

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEANDRO DE ARAUJO TEIXEIRA LEITE**

**CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS EM PLA  
OBTIDAS POR TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

**LONDRINA**

**2023**

**LEANDRO DE ARAUJO TEIXEIRA LEITE**

**CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS EM PLA  
OBTIDAS POR TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

**Characterization of the mechanical strength of PLA parts obtained by additive  
manufacturing techniques**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.

**LONDRINA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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

**LEANDRO DE ARAUJO TEIXEIRA LEITE**

**CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS EM PLA  
OBTIDAS POR TÉCNICAS DE MANUFATURA ADITIVA**

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

Data de aprovação: 27/novembro/2023

---

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves  
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Amadeu Lombardi Neto  
Doutorado em Engenharia Metalúrgica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Elizabeth Mie Hashimoto  
Doutorado em Estatística e Experimentação Agrônoma  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2023**

Dedico este trabalho à minha família e amigos por  
sempre me apoiarem nos momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha professora orientadora Janaina por sua dedicação e disposição. Ao laboratório de ensaios, em especial ao professor Genaro pelo amparo durante a realização do trabalho.

A equipe londribaja por permitir o desenvolvimento das habilidades adquiridas em sala de aula.

A minha família e amigos pelo apoio durante esta jornada, em especial a Paulo Pantolfi e Maria Clara dos Santos Lopes.

Por fim ao edital DIREC/DIRGRAD 13/2023 pelo apoio financeiro para viabilizar o trabalho.

O medo faz parte da vida da gente. Algumas pessoas não sabem como enfrenta-lo. Outras, acho que estou com elas, aprendem a conviver com ele e o encaram não de forma negativa, mas com um sentimento de autopreservação (SENNA; AYRTON, 1990).

## RESUMO

Tendo em vista a crescente popularidade das impressoras 3D e a grande variedade de parâmetros disponíveis para a impressão o presente trabalho busca estabelecer um envelope de estudo tendo como base os parâmetros de impressão mais utilizados no ambiente doméstico, como velocidade de impressão, bico utilizado, temperatura utilizada e marca de filamento fixos para a manufatura de todos os corpos de prova utilizados nos ensaios. A partir dessa premissa o presente trabalho analisa a influência da densidade de preenchimento na resistência mecânica do PLA utilizado na impressão 3D, por meio do levantamento de curvas tensão x deformação e obtenção dos valores absolutos de resistência à tração e flexão. Para isso foram realizados ensaios de tração simples e flexão de 3 pontos, os quais foram seguidos os procedimentos listados na ASTM D638 e ASTM D790. O nível de densidade de preenchimento estudado foi variado de 10% a 100%, intervalo esse que foi variado em incrementos de 10% no valor de densidade. Para verificar a influência do preenchimento na resistência final da peça foi aplicado o teste de Scott Knott seguido do teste Scott Knott, onde foi possível estabelecer uma relação entre a resistência mecânica e o nível de preenchimento, separando as diferentes densidades de preenchimento em grupos equivalentes de resistência.

Palavras chave: PLA; resistência; tração; mecânica.

## **ABSTRACT**

In view of the growing popularity of 3D printers and the wide variety of parameters available for printing, this work seeks to establish a study envelope based on the most used printing parameters in the domestic environment, such as printing speed, nozzle used, temperature used and fixed filament brand for the manufacture of all test specimens used in the tests. Based on this premise, the present work analyzes the influence of filling density on the mechanical resistance of PLA used in 3D printing, by surveying stress x strain curves and obtaining absolute values of tensile and flexural strength. For this, simple tensile and 3-point bending tests were carried out, following the procedures listed in ASTM D638 and ASTM D790. The filling density level studied was varied from 10% to 100%, a range that was varied in increments of 10% in the density value. To verify the influence of filling on the final strength of the part, the Scott Knott test was applied, followed by the Scott Knott test, where it was possible to establish a relationship between the mechanical resistance and the level of filling, separating the different filling densities into equivalent groups of resistance.

**Keywords:** PLA; mechanical; resistance; filament.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Funcionamento da Fused Deposit Modeling (Modelagem por fusão e deposição). .....	16
Figura 2 – Etapas da manufatura de um objeto por impressão 3D.....	16
Figura 3 – Exemplos de quantidade de preenchimento.....	17
Figura 4 - Variação do tempo de impressão com diferentes valores de preenchimento.....	17
Figura 5 - Peça submetida a tração. ....	18
Figura 6 - Representação de 1 pascal. ....	19
Figura 7 – Representação de um ensaio de tração. ....	20
Figura 8 - Gráfico tensão x deformação do aço ABNT 1020.....	21
Figura 9 - Ensaio de tração de um material frágil.....	22
Figura 10 - Estado de flexão em uma peça .....	23
Figura 11 - Representação de esforços na flexão. ....	23
Figura 12 - Ensaio de flexão de 3 pontos.....	24
Figura 13 - Etapas do trabalho .....	25
Figura 14 - Creality Ender 3 MAX .....	26
Figura 15 - Referência de temperatura para o bico e mesa de impressão. ....	26
Figura 16 - Passo de avanço no eixo Z.....	27
Figura 17 - Tipos de padrão de preenchimento.....	27
Figura 18 - Área de engaste com 100% de preenchimento. ....	28
Figura 19 - Exemplo de diferentes espessuras de parede e preenchimento. ....	28
Figura 20 - Identificação dos corpos de prova. ....	29
Figura 21 - Máquina de ensaio universal.....	30
Figura 22- Corpos de prova para ensaio de tração ASTM D638 .....	31
Figura 23 - Região de medidas da seção. ....	32
Figura 24 - Posicionamento do corpo de prova. ....	33
Figura 25 - Exemplo de ruptura do corpo de prova para tração. ....	34
Figura 26 - Representação do corpo de prova para termoplásticos ASTM D790. .....	34
Figura 27 - Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão.....	35
Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova para flexão.....	36

<b>Figura 29 - Exemplo de ruptura dos corpos de prova para flexão.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 30 - Fluxograma para quantificação dos corpos de prova. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 31 - Corpos de prova descartados.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 32 -- Valores médios encontradas de resistência a tração.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 33 - Curva tensão x deformação para o ensaio de tração. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 34 - Regiões de comportamento elástico e plástico. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 35 - Valores médios de resistência máxima a flexão. ....</b>	<b>44</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões para o corpo de prova ASTM .....	31
Tabela 2 - Velocidades para o ensaio de tração .....	31
Tabela 3 - Testes dos pressupostos da análise de variância de Scott Knott. ...	40
Tabela 4 - Teste de Scott Knott para o ensaio de tração. ....	40
Tabela 5 - Pressupostos para os ensaios de flexão.....	43
Tabela 6 - Teste de Scott Knott para os ensaios de flexão.....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelagem por fusão e deposição.....</b>	<b>15</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização da resistência mecânica.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Resistência a tração .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Resistência a flexão. ....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
<b>5.1</b>	<b>Ensaio de tração e flexão .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2</b>	<b>Parâmetros de impressão.....</b>	<b>25</b>
<b>5.3</b>	<b>Análise estatística .....</b>	<b>37</b>
<b>5.4</b>	<b>Identificação dos corpos de prova .....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Ensaio de tração.....</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Ensaio de flexão. ....</b>	<b>43</b>
<b>6.3</b>	<b>Discussão dos resultados .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Definida pela ISO/ASTM 52900:2021 como “um processo de união de um ou mais materiais para a confecção de uma peça ou produto através da sobreposição de camadas”, a manufatura aditiva difere dos métodos de manufatura por subtração, como usinagem ou fresamento convencionais, por fabricarem o produto através da adição de material ao invés de sua remoção. Além de manufatura aditiva diferentes nomes podem ser encontrados na literatura como “fabricação aditiva” ou “prototipagem rápida”, no entanto o termo mais utilizado desde sua popularização é “Impressão 3D” (LANZOTTI *et al.*, 2015).

A partir de 2009 devido ao barateamento dos custos, as impressoras de Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*, FDM) ganharam notável popularidade no ambiente doméstico devido a praticidade e possibilidade de fabricar praticamente qualquer forma, desde brinquedos a objetos úteis para o dia a dia (MA; ZHANG, 2022).

Além de sua popularidade no ambiente doméstico, manufatura aditiva é considerada um dos pilares da indústria 4.0 devido sua alta versatilidade de operação com diferentes tipos de matéria prima (RECH *et al.*, 2021), versatilidade e capacidade de fabricação de peças complexas necessitando-se de apenas uma etapa de produção (CONNER *et al.*, 2014) e menor impacto ambiental quando comparada com técnicas convencionais de fabricação (PILZ *et al.*, 2020). Dentre as principais aplicações para a manufatura aditiva destaca-se a facilidade de confecção de protótipos e provas de conceito (BIONE *et al.*, 2021), uso para produção de EPI e materiais de apoio para contenção de epidemias (BIONE *et al.*, 2021), prototipagem e fabricação de moldes para joalherias (YAP; YEONG, 2014), fabricação de estruturas em concreto com formas complexas e baixo consumo de matéria prima (HASSE *et al.*, 2020).

Nesse contexto o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um envelope de estudo, tendo fixos todos os parâmetros de impressão como temperatura e velocidade de impressão, de modo que os dados obtidos possam ser utilizados durante o dimensionamento de peças mecânicas fabricadas com impressoras 3D, otimizando o tempo de fabricação e consumo de matéria prima.

## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo central aplicar os conhecimentos adquiridos durante a graduação, em específico, por meio de um estudo prático sobre a resistência mecânica do PLA (Biopolímero Ácido Polilático).

### **2.1 Objetivo geral**

Estabelecer um envelope de estudo ao padronizar os parâmetros de impressão utilizados na fabricação dos corpos de prova, visando remover fontes de erro e influências externas para caracterizar a resistência mecânica do PLA empregado em impressoras 3D que utilizem a técnica FDM para a impressão.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para o presente trabalho os objetivos específicos podem ser listados da seguinte maneira:

- Quantificar o limite de escoamento do PLA após a FDM;
- Caracterizar a tensão máxima admissível do PLA após a FDM, submetendo corpos de prova a ensaios de tração simples;
- Identificar comportamento do PLA quando submetido a esforços de tração, pela curva tensão x deformação do mesmo;
- Verificar se há influência do preenchimento na resistência final da peça, visando otimizar o peso final do produto manufaturado.

### 3 JUSTIFICATIVA

As técnicas de manufatura aditiva ganharam grande popularidade na última década, sendo cada vez mais utilizadas em todas as áreas de produção, principalmente para prototipagem ou desenvolvimento de produtos de uso único e específico. Entre as impressoras 3D de baixo custo (FDM) três insumos de filamento são os mais populares, sendo eles o *Polyact Acid* (PLA), Poietrefalato de Etileno Glicol (PETG) e o Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017). Segundo Farah, Anderson e Langer (2016) o PLA é considerado a matéria prima principal da tecnologia FDM, por ter um bom custo benefício, boa rigidez e excelente resistência à impactos e temperatura.

