso pode ter acontecido, pela influência dos pós de metais utilizados. Para que essa situação fosse contornada, percebeu-se que era necessário abaixar a temperatura da extrusora para que a temperatura recomendada para o ABS puro fosse menor. A partir disso, foi possível alcançar um filamento que apresentou uma consistência melhor durante o processo de extrusão. Além disso, foi preciso também ajustar a velocidade para atingir o diâmetro em torno de  $1,75mm \pm 0,05mm$ , que é o diâmetro ideal

para a impressão 3D via FDM Zou2016. A partir disso, obteve-se um filamento com diâmetros consistentes e que apresentou uma variação no seu diâmetro aceitável para trabalhar com os mais diversos modelos de impressoras 3D. É importante ressaltar, que ficou evidente durante o processo de fabricação a influência da razão entre a velocidade do tracionador e a velocidade de extrusão no efetivo controle do diâmetro do material. Com isso, quanto maior a razão, maior a uniformização do filamento, implicando em uma variação de diâmetro mais baixa.

É fulcral, destacar que a precisão no diâmetro do filamento demonstrou ser um parâmetro bastante influenciador no processo de fabricação das peças produzidas via Impressão 4D, de modo que, a variação do diâmetro gera deformidades nas peças, por exemplo zonas vazias. Diante disso, nota-se que este fator é bastante crítico, tendo em vista que essa tecnologia depende de um jeito fundamental da forma em que o material é distribuído na geometria.

### 6.0.3 Análise morfológica por microscopia confocal

Através da análise de Microscopia Confocal, foi possível verificar a distribuição das nano partículas de alumínio e titânio na matriz de ABS. Pelas figuras 6.2 e 6.3 é possível verificar como os diferentes valores de exposição, em particular a luminosidade (em uma escala de 0 a 10000), permitem identificar diferentes características, destacando, por exemplo, os grãos de pó metálico em primeiro plano, e aqueles em maior profundidade, dispersos na matriz polimérica. Diferentes valores de luminosidade, combinados com diferentes ampliações, permitem a verificação da estrutura do depósito impresso em FDM, destacando as principais direções de deposição do filamento derretido. O pó metálico aparece bem distribuído na matriz polimérica, mas não de forma homogênea. Também é notável a formação de aglomerados maiores, provavelmente devido à fase de mistura sólida dos pós com os pellets. Isto mostra a necessidade de melhorar o processo de preparação da mistura sólida inicial, preliminar para a extrusão do filamento.

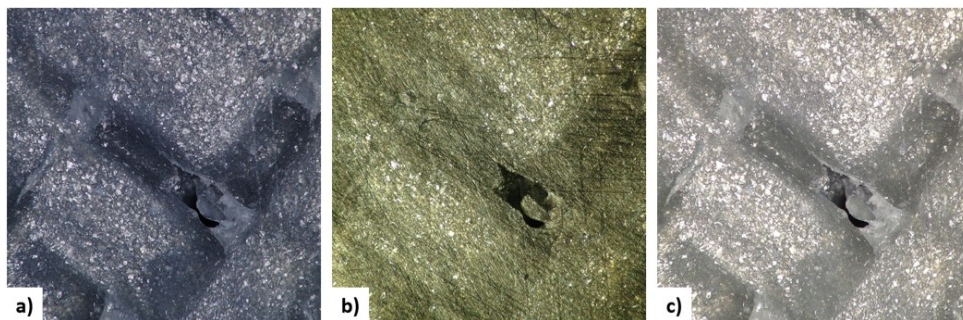


Figura 6.2 – Microscopia confocal: magnificação 10x do corpo de prova de ABS com alumínio 5%. valor de luminosidade fixada de: a) 0; b) 10000; c) 9800.

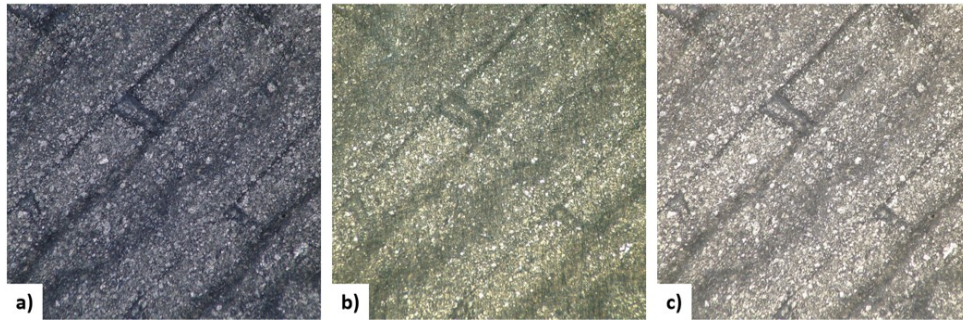


Figura 6.3 – Microscopia confocal: magnificação 40x do corpo de prova de ABS com alumínio 5%. valor de luminosidade fixada de: a) 0; b) 10000; c) 9800.

#### 6.0.4 Termogravimetria (TGA/DSC)

A análise Termogravimétrica (TGA), foi utilizada para caracterizar a estabilidade térmica das amostras, a fim de obter a taxa de decomposição de cada filamento produzido. Ademais, a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), foi empregada para avaliar a variação de entalpia das amostras. A partir das curvas DSC, foi possível extrair as temperaturas características do material, além da  $T_g$  e da  $T_m$ , também as temperaturas de Cristalização ( $T_c$ ) e de Degradação ( $T_d$ ) dispostas na Tabela 6.1. Na tabela são mostrados os valores extraídos das curvas experimentais, para as quatro temperaturas características, e a variação percentual ( $\Delta\%$ ) calculada em relação ao valor do primeiro PC, o de material puro (i.e., não-aditivado), usado como referência. Ao analisar a tabela 6.1, é possível verificar que a deposição de aditivos particulados tem influências nas propriedades térmicas. Apesar, da variação ser muito pequena, isso influencia diretamente na metodologia de programação e ativação das peças, de modo que ao aplicar a programação desenvolvida para o ABS puro, não geraria o mesmo efeito no ABS aditivado com alumínio, tendo em vista que a temperatura de ativação é maior. Com os dados apresentados, é possível aplicar as metodologias de programação que tentam influenciar na cristalinidade do polímero, tendo em vista que a temperatura em que o material é posto para cristalizar/solidificar, influenciará qual etapa da cristalização será favorecida. Caso a temperatura esteja próxima à  $T_m$ , favoreceremos o crescimento do cristal. Isso, porque o pequeno resfriamento dá origem a poucos núcleos, que crescerão e demorarão a se tocar, produzindo esferólitos grandes. Somado a isso, quanto maior a temperatura, menor a viscosidade do fundido, sendo maior a mobilidade das cadeias, o que resulta em uma maior cristalinidade. Caso a temperatura esteja mais próxima à  $T_g$ , favoreceremos a nucleação. Isso, porque o grande resfriamento promove a criação de núcleos e, assim, os esferólitos estarão mais próximos e logo se tocarão, dando origem a um maior número de esferólitos, porém pequenos.

A Tabela 6.2. resume os resultados da análise estatística realizada na amostra (embora pequena) de 6 medições, das 4 temperaturas características.

Analisando os dados apresentados nas tabelas 6.2 e 6.1, nota-se dois resultados interessantes que quando são complementados com uma análise dos gráficos, é possível levantar

Tabela 6.1 – Temperaturas obtidas através das curvas de DSC

| CP  | Tg      | $\Delta\%$ | Tc      | $\Delta\%$ | Tm      | $\Delta\%$ | Td      | $\Delta\%$ |
|-----|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
| I   | 101.52% | -          | 194.12% | -          | 200.33% | -          | 387.56% | -          |
| II  | 105.28% | 103.70%    | 191.01% | 98.40%     | 200.16% | 99.90%     | 387.02% | 99.90%     |
| III | 106.12% | 104.50%    | 189.74% | 97.70%     | 200.13% | 99.9%      | 386.96% | 99.80%     |
| IV  | 107.74% | 106.10%    | 190.66% | 98.20%     | 200.20% | 99.90%     | 388.23% | 100.20%    |
| V   | 104.70% | 103.10%    | 189.57% | 97.70%     | 200.31% | 100.00%    | 384.66% | 99.30%     |
| VI  | 103.84% | 102.30%    | 194.67% | 100.30%    | 200.44% | 100.10%    | 382.62% | 98.70%     |

algumas hipóteses sobre a influência deste tipo de aditivo nas propriedades dos materiais. Sendo assim, o primeiro resultado é que o aditivo apresenta uma influência nas propriedades térmicas, tanto na Tg, quanto na Tc, segundo o resultado é que o aditivo não apresentou influências tão significativas na Tm. Já analisando esses dados junto das curvas dos Gráfico de Ensaio DSC/TGA, percebe-se que apesar das curvas indicar uma possível mudança na estrutura cristalina do material, o que ocorre é que o aditivo metálico está absorvendo mais energia, modificando assim, a entalpia total do sistema. É possível fazer essa hipótese, pois, caso haja uma mudança de cristalinidade do material, essa mudança seria refletida em uma mudança significativa na Tm, porém, não é isso que foi observado nos ensaios térmicos.

Tabela 6.2 – Análise estatística dos resultados da DSC

|                            | Tg      | Tc      | Tm      | Td      |                 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| Média                      | 104.867 | 191.628 | 200.262 | 386.175 | °C              |
| Erro padrão                | 0.862   | 0.905   | 0.048   | 0.864   | °C              |
| Mediana                    | 104.990 | 190.835 | 200.255 | 386.990 | °C              |
| Desvio padrão              | 2.111   | 2.217   | 0.119   | 2.117   | °C              |
| Variância                  | 4.456   | 4.917   | 0.014   | 4.481   | °C <sup>2</sup> |
| Mínimo                     | 101.520 | 189.570 | 200.130 | 382.620 | °C              |
| Máximo                     | 107.740 | 194.670 | 200.440 | 388.230 | °C              |
| Contagem                   | 6       | 6       | 6       | 6       |                 |
| Nível de Confiança (95,0%) | 2.215   | 2.327   | 0.124   | 2.221   |                 |

As figuras de A.7 a A.12, representam os gráficos obtidos nos ensaios térmicos. Os gráficos, contém três curvas: a de cor verde, que apresenta a Curva Termogravimétrica (TGA, Thermal Gravimetric Analysis), a de cor azul que apresenta a Curva de Derivada Termogravimétrica (DTG, Derivative Thermal Gravimetric) e a de cor vermelha que apresenta a curva Calorimetria de varredura Diferencial (DSC, Differential Scanning Calorimetry). Com isso, observou-se, que nas curvas TGA, a estabilidade térmica do ABS puro e dos filamentos produzidos foram muito semelhantes, em torno de 365°C. Para as curvas DTG, todas as amostras apresentaram somente um pico, com o ABS em torno de 420°C, já com as amostras de ABS-alumínio em torno de 440°C e as amostras de ABS-titânio também em torno de 420°C. Ao analisar os gráficos das figuras, 6.4 a 6.5 no gráfico 6.4 a curva de cor cinza escuro, representa os CPs de ABS Puro Comercial. Já as curvas de cor azul, representa os CPs de ABS Puro produzido em laboratório,

a cor laranja e a verde representam os CPs de ABS aditivado com alumínio 5% e ABS com Alumínio 7,5%, respectivamente. Já no gráfico, 6.5 a curva de cor cinza escuro, representa o CPs ABS puro comercial, já as curvas de cores amarelo e azul representam os CPs ABS com aditivo de titânio 5% e de ABS com aditivo de titânio 7,5% respectivamente.

