

**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**  
**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO**  
**SUCKOW DA FONSECA**

**CARACTERIZAÇÃO DE PEÇAS**  
**FABRICADAS COM IMPRESSÃO 3D E**  
**ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DE DUAS**  
**IMPRESSORAS**

Clara Conceição Oliveira

Profs.: Paulo Victor Gomes dos Santos

João da Rocha e Silva

**Bragança**  
**Novembro 2020**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA**  
**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**

**CARACTERIZAÇÃO DE PEÇAS  
FABRICADAS COM IMPRESSÃO 3D E  
ANÁLISE DA RESOLUÇÃO DE DUAS  
IMPRESSORAS**

Clara Conceição Oliveira

Dissertação apresentada à Escola Superior de  
Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de  
Bragança para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Industrial e Engenharia Mecânica no  
âmbito da dupla diplomação com o Centro Federal de  
Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Profs.: Paulo Victor Gomes dos Santos

João da Rocha e Silva

**Bragança**

**Novembro 2020**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço principalmente aos meus pais, Edna e Georgen, pelo total apoio nesta jornada entre um oceano durante mais de dois anos, sem eles nada disso teria acontecido.

Aos meus irmãos, Guiherme e Raphael, pela presença e fraternidade.

Ao Rodrigo pelo zelo, paciência, amor e principalmente pelo incentivo dado para que eu iniciasse esta trajetória, sem sua insistência e afeto este intercâmbio não teria se iniciado e muito menos finalizado.

Agradeço aos meus orientadores, Paulo Victor e João Rocha, pela paciência e sempre disposição para me ajudar na elaboração deste projeto.

Aos verdadeiros amigos que caminharam e torceram por mim.

## RESUMO

Como a tecnologia de impressão 3D vem sendo muito utilizada no mundo, devido aos diversos ramos nos quais pode ser aplicada, um estudo mais aprofundado sobre os métodos de fabricação juntamente com as propriedades das peças fabricadas ajuda a encontrar melhores e diferentes aplicações destes materiais. Este trabalho tem o propósito de apresentar os materiais e métodos mais utilizados em impressão 3D, caracterizar os polímeros ABS e PLA através de ensaios de tração, flexão e absorção de água, além de estudar a resolução de duas impressoras empregadoras da tecnologia FDM. Nos ensaios mecânicos de tração aplicou-se a norma ASTM D638 – 14 com espécime do tipo V e para os ensaios de flexão dos polímeros empregou-se a norma ASTM D790 – 17 com espécime de formato retangular. Ambos os ensaios foram feitos numa máquina de testes universal da série Autograph AGS – X, Shimadzu. No ensaio de absorção de água a norma empregada foi ASTM D570 – 98 (aprovada novamente em 2018) com espécimes de perfil quadrado, segundo padrão ISO. As impressoras Cube 3 e *Ultimaker 3* das marcas 3D Systems e *Ultimaker*, respectivamente, foram as escolhidas para estudo da resolução através da análise de dois espécimes, um desenvolvido por *Makerbot* para observar detalhes qualitativos de impressão, como *stringing*, *bridging*, *overhangs*, furos e escala e outra peça desenvolvida pela aluna, baseada na norma ASTM 52902:2019, para análise dimensional da exatidão e precisão das medidas. Por fim, com os resultados das propriedades obtidos nos ensaios conseguiu-se uma breve caracterização destes materiais, concluiu-se que as peças fabricadas por impressão FDM são altamente anisotrópicas e desenvolveu-se um gancho simples que, além de decorar, serviu para suspender artefatos como mochilas e roupas. Com os resultados das análises das resoluções distinguiu-se qual das máquinas escolhidas é mais apta para fabricação de certos formatos geométricos, onde cada uma tem sua melhor aplicação.

Palavras-chave: ABS, PLA, impressão 3D, FDM, SLA, ensaios mecânicos, absorção de água, resolução

## **ABSTRACT**

As the 3D printing technology is being applied all over the world because of its wide range of application a deeper study about the 3D printing methods along with the properties of the fabricated parts helps to find different and better applications of the materials used in 3D printing. The aim of this Project was to introduce two types of polymers, ABS and PLA, and the most applied 3D printing processes, FDM and SLA. It also focused on defining tension, flexural properties and water absorption of the polymers presented above and study the resolution of two FDM printers. The test methods to evaluate the tension and flexural properties were based on the ASTM D638 – 14 and ASTM D790 – 17 standards. The water absorption test was based on the ASTM D570 – 98 standard. Two printers, Cube 3 and Ultimaker 3, had their resolutions compared using two benchmarks, one downloaded in Makerbot to compare qualitative printing details and the other developed by the student based on the ASTM 52902:2019 standard to analyse measure's dimensional accuracy and reliability. Lastly, a short mechanical characterization of the polymers was obtained with the tension and flexural tests and it was concluded that FDM parts are highly anisotropic. After that a simple hook was sized to apply PLA Polymer and with the results of the resolution analysis the best machine was chosen to manufacture certain geometric shapes.

Keywords: ABS, PLA, 3D printing, FDM, SLA, mechanical testing, water absorption, resolution

# ÍNDICE

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Organização dos capítulos.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Polímeros .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1. ABS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2. PLA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3. Resinas .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.4. Comparação entre PLA e ABS.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.5. Polímeros de alta performance na engenharia .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.6. Escolha do material para impressão 3D .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Manufatura aditiva.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1. Impressão 3D .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1.1. Arquivo .stl.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1.2. Orientação da peça e sua influência nas características de impressão.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1.3. Vantagens do método de Impressão 3D .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1.4. <i>Warping</i> na fabricação 3D .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Tecnologias de produção 3D .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1. Estereolitografia.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.2. Modelagem por Fusão e Deposição .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2.1. Parâmetros que influenciam no processo .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2.2. Como funciona o processo .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3. Resistência ligada a orientação de construção da peça .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.4. Aplicações .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Ascensão da impressão 4D .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.1. Ideia .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2. Blocos fundamentais de impressão 4D .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3. Abordagem simples do funcionamento .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5. Ensaios utilizados para a caracterização das peças fabricadas por impressão 3D .....</b>	<b>28</b>

2.5.1.	Ensaio de tração.....	29
2.5.1.1.	Procedimento do ensaio de tração .....	29
2.5.1.2.	Propriedades obtidas com o ensaio de tração.....	30
2.5.1.3.	Normas utilizadas no ensaio de tração .....	33
2.5.2.	Ensaio de absorção de água .....	33
2.5.2.1.	Procedimento do ensaio de absorção de água.....	34
2.5.2.2.	Normas usadas no ensaio de absorção de água .....	35
2.5.3.	Ensaio de flexão .....	35
2.5.3.1.	Procedimento do ensaio de flexão .....	36
2.5.3.2.	Propriedades obtidas com o ensaio de flexão .....	36
2.5.3.3.	Normas usadas no ensaio de flexão.....	37
2.6.	Estudo da resolução .....	38
2.6.1.	Resolução em x e y .....	38
2.6.2.	Resolução em z.....	38
2.6.3.	Resolução ligada às tecnologias.....	39
2.6.4.	Estudo de diferentes modelos que auxiliam na verificação da resolução de duas impressoras FDM .....	40
2.6.5.	Razões para se empregar um modelo .....	42
3.	Ensaio Experimentais.....	45
3.1.	Procedimento experimental do ensaio de tração .....	45
3.1.1.	Geometria e impressão dos espécimes .....	45
3.1.2.	Estabilização dos espécimes.....	49
3.1.3.	Ensaio de tração.....	49
3.2.	Procedimento experimental do ensaio de absorção de água.....	50
3.2.1.	Fabrico dos espécimes .....	50
3.2.2.	Estabilização dos espécimes.....	52
3.2.3.	Ensaio de absorção de água .....	53
3.3.	Procedimento experimental do ensaio de flexão em três pontos .....	53
3.3.1.	Fabrico dos espécimes .....	53
3.3.2.	Estabilização dos espécimes.....	55
3.3.3.	Ensaio de flexão .....	55
3.4.	Resolução .....	56
3.4.1.	Impressoras escolhidas.....	57
3.4.2.	Desenvolvimento do modelo para análises geométrica e dimensional.....	57

3.4.3.    Fabrico e controlo dimensional dos modelos .....	59
<b>4. Apresentação e análise dos resultados.....</b>	<b>62</b>
4.1.    Ensaio de tração .....	62
4.1.1.    Análises .....	65
4.2.    Ensaio de absorção de água .....	68
4.2.1.    Análises .....	69
4.3.    Ensaio de flexão.....	70
4.3.1.    Análises .....	73
4.4.    Análise dimensional .....	74
4.4.1.    Resultados do estudo da resolução.....	82
4.5.    Caso de aplicação dos valores encontrados para as propriedades nos ensaios realizados .....	88
<b>5. Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>93</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE A – ESPÉCIME PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE B – ESPÉCIME PARA O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA... 102</b>	
<b>APÊNDICE C – ESPÉCIME PARA ENSAIO DE FLEXÃO .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE D – REPRESENTAÇÃO DESENHO TÉCNICO MANDALA .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE E – AMOSTRAS EM ABS (TRAÇÃO).....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE F – AMOSTRAS EM PLA+ (TRAÇÃO) .....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE G – AMOSTRAS EM ABS (FLEXÃO).....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE H – AMOSTRAS EM PLA+ (FLEXÃO) .....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Classificação tradicional dos polímeros. Adaptado de Kantoviscki [2] .....	4
Figura 2 Perfis do ABS e PLA. Adaptado de [15] .....	9
Figura 3 Etapas do processo de impressão 3D .....	11
Figura 4 Espécime composto por 124 facetas. ....	13
Figura 5 Ilustração da altura do cordão. Adaptado de Giang [19] .....	13
Figura 6 Tolerância Angular. Adaptado de [19].....	14
Figura 7 Efeitos de solidificação. a) pincushion e b) curling. Adaptado de [22] .....	16
Figura 8 Processo de impressão 3D SLA [24] .....	17
Figura 9 Representação da mesoestrutura das peças fabricadas pelo processo de Impressão 3D por extrusão. Adaptado de [26] .....	20
Figura 10 Padrões de suportes da impressora FDM Robox Dual. Adaptado de [32].....	22
Figura 11 Percentagem de preenchimento de um espécime [33] .....	22
Figura 12 Tipos de preenchimento. Adaptado de [32] .....	23
Figura 13 Processo FDM. Adaptado de [35].....	24
Figura 14 Micrografia da área da seção transversal de uma peça construída por FDM. Adaptado de [36] .....	26
Figura 15 Peça mostrando as etapas. Adaptado de [38] .....	28
Figura 16 Comportamento tensão-deformação para polímeros. Adaptado de [43] .....	30
Figura 17 Material com região representada pela Lei de Hooke. Adaptado de ASTM D638-14.....	32
Figura 18 Tensão limite de escoamento. Adaptado de [44] .....	32
Figura 19 Modelos segundo [60]–[63] .....	41
Figura 20 Modelos segundo [64]–[66] .....	42
Figura 21 Modelos segundo [67], [68] .....	42
Figura 22 Diagrama de Ishikawa para obtenção de modelo/ peça .....	44
Figura 23 Tension Test Specimens for Sheet, Plate and Molded Plastics. Adaptado de ASTM D638 – 14 .....	46
Figura 24 Espécime tipo V da norma ASTM D638 – 14 .....	46
Figura 25 Robox Dual durante a construção dos espécimes em ABS.....	47

Figura 26 Layout do programa AutoMaker com os espécimes e parâmetros escolhidos .....	48
Figura 27 Espécimes em ABS (a) e PLA+ (b) para ensaio de tração.....	48
Figura 28 Espécime em ABS fixo à máquina.....	50
Figura 29 Espécimes após o ensaio de tração em ABS (a) e PLA (b) .....	50
Figura 30 Espécime para Ensaio de Absorção de água .....	51
Figura 31 Espécimes em ABS (a), PLA+ e PLA para ensaio de absorção de água (b) .	52
Figura 32 Balança para pesagem dos espécimes .....	52
Figura 33 Imagem do espécime em ABS imerso em água destilada.....	53
Figura 34 Esquema do espécime no suporte para Ensaio de Flexão .....	54
Figura 35 Corpo de prova em ABS antes do ensaio.....	56
Figura 36 Corpos de prova após o ensaio.....	56
Figura 37 Detalhe da casa para estudo da resolução .....	58
Figura 38 Mandala em sua última versão .....	58
Figura 39 Modelo desenvolvido por MakerBot .....	59
Figura 40 Peças fatiadas no programa Cura .....	60
Figura 41 Peças impressas na Ultimaker 3 .....	60
Figura 42 Peças impressas na Cube 3.....	60
Figura 43 Componentes usados na obtenção das medidas dos espécimes .....	61
Figura 44 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em ABS	62
Figura 45 Diagrama Tensão x Deformação das amostras em PLA+ .....	64
Figura 46 Valores de resistência à tração das Amostras em ABS e PLA .....	65
Figura 47 Valores dos módulos de elasticidade das amostras em ABS e PLA.....	67
Figura 48 Média das tensões de tração .....	67
Figura 49 Média dos módulos de elasticidade.....	67
Figura 50 Aumento percentual do peso das amostras .....	69
Figura 51 Média do aumento percentual do peso das amostras .....	69
Figura 52 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em ABS	71
Figura 53 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PLA+ .....	72
Figura 54 Valores de resistência à Flexão das amostras em ABS e PLA+ .....	73

Figura 55 Valores dos módulos de elasticidade dos espécimes de flexão em ABS e PLA .....	74
Figura 56 Mandala na Ultimaker 3.....	75
Figura 57 Mandala na Cube 3.....	75
Figura 58 Peça fornecida por Makerbot. Imprimida por a) Cube 3, b) Ultimaker 3.....	78
Figura 59 Dimensão e acabamento.....	79
Figura 60 Stringing.....	79
Figura 61 Teste de escala.....	80
Figura 62 Dimensão e formato .....	80
Figura 63 Bridging .....	80
Figura 64 Análise de angulação na Ultimaker 3.....	81
Figura 65 Análise de angulação na Cube 3 .....	81
Figura 66 Continuação análise de ângulos na Ultimaker 3 .....	81
Figura 67 Continuação análise de ângulos na Cube 3 .....	81
Figura 68 Escrita na vertical Ultimaker.....	82
Figura 69 Escrita na vertical Cube .....	82
Figura 70 Área transversal do gancho (em mm) .....	88
Figura 71 Viga inicialmente curva sujeita a flexão. Adaptado de [90] .....	90
Figura 72 Análise de tensão no software Autodesk Inventor 2020.....	92
Figura 73 Gancho dimensionado no Autodesk Inventor.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resina para impressão SLA. Adaptado de Formlabs (2014) e 3D Systems (2018) [13], [14].....	8
Tabela 2 Parâmetros de fabricação de modelo em ABS e em PLA+ .....	47
Tabela 3 Parâmetros de impressão dos espécimes em PLA e PLA+ para ensaio de Absorção de Água .....	51
Tabela 4 Parâmetros de fabricação dos modelos em ABS e PLA+ .....	54
Tabela 5 Especificações das impressoras .....	57
Tabela 6 Legenda sobre setas, círculos e quadrados que auxiliam no estudo da resolução com a mandala .....	59
Tabela 7 Parâmetros de impressão para as peças .....	60
Tabela 8 Valores encontrados de propriedades mecânicas das amostras em ABS .....	63
Tabela 9 Valores encontrados de propriedades mecânicas das amostras em PLA .....	65
Tabela 10 Valores das dimensões e massas dos espécimes antes do ensaio .....	68
Tabela 11 Valores das dimensões e massas dos espécimes após o ensaio .....	68
Tabela 12 Taxa de movimento da cabeça aplicadora de carga.....	70
Tabela 13 Valores encontrados para propriedades no ensaio do Flexão do ABS .....	71
Tabela 14 Propriedades mecânicas de flexão PLA+ .....	73
Tabela 15 Valores encontrados de dimensões dos componentes da Mandala construída pela Ultimaker 3 (em mm).....	76
Tabela 16 Valores encontrados de dimensões dos componentes da Mandala construída com a Cube 3 (em mm) .....	77
Tabela 17 Valores do desvio padrão para os componentes das mandalas (em mm).....	84
Tabela 18 Valores de desvio padrão para os rasgos e furos das mandalas (em mm).....	87
Tabela 19 Valores nominais dos furos cilíndricos (em mm).....	87
Tabela 20 Dados para dimensionamento do gancho .....	89
Tabela 21 Parâmetros encontrados .....	92

# Capítulo 1

## 1. Introdução

O uso da impressão 3D vem se intensificando cada vez mais no mundo, seja para o utilizador final, difundindo o conceito de *DIY (Do It Yourself)* ou nas grandes empresas. Um exemplo é a *New Balance*, que junto com a *Formlabs* (grande empresa no ramo de impressão 3D), desenvolveram uma nova resina, chamada *Rebound Resin* para uso nas solas de calçado desportivo. Não só empresas no ramo dos calçados, como as de automóveis, aeroespaciais, médicas, entre outras têm se mostrado adeptas a este novo tipo de tecnologia. Ela é muito usada quando se requer alta complexidade, originalidade e exatidão.

Apesar de ser bastante prática no que concerne à gestão de projeto, desde o planeamento até as fases de execução e finalização é preciso um mínimo de conhecimento sobre as tecnologias mais utilizadas, parâmetros que influenciam na construção e acabamento das peças, entre outros fatores.

Um vasto número de tecnologias está disponível no fabrico aditivo, mas os recursos laboratoriais são limitados e, por isso escolheu-se falar sobre as tecnologias mais difundidas no meio académico, *FDM* e *SLA*, além de trabalhar com dois materiais poliméricos (ABS e PLA) e estudar duas impressoras que utilizam a tecnologia *FDM*.

### 1.1. Enquadramento

O uso da tecnologia de impressão 3D vem se intensificando cada vez mais no mundo, pois pode ser usada nos mais diversos ramos, desde o culinário até aeroespacial, permitindo um projeto único, assim um estudo sobre as tecnologias mais empregadas, juntamente com os parâmetros de fabricação ajudam na melhoria dos processos e conseqüentemente na qualidade das peças construídas.

Por este aumento no uso da tecnologia de impressão 3D é necessário um estudo sobre as propriedades mecânicas das peças fabricadas com esses procedimentos, a fim de encontrar melhores e diferentes aplicações destes materiais.

Pelos motivos apresentados, os assuntos escolhidos para esta dissertação são os explicitados abaixo.

## **1.2. Objetivos**

Com este trabalho pretende-se realizar uma revisão bibliográfica sobre a impressão 3D empregando as tecnologias *SLA* e *FDM* e sobre os polímeros ABS e PLA. Examinar as propriedades mecânicas de tração, flexão, absorção de água em espécimes construídos com impressoras *FDM* utilizando os polímeros citados anteriormente e comparar os valores experimentais com valores da literatura. Outro objetivo deste trabalho é comparar a resolução de duas impressoras, a fim de saber as restrições e melhorar a forma de trabalhar com elas.

## **1.3. Organização dos capítulos**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é explicado o motivo da escolha deste tema, assim como os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo são apresentadas revisões bibliográficas sobre dois tipos de impressão 3D, *FDM* (modelagem por fusão e deposição) e *SLA* (estereolitografia), além dos polímeros usados neste trabalho, ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e PLA (poliácido láctico). Também são apresentados os fundamentos teóricos sobre os ensaios mecânicos de tração, flexão e ensaio de absorção de água, como também um estudo sobre a resolução das impressoras que empregam tecnologias de impressão 3D, mais especificamente *FDM*.

No terceiro capítulo é apresentada toda a parte experimental desta tese, ou seja, as normas para realização dos testes, tipos de espécimes e confecção deles, seu condicionamento e a prática dos ensaios. Inclusive as impressoras escolhidas para análise da resolução como também o desenvolvimento e fabricação do espécime para isso.

No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios e análise da resolução.

Por fim, no capítulo cinco obtém-se conclusões baseadas nos resultados obtidos dos ensaios, análise da resolução e são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### 2. Fundamentos Teóricos

#### 2.1. Polímeros

Polímero segundo IUPAC [1] é uma substância composta por macromoléculas e sua caracterização é bastante complexa, por isso abaixo é apresentada uma hierarquia simplificada, Figura 1, feita de acordo com os comportamentos térmico e mecânico dos materiais. Onde o comportamento mecânico é analisado segundo a resistência às deformações mecânicas, enquanto o comportamento térmico se dá pela análise do desempenho da matéria quando submetida ao aquecimento.

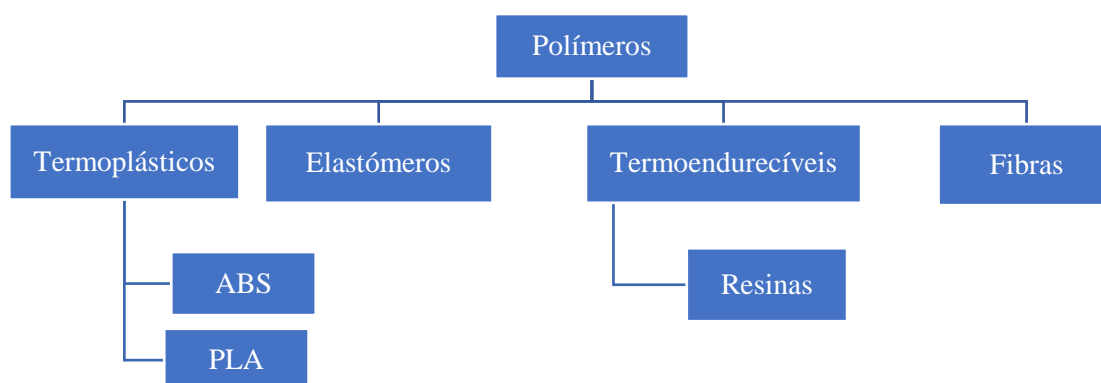


Figura 1 Classificação tradicional dos polímeros. Adaptado de Kantoviski [2]

Na Figura 1 o termo termoplástico, de forma simples, refere-se a materiais que quando aquecidos amolecem e fluem, assim podem ser moldados no formato desejado, enquanto os termoendurecíveis (ou termofixos) são materiais que não se fundem depois de curados e são muito estáveis às variações de temperaturas. Quando reaquecidos decompõem-se antes de fundir e não são recicláveis. Já os elastómeros são materiais altamente flexíveis que possuem a capacidade de retornar à sua forma original após receber forte pressão ou carga. As fibras dividem-se em naturais, sintéticas (antes denominadas artificiais) e mistas e satisfazem a relação do comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior do que o diâmetro ( $L/D > 100$ ) [3].

Este trabalho se concentra nos polímeros ABS e PLA que são os materiais utilizados nas partes teórica e prática (impressão 3D) dele. A escolha de um material depende das características exigidas de projeto, no caso deste trabalho são, ABS e PLA pois são os polímeros disponíveis no *FabLab* do Instituto Politécnico de Bragança em Portugal. As características destes polímeros são mais bem explicitadas a seguir.

### **2.1.1. ABS**

O ABS é um termoplástico derivado do petróleo largamente utilizado na indústria e muito utilizado na impressão 3D. Ser termoplástico significa dizer que quando o material é aquecido, o mesmo amolece e flui, podendo ser trabalhado até a forma que se quer, e quando arrefece retorna ao estado sólido sem alteração de suas propriedades.

O ABS, sigla para acrilonitrila butadieno estireno é formado pela copolimerização destes três monômeros, eles acrescentam diferentes características ao material. O grupo butadieno fornece boa resistência ao impacto, o grupo da acrilonitrila a resistência à temperatura e química, enquanto o estireno proporciona um aumento da rigidez [4], [5].

Por possuir boa resistência química é empregado em diversas condições ambientais (chuva e vento), mas o seu uso diretamente ao sol deve ser evitado pois o material deteriora-se mais rápido, também apresenta baixa densidade quando comparado a outros polímeros, exemplo o PLA. Seu ponto de fusão (entre 220 e 260 °C) facilita o uso na impressão 3D, tem aparência opaca e é disponível em diversas cores. Também apresenta boas características não mecânicas, como por exemplo o fato de ser fácil de pintar, assim possibilita a utilização nos casos em que o material deve ser de cor diferente da impressa. Tem uma boa interação com cola, então, depois da impressão 3D de várias partes, pode-se juntá-las num corpo só. O ABS também é fácil de maquinar, ou seja, é um material fácil de dar acabamento posterior, exemplos de processos são lixamento e o tratamento com acetona, que permite deixar a superfície do material mais lisa [5].

De acordo com Kantovisck (2011) [2] é um material predominantemente amorfo e resiste à temperatura, mas para ser trabalhado numa impressora 3D precisa ter a mesa aquecida e controle de temperatura dentro da máquina para evitar *warping*, que é causado pela contração do material durante o arrefecimento, pois as seções da peça arrefecem a diferentes velocidades, fazendo com que as dimensões também mudem a taxas diferentes.

O ABS é um polímero muito empregado em peças de interior de carros, teclados de computador, utensílios de cozinha, filamentos de impressão 3D e brinquedos.

### **2.1.2. PLA**

O mercado de polímeros está em constante crescimento, elevando o consumo destes materiais e gerando um alto número de resíduos que se acumulam em locais não propícios, causando problemas ambientais ao redor do mundo, por isso a busca pela produção de materiais poliméricos menos nocivos ao meio ambiente. Dentre estes plásticos encontra-se o Polilático ou PLA, que é um polímero biobaseado.

O poliácido láctico é um polímero sintético termoplástico biodegradável, sua degradação leva de seis meses a dois anos quando descartado corretamente em compostagens com condições adequadas de luz, umidade, temperatura e quantidade correta de microrganismos. Também é reciclável, biocompatível em contato com tecido vivo e bioabsorvível (a degradação do plástico no corpo humano leva a diminuição do pH das células e/ou tecidos gerando um acúmulo de ácido láctico na região e, em alguns casos, este acúmulo desenvolve um processo inflamatório) [6].

Formado pelo ácido láctico, que é produzido pelos mamíferos ou por bactérias, através da fermentação de vegetais ricos em amido, exemplos são a beterraba, milho, trigo e batata [7]. Sua diferença para o plástico de amido é que o PLA usa o amido para chegar ao ácido láctico, enquanto o outro usa o amido como matéria principal.

Suas aplicações incluem embalagens alimentícias, cosméticas, sacolas plásticas de mercado, garrafas, pratos, filamento de impressão 3D, dispositivos médicos, por exemplo, implantes de tecido, enxertos ósseos e artefatos de fixação de fraturas, já que com a degradação do plástico não é preciso removê-lo do corpo hospedeiro [8].

Quando comparado aos polímeros derivados de fontes fósseis, o PLA possui propriedades mecânicas tão boas quanto, especialmente, alta rigidez, transparência e boa capacidade de moldagem. Uma das desvantagens do PLA é sua baixa resistência ao impacto e à alta temperatura. Então faz-se uso de plastificantes orgânicos (aumentam a flexibilidade dos plásticos), exemplos são o glicerol e sorbitol. Algumas vezes são inseridas fibras naturais ou fabricadas blendas (mistura mecânica de diferentes plásticos que não reagem quimicamente entre si) para obter uma melhoria destas características.

O filamento de PLA é usado na impressão 3D porque é fácil de imprimir graças a sua baixa temperatura de fusão, aproximadamente 180 °C, possui um acabamento de boa qualidade e não precisa de uma base aquecida. Quando usado para impressão de peças de grande tamanho contrai bem pouco, por isso não apresenta o efeito *warping* (empenamento devido à contração).

De acordo com Pereira et al. (2016) [9], a aplicação de pigmentos numa amostra de PLA causa uma variação no Módulo de Elasticidade do material, originando um aumento na rigidez do mesmo. Enquanto a Tensão e Deformação na ruptura apresentam um decréscimo nos valores, pois devido à natureza do pigmento, muitas vezes mineral, causar um aumento na rigidez leva a uma diminuição nas outras propriedades apresentadas. Peças impressas com PLA podem ser personalizadas para um determinado uso, alterando somente a cor na qual são impressas.