Devido a possibilidade de fabricar formas complexas em um tempo relativamente curto, as impressoras 3D são amplamente utilizadas na área da saúde por viabilizar o desenvolvimento de próteses ou equipamentos específicos para cada tipo biológico. Entre as possíveis aplicações no âmbito da saúde tratamento de agenesia vaginal e a produção de próteses para a retina. Além das aplicações em tratamentos, as impressoras 3D têm grande papel no planejamento de cirurgias complexas como cirurgias do coração, e cirurgias de quadril (BOLL *et al.*, 2019), (RANZZI *et al.*, 2021), (FERNANDES *et al.*, 2022), (BARCZEWSKI *et al.*, 2022).

Como decorrência da vasta área de aplicação para as impressoras 3D surge a necessidade, principalmente em projetos mecânicos, de estabelecer um envelope de segurança para a operação do produto final, visando quebras ou falhas inesperadas. A alteração de parâmetros como, por exemplo, a temperatura pode ter influência drástica na resistência mecânica final do produto manufaturado, tendo essa premissa o presente trabalho fixa os parâmetros de impressão para uma melhor representação das condições presentes em um ambiente doméstico durante a manufatura das peças (KARAMANLIOGLU; ALKAN, 2019).

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração do presente trabalho foi necessário abordar diversos temas teóricos de resistência mecânica de materiais e funcionamento das impressoras 3D, os tópicos a seguir apresentam os principais pontos de estudo que serão utilizados na elaboração do trabalho.

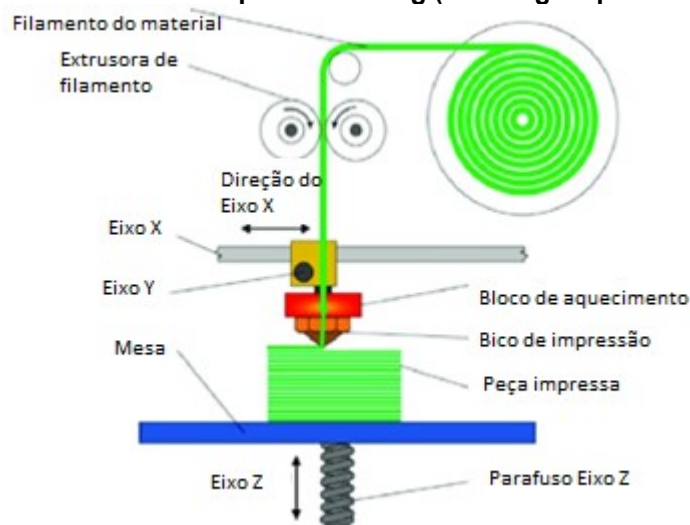
### 4.1 Modelagem por fusão e deposição

Desenvolvida no início da década de 1980 por Hideo Kodama a estereolitografia (SLA), é considerada a técnica de prototipagem rápida precursora da impressão 3D, a qual utilizava fotopolímeros para imprimir um modelo por camadas. No fim da década de 1980, surge a tecnologia de impressão por FDM, sendo essa a técnica de impressão mais popular nos dias atuais, pois é a técnica mais utilizada em ambientes domésticos pelo fato da FDM ser facilmente aplicada em equipamentos de baixo custo. Segundo Dall'agnol, Sagawa e Tavares Neto (2022) as impressoras 3D tem sido cada vez mais utilizadas para a produção em larga escala de produtos acabados com alta capacidade de personalização.

O funcionamento da FDM consiste em depositar um polímero derretido próximo ao seu ponto de fusão sobrepondo camada a camada. Dentre os principais componentes de uma impressora 3D citam-se a mesa de impressão que, normalmente, é mantida aquecida para melhorar a fixação da amostra a ser impressa. O bloco de aquecimento, responsável por elevar a temperatura do filamento até seu ponto de fusão. O bico de impressão que é responsável por direcionar o material derretido e por fim a extrusora de filamento, cujo propósito é abastecer o bloco de aquecimento e o bico de impressão com o filamento. A representação dos principais componentes presentes em uma impressora 3D está disposta na Figura 1.



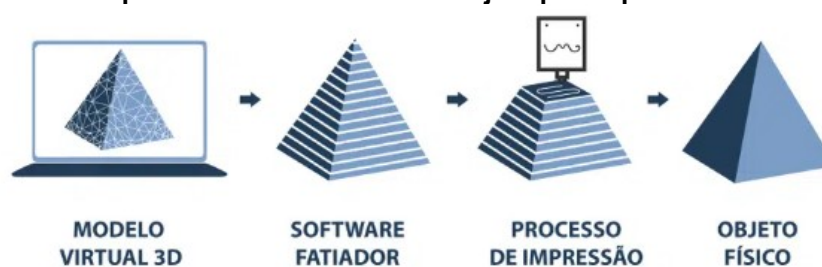
**Figura 1 - Funcionamento da Fused Deposit Modeling (Modelagem por fusão e deposição).**



**Fonte: Adaptado de Angelopoulos, Samouhos e Taxiarchou (2021)**

O processo de fabricação de peças por prototipagem rápida é realizado com o auxílio de *softwares* de desenho CAD 3D, sendo utilizado o formato *Standard Triangle Language* (STL) para salvar o arquivo final. Após a modelagem o objeto deve ser processado por um *software* de fatiamento o qual dividirá o objeto em várias fatias planas para a elaboração de um Código G que, quando executado pela impressora 3D, irá sobrepor os vários planos gerados pelo *software*, resultando assim no protótipo final (RECH *et al.*, 2021). A representação das etapas necessárias para a impressão de um produto estão representadas na Figura 2.

**Figura 2 – Etapas da manufatura de um objeto por impressão 3D.**

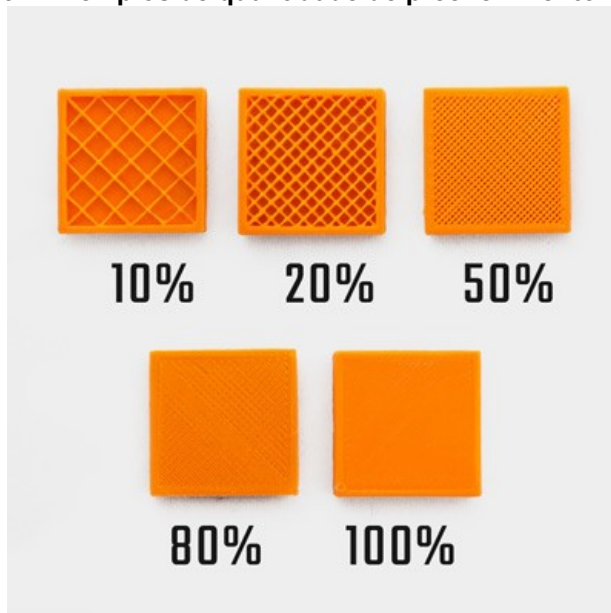


**Fonte: Makerhero (2020)**

Para diminuir o tempo de fabricação e uso de material e manufatura os *softwares* de fatiamento criam uma peça oca com paredes sólidas. A densidade final da peça é determinada pelo parâmetro de preenchimento. Diferentes valores de

preenchimento geram diferentes estruturas no interior da peça produzida, como é evidenciado na Figura 3.

**Figura 3 – Exemplos de quantidade de preenchimento.**



Fonte: (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

Segundo Porsani, Silva e Hellmeister (2017), a densidade determinada para o objeto está diretamente relacionada a quantidade de matéria prima e o tempo de produção do objeto final. A Figura 4 exemplifica o impacto da variação de preenchimento na confecção de um cubo de 50x50x50 mm manufaturado utilizando uma impressora Graber I3, com filamento de 1.65mm *open-source*, com resolução de 0,2mm de altura de camada e velocidade de impressão de 35mm/s.

**Figura 4 - Variação do tempo de impressão com diferentes valores de preenchimento**



Fonte: (PORSANI; SILVA; HELLMEISTER, 2017)

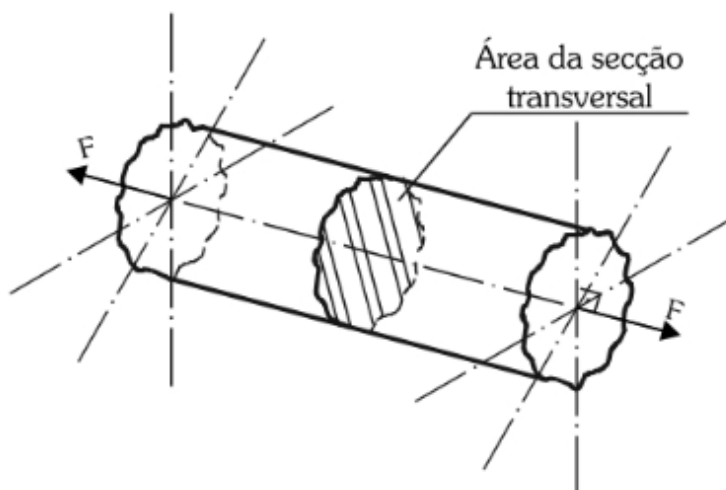
## 4.2 Caracterização da resistência mecânica

Todos os objetos estão sujeitos a diferentes tipos de esforço, principalmente os objetos com propósitos mecânicos tendo em vista que, muitas vezes, são projetados para suportar um esforço já conhecido (MELCONIAN, 2018). A resistência mecânica do PLA é um objeto de estudo recorrente entre os trabalhos de pesquisa. Lima, Marques e Shimano (2022) investigaram a influência da umidade na resistência mecânica final de peças impressas em PET-G. Coppola *et al.* (2018) determinou a influência da viscosidade do PLA na resistência mecânica final do produto. Ambos os trabalhos utilizaram o ensaio de tração simples e o ensaio de flexão de 3 pontos para identificar as propriedades mecânicas de seus materiais, sendo um indicativo da eficácia de ambos os ensaios ao caracterizar a resistência mecânica final dos corpos de prova.

### 4.2.1 Resistência a tração

Entende-se que uma peça está submetida à esforço de tração (Figura 5) quando uma carga normal for exercida sobre a área de seção transversal da peça, em direção ao eixo longitudinal (MELCONIAN, 2018).

Figura 5 - Peça submetida a tração.



Fonte: Melconian (2018).

A carga imprimida na peça gera nela uma tensão normal que é determinada pela relação entre a intensidade da carga imprimida e a área da seção transversal da peça (MELCONIAN 2018), demonstrada na Equação 1.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (1)$$

Sendo:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  – Tensão normal máxima [Pa]

$F_{m\acute{a}x}$  – Força normal ou axial máxima [N]

$A$  – Área da seção transversal da peça [m<sup>2</sup>]

A unidade de tensão no SI (Sistema internacional de unidades) é o pascal (MELCONIAN, 2018), que corresponde à carga de 1 N atuando sobre uma superfície de 1 m<sup>2</sup> (Figura 6)

**Figura 6 - Representação de 1 pascal.**



**Adaptado de Melconian (2018).**

Pela unidade pascal ser infinitesimal, utilizam-se com frequência seus múltiplos, o kPa (quilopascal) e o MPa (megapascal) (MELCONIAN, 2018). A unidade Mpa (megapascal) corresponde à aplicação de 1 N na superfície de um milímetro quadrado.