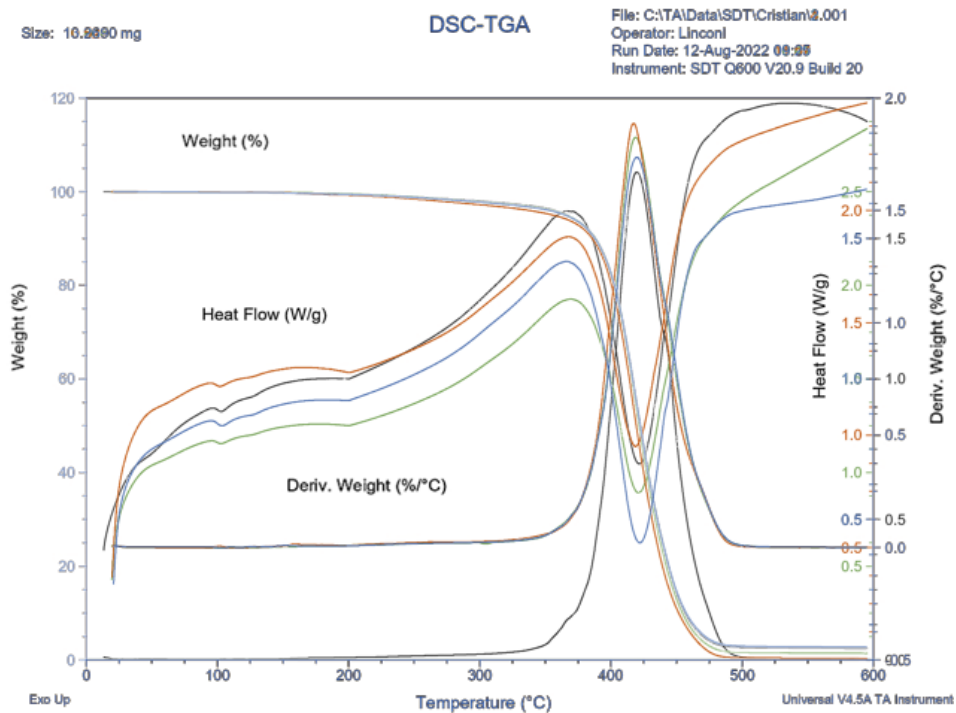


Figura 6.4 – Curvas de TGA e DSC dos CPs de ABS Com Alumínio

No gráfico 6.4, nota-se que o aditivo de alumínio influenciou na resistência térmica do material, tendo um comportamento linear dentro das diferentes porcentagens de aditivo do material. O material aditivado com 7,5% de alumínio, foi o material que apresentou maior resistência térmica. Por outro lado, o material que apresentou a pior resistência térmica foi o ABS Comercial Puro. Além disso, é possível notar também, que o aditivo teve influência no processo de cristalização do material. Quando se analisa, a liberação de calor latente através das curvas do DSC, nota-se que o material com maior percentual de aditivo apresentou um pico exotérmico bem definido na curva de DSC. Com isso, pode ser explicado pela influência que o nano-particulado exerce sobre a taxa de resfriamento no processo de cristalização do material. Quando analisa-se o pico endotérmico dos material, é visível que o ABS Comercial começa a degradar a uma temperatura um pouco maior que os demais, porém, sua curva de degradação é mais rápida que dos materiais aditivados. Contudo, o ABS Puro fabricado em laboratório, foi o que apresentou um pico endotérmico mais acentuado, e diferente do ABS Comercial que apresentou um pico menor e uma curva mais acentuada em uma estreita faixa de temperatura. Deste modo, é possível verificar que o processo de fabricação também é um fator influente na formação de regiões cristalinas no material. No gráfico 6.5, nota-se que o material aditivado com titânio, não se comportou da mesma maneira que o alumínio, no qual era esperado que o filamento com

aditivo de 7,5% apresenta-se a maior resistência térmica, porém o que ocorreu que, o material que apresentou a maior resistência térmica foi o de 5%, entretanto esse resultado já era esperado, tendo em vista que o filamento com 7,5% de titânio, apresentou grandes deformações geradas por falha de extrusão e problema de aglutinação excessiva do pó metálico, durante o processo de fabricação. Isso acabou se refletindo em todos os ensaios realizados com esse material. Porém os demais Materiais se comportaram de forma similar ao material aditivado com alumínio. Com esses resultados, foi possível entender as mudanças térmicas das amostras, assim como os limites de temperatura aos quais podem ser submetidos os filamentos produzidos sem que se comprometam as suas propriedades. Logo, o conhecimento das propriedades térmicas também possibilita uma melhora nos processos de impressão, de programação e de ativação, das peças fabricadas via Impressão 4D.

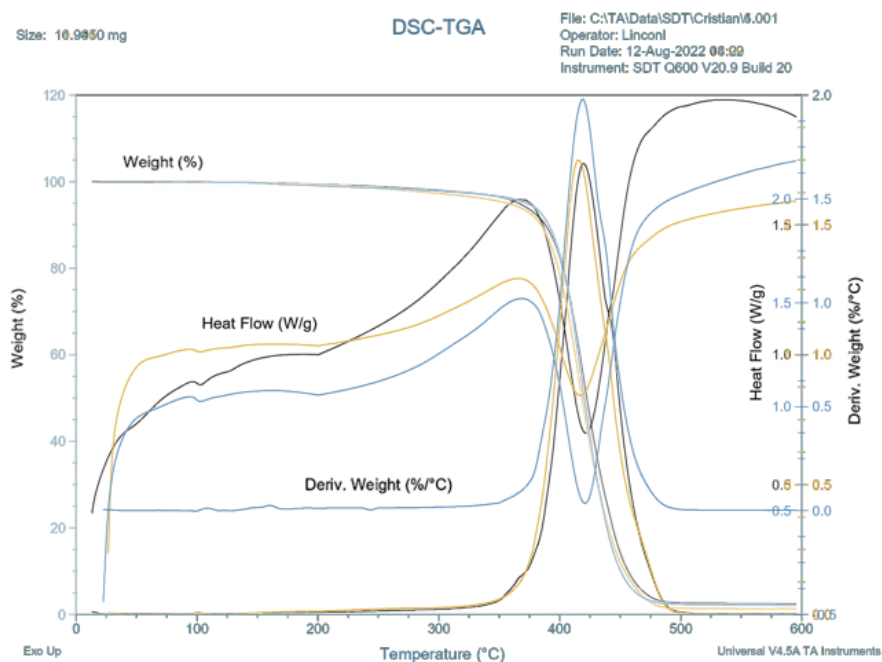


Figura 6.5 – Curvas de TGA e DSC dos CPs de Abs com Titânio

Com os resultados apresentados nos ensaios térmicos, é possível verificar que aditivar os polímeros com nano particulado de metal, gera influências térmicas significativas, e deve ser levado em consideração, essa influência na hora de desenvolver um polímero aditivado com nano particulado de metal que apresente a propriedade de memória de forma, ativada termicamente, pois os particulados podem apresentar influências negativas nos processos de programação.

### 6.0.5 Ensaio de tração

O ensaio de tração, foi realizado para obter as propriedades de resistência à tração e o módulo de elasticidade de cada amostra produzida.



As Figuras 6.6 apresentam a configuração dos CPs com os extensômetros:

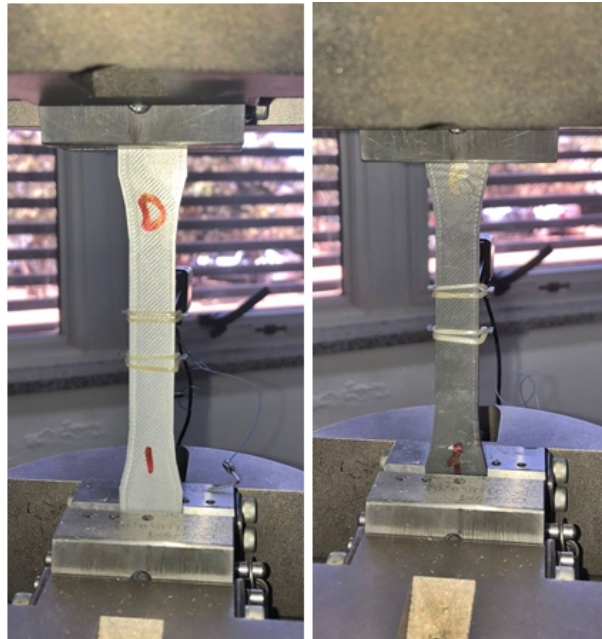


Figura 6.6 – Configuração dos CPS de ABS-alumínio e ABS-titânio, respectivamente, na máquina de tração. Fonte: Autor.

O valor fornecido pelo fabricante 3D Lab, para resistência à tração dos CPs impressos em filamento comercial de ABS puro, segundo a norma ASTM D638, é de 29 MPa. Para o módulo de elasticidade (E), o valor fornecido é de 2200 MPa. No ensaio realizado, neste trabalho com o filamento comercial, obteve-se uma diferença de e 1,35% para E modulo de elasticidade. Para os demais filamentos fabricados, obteve-se um resultado dentro de uma margem aceitável, de acordo com a Tabela 6.3. Deste modo os valores obtidos, demonstram que o ensaio foi bem elaborado e apresenta dados consistentes. Além disso, quando analisamos apenas os filamentos fabricados nessa pesquisa, é possível notar uma melhora significativa nas propriedades mecânicas do filamento aditivado, com 5% de alumínio, chegando a uma melhora de 33,78% no módulo de elasticidade. Apesar, dos aditivos estudados nessa pesquisa não terem gerado efeitos positivos e nem negativos, em relação as propriedades de memória de forma do polímero ABS, o mesmo se demonstra bastante promissor na implementação em materiais que já apresentam as propriedades de memória de forma, como um bom aditivo para aprimorar as propriedades mecânicas.