### **2.1.3. Resinas**

As resinas usadas nos processos de impressão *SLA* são compostos precursores dos polímeros termofixos (ou termoendurecíveis) e são fotossensíveis na forma líquida.

A maioria das resinas usadas em impressão 3D são à base de epóxi (família de resinas sintéticas), acrilatos e éter vinílicos [10]. Cada formulação proporciona às resinas propriedades mecânicas e térmicas diferenciadas, necessárias para a aplicação do produto.

As resinas à base de epóxi proporcionam maior adesão às camadas, ainda apresentam processo de cura após a fotopolimerização, aumentando a resistência mecânica da peça antes da etapa de pós-cura (as resinas à base de acrilato não apresentam esta característica). As peças construídas com resinas à base de epóxi apresentam baixa retração em relação às resinas à base de acrilatos e quando combinadas com éter vinílicos polimerizam-se rapidamente [10], [11]. Por causa das variadas vantagens apresentadas acima, hoje em dia muitas resinas são à base de epóxi, mas dependendo da formulação, a peça pode apresentar diferentes graus de polimerização (ou endurecimento, 65 a 90 %) [12]. As dimensões da peça também influenciam no grau de polimerização, que pode ser diferente na parte mais interna e externa do objeto, que influencia nas propriedades mecânicas e comportamento térmico das peças.

As resinas à base de acrilatos são o primeiro tipo desenvolvido para estereolitografia. Estas resinas apresentam a desvantagem de sua polimerização ser inibida pelo oxigênio, podendo gerar superfícies não totalmente curadas, não tão firmes. Geralmente estas resinas possuem alta viscosidade, originando peças pouco flexíveis.

A Tabela 1 a seguir apresenta algumas resinas e características:

*Tabela 1 Resina para impressão SLA. Adaptado de Formlabs (2014) e 3D Systems (2018) [13], [14]*

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Exemplos</b>
Resina padrão	Acabamento suave; Relativamente frágil; Protótipos com superfície detalhada	White FLGPWH04 (FormLabs) Color Base FLGPCB01 (FormLabs)
Resina clara	Transparente; Requer pós-processo para um acabamento bem claro	Accura 60 (3D Systems) VisiJet SL CLear (3D Systems)
Resina para fundição	Baixa produção de cinzas depois da queima; Usada para criar padrões de moldes; Reproduz mínimos detalhes	Accura CastPro (3D Systems) Accura CastPro Free (3D Systems)
Resina de alta temperatura	Resistência a altas temperaturas; Usada em moldes de injeção; Alto custo; Pós cura necessária	VisiJet SL HiTemp (3D Systems) Accura Phoenix (3D Systems)
Resina dentária	Biocompatível; Duráveis	Accura ClearVue (3D Systems) FLDLCL01 (FormLabs)
Resina tipo borracha	Semelhante a borracha; Baixa precisão dimensional	FLFLGR02 (FormLabs)

#### **2.1.4. Comparação entre PLA e ABS**

A Figura 2 apresenta algumas características do PLA e ABS, que sendo representadas graficamente podem ser aprendidas de forma mais clara. Como forma de interpretar a imagem, quanto mais perto do fim, melhor é aquela característica do material. Esta comparação não mostra se um material é melhor do que o outro, pois as propriedades dependem da aplicação do produto fabricado, podendo ser boa ou ruim.

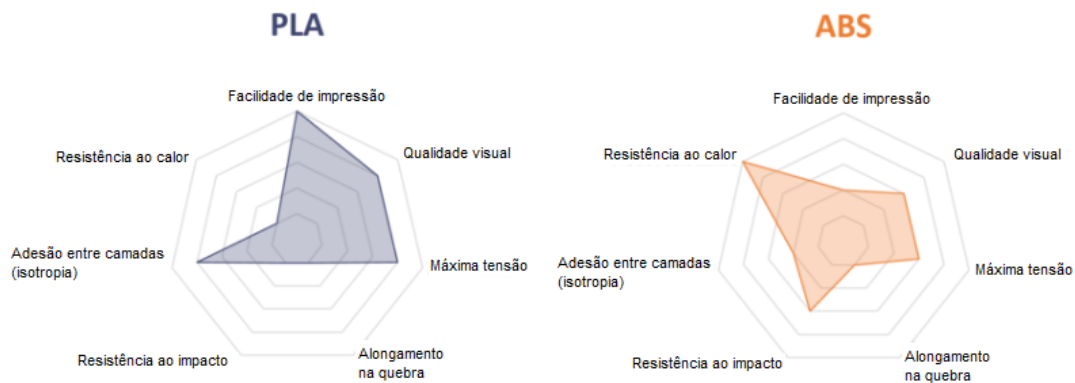


Figura 2 Perfis do ABS e PLA. Adaptado de [15]

Os termos da Figura 2 referem-se a:

- i. Facilidade de imprimir: adesão à base de impressão, frequência de impressões ruins, entre outras características. O ABS necessita de uma mesa de impressão aquecida para evitar *warping* e temperaturas de impressão um pouco mais altas quando comparado ao PLA, mas pode ser colado facilmente;
- ii. Qualidade visual: a qualidade superficial do objeto. O ABS apresenta uma qualidade superficial um pouco menor quando comparado ao PLA, mas pode ser pós-processado com lixa, pintado, utilizar vapor de acetona para um acabamento brilhante;
- iii. Tensão máxima que um objeto suporta antes da quebra quando testado em tração. O PLA suporta uma maior tensão em comparação ao ABS.
- iv. Alongamento na rutura: comprimento máximo que uma peça é esticada antes de quebrar. Ambos sofrem uma pequena deformação devido a sua rigidez.
- v. Resistência ao impacto: energia necessária para quebrar um objeto com impacto repentino. Por ser menos rígido, o ABS tem uma maior resistência ao impacto em relação ao PLA;
- vi. Adesão entre camadas: quão boa é a adesão entre camadas. A adesão entre as camadas de material do PLA é maior se comparada ao ABS;
- vii. Resistência ao calor: temperatura máxima que um objeto suporta antes de amolecer e deformar. ABS funciona melhor em aplicações a altas temperaturas por causa de sua mais alta temperatura de transição vítrea. PLA perde sua integridade estrutural e começa a deformar, principalmente se sob carga.

### **2.1.5. Polímeros de alta performance na engenharia**

Dentre os vários polímeros usados na impressão 3D, estão os polímeros de alta performance, desenvolvidos para serem aplicados onde existe a necessidade de resistência à abrasão e desgaste. Aplicados também quando se quer resistência à temperatura, isolamento ou condução na indústria de engenharia elétrica, empregados em componentes para a indústria química, entre outras aplicações. Exemplos de polímeros de alta performance são o *PEEK* (poliéteretercetona) e o *PEI* (Polieterimida).

O *PEEK* é um polímero termoplástico semicristalino com ponto de fusão em 341 °C, podendo trabalhar até 260 °C, maiores valores dentre os plásticos de alta performance. Apresenta-se como uma das melhores opções ao procurar boas resistências química (resiste bem aos solventes orgânicos, óleos, ácidos fracos), mecânica (aproximadamente 90 MPa, juntamente com um alto módulo de elasticidade e grande dureza) e à radiação (mais altos valores entre os termoplásticos). Também é um material biocompatível o que faz com que seja adequado para aplicações biomédicas além de também ser usado nas indústrias automotivas, aeroespacial e eletrônica. Possui uma ótima estabilidade dimensional devido ao baixo coeficiente de expansão linear e a baixa absorção de água, que evita que o material inche [16], [17].

O *PEI* é um termoplástico amorfo com boa resistência mecânica e rigidez em altas temperaturas. Resiste muito bem termicamente e apresenta boas propriedades elétricas, além de boa resistência química e estabilidade dimensional [16].

### **2.1.6. Escolha do material para impressão 3D**

Para a correta seleção de um material devemos ter em conta a sua aplicação depois de fabricado, assim como: as condições de exposição, temperaturas e se a peça ficará em contato com algum reagente. Tendo em conta os parâmetros acima e outros considerados no projeto consegue-se definir o material com melhor custo benefício de impressão.

Também se deve ter em mente as características da impressora disponível. Por exemplo, materiais como ABS evitam defeitos quando impressos em câmaras fechadas e

mesa aquecida. Já materiais como PLA podem ser impressos tanto em máquinas abertas quanto fechadas.

Muitas vezes a peça impressa substituirá outra antes construída com outro material, então é preciso saber as propriedades mecânicas e químicas (absorção de água e óleos, solventes) do material utilizado anteriormente e escolher um que seja imprimível e tenha características mais parecidas possíveis.

## 2.2. Manufatura aditiva

Usa-se termo prototipagem rápida (RP) quando se consegue construir objetos tridimensionais num curto espaço de tempo pela adição sucessiva de finas camadas de material, quando comparado aos modelos de fabricação tradicionais [18].

A impressão 3D é um processo de manufatura aditiva ou fabrico aditivo e um avanço na fabricação de objetos porque enquanto os atuais processos de fabricação geralmente envolvem a redução (manufatura subtrativa) ou a alteração do material, a impressão 3D possibilita a criação de objetos tridimensionais por meio da deposição controlada de material em sucessivas camadas até a criação da estrutura que se quer. Este tipo de fabricação pode ser usado tanto na prototipagem de um produto quanto na produção final dele, também não necessita de ferramentas personalizadas, exemplos são moldes para fundição, ou movimentos planejados da ferramenta. A peça é fabricada diretamente de um modelo digital 3D, criado através de um software *CAD*.

### 2.2.1. Impressão 3D

Este tipo de impressão difere uma da outra pelos materiais e técnicas usadas para construção das camadas, no entanto os mesmos processos básicos são empregados. Eles são representados na Figura 3.



Figura 3 Etapas do processo de impressão 3D

- i. Começa-se com a ideia e criação de um desenho em programa de modelação do tipo *CAD* da peça que se quer (modelo 3D) com as dimensões desejadas. Exemplos de softwares são *SolidWorks*, *Autodesk Inventor* para aplicações profissionais e *Google SketchUp* para particulares. Hoje em dia algumas aplicações usam Scanners 3D como forma de reduzir o tempo de modelagem;
- ii. Conversão do arquivo *CAD* em uma extensão para ser enviada à impressora 3D, normalmente *.stl* (seção 2.2.1.1);
- iii. Depois então este arquivo é enviado e através do Fatiamento (criação de um arquivo em código G), ele é lido pelo software da impressora 3D. O utilizador então designa a localização e melhor orientação (seção 2.2.1.2) da peça na máquina. Na etapa de fatiamento escolhem-se os parâmetros de impressão e preenchimento e criam-se as estruturas de suporte (se necessárias).
- iv. Este envia as instruções para a máquina, que começa a fabricar o objeto, camada por camada. Esta etapa difere de técnica para técnica nos processos de manufatura aditiva, assim como o material usado, que pode ser polímero, papel ou compósito, dependendo do processo. A precisão da peça e o acabamento superficial melhoram quanto menor for a espessura das camadas, na maioria das vezes;
- v. Depois de concluir o processo de impressão, as partes e os suportes são removidos da máquina. No caso das resinas, são curadas. Os materiais plásticos, metais e as resinas podem sofrer um pós-processo, serem polidos ou pintados, entre outros tipos de acabamento.

### **2.2.1.1. Arquivo *.stl***

Este tipo de arquivo recria a superfície do desenho através do uso de vários triângulos (facetas), mas não representa textura nem cores. Junto à etapa de fatiamento serve de ponte entre o computador e a impressora 3D, Figura 4.

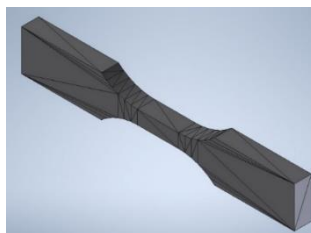


Figura 4 Espécime composto por 124 facetas.

.*stl* é abreviação das palavras *Standard Triangle Language* [19] ou abreviação da palavra *Stereolithography*, por Chua et al. (2003) [18]. Quando se quer um aumento da resolução, mais e menores triângulos são usados e quando se quer uma resolução menor, menos e maiores triângulos são usados. É importante estudar a melhor resolução para a peça, pois uma resolução muito grande pode causar gastos excessivos, além de algumas impressoras não conseguirem imprimir e baixa resolução acaba por não representar fielmente o objeto desenhado no programa *CAD*.

Dois parâmetros são comuns a todos os softwares de desenho quando se pretende especificar a resolução do arquivo *.stl*. São eles [19]:

- i. *Chord Height* ou altura do cordão: controla o desvio entre os triângulos do arquivo *.stl* e a superfície original do desenho. Quanto menor esta distância mais precisa a curvatura do desenho, Figura 5.



Figura 5 Ilustração da altura do cordão. Adaptado de Giang [19]

- ii. *Angular Tolerance* ou tolerância angular: limita o ângulo entre triângulos adjacentes. O valor padrão costuma ser  $15^\circ$  (ou  $0^\circ$ ), mas este valor muda se é preciso uma superfície mais suave, Figura 6.

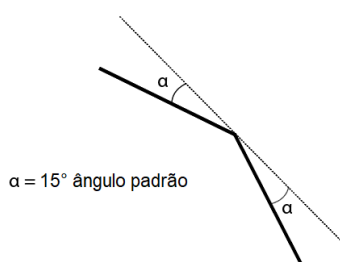


Figura 6 Tolerância Angular. Adaptado de [19]

A utilização do arquivo *.stl* possibilita uma abordagem mais simples do modelo *3D CAD* e já é um padrão difundido entre muitos sistemas de prototipagem rápida (ou fabrico aditivo).

### 2.2.1.2. Orientação da peça e sua influência nas características de impressão

Refere-se a rotação da peça na base de impressão em relação aos eixos do sistema de coordenadas da máquina. A orientação da peça influencia diretamente em características que resultam na qualidade final do objeto. São elas: precisão da peça, tempo de impressão, resistência da peça e suportes.

Dependendo do formato da peça, uma orientação horizontal ou vertical é preferível. Por exemplo na construção de um cilindro, quando ele é construído com orientação vertical, as camadas são concêntricas e postas uma sobre a outra, fazendo com que a peça tenha uma superfície suave. Quando uma orientação horizontal é escolhida, o cilindro é fabricado com uma série de retângulos, posto um sobre o outro, variando bem pouco as dimensões. Este objeto então fica com a superfície em contato com a base de impressão achatada, diminuindo a qualidade da impressão [20].

Ao encontrar uma orientação de fabricação que diminua o número de camadas, associadamente diminui-se o tempo de impressão. Em peças grandes este número pode variar muito.

A orientação de construção da peça também influencia muito na resistência dela quando se fala do processo *FDM*, pois as peças são anisotrópicas. Este tópico é tratado com mais detalhe na seção 2.3.3, depois de apresentadas as tecnologias *FDM* e *SLA*.

Uma boa escolha de orientação de construção das peças diminui o uso de suportes, o que é bom pois eles adicionam tempo e aumentam custos de impressão.

### **2.2.1.3. Vantagens do método de Impressão 3D**

Quando comparado aos métodos tradicionais de fabricação [21]:

- i. Há uma redução no desperdício de material, pois só é usado na criação das peças. Pouco material é desperdiçado nos suportes das peças onde existe a necessidade deles;
- ii. Permite a confecção de geometrias complexas, detalhes internos e ocultos que são feitos durante a construção da peça;
- iii. Também permite a customização dos projetos, facilitando a adequação do produto ao utilizador, uma vez que não são necessárias ferramentas especiais. Por este motivo em conjugação com o apresentado no ponto anterior (ponto ii acima) estas técnicas de fabricação são muito usadas nas indústrias médica, odontológica na fabricação de próteses, implantes e aparelhos dentários;
- iv. Fabricação com uma única etapa: num processo convencional várias etapas de fabricação são feitas até a obtenção do produto. A ordem destes passos afeta muito a qualidade final e a maquinabilidade do produto. Enquanto na impressão 3D tudo é feito num passo só e sem interação do operador durante a fabricação do componente, diminuindo a dependência de vários processos de fabricação (maquinagem, soldagem, pintura), possibilitando ao projetista um maior controle sobre o produto.

Apesar das grandes vantagens, ainda não é um método que pode substituir os processos convencionais em todas as aplicações, pois quando se quer peças grandes o tempo de construção é muito alto (aumenta conforme cresce o número de camadas). Quando a produção é em grande escala, este tipo de fabricação não se compara à fundição (exemplo de processo convencional), porque o valor do molde torna-se insignificante comparado ao número de vezes em que será usado [11]. Então pode-se dizer que é a melhor escolha quando se quer construir apenas uma ou poucas peças ou quando a geometria é muito complexa para outros processos de manufatura, enquanto os processos convencionais são mais económicos à medida que aumenta o volume de produção.

#### 2.2.1.4. *Warping* na fabricação 3D

*Warping* é a contração não homogênea dos materiais durante a solidificação na construção das camadas nas tecnologias 3D. Suas principais razões são os diferentes tempos de solidificação das camadas e as influências da geometria da peça [22]. Como consequência tem-se a mudança nas dimensões da peça.

Como a solidificação acontece primeiro na superfície das peças em comparação às partes internas, leva-se a um rebaixamento dos planos laterais causando o efeito *pincushion*, Figura 7a.

O *curling* é um tipo de *warping* causado pelos diferentes alongamentos das camadas da peça por causa dos diferentes tempos de solidificação, que ocorre geralmente nos cantos dos objetos, Figura 7b.



Figura 7 Efeitos de solidificação. a) *pincushion* e b) *curling*. Adaptado de [22]

### 2.3. Tecnologias de produção 3D

Diferentes técnicas são usadas para fabricar peças, não existindo uma ideal. Escolhe-se a que mais convém devido os diferentes materiais trabalhados, propriedades mecânicas e estéticas necessárias ao protótipo, custos envolvidos no processo e prazos para construção. Dois tipos de impressão 3D são apresentados a seguir.

#### 2.3.1. Estereolitografia

Em inglês *Stereolithography* ou *SLA* é o primeiro processo de manufatura aditiva disponível comercialmente. Desenvolvido e patenteado por Charles Hull em 1986. Neste processo a deposição de material é feita através da fotopolimerização ou cura da resina.

No processo de impressão, inicialmente os arquivos *CAD* com a forma do objeto requerido são traduzidos de forma que o *software* da impressora possa entender. Um tipo de arquivo é o *.stl*, como já apresentado, um dos mais usados tanto na Estereolitografia quanto em outros processos de manufatura aditiva. Pelo objeto ser construído a partir de um arquivo *CAD*, não há necessidade de um molde.

O material de trabalho (resina fotopolimérica), liquefeito, mediante feixes de luz ultravioleta de baixa potência e altamente focados em pontos específicos, endurece dando origem a primeira camada que fica localizada na plataforma de construção que está dentro da resina líquida. Estes feixes UV são guiados por espelhos galvanométricos e por meio da formação de ligações cruzadas endurecem a resina [12]. Terminada uma camada, um mecanismo de destaque solta a camada curada da base do tanque, enquanto a base de impressão (plataforma móvel) move-se numa altura correspondente à espessura de uma nova camada de material. Então uma lâmina de varredura recobre a camada de resina já curada com outra de resina líquida. Os feixes de luz controlados por computador passam novamente em cima do fotopolímero, na forma determinada, produzindo mais uma camada de resina curada que se liga à outra.

Esta ligação só é possível porque a profundidade de cura do *laser* é um pouco maior do que a altura de movimento da base de impressão (em *Z*), assim o grupo da primeira camada que não reagiu, polimeriza com a resina iluminada da segunda camada, fazendo a ligação [23]. A fabricação dá-se assim, camada por camada, Figura 8.

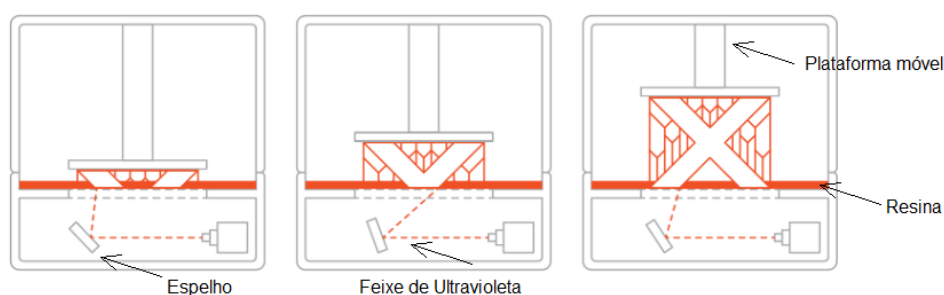


Figura 8 Processo de impressão 3D SLA [24]

Terminada a produção passa-se a uma etapa de pós-processamento. A peça é lavada com solução química (ex. álcool isopropílico) para a remoção do excesso de resina, os suportes são removidos manualmente (com auxílio de alicates ou são quebrados) e então coloca-se o objeto num forno de Ultravioleta para uma pós-cura com a intenção de atingir as propriedades mecânicas ideais para a aplicação da peça. As etapas de pós-cura

e remoção de suportes podem ser invertidas, dependendo do modelo e do material de fabricação da peça. Após as etapas acima, as superfícies sofrem ou não operações posteriores para melhorar o acabamento superficial, como, lixamento, polimento e pintura.

Neste processo, como é mencionado acima, existe a necessidade de suportes. Eles são removidos da região de interface com a peça, são fabricados concomitante à fabricação da peça e são feitos da mesma resina fotopolimérica. Os suportes permitem:

- i. A fácil separação do protótipo da base móvel, terminada a fabricação;
- ii. Prender o objeto à plataforma, assim ele não flutua na resina líquida;
- iii. Dar suporte as partes que precisam de sustentação, quando ressaltos são fabricados;
- iv. Reduzir as distorções durante a etapa da construção [12]. Evitam o efeito de *curling*.

Os suportes quando removidos deixam marcas nas peças, então pós-processos podem ser necessários, uma alternativa que pode evitar pós-processos é orientar a peça de forma que as superfícies visíveis não fiquem em contato com os suportes.

Já a etapa de pós-cura permite aumentar a quantidade de ligações cruzadas entre as cadeias de resina, causando uma melhoria nas propriedades mecânicas e térmicas das peças [12], ou seja, a peça apresenta um aumento na dureza e na resistência à temperatura, ao mesmo tempo em que se torna mais frágil. Esta etapa de pós-cura pode ser realizada em fornos de Ultravioleta, e/ou fornos elétricos, e/ou ao ar livre [12], [25] que é um processo mais demorado de pós-cura. O tempo que uma peça passa em cada um destes ambientes depende das dimensões dela.

A fabricação *SLA* apresenta bons acabamentos superficiais porque o movimento da base de impressão pode ser bastante pequeno (correspondente à espessura da camada) e pode-se fazer uso de pequenos pontos de *laser* para cura da resina, por isso é muitas vezes usado em peças que precisam de uma maior exatidão nas dimensões. Também fornece boa precisão e detalhes às partes fabricadas, além dos itens terem um bom tempo de vida.

É um processo de fabricação que pode ir de algumas horas para peças pequenas ou dias para peças muito grandes e complexas. Seu tempo de fabricação varia de acordo com o tamanho e complexidade da peça a ser produzida. Por ser um processo que não

depende do calor para produção de peças, impressoras *SLA* grandes são construídas para grandes volumes de construção, exemplos são painéis de carros e para-choques que podem ser construídos por elas [25]. Vale salientar que quando o tamanho da peça é maior do que o volume de impressão da máquina de *SLA*, imprime-se as peças separadas e depois elas são coladas com epóxi.

A impressão *SLA* apresenta uma vasta gama de materiais de trabalho, desenvolvidos especialmente para diferentes aplicações. Materiais biocompatíveis para indústria odontológica, produção de joias, materiais flexíveis, aplicações em que sejam necessários materiais transparentes.

### **2.3.2. Modelagem por Fusão e Deposição**

Tecnologia *FDM* ou em inglês *Fused Deposition Modeling*. Esta tecnologia foi patenteada e desenvolvida por Scott Crump, fundador da *Stratasys* por volta dos anos 80, uma das maiores empresas de tecnologia *FDM* do mundo [11]. As impressoras de tecnologia *FDM* são as mais conhecidas no âmbito social, por causa de seu custo mais acessível, constroem protótipos mais rapidamente e com materiais mais baratos, exemplos são os termoplásticos como ABS, PLA, PVC, PPE, PC e elastómeros. A impressão é feita através da extrusão e deposição do material fundido por um cabeçote extrusor de filamentos.

Assim como o tipo de impressão *SLA* (*Stereolithography*), fabricam peças camada a camada. Enquanto a *FDM*, também chamada de *FFF* (*Fused Filament Fabrication*) deposita material por toda a área da camada na qual se encontra, a *SLA* solidifica a resina diretamente graças a um raio ultravioleta. A sigla *FFF* é usada para nomear a mesma tecnologia pois a sigla *FDM* é marca registrada da anteriormente citada *Stratasys*.

#### **2.3.2.1. Parâmetros que influenciam no processo**

Para ocorrer a impressão de um objeto pela tecnologia *FDM*, uma série de dados é definida, pois eles influenciam na qualidade final do produto (aspecto da superfície e as

propriedades mecânicas). Alguns são: altura e orientação das camadas, suportes, preenchimento e temperatura, que são explicitados abaixo.

i. Altura e orientação das camadas

As camadas influenciam na resistência das peças. Como o objeto é construído camada por camada, a impressão 3D produz peças que possuem uma estrutura formada por vazios e ligações de filamentos depositados, dentro e entre as camadas. O tamanho, a forma dos vazios e a área de contato entre os filamentos influencia na anisotropia (Figura 9) e, conseqüentemente, na magnitude das resistências à tração, compressão e flexão das peças impressas [17], [26].

Segundo Cho et al. (2019) [27], quanto maior for a espessura das camadas, maior é a resistência mecânica do objeto. Para Hibbert et al. (2019) [28], uma menor espessura apresenta melhores propriedades de resistência à tração, limite de escoamento e tenacidade quando a orientação das camadas é de  $0^\circ/90^\circ$ , já camadas com orientação  $45^\circ/-45^\circ$  e menor espessura apresentaram resultados contrários ou não aos dados na orientação  $0^\circ/90^\circ$ .

Es-Said et al. (2007) [29] estudou a orientação das camadas (ângulo de *raster*) na impressão 3D e afirmou segundo resultados experimentais que a orientação de construção de  $0^\circ$  (camadas depositadas ao longo do comprimento das amostras) mostrou-se a mais resistente às tensões de tração, seguido das orientações  $45/0^\circ$ ,  $45/-45^\circ$ ,  $90^\circ$  e por último com os menores valores de resistência a tração e cedência a orientação de  $45^\circ$  (as camadas estão em  $45^\circ$  com o comprimento da amostra).

Santana et al. (2018) [26] também estudou as orientações de construção  $0^\circ$ ,  $45^\circ/-45^\circ$  e  $0^\circ/90^\circ$  e suas influências em certas propriedades mecânicas e constatou que a orientação que apresenta a maior resistência à tração e módulo de *Young* é  $0^\circ$ , seguida por  $45^\circ/-45^\circ$  e depois  $0^\circ/90^\circ$ .

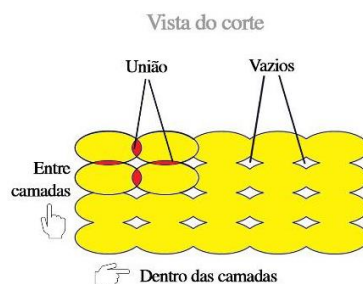


Figura 9 Representação da mesoestrutura das peças fabricadas pelo processo de Impressão 3D por extrusão. Adaptado de [26]

Nos ensaios de flexão de Es-Said (2007) [29], a orientação de  $0^\circ$  mostrou-se a mais resistente, seguida da orientação  $45/-45^\circ$ ,  $45/0^\circ$ ,  $45^\circ$  e a de menor resistência foi a de  $90^\circ$ . Em Rajpurohit et al. (2018) [30] e Christiyani (2016) [31] a espessura das camadas desempenha um papel muito importante. Neles uma maior espessura das camadas influencia numa queda da resistência à flexão, pois uma menor espessura possibilita uma maior força de ligação entre as camadas.