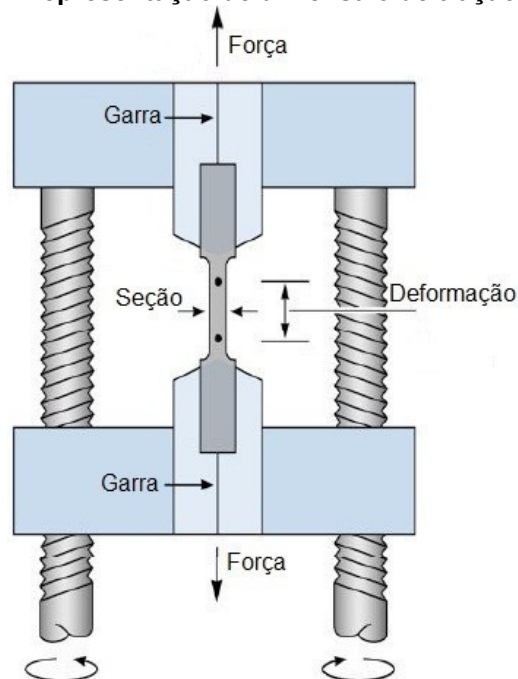
Para quantificar a tensão máxima admissível no material é utilizado o ensaio de tração simples, visto que com esse ensaio é possível o levantamento de vários parâmetros de resistência do material (LIMA; MARQUES; SHIMANO, 2022), dentre eles:

- Limite de escoamento – Valor da tensão suportada pelo material antes de sofrer deformações plásticas;
- Módulo de elasticidade – Representa a rigidez do material e é obtido pela inclinação da reta na região elástica (Figura 8);

- Tensão máxima – Tensão máxima suportada pelo material antes de sua ruptura;
- Deformação até a ruptura.

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova a um esforço axial até o seu rompimento, como indicado na Figura 7.

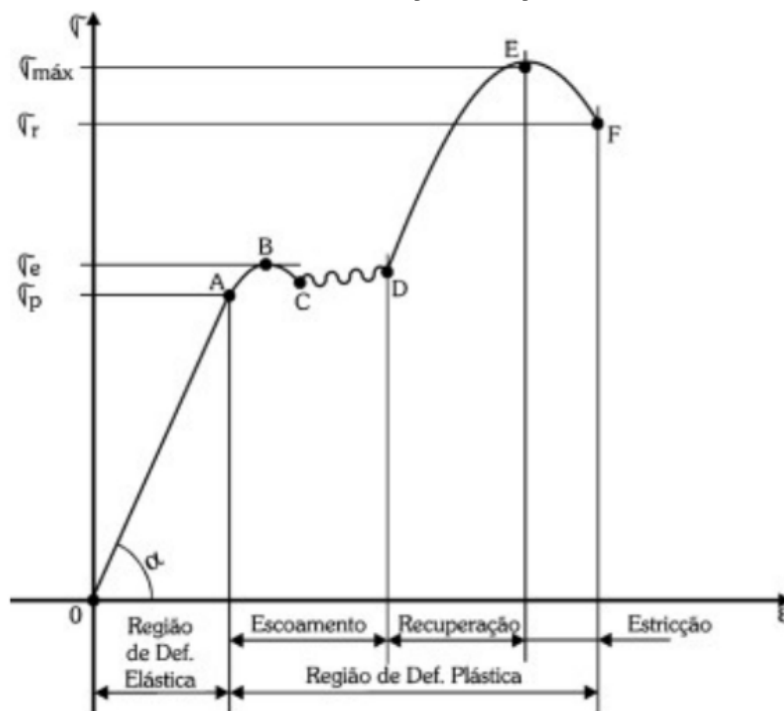
**Figura 7 – Representação de um ensaio de tração.**



**Fonte: Bipodi (2020)**

Ao cruzar os valores de tensão obtidos com o alongamento do corpo de prova é possível gerar um gráfico dos valores de tensão x deformação do material testado (Figura 8). Com a curva de tensão x deformação é possível identificar as diferentes áreas principais de deformação do material, o regime de deformação elástica, região onde a deformação é linearmente proporcional a força aplicada, e o regime plástico do material. Para aplicação em peças mecânicas, o limite de escoamento, região onde o material passa do regime elástico para o plástico, é utilizado como tensão máxima de projeto (MELCONIAN, 2018).

Figura 8 - Gráfico tensão x deformação do aço ABNT 1020



Fonte: Melconian (2018)

Durante o regime elástico o material submetido ao esforço de tração tem seu comportamento regido pela Lei de Hooke, que relaciona o alongamento com a rigidez do material. No intervalo regido pela lei de Hooke (Região de deformação elástica) o alongamento do material é expresso pela Equação 2.

$$\Delta l = \frac{\sigma_p \cdot l}{E} \quad (2)$$

Sendo:

$\Delta l$  – alongamento da peça [m];

$\sigma_p$  – tensão normal durante o regime elástico [Pa];

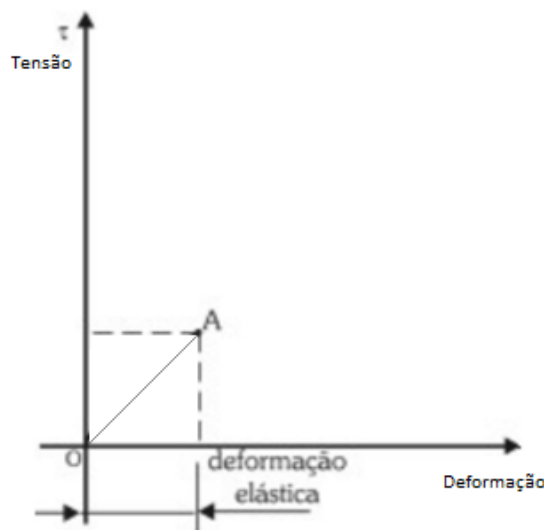
$l$  – comprimento inicial da peça [m];

$E$  – modulo de elasticidade do material [Pa].

Durante o ensaio de tração o material pode se comportar de duas maneiras distintas, sendo elas dúctil e frágil (MELCONIAN, 2018). O material dúctil é

caracterizado por apresentar uma deformação plástica precedida de deformação elástica para que atinjam o rompimento durante o ensaio de tração (Figura 9). Materiais classificados como frágil não apresentam deformação plástica antes de seu rompimento, como exemplificado na Figura 9.

**Figura 9 - Ensaio de tração de um material frágil.**



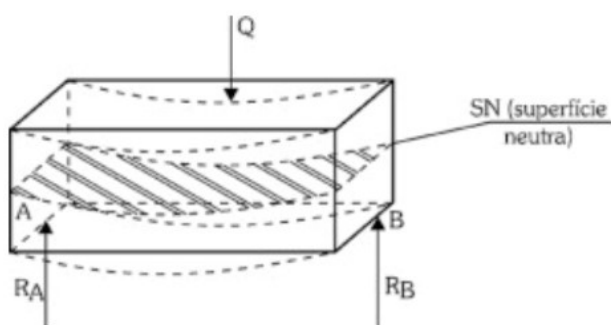
**Adaptado de Melconian (2018).**

Em seus estudos ao quantificarem a resistência mecânica do PLA e PET- G Santana *et al.* (2018), Rech *et al.* (2021), obtiveram resultados satisfatórios com relação a resistência mecânica de ambos os materiais, onde constaram que o limite de resistência a tração do PLA é de  $53,32 \pm 0,33$  Mpa, e a resistência a tração do PETG  $47,78 \pm 0,38$  MPa. Este é um indicativo que o ensaio de tração é uma opção viável e eficiente para avaliar a resistência mecânica de termoplásticos.

#### 4.2.2 Resistência a flexão.

É entendido como esforço de flexão em uma peça quando a mesma está submetida à ação de cargas cortantes que resultam em um momento fletor significativo (MELCONIAN, 2018). A Figura 10 representa um estado de flexão pura, no qual um corpo sob dois pontos de apoio Ra e Rb está submetido a uma força Q gerando unicamente momento fletor em torno do eixo Z.

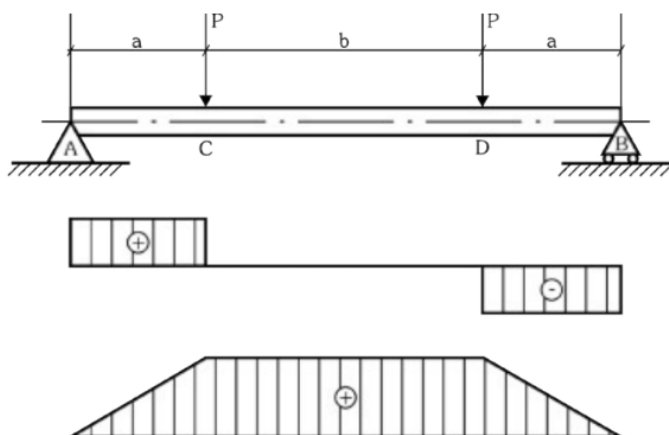
**Figura 10 - Estado de flexão em uma peça**



Fonte: Melconian (2018).

A flexão pode ser definida como sendo pura e simples. No estado de flexão pura a peça submetida ao esforço de flexão apresenta somente momento fletor atuante nas diferentes seções transversais, não possuindo força cortante atuando em ambas seções (MELCONIAN, 2018). A Figura 11 demonstra que a região de maior momento fletor está representada pelo intervalo C-D, por ser o intervalo intermediário entre as cargas P aplicadas ao corpo.

**Figura 11 - Representação de esforços na flexão.**



Fonte: Melconian (2018).

No estado de flexão simples as seções transversais da peça estão submetidas à ação de força cortante e momento fletor simultaneamente, sendo representado pelos intervalos AC e DB da Figura 11.

Para o dimensionamento de peças mecânicas submetidas a esforço de flexão (Figura 10) é tido como parâmetro a tensão admissível, que será a tensão atuante máxima na fibra mais afastada (MELCONIAN, 2018). A tensão máxima admissível é calculada com a Equação 3.



$$\sigma_x = \frac{M}{W_x} \quad (3)$$

Em que:

$\sigma_x$  – Tensão máxima admissível

$M$  – Momento fletor aplicado na peça

$W_x$  – Momento de inércia em torno do eixo X

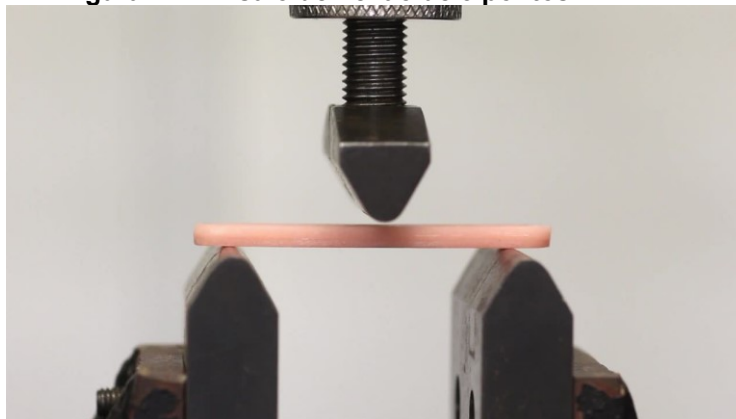
Ao determinar a tensão máxima admissível na flexão do PLA sob diferentes níveis de umidade Lima, Marques e Shimano (2022) demonstraram que o ensaio de flexão de três pontos apresentou grande eficiência e precisão ao analisar a resistência mecânica PLA.