Tabela 6.3 – Comparação da  $\sigma_m$  e  $E$  entre o ABS Comercial e os Filamentos Fabricados.

|                  | Tensão Média de Ruptura $\sigma_m$ (MPa) | Módulo de Elasticidade Médio $E$ (GPa) | Diferencial (%) $\Delta E$ - ABS Comercial |
|------------------|--|--|--|
| ABS Comercial    | 22                                       | 2,17 $\pm$ 0, 10                       | -  |
| Corpo de prova 1 | 18                                       | 1,89 $\pm$ 0, 25                       | -12,81                                     |
| Corpo de prova 2 | 11                                       | 1,65 $\pm$ 0, 31                       | -24,11                                     |
| Corpo de prova 3 | 26                                       | 2,53 $\pm$ 0, 18                       | 16,63                                      |
| Corpo de prova 4 | 23                                       | 1,03 $\pm$ 0, 41                       | -52,68                                     |
| Corpo de prova 5 | 25                                       | 2,21 $\pm$ 0, 26                       | 1,46                                       |

Tabela 6.4 – Comparação da  $\sigma_m$  e  $E$  entre ABS Puro Fabricado e os Filamentos Aditivados.

|                  | Tensão de Ruptura $\sigma_m$ (MPa) | Módulo de Elasticidade Médio $E$ (GPa) | Diferencial (%) $\Delta E$ - Corpo de prova I |
|------------------|------------------------------------|--|---|
| Corpo de prova 1 | 18                                 | 1,89 $\pm$ 0, 25                       | -   |
| Corpo de prova 2 | 11                                 | 1,65 $\pm$ 0, 31                       | -12,96  |
| Corpo de prova 3 | 26                                 | 2,53 $\pm$ 0, 18                       | 33,78   |
| Corpo de prova 4 | 23                                 | 1,03 $\pm$ 0, 41                       | -45,73  |
| Corpo de prova 5 | 25                                 | 2,21 $\pm$ 0, 26                       | 16,38   |

Analisando os resultados mostrados acima, nota-se que os filamentos fabricados com 5% de aditivo (CPss 3 e 5) obtiveram os melhores resultados, tanto para o filamento aditivado com alumínio, quanto para o filamento aditivado com titânio. No entanto, percebe-se que o filamento fabricado com 7,5% de aditivo de alumínio não teve um resultado satisfatório. Isso pode ter ocorrido, devido aos erros associados ao processo de fabricação do filamento, uma vez que esse filamento foi o que demonstrou maior dificuldade de fabricação, sendo o equipamento que tinha-se a disposição inadequado para a produção do filamento com esse teor de reforço particulado. Além disto, o mesmo gerou ranhuras no bico extrusor e no ponto de acúmulo de metal, que gerou um estreitamento do diâmetro interno do bico. Deste modo, o filamento não apresentou uma qualidade satisfatória, refletindo diretamente no resultado obtido na Impressão

3d, no qual a peças desse lote apresentaram uma variação de massa significativa e de-laminação pro sub-extrusão nas camadas mais externas dos CPs.

As figuras de A.1 a A.6, permite que seja analisado as curvas médias obtidas nos ensaios destrutivo de tração. Com isso, pode-se observar que o filamento com alumínio de 5%, é o material que demonstrou maior estabilidade mecânica, apresentando uma curva característica condizente com a literatura para o polímero ABS. Ademais, é possível notar que na curva dos filamentos de alumínio 2,5% e 7,5%, que o gráfico apresenta um possível deslizamento das amostras durante o ensaio e ponto de falha do material precoce.

## 6.1 Impressão 4D

No processo de fabricação dos CPs de Impressão 4D, encontrou-se dificuldades apenas na fabricação dos CPs feitos com o filamento Nylon da Up3d. Os filamentos de Nylon da UP3d, apresentou empenamento, separação de camada e preenchimento fraco, além de, apresentar imprecisão dimensional. Logo, foi inviável gerar peças que atende-se uma qualidade mínima para o desenvolvimento dos próximos teste. Devido a este fato, as peças fabricadas desse material foram descartadas. É vital, apontar que dos materiais estudados nesta pesquisa, apenas três apresentaram o efeito de memória de forma, sendo eles o PLA, TPu e o Nylon, com a observação de que o Nylon apresentou uma resposta ligeiramente melhor do que o PLA. Esse fato, pode ser visualizado na tabela 6.5, no qual consta a velocidade de cada material em resposta a diferentes temperaturas de ativação. Já na tabela 6.6, quando compara-se os CPss programados à 66 °C, mas com processos de resfriamento diferentes, é possível notar um refreamento controlado e lento, apresentando uma resposta 42% mais rápida do material quando ativado, do que o com o resfriamento mais rápido.

Ao analisar os resultados apresentados na tabela 6.5, é possível verificar a influência que os aditivo nanoparticulados exercem sobre os materiais com propriedades de memória de forma. Com isso, quando comparamos o tempo de resposta apresentado tanto pelo PLA sem aditivo, quanto o PLA com aditivo de Alumínio, programados a 50°C, o Pla com aditivo apresentou uma resposta de 4,7% mais lenta, já quando programados a 40°C, a resposta foi de 10,16% mais lento. Entretanto, quando analisamos os comportamentos térmicos observados nos Ensaio de TGA/DSC, percebemos que a resposta mais lenta já era algo esperado, pois, o nanoparticulado exerce influência nas propriedades térmicas do material, deixando o mesmo termicamente mais resistentes. Isso fica evidente, quando olhamos que a diferença na velocidade de resposta reduz conforme o material aditivado é programado a temperaturas mais altas.

Tabela 6.5 – Comparação da Resposta da Memória de Forma do Material a Orientação de Impressão Diferente.

| Material  | T de programação (°C) | Orientação -45/45 | Orientação 0/90 |
|-----------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| Pla       | 40                    | 59 s              | 65 s            |
| Nylon     | 40                    | 37 s              | 58 s            |
| Pla       | 50                    | 48 s              | 55 s            |
| Nylon     | 50                    | 37 s              | 48 s            |
| Pla       | 60                    | 39 s              | 45 s            |
| Nylon     | 60                    | 29 s              | 46 s            |
| Pla       | 66                    | 25 s              | 38 s            |
| Nylon     | 66                    | 19 s              | 36 s            |
| Pla       | 70                    | 40 s              | -               |
| Nylon     | 70                    | 34 s              | 43 s            |
| Pla       | 80                    | 55 s              | -               |
| Pla+Al 5% | 50                    | 50 s              | 58              |
| Pla+Al 5% | 40                    | 65 s              | 68              |
| Nylon     | 80                    | 37 s              | 58 s            |
| TPU       | 66                    | 9 s               | 20 s            |

A partir disso, o material que apresentou a melhor resposta foi o TPU, quando programado à 66°C, realizando o resfriamento de forma lenta. No entanto, foi visível que a orientação de impressão gerou uma diferença significativa na resposta do material, tendo esse fato visto por outros autores como (GLADMAN E.A. MATSUMOTO, 2016), que determinaram várias curvaturas para a Flor Biomimética, em hidro-estímulo, imprimindo padrões discretos nas pétalas usando uma tinta de hidrogel (fibras de celulose enxertadas em uma matriz acrílica). Os autores, demonstraram que juntamente com a velocidade de impressão, a orientação das estruturas impressas também influenciam na curvatura. Ademais, foi testemunhado também, que a anisotropia na orientação junto com as camadas contíguas (0°/90°, -45°/45° ou padrão) relacionam-se a estruturas do tipo hélice diferencial, rolamento, flexão, espiral ou torção.

Na figura 6.7, temos a estrutura desenvolvida neste projeto. A figura com título (A), é a estrutura impressa sem ter passado pelo processo de programação. Já na figura (B), temos a estrutura após ser programada. Na estrutura (C), é possível ver a estrutura após ser ativada. Comparando a figura (A) com a figura (C), é possível notar que a estrutura retorna praticamente para sua geometria original.

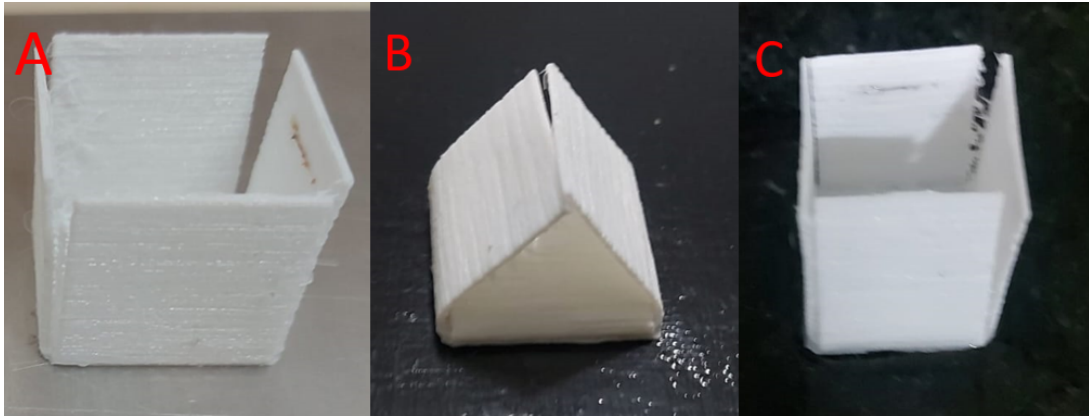


Figura 6.7 – Estrutura 4D, fabricada, antes, durante e apos ativação da propriedade de memoria de forma. Fonte: Autor.

Tabela 6.6 – Efeito do Polímero Aditivado nas Propriedades de Memória de Forma.

| Material | T de programação<br>(min) | Orientação<br>-45/45 | Orientação<br>0/90 |
|----------|---------------------------|----------------------|--------------------|
| Pla      | 120                       | 28 s                 | 35 s               |
| Nylon    | 120                       | 17 s                 | 35 s               |
| Pla      | 20                        | 49 s                 | 55 s               |
| Nylon    | 20                        | 33 s                 | 41 s               |

Concluiu-se que o ABS puro não apresentou propriedades de memória de forma. O ABS apresentou também, não sofrer nenhuma influência das nanopartículas nas propriedades de memória de forma. Desta maneira, aditiva o material com nano particulados de alumínio ou de titânio, não gera influência nas propriedade de memória de forma, e também não induz o mesmo a ter as propriedades de memória de forma. Na literatura existe relatos que o ABS apresenta uma ligeira recuperação de memória de forma, porem os resultados apresentado pela autora dias2020impressao, também demostrou que o ABS não apresentou resposta significativas, nem propriedade de memória de forma.

Quando analisa-se o efeito dos parâmetros de impressão nas propriedades de memória de forma, o PLA, quando impresso com a orientação de 0 graus a 90 graus, na temperatura de 70°C não apresentou mais propriedades de memória de forma. Esse efeito, não foi visto quando aplicado no Nylon. Além disso, a perca das propriedades de memória de forma só ocorra nas temperatura acima de 70 graus no PLA. Porém, nas temperaturas inferiores a 70 graus, o material demorou mais a voltar para a sua forma permanente. Ambos os materiais, apresentaram uma melhor recuperação quando fabricados com a orientação de impressão de -45 a 45 graus.

O autor ([GLADMAN E.A. MATSUMOTO, 2016](#)), relata em seu trabalho que a orientação de impressão e a velocidade de impressão apresentam influências nas propriedades de memória de forma. Contudo, essa influência não gerou a perca das propriedades de memória de

forma do material, mas sim, ocasionou uma torção no material, quando impresso na orientação de -45/45. Esse mesmo efeito, foi visto nos CPs ensaiados nesta pesquisa.

A autora (DIAS, 2020), apresenta em seus resultados, que o aumento da temperatura de programação, demonstrou uma melhora na resposta das propriedades de memória de forma do material. Isso se justifica, pela maior mobilidade molecular, gerando assim uma recuperação mais rápida. No entanto, quando analisamos os resultados obtidos nesta pesquisa, notou-se que isso ocorre, mas que a temperatura de programação superiores a 12% da Tg do material, acontece o inverso, pois o material apresenta uma resposta mais lenta ao estímulo. A autora (PEIXOTO, 2020), encontra em seus resultados que o aumento da temperatura de programação influencia na redução da velocidade de resposta do material ao estímulo. O fator mais importante no processo de fabricação 4D, é a etapa da programação. Nesta etapa, o material apresentou uma resposta mais rápida quando a programação foi executada a 66°C, e com o resfriamento de forma gradual e lenta, desse modo obteve-se uma melhora de 50% na velocidade de recuperação do material, demonstrando-se ser consistente tanto para o PLA quanto para o Nylon. No entanto, quando o material sofreu um processo de resfriamento forçado, retirando o mesmo da estufa para a temperatura ambiente em torno de 28°C, a resposta dos CPs foi mais lenta. Na programação, a temperatura de ativação e a forma que carga é aplicada no material, são pontos críticos do processo de fabricação através da impressão 4D. Quando, analisado temperaturas 33% menores que a Tg para ambos os materiais, os mesmos apresentaram uma recuperação mais lenta, chegando a não recuperar completamente sua forma inicial. Agora, quando analisado o outro extremo, com uma temperatura 33% acima da Tg, notou-se que as propriedades de memória de forma no PLA já não demonstravam ser efetivas, sendo a resposta 40% mais lenta, quando comparado com a resposta do material a temperaturas próximas da Tg. A redução na velocidade da resposta do material ao estímulo, já era esperado, sabendo-se que o material sujeito à uma temperatura menor de 60°C ( $T < T_g$ ), apresenta uma menor mobilidade molecular que resulta em uma recuperação mais lenta da forma.