A altura das camadas influencia também no acabamento das superfícies. Quanto menor a altura das camadas mais suave a superfície e melhor a reprodução de geometrias curvas, porém o tempo de impressão será maior, ou também, quanto maior a altura das camadas menos suave a superfície, logo um menor tempo de impressão.

## ii. Suportes

Os suportes são muito importantes na construção, pois peças com detalhes com grandes angulações e complexas necessitam deles para que não haja desprendimento de material durante a impressão e solidificação. Eles são retirados ao fim da fabricação da peça, quebrando com as mãos ou com auxílio de alicates e podem ser construídos com o mesmo material do objeto ou diferente, através de um segundo bocal que fornece o filamento para os suportes.

Como eles deixam marcas na peça impressa, foi desenvolvida outra forma de retirar os suportes. Esta forma se dá pela utilização de suportes feitos de material solúvel que quando colocado em solução, dissolve-se deixando apenas o material principal (que dá o formato da peça). Na Figura 13 vê-se o carretel de suportes (*Support Material Spool*). Assim há uma melhoria no acabamento superficial das peças, já que não existem marcas da sua remoção, porém há um aumento no valor do produto, já que uma impressora com dois bocais é usada e um material diferente do da peça.

Na tecnologia *FDM* são usados alguns tipos de suportes com padrões de acordo com a necessidade, quer dizer, quando se quer menos material ou impressões com tempos mais curtos.

Na Figura 10 tem-se exemplos de padrões de suportes usados pela impressora *Robox Dual* (empresa *Cel Robox*):

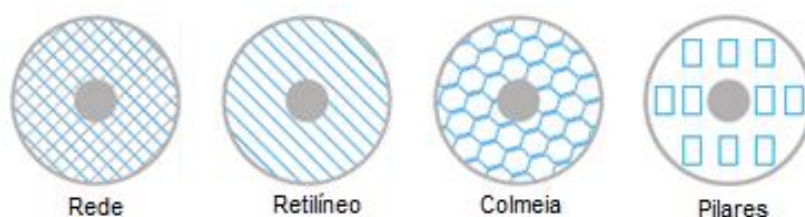


Figura 10 Padrões de suportes da impressora FDM Robox Dual. Adaptado de [32]

### iii. Preenchimento

Como o próprio nome diz, este parâmetro engloba a percentagem de preenchimento do interior durante a fabricação da peça e padrões de preenchimento. Ela influencia diretamente no desempenho do objeto. Peças mais resistentes têm uma quantidade maior de preenchimento (varia de 0 % para peças ocas a 100 % para peças totalmente preenchidas). Hibbert et al. (2019) [28] em seu estudo comparou uma alta percentagem de preenchimento com 100 % de preenchimento e mostrou que há um incremento nos valores de várias propriedades mecânicas (limite de escoamento, resistência à tração e tenacidade) quando se acresce a quantidade de preenchimento. A razão desta consequência, segundo o autor, foi que um preenchimento sólido (100 %) pode suportar maiores tensões devido à sua estrutura mais densa e maior área transversal efetiva, em comparação a uma alta percentagem de preenchimento.

Uma observação sobre o preenchimento é que um protótipo visual pode ter uma percentagem pequena de preenchimento, já que não precisa de resistência, enquanto um protótipo funcional necessita de uma maior quantidade de preenchimento. Quanto menor a percentagem de preenchimento mais barata e mais rápida a fabricação da peça. A Figura 11 apresenta uma imagem com diferentes percentagens de preenchimento.

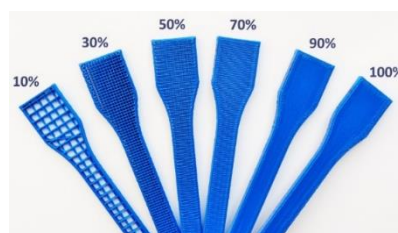


Figura 11 Percentagem de preenchimento de um espécime [33]

Sobre os tipos de preenchimentos de peças, a Figura 12 apresenta alguns tipos que a impressora *Robox Dual* fabrica.

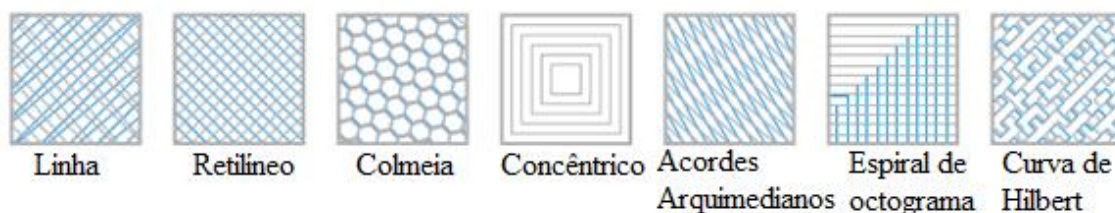


Figura 12 Tipos de preenchimento. Adaptado de [32]

Cada padrão de preenchimento tem seu formato por diferentes motivos, mas o que é mais levado em conta quando se fala em padrões é a resistência mecânica que eles oferecem à peça. Cho et al. (2019) [27] estudou três padrões de preenchimento (triangular, zigue-zague e em rede) e sua influência na resistência mecânica de uma peça construída com PLA por impressão 3D e concluiu que dentre os três, o padrão triangular oferece a maior resistência mecânica e menor consumo de filamento e zigue-zague a menor.

#### iv. Temperatura do bocal extrusor

Quando a temperatura do bocal é muito baixa o filamento não flui de forma adequada, causando lacunas entre as camadas e algumas vezes isso facilita a separação delas. Muitas vezes causa uma má adesão da peça à mesa. Quando é muito alta, pode danificar o filamento, tornando a peça impressa muito frágil [34].

Aumentando a temperatura até uma faixa de aproximadamente 240°C, no caso do estudo feito por Behzadnasab e Yousefi (2016) [34] com PLA, vê-se um aumento no módulo de *Young* e redução na viscosidade do material, o que resulta numa melhor difusão entre as camadas anteriores e as novas camadas de PLA extrudidas, ocasionando uma melhor adesão entre elas.

### 2.3.2.2. Como funciona o processo

Primeiramente a máquina é carregada com um carretel (rolo) de filamento termoplástico (material usado na fabricação da peça, *Build material spool*). Depois o programa da máquina recebe o arquivo digital com o desenho da peça (*part*) a ser fabricada e manda o comando para a impressora. Então quando os bocais (*Extrusion nozzles*) do cabeçote extrusor (*extrusion head*) estão na temperatura desejada, o cabeçote desenrola o filamento a fim de fundir e depositá-lo na base de impressão (*build platform*) ao mesmo tempo em que se movimenta nos eixos X, Y e, algumas vezes em Z, formando

uma camada de termoplástico com o formato da geometria transversal da peça. Este termoplástico então arrefece e solidifica, podendo usar ventiladores para acelerar o processo. Vários passes são necessários para preencher uma área e assim que ela é finalizada a base de impressão desce uma distância correspondente a espessura de uma camada ou o cabeçote extrusor sobe uma altura correspondente a uma camada, adicionando mais uma camada de material e assim sucessivamente, até que a peça esteja completa.

Algumas máquinas utilizam ao invés de filamentos, pastilhas de material que são alimentadas por meio de pirâmides invertidas [35]. A fabricação dá-se da mesma forma que a fabricação com filamentos, depois que uma camada é construída, o cabeçote se levanta numa altura correspondente a espessura da camada e o processo repete-se até o formato do objeto desejado. Os filamentos são fundidos por intermédio de aquecedores resistivos (*Liquifiers*), facilitando a passagem do material pelo bocal [35]. Terminada a fabricação, a peça é deixada terminando de arrefecer e endurecendo, Figura 13.

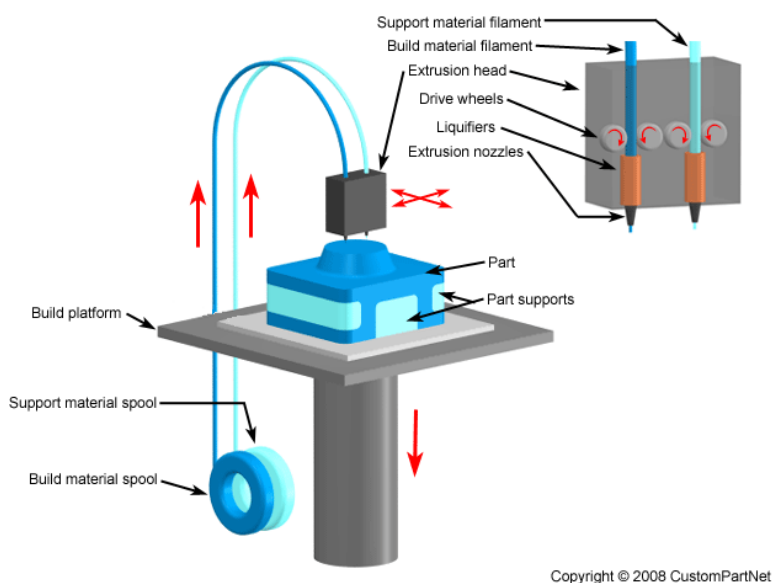


Figura 13 Processo FDM. Adaptado de [35]

A formação das ligações entre filamentos de polímeros é impulsionada pela energia térmica do material extrudido. A temperatura das interfaces entre filamentos adjacentes tem um papel importante na qualidade das ligações, portanto nas propriedades mecânicas do objeto. Ela depende da taxa na qual o filamento arrefece durante sua saída do extrusor, por isso um controle da temperatura ambiente influencia na resistência mecânica do material. Para apresentar boas características, as ligações necessitam do

desenvolvimento de pescoços formados entre filamentos adjacentes (Figura 14) e da difusão molecular [36].

Pelo uso de termoplásticos como materiais para fabricação das peças, a impressão *FDM* é boa na produção de objetos resistentes, podendo assim ser usada na fabricação de peças funcionais e uso final.

### **2.3.3. Resistência ligada a orientação de construção da peça**

Como já citado, no processo de fabricação *SLA* as camadas ligam-se umas às outras quimicamente enquanto a impressão ocorre. Com a produção de uma nova camada por polimerização há a criação de ligações covalentes que acrescentam resistência à peça, mas esta reação não se dá por completo, na verdade existe uma parte das camadas que ficam num estado de semirreação, chamado “estado verde”. Neste estado encontram-se partes ainda por polimerizar onde as camadas subsequentes se ligam covalentemente [37].

Assim as ligações covalentes se dão tanto entre as camadas individuais, quanto entre as camadas de material, o que dá uma característica de isotropia para as peças, ou seja, as propriedades físicas nas direções *x*, *y* e *z* são idênticas independentemente da direção de fabrico. Por isso o objeto apresenta a mesma resistência nas três direções é estanque e bastante denso, independentemente de ser um corpo sólido ou ter canais por dentro [37].

No processo *FDM*, a ligação entre as camadas se dá de forma mecânica [37], gerando uma aderência que não é total e, conseqüentemente, vazios entre elas, fazendo com que a peça tenha característica anisotrópica, quer dizer, as características físicas variam conforme muda a direção de fabricação, logo as peças são mais fracas na direção de tração perpendicular às camadas por causa dos vazios e da não aderência, em comparação a direção de tração paralela, onde a ligação é muito mais forte. Por isso geralmente os objetos não são adequados para aplicações que envolvam esforços em certas direções. A Figura 14 apresenta uma micrografia da seção transversal de uma peça construída por *FDM*, a letra *H* representa a altura do filamento, *W* representa a largura e *2y* é região de “empescoçamento” (mencionada na seção 2.3.2.2).

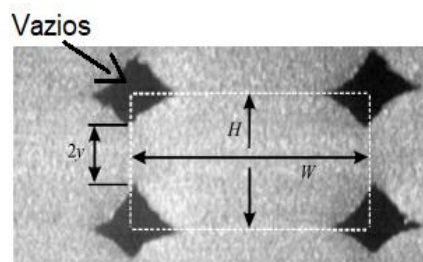


Figura 14 Micrografia da área da seção transversal de uma peça construída por FDM. Adaptado de [36]

A presença destes vazios diminui a resistência e intervém na estanqueidade da peça. Por estes motivos é difícil produzir objetos totalmente estanques com tecnologia FDM [37].

### 2.3.4. Aplicações

As impressoras 3D são empregadas em produtos para fins domésticos, industriais e profissionais. Exemplos são:

- i. Próteses médicas e odontológicas na indústria médica;
- ii. Na indústria aeroespacial tem-se as portas dos aviões, acessórios das cabines, painéis, dutos para fluxo de ar;
- iii. Indústria de fundição de joias;
- iv. Fins educacionais, tornando a prática mais acessível aos alunos e no grande mercado *DIY* permitindo aspirantes e empreendedores explorarem novas ideias e melhoramentos de produtos para o mercado;
- v. Indústria de automóveis. Exemplos de componentes que são feitos com impressão 3D são os painéis de carros, suportes, acessórios do interior, dutos de ar.

## 2.4. Ascensão da impressão 4D

Skylar Tibbits é professor do departamento de Arquitetura e fundador do laboratório *Self-Assembly*, localizado no *International Design Center* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). O trabalho do laboratório é focado em tecnologias de montagem automática e materiais programáveis para novos processos de fabricação, produtos e construção.

### 2.4.1. Ideia

Em colaboração com a *Stratasys*, Skylar Tibbits desenvolveu um projeto chamado Impressão 4D (*4D Printing*). A ideia por trás deste conceito é juntar uma impressora multimaterial (consegue-se depositar mais de um material) com uma nova capacidade, a transformação. As peças podem se transformar diretamente de um formato para outro, sozinhas. A quarta dimensão é rotulada como a transformação ao longo do tempo, onde as estruturas impressas não são mais estáticas, elas são agora programaticamente ativas e podem se transformar independentemente [38].

### 2.4.2. Blocos fundamentais de impressão 4D

Os blocos principais da impressão 4D são a máquina de impressão 3D, materiais ativos, modelo matemático ou programação geométrica e estímulos.

As máquinas funcionam com impressão multimaterial de polímeros com diversas propriedades, por exemplo, de rígido a macio e materiais transparentes. Para esta transformação com o tempo, um material “ativo” foi desenvolvido em cooperação com a *Stratasys*.

A programação geométrica ou modelo matemático é responsável pelo *design* da distribuição do material e estrutura necessária para dar a peça a capacidade de mudança de estado no próprio material, ou seja, atingir as mudanças desejadas em formato, propriedade e funcionalidade [39].

Estímulos são responsáveis por desencadear alterações na forma, propriedade e funcionalidade da estrutura impressa. A maioria das pesquisas apresenta a água, combinação de calor e luz e combinação de água e calor como principais estímuladores [39]. A seleção dos estímulos e materiais ativos depende dos requisitos da aplicação da peça.

### 2.4.3. Abordagem simples do funcionamento

Para o funcionamento desta tecnologia de impressão 4D deve haver a deposição de um material rígido, que fornece estrutura e são limitadores de ângulos de dobramento, concomitante a extrusão de um polímero ativo para dar energia para a peça. Este material ativo é um polímero que responde a estímulos e no caso desenvolvido pelo laboratório *Self-Assembly* e *Stratasys* ele se expande em 150 % quando em contato com a água.

A peça quando impressa tem uma posição inicial, depois de entrar em contato com água o material ativo incha forçando o material rígido dobrar. Quando o polímero rígido encontra elementos vizinhos ele é forçado a parar de dobrar e atinge seu estado de configuração final, Figura 15 [40].

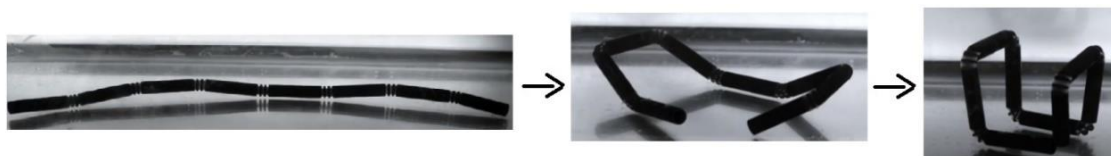


Figura 15 Peça mostrando as etapas. Adaptado de [38]

Com a contribuição da *Autodesk* também está sendo desenvolvido um *software* chamado *Project Cyborg* que permite simular este comportamento de automontagem na tentativa de otimizar quando e quais partes estão se dobrando [38].

Um exemplo de aplicação dado por *Tibbits* é um projeto de tubulação de água, desenvolvido em conjunto com a empresa *Geosyntec* (empresa de consultoria e engenharia nos arredores de Boston, EUA). A intenção é que a tubulação possa expandir ou se contrair para mudar a capacidade ou o fluxo [38].

## 2.5. Ensaios utilizados para a caracterização das peças fabricadas por impressão 3D

Neste tópico é retratada de forma elucidativa a teoria dos ensaios feitos neste projeto, com o propósito de auxiliar a prática deles.

Para padronizar os ensaios são utilizadas normas fornecidas por instituições reconhecidas mundialmente, alguns exemplos são: ABNT (Associação Brasileira de

Normas Técnicas), *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*), *DIN* (*Deutsches Institut für Normung*), *ISO* (*International Organization for Standardization*), entre outras, além de normas particulares das indústrias.

### **2.5.1. Ensaio de tração**

Ensaio de tração é um tipo de ensaio mecânico classificado como destrutivo, ou seja, inutiliza a peça total ou parcialmente. Através do ensaio de tração muitas propriedades são obtidas, exemplos são, limite de resistência à tração ( $\sigma_u$ ) e módulo de elasticidade (E) [41].

#### **2.5.1.1. Procedimento do ensaio de tração**

O ensaio de tração consiste na submissão de um material, por exemplo, um espécime de formato padronizado, a um esforço de alongamento estático até a ruptura dele, quer dizer, uma carga é aplicada lentamente no material até ele romper. Esta carga também é gradual e uniaxial (aplicada em apenas uma direção) [42]. Os valores destes esforços ou cargas são fornecidos pela própria máquina de ensaio. À medida que o espécime sofre um alongamento imposto pela máquina, a resposta do material em resistir ao alongamento é a tensão imposta, que cresce proporcionalmente à deformação enquanto o material está no regime elástico. Depois que o espécime entra no regime plástico, este cede mais facilmente, apesar da tensão continuar aumentando (tanto mais quanto maior for a taxa de estiramento do material [43]), até o ponto em que ele entra em colapso e sofre deformação localizada (empescoamento), deixando de resistir, Figura 16.

Com o ensaio medem-se propriedades do material importantes para sua especificação e traça-se a curva tensão x deformação dele. Estes resultados dados pelo ensaio são muito influenciados pela temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, condições ambientais, entre outros parâmetros.

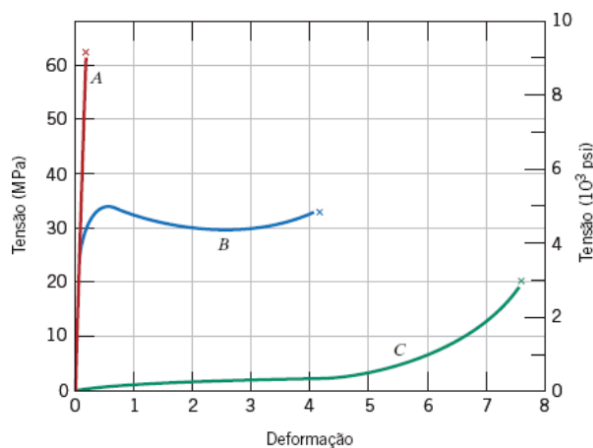


Figura 16 Comportamento tensão-deformação para polímeros. Adaptado de [43]

### 2.5.1.2. Propriedades obtidas com o ensaio de tração

São muitas as propriedades obtidas com o ensaio de tração, as apresentadas abaixo são as utilizadas neste projeto.

#### 2.5.1.2.1. Tensão de Tração

A tensão de tração é a carga por unidade de área da menor seção transversal dentro do comprimento útil em qualquer instante, expresso em MPa. Calculada pela Equação 1.

$$\sigma_u = \frac{W}{A_0} \quad \text{Equação 1}$$

Onde

- i. W é a carga que o corpo sustenta, em N;
- ii. A<sub>0</sub> é a área inicial da seção útil de teste, em mm<sup>2</sup>.

#### 2.5.1.2.2. Limite de resistência à tração

É a tensão máxima que um corpo sob tração consegue resistir e é dada pela Equação 1. O resultado obtido será então em *megapascal* (MPa).

### 2.5.1.2.3. Deformação

Corresponde à razão entre o alongamento no comprimento,  $\Delta L$ , relativamente ao comprimento útil original  $L$ . Este valor é adimensional e dado pela Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Equação 2}$$

Onde

- i.  $\Delta L$  é o alongamento, em mm;
- ii.  $L$  é o comprimento útil original, em mm.

### 2.5.1.2.4. Módulo de elasticidade

Também chamado de módulo de *Young* ou módulo elástico. Medida da rigidez e indica a flexibilidade do objeto. Quanto maior o módulo, maior a tensão necessária para criar a mesma quantidade de deformação, isto é, mais rígido será o material ou menor a deformação elástica. Na maioria dos materiais este valor é dependente da temperatura, quanto maior a temperatura, menor o valor de  $E$ .

Para seu cálculo, primeiro é preciso estender a parte linear da curva tensão x deformação, então divide-se a diferença entre tensões ( $\Delta\sigma$ ) em qualquer segmento desta linha reta pela respetiva diferença em deformação ( $\Delta\varepsilon$ ), Figura 17, Equação 3 [44].

A parte elástica corresponde àquela em que a deformação é proporcional à tensão aplicada, apresenta comportamento linear, portanto obedece à lei de *Hooke* ( $\sigma = E\varepsilon$ ). Neste caso se pode simplesmente dividir a tensão em qualquer ponto da linha CD pela deformação no mesmo ponto, Figura 17 [45].

Os resultados devem ser apresentados em pascal (Pa) ou suas variantes.

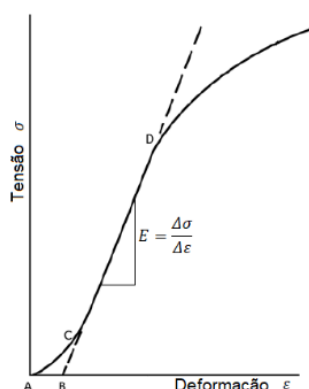


Figura 17 Material com região representada pela Lei de Hooke. Adaptado de ASTM D638-14

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3}$$

Onde

- i.  $\sigma$  é a tensão na parte linear da curva, em MPa;
- ii.  $\varepsilon$  é a deformação no mesmo ponto, adimensional.

### 2.5.1.2.5. Tensão limite de escoamento

Este ponto é caracterizado pela curva tensão x deformação deixar de ser linear. Como muitas vezes sua definição é complicada, foi convencionada uma linha paralela (N) à parte elástica da curva (A) a partir de uma pré-deformação de 0,002 ou 0,2 %, valor utilizado para alguns metais e adotado neste trabalho. A interseção desta linha com a curva do diagrama é a tensão limite de escoamento ( $\sigma_y$ ), que é a tensão necessária para promover uma deformação permanente de 0,2 % no corpo, Figura 18.

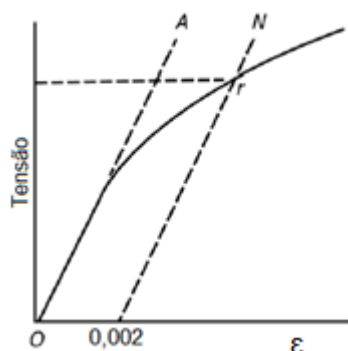


Figura 18 Tensão limite de escoamento. Adaptado de [44]

Ficando então

$$\sigma_y = E \times (\varepsilon_{ponto} - 0,002) \quad \text{Equação 4}$$

Onde

- i.  $\sigma_y$  é a tensão limite de escoamento, em MPa;
- ii.  $E$  é o módulo de elasticidade, em MPa;
- iii.  $\varepsilon_{ponto}$  deformação no ponto em que a linha paralela cruza o diagrama.

### 2.5.1.3. Normas utilizadas no ensaio de tração

As propriedades de tração de um material variam com a preparação do espécime, velocidade e ambiente de teste. Assim uma norma é utilizada, a fim de especificar procedimentos que garantem as mesmas condições às quais eles são testados em qualquer laboratório ao redor do mundo.

No presente trabalho a norma escolhida é a *ASTM D638 – 14* nomeada como *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, utilizada também para determinar as geometrias dos espécimes fabricados com materiais plásticos (não especificadamente pelas impressoras 3D), mas ela será utilizada pela falta de normas específicas para o dado trabalho. Esta norma auxilia na obtenção dos valores das propriedades de tração dos materiais ensaiados.

Os materiais poliméricos escolhidos para trabalhar neste projeto são ABS e PLA. Antes do ensaio de tração, os espécimes precisam ser condicionados de acordo com a norma *ASTM D618 – 13*, como forma de padronizar as condições de humidade, temperatura às quais os modelos estão sujeitos antes do teste de tração.

### 2.5.2. Ensaio de absorção de água

Quando um filamento 3D absorve água, apresenta problemas porque ela causa oxidação e degradação dele, gerando uma má impressão.

A absorção de água pode aumentar a fragilidade [46], acréscimo do diâmetro do filamento, influenciando no entupimento do bocal extrusor ou vazios no filamento, pois

quando o bocal é aquecido, a água contida evapora. Esses vazios acabam por causar rugosidades e esbranquiçar a peça, diminuindo a qualidade do acabamento superficial dela e acarretam degradação, já mencionada, pois as moléculas de água unem-se às moléculas do polímero, podendo romper os filamentos.

Em relação ao espécime já impresso, a penetração de água nele pode ser conseguida principalmente através do mecanismo de difusão de moléculas de água entre as micro lacunas das cadeias poliméricas [47].

Uma forma de diminuir o problema de absorção de água em polímeros pode ser o revestimento do material com algum produto que limite a quantidade de água absorvida, exemplos de materiais que servem de revestimento são o selante de madeira de poliuretano (*Lakeone*) e um verniz aquoso de acrílico (*Luxens*) [47].

### 2.5.2.1. Procedimento do ensaio de absorção de água

Para a realização do ensaio é preciso ter uma balança com capacidade de leitura de 0,0001 g e um forno que mantenha a temperatura uniforme,  $50 \pm 3$  °C.

Primeiramente condiciona-se os espécimes segundo descrito na norma *ASTM D570 – 98* (2018) [48]. Depois medem-se os espécimes com ajuda de um paquímetro antes de submergi-los em água e anotam-se os valores. Estes valores são comparados aos valores encontrados depois do teste de absorção de água. Com eles consegue-se observar mudanças nas dimensões e aparência do objeto que podem ocorrer devido à água absorvida.

É importante a utilização das dimensões o mais corretas possível dos espécimes, pois a quantidade de água absorvida é muito pequena, por isso qualquer variação no volume do material tem impacto significativo [47].

Também se mensuram as massas dos espécimes e os valores são anotados antes e depois do ensaio. Estes valores de massa são utilizados nos cálculos posteriores. Por exemplo no cálculo do aumento percentual do peso durante a imersão (AP), que é definido como a quantidade de saturação de água em relação ao peso da amostra seca. AP é dado pela Equação 5 [48]:

$$AP\% = \frac{w_{sat} - w_{seco}}{w_{seco}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde

- i.  $w_{\text{seco}}$  é a peso seco, quer dizer, peso da amostra condicionada;
- ii.  $w_{\text{sat}}$  é o peso da amostra depois do período de imersão em água, fim do teste.