O ensaio de flexão de três pontos possibilita obter uma ampla variedade de parâmetros de resistência, dentre eles:

- Limite de escoamento em flexão – Valor da tensão flexural suportada pelo material antes de sofrer deformações plásticas ou permanentes;
- Módulo de elasticidade de flexão – representa a rigidez do material;
- Tensão flexural máxima – tensão máxima suportada pelo material em flexão;
- Deformação relativa até a tensão flexural máxima.

No ensaio de flexão de 3 pontos um corpo de prova feito em formato de aba é apoiado em um suporte por suas extremidades e submetida à aplicação de uma carga crescente na região central em relação aos apoios (Figura 12).

**Figura 12 - Ensaio de flexão de 3 pontos.**

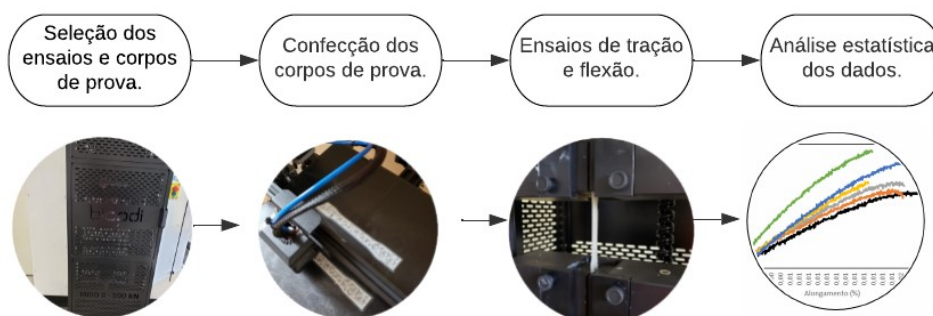


**Fonte: IPTV USP (2018).**

## 5 METODOLOGIA

Para a execução do trabalho foi estabelecido um cronograma contendo 4 etapas ilustradas pela Figura 13. A primeira etapa consistiu na escolha dos ensaios e corpos de prova a serem utilizados, onde foi adotado o ensaio de tração simples e o ensaio de flexão de 3 pontos. A segunda e terceira etapa são respectivamente a manufatura e ensaio dos corpos de prova seguindo as orientações da ASTM D638 e ASTM D790. A última etapa do trabalho foi constituída de uma análise estatística dos resultados obtidos, onde foram realizados testes de hipóteses para validar os pré-supostos da análise, seguido do teste de Scott Knott. Para minimizar os efeitos do ambiente e erros de fabricação nos valores finais de resistência mecânica a produção de todos os corpos de prova foi aleatorizada e dividida em 20 lotes de impressão, sendo fabricados 10 corpos de prova por lote.

**Figura 13 - Etapas do trabalho**



Fonte: Autoria própria.

### 5.1 Parâmetros de impressão

Para a manufatura de todos os corpos de prova foram impressos utilizando uma impressora 3D FDM modelo Creality Ender 3 MAX, exibida na Figura 14.

**Figura 14 - Creality Ender 3 MAX**

**Fonte: Autoria Própria**

Em aparelhos que utilizam a técnica FDM é necessário definir valores de temperatura para o bico de impressão e também para a mesa. Para o presente trabalho foi utilizada a janela de temperatura estipulada pelo fabricante (Figura 15), sendo de 235°C para o bico de impressão e 100°C para a mesa de impressão.

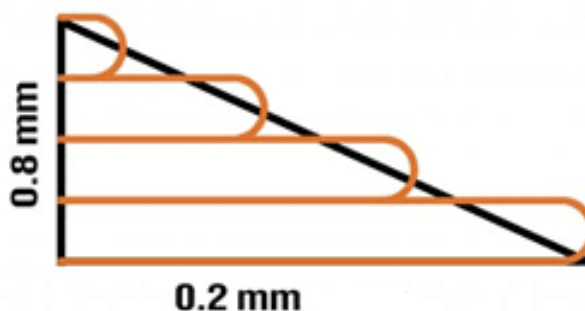
**Figura 15 - Referência de temperatura para o bico e mesa de impressão.**

**Fonte: Autoria própria.**

Para a impressão 3D há uma grande variedade de bicos de impressão disponíveis, sendo o intervalo de 0,2 a 0,8 mm o mais popular dentre as impressoras de baixo custo. Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o bico de 0,4mm

feito em latão, por ser o mais popular entre as impressoras 3D de baixo custo (ROSANI; SILVA; HELLMMEISTER, 2017). Para o passo do eixo Z (Figura 16) foi utilizado o valor de 0,2mm, por também ser o mais utilizado nas impressões com o bico de 0,4mm.

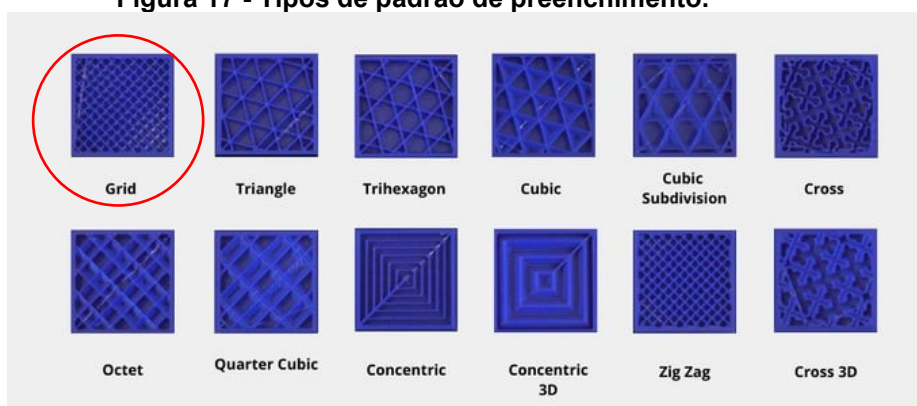
**Figura 16 - Passo de avanço no eixo Z**



Adaptado de 3DLAB (2020)

Para otimizar o tempo de manufatura e a quantidade de material utilizado deve-se levar em consideração o padrão de preenchimento a ser utilizado (Figura 17), pois esse padrão está diretamente ligado com esses 3 fatores (ROSANI; SILVA; HELLMMEISTER, 2017).

**Figura 17 - Tipos de padrão de preenchimento.**



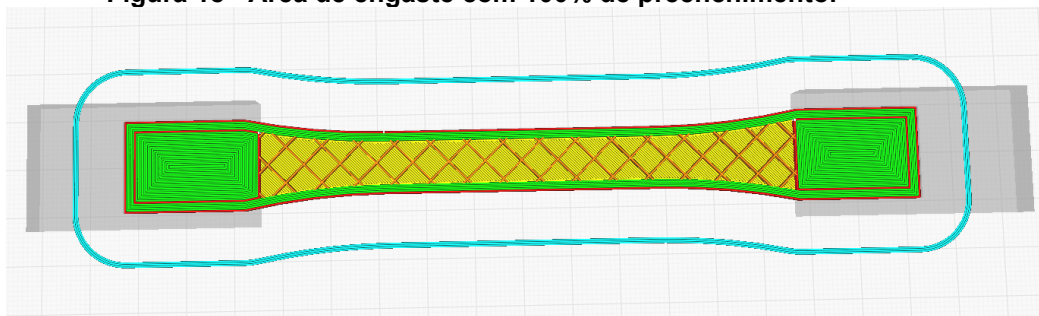
Fonte: BCN3D (2020)

Para o estudo foi selecionado o padrão linear de preenchimento (Grid) por ser o mais indicado na produção de peças que necessitam de resistência mecânica.

Por estar diretamente relacionado à resistência final da peça a densidade de preenchimento é fundamental para o estudo. Para determinar a relação entre a densidade de preenchimento e a resistência mecânica de uma peça foi utilizado um valor de preenchimento será dividido em 10 intervalos iguais, variando de 10 a 100%.

Devido ao modo de fixação dos corpos de prova, na região de contato do espécime com a garra da máquina de ensaio, para evitar uma possível falha precoce do material fora da região de interesse, foi utilizado 100% de densidade em todas os espécimes (Figura 18).

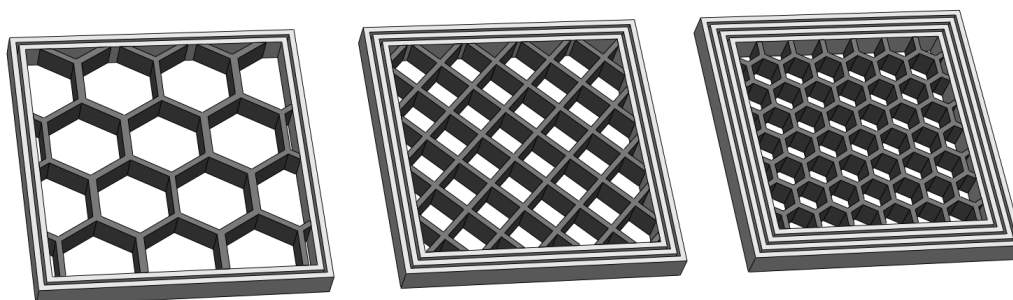
**Figura 18 - Área de engaste com 100% de preenchimento.**



Fonte: autoria própria.

Outro parâmetro que está diretamente relacionado com a resistência final da peça é o “Wall Thickness” (Figura 19) que define quantas voltas o bico de impressão irá fazer em seu contorno. Por ser o mais comum em impressões realizadas com o bico de 0,4 mm, além de 0,8mm como o valor de espessura de parede (Wall Thickness) com o bico de impressão dando duas voltas no contorno da peça. Para a justificativa dos parâmetros utilizados foram consideradas as principais aplicações da impressora 3D no ambiente doméstico (ROSANI; SILA; HELLMEISTER, 2017), em conjunto com suas aplicações no meio industrial, com foco em prototipagem rápida (LIM *et al.*, 2016).