Por fim, a autora (DIAS, 2020), chegou a resultados parecido em seu trabalho para as temperaturas de programação menores do que a Tg. Porém, o resultado apresentado pelo PLA a 70°C, demonstrou ser inesperado, entrando em contradição com o que é apresentado na literatura. Com isso, torna-se necessário uma investigação mais profunda sobre o assunto para compreender o que ocorreu, e porque isso ocorreu apenas com a orientação de impressão de 0/90 graus.

## 7 CONCLUSÕES

Dos materiais estudados, apenas o PLA, TPU e Nylon demonstraram ter propriedades de memória de forma. O PLA e Nylon apresentaram melhor resposta quando programados com a temperatura de 66°C . Porém, quando analisou-se o PLA com temperaturas a cima de 70°C com a orientação de impressão de 0 a 90 graus, o mesmo demonstrou perder a suas propriedades de memória de forma. O Nylon, como material de baixo custo, demonstrou ser bastante promissor para a fabricação de peças em 4D que podem ser utilizados no setor aeroespacial.

O filamento de TPU, foi o que apresentou a melhor resposta de memoria de forma de todos os materiais estudando, porem ainda é necessário realizar mais ensaios para compreender de maneira mais efetiva, suas propriedades, quais fatores influenciam na velocidade de resposta do mesmo, além de compreender a força que um atuador deste material conseguiria exercer.

Os filamentos produzidos de ABS com alumínio e titânio, demonstraram ter uma boa precisão dimensional e facilidade de impressão, porém, ambos os aditivos demonstraram não gerar nenhuma influência nas propriedades de memória de forma no material. Já os filamentos com 5% de aditivos, de ambos os particulados metálicos, demonstraram melhoras nas propriedades mecânicas, quando comparados com o ABS puro.

É notório, portanto, que o estudo da impressão 4D FDM e dos materiais é de extrema necessidade em virtude das aplicações que essa tecnologia gerar no setor aeroespacial. Um grande exemplo e a possibilidade da criação de atuadores mais leves e simples. No entanto, ainda existe um longo caminho de pesquisas no que envolve o desenvolvimento de componentes como este.

Percebe-se, que ainda existem muitas linhas de pesquisas que deveriam ser abordadas para um conhecimento mais aprofundado do tema, como a influência que os nanoparticulados tem nos materiais que demostram ter a capacidade de memória de forma, para a otimização dos materiais de modo que eles atendam os requisitos de projetos aeroespaciais. Além disto, é necessário o estudo do efeito de memória de forma de peças composta por múltiplos materiais, sendo um deles um material aditivado de nanopartículas com objetivo de te um material condutivo, a fim de imprimir um circuito resistivo na peça, de modo que este serviria como acionador das propriedades de memória de forma do material. Conclui-se, que a impressão 4D é uma tecnologia que tem potencial de trazer grandes inovações para setor Aeroespacial, mas que ainda necessita de um profundo estudo sobre ela.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

Para uma futura linha de pesquisa de Mestrado espera-se complementar o presente estudo com:

- Desenvolvimento de um atuador, fabricado via impressão 4D para uso em CubeSat;
- Estudo da influencia da combinação de múltiplos material na peças fabricada via impressão 4D;
- Desenvolvimento de um sistema para teste da força gerada pelo atuador fabricado via impressão 4D;
- Estudo da viabilidade de induzir efeito de memoria de forma em materiais que não tem essa propriedade através da criação de compósitos de polímeros reforçados com nanopartículas;



# Referências

- ABREU, C. E. M. et al. Indústria 4.0: Como as empresas estão utilizando a simulação para se preparar para o futuro. *Revista Ciência Exatas e Tecnológicas*, 2017. Citado na página 19.
- ABREU, S. A. C. Impressão 3d baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 89.
- ASTM. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2003. ASTM International. Citado na página 54.
- ASTM. ASTM D638-14, standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2014. DOI:10.1520/D0638-14. Citado na página 55.
- BAYLEY, G. V. D. G. H. A tissue-like printed material. *SCIENCE*, 2013. Citado na página 38.
- BERTUSSI, L. V. Viagem a marte: a colonização do planeta vermelho. *Revista Resgates*, p. 159. Citado na página 39.
- BÉLAND, S. *High Performance thermoplastic resins and their composites*. [S.l.]: Elsevier, 1990. 01 p. ISBN 0-81551-278-3. Citado na página 31.
- CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 7ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 577-615 p. ISBN 0-00697-011-7. Citado 3 vezes nas páginas 16, 32 e 33.
- CANEVAROLO JR., S. V. *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2ª. ed. [S.l.]: Artiber, 2006. v. 2. 21-32 p. ISBN 978-858809810-7. Citado 3 vezes nas páginas 16, 32 e 33.
- CAPPELLETTI, C.; BATTISTINI, S.; MALPHRUS, B. *Cubesat Handbook: From Mission Design to Operations*. [S.l.]: Academic Press, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 30.
- CARVALHO, L. R. *Fabricação e caracterização de estruturas sanduíche tipo colmeia com núcleo impresso por fusão e deposição de material termoplástico*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Brasília, 2019. Citado na página 16.
- CHOI O.-C. KWON, W. J. H. L. M.-W. M. J. 4d printing technology: a review. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2015. Citado na página 44.
- CHOWDHURY, J. et al. 4d printing of smart polymer nanocomposites: Integrating graphene and acrylate based shape memory polymers. *Polymers*, MDPI, v. 13, n. 21, p. 3660, 2021. Citado na página 18.
- CHU, H. et al. 4d printing: A review on recent progresses. *Micromachines*, v. 11, n. 9, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/11/9/796>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- CHU WENQUANG YANG, L. S. S. C. R. Y. W. L. H. Y. H.; LIU, L. 4d printing: A review on recent progresses. *Micromachines*, 2014. Citado na página 41.

- COSTA, L. C.; FERREIRA, C. da S. Influência da viscosidade elongacional do abs na impressão 3d por fdm. In: *XXVII CIC e XII CIDTI*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 25.
- COSTA, R. M. B. Atualização de uma impressora 3d fdm tipo delta. 2019. Citado na página 88.
- DIAS, A. M. L. *Impressão FFF de polímeros de memória de forma*. Tese (Doutorado), 2020. Citado 5 vezes nas páginas 7, 44, 45, 46 e 69.
- DUARTE, M. L. B. Evaluacion de polímeros inteligentes fotocurables con memoria de forma. In: *VII CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES*. [S.l.: s.n.]. p. 75. Citado na página 34.
- GE, Q. et al. Multimaterial 4d printing with tailorable shape memory polymers. *Scientific reports*, Springer, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2016. Citado na página 43.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado na página 24.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing: Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6. Citado na página 25.
- GIBSON, R. F. *Principles of composite material mechanics*. [S.l.]: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2016. Citado na página 24.
- GLADMAN E.A. MATSUMOTO, R. N. L. M. J. L. A. Biomimetic 4d printing. *Nat. Mater.*, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 40, 67 e 68.
- GONÇALVES, A. H. S.; NASCIMENTO-DIAS, B. L. Uma breve síntese sobre os conceitos de terraformação de marte e suas possibilidades. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218*, v. 2, n. 3, p. 51–56, 2021. Citado na página 39.
- GORNI, A. A. Introdução aos plásticos. *Revista plástico industrial*, v. 10, n. 09, 2003. Citado na página 35.
- HU, G. et al. Increasing dimension of structures by 4d printing shape memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 26, n. 12, p. 125023, 2017. Citado na página 43.
- JIMÉNEZ, A. G. *Materiales elastoméricos con memoria de forma*. Universidad Complutense de Madrid, 2017. Citado na página 34.
- KHOO Z.X.; TEOH, J. L. Y. C. C. Y. S. A. J. L. K. Y. W. 3d printing of smart materials: A review on recent progresses in 4d printing. *Virtual Phys. Prototyp*, 2015. Citado na página 37.
- KLOUDA L.; MIKOS, A. Thermoresponsive hydrogels in biomedical applications. *Eur. J. Pharm. Biopharm*, 2008. Citado na página 43.
- KUANG, X. et al. Advances in 4d printing: materials and applications. *Advanced Functional Materials*, Wiley Online Library, v. 29, n. 2, p. 1805290, 2019. Citado na página 18.
- LANGELAAR, M. Topology optimization of 3d self-supporting structures for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2016. Citado na página 29.

- LEE, J. et al. A review on 3d printed smart devices for 4d printing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Springer, v. 4, n. 3, p. 373–383, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 41.
- LEIST S.K.; ZHOU, J. .current status of 4d printing technology and the potential of light-reactive smart materials as 4d printable material. . *Virtual Phys. Prototyp*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 43.
- LENDLEIN, A. Elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications. *Biodegradable*, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 17, 33, 39 e 44.
- LISBOA, G. Estudo e desenvolvimento de uma impressora 3d utilizando a placa eletrônica gen7v1. 2br2. UFMA, 2017. Citado na página 29.
- LIU, C.; QIN, H.; MATHER, P. Review of progress in shape-memory polymers. *Journal of materials chemistry*, Royal Society of Chemistry, v. 17, n. 16, p. 1543–1558, 2007. Citado na página 36.
- LIU Y.; BOYLES, J. G. J. D. M.d. self-folding of polymer sheets using local light absorption. *Soft Matter*, 2012. Citado na página 42.
- LU, B.; LI, D.; TIAN, X. Development trends in additive manufacturing and 3D printing. *Engineering*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. –89, 2015. ISSN 2095-8099. DOI:10.15302/J-ENG-2015012. Citado na página 31.
- MALMIERCA, M. et al. Polímeros con memoria de forma: Un nuevo horizonte para los elastómeros. *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, Asociación para el Fomento de la Ciencia y de la Técnica (FOCITEC), n. 671, p. 104–111, 2012. Citado na página 34.
- MARTIN C.A.; SANDLER, J. W. A. S. M. B. W. S. K. S. M. Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites. *Polymer*, 2005. Citado na página 43.
- MEHRPOUYA, M. et al. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Applied Sciences*, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.
- MIRIYEV A.; STACK, K. L. H. Soft material for soft actuators. *Nat. Commun*, 2017. Citado na página 43.
- MOMENI SEYED M.MEHDI HASSANI.N, X. L. . N. F. A review of 4d printing. *Elsiever*, 2017. Citado na página 37.
- MONTEIRO, M. T. F. A impressão 3d no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias. *PPGD-Universidade do estado de Minas Gerais. Brasil-MG*, 2015. Citado na página 23.
- PAYES, G. O. *Polímeros compuestos con memória de forma a base de PLA*. Dissertação (B.S. thesis) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2021. Citado na página 33.
- PEIXOTO, C. D. P. *Caracterização das propriedades de memória de forma de um poliuretano: influência de parâmetros críticos*. Tese (Doutorado), 2020. Citado na página 69.