No caso deste trabalho a percentagem de água absorvida corresponde ao aumento percentual do peso.

Depois de medidas as dimensões e massas dos espécimes, eles são condicionados para retirar toda a humidade presente em seus interiores. Finalmente eles são submergidos em água durante 24 h, seguindo o procedimento Imersão por 24 h [48]. No fim deste período eles são retirados da água, um a um, secos com um pano, pesados e medidos.

### **2.5.2.2. Normas usadas no ensaio de absorção de água**

Para o ensaio foi usada a norma *ASTM D570 – 98* (aprovada novamente em 2018), nomeada como *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. Ela fornece a geometria dos espécimes empregados no ensaio, bem como o condicionamento deles e como prosseguir com o procedimento de teste. Assiste também em relação as fórmulas usadas no cálculo das propriedades.

### **2.5.3. Ensaio de flexão**

Ensaio muito utilizado na indústria pois fornece dados quantitativos da deformação dos materiais, quando sujeitos a cargas de flexão. Os resultados obtidos com este ensaio podem variar conforme a temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e geometria transversal do espécime [41].

Existem dois tipos de Ensaio de Flexão: em três pontos e em quatro pontos. No ensaio em três pontos é usada uma barra apoiada nos extremos do comprimento com uma carga aplicada a meia distância entre os apoios. Já no ensaio de quatro pontos há aplicação de carga em dois pontos equidistantes dos apoios.

Segundo Sun et al. (2008) [36] a qualidade das ligações entre filamentos adjacentes depende da temperatura de envelope e variações nas condições convectivas da peça enquanto a resistência à flexão é avaliada.

Os parâmetros do teste são a extensão entre apoios, a velocidade da carga e a máxima deflexão para o teste. Estes parâmetros são baseados na espessura do espécime.

De acordo com Christyian et al. (2016) [31] a resistência à flexão decresce com o aumento da espessura das camadas, enquanto um número maior de camadas (espessuras menores) contribui para um acréscimo na resistência à flexão, já que apresenta uma quantidade menor de porosidades e é responsável pela grande quantidade de ligações. Quando o espécime é construído com ângulo de *raster* paralelo (muitas vezes considerado 0°) a direção do plano de flexão, também há um aumento na resistência à flexão.

### 2.5.3.1. Procedimento do ensaio de flexão

No Ensaio de Flexão em Três Pontos um espécime de seção retangular padronizada é apoiado em dois suportes e uma carga crescente é aplicada no meio do espécime até sua rutura ou quando uma deformação de 5 % é alcançada (o que acontecer primeiro), causando flexão em todo o corpo. Deste teste tiram-se dados força x deslocamento, conseqüentemente um gráfico tensão x deformação, de onde são extraídas propriedades de flexão do corpo [49].

### 2.5.3.2. Propriedades obtidas com o ensaio de flexão

#### 2.5.3.2.1. Resistência a flexão

Máxima tensão de flexão suportada pela amostra durante o ensaio. Dada pela Equação 6, onde  $\sigma_{fm}$  é a tensão nas fibras externas no ponto médio do espécime (em MPa).

$$\sigma_{fM} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde

- i. P é a carga no ponto máximo na curva Carga x Deslocamento, em N;
- ii. L é a extensão entre apoios, em mm;
- iii. b é a largura do espécime, em mm;
- iv. d é a espessura do espécime, em mm.

### 2.5.3.2.2. Deformação na flexão

Mudança nominal no comprimento de um elemento da superfície externa do espécime a meia distância, onde a deformação máxima ocorre. Dada pela Equação 7, onde  $\varepsilon_f$  é a deformação na superfície externa (em mm/mm).

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde

- i. D é o deslocamento do centro do espécime, em mm;
- ii. L é a extensão entre apoios, em mm;
- iii. d é a espessura da amostra, em mm.

### 2.5.3.2.3. Módulo de Elasticidade na Flexão

Módulo de elasticidade calculado pela razão, dentro do limite elástico, da tensão pela respetiva deformação ou pela Equação 8:

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad \text{Equação 8}$$

Onde

- i. L é a extensão entre apoios, em mm;
- ii. m é o declive da curva força x deslocamento na parte linear, em N/mm;
- iii. b é a largura do espécime, em mm;
- iv. d é a espessura do espécime, em mm.

### 2.5.3.3. Normas usadas no ensaio de flexão

A norma usada no Ensaio de Flexão atende por *ASTM D790 – 17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* [50]. Com ela obtém-se as geometrias dos espécimes, a quantidade, bem como seu condicionamento e procedimentos de realização do ensaio.

## 2.6. Estudo da resolução

Todas as impressoras e processos de fabricação 3D têm suas limitações. O nível de detalhes de uma impressão é afetado pela resolução nas três dimensões (XY, planares e responsáveis pelo tamanho mínimo dos detalhes no plano e Z, altura ou espessura da camada). É necessário que as direções sejam analisadas separadamente, pois suas resoluções são diferentes, já que são controladas por diferentes mecanismos.

A resolução também é influenciada pela técnica de manufatura aditiva utilizada e pelo material empregue. Espera-se que a peça seja fiel ao desenho *CAD*, mas as limitações referidas acima mostram que algum grau de inexatidão é esperado, ou seja, a resolução influencia na qualidade e funcionalidade do objeto.

### 2.6.1. Resolução em x e y

Também chamada de resolução horizontal. Neste tipo de resolução tanto as impressoras quanto os processos têm um menor valor que imprimem com êxito. Marca o tamanho mínimo dos detalhes que podem ser produzidos pela impressora, influenciados pelas configurações dela e pelo diâmetro do bocal. É o menor movimento que o *laser*, na tecnologia *SLA*, ou o bocal extrusor, tecnologia *FDM*, podem fazer numa camada e quanto menor este número, melhores são os detalhes. Nas impressoras *SLA* o tamanho do ponto do *laser* é afetado pela refração dele, contaminantes e química das resinas [56].

### 2.6.2. Resolução em z

É a espessura ou altura mínima da camada que uma impressora consegue produzir num passe. Esta altura não ultrapassa o valor do diâmetro do bocal da máquina *FDM* [57]. A altura das camadas influencia nos resultados, seja de um jeito bom ou ruim, quer dizer, aumentar a altura das camadas nem sempre oferece o melhor resultado, mas algumas vezes, aumentar a resolução significa melhorar a qualidade das impressões.

Um aumento na resolução em Z, ou seja, uma diminuição da altura das camadas aumenta o número de repetições, conseqüentemente o tempo de fabricação do componente e a chance de erro na impressão.

Quando o objeto a ser impresso possui mais arestas verticais, horizontais e poucas diagonais, o uso de melhores resoluções em Z não compensa, já que a qualidade da peça não melhora e maiores são as chances de erros. Enquanto peças com detalhes arredondados, formas orgânicas e gravuras complexas são beneficiadas com redução dos valores da altura das camadas [56].

### **2.6.3. Resolução ligada às tecnologias**

A comparação entre máquinas que trabalham com diferentes tecnologias de impressão 3D não é válida, pois as diferentes naturezas dos processos possibilitam diferentes resoluções em cada impressora. A comparação só é válida quando se faz com máquinas da mesma tecnologia. Impressoras que usam a tecnologia *SLA* têm uma resolução muito maior quando comparadas às máquinas *FDM*.

Para entender um pouco mais da resolução num processo *FDM* é preciso entender como se dá os movimentos nos eixos X, Y e Z da cabeça de impressão. Este movimento é feito com ajuda de motores de passo, ou seja, cada passo do motor é a menor quantidade que ele consegue se mover. Quão menor for este passo do motor, mais finos e precisos serão os movimentos, logo melhor a resolução de impressão [58].

A resolução das impressoras *FDM* é por conta do diâmetro do bocal e a exatidão dos movimentos do extrusor (exatidão devido ao motor de passo) nos eixos X e Y, enquanto a das máquinas *SLA* se dá pelo tamanho do ponto do *laser*.

O fluxo de material derretido também acaba por influenciar no acabamento dos objetos fabricados por impressão *FDM*, pois o bocal extrusor é uma zona de muito calor (o plástico é derretido) onde o material é expelido, o que faz com que seja difícil para as máquinas controlarem com precisão a quantidade de material que sai dele [58].

A impressão de uma máquina *SLA* não depende da exata deposição do fluxo de filamento, em comparação as de tecnologia *FDM*, por isso apresentam uma resolução mais fina em XY, e sua resolução em Z depende da profundidade de penetração da luz (a

cura depende da dose de exposição, ou seja, da intensidade de luz e tempo de iluminação) e também da exatidão do motor de passo que opera a plataforma de construção [11].

#### **2.6.4. Estudo de diferentes modelos que auxiliam na verificação da resolução de duas impressoras FDM**

Como forma de estudar a resolução das impressoras, várias bibliografias foram usadas em conjunto com a norma *ISO/ASTM 52902:2019* nomeada por *Additive manufacturing – Test artifacts – Geometric capability assessment of additive manufacturing systems* com a finalidade de desenvolver um modelo que auxilie neste estudo. A norma descreve as geometrias de modelos, juntamente com as medidas qualitativas e quantitativas (acabamento superficial, aparência e dimensões) para avaliar o desempenho do processo de manufatura aditiva [59].

A Figura 19a mostra o modelo criado por Childs e Juster (1994) [60], consiste numa base quadrada sustentada por quatro cubos. A partir desta base pode-se medir a planicidade e retidão do modelo. A repetibilidade e paralelismo do sistema foram medidos através de nove detalhes retangulares com um furo cilíndrico no meio, estes furos permitiram medir os formatos arredondados. No modelo também foram empregues paredes finas, tudo para comparar exatidão e repetibilidade das partes.

Jayaram et al. (1994) [61] desenvolveu um modelo para estudo qualitativo com cilindros, cone e prismas quadrangulares para estudar os efeitos de inclinações, escada, paralelismo, retidão e empenamento das superfícies, nesta ordem. O mesmo modelo foi usado para estudo quantitativo através de medições com uma máquina de medição de coordenadas. Eles mediram os desvios de superfícies planas usando o topo dos prismas, Figura 19b.

No estudo da exatidão geométrica Campbell et al. (2019) [62] usou uma simplificação de uma peça antes desenvolvida, Figura 19c, e nos aspetos estéticos, onde avaliou a perceção tátil e visual empregaram outro objeto, Figura 19d. Ela foi escolhida para avaliação visual porque contém superfícies orgânicas que não são facilmente medidas, mas facilmente percebidas pelos olhos.

Ippolito et al. (1995) [63] usou uma peça baseada em uma proposta da 3D System para avaliar a exatidão dimensional e acabamento superficial de alguns processos de manufatura aditiva. A pesquisa concluiu que os processos usados obtêm valores similares de exatidão dimensional, mas o resultado da peça é influenciado pelo material escolhido, conseqüentemente pelos parâmetros de operação escolhidos e pelas habilidades do operador, Figura 19e.

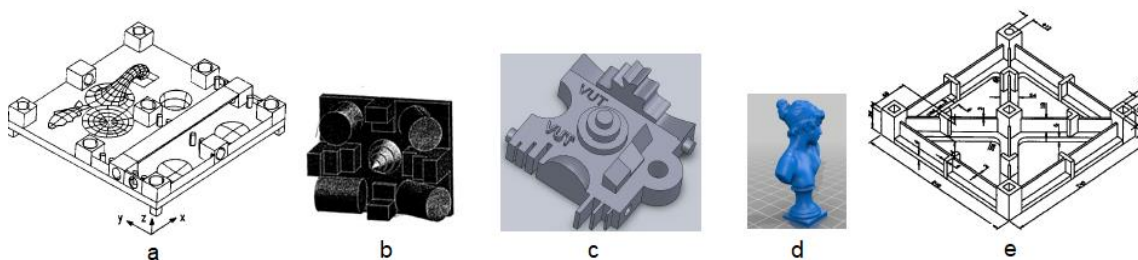


Figura 19 Modelos segundo [60]–[63]

Byun e Lee (2003) [64] compararam vários modelos desenvolvidos, resumiram os contras existentes neles e desenvolveram uma peça para compensar estas desvantagens das peças antes propostas, Figura 20a. Com isso avaliaram a exatidão dimensional, fabricação de detalhes finos e rugosidade da superfície.

Kruth et al. (2005) [65] desenvolveu um modelo para testar as propriedades mecânicas (tais como densidade, dureza e rigidez) e realizar análises dimensionais para avaliar exatidão e qualidade superficial, Figura 20b. Os testes mecânicos foram realizados a partir de amostras retiradas do modelo.

Lemu e Kurtovic (2012) [66] desenvolveram três peças para avaliar a influência do tipo de arquivo na exatidão da peça, as exatidões alcançáveis, tais como planicidade e acabamento superficial e a mínima espessura de parede, Figura 20c. Concluíram que os desvios nas exatidões geométricas e dimensionais estão subordinados ao tipo de arquivo da peça e que a orientação de construção do objeto influi na espessura mínima das paredes.

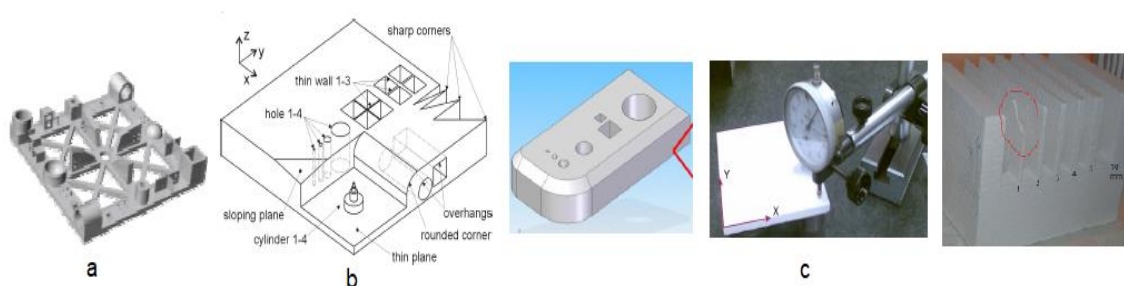


Figura 20 Modelos segundo [64]–[66]

Fahad e Hopkinson (2012) [67] definiram um novo tipo de modelo para avaliar exatidão, tolerâncias e repetibilidade das peças construídas com diferentes processos de manufatura aditiva. Como forma de estudar a repetibilidade, os detalhes foram dispostos simetricamente na peça, Figura 21a.

Kacmarcik et al. (2018) [68] estudou a exatidão dimensional de duas máquinas *FDM* por meio de um modelo desenvolvido por eles, Figura 21b.

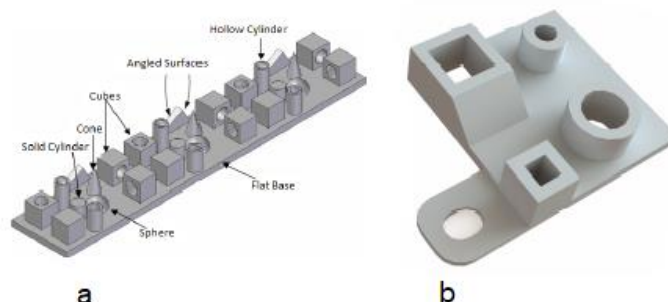


Figura 21 Modelos segundo [67], [68]

### 2.6.5. Razões para se empregar um modelo

Um modelo, de acordo com Chua et al. (2003) [18], serve como uma ferramenta valiosa na avaliação dos pontos altos e baixos dos sistemas testados, ele mostra onde o sistema se sobressai ou não. Facilita para um potencial comprador saber se a peça ficará como necessita, através de medições, verificações e testes; também ajuda os departamentos de uma empresa a entenderem o que um sistema de prototipagem rápida pode fazer. Possibilita que as partes (*design*, fabricação) trabalhem simultaneamente com o produto.

De acordo com Chua et al. (2003) [18] para o desenvolvimento de um modelo primeiro escolhe-se o tipo que será usado, ele deve ser simples, fabricado com pequenos

gastos de recursos e permitir o uso de dispositivos de medição simples para realização das medidas.

Eles se dividem em modelos geométricos, mecânicos e de processos [69]:

- i. Modelos geométricos: usados para verificar e comparar a exatidão geométrica e dimensional dos protótipos (tolerâncias, exatidão, acabamento superficial e repetibilidade).
- ii. Modelos mecânicos: permitem a caracterização das propriedades mecânicas (tensão, compressão, fluência, entre outras). Eles geralmente são padronizados segundo alguma norma nacional ou internacional;
- iii. Modelos de processos: estabelecem os parâmetros ótimos de processo (orientação da peça, suportes, espessura da camada, velocidade). Devido à variedade de processos e parâmetros de manufatura aditiva é extremamente difícil o projeto de um modelo universal.

Vale salientar que neste projeto modelos geométricos e mecânicos são escolhidos para avaliação de exatidão e propriedades mecânicas de peças construídas com máquinas que utilizam a tecnologia *FDM*.

Depois de escolhido o tipo de modelo, os tempos de construção e medidas devem ser registrados através de tabelas e gráficos, estes resultados são baseados nas medidas da peça fabricada em relação ao modelo *CAD*. O resultado do tempo é a soma do projeto *CAD*, processos e pós-processo (quando necessário).

Por fim, faz-se a análise e comparação dos resultados. Estes desvios podem ou não serem aceitos, dependendo do intervalo de tolerância deles. Ressalta-se que um modelo não deve ser tomado como verdade absoluta, ele faz parte do estudo de avaliação geral. Os aspectos humanos como experiência e habilidade não são levados em conta, mas devem ser quando se trata de uma avaliação completa.

O diagrama de *Ishikawa* Figura 22 demonstra esta relação que alguns fatores têm com o modelo desenvolvido, possíveis causas de variação do modelo fabricado com o modelo em *CAD*. Como mencionado acima, cada fator não deve ser analisado separadamente para um resultado verdadeiro. Este diagrama encaixa-se para fabricação de qualquer peça aplicando impressão 3D.

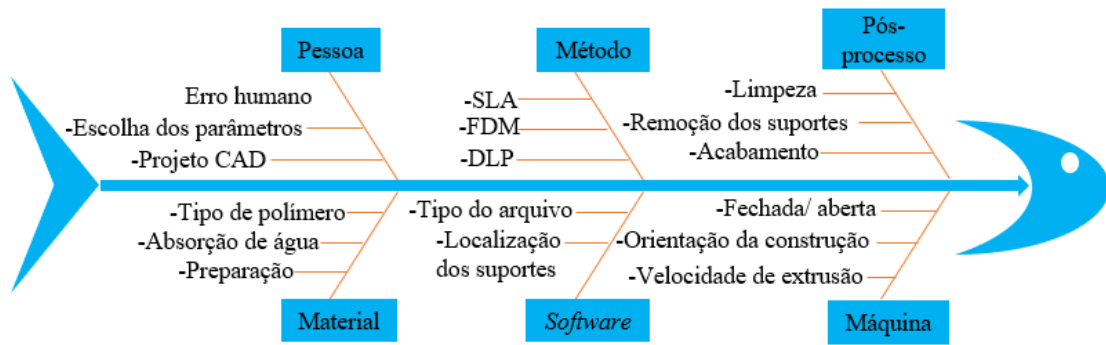


Figura 22 Diagrama de Ishikawa para obtenção de modelo/ peça

## Capítulo 3

### 3. Ensaaios Experimentais

Nesta seção é apresentada a prática dos ensaios de tração, absorção de água, flexão, envelhecimento acelerado e estudo da resolução de duas impressoras. Desde a fabricação dos espécimes até a realização do ensaio propriamente dito.

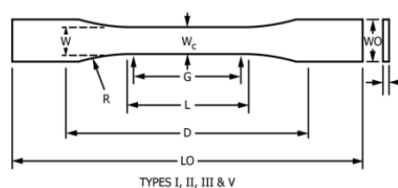
#### 3.1. Procedimento experimental do ensaio de tração

##### 3.1.1. Geometria e impressão dos espécimes

Para se iniciar o fabrico de espécimes é necessário determinar as dimensões a utilizar, elas dependem da rigidez do material. De acordo com a norma *ASTM D883 – 19c*, um plástico semirrígido tem um módulo de elasticidade em flexão ou em tração entre 70 e 700 MPa a 23 °C e 50 % de humidade relativa quando testado consoante aos métodos de teste *D790-17*, *D638 – 14*, entre outros. Já um plástico rígido tem um módulo de elasticidade maior do que 700 MPa sob as mesmas condições.

Parte-se então do princípio de que não se sabe se o material é rígido, semirrígido ou não rígido. Para isso faz-se uso de uma das geometrias apresentadas na norma *ASTM D638 – 14*.

De acordo com a norma apresentada acima, escolheu-se espécimes de plástico rígido ou semirrígido com espessuras de até 4 mm (0.16 in.), por isso são do tipo V e apresentam as dimensões assinaladas em laranja na Figura 23.



Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm (in.)<sup>4</sup>

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>		
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)		$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>B,C</sup>
$L$ —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)		$\pm 0.5$ ( $\pm 0.02$ ) <sup>C</sup>
$W_O$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...		+ 6.4 (+ 0.25)
$W_O$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)		+ 3.18 (+ 0.125)
$L_O$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)		no max (no max)
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)		$\pm 0.25$ ( $\pm 0.010$ ) <sup>C</sup>
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...		$\pm 0.13$ ( $\pm 0.005$ )
$D$ —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)		$\pm 5$ ( $\pm 0.2$ )
$R$ —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)		$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ ) <sup>C</sup>
$R_O$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...		$\pm 1$ ( $\pm 0.04$ )

Figura 23 Tension Test Specimens for Sheet, Plate and Molded Plastics. Adaptado de ASTM D638 – 14

Em seguida, fez-se o desenho deles no programa *Autodesk Inventor Professional 2020*. A Figura 24 apresenta o desenho do espécime no programa e o APÊNDICE A mostra uma representação do desenho técnico dele sem aplicação do material, no caso PLA+ e ABS.

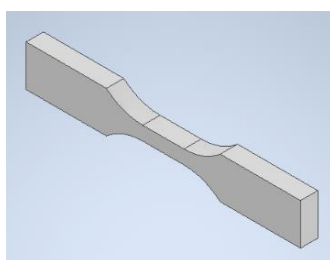


Figura 24 Espécime tipo V da norma ASTM D638 – 14

O arquivo do desenho foi transformado num arquivo *.stl* no próprio *Inventor*, Figura 4, e enviado aos *softwares* de fatiamento, onde é feita a conversão do objeto em código G para ser fabricado pelas impressoras 3D.

Um modelo em PLA+, na cor preta foi fabricado com a impressora *Big Builder Dual Feed* com 100 % de preenchimento para a primeira avaliação do comportamento de tração, a fim de verificar a fixação às garras e parâmetros de ensaio escolhidos. Este modelo foi ensaiado com velocidade de ensaio de 5 mm/min, pois é um valor aceitável e dentro do intervalo previsto pela norma do ensaio de tração usada, mas como esta velocidade causou rutura do modelo antes de 30 s (tempo mínimo para o ensaio ser considerado válido), a velocidade foi diminuída então para 1 mm/min, também de acordo com a norma. Outros dois espécimes foram confeccionados com as mesmas especificações anteriores e ensaiados com a nova velocidade a fim de testar os parâmetros. Com eles conseguiram-se resultados satisfatórios.

Depois de realizados os primeiros ensaios e os parâmetros de tração escolhidos responderem de forma esperada, 5 modelos foram impressos para cada material. Número este também tirado da norma *ASTM D638 – 14*.

Para a construção dos modelos em ABS, o arquivo *.stl* foi enviado ao *software AutoMaker* da impressora *Robox Dual*, Figura 25. O programa então transformou o arquivo *.stl* em código G e enviou os comandos de fabricação para a impressora. Os parâmetros de fabricação 3D que foram usados nos espécimes em ABS são apresentados na Tabela 2.

A *Robox Dual* contém base de impressão aquecida, que garante uma melhor adesão do material, e possui o ambiente de impressão fechado, possibilitando que a temperatura dele seja controlada. Estas duas características ajudam evitar o *warping*, pois mantêm todo o objeto morno até o fim da impressão, fazendo com que ele resfrie simultaneamente.

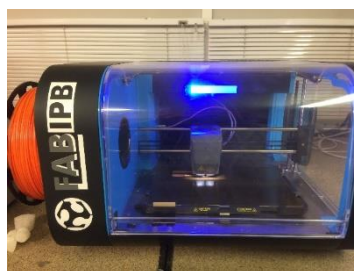


Figura 25 Robox Dual durante a construção dos espécimes em ABS

Tabela 2 Parâmetros de fabricação de modelo em ABS e em PLA+

Parâmetros	ABS	PLA+
Preenchimento ( <i>infill</i> )	100 %	100 %
Cor	Laranja	Preto
Altura da camada	0,3 mm	0,2 mm
Temperatura extrusor	235 °C	215 °C
Temperatura ambiente de impressão	55 °C	~20 °C
Temperatura da base de impressão	115 °C	~20 °C
Ângulo de <i>raster</i>	+45°/-45°	+45°/-45°
Número de camadas	11	15

Com exceção da cor e da percentagem de preenchimento, os demais parâmetros foram fornecidos pela impressora *Robox Dual* em função do tempo de fabricação. Quanto

maior este tempo, mais refinada a produção do espécime. O tempo de fabricação escolhido foi de aproximadamente 36 min, com produção mais grosseira. A Figura 26 mostra o programa *AutoMaker*, com os cinco espécimes em ABS e seu respetivo tempo de fabricação escolhido.

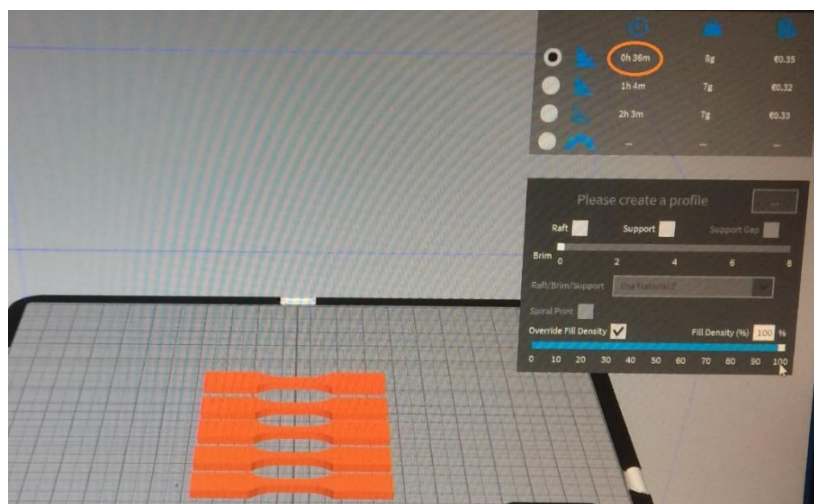


Figura 26 Layout do programa *AutoMaker* com os espécimes e parâmetros escolhidos

Para construção dos espécimes em PLA a mesma impressora seria utilizada, mas como ela apresentou problemas no extrusor, foi utilizada a *Big Builder Dual Feed*, impressora usada na fabricação dos primeiros espécimes. Foi utilizado então PLA+ (PLA com valores de propriedades mais altos quando comparado ao PLA comum), preto e os parâmetros dados pela impressora foram apresentados na Tabela 2, tirando a cor e percentagem de preenchimento que foram fornecidos pelo utilizador.

As tabelas dos materiais apresentam as cores, pois de acordo com Pereira et al. (2016) [9], variações nas cores causam mudanças nas propriedades mecânicas do PLA, tais como tensão e deformação na rutura.

A Figura 27a e b apresenta os espécimes em ABS e PLA+ para o Ensaio de Tração, respetivamente.