**Figura 19 - Exemplo de diferentes espessuras de parede e preenchimento.**

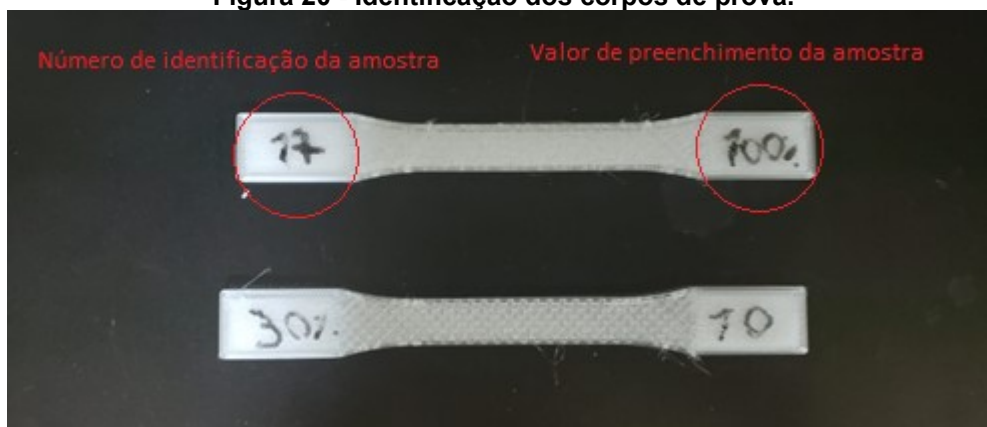


Fonte: 3D Prototypes (2021)

## 5.2 Identificação dos corpos de prova

Após a fabricação os espécimes receberam uma numeração de 1 a 100 de maneira aleatória como demonstrado pela Figura 20. O procedimento de identificação foi aplicado de maneira idêntica para ambos os tipos de corpo de prova.

Figura 20 - Identificação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria Própria.

### 5.3 Ensaio de tração e flexão

Para a padronização dos ensaios de tração e flexão foram adotados os procedimentos estabelecidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), especificamente ASTM D638, que rege os ensaios de tração em plásticos, e a ASTM D790 que rege os ensaios de flexão em plásticos. Ambos os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universais BIPODI MBIO 2, a qual é exemplificada pela Figura 14. Para armazenamento entre a fabricação e os ensaios os espécimes foram mantidos entre 21°C e 25°C, em um ambiente controlado de umidade relativa do ar entre 45% e 50%, seguindo as indicações da ASTM D638.

Figura 21 - Máquina de ensaio universal.

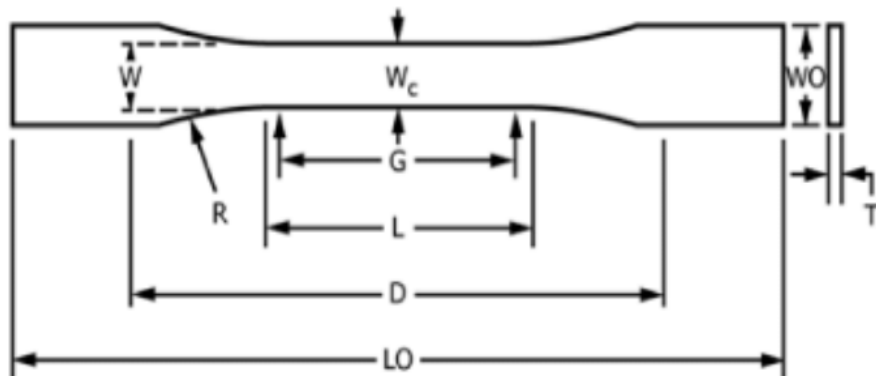


Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de resistência à tração, definiu-se as dimensões do corpo de prova (Figura 22). No estudo será utilizado o corpo de prova do tipo 1, cujas dimensões e tolerâncias estão listados na Tabela 1 - Dimensões para o corpo de prova ASTM.



Figura 22- Corpos de prova para ensaio de tração ASTM D638



Fonte: ASTM (2014)

Tabela 1 - Dimensões para o corpo de prova ASTM

Dimensões	7mm ou abaixo		Entre 7 mm e 14 mm
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
W	13	6	19
L	57	57	57
WO	19	19	29
LO	165	183	246
G	50	50	50
D	115	135	135
R	76	76	76

Fonte: Adaptado de ASTM (2014)

Para o ensaio de tração foi utilizada uma amostra do tipo 1, sendo indicado 5 mm/min de velocidade de avanço (Tabela 2 - Velocidades para o ensaio de tração)

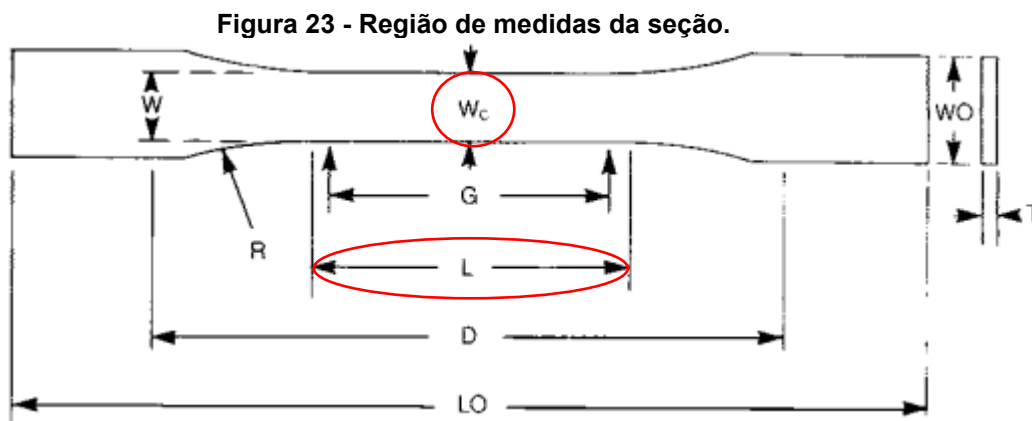
Tabela 2 - Velocidades para o ensaio de tração

Classificação	Tipo de espécime	Velocidade de ensaio
Rígidos e semi rígidos	1, 2, 3 e tubos.	5 ± 25%
		50 ± 10%
	4	500 ± 10%
		5 ± 25%
		20 ± 10%
		500 ± 25%
5	1 ± 25%	
	10 ± 25%	
	100 ± 10%	
	50 ± 10%	
Não Rígidos	3	500 ± 10%
		50 ± 10%
	2	50 ± 10%
		500 ± 10%



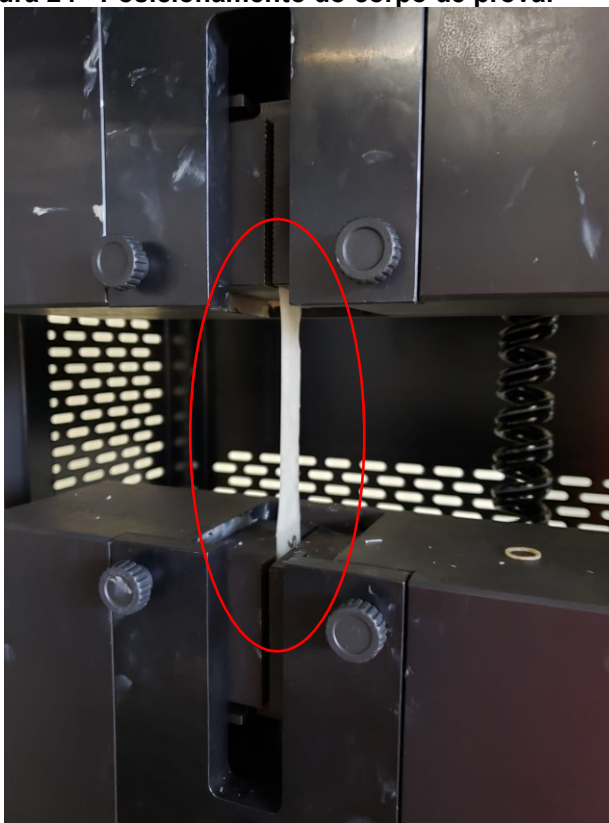
Fonte: ASTM (2014)

Durante o ensaio de tração foram utilizadas somente amostra não testadas. Antes da realização dos ensaios cada corpo de prova teve sua área da seção transversal aferida em 3 pontos diferentes, no centro e a cada 5mm de cada extremidade da região L e na região central  $W_c$ , como é observado na Figura 23.



Fonte: ASTM (2014)

Para a realização dos ensaios todos os corpos de prova foram posicionados no centro da garra do equipamento e orientados verticalmente em relação à máquina de ensaios, como exemplificado na Figura 24. Todos os ensaios de tração foram realizados em ambiente com umidade e temperatura controladas, com temperatura média de 20°C.

**Figura 24 - Posicionamento do corpo de prova.**

Fonte: Autoria própria.

Os valores de tensão a cada instante de tempo foram determinados pelo quociente da intensidade da força pela média aritmética dos valores obtidos da área da seção. De acordo as indicações fornecidas pela ASTM, o desvio padrão para qualquer parâmetro obtido durante o ensaio é dado pela Equação 4.

$$s = \sqrt{(\sum X - n\bar{X}^2)/(n - 1)} \quad (4)$$

Em que:

$s$  – valor estimado do desvio padrão;

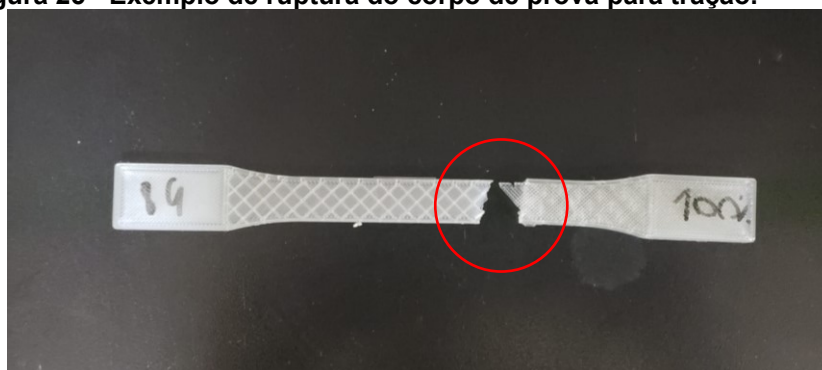
$X$  – Valor absoluto aferido;

$n$  – quantidade de aferições;

$\bar{X}$  – media aritmética das aferições.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração até atingirem ruptura, como indicado pela Figura 25.

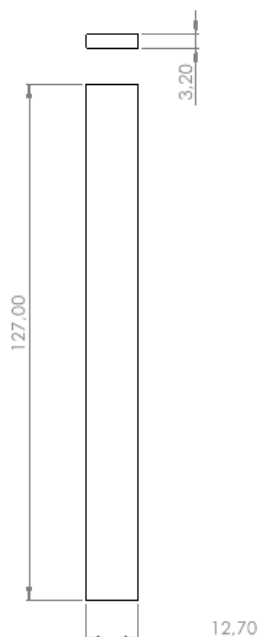
**Figura 25 - Exemplo de ruptura do corpo de prova para tração.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para determinar as características de resistência à flexão foi realizado um ensaio de flexão de três pontos seguidos os procedimentos estipulados pela ASTM D790, que rege os ensaios de flexão em plásticos. A seção 7.4 da ASTM D790 indica que para termoplásticos as dimensões recomendadas para o corpo de prova são de 127x12,7x3,2 mm, como indicado na Figura 26.