PINTO, A. O. *Impressão 3D: aplicações médicas e farmacêuticas*. Tese (Doutorado), 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 90.

RAVIV D.; ZHAO, W. M. C. P. A. K. A. S. B. H. S. D. D. Z. M. O. C. e. a. Active printed materials for complex self-evolving deformations. *SCI*, 2014. Citado na página 37.

REICHENTAL, A. *Beam Me Up a Part, Scotty*. IndustryWeek, 2010. Entrevista concedida a Peter Alpern. Acessado em: 27 de Abril de 2019. Disponível em: <<https://www.industryweek.com/product-development/beam-me-part-scotty>>. Citado na página 23.

SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 23, 2018. Citado na página 16.

SANTOS, T. R. et al. The effects of printing parameters on mechanical properties of a rapidly manufactures mechanical ventilator. In: *CBEB*. Vitória, Brasil: [s.n.], 2020. Citado 4 vezes nas páginas 16, 23, 29 e 48.

SANTOS, T. R. et al. Active learning with practical engineering applications through the laicansat project. In: *Proceedings of the PAEE/ALE'2018, 10th International Symposium on Project Approaches in Engineering Education (PAEE) and 16th Active Learning in Engineering Education Workshop (ALE)*. Distrito Federal, Brasil: Project Approaches in Engineering Education (PEAA) / Active Learning in Engineering Education (ALE), 2018. Citado na página 31.

SANTOS, T. T. D. Desenvolvimento de filamento para impressão 3d fdm a partir de pet reciclado modificado. Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), 2020. Citado na página 26.

SANT'ANA, M. S.; GOMES, M. L. C.; JUNIOR, M. D. N. B. Analysis of the influence of the cure and post - cure process on fiberglass composites. *25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 2019. Citado na página 31.

SARTORI, A. *Análise dos Efeitos da Manufatura Aditiva na Cadeia de Suprimentos*. Dissertação (Mestrado Profissional) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Citado na página 16.

SIEMASZKO, M. et al. 3d printing cubesat parts with power and data transfer functionalities with two blends of peek. In: *IEEE. 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*. [S.l.], 2022. p. 1–9. Citado na página 16.

SOARES, E. Efeito dos teores de polietileno reticulado e agente compatibilizante nas propriedades mecânicas e térmicas de poliamida 6. Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2019. Citado na página 35.

TIBBITS C. MCKNELLY, C. O. D. D. S. H. S. 4d printing and universal transformation. *Archit.*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 43.

TIBBITS, S. The emergence of “4d printing”. *Archit.*, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 17, 37, 38, 39 e 42.

TIBBITS, S. . 4d printing: Multi-material shape change. *Archit.*, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 18, 37, 38 e 40.

ULTIMAKER. *Ultimaker Cura. release* 19 de Março de 2019. V. 4.0.0. Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>>. Citado na página 29.

VALENTE, R. L. Influência dos parâmetros de impressão 3d na resistência à flexão de corpos de prova impressos em ácido polilático (pla) utilizando modelagem por fusão e deposição (fdm). Universidade Federal de Santa Maria, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.

VALIM, F. C. F. et al. Nanocompósitos de poliuretano termoplástico com estruturas de carbono: estudo das propriedades elétricas e do efeito de memória de forma. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2021. Citado na página 36.

VERDONCK, J. et al. Development and qualification of a deployable radiator in the frame of the european horizon 2020 pegasus program. *48th International Conference on Environmental Systems, YEAR = 2018*,. Citado na página 18.

VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

ZHOU W.M. HUANG, S. K. X. W. H. L. J. F. H. C. Y. From 3d to 4d printing: approaches and typical applications. *J. Mech. Sci. Technol*, 2015. Citado na página 40.

ZHOU, Y. et al. From 3d to 4d printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Springer, v. 29, n. 10, p. 4281–4288, 2015. Citado na página 42.

# APÊNDICE A – Graficos

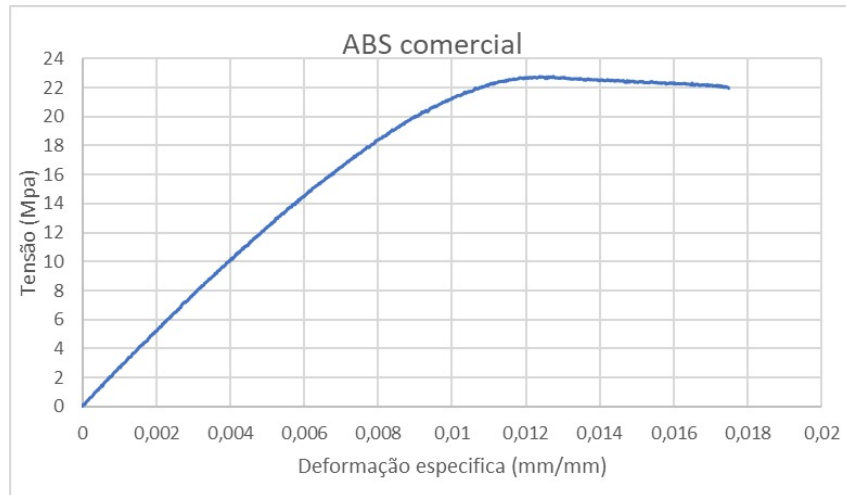


Figura A.1 – Gráfico Tensão x Deformação do ABS Comercial. Fonte:Autora.

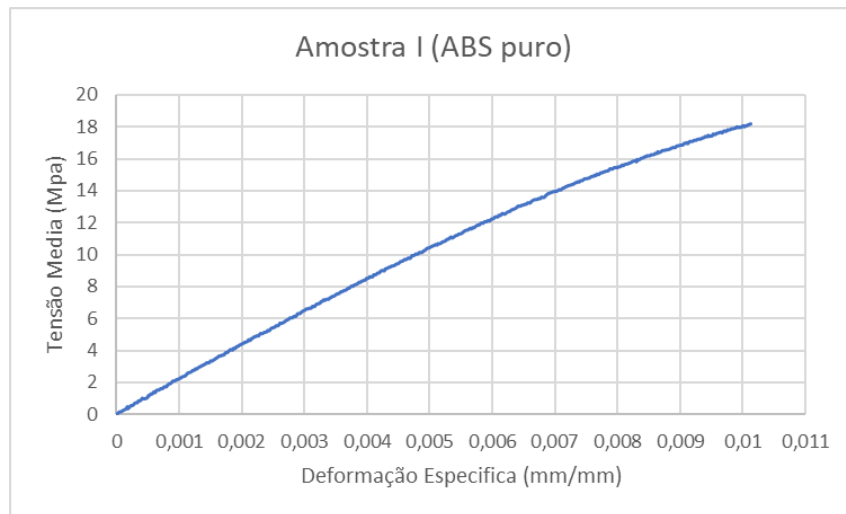


Figura A.2 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra I. Fonte:Autor.

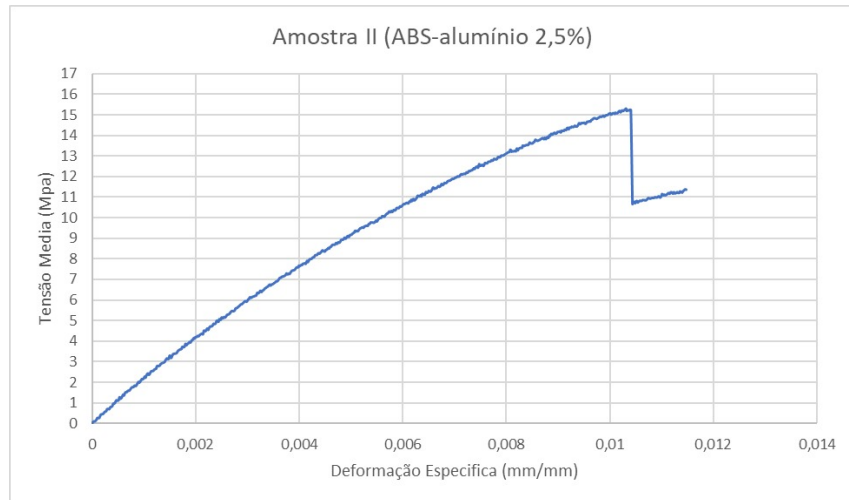


Figura A.3 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra I. Fonte:Autor.

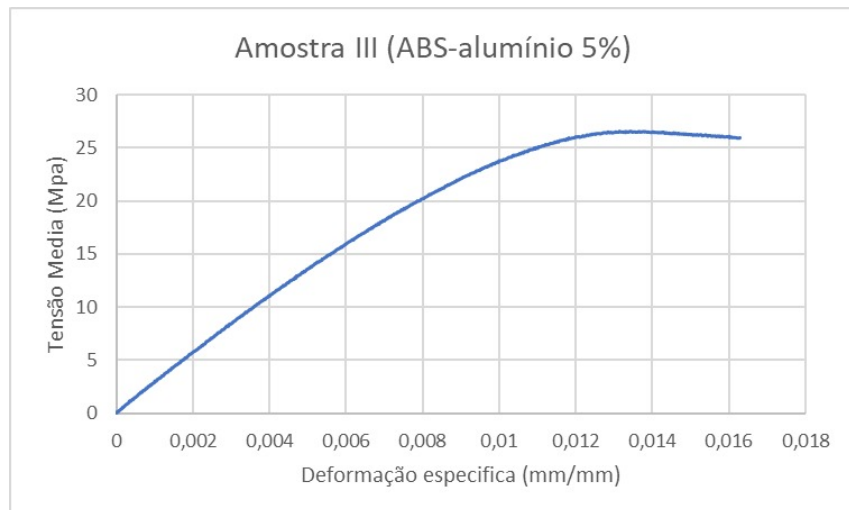


Figura A.4 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra III. Fonte:Autor.

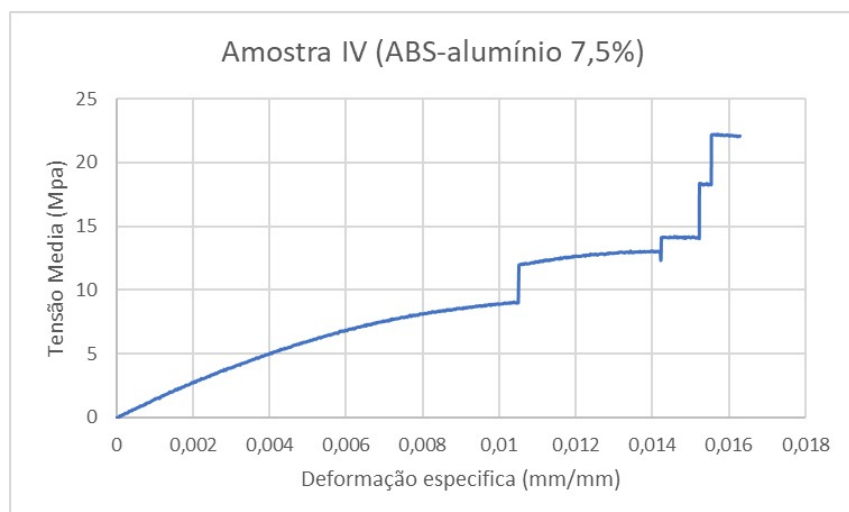


Figura A.5 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra IV. Fonte:Autor.