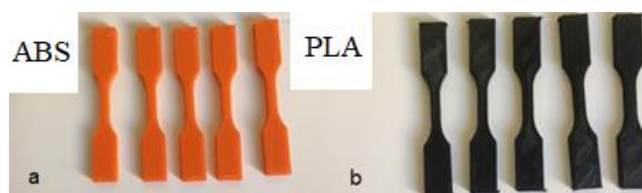


Figura 27 Espécimes em ABS (a) e PLA+ (b) para ensaio de tração

Acrescenta-se que as impressoras usadas estão localizadas no Fablab do Instituto Politécnico de Bragança e trabalham com a tecnologia *FDM*, ou seja, utilizam extrusão de material fundido para construir a peça, camada por camada.

### **3.1.2. Estabilização dos espécimes**

O condicionamento dos espécimes deveria seguir a norma *ASTM D618 – 13*. O Procedimento A que seria utilizado é dado por 40/23/50 para espécimes de até 7 mm de espessura. Como já mencionado, os espécimes do projeto têm aproximadamente 3,2 mm de espessura. Que significa 40 h de condicionamento em 23 °C ( $\pm 2$  °C) e 50 % de humidade relativa. Como não houve possibilidade do controle de humidade, os espécimes foram mantidos no laboratório do ensaio (laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança) por no mínimo 40 h, com temperatura de aproximadamente 20 °C.

### **3.1.3. Ensaio de tração**

O ensaio de Tração foi realizado em espécimes projetados segundo a norma *ASTM D638 – 14* e condicionados em condições de ambiente reais. Os espécimes foram fabricados com os polímeros PLA+ e ABS, anteriormente apresentados, as larguras e espessuras foram medidas para cada espécime com auxílio de um paquímetro *Mitutoyo* com resolução de 0,05 mm.

Foi usada a máquina de testes universal da marca *Shimadzu* série *Autograph AGS – X* (500 N a 10 kN) do laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB. Os espécimes foram presos às garras da máquina manualmente, de modo que as garras ficassem a uma distância de 25,4 mm entre si. Enquanto uma garra é fixa a outra fez o movimento longitudinal ao corpo, Figura 28.

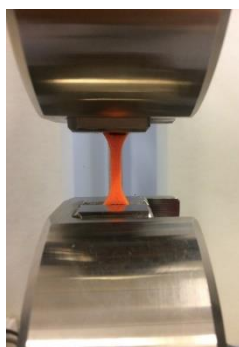


Figura 28 Espécime em ABS fixo à máquina

Por meio da garra que se movimenta é aplicada uma carga gradual que corresponde à deformação imposta pela velocidade de 1 mm/min que foi usada no ensaio de Tração até a rutura dos espécimes. Estes parâmetros foram colocados no *display* do *software* da máquina juntamente com valores de largura e espessura dos espécimes (secção transversal  $A_0$ ).

O ensaio foi controlado pelo microcomputador através do programa *Trapezium – X*. Os valores encontrados foram anotados para cada modelo, obtendo assim valores de tração para cada amostra.

A Figura 29a e b apresenta os espécimes após o ensaio de tração em ABS e PLA+, nesta ordem.

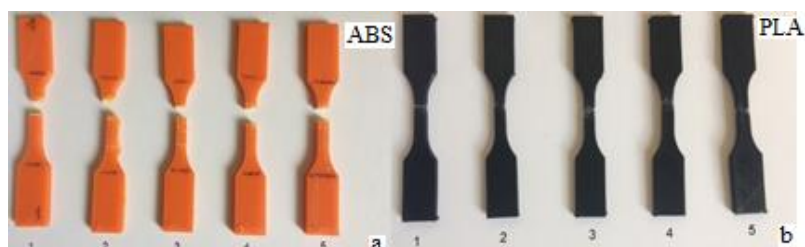


Figura 29 Espécimes após o ensaio de tração em ABS (a) e PLA (b)

## 3.2. Procedimento experimental do ensaio de absorção de água

### 3.2.1. Fabrico dos espécimes

De acordo com a norma D570 – 98 (aprovada novamente em 2018) o perfil dos espécimes é de acordo com o padrão *ISO* e suas dimensões são 60x60x1 mm com tolerâncias de  $\pm 2$  e 0,05 mm, respetivamente.

O desenho do modelo foi feito no *software Autodesk Inventor Professional 2020*. A Figura 30 apresenta a sua imagem sem aplicação do material, no caso PLA e ABS. O APÊNDICE B mostra uma representação do desenho técnico do espécime.

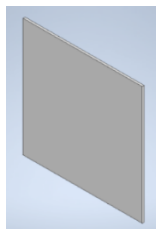


Figura 30 Espécime para Ensaio de Absorção de água

Finalizado o desenho o arquivo foi transformado em *.stl* no próprio *Inventor* e enviado ao *AutoMaker (Robox Dual)* e *Repetier – Host (Big Builder Dual Feed)* para conversão do objeto em código G a fim de ser fabricado pelas impressoras 3D.

Segundo a norma *ASTM D570* (2018) [48], 3 modelos devem ser fabricados para o ensaio de absorção de água, mas 7 peças foram fabricadas no total, três em PLA na cor azul (uma das peças apresentou muitos defeitos), um em PLA+ preto e mais três em ABS laranja.

Na Tabela 3 tem-se os parâmetros de impressão dos modelos em PLA e ABS fabricados pela impressora *Robox Dual*, além dos parâmetros do PLA+ fabricado pela *Big Builder Dual Feed*.

Tabela 3 Parâmetros de impressão dos espécimes em PLA e PLA+ para ensaio de Absorção de Água

Parâmetros	PLA	PLA+	ABS
Preenchimento ( <i>infill</i> )	100 %	100 %	100 %
Cor	Azul	Preto	Laranja
Altura da camada	0,3 mm	0,2 mm	0,3 mm
Temperatura extrusor	195 °C	210 °C	235 °C
Temperatura da mesa de impressão	70 °C	~20 °C	125 °C
Temperatura ambiente de impressão	35 °C	~20 °C	60 °C
Ângulo de <i>raster</i>	+45°/-45°	+45°/-45°	+45°/-45°
Número de camadas	3	5	3

No último espécime em PLA azul a impressora *Robox Dual* apresentou um problema no extrusor e não pôde mais imprimir com o material, por isso um espécime em PLA+ foi construído na *Big Builder Dual Feed*. Espera-se uma variação na absorção, para

menos, de água deste espécime em relação aos demais, já que a impressora *Big Builder Dual Feed* teoricamente apresenta uma melhor união entre as camadas quando comparada à *Robox Dual*, Tabela 3.

Para cada espécime em ABS e em PLA na impressora *Robox Dual*, o tempo de impressão foi de aproximadamente 24 min, com uma produção mais grosseira.

A Figura 31a e b apresenta os espécimes para o ensaio de absorção de água em ABS, PLA+ (preto) e em PLA, respetivamente. Todos os espécimes foram fabricados com máquinas disponíveis no Fablab do IPB.

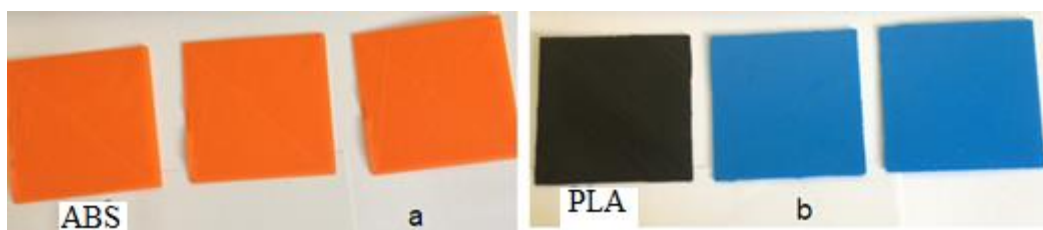


Figura 31 Espécimes em ABS (a), PLA+ e PLA para ensaio de absorção de água (b)

### 3.2.2. Estabilização dos espécimes

O condicionamento dos modelos foi realizado no laboratório de Química Analítica do IPB. Inicialmente os espécimes foram secos no forno *Scientific Series 9000* a  $50 \pm 3$  °C durante 24 h. Após o forno eles foram colocados num dessecador para arrefecer e retirar o resto de humidade, então foram pesados na balança analítica modelo *ACS 220-4* da marca *Kern* (Figura 32) e medidos com um paquímetro analógico *Mitutoyo* resolução de 0,05 mm, com os valores obtidos anotados na Tabela 10 (tópico 4.2) para posterior comparação.

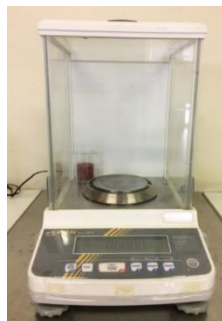


Figura 32 Balança para pesagem dos espécimes

### 3.2.3. Ensaio de absorção de água

O tipo de imersão escolhido foi de 24 h e realizada no laboratório de Química Analítica do IPB. Os espécimes foram totalmente imersos num recipiente com água destilada na posição vertical para que a parte em contato com água fosse a maior possível. No fim das 24 h os espécimes foram retirados da água, um de cada vez, a superfície foi seca com um papel absorvente e imediatamente medidos com paquímetro e balança, Figura 33.



Figura 33 Imagem do espécime em ABS imerso em água destilada

## 3.3. Procedimento experimental do ensaio de flexão em três pontos

### 3.3.1. Fabrico dos espécimes

Os espécimes foram fabricados de acordo com a norma *ASTM D790 – 17*. Ela informa que deve ser usada uma proporção de extensão entre suportes para espessura da amostra de 16:1. Também diz que a espessura do espécime não deve ultrapassar a largura e a seção transversal deve ser retangular. A dimensão escolhida dos espécimes foi 71,2 mm x 12,7 mm x 3,2 mm. Este comprimento (71,2 mm) deve possibilitar, ao mínimo, 10 % do comprimento entre suportes sobressair ao material em cada lado. A Figura 34 mostra um esquema simples da peça e dos suportes com as dimensões nominais, ambos feitos no programa *Autodesk Inventor Professional 2020* e o APÊNDICE C apresenta uma representação do desenho técnico do espécime.

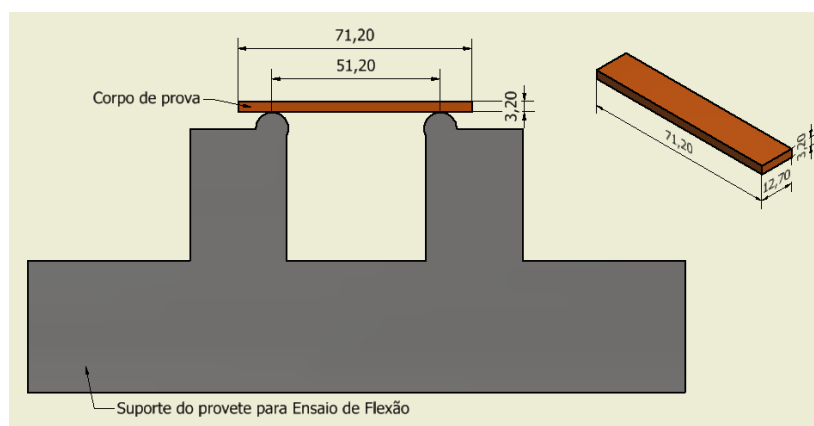


Figura 34 Esquema do espécime no suporte para Ensaio de Flexão

Depois de feita a modelação, ela foi convertida em *.stl* no próprio programa e enviada aos *softwares Automaker* da impressora *Robox Dual* para construção de 5 modelos em ABS e ao *Repetier – Host* da *Big Builder Dual Feed* para fabricação de 5 modelos em PLA+, ambas as impressoras estão disponíveis no Fablab do IPB. A Tabela 4 fornece os dados sugeridos pelos programas das impressoras, com exceção da percentagem de preenchimento e da cor do filamento, fornecidos pelo utilizador. O número de modelos também é dado pela norma *ASTM D790 – 17*.

Tabela 4 Parâmetros de fabricação dos modelos em ABS e PLA+

Parâmetros	ABS	PLA+
Preenchimento ( <i>infill</i> )	100 %	100 %
Cor	Laranja	Preta
Altura da camada	0,3 mm	0,2 mm
Temperatura extrusor	235 °C	215 °C
Temperatura ambiente de impressão	60 °C	~20 °C
Temperatura da base de impressão	125 °C	~20 °C
Ângulo de <i>raster</i>	+45°/-45°	+45°/-45°
Número de camadas	11	15

O tempo de impressão das amostras foi de aproximadamente 1 h na impressora *Robox Dual*, com uma impressão mais grosseira.

### 3.3.2. Estabilização dos espécimes

O condicionamento das peças deveria seguir a norma *ASTM D618 – 13*, Processo A, 40/23/50, para espécimes de 7 mm ou menores em espessura. Ou seja, os espécimes deveriam ser mantidos num ambiente controlado à temperatura de 23 °C e humidade relativa 50 % por um período de 40 h. Por falta de recursos para controlar a humidade, os espécimes foram mantidos durante 40 h no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais onde foram realizados os ensaios, com temperatura de aproximadamente 20 °C.

### 3.3.3. Ensaio de flexão

Escolheu-se o Procedimento A, tipo I. O procedimento A é usado em materiais que rompem com pequenos deslocamentos e a taxa de deformação (*Z*) é 0,01 mm/mm/min. O teste tipo I usa a posição da cabeça aplicadora da carga para medir os deslocamentos [50]. Primeiro mediu-se a largura e as espessuras dos espécimes no centro da extensão entre suportes, depois determinou-se a verdadeira distância entre suportes.

Para o cálculo da taxa de movimento da parte aplicadora da carga (mm/min) usou-se a Equação 9:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad \text{Equação 9}$$

Onde

- i. *Z* é a taxa de deformação e deve ser admitida como 0,01 mm/mm/min;
- ii. *d* é a espessura do espécime, em mm;
- iii. *L* é a distância entre suportes, em mm;

Os valores encontrados para *R* foram 1,348 mm/min para o ABS e 1,245 mm/min para o PLA+.

Os espécimes foram posicionados nos suportes da máquina de Ensaio Universal *Shimadzu*, série *Autograph AGS – X* (500 N à 10 kN), localizada no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, com seu eixo mais longo perpendicular à parte aplicadora da carga. Após isso a carga foi aplicada nos espécimes as taxas *R* dadas pela

Equação 9 e os dados obtidos foram anotados. O teste teve seu fim quando uma deformação máxima de 0,05 mm/mm foi alcançada antes de romper.

Estes dados por fim foram empregados no cálculo da resistência e módulo de flexão. A Figura 35 apresenta um espécime em ABS na máquina logo antes do início do ensaio e a Figura 36 apresenta os espécimes em ABS (a) e PLA+ (b) após o ensaio.

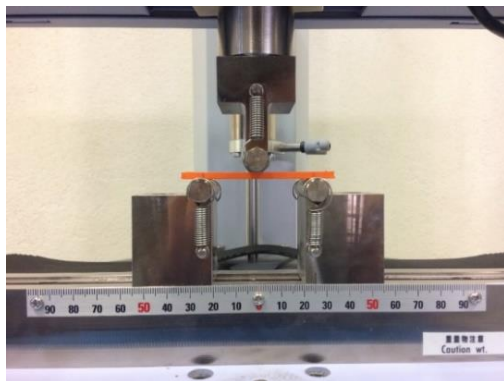
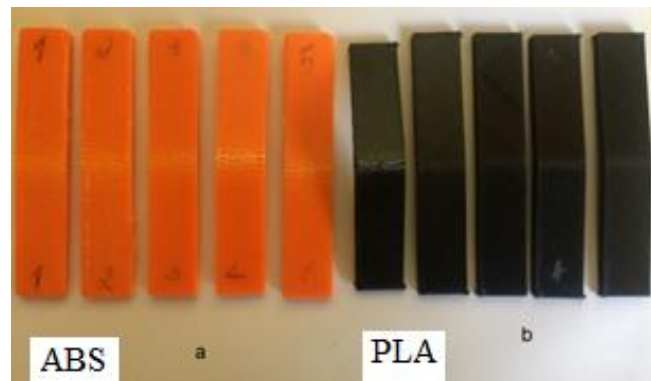


Figura 35 Corpo de prova em ABS antes do ensaio



### 3.4. Resolução

O estudo da resolução é feito com a utilização de duas impressoras que empregam a tecnologia *FDM* na construção das peças. Para isto dois modelos foram desenvolvidos, inspirados nas referências citadas anteriormente (tópico 2.6.4) em conjunto com a norma *ASTM 52902:2019* [59] e mais alguns modelos fornecidos por *Creative Tools* e *MakerBot Industries* [71], [72].

Em cada uma das impressoras foram impressos dois modelos. Um deles, desenvolvido neste projeto, foi usado para verificação da precisão dimensional das impressoras através da observação das dimensões das peças, enquanto o outro, fornecido por *MakerBot* [72] foi empregue na análise da qualidade superficial das peças, consequentemente na verificação da facilidade das impressoras em construírem certas formas e detalhes geométricos.

### 3.4.1. Impressoras escolhidas

Para a impressão dos modelos as máquinas usadas são a *Ultimaker 3* da marca *Ultimaker* e a *Cube 3* da marca *3D Systems*, ambas disponíveis no Fablab do IPB. A Tabela 5 apresenta algumas especificações das duas impressoras. Mais especificações podem ser encontradas no sítio dos fabricantes.

Tabela 5 Especificações das impressoras

<b>Especificações</b>	<b><i>Ultimaker 3</i></b>	<b><i>Cube 3</i></b>
Tecnologia de impressão	<i>FDM</i>	<i>FDM</i>
Materiais	PLA, ABS, Nylon, PVA	PLA, ABS
Base de impressão	Aquecida	Não aquecida
<i>Software</i>	<i>Cura</i> (código aberto)	<i>Cubify</i>

### 3.4.2. Desenvolvimento do modelo para análises geométrica e dimensional

Segundo a norma *ASTM 52902:2019* algumas são as formas básicas que o modelo deve ter para servir como teste de resolução e exatidão das máquinas e/ou tecnologias de impressão 3D. Para se medir a exatidão linear, detalhes cúbicos e circulares são feitos. Já a resolução é medida através de cilindros (a opção escolhida foi diâmetros médios com valores de 0,1 a 0,5 mm) e furos cilíndricos com diversos diâmetros (a opção escolhida também foi média com valores indo de 0,1 a 0,5 mm) e paredes com várias espessuras (espessuras de 0,1 mm, 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm e 1 mm).

Duas hipóteses foram levantadas, uma casinha e uma mandala. Ambas foram desenhadas no programa *Autodesk Inventor Professional 2020* e têm como objetivo o controle da exatidão de impressão das máquinas. Possibilitando a medição e controle da exatidão de diferentes características geométricas, tais como tamanho, forma, orientação e localização.

Em relação aos *designs*, a casinha é simétrica, de forma que a repetibilidade dos elementos pode ser estudada na mesma peça, mas não foi totalmente explorada por

preferência à mandala. A Figura 37 mostra uma imagem da casinha com elementos que auxiliariam nas medições e estudo da resolução.

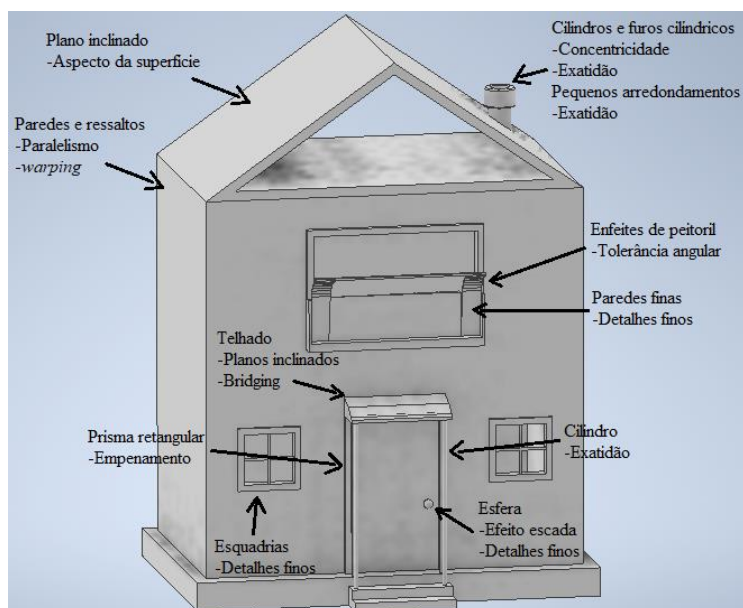


Figura 37 Detalhe da casa para estudo da resolução

A segunda hipótese, a mandala, foi feita em algumas versões, para adequar as ideias aos componentes necessários. A Figura 38 apresenta a imagem da mandala no *software Autodesk Inventor* e o APÊNDICE D apresenta a representação do desenho técnico dela.

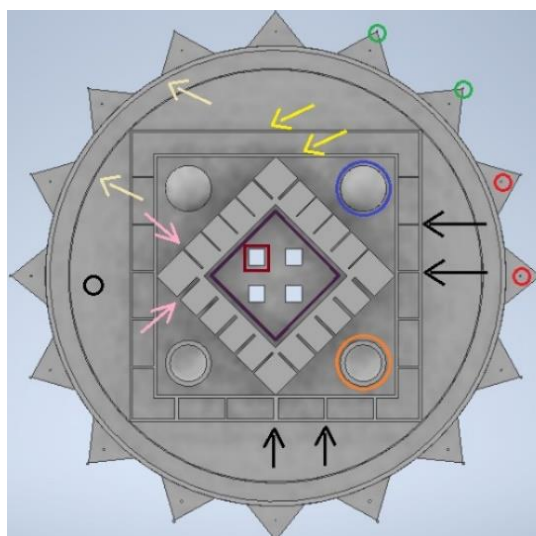













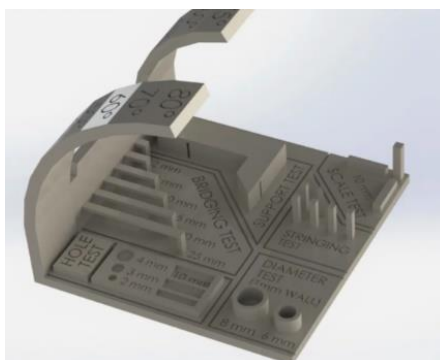
Figura 38 Mandala em sua última versão

A mandala, assim como a casinha, também é simétrica. Na Tabela 6 são apresentadas explicações para as setas e círculos coloridos no desenho dela.

Tabela 6 Legenda sobre setas, círculos e quadrados que auxiliam no estudo da resolução com a mandala

Símbolos	Componente	Medição
Círculos vermelhos 	Furos cilíndricos	Diâmetros dos furos cilíndricos (d)
Círculos verdes 	Cilindros	Diâmetros dos cilindros (d)
Setas pretas 	Paredes finas	Espessura das paredes (e)
Setas rosas 	Rasgos	Espessura dos rasgos (e)
Setas amarelas 	Paredes	Espessura, simetria (e)
Setas beges 	Paredes circulares	Diâmetro e espessuras (d) e (e)
Círculo preto 	Piso da peça	Paralelismo (P)
Círculo azul 	Meia esfera	Diâmetro externo (d)
Círculo laranja 	Semiesfera oca	Diâmetro interno (d)
Losango roxo 	Paredes	Exatidão (ex)
Quadrado vinho 	Furos quadrados	Exatidão (ex)

A Figura 39 mostra a peça desenvolvida por *MakerBot* [72]. Através deste modelo pode-se analisar a facilidade de construção de componentes angulares numa peça, *bridging*, *stringing*, escala, furos e cilindros.

Figura 39 Modelo desenvolvido por *MakerBot*

### 3.4.3. Fabrico e controlo dimensional dos modelos

Os dois modelos escolhidos para este trabalho são a Mandala e o desenvolvido por *MakerBot*. Depois de terminadas as modelações, os arquivos foram transformados em .stl no próprio *Inventor* a fim de seguir para a impressão. Para isso eles foram enviados aos programas das máquinas (*Cura* e *Cubify*, e foram fatiados). A Figura 40 mostra as duas peças já fatiadas no *software Cura*.

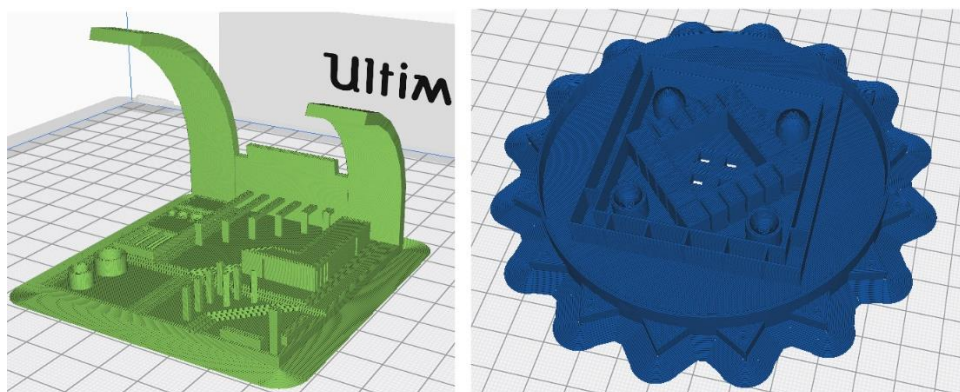


Figura 40 Peças fatiadas no programa Cura

Os parâmetros de impressão empregados nas duas máquinas são dados na Tabela 7.

Tabela 7 Parâmetros de impressão para as peças

Parâmetros	Ultimaker 3		Cube 3	
	Mandala	Peça Makerbot	Mandala	Peça Makerbot
Material	PLA	PLA	PLA	PLA
Preenchimento	100 %	100 %	Quase sólido	Quase sólido
Cor	Azul	Verde	Magenta	Magenta
Altura da camada	0,06 mm	0,06 mm	0,07 mm	0,07 mm
Temperatura do extrusor	195 °C	195 °C	~	~
Temperatura da mesa de impressão	60 °C	60 °C	~	~

Por fim na Figura 41 e Figura 42 tem-se as imagens das peças depois de impressas na *Ultimaker 3* e *Cube 3*, nesta ordem. As máquinas estão disponíveis no Fablab do IPB.

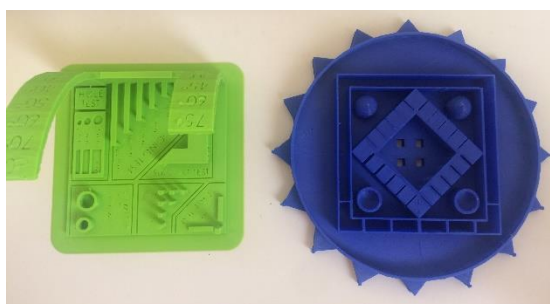


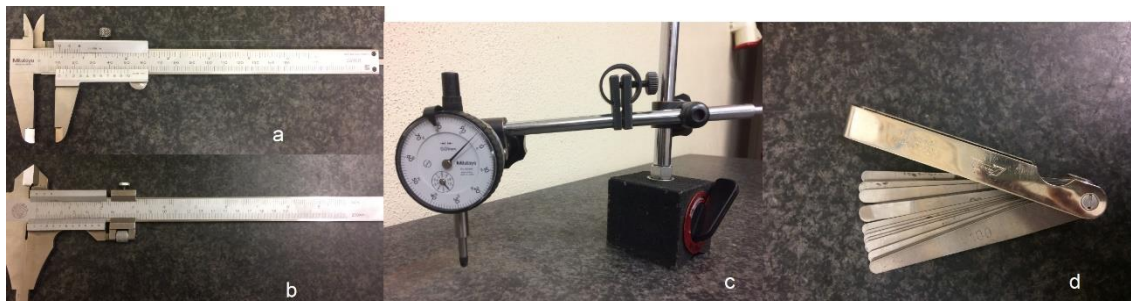
Figura 41 Peças impressas na Ultimaker 3



Figura 42 Peças impressas na Cube 3

Posteriormente à impressão, foi efetuado o controlo dimensional das peças com auxílio de alguns instrumentos que possibilitam obter as dimensões dos componentes.