**Figura 26 - Representação do corpo de prova para termoplásticos ASTM D790.**



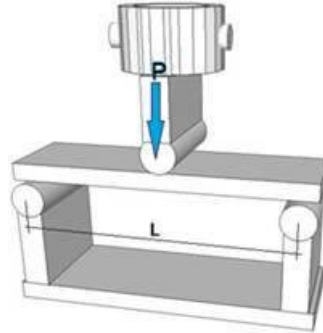
**Fonte: Autoria própria.**

Para armazenamento os espécimes foram mantidos entre 21°C e 25°C, em um ambiente controlado de umidade relativa do ar entre 45% e 50%, seguindo as indicações da ASTM D790.

Para o ensaio foram utilizadas apenas espécimes não testados as quais terão as dimensões da sessão (largura e profundidade) aferidas com um paquímetro de

modo individual. O corpo de prova será posicionado entre dois apoios (Figura 27) e a ferramenta irá pressionar o corpo de prova até que ocorra a ruptura. A taxa de avanço utilizada será calculada pela Equação 4.

**Figura 27 - Posicionamento do corpo de prova para o ensaio de flexão.**



**Fonte: Rabahi e Levy Neto (2016)**

$$R = ZL^2/6d \quad (4)$$

Em que:

$R$  – taxa de avanço da ferramenta. [mm/min]

$L$  – distância entre os suportes [mm]

$d$  – espessura do espécime [mm]

$Z$  – taxa de alongamento das fibras externas [mm/mm/min]

Durante o ensaio foram levantados os valores da carga aplicada até a ruptura da amostra. No ensaio utilizado o ponto de tensão máxima ocorre no centro dos pontos de apoio. Os valores de tensão nesse ponto a cada instante de tempo podem ser calculados com a Equação 5.

$$\sigma = 3PL/2bd^2 \quad (5)$$

Em que:

$\sigma$  – valor de tensão máximo a flexão [Mpa]

$P$  – intensidade da carga aplicada [N]

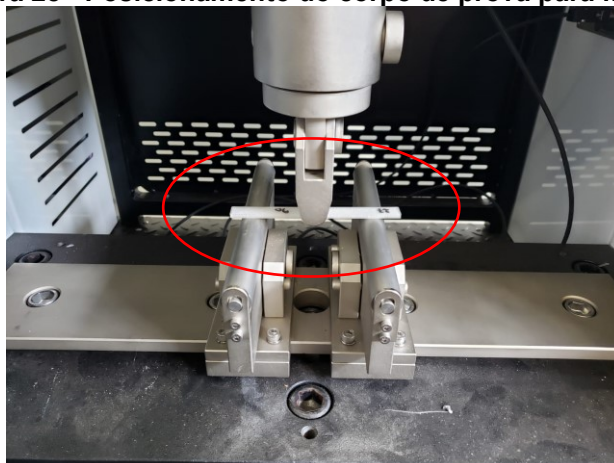
$L$  – distância entre os suportes [mm]

$b$  – largura do corpo de prova [mm]

$d$  – espessura do corpo de prova [mm]

Para o ensaio de flexão foi utilizado uma distância entre apoios (L) de 90 mm, com a velocidade de avanço da ferramenta (R) em 20 mm/min. A Figura 28 demonstra o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios universal. Os ensaios de flexão foram conduzidos em ambiente com umidade e temperatura controladas, a uma temperatura média de 20°C.

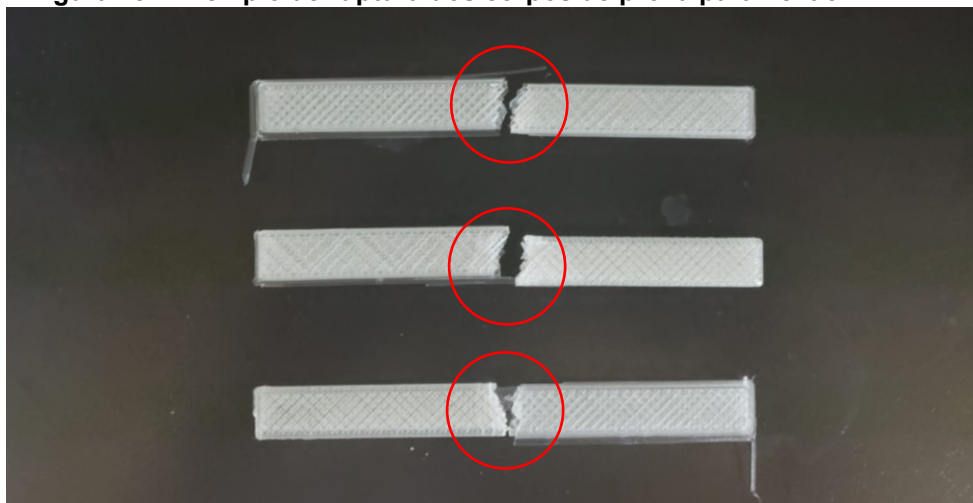
**Figura 28 - Posicionamento do corpo de prova para flexão.**



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão até sua ruptura, como pode ser observado na Figura 29.

**Figura 29 - Exemplo de ruptura dos corpos de prova para flexão.**



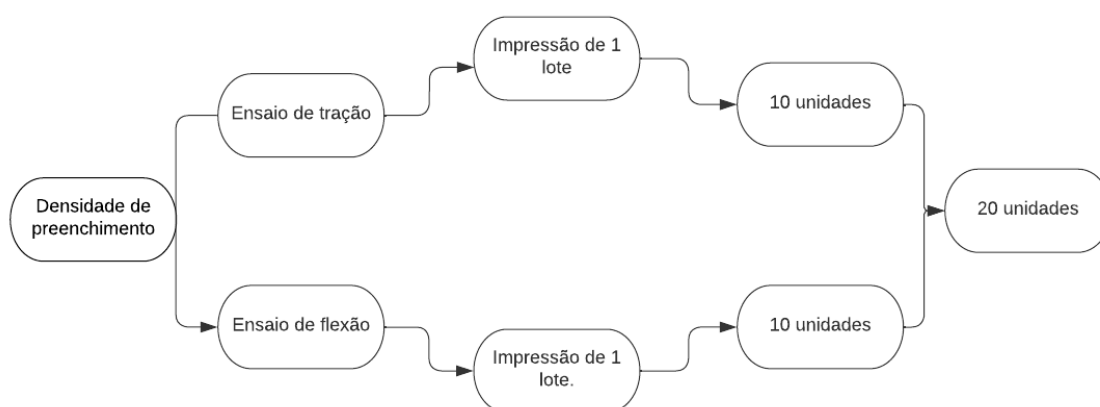
Fonte: Autoria Própria

#### 5.4 Análise estatística

Para a realização dos ensaios de tração de flexão as normas ASTM D638 e ASTM D790 estipulam o valor mínimo de 5 unidades para cada ensaio e mais 5 unidades para cada direção em que variem as propriedades mecânicas do material. Para termoplásticos caso a resistência do corpo de prova mude com a orientação das camadas de plástico é necessária a realização de mais 5 ensaios para cada situação.

Para o preenchimento selecionado existem 2 orientações do padrão Grid, como demonstrado pela Figura 3. Desse modo ao variar o preenchimento entre 10 e 100% serão necessários 20 corpos de prova para cada valor de densidade (Figura 30), sendo 10 para tração e 10 para flexão, totalizando 200 corpos de prova divididos em 20 grupos de ensaio de 10 unidades cada. Para cada grupo foi determinada a média e o desvio padrão para os dados obtidos, onde foi adotado um fator de confiança de 95%.

**Figura 30 - Fluxograma para quantificação dos corpos de prova.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Para minimizar a influência das variáveis externas nas propriedades mecânicas finais das peças, os corpos de prova serão confeccionados de maneira aleatória durante um período de 20 dias, sendo 10 dias para a fabricação dos corpos de prova de tração e 10 dias para os corpos de prova de flexão. A cada dia de fabricação foram produzidos 10 corpos de prova de uma única vez, os quais estarão dispostos de maneira aleatória variando a orientação de impressão e densidade de preenchimento.

Para análise estatística dos dados é recorrente entre trabalhos de pesquisa o uso de testes de normalidade e homogeneidade de variâncias com o intuito de validar a ANOVA, e o Teste de Scott Knott para verificar a diferença estatística dos dados obtidos, como utilizado por Lima *et al.* (2022) ao identificar a influência da temperatura ambiente na resistência mecânica do PLA, assim como Karamanlioglu e Alkan (2019) ao identificar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas do PLA. Para o presente estudo foi adotado como variável resposta os valores máximos de resistência a tração e flexão.

Como primeiro tratamento para os dados foi verificada a normalidade seguida da homogeneidade das variâncias (teste Bartlett) para validar a anova, onde:

- $p_{valor} \geq 0,05$ , as variâncias são iguais e/ou os dados são normalmente distribuídos;
- $p_{valor} \leq 0,05$ , as variâncias não são iguais e/ou não estão normalmente distribuídas.

Para analisar a influência dessas variáveis na resistência final da peça foi aplicado o teste de análise de variância ANOVA de um fator (*One Way Analysis of Variance*), considerando as seguintes hipóteses:

- $H_0$  (hipótese nula): Todas as médias são iguais,  $p_{valor} \geq 0,05$ .
- $H_1$  (hipótese alternativa): No mínimo uma média é diferente das outras,  $p_{valor} \leq 0,05$

Quando a hipótese nula não for rejeitada, implica que os níveis do fator analisado não geram nenhum efeito no valor final da variável respostas observadas, e com isso tem-se a conclusão da análise.

Ao rejeitar a hipótese nula, sabe-se que um dos fatores influenciaram no resultado final, porém apenas com o teste ANOVA não é possível saber quais foram os níveis que influenciaram mais que os outros. Assim quando a hipótese nula é rejeitada é necessária a realização de um teste *post hoc*.

Os testes *post hoc* consistem em realizar comparações para descobrir quais grupos apresentam diferença entre si. Para o teste de comparação de múltiplas médias foi utilizado o teste de Scott Knott (LIMA; MARQUES; SHIMANO, 2022), (KARAMANLIOGLU; ALKAN, 2019).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após finalizada a manufatura dos 200 corpos de prova, todos foram submetidos a seus respectivos ensaios, onde 100 amostras foram destinadas ao ensaio de tração e as demais 100 amostras para o ensaio de flexão. Durante o ensaio de tração 98 dos 100 corpos de prova manufaturados foram submetidos com sucesso ao ensaio de tração até sua ruptura, porém dois corpos de prova apresentaram fratura fora da região de interesse estipulada pela ASTM D638 (Região G da Figura 22), como evidenciado na Figura 31. Desse modo os corpos de prova de número 54 e 57 foram descartados do estudo. Para o ensaio de flexão todos os 100 corpos de prova utilizados sofreram ruptura de maneira correta.

**Figura 31 - Corpos de prova descartados.**



**Fonte: Autoria Própria.**

### 6.1 Ensaio de tração

Após a realização dos ensaios de tração foram levantados os valores de tensão máxima suportada pelos corpos de prova. As intensidades de tensão e deformação dos corpos de prova foram calculadas com as equações 1 e 2. Para comparação estatística dos valores de tensão máxima encontrados foram realizados uma analisa



ANOVA, seguida do teste de Scott Knott para comprovar a diferença estatística entre os valores de tensão máxima encontrados durante os testes. De acordo com a ANOVA ( $F=30,384$ ) com  $p\text{-valor} \leq 0,005$  e, a nível de significância de 5%. A Tabela 3 apresenta a decisão tomada a respeito dos testes de Normalidade e Homogeneidade.