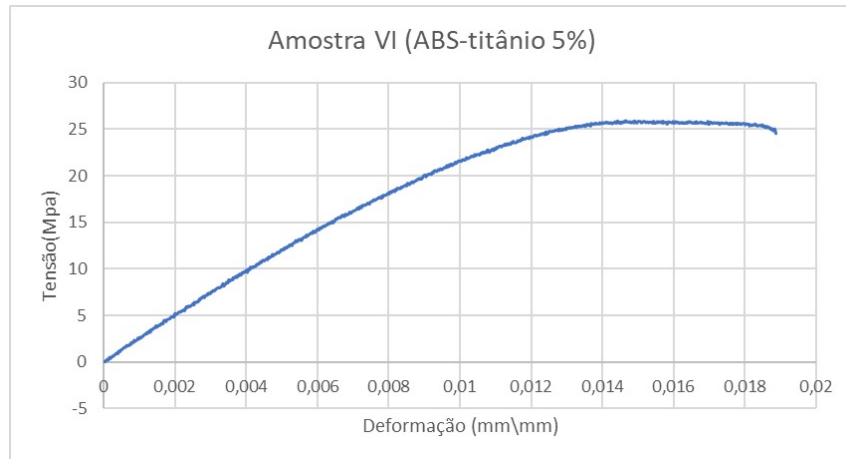


Figura A.6 – Gráfico Tensão x Deformação da Amostra VI. Fonte: Autor.