Para este fim são utilizados dois paquímetros com resoluções 0,05 e 0,02 mm da marca *Mitutoyo*, um relógio comparador modelo 2046F também da marca *Mitutoyo* e um gabarito de rasgos, Figura 43a, b, c e d, respectivamente.



*Figura 43 Componentes usados na obtenção das medidas dos espécimes*

## Capítulo 4

### 4. Apresentação e análise dos resultados

Nos tópicos seguintes são apresentados os resultados relativamente aos ensaios de tração, absorção de água e flexão feitos, e no ponto posterior são exibidos os valores encontrados no dimensionamento dos espécimes para análise da resolução das duas impressoras usadas.

#### 4.1. Ensaio de tração

A partir dos valores de força e deslocamento dados pelo *software Trapezium – X* da Máquina de Testes Universal *Shimadzu* série *Autograph AGS – X* calcularam-se os valores das tensões e deformações utilizando a Equação 1 e Equação 2 e imprimiram-se no total dez gráficos, além de dois gráficos com as tensões de todas as amostras. A Figura 44 apresenta o gráfico de tensões das amostras em ABS. No APÊNDICE E têm-se os gráficos de cada amostra em ABS separadamente com seus respectivos valores de resistência à tração e tensão limite de escoamento.

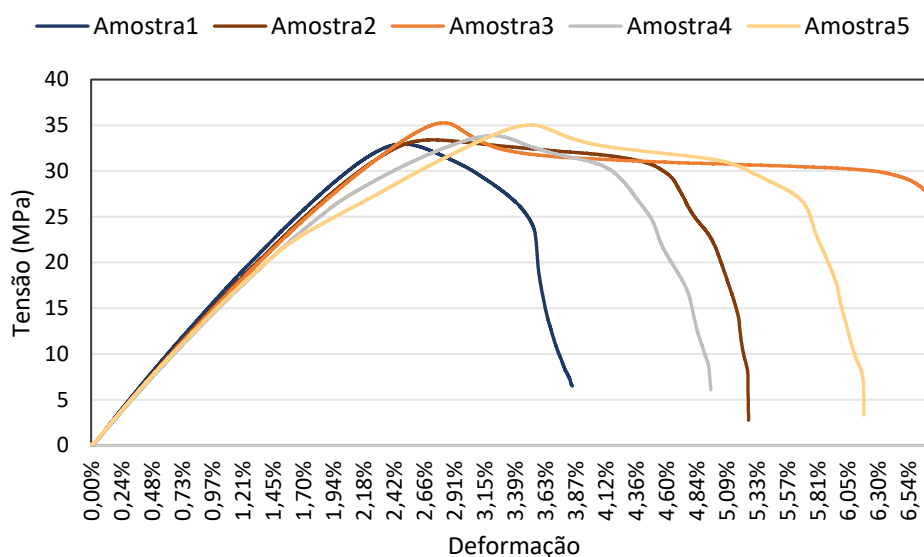


Figura 44 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de tração das amostras em ABS

Como se pode ver pela Figura 44, os diagramas obtiveram deformações elásticas, plásticas e comportamento parecido até próximo do limite de escoamento dos espécimes (adotado o mesmo valor utilizado em alguns metais, tensão onde ocorre uma deformação de 0,2 %). Percebe-se que as Amostras 4 e 5 (curvas cinza e amarela, nesta ordem) se distanciaram das demais com uma deformação mais acentuada à medida que a tensão cresceu. Após a resistência à tração (ponto mais alto de cada curva) os espécimes apresentaram o mesmo tipo de comportamento de estrição, mas seus valores de deformação foram bastante diferentes, com a Amostra 3 (laranja) apresentando a maior deformação (aproximadamente 6 %) e maior resistência à tração (aproximadamente 36 MPa), enquanto a Amostra 1 apresentou os menores valores de resistência a tração e deformação, aproximadamente 32 MPa e 3 %, nesta ordem. Se percebe então uma curva típica de materiais poliméricos com comportamento mais dúctil, já que as amostras apresentaram uma capacidade de deformação plástica antes da fratura. A Tabela 8 apresenta os valores encontrados da resistência à tração, tensão de escoamento e módulo de *Young* das amostras em ABS.

*Tabela 8 Valores encontrados de propriedades mecânicas das amostras em ABS*

<b>ABS</b>			
<b>Amostra</b>	<b>Resistência a tração</b>	<b>Módulo de Young</b>	<b>Tensão de escoamento</b>
1	32,95 MPa	1,62 GPa	29,24 MPa
2	33,40 MPa	1,57 GPa	29,01 MPa
3	36,89 MPa	1,62 GPa	29,55 MPa
4	34,38 MPa	1,53 GPa	26,16 MPa
5	36,65 MPa	1,60 GPa	24,21 MPa
Média	34,85 MPa	1,59 GPa	27,63 MPa
Desv. Pad.	1,82 MPa	0,04 GPa	2,34 MPa

Na Figura 45 pode-se observar a sobreposição dos gráficos referentes as curvas de tensão das amostras em PLA+ e separadamente com seus respectivos valores de resistência à tração e tensão de escoamento no APÊNDICE F.

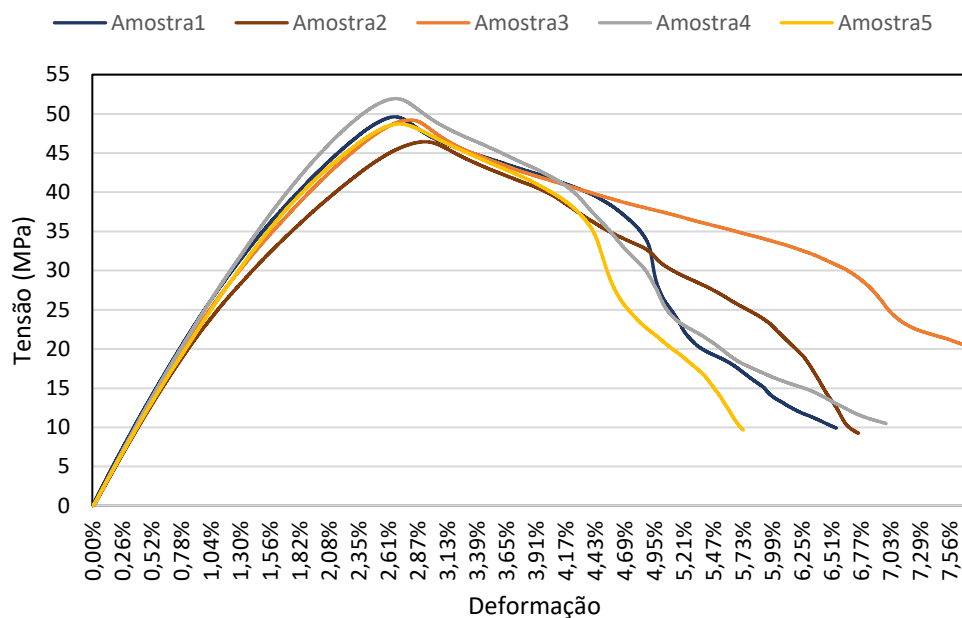


Figura 45 Diagrama Tensão x Deformação das amostras em PLA+

Através da análise da Figura 45 percebe-se que as amostras de PLA+ tiveram comportamento igual, mas diferentes valores de resistência à tração, o que já é de se esperar, pois embora os espécimes sejam feitos do mesmo material, as partes têm aptidões diferentes, por conta das variações de dimensões e disposição dos filamentos. Vê-se que as peças tiveram comportamento elástico até o limite de escoamento, tensão onde a deformação é de 0,2 %, adotado o mesmo valor do apresentado para alguns metais. Após este ponto ainda se teve um aumento nas tensões e encruamento dos objetos até um valor de tensão máximo a partir do qual houve um decréscimo da carga aplicada até o rompimento das peças. Pelo diagrama constata-se que a Amostra 3 (laranja) foi a que aguentou a maior deformação (aproximadamente 8 %) até à sua rutura, enquanto a Amostra 5 (amarela) foi a que suportou menor quantidade de deformação (aproximadamente 5,8 %). Já as Amostras 4 (cinza) e 2 (castanho) apresentaram a maior e menor resistência à tração (51,93 MPa e 46,44 MPa) e tensão de escoamento (39,29 MPa e 30,00 MPa).

A Tabela 9 apresenta os valores encontrados da resistência à tração, tensão de escoamento e módulo de *Young* das amostras em PLA+.

Tabela 9 Valores encontrados de propriedades mecânicas das amostras em PLA

PLA+			
Amostra	Resistência a tração	Módulo de Young	Tensão de escoamento
1	49,62 MPa	2,66 GPa	34,77 MPa
2	46,44 MPa	2,47 GPa	30,00 MPa
3	49,21 MPa	2,59 GPa	32,50 MPa
4	51,93 MPa	2,63 GPa	39,29 MPa
5	48,71 MPa	2,52 GPa	36,58 MPa
Média	49,18 MPa	2,57 GPa	34,62 MPa
Desv. Pad.	1,97 MPa	0,07 GPa	3,59 MPa

#### 4.1.1. Análises

Abaixo, na Figura 46 tem-se os valores das médias de tensões encontradas comparadas aos valores de literaturas. Para ABS as literaturas consultadas foram [17], [28], [73]–[78] e para o PLA+ foram [26], [75], [78], [79].

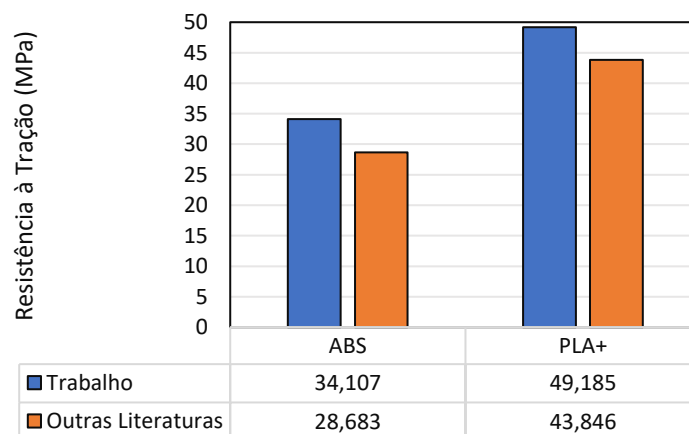


Figura 46 Valores de resistência à tração das Amostras em ABS e PLA

Os valores encontrados para o ABS e PLA+ foram um pouco acima das médias encontradas na literatura, isto se deve a diversos parâmetros não analisados que se diferenciam um dos outros. Logo no início tem-se o polímero escolhido (ABS e PLA+), o que faz com que cada filamento de material tenha propriedades mecânicas diferentes. Uma característica exposta anteriormente que junto às outras influencia na resistência à

tração do PLA é a sua cor, portanto a cor escolhida (preta) devido à composição química muitas vezes mineral, acaba por diminuir ou aumentar a resistência do objeto [9].

Depois tem-se as impressoras empregadas na fabricação dos espécimes, cada uma tem diferentes configurações e isto também influencia na resistência mecânica do material. Nesta análise, as escolhidas foram a *Robox Dual* e *Big Builder Dual Feed*.

Como já mencionado a *Robox* possui o ambiente de impressão aquecido o que acaba por ajudar a melhorar as propriedades do material, pois possibilita uma melhor ligação entre as camadas de material, já que existe um controle da temperatura do ambiente de impressão, além de ajudar a evitar *warping* nos espécimes. Enquanto a *Big Builder* possui a câmara de impressão aberta, não tendo uma influência positiva na impressão do material.

Também as temperaturas dos bocais extrusores das impressoras quando devidamente escolhidas (as usadas nos espécimes foram dadas pelos *softwares* das máquinas depois de selecionados os polímeros, 235 °C para ABS e 215 °C para PLA+) ajudam numa melhor fluidez dos materiais, resultando em uma melhor adesão entre as camadas e conseqüentemente num incremento no módulo de elasticidade deles, já que depois de sólidas as peças ficam mais resistentes à deformação.

Como já citado, a orientação das camadas de preenchimento da peça (ângulo de *raster*) escolhida foi 45°/-45° (significa que os filamentos fazem 45° e -45° com o eixo X de construção e aplicação da carga). Uma característica inerente da fabricação *FDM* é a anisotropia o que faz com que os objetos suportem diferentes valores de cargas nas variadas orientações. Uma das razões para estes valores de propriedades mecânicas mais variados.

Na Figura 47 vê-se uma comparação entre as médias dos módulos de elasticidade encontrados na literatura, para o ABS as bibliografias foram [74]–[78] e bibliografias [26], [75], [78], [79] para o PLA+, e os obtidos neste trabalho.

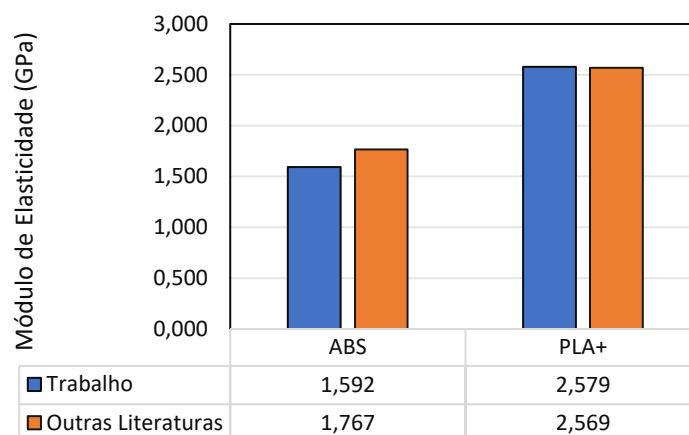


Figura 47 Valores dos módulos de elasticidade das amostras em ABS e PLA

Os valores encontrados são muito parecidos com os das referências, mostrando um comportamento parecido apesar das diferenças ambientais e de outros parâmetros. Em relação ao PLA+, a cor do filamento afeta os valores do módulo de elasticidade, causando um aumento em sua rigidez [9].

Pela Figura 49 percebe-se que o módulo de elasticidade do PLA+ é 61,99 % mais alto do que o do ABS, o que fortalece o conceito das literaturas de que o PLA é um polímero mais rígido e, conseqüentemente, mais frágil em comparação ao outro. E na Figura 48 tem-se uma comparação entre as médias das tensões de tração e escoamento dos dois materiais. Nota-se que o PLA+ tem maior resistência à tração, sendo elas 44,2 % e 25,73 % maiores do que as tensões de tração e escoamento suportadas pelo ABS, concordando com algumas literaturas.

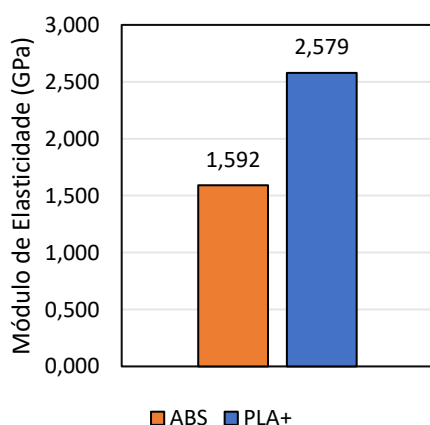


Figura 49 Média dos módulos de elasticidade

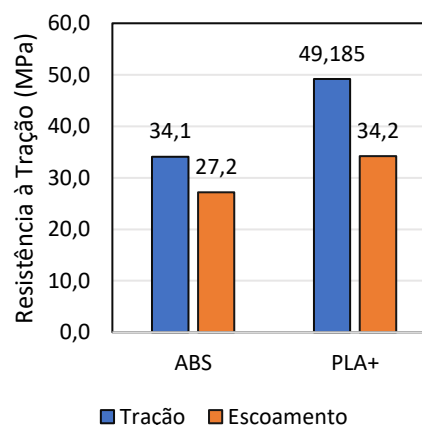


Figura 48 Média das tensões de tração

## 4.2. Ensaio de absorção de água

A absorção de água nos objetos produzidos com impressão *FDM* se dá pelos vazios entre camadas e falhas de impressão. E quanto mais poroso eles forem, espera-se que a absorção de água seja maior. A Tabela 10 apresenta os valores das dimensões e massas dos espécimes antes do ensaio.

*Tabela 10 Valores das dimensões e massas dos espécimes antes do ensaio*

	<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Espessura</b>	<b>Massa</b>
<b>ABS</b>				
1	60,25 mm	60,00 mm	1,00 mm	3,1073 g
2	60,25 mm	60,00 mm	1,00 mm	3,0845 g
3	60,25 mm	60,00 mm	1,00 mm	3,0848 g
<b>PLA</b>				
1	59,75 mm	59,75 mm	1,00 mm	3,8498 g
2	59,75 mm	59,75 mm	1,00 mm	3,8699 g
3	60,20 mm	60,00 mm	1,00 mm	3,9028 g
<b>PLA+</b>				
1	60,30 mm	60,00 mm	1,00 mm	4,2418 g

A Tabela 11 apresenta os valores encontrados para as massas e dimensões após o ensaio.

*Tabela 11 Valores das dimensões e massas dos espécimes após o ensaio*

	<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Espessura</b>	<b>Massa</b>
<b>ABS</b>				
1	60,30 mm	60,15 mm	1,10 mm	3,1390 g
2	60,35 mm	60,15 mm	1,00 mm	3,1153 g
3	60,30 mm	60,20 mm	1,10 mm	3,1136 g
<b>PLA</b>				
1	59,85 mm	59,75 mm	1,00 mm	3,8774 g
2	60,00 mm	59,80 mm	1,00 mm	3,9058 g
3	60,40 mm	60,20 mm	1,10 mm	3,9367 g
<b>PLA+</b>				
1	60,50 mm	60,25 mm	1,00 mm	4,2706 g

Com estes valores calculou-se o aumento percentual do peso (AP%) das amostras, Figura 50.

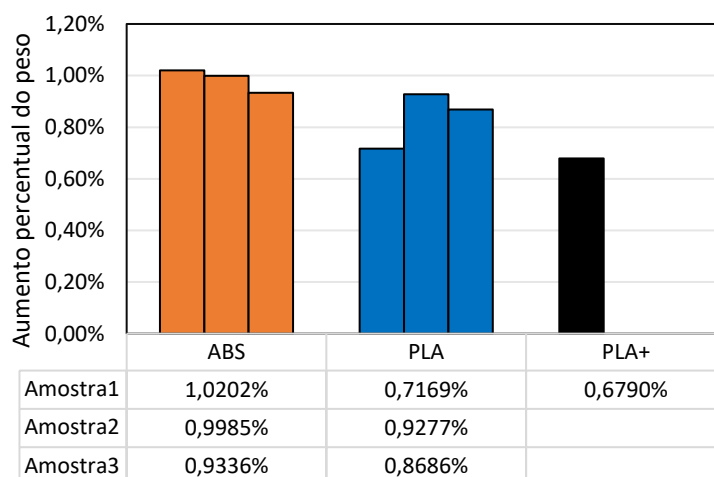


Figura 50 Aumento percentual do peso das amostras

Pelos dados obtidos percebeu-se que uma amostra construída pelo processo *FDM* com parâmetros sugeridos pela impressora não é totalmente estanque à água. Melhorando os parâmetros de fabricação consegue-se fazer com que a peça seja estanque.

O ABS foi o material com maior quantidade de água absorvida, um fator que possivelmente explica este comportamento é a maior dificuldade de impressão, portanto a superior suscetibilidade à defeitos deste material em comparação ao PLA.

#### 4.2.1. Análises

Através dos resultados obtidos pelos ensaios traçou-se um gráfico de coluna com as médias dos valores das percentagens encontradas em cada material, Figura 51.

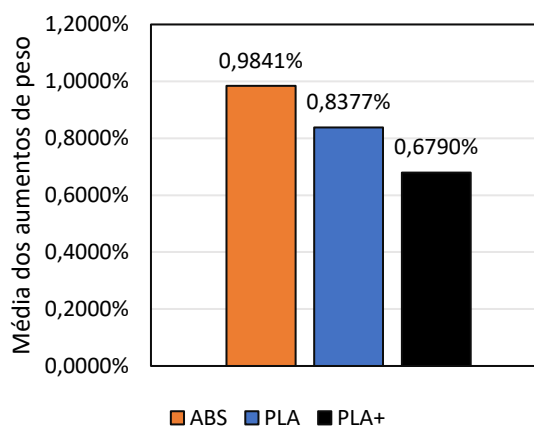


Figura 51 Média do aumento percentual do peso das amostras

Como já foi falado, um dos mecanismos de penetração da água nos polímeros é a difusão das moléculas de água entre as microlacunas do polímero. As microlacunas (volumes livres) são geradas a partir de espaços vazios desenvolvidos por conta do movimento entre as cadeias poliméricas, consequência da variação de temperatura (temperatura de extrusão) [47], [80].

O ABS apresenta os maiores valores de porosidade, ou seja, ele foi o material que apresentou maior aumento percentual de peso. Um número superior de vazios entre as camadas (porosidades) acaba por influenciar na resistência mecânica do material, diminuindo-a.

No estudo de Fernandes (2016) [47], ele enuncia que com uma menor espessura de camada espera-se maior absorção de água no PLA. Neste trabalho encontrou-se que a menor espessura apresentou a menor absorção de água (PLA+ de espessura 0,2 mm), seguido do PLA (0,3 mm de espessura) e no fim o ABS (0,3 mm de espessura).

Um dos motivos para o PLA+ apresentar a menor absorção de água é que a impressora *Big Builder*, com os parâmetros sugeridos, possibilita uma melhor adesão entre as camadas de material.

### 4.3. Ensaio de flexão

A partir dos valores das dimensões dos espécimes encontraram-se os valores das taxas de movimento da cabeça aplicadora de carga (R), Tabela 12, para cada material utilizando a Equação 9.

*Tabela 12 Taxa de movimento da cabeça aplicadora de carga*

<b>Material</b>	<b>Comprimento entre suportes (L)</b>	<b>Taxa de movimento (R)</b>
PLA+	48 mm	1,348 mm/min
ABS	50 mm	1,245 mm/min

Com este valor adicionado ao programa da máquina deu-se início ao ensaio e os diagramas tensão x deformação das amostras foram obtidos. A Figura 52 apresenta o diagrama com as tensões de todas as amostras em ABS e no APÊNDICE G tem-se os diagramas das cinco amostras separadamente com os respectivos valores de resistência à flexão. Os ensaios foram interrompidos quando uma deformação de aproximadamente

5 % foi alcançada, de acordo com a norma, já que os espécimes não romperam antes desse valor. Valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade foram obtidos com a Equação 6 e Equação 8.

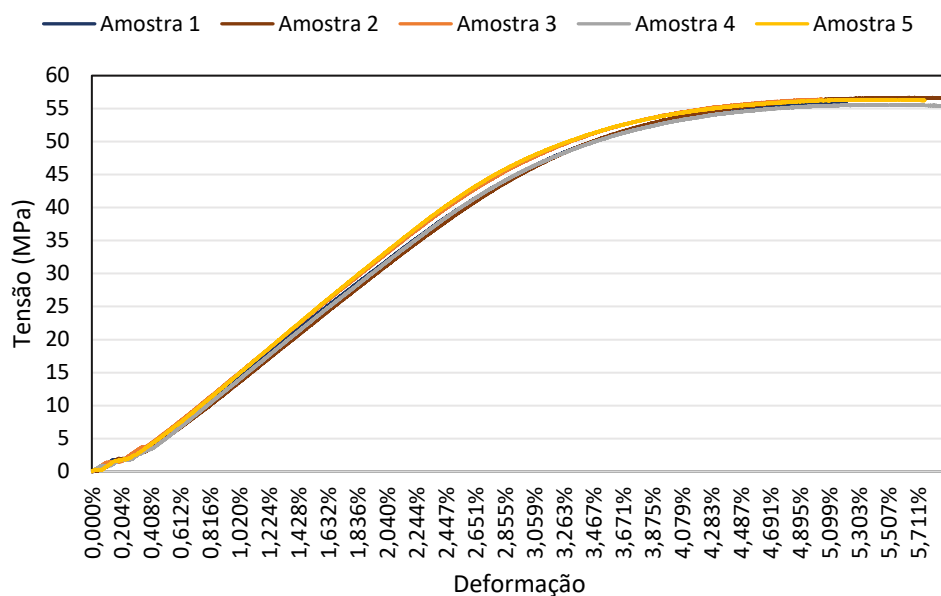


Figura 52 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em ABS

Pela Figura 52 percebe-se que os espécimes em ABS tiveram o mesmo comportamento e tensões máximas muito parecidas, além de valores de deformação nas tensões máximas de aproximadamente 5 %. Os valores da resistência à flexão, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima para ABS obtidos são dados na Tabela 13.

Tabela 13 Valores encontrados para propriedades no ensaio do Flexão do ABS

ABS			
Amostra	Resistência a flexão	Módulo de Young na Flexão	Deformação tensão máxima
1	55,85 MPa	1,53 GPa	5,10 %
2	56,68 MPa	1,49 GPa	5,46 %
3	56,42 MPa	1,55 GPa	5,04 %
4	55,60 MPa	1,48 GPa	5,47 %
5	56,38 MPa	1,57 GPa	5,40 %
Média	56,19 MPa	1,52 GPa	
Desv. Pad.	0,44 MPa	0,04 GPa	

Os valores adquiridos foram todos parecidos, pela Tabela 13 e Figura 52 percebe-se que a Amostra 2 (castanho) possui a maior resistência à flexão, aproximadamente

56 MPa, enquanto a Amostra 4 (cinza) possui o menor valor, 55,60 MPa. Para os módulos de elasticidade na flexão conclui-se que o maior e menor valor são 1,57 GPa e 1,48 GPa para as Amostras 5 (amarela) e 4 (cinza), respectivamente. Pela observação vê-se que os valores de tensão de flexão são maiores do que os encontrados em tração.

A Figura 53 apresenta a sobreposição dos gráficos das curvas de tensão das amostras em PLA+ e separadamente com seus respectivos valores de resistência à flexão no APÊNDICE H.

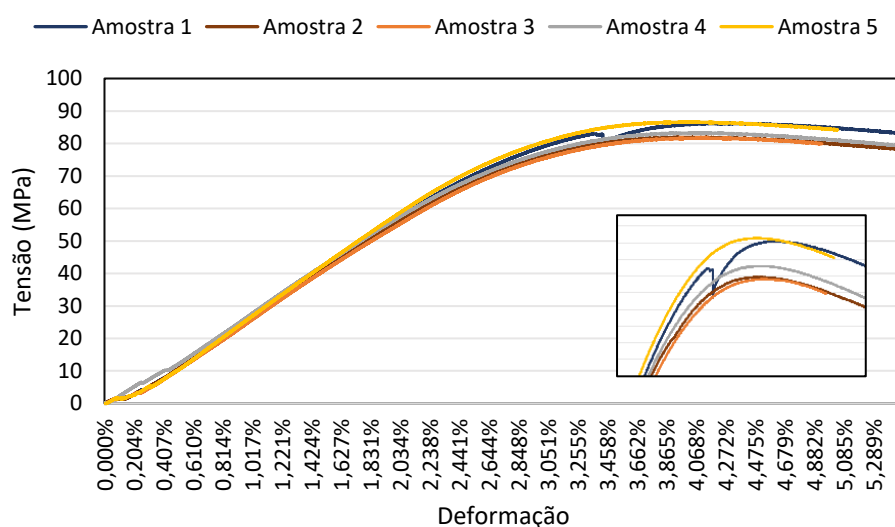


Figura 53 Diagrama Tensão x Deformação do ensaio de flexão das amostras em PLA+

Analisando a Figura 53 vê-se que as amostras tiveram comportamento parecido e somente a Amostra 1 ([linha azul] ampliação no canto direito inferior da Figura 53) sofreu uma queda de tensão mais acentuada devido a um maior escoamento do material. Todas as amostras tiveram seus valores de tensão máxima perto de 4 % de deformação.