**Tabela 3 - Testes dos pressupostos da análise de variância de Scott Knott.**

Teste	p-valor	Decisão
Normalidade	0,2691	Aceita
Homogeneidade	0,9183	Aceita

**Fonte: Autoria Própria.**

Como os pressupostos de normalidade e homogeneidade foram aceitos, foi dada procedência com o teste de Scott Knott, para separar em grupos de igualdade estatística os valores de preenchimento máximo encontrados. A Tabela 4 contém a representação dos grupos obtidos através do teste de Scott Knott, assim como a média de tensão máxima obtida para cada valor de preenchimento e seu respectivo desvio padrão.

**Tabela 4 - Teste de Scott Knott para o ensaio de tração.**

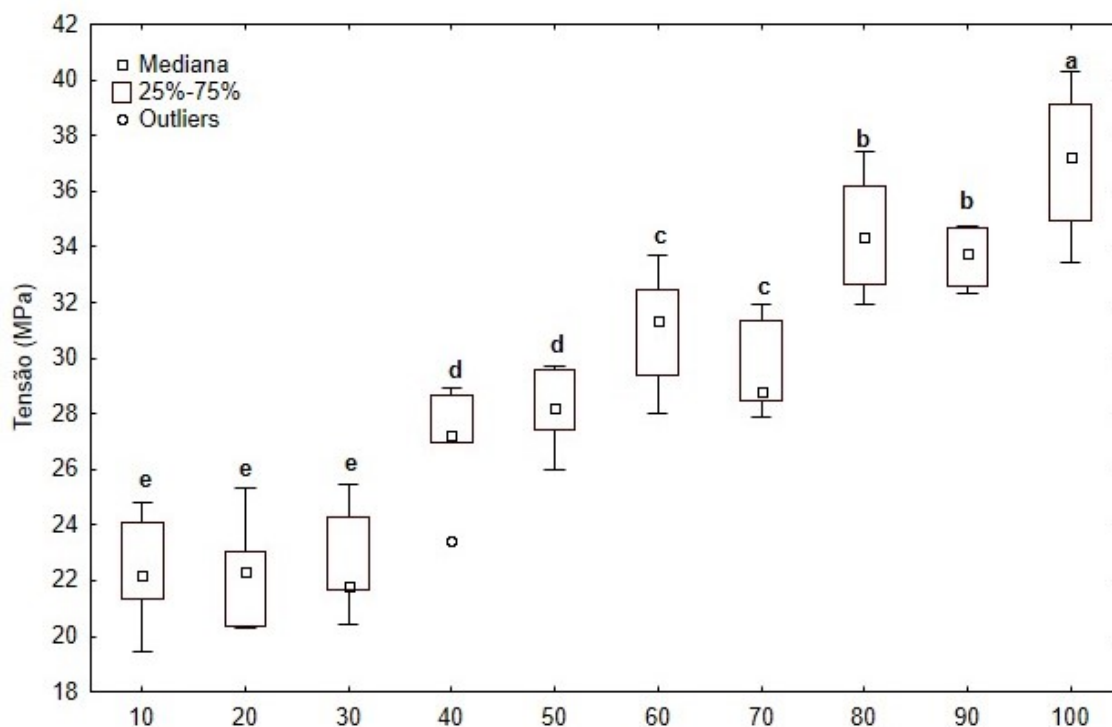
Tratamentos (%)	Medias (Mpa)	Desvio padrão	Grupos
100	37,04	4,91	a
80	34,51	4,80	b
90	33,65	4,66	b
60	30,97	5,13	c
70	29,68	4,98	c
50	28,18	4,56	d
40	27,04	5,27	d
30	22,72	5,25	e
10	22,36	5,24	e
20	22,26	5,29	e

**Fonte: Autoria Própria.**

Grupos de preenchimento que receberam o mesmo índice segundo o teste de Scott Knott são estatisticamente iguais, não havendo diferença significativa entre um valor de preenchimento e outro, desde que ambos façam parte do mesmo grupo. O teste de Scott Knott realizado apresentou índices de A até E, resultando em 5 grupos distintos de resistência máxima à tração, os quais são indicados pelo conjunto de letras a, b, c, d, e. Para melhor compreensão do teste de Scott Knott, as tensões

máximas médias encontradas para cada valor de preenchimento estão representadas na Figura 32.

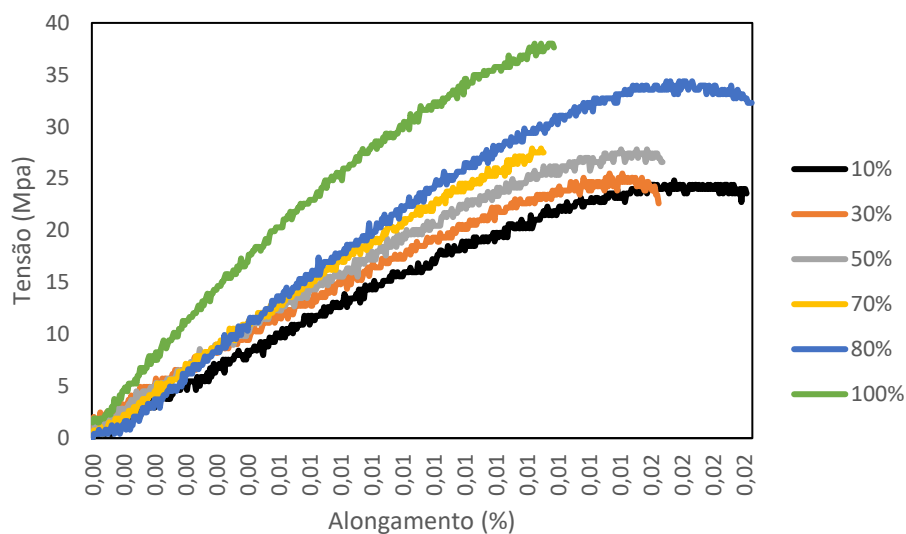
**Figura 32 -- Valores médios encontradas de resistência a tração.**



Fonte: Autoria Própria.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos foram levantadas as curvas de tensão x deformação a partir de um valor de preenchimento que represente cada grupo de igualdade estabelecido pelo teste de Scott Knott, totalizando 6 curvas representadas pela Figura 33.

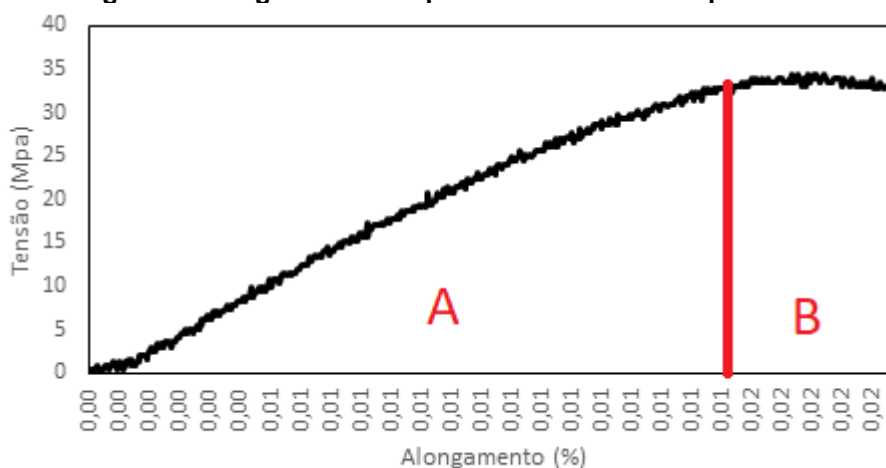
**Figura 33 - Curva tensão x deformação para o ensaio de tração.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Ao analisar o comportamento da curva de tensão x deformação observa-se um comportamento típico de um material frágil, com um intervalo dúctil estreito e baixo valor de alongamento (2%). A Figura 34 evidencia as regiões de comportamento elástico (Região A) e comportamento plástico (Região B) do corpo de prova submetido ao ensaio de tração simples.

**Figura 34 - Regiões de comportamento elástico e plástico.**



**Fonte: Autoria Própria.**

## 6.2 Ensaio de flexão.

Após a execução dos ensaios de flexão foram obtidos os valores de tensão máxima a flexão para cada corpo de prova testado utilizando a Equação 6. Em posse dos valores máximos de resistência a flexão foi realizada a análise ANOVA seguido do teste de Scott Knott para verificar a normalidade e homogeneidade dos dados. A Tabela 5 de acordo com a ANOVA ( $F=30,384$ ) com  $p\text{-valor} \leq 0,005$  e ao nível de significância de 5% indica a decisão tomada para os testes.

**Tabela 5 - Pressupostos para os ensaios de flexão.**

Teste	p-valor	Decisão
Normalidade	0,2676	Aceita
Homogeneidade	0,1605	Aceita

**Fonte: Autoria Própria.**

De acordo com o teste de Barlett a 5% de significância as variâncias podem ser consideradas homogêneas, desse modo, foi dada sequência com o teste de Scott Knott, para separar em grupos de igualdade estatística os valores de resistência obtidos. A Tabela 6 apresenta a média de tensão máxima suportada, assim como o desvio padrão calculado.