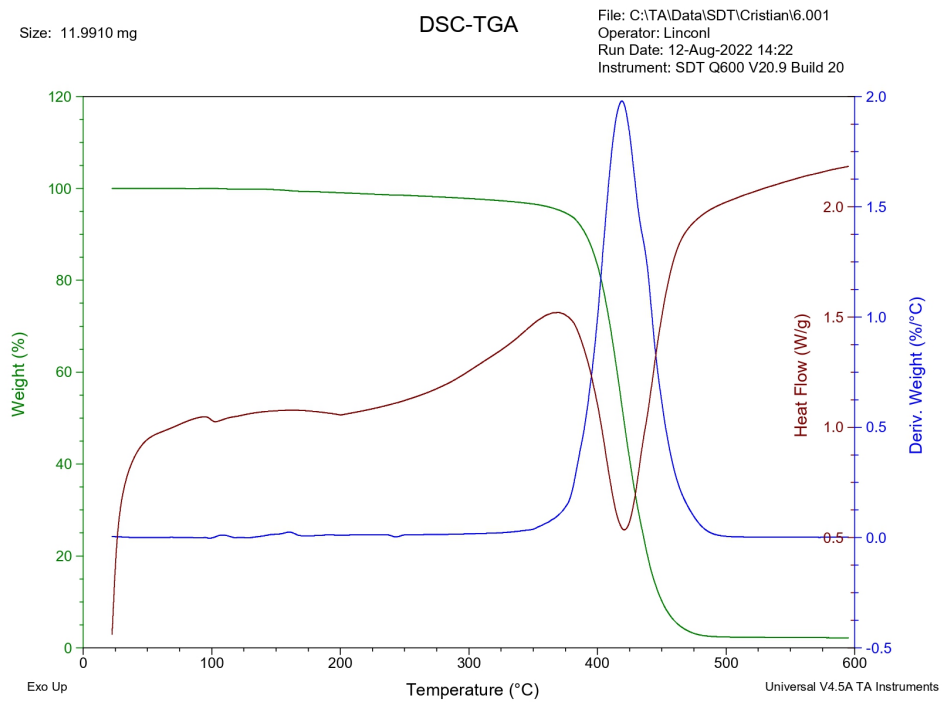


Figura A.7 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 1



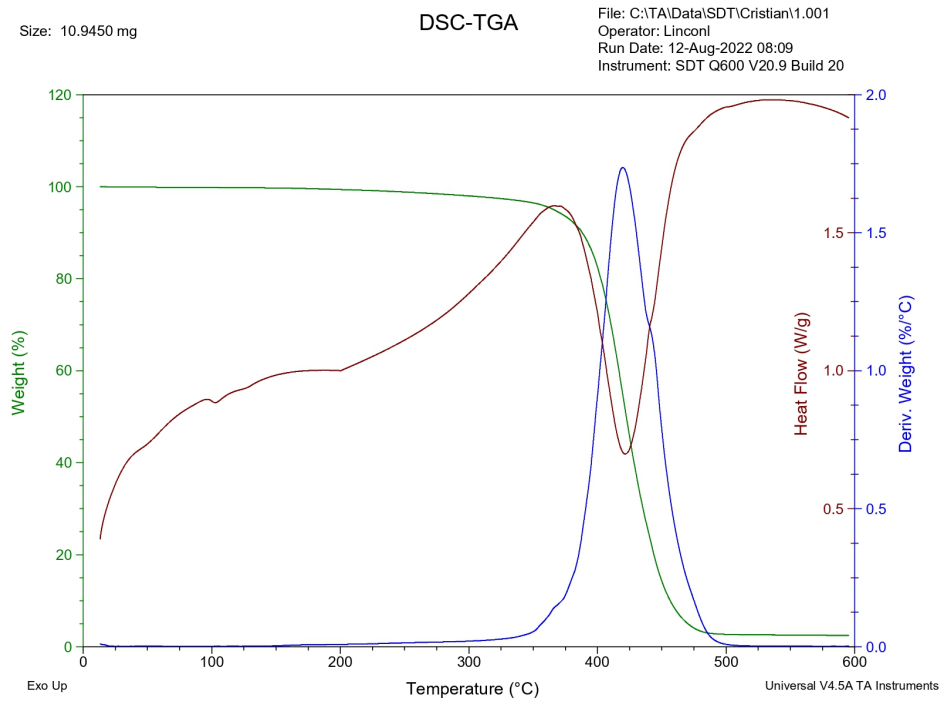


Figura A.8 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 2

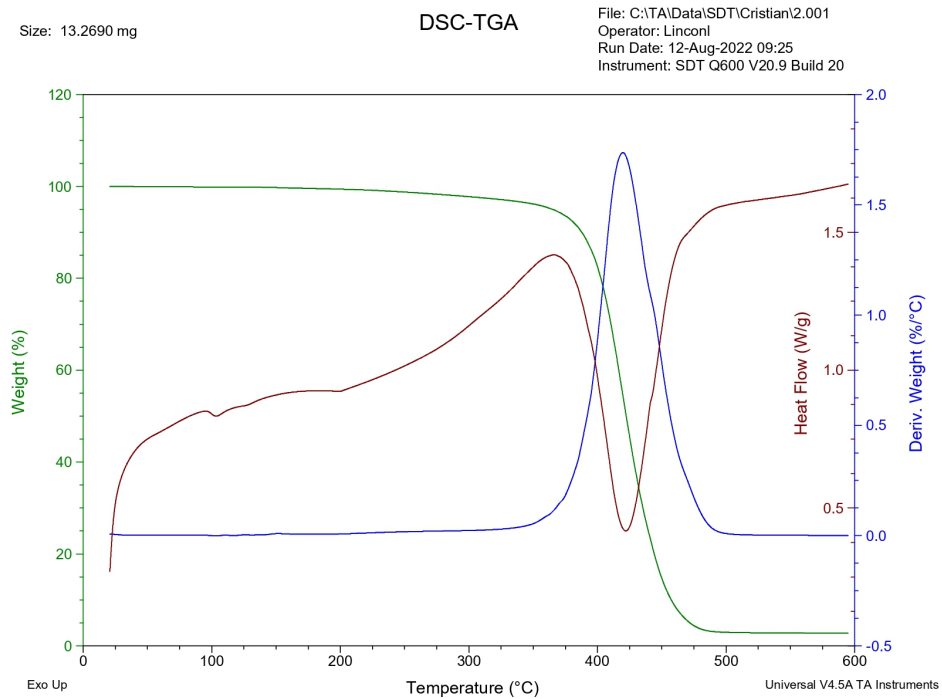


Figura A.9 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 3

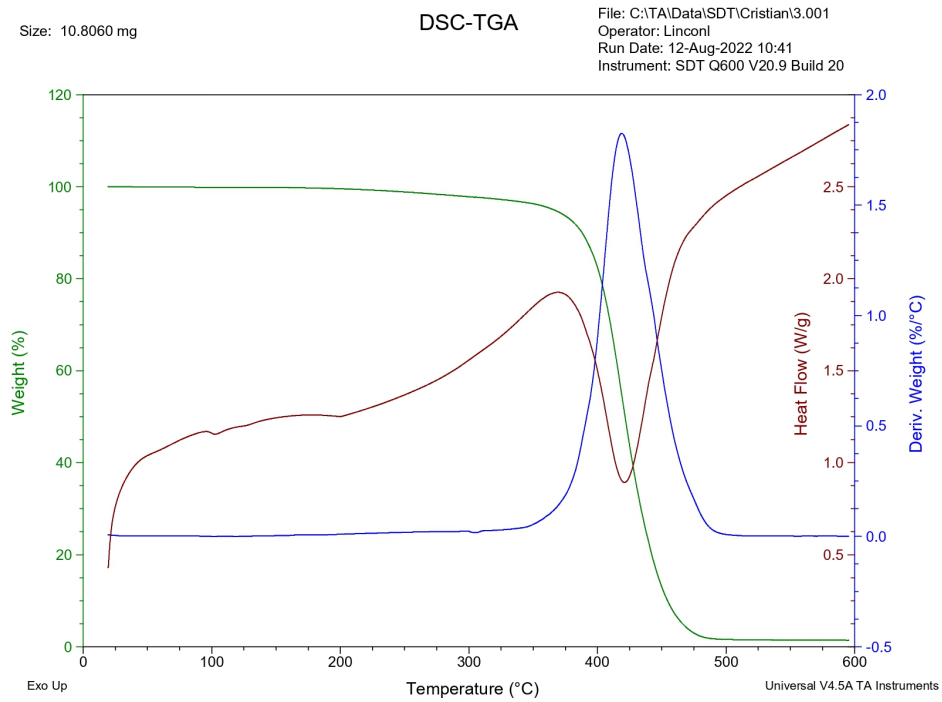


Figura A.10 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 4

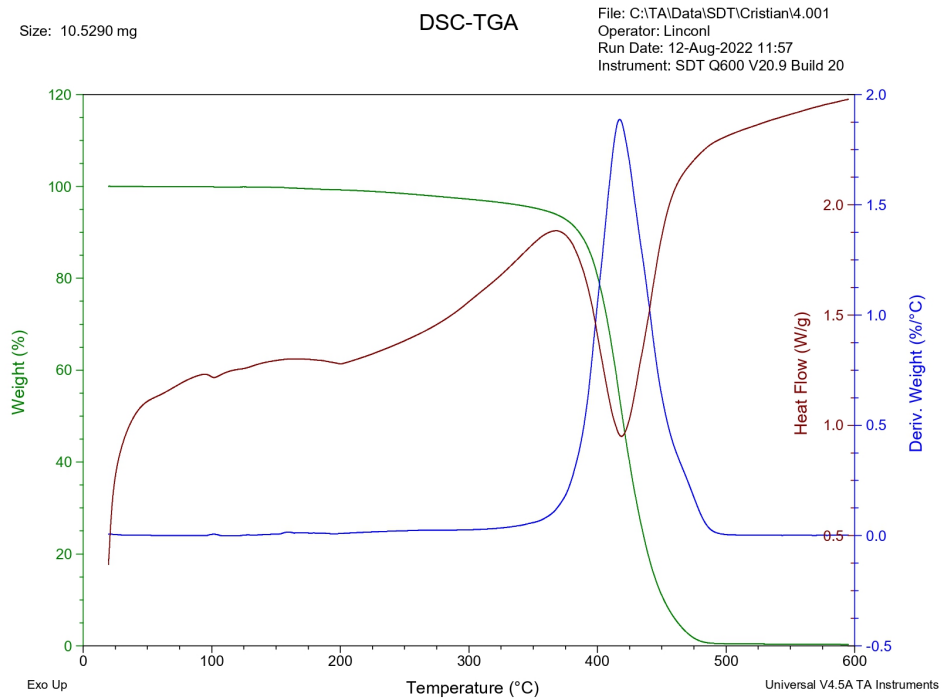


Figura A.11 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 5

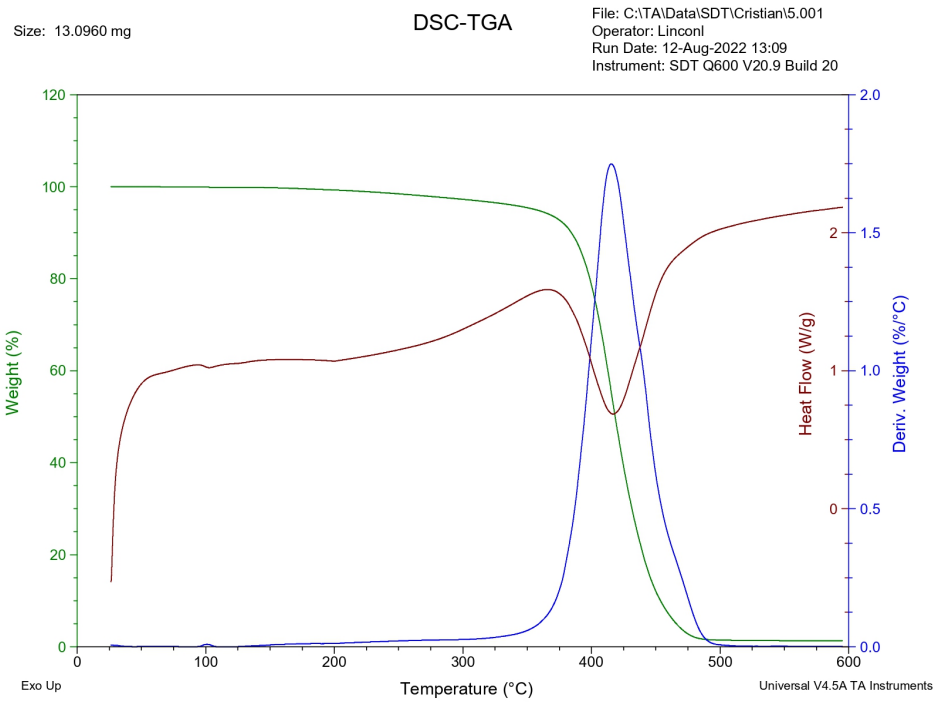


Figura A.12 – Curvas de TGA e DSC da Amostra 6

# APÊNDICE B – Montagem e calibração da impressora 3D

## B.0.1 Montagem da impressora 3D

A impressora que foi utilizada no desenvolvimento deste projeto, é um equipamento que foi adquirido novo, e este vem no formato kit de montagem. A montagem seguiu o manual de montagem fornecido pela Creality, que é dividido em 4 etapas, no qual com uma pessoa montando leva cerca de 45 minutos, o processo de montagem foi simples e não necessitou de ferramentas além daquelas fornecida no kit de montagem da impressora. Na figura B.1 e B.2 é possível ver algumas etapas da montagem da impressora 3D.

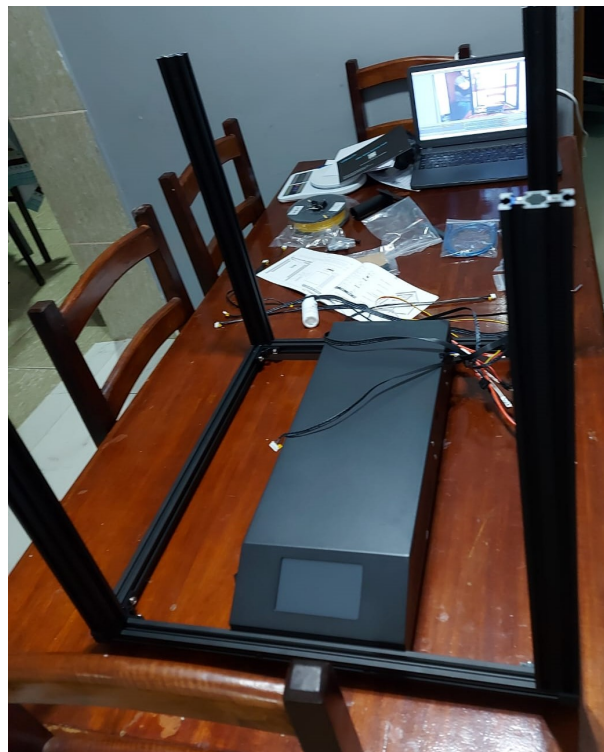


Figura B.1 – Montagem do Frame Estrutural da Ender 5 Plus

A etapa mais demorada dos primeiros passos do projeto foi a calibragem e primeiras configurações da impressora.

Para peça de teste, foram fabricados cubos de calibração para validar a precisão da impressora, usando os parâmetros de fatiamento base que a creality recomendava.

Apos a montagem da impressora, realizou-se algumas substituição de peças afim de obter uma melhor qualidade das peças fabricada nela, sendo assim substituído o kit do subsistema extrusor de plástico por um de metal, o bico extrusor de latão por um de aço endurecido.

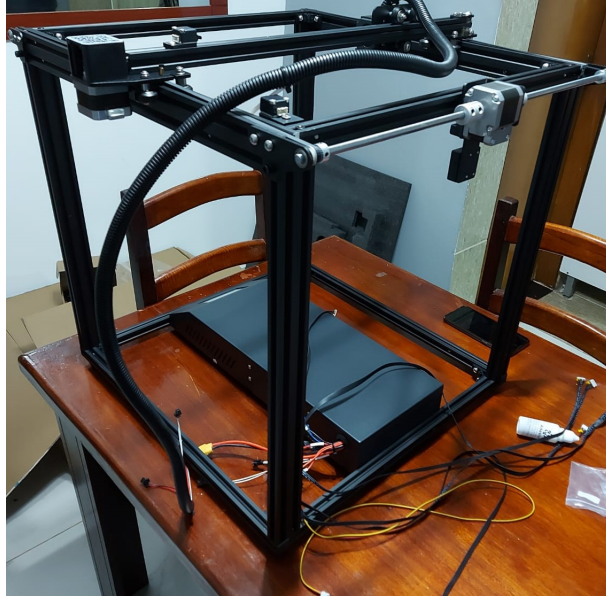


Figura B.2 – Cabagem do sistema elétrico da Ender 5 Plus

O sistema de alimentação de filamento que vem originalmente com a impressora era ABS injetado, que é um problema para os requisitos desta pesquisa, no qual a impressora irá trabalhar com temperaturas elevadas, e necessita de confeccionar peças bastante precisas. Esse problema pode ser corrigido através da substituição do sistema de alimentação de filamento por um sistema de metal, que a própria Creality vende como upgrade.

A substituição do sistema de alimentação de filamento é um procedimento simples, consiste apenas em desparafusar o motor responsável pela extrusora do sistema de alimentação, e parafusar o novo sistema de alimentação de filamento de metal. esse procedimento demorou cerca de 15 minutos. Na figura B.3 é possível ver o extrusor original, com poeira de desgaste que plástico liberar durante a impressão, na figura B.4 é possível ver o extrusor de metal já instalado.

Após a substituição foi feita a calibração da pressão do sistema de alimentação de filamento.

#### **B.0.1.1 Manutenção preventiva**

A manutenção preventiva da impressora deve ser feita periodicamente mesmo que o equipamento tenha poucas horas de uso, o correto é ser implementado a metodologia de manutenção preventiva pré impressão, nesta pesquisa foi aplicado a manutenção preventiva pré impressão, afim de reduzir possíveis influencia nas propriedade de memória de forma das peças fabricadas, causada por mal funcionamento da impressora, durante a fabricação.

A manutenção preventiva pré impressão consiste na execução todos os dias antes de efetuar qualquer impressão a fim de detectar problemas em seus estágios iniciais evitando assim problemas maiores:



Figura B.3 – Foto do extrusor de plastico original da Ender 5 plus



Figura B.4 – Foto do extrusor de metal original instalado na Ender 5 plus

- Parte externa: verifique se não existe nada de estranho na estrutura da impressora, se não existem danos aparentes, fios soltos ;
- Integridade do "frame": verifique se a estrutura permanece rígida e sem sinais de enfraquecimento;
- Tensão das correias: verifique se as correias ainda estão firmes ou se precisam de novo tensionamento;
- Sujeira e detritos no hotend: verifique se não existem poeira em excesso na estrutura ou

restos de filamento no hotend e etc. Caso necessário, limpe cuidadosamente a sujeira nos rolamentos e partes pequenas usando uma escova de dentes. Para a limpeza do restante da estrutura, utilize um pano seco;

- Caso o bico do hotend esteja muito sujo, retire o filamento da impressora, aqueça o bico a 230°C, desligue o aquecimento e retire delicadamente os detritos com a escova de fios metálicos;
- A temperatura para limpeza do bico vai depende do material que está sendo usado no equipamento, para o Nylon, essa temperatura será de 260°C;

### **B.0.1.2 Calibragem e Configuração da impressora 3D**

A etapa de calibragem da impressora é um momento crítico, tendo em vista que nessa etapa e feito os ajustes fino, que determinam a qualidade que a impressora ira entregar. sendo os prontos mais importante de se verifica nesta etapa, nivelamento e se as configuração de velocidade de extrusão.

Foi executado o aquecimento do sistema do extrusor, afim de realizar a verificação da vazão do filamento e iniciar o processo de calibração do fluxo, o processo de calibração do fluxo de extrusão, consiste em colocar um cubo de 10x10x10mm para imprimir, sem preenchimento e sem o fundo e com parede de espessura de 0,8 mm. A espessura de 0,8mm e escolhida por ser duas vezes a espessura do diâmetro que material será depositado, pois o bico da impressora é um bico de 0,4 mm. Apos a impressão ser finalizada deve-se pegar o cubo e medir a parede do mesmo a fim de verifica se o material esta sendo depositado com a espessura adequada.

O ultimo passo do processo de calibra e verificação das configuração da impressora é se os motores de passos dos eixos estão funcionando perfeitamente, para verificar isso, foi utilizado duas peças a serem impressas, a primeira dela consiste do cubo de calibração padrão de 20x20x20 mm, e a segunda a impressão de uma peça circula, afim de verifica se não esta ocorrendo achatamento em alguma direção ou a peça esta ficando ovalada, caso a mesma fique ovalada ou a chatada significa que ocorreu perca de passo no motor ou que alguma correia esta folgada.

Para desenvolver as peças de calibração, usou-se o software Solidworks 2018, na figura [B.5](#) e possível verifica foto do desenho do cubo de calibração do fluxo do extrusor e na figura [B.6](#) e possível verifica o desenho do cubo de calibração dos eixo, e na figura [B.7](#) é possível ver o desenho do circulo para verifica possível folgas de correias ou perca de passo dos motores do eixo xy. Para impressão destas peças de teste foi utilizado o material PLA, com as configurações básicas fornecida pelo fabricante.