Com a Figura 53 e Tabela 14 verificou-se que os valores máximos de tensão são na Amostra 5 (amarela), 86,61 MPa, deformação na tensão máxima na Amostra 1 (azul), 4,225 % e módulo de elasticidade na flexão para a Amostra 4 (cinza), 2,71 GPa. Valores mínimos de tensão e módulo de elasticidade na Amostra 3 (laranja), 81,66 MPa e 2,48 GPa, respectivamente e deformação na Amostra 5, 3,988 %. Pela observação vê-se que os valores de tensão na flexão são maiores do que os encontrados em tração.

Tabela 14 Propriedades mecânicas de flexão PLA+

PLA+				
Amostra	Resistência a flexão	Módulo de Young na Flexão	Deformação na tensão máxima	
1	86,21 MPa	2,58 GPa	4,225 %	
2	81,91 MPa	2,53 GPa	4,095 %	
3	81,66 MPa	2,48 GPa	4,181 %	
4	83,23 MPa	2,71 GPa	4,074 %	
5	86,61 MPa	2,62 GPa	3,988 %	
Média	83,92 MPa	2,58 GPa		
Desv. Pad.	2,34 MPa	0,08 GPa		

### 4.3.1. Análises

Na Figura 54 tem-se os valores das médias da resistência à flexão encontrados em comparação aos valores da literatura para os espécimes em ABS literatura [17], [29], [81], [82] e para o PLA+ literatura [30], [31], [83], [84].

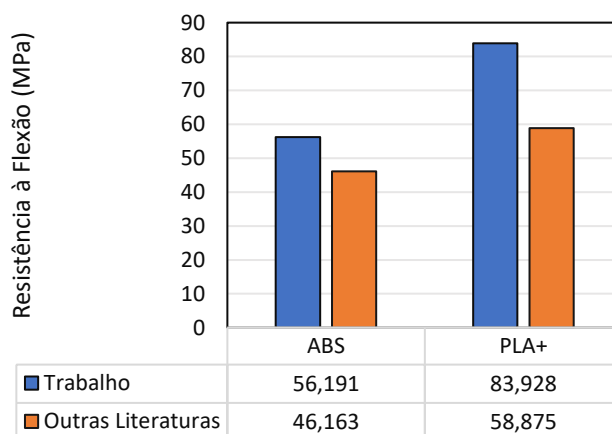


Figura 54 Valores de resistência à Flexão das amostras em ABS e PLA+

As tensões de flexão encontradas foram mais altas do que as tensões de tração, mostrando que os materiais apresentam maior resistência à flexão e foram maiores do que as encontradas nas referências citadas anteriormente.

Os resultados variaram por causa dos diferentes parâmetros usados entre o trabalho e a literatura usada como referência. Por exemplo, em Christyian et al. (2016) [31], os ângulos de *raster* usados foram 0 e 90°, o que acaba por influenciar nos valores das resistências. Os materiais e impressoras (temperatura do ambiente e da base de

impressão, temperatura do bocal extrusor) usados foram apresentados nos resultados de tração e viu-se que eles ajudam na variação dos números destas propriedades.

Os valores mais altos encontrados também podem ser por causa da boa adesão entre camadas. Elas possuem pequenas espessuras [31] e ângulos de *raster* ( $45^{\circ}/-45^{\circ}$ ) [29] que facilitam um aumento de resistência.

Na Figura 55 vê-se os resultados das médias de módulos de elasticidade na flexão encontrados neste trabalho em comparação aos de algumas literaturas ABS ([17], [85]) e PLA+ ([83], [84]).

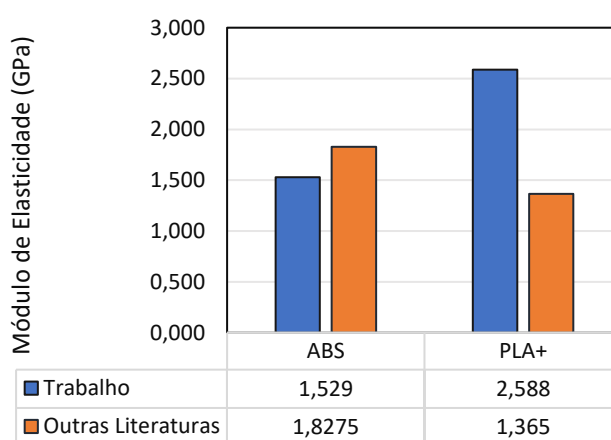


Figura 55 Valores dos módulos de elasticidade dos espécimes de flexão em ABS e PLA

Os resultados foram diferentes dos encontrados na literatura para o ensaio de flexão. Através deles vê-se que o PLA+ é um polímero bastante rígido e apresenta a maior discrepância entre os resultados. Isto se deve pela orientação das camadas de construção dos espécimes (ângulo de *raster*), orientação de construção deles na base de impressão, entre outros parâmetros. O PLA+ apresenta um módulo de elasticidade na flexão 69,26 % maior do que o do ABS, constatando através de algumas literaturas que este é um polímero muito mais rígido.

#### 4.4. Análise dimensional

A Figura 56 apresenta a mandala impressa na *Ultimaker 3*. Observando-a e a Figura 38 percebe-se que a mandala não tem uma das paredes circulares e paredes finas (setas bege e pretas), esta falta de componentes se apresentou desde a etapa de fatiamento no *software Cura*. A impressão também não apresentou alguns cilindros, os fabricados

estão visivelmente distorcidos (círculos verdes mostram algumas localizações deles), e nem um furo cilíndrico (círculos vermelhos mostram a teórica localização de alguns deles). Além disso, os rasgos (setas rosas) ficaram com espessuras visivelmente diferentes, a peça não apresentou *warping*, suas formas esféricas foram construídas sem dificuldades, ou seja, apresentam bom acabamento e pequeno efeito escada.

A Figura 57 mostra a peça fabricada pela *Cube 3*. Nela, alguns cilindros e nem um furo cilíndrico foi construído (círculos verdes e vermelhos, nesta ordem). Nesta mandala os cilindros fabricados têm bons formatos, a peça apresenta vazios em posições diferentes e um pouco de *warping*. Os formatos esféricos têm bom acabamento, logo pequeno efeito escada. As imagens apresentam uma linha branca no meio que caracteriza o eixo de simetria das mandalas.

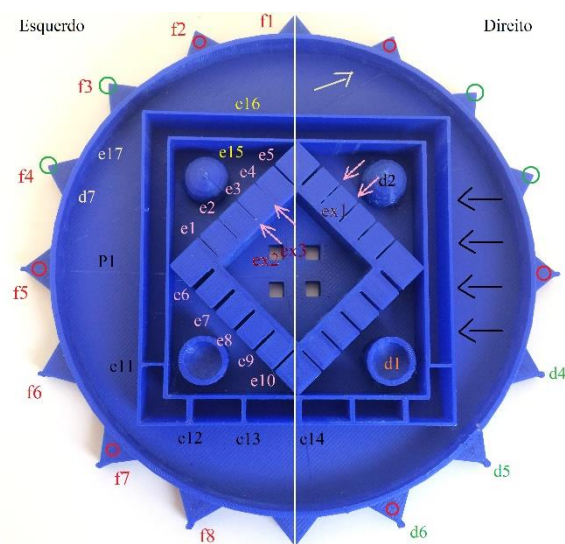


Figura 56 Mandala na Ultimaker 3

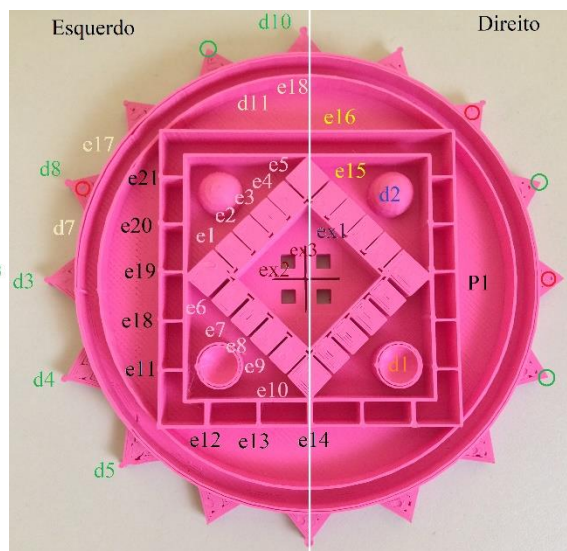


Figura 57 Mandala na Cube 3

Em cada parte dos espécimes em formato de mandala foram feitas três medições pela mesma pessoa, a fim de se ter uma melhor precisão nos valores encontrados e evitar erros devido ao operador. A Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os valores encontrados em cada parte das Mandalas fabricadas pela *Ultimaker 3* e *Cube 3* junto dos valores nominais. É importante acrescentar que como as Mandalas são simétricas, os componentes simétricos recebem o mesmo nome, mas são separados por lado esquerdo e direito. Na Figura 56 tem-se a mandala fabricada pela *Ultimaker 3* com as nomenclaturas usadas na parte Componentes da Tabela 15 (valores em mm). Pela observação percebe-

se que as dimensões encontradas foram parecidas com as dimensões nominais, e apenas os diâmetros dos cilindros construídos (d3 a d6) e algumas espessuras dos rasgos esquerdos (e1 a e5) que ficaram com tamanhos bem diferentes. A máquina apresentou muita dificuldade para imprimir os cilindros, estes pequenos componentes, quando fabricados, ficaram com formatos muito distorcidos.

Tanto na Tabela 15 quanto na Tabela 16, as lacunas em branco significam que os componentes não foram fabricados pelas impressoras.

*Tabela 15 Valores encontrados de dimensões dos componentes da Mandala construída pela Ultimaker 3 (em mm)*

<b>Componentes</b>	<b>Nominal</b>	<b>Medidas lado Esquerdo</b>			<b>Medidas lado Direito</b>		
d1	8,00	7,70	7,70	7,55	7,70	7,65	7,65
d2	10,00	9,90	9,85	9,90	9,85	9,95	9,85
d3	0,40	1,00	0,60	1,30	1,20	1,00	1,00
d4	0,45	0,70	0,95	1,30	1,40	1,10	1,20
d5	0,50	0,90	1,10	1,38	1,50	1,20	1,60
d6	0,55	1,40	1,00	1,10	1,00	1,48	1,50
d7	100	100; 100,1; 99,82					
e1	0,4	0,20	0,20	0,20	0,40	0,40	0,40
e2	0,35	0,15	0,15	0,15	0,35	0,35	0,35
e3	0,3	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30	0,30
e4	0,25	0,05	0,05	0,05	0,25	0,25	0,25
e5	0,55	0,35	0,35	0,35	0,55	0,55	0,55
e6	1	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,80
e7	0,8	0,80	0,80	0,80	0,60	0,60	0,60
e8	0,7	0,70	0,70	0,70	0,50	0,50	0,50
e9	0,6	0,60	0,60	0,60	0,40	0,40	0,40
e10	0,5	0,50	0,50	0,50	0,30	0,30	0,30
e11	0,4	0,50	0,60	0,60	0,62	0,60	0,60
e12	0,8	1,20	1,20	1,00	1,10	1,10	1,12
e13	0,6	0,80	0,86	0,84	0,86	0,88	0,86
e14	1	1,3; 1,3; 1,3					
e15	0,6	0,50	0,60	0,75	0,75	0,80	0,62
e16	0,5	0,50	0,54	0,52	0,50	0,54	0,50
e17	1	1,18	1,20	1,40	1,20	1,30	1,5
P1	0	ressalto 0 a 0,05			ressalto 0 a 0,05		
ex1	22	21,90	21,95	21,95	22,20	22,20	22,2
ex2	3,54	3,55	3,55	3,55	3,45	3,45	3,55
		3,25	3,20	3,25	3,30	3,30	3,30
ex3	3,54	3,50	3,50	3,45	3,45	3,45	3,45
		3,30	3,30	3,30	3,20	3,20	3,25

A Tabela 16 apresenta os valores encontrados em cada parte da Mandala fabricada pela *Cube 3* e a Figura 57 apresenta a mandala com as nomenclaturas usadas na parte Componentes da Tabela. Como se pode constatar comparando as tabelas, a impressora *Cube* produziu mais componentes do que a *Ultimaker* e as dimensões dos componentes também estão parecidas com as nominais, além disso a máquina não expôs dificuldade na impressão dos rasgos (e1 a e5).

Tabela 16 Valores encontrados de dimensões dos componentes da Mandala construída com a *Cube 3* (em mm)

Componentes	Nominal	Medidas lado Esquerdo			Medidas lado Direito		
d1	8,00	7,40	7,70	7,68	7,50	7,50	7,90
d2	10,00	9,80	9,70	9,90	10,00	9,90	9,85
d3	0,40	1,20	1,20	1,22			
d4	0,45	1,10	1,20	1,28			
d5	0,50	1,20	1,10	1,00			
d7	100			100; 97; 97			
d8	0,35	1,10	1,10	1,18			
d10	0,20			1,1; 1; 1,1			
d11	90,00			89; 90; 85			
e1	0,40	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35
e2	0,35	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30
e3	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
e4	0,25	0,30	0,30	0,30	0,15	0,15	0,15
e5	0,55	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45
e6	1,00	0,95	0,95	0,95	0,90	0,90	0,90
e7	0,80	0,75	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70
e8	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60
e9	0,60	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50
e10	0,50	0,45	0,45	0,45	0,40	0,40	0,40
e11	0,40	0,60	0,60	0,56	0,50	0,52	0,50
e12	0,80	1,00	1,00	1,02	1,10	1,00	0,98
e13	0,60	0,80	0,80	0,70	0,70	0,70	0,70
e14	1,00			1,14; 1,2; 1,1			
e15	0,60	0,80	0,80	0,60	0,60	0,80	0,80
e16	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,62	0,58
e17	1,00	0,80	0,90	0,82	0,90	0,88	0,90
e18	0,35	0,60	0,60	0,70	0,52	0,50	0,52
e19	0,30	0,70	0,60	0,60	0,50	0,48	0,50
e20	0,25	0,60	0,70	0,70	0,50	0,52	0,50
e21	0,20	0,50	0,70	0,70	0,50	0,50	0,50
P1	0	Ressalto 0 a 0,1			Concavidade 0 a 0,1		
ex1	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
ex2	3,54	3,20	3,10	3,10	3,40	3,40	3,30

Componentes	Nominal	Medidas lado Esquerdo			Medidas lado Direito		
ex3	3,54	3,10	3,10	2,95	3,40	3,50	3,40
		2,80	2,80	2,80	3,40	3,40	3,40
		2,95	2,95	2,95	3,50	3,50	3,50

Analisando os valores de paralelismo (P1) para as mandalas construídas com as duas impressoras percebe-se que a *Ultimaker* construiu uma peça com menores valores de ressalto e concavidades (analisados com o relógio comparador), consequência de não apresentar *warping* e melhor ligação entre camadas.

A peça desenvolvida por *Makerbot* foi usada para tratar de uma análise mais qualitativa da impressão. As máquinas imprimiram todos os detalhes e as medidas obtidas foram exatas na *Ultimaker*, até o limite de resolução dos equipamentos de medida, ao passo que a *Cube* apresentou pequenas variações nas dimensões. A Figura 58 apresenta a peça imprimida pela *Cube 3* a) e *Ultimaker 3* b).

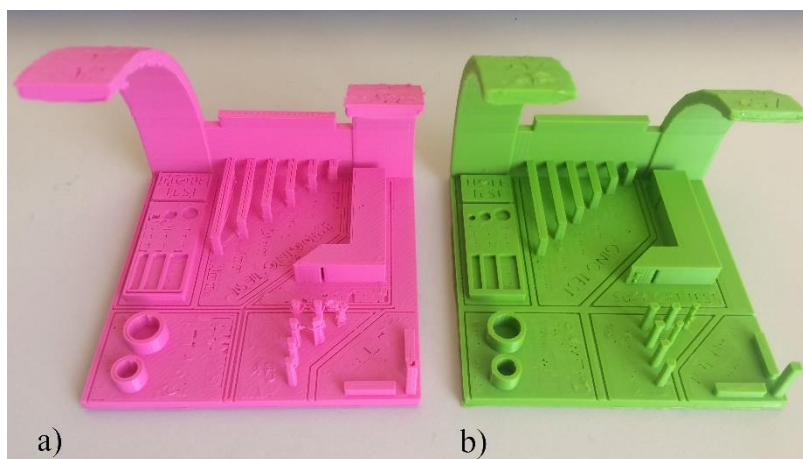


Figura 58 Peça fornecida por *Makerbot*. Imprimida por a) *Cube 3*, b) *Ultimaker 3*

Mais uma vez a impressão feita com a *Cube 3* a) apresentou espaços entre camadas de filamento e um pequeno *warping*, já a impressão feita pela *Ultimaker 3* não. Ambas as peças apresentaram má impressão de partes escritas na horizontal.

As figuras a seguir mostram as partes das peças em detalhes para facilitar a visualização. As partes em verde foram impressas pela *Ultimaker 3* e as em rosa pela *Cube 3*. A Figura 59 apresenta os cilindros para medição dos diâmetros, espessura de paredes e acabamento. Percebe-se que na fabricação da *Cube 3* existe um espaço entre as camadas de filamento, o que não se vê na impressão da *Ultimaker 3* e as dimensões das peças na *Ultimaker* estão iguais às nominais (utilizando a resolução possível com os

equipamentos de medida disponíveis), enquanto que na *Cube* existe uma pequeníssima variação. A Figura 60 apresenta os prismas para análise de *stringing* e formato. Vê-se que ambas as impressoras tiveram maiores dificuldades para imprimir os prismas triangulares em comparação aos quadrangulares, apesar destes também não terem uma forma perfeitamente definida. Na impressão da *Ultimaker* quase não se vê fios de filamento (*stringing*) entre as formas, já com a *Cube* observa-se uma perda maior de formato das partes, além de uma quantidade maior e mais visível de fios de filamento entre elas.



Figura 59 Dimensão e acabamento



Figura 60 Stringing

A Figura 61 é usada para teste de escala. Nela observa-se que o prisma construído na vertical usando a *Cube* não é, mas deveria ser fechado, mesmo assim, as formas nas duas impressoras foram bem feitas e obedecem às dimensões especificadas. A Figura 62 apresenta os furos para análise de dimensões e formato. Consegue-se ver que a impressão na *Ultimaker* (imagem verde) é mais sólida e com melhor acabamento em comparação à impressão na *Cube*. As peças da *Ultimaker* têm as dimensões mais próximas possível às nominais, já na *Cube* as peças têm as dimensões bem pouco diferentes.



Figura 61 Teste de escala



Figura 62 Dimensão e formato

Na Figura 63 observa-se o *bridging* das duas impressões e o que se nota é que na impressão da *Ultimaker*, a partir de 15 mm (seta preta) já se tem material arrefecido num formato arredondado na parte inferior da peça, enquanto na *Cube* só se nota a partir dos 20 mm (seta preta). Apesar disso, quando o tamanho do *bridging* é de 25 mm (maior), vê-se muito mais material arrefecido fora do plano na impressão da *Cube* em comparação a da outra máquina.

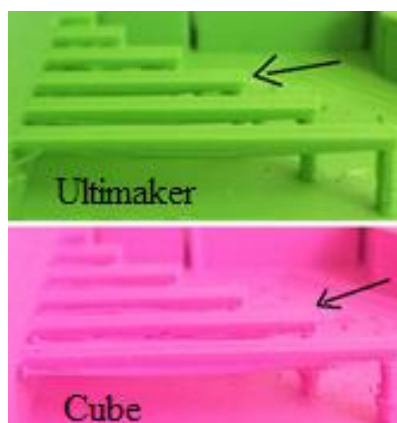


Figura 63 Bridging

A Figura 64 e Figura 65 mostram a análise de angulação das máquinas (*overhang test*), quer dizer, a dificuldade de reprodução de figuras com angulações por elas. Como já mencionado, as partes em verde foram fabricadas pela *Ultimaker 3* e as em rosa pela *Cube 3*.



Figura 64 Análise de angulação na Ultimaker 3

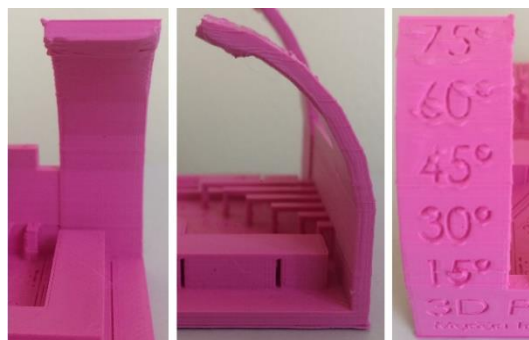


Figura 65 Análise de angulação na Cube 3

A Figura 66 e Figura 67 apresentam a continuação do estudo dos ângulos, mas com diferentes valores dos apresentados na Figura 64 e Figura 65.

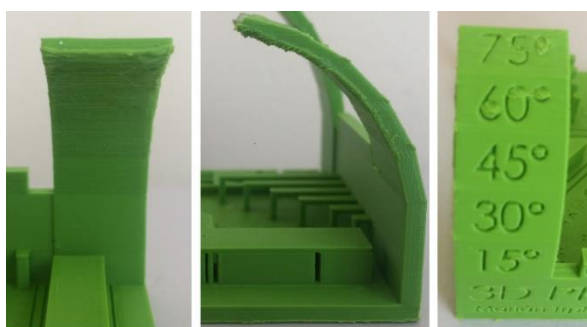


Figura 66 Continuação análise de ângulos na Ultimaker 3

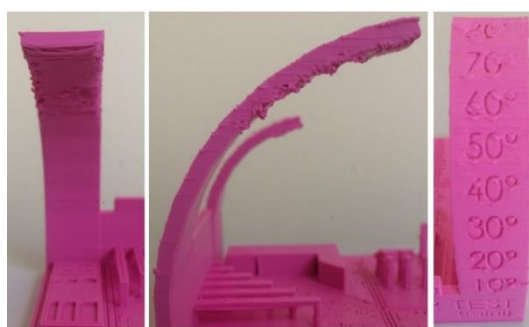


Figura 67 Continuação análise de ângulos na Cube 3

Reparam-se inconsistências na parte inferior da peça, ou seja, material desprendido depois de arrefecido, deixando a parte com péssima aparência a partir do ângulo de 60° na impressão da *Ultimaker*. Já na *Cube* o resultado variou em cada parte com ângulos. Na Figura 65 as inconsistências começaram a aparecer por volta dos 60°, enquanto na Figura 67 foi a partir dos 50°.

Por fim pode-se verificar a facilidade para escrita na vertical com a Figura 68 e Figura 69. Com a análise compreende-se que a impressão pela *Ultimaker* (Figura 68) ficou mais limpa, mais nítida, ao passo que a impressão feita com a *Cube* (Figura 69) apresentou acúmulo de material em certos pontos, diminuindo a clareza da escrita.



Figura 68 Escrita na vertical Ultimaker

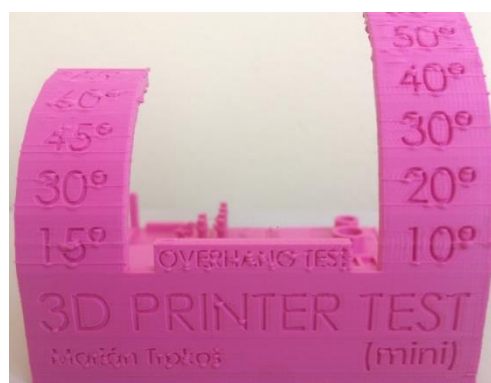


Figura 69 Escrita na vertical Cube

#### 4.4.1. Resultados do estudo da resolução

Na etapa de fatiamento, o programa *Cura* da impressora *Ultimaker*, usada para imprimir uma Mandala, apresentou limites de impressão em relação a largura em xy, por isso, não apresentou alguns detalhes (paredes finas e circular) e eles não foram impressos. Acredita-se que o motivo seja o tamanho do diâmetro do bocal, já que a resolução do motor de passo da impressora é bem alta, ou seja, o passo é bastante pequeno, então instalando um bocal com diâmetro menor se conseguiria imprimir peças com espessuras muito pequenas.

No geral, a mandala impressa pela *Ultimaker 3* mostrou-se bem sólida, sem espaços vazios (melhor ligação entre as camadas), não exibiu *warping*, suas partes esféricas foram fabricadas com bom acabamento, a peça inteira tem bom aspecto, mas os componentes pequenos não foram construídos ou exibiram formatos irregulares, mesmo com espessura de camada de 0,06mm.

A mandala impressa pela *Cube 3* não teve uma boa ligação entre as camadas, logo apresentou espaços vazios e *warping*. Um dos motivos pode ser a mesa não aquecida e a extensa área em contato com ela. A impressora foi capaz de fabricar as paredes finas e alguns cilindros que apresentam formatos melhores em comparação aos cilindros fabricados pela outra máquina mesmo quando sua espessura de camada foi maior, 0,07mm. Como forma de evitar este espaço vazio entre as camadas, uma mudança na dimensão da largura de extrusão do filamento ou, dependendo do *software* da impressora, a escolha de um tipo de padrão de preenchimento alternado que se ajusta para preencher este espaço entre lacunas pode ser feito [86]. Algumas vezes, mudar o multiplicador de

extrusão também ajuda. Este número modifica a quantidade de plástico que sai pelo bocal, quanto maior, mais plástico é extrudido.

Ambas as impressoras foram incapazes de reproduzir os pequenos furos cilíndricos representados pelos círculos vermelhos na Figura 38.

Para evitar o *stringing* da peça fornecida por *Makerbot*, poder-se-ia aumentar a distância de retração, que é o quanto o filamento se retrai no extrusor quando este vai para uma nova posição. A necessidade do *bridging* em alguma parte da peça pode ser auxiliada com a adição de suportes garantindo uma base extra, evitando que as camadas de plástico se solidifiquem com um arredondamento na parte inferior. Para se manter as dimensões mais próximas possível das especificadas, deve-se atentar a sob e sobre extrusão, quando mais ou menos plástico deixa o bocal extrusor. Estas taxas não podem ser totalmente controladas, mas uma mudança é feita através do multiplicador de extrusão, que permite um controle maior da taxa de plástico que deixa o bocal extrusor.

No teste de angulação ou *Overhang test* consegue-se ver o quão bem a impressora arrefece o plástico que sai do bocal extrusor. O quão melhor este arrefecimento for, melhor o aspeto da superfície inferior da peça com ângulos.

Na Tabela 17 se encontram os valores para o desvio padrão e *Root Mean Square Error (RMSE)* das dimensões dos componentes das mandalas construídas pela *Ultimaker* e *Cube*. A tabela não apresenta todos os componentes, pois alguns não foram fabricados e outros, como os rasgos (setas rosas na Figura 38), foram medidos com um gabarito de rasgos, que não permite variações na observação das medidas por parte do utilizador. A Tabela 17 apresenta Desvio Padrão e *RMSE* Esquerdo e Direito porque as mandalas são simétricas, deste modo consegue-se verificar a reprodutibilidade de formas e dimensões das máquinas e as lacunas em branco significam que tal máquina não fabricou o componente.

Tabela 17 Valores do desvio padrão para os componentes das mandalas (em mm)

Parte	Nominal	Impressora	Des. Pad. Esq	Desv. Pad. Dir.	RMSE Esquerdo	RMSE Direito
d1	8	Ultimaker	0,087	0,029	0,357	0,334
		Cube	0,168	0,231	0,429	0,412
d2	10	Ultimaker	0,029	0,050	0,119	0,108
		Cube	0,100	0,076	0,216	0,104
d3	0,4	Ultimaker	0,351	0,115	0,635	0,673
		Cube	0,012		0,807	
d4	0,45	Ultimaker	0,301	0,153	0,587	0,793
		Cube	0,090		0,747	
d5	0,5	Ultimaker	0,241	0,208	0,657	0,949
		Cube	0,100		0,606	
d6	0,55	Ultimaker	0,208	0,283	0,640	0,810
		Cube				
d7	100	Ultimaker	0,142		0,119	
		Cube	1,732		2,449	
d8	0,35	Ultimaker				
		Cube	0,090		0,778	
d10	0,2	Ultimaker				
		Cube	0,058		0,868	
d11	90	Ultimaker				
		Cube	2,646		2,944	
e11	0,4	Ultimaker	0,058	0,012	0,173	0,207
		Cube	0,023	0,012	0,188	0,107
e12	0,8	Ultimaker	0,115	0,012	0,346	0,307
		Cube	0,012	0,064	0,207	0,233
e13	0,6	Ultimaker	0,031	0,012	0,235	0,267
		Cube	0,058	0	0,173	0,100
e14	1	Ultimaker	0		0,300	
		Cube	0,050		0,152	
e15	0,6	Ultimaker	0,126	0,093	0,104	0,145
		Cube	0,115	0,115	0,163	0,163
e16	0,5	Ultimaker	0,020	0,023	0,026	0,023
		Cube	0	0,020	0,100	0,101
e17	1	Ultimaker	0,122	0,153	0,278	0,356
		Cube	0,053	0,012	0,166	0,107
e18	0,35	Ultimaker				
		Cube	0,058	0,012	0,287	0,164
e19	0,3	Ultimaker				
		Cube	0,058	0,012	0,337	0,194
e20	0,25	Ultimaker				
		Cube	0,058	0,012	0,419	0,257

Parte	Nominal	Impressora	Des. Pad. Esq	Desv. Pad. Dir.	RMSE Esquerdo	RMSE Direito
e21	0,2	<i>Ultimaker</i>				
		<i>Cube</i>	0,115	0	0,443	0,300
ex1	22	<i>Ultimaker</i>	0,029	0	0,071	0,200
		<i>Cube</i>	0	0	0	0
ex2	3,54	<i>Ultimaker</i>	0	0,058	0,010	0,074
			0,029	0	0,308	0,240
	3,54	<i>Cube</i>	0,057	0,058	0,409	0,180
			0,086	0,058	0,495	0,117
ex3	3,54	<i>Ultimaker</i>	0,029	0	0,061	0,090
			0	0,029	0,240	0,324
	3,54	<i>Cube</i>	0	0	0,740	0,140
			0	0	0,590	0,040

Pela observação da Tabela 17 nota-se que as máquinas tiveram comportamento bastante variado, por exemplo, a *Ultimaker* não construiu as paredes finas (e18 a e21) e a *Cube* sim, a *Cube* não fabricou o cilindro de diâmetro d6 enquanto a *Ultimaker* sim, e ambas as impressoras tiveram pequenas variações nas dimensões encontradas (pode ser deduzido através dos baixos valores de desvio padrão e *RMSE*). Fatores como tipo de material extrudido, calibração da mesa de impressão, velocidade de extrusão e arrefecimento, entre outros, influenciam nas dimensões finais da peça. Estas pequenas variações podem ser consideradas grandes uma vez que se queira uma peça com tolerâncias bem apertadas, tudo depende da aplicação dela, mas em usos gerais as dimensões são perfeitamente aceitáveis.

Aferindo os valores das partes confeccionadas pelas duas impressoras (Figura 56 e Figura 57, diâmetros: d1, d2 e d7, espessuras: e11, e12, e13, e14, e15, e16 e e17 e exatidões: ex1, ex2 e ex3) notou-se que a *Ultimaker* manteve os diâmetros com menor desvio entre si e mais próximos do previsto, somente em d2 que o desvio em relação a medida nominal foi intercalado entre máquinas e lados, sendo no lado esquerdo, a *Ultimaker* com menor *RMSE*, enquanto no lado direito foi a *Cube*. Nas espessuras e11, e16 e e17, a *Cube* obteve a menor variação entre as medidas observadas, em contrapartida na espessura e14 a *Ultimaker* apresentou o melhor resultado. Já em e12, e13 e e15 as máquinas se alternaram. Citando o *RMSE*, somente em e11 as máquinas se intercalaram (lado esquerdo o melhor resultado foi com a *Ultimaker* e no lado direito *Cube*), em e12, e13, e14 e e17 a impressora *Cube* saiu melhor e em e15 e e16 a *Ultimaker*. A respeito das

exatidões, as partes fabricadas pelas duas impressoras obtiveram medidas próximas das nominais, com a *Cube* exibindo melhor resultado em ex1, enquanto a *Ultimaker* foi melhor na fabricação de ex2 e ex3. Comparando os valores obtidos entre si, a *Cube* apresentou os menores desvios em ex1 e ex3 e a *Ultimaker* em ex2.

Nas situações dos cilindros com diâmetros d3, d4, d5 a impressora *Cube* construiu apenas no lado esquerdo e comparando com a mesma parte fabricada pela *Ultimaker* obteve o menor desvio padrão, mas a *Ultimaker* construiu os componentes em ambos os lados. Já no cilindro com diâmetro d6, a *Ultimaker* construiu nos dois lados e a *Cube* não fabricou as partes. Considerando os valores dos cilindros construídos com valores nominais, a *Ultimaker* se saiu melhor em d3 e d4, em compensação a *Cube* em d5.

O cilindro com diâmetro d8 foi fabricado com a *Cube* no lado esquerdo somente, e com a *Ultimaker* nenhum objeto foi fabricado. A *Ultimaker* não foi capaz de fabricar o cilindro e parede circular com diâmetros d10 e d11, nesta ordem, enquanto a *Cube* sim e os desvios padrão da impressão foram pequenos, mas em d11 foi o maior apresentado em toda a tabela, 2,646 e 2,944 para o desvio em relação a medida nominal. Embora as máquinas tenham se revezado na impressão dos cilindros com pequenos diâmetros, nenhum dos itens apresentou medidas parecidas com as nominais, mas as impressões da *Cube* foram muito melhores tratando-se dos formatos.

Relativamente às espessuras das paredes finas (e18 a e21), a *Ultimaker* não construiu os itens, em contrapartida a *Cube* fabricou todos e com pequenos valores de desvio padrão, porém com medidas diferentes das nominais.

A Tabela 18 mostra os valores encontrados nas partes medidas com gabarito de espessuras (rasgos) e a Tabela 19 os furos cilíndricos (círculos vermelhos representados por f1 à f6 na tabela e Figura 56 ou Figura 57). Os furos só apresentam os valores nominais, já que não foram fabricados, então sabe-se que furos com diâmetros de 0,2 a 0,55 não são fabricados por nem uma das impressoras. Como as espessuras dos rasgos (e1 a e10) foram medidas com um gabarito, não há possibilidade de variação da medição por parte da observação do utilizador, assim todos os valores encontrados foram os mesmos, por isso os valores de desvio padrão são zero. Mas em relação a medida prevista, as máquinas se intercalaram. A *Cube* foi melhor (comparando com a *Ultimaker*) do lado esquerdo de e1 a e5 e depois no lado direito de e6 a e10, logo, a *Ultimaker 3* apresentou

medidas mais próximas das nominais no lado direito de e1 a e5 e depois no lado esquerdo de e6 a e10.

Tabela 18 Valores de desvio padrão para os rasgos e furos das mandalas (em mm)

Parte	Nominal	Impressora	Esquerdo	Direito	Desvio padrão	RMSE Esquerdo	RMSE Direito
e1	0,4	Ultimaker	0,20	0,40	0	0,20	0
		Cube	0,30	0,35	0	0,10	0,05
e2	0,35	Ultimaker	0,15	0,35	0	0,20	0
		Cube	0,25	0,30	0	0,10	0,05
e3	0,3	Ultimaker	0,10	0,30	0	0,20	0
		Cube	0,25	0,25	0	0,05	0,05
e4	0,25	Ultimaker	0,05	0,25	0	0,20	0
		Cube	0,30	0,15	0	0,05	0,10
e5	0,55	Ultimaker	0,35	0,55	0	0,20	0
		Cube	0,40	0,45	0	0,15	0,10
e6	1	Ultimaker	1,00	1,00	0	0	0,20
		Cube	0,95	0,90	0	0,05	0,10
e7	0,8	Ultimaker	0,80	0,80	0	0	0,20
		Cube	0,75	0,70	0	0,05	0,10
e8	0,7	Ultimaker	0,70	0,70	0	0	0,20
		Cube	0,65	0,60	0	0,05	0,10
e9	0,6	Ultimaker	0,60	0,40	0	0	0,20
		Cube	0,55	0,50	0	0,05	0,10
e10	0,5	Ultimaker	0,50	0,30	0	0	0,2
		Cube	0,45	0,40	0	0,05	0,1

Tabela 19 Valores nominais dos furos cilíndricos (em mm)

Parte	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
Nominal	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55

Vale a pena acrescentar que a impressora *Ultimaker* fabricou os rasgos (e1 a e5) do lado esquerdo da mandala com valores bem diferentes dos nominais, e do lado direito as dimensões ficaram bastante parecidas com os objetivos.

#### 4.5. Caso de aplicação dos valores encontrados para as propriedades nos ensaios realizados

Exemplo de peça que pode ser utilizada com ABS ou PLA para cargas não muito pesadas é o gancho. A seguir é apresentado o dimensionamento de um gancho simples e sem ressalto que pode ser fabricado por uma impressora 3D baseado nas referências Rudenko (1976), Budynas e Nisbett (2011) e Collins et. al (2009) [87]–[89]. Este gancho foi dimensionado para ser fabricado em PLA+ e suportar uma mochila de até 15 kg, então aplicando a Equação 10 encontrou-se um peso máximo suportado de  $P = 147 \text{ N}$ .

$$P = mg = 147 \text{ N} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

- i.  $m$  é massa suportada pelo gancho e é igual a 15 kg;
- ii.  $g$  é a aceleração da gravidade adotada por  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Frequentemente, os ganchos possuem seção trapezoidal mais larga internamente, permitindo um projeto mais simples e a hipótese básica foi que estas seções permanecem planas após a deformação. Para facilitar os cálculos de dimensionamento, considerou-se um gancho com seção trapezoidal constante e rosca métrica  $v$  (ou triangular, suportam menores cargas em relação aos outros tipos de rosca, por exemplo, trapezoidal). Na Figura 70 são apresentadas as dimensões escolhidas para a área da seção transversal do gancho.

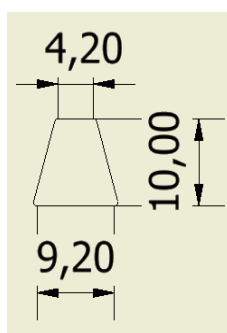


Figura 70 Área transversal do gancho (em mm)

Para dar sequência ao cálculo de dimensionamento do gancho alguns dados são fornecidos na Tabela 20.

Tabela 20 Dados para dimensionamento do gancho

Parâmetros	Valores
Material	PLA+
Massa mochila (m)	15 kg
Aceleração da gravidade (g)	9,8 m/s <sup>2</sup>
Diâmetro menor da parte roscada (d <sub>1</sub> )	7,188 x 10 <sup>-3</sup> m
Seção transversal do gancho: base maior (b <sub>1</sub> )	9,2x10 <sup>-3</sup> m
Seção transversal do gancho: base menor (b <sub>2</sub> )	4,2x10 <sup>-3</sup> m
Seção transversal do gancho: altura (h)	0,01 m
Raio do centro de curvatura até a superfície interna do gancho (r <sub>i</sub> )	0,01 m

Na parte superior do gancho, uma haste cilíndrica roscada é encontrada, operando somente à tração [87]. A Equação 11 foi empregada para verificar a tensão de tração na parte roscada [87]. Na escolha de d<sub>1</sub>, a norma NBR ISO 724 [90] foi empregada. Para pequenas cargas a rosca optada foi a métrica fina M8 x 0,75. Esta rosca tem 8 mm de diâmetro maior (igual ao diâmetro nominal e 0,75 mm de passo). Aplicado o valor de d<sub>1</sub> e P na Equação 11, encontrou-se  $\sigma_t = 3,622$  MPa, um bom valor, já que não deve exceder 30 MPa que é o menor valor de tensão de escoamento encontrado para o PLA+ (Seção 4.1, Tabela 9).

$$\sigma_t = \frac{P}{\frac{\pi d_1^2}{4}} = 3,622 \text{ MPa} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- i. P é o peso máximo suportado pelo gancho e corresponde a 147 N;
- ii. d<sub>1</sub> é o diâmetro de flanco e é igual a 7,188 mm, dado pela norma NBR ISO 724.

Para saber se o gancho servirá ao propósito de carregar o peso da mochila deve-se encontrar as tensões máximas em suas partes interna e externa dadas pela Equação 12 de acordo com as dimensões especificadas e comparar ao valor da tensão de escoamento do material, assim garantindo que ele não atingirá a região plástica, deformando-se permanentemente. Para isso seguiu-se o passo-a-passo abaixo.

$$\sigma_{i/o} = \frac{M c_{i/o}}{e A r_{i/o}} + \frac{P}{A} \quad \text{Equação 12}$$

Onde,

- i.  $\sigma_i$  corresponde a tensão na parte interna do gancho;
- ii.  $\sigma_o$  corresponde a tensão na parte externa do gancho.

Inicialmente o gancho foi tratado como viga curva, pois o eixo neutro de flexão sofreu um deslocamento ( $e$ ) em direção ao centro de curvatura inicial, não passando pelo centroide da seção transversal da viga, Figura 71.

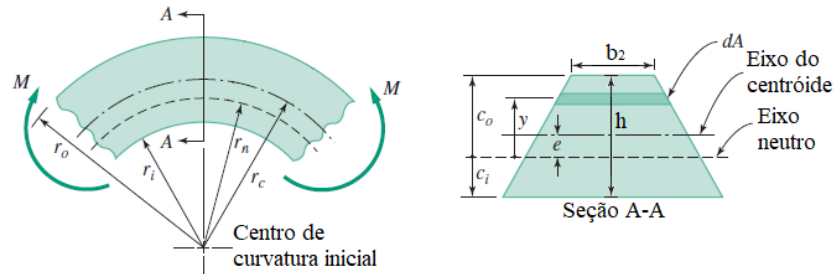


Figura 71 Viga inicialmente curva sujeita a flexão. Adaptado de [90]

Segundo Budynas e Nisbett (2011) e Collins et al. (2009) [88], [89] e observando a Figura 71 o deslocamento  $e$  do eixo neutro é dado pela Equação 13. Para o cálculo de  $e$ , foi necessário determinar alguns parâmetros dados na equação.

$$e = r_c - r_n = r_c - \frac{A}{\int \frac{dA}{r}} = 5,483 \times 10^{-4} m \quad \text{Equação 13}$$

Onde,

- i.  $r_c$  é raio de curvatura do centroide da viga;
- ii.  $r_n$  é o raio do eixo neutro;
- iii.  $A$  é a área crítica transversal da viga, no caso área do trapézio;
- iv.  $r$  é o raio desde o centro de curvatura inicial até a área diferencial  $dA$ .

Primeiramente encontrou-se  $r_0$  utilizando a Equação 14 e a Tabela 20.

$$r_0 = r_i + h = 0,02 m \quad \text{Equação 14}$$

Onde

- i.  $r_0$  é o raio do centro de curvatura até a superfície mais externa do gancho.

Seguidamente determinou-se os valores de  $A$  com a Equação 15 e  $\int \frac{dA}{r}$  com a Equação 16 baseada em Collins et al. (2009) [89].

$$A = \frac{(b_1 + b_2)}{2} h = 6,7 \times 10^{-5} m^2 \quad \text{Equação 15}$$

e

$$\int \frac{dA}{r} = \left( \frac{b_1 r_0 - b_2 r_i}{h} \ln \frac{r_0}{r_i} \right) - b_1 + b_2 = 4,84 \times 10^{-3} m \quad \text{Equação 16}$$

Depois, com a Equação 17 baseada em Budynas e Nisbett (2011) [88] achou-se  $r_n$ .

$$r_n = \frac{A}{\int \frac{dA}{r}} = 0,0139 \text{ m} \quad \text{Equação 17}$$

Para encontrar  $r_c$  empregou-se a Equação 18 conforme Budynas e Nisbett (2011) [88] e por fim os valores de  $r_c$  e  $r_n$  foram substituídos na Equação 13, possibilitando encontrar o deslocamento do raio neutro em relação ao centroide,  $e = 5,43 \times 10^{-4} \text{ m}$ .

$$r_c = r_i + \frac{h}{3} \left( \frac{b_1 + 2b_2}{b_1 + b_2} \right) = 0,014 \text{ m} \quad \text{Equação 18}$$

Terminada esta etapa foi necessário determinar as tensões máximas nas superfícies do gancho. Para isso são calculadas as distâncias da superfície interna e externa até o raio neutro,  $c_i$  e  $c_o$ , nesta ordem com a Equação 19 e Equação 20.

$$c_o = r_o - r_n = 6,16 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{Equação 19}$$

Onde,

- i.  $c_o$  é a distância da superfície externa do gancho até o eixo neutro.

$$c_i = r_n - r_i = 3,83 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{Equação 20}$$

Onde,

- ii.  $c_i$  é a distância da superfície interna do gancho até o eixo neutro.

Mensurar  $M$  é feito pela Equação 21. Como o momento no gancho é produzido por uma força cuja linha de ação não passa através do centroide da seção transversal crítica, deve ser calculado em relação ao eixo que passa pelo centroide [89]. Devido a este momento, uma tensão de tração é observada no raio interno ( $r_i$ ) e uma tensão de compressão é observada no raio externo ( $r_o$ ).

$$M = Pr_c = 2,11 \text{ Nm} \quad \text{Equação 21}$$

Onde

- iii.  $M$  é o momento aplicado na seção em questão.

Por fim, empregando a Equação 12 encontra-se as tensões máximas nas superfícies interna e externa do gancho. O fator  $P/A$  na equação representa a tensão devido à força axial aplicada na seção da viga. Os dados de tensão encontrados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 Parâmetros encontrados

$\sigma_i$	24,48 MPa
$\sigma_0$	-15,71 MPa

As tensões encontradas  $\sigma_i= 24,482$  MPa e  $\sigma_0= -15,719$  MPa (o sinal negativo simboliza tensão de compressão) são menores do que o menor valor de tensão de escoamento encontrado nos ensaios de tração de material (30 MPa), ou seja, o material não falhará por escoamento.

Como forma de ratificar os cálculos realizados a mão, o gancho foi desenhado no *software Autodesk Inventor 2020*, então os valores das médias das propriedades de tensão de tração e escoamento encontrados nos ensaios mecânicos foram aplicados (49,18 MPa e 27,63 MPa nesta ordem) e cor (preta), por fim foi realizada uma análise estática de tensão, fixando a rosca superior e aplicando a força de 147 N na curvatura feita pelo raio interno ( $r_i$ ). Os valores encontrados, 24,92 MPa e -14,95 MPa, foram parecidos com os dos cálculos confirmando a informação de que o material não falhará por escoamento.

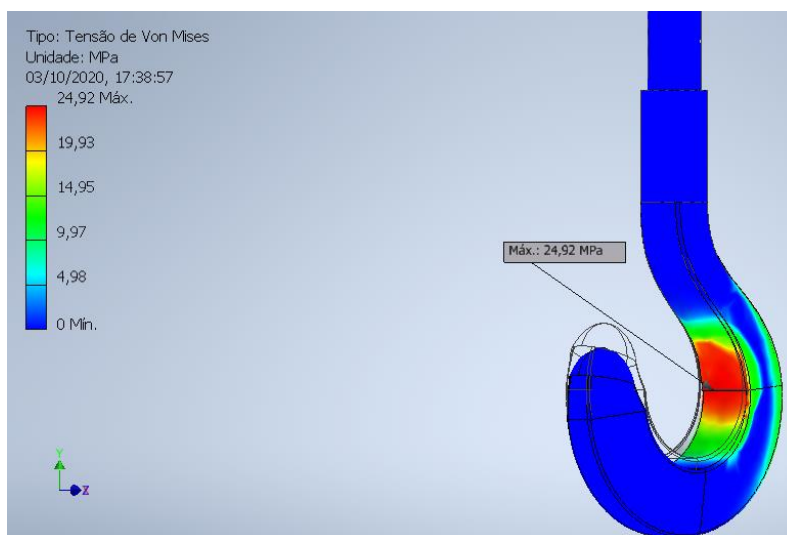


Figura 72 Análise de tensão no software Autodesk Inventor 2020

## Capítulo 5

### 5. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma fundamentação teórica sobre os polímeros ABS e PLA, dois tipos de tecnologia de manufatura aditiva, Estereolitografia e Modelagem por Fusão e Deposição (principalmente, usada para os ensaios), possibilitando um conhecimento mais aprofundado sobre os parâmetros de processo, a fim de auxiliar no melhoramento da impressão 3D e no desenvolvimento de protótipos visuais e/ ou funcionais.

Através dos resultados dos ensaios mecânicos de tração e flexão e do ensaio de absorção de água, baseados em normas *ASTM*, obteve-se valores das resistências dos materiais utilizados, além da porcentagem de água absorvida por eles. Com os resultados conseguiu-se uma breve caracterização destes materiais, amparando numa escolha para sua preferível aplicação.

Com base nos estudos da bibliografia e comparação com os resultados obtidos, concluiu-se que as peças construídas pelo processo *FDM* são altamente anisotrópicas, o que influencia muito nos resultados dos ensaios mecânicos, já que a orientação das camadas de preenchimento, temperatura de extrusão e percentagem de preenchimento fazem esses resultados variarem muito.

No estudo da resolução percebeu-se que um modelo serve tanto para saber as limitações do processo de construção como melhorar este processo, pois através dele se pode saber onde é necessário refinar o procedimento. Na comparação feita entre as duas máquinas, notou-se que uma não se sobrepôs a outra, quer dizer, as máquinas apresentaram comportamento variado, dependendo do tamanho e da parte fabricada, não sendo possível escolher a máquina que tem melhor resolução.

Uma deficiência recorrente na *Cube* foram os espaços vazios na impressão, que podem ser solucionados alterando-se o multiplicador de extrusão ou um preenchimento alternado, como já mencionado. Com respeito à *Ultimaker*, ela fabricou menos componentes do que a outra máquina, limitação que se apresentou desde o software para

os componentes d11, e18 a e21 (setas pretas e bege na Figura 56), o que fez chegar à conclusão que foi uma falha do programa, e não da máquina. Referenciando o aspecto visual, a impressão da *Ultimaker* foi melhor, justamente por não imprimir partes vazias e evitar *warping*, embora a *Cube* também tenha apresentado um bom resultado.

Este estudo permitiu então perceber que uma simples mudança em um parâmetro pode causar diferenças grandes no resultado da impressão, auxiliando num entendimento mais aprofundado de alguns deles, proporcionando impressões melhores.

Como forma de demonstrar a aplicação da impressão 3D juntamente com os valores obtidos nos ensaios mecânicos, foi feito um projeto de um gancho simples e sem ressalto fabricado em PLA+ para suportar a massa de uma mochila de até 15 kg. Seu dimensionamento está disponível na seção 4.5. O gancho foi escolhido pois é uma peça geralmente de aço que sendo substituído pelo PLA+ na impressão 3D passa a ser mais leve e pode ter um *design* diferenciado, por exemplo, suas cores e formas de decoração de modo a ser empregado num quarto infantil, Figura 73.



Figura 73 Gancho dimensionado no Autodesk Inventor

Em trabalhos futuros espera-se analisar estas e novas características variando seus valores, a fim de fazer comparações e encontrar um padrão e/ ou resultados ótimos, relacionando as limitações e erros de impressão com estes valores. Espera-se também estudar a molhabilidade dos líquidos no ABS e PLA e sua relação com a absorção de água destes materiais, influenciando em características qualitativas e quantitativas dos objetos impressos.

## Referências bibliográficas

- [1] A. D. McNaught and A. Wilkinson, “Compendium of Chemical Terminology,” *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. 2014.
- [2] A. R. Kantovicki, “Materiais Poliméricos Módulo 1 - Conceitos e Definições.” UTFPR, 70 slides, 2011.
- [3] S. V. Canevarolo Jr., *Ciência dos Polímeros*, 2nd ed., vol. 1. Artliber, 2006.
- [4] F. Rodriguez and et al., “Major Industrial Polymers,” *Encyclopaedia Britannica*. 2016.
- [5] A. Plastics, “ABS plastic properties,” 2018. [Online]. Available: <https://www.adrecoplastics.co.uk/abs-plastic-properties-and-application/>.
- [6] M. N. Belgacem and A. Gandini, *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Elsevier, 2008.
- [7] G. F. Brito, P. Agrawal, E. M. Araújo, and T. J. A. Mélo, “Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes,” Campina Grande, 2011.
- [8] E. Castro-Aguirre, F. Iñiguez-Franco, H. Samsudin, X. Fang, and R. Auras, “Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life,” 2016.
- [9] H. G. Pereira and et al., “Comportamento Mecânico Do Poli(Ácido Láctico) Com Diferentes Pigmentações Para A Impressão 3D De Componentes Para Aplicação em Próteses e Órteses,” p. 10, 2016.
- [10] G. A. Fernandes, “Resina Fotopolimérica SOMOS 7110 para Estereolitografia: condições de pós-processamento e caracterização química e térmica,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [11] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15. pp. 10212–10290, 2017.
- [12] G. A. Fernandes, C. H. Ahrens, and A. T. N. Pires, “Influência Do Processo De Pós-Cura Em Câmara De Luz Ultravioleta De Peças Obtidas Com Resina Fotopoliméricas Em Máquinas De Estereolitografia,” *Congr. Bras. Eng. E Ciência Dos Mater.* 14., 2000, São Pedro - SP, no. 1, pp. 58101–58108, 2000.

- [13] FormLabs, “Materials Data Sheet,” pp. 76–77, 2014.
- [14] 3DSystems, “Material Selection Guide for Stereolithography,” 2018.
- [15] 3d Matter, “What is the best type of plastic for my 3D printing application?,” 2016. [Online]. Available: <https://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/#more-653>.
- [16] Ensinger, “Plásticos de Alta Performance.” [Online]. Available: <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-de-alto-desempenho>.
- [17] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, “Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study Between PEEK and ABS,” *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, 2015.
- [18] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping*, 2nd ed. World Scientific, 2003.
- [19] K. Giang, “3D Printing STL files: A step-by-step guide.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide/>.
- [20] B. Redwood, “How Does Part Orientation Affect a 3D Print.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>.
- [21] J. V. L. Silva and R. A. Rezende, *Additive manufacturing and its future impact in logistics*, vol. 6, no. PART 1. IFAC, 2013.
- [22] C. Schmutzler, A. Zimmermann, and M. F. Zaeh, “Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-form Deformation,” *48th CIRP Conf. Manuf. Syst.*, pp. 1017–1022, 2016.
- [23] F. P. W. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, “A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering,” *Biomaterials*. 2010.
- [24] A. B. Varotsis, “Introduction to SLA 3D Printing.” 3DHubs.
- [25] 3D Hubs, *SLA 3D Printing: How to print highly detailed parts (STRENGTH TEST)*. 2019.
- [26] L. Santana, J. L. Alves, A. da C. Sabino Netto, and C. Merlini, “Estudo Comparativo Entre PETG e PLA Para Impressão 3D Através de Caracterização Térmica, Química e Mecânica,” *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 23, no. 4, p. 28,

- 2018.
- [27] E. E. Cho, H. H. Hein, Z. Lynn, S. J. Hla, and T. Tran, "Investigation on Influence of Infill Pattern and Layer Thickness on Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology," *J. Eng. Sci. Res.*, 2019.
- [28] K. Hibbert, G. Warner, C. Brown, O. Ajide, G. Owolabi, and A. Azimi, "The Effects of Build Parameters and Strain Rate on the Mechanical Properties of FDM 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene," *Open J. Org. Polym. Mater.*, vol. 09, no. 01, pp. 1–27, 2