**Tabela 6 - Teste de Scott Knott para os ensaios de flexão.**

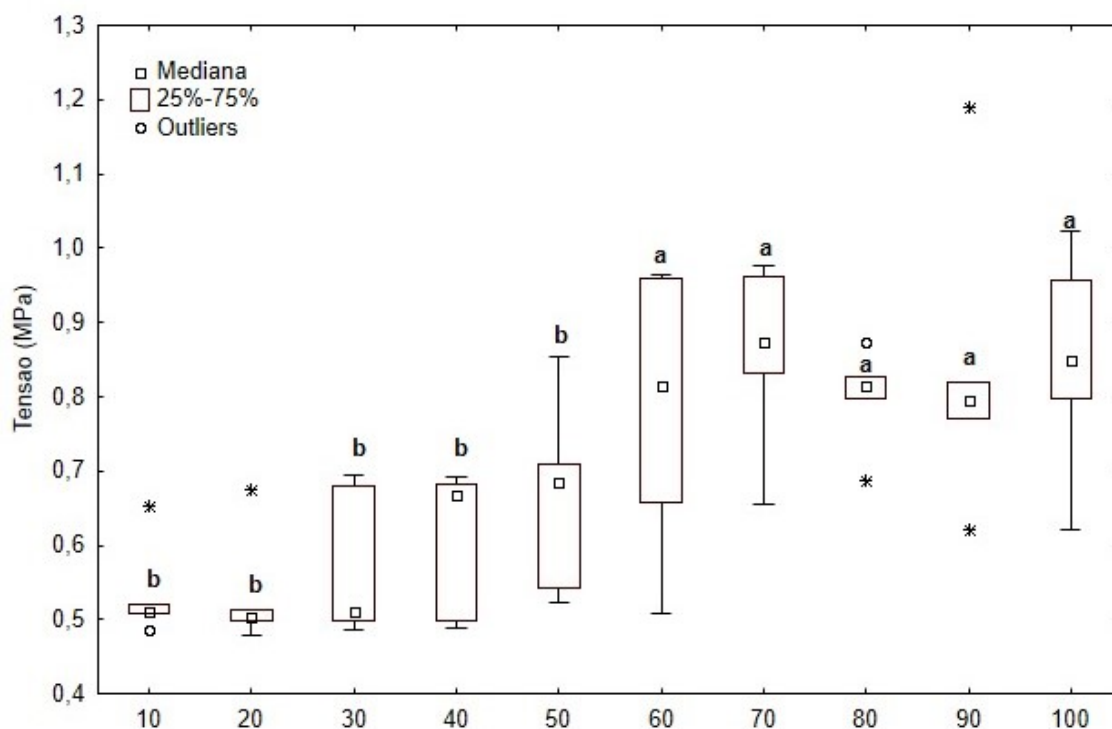
Tratamentos	Médias (Mpa)	Desvio padrão	Grupos
70	0,8624	0,1504	a
100	0,8494	0,1872	a
90	0,9318	0,1662	a
80	0,8024	0,1465	a
60	0,7866	0,1577	a
50	0,6668	0,1594	b
40	0,9158	0,1632	b
30	0,5636	0,1633	b
10	0,5313	0,1615	b
20	0,5289	0,1636	b

**Fonte: Autoria Própria.**

Grupos de preenchimento que receberam o mesmo índice segundo o teste de Scott Knott são estatisticamente iguais, não havendo diferença significativa entre um valor de preenchimento e outro, desde que ambos façam parte do mesmo grupo. O

teste de Scott Knott para o ensaio de flexão apresentou índices de A até B, resultando em dois grupos distintos de resistência máxima a flexão. As tensões máximas medias encontradas para cada valor de preenchimento, assim como seus respectivos grupos estão representadas na Figura 35.

**Figura 35 - Valores médios de resistência máxima a flexão.**



Fonte: Autoria Própria.

### 6.3 Discussão dos resultados

A partir dos dados de tensão máxima admissível obtidos em conjunto com o comportamento das curvas de tensão deformação foi possível constatar um comportamento típico de um material frágil e não dúctil das amostras, o que reflete a matéria prima utilizada (PLA). Por não apresentarem comportamento dúctil a tensão de escoamento não pode ser analisada pois o material não apresenta regime de deformação plástica, atingindo sua tensão de ruptura ainda no regime de deformação

elástica. Portanto a tensão máxima suportada durante o ensaio de tração pode ser considerada como tensão máxima admissível em projeto.

Ao aplicar o teste de Scott Knott foi possível comprovar que diferentes níveis de preenchimento geram alterações na resistência mecânica final da peça, porém pequenos incrementos na densidade de preenchimento não geram alterações significativas na resistência final do produto, desse modo os 10 valores de densidade analisados resultaram em 5 grupos de resistências distintos (Tabela 4). Os dados evidenciados na Tabela 4 demonstram que um incremento de 10% para 30% de preenchimento não proporcionou alteração estatística na resistência mecânica do corpo de prova, pois ambos pertencem ao grupo E, dessa forma de acordo com o teste de Scott Knott não há diferença na resistência entre o valor de 10% e 30%, tal diferença ocorre somente ao comparar os dados obtidos entre os valores de 10% e 40%, onde o valor de 10% pertence ao grupo “e” e a densidade de 40% pertence ao grupo “d”.

Com respeito aos dados de resistência máxima a flexão obtidos foi possível comprovar com a aplicação do teste de Scott Knott a influência do preenchimento na resistência máxima a flexão dos corpos de prova. No entanto pequenos incrementos na densidade de preenchimento não provocam, estatisticamente, alterações significativas na tensão máxima admissível à flexão. Como evidenciado pela Tabela 6 os 10 valores de densidade foram separados em dois grupos, sendo necessário um incremento do valor de 10% (grupo “b”) para uma densidade de 60% (grupo “b”) para obter-se uma alteração significativa no valor de resistência máxima a flexão. Porém uma análise mais a fundo da Figura 35 nota-se uma dispersão irregular dos dados e uma alta variabilidade dos resultados obtidos. Em específico cita-se o valor de 60% de preenchimento, o qual apresentou maior erro dentro os valores analisados. Nota-se também uma alta dispersão dos valores encontrados, em especial em 10%, 20%, 80% e 90% de preenchimento. Com a alta variabilidade dos dados obtidos, em conjunto com a alta dispersão dos dados não é possível estabelecer um resultado conclusivo com os dados de resistência máxima a flexão obtidos.

## 7 CONCLUSÃO

Os ensaios de tração realizados no estudo proporcionaram resultados satisfatórios, sendo possível, segundo o teste de Scott Knott, dividir os valores de preenchimento em 6 grupos distintos de resistência máxima a tração. Com relação ao ensaio de flexão os resultados encontrados foram inconclusivos, não representando a real resistência a flexão dos corpos de prova, desse modo tais valores não devem ser considerados ao realizar o dimensionamento de peças mecânicas. Tal resultado foi decorrido de tensão de flexão máxima suportada pelos corpos de prova ser muito baixa (inferior a 1Mpa), gerando uma carga muito baixa sob a célula de carga, a qual não possuía resolução suficiente para registrar a intensidade da carga aplicada aos corpos de prova. Esse resultado indica que a escolha para as dimensões do corpo de prova de flexão não foi adequada para as condições do ensaio.

Com o trabalho foi possível estabelecer uma base de dados considerável para futuros projetos de peças mecânicas que venham a utilizar a técnica FDM de manufatura aditiva, sendo possível escolher a densidade de preenchimento mais adequada de acordo com a necessidade do projeto. Porém a alteração de qualquer parâmetro utilizado no trabalho como espessura de parede, altura de camada, quantidade de camadas superiores e inferiores, temperaturas utilizadas, marca do filamento ou até mesmo a cor utilizada fugirá do envelope criado pelo trabalho, de tal modo que os valores de resistência encontrados não representarão os reais valores de resistência da nova peça manufaturada.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Devido à alta restrição do envelope criado futuros estudos a respeito da resistência do PLA são necessários para abranger todos os cenários possíveis com relação aos parâmetros de impressão. Desse modo é possível citar como sugestão para futuros estudos analisar o o impacto gerado na resistência mecânica da peça ao alterar o tipo de preenchimento, temperatura de impressão e a cor do filamento utilizado.



## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM D638-14**, Test Method for Tensile Properties of Plastics, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM D790**: Standard terminology for additive manufacturing technologies, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2007.
- ANGELOPOULOS, P. M.; SAMOUHOS, M.; TAXIARCHOU, M.. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication; a review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 37, p. 4031-4043, 26 ago. 2021. Elsevier BV.
- BARCZEWSKI, B. F. *et al.* Aplicações da manufatura aditiva em oftalmologia. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, [S.L.], v. 81, p. 1-10, 22 jul. 2022. *Revista Brasileira de Oftalmologia*
- BIONE, G. B. B. S *et al.* 3D printing applications during COVID-19 pandemic: a literature review. **Rgo - Revista Gaúcha de Odontologia**, [S.L.], v. 69, p. 1-10, 05 abr. 2021. FapUNIFESP (SciELO).
- BOLL, L. G *et al.* Using a 3D printer in cardiac valve surgery: a systematic review. **Revista da Associação Médica Brasileira**, [S.L.], v. 65, n. 6, p. 818-824, jun. 2019. FapUNIFESP.
- DALL'AGNOL, G.; SAGAWA, J. K.; TAVARES NETO, R. F. Scheduling for Additive Manufacturing: a literature review. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 1-10, 29 jul. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e1922>.
- FERNANDES, M. S. *et al.* Three-dimensional Printer Molds for Vaginal Agenesis: an individualized approach as conservative treatment. **Revista Brasileira de Ginecologia e Obstetrícia / Rbgo Gynecology And Obstetrics**, [S.L.], v. 44, n. 12, p. 1110-1116, 22 set. 2022. Georg Thieme Verlag KG.
- LIMA, L. F.; MARQUES, V. A. S.; SHIMANO, M. M.. Influência da temperatura ambiente no comportamento mecânico do PLA utilizado em manufatura aditiva. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 1-7, 12 set. 2022.
- MELCONIAN, S. **Mecânica técnica e resistência dos materiais**. São Paulo: Erica, 2018. ISBN 9788536527857
- RANZZI, A. *et al.* Estudo comparativo com e sem o uso de prototipagem em 3D de uma técnica não convencional no planejamento cirúrgico de revisão de artroplastia total de quadril. **Revista Brasileira de Ortopedia**, [S.L.], v. 57, n. 05, p. 884-890, 13 out. 2021. Georg Thieme Verlag KG.
- PORSANI, R. N.; SILVA, B. N.; HELLMEISTER, L. A. V. Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3D FDM open material.. In: **Anais do congresso**

**internacional e workshop design & materiais**, 2017, . Anais eletrônicos...  
Campinas, Galoá, 2017

RABAHI, R. F.; LEVY NETO, F. Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético através da teoria estatística de Weibull. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 542-551, set. 2016.

RECH, F. *et al.* Formulação e caracterização de potenciais filamentos compósitos de PLA e talos de tabaco para aplicação em manufatura aditiva. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 1-10, 12 fev. 2021.

SANTANA, L. *et al.* Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 1-10, 6 dez. 2018.

KARAMANLIOGLU, M.; ALKAN, U. Influence of time and room temperature on mechanical and thermal degradation of poly(lactic) acid. **Thermal Science**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 383-390, out. 2019. National Library of Serbia.

COPPOLA, B. *et al.* 3D Printing of PLA/clay Nanocomposites: influence of printing temperature on printed samples properties. **Materials**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 1947-1960, 11 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11101947>.

LIM, C. W. J. *et al.* An Overview of 3-D Printing in Manufacturing, Aerospace, and Automotive Industries. **Ieee Potentials**, [S.L.], v. 35, n. 4, p. 18-22, jul. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

LANZOTTI, A. *et al.* The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 21, n. 5, p. 604-617, 17 ago. 2015. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0135>.

MA, Y.; ZHANG, L. Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: a mini review. **Current Opinion In Food Science**, [S.L.], v. 44, p. 100803-100815, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>.

YAP, Y.L.; YEONG, W.y.. Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. **Virtual And Physical Prototyping**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 195-201, 3 jul. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>.

CONNER, B. P. *et al.* Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 1-4, p. 64-76, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [S.L.], v. 107, p. 367-392, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.

HASSE, J. A. *et al.* Increasing structuration rate of 3D printable concretes: the effect of viscosity enhancing admixtures. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1-50, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000400012>.

PILZ, T. L. *et al.* Systematic analysis of comparative studies between additive and conventional manufacturing focusing on the environmental performance of logistics operations. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 1-10, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x5289-20>.