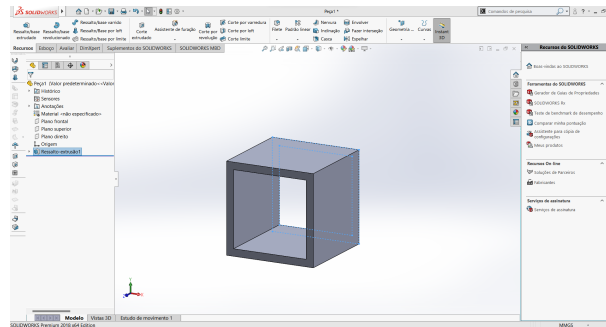


Figura B.5 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração do Fluxo de Filamento

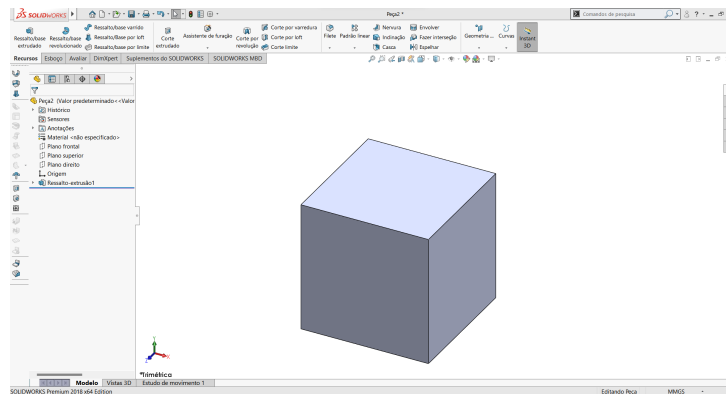


Figura B.6 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração da velocidade de passo do eixo xy

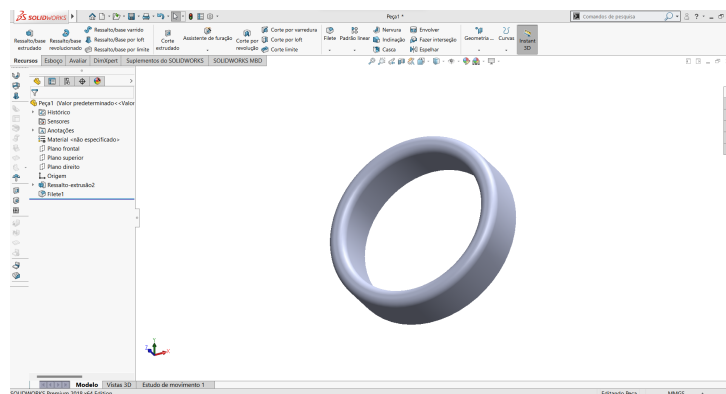


Figura B.7 – Geometria Desenvolvida no Solidworks para Calibração da folga e perca de passo dos eixos xy



# APÊNDICE C – referencial teorico complementa impressora 3D

## C.0.1 Impressora 3D Delta

As impressoras Em Delta, possuem a sua cama de impressão (Mesa Aquecida), no formato circular e estático. Ela possui, sua movimentação realizada por três braços articulados, que movem-se em diferentes elevações, para cima e para baixo, para poder realizar o trabalho. Esse tipo de equipamento, apresenta uma melhor precisão dimensional e velocidade de impressão superior ao modelos apresentados anteriormente, no entanto, é um equipamento bastante complexo de se realizar a sua manutenção e a sua calibragem (COSTA, 2019). Na figura C.1 é possível ver o diagrama com as seta indicando os movimento desse modelo de impressora 3D.

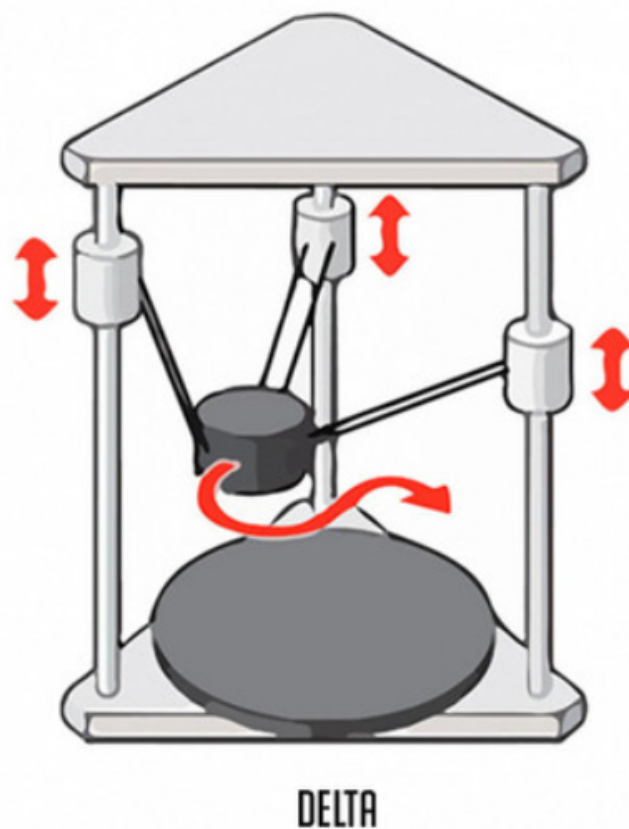


Figura C.1 – Diagrama da impressora Delta fonte:3Dlab

## C.1 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS), é uma tecnologia bastante empregada no Setor Aeroespacial e na Indústria Automobilística, por ser uma tecnologia de fabricação que derrete o material a base de nylon, gerando peças duráveis e funcionais, adequadas para testes de engenharia. As peças SLS, quando comparadas com as SLA, tem propriedades mecânicas melhores, porém, o seu acabamento superficial é mais áspero. As impressoras de SLS, apresentam como vantagem que as suas peças não requerem estruturas de suporte, sendo possível produzir uma quantidade maior de peças em um mesmo processo de impressão. Contudo, ela ainda é uma tecnologia que tem o seu custo mais elevado, quando comparada com a de FDM, de SLA e a de DLP. Além disso, esta tecnologia faz sinterização da matéria prima em pó, por isso, a mesma requer outros equipamentos para a produção das peças (ABREU, 2015).

O mecanismo desta tecnologia consiste na utilização de um recipiente de pó de polímero aquecido. Em seguida, uma lâmina de recobrimento deposita uma camada muito fina do material em pó, de espessura em torno de 0,1 mm em cima da plataforma de construção. Um raio laser de CO<sub>2</sub> começa então a escanear a superfície. O laser irá seletivamente sinterizar o pó e solidificar uma seção transversal do objeto. Na figura C.3 é possível o digrama do mecânicos por trás desta tecnologia.

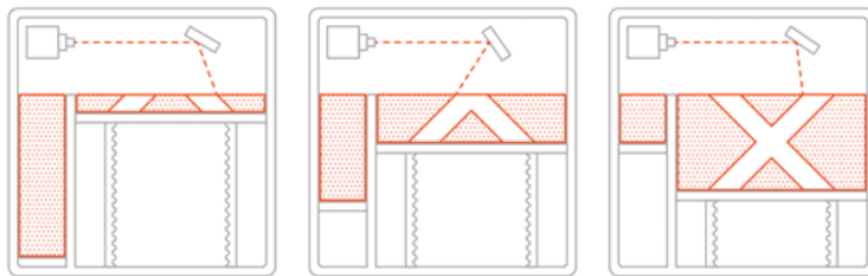


Figura C.2 – Diagrama da impressora SLS fonte:3Dlab

## C.2 Stereolithography (SLA)

A primeira Impressora 3D que foi criada, foi a do tipo Estereolitografia que atualmente, são bastante conhecidas como Impressoras de resina, por conta da matéria prima utilizada. Essas impressoras, funcionam com um raio laser UV, que percorre o formato do objeto em um tanque com resina sensível à radiação ultravioleta (fotossensível). Os raios UV, enrijece a resina sobre a plataforma de impressão camada por camada. A vantagem desta tecnologia, é que quando comparado com a manufatura FDM, as peças tem uma precisão dimensional maior, acabamento superficial melhor, e permitem a produção de peças mais complexas, detalhadas e pequenas. As suas desvantagens, é ser necessário lavar e curar as peças para a retirada dos resíduos de resina das peças, e para fazer com que as mesmas endureçam, além da resina ter um odor muito forte.

Esta tecnologia por ser pioneira, já é bastante consolidada em diversos setores como na produção de próteses dentário, fabricação de joias e na indústria, pois, este tipo de impressão possuem materiais biocompatíveis, esterilizáveis, resistentes a altas temperaturas, flexíveis, transparentes e óticos (PINTO, 2018). Na figura C.3 é possível o diagrama do mecânicos por trás desta tecnologia.

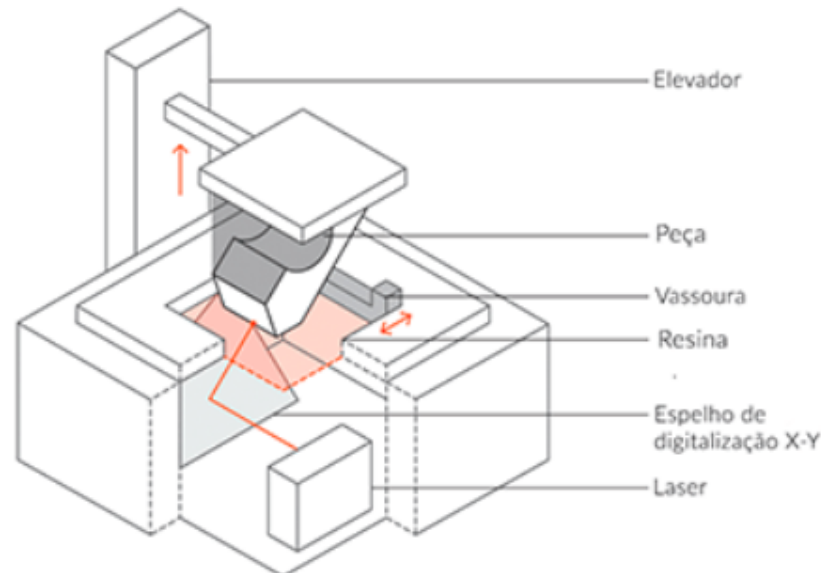


Figura C.3 – Diagrama da impressora SLA fonte:3Dlab

### C.3 Digital Light Processing (DLP)

A impressora 3D de Processamento Digital de Luz, ou DLP, devido a siglas em inglês Digital Light Processing, é uma tecnologia bastante parecida com a SLA, pois, ambas geram as peças através da cura de resina líquida usando a luz UV, porém, a DLP utiliza um projeto ecrã no lugar do laser, como forma de manipulação da luz. A tecnologia DLP, apresenta as mesmas vantagens que a tecnologia SLA, entretanto, as impressoras DLP 3D, podem criar imagens de uma camada inteira de construção de uma só vez, resultando em velocidades de construção mais rápidas. Um dos diferencial da tecnologia DLP para SLA, é que ela apresenta um acabamento melhor nas peças curvadas e pequenas, agregando potencial em peças totalmente translúcidas. A desvantagem que em comparação com a SLA, o processo para calibrar o equipamento é mais complexo (PINTO, 2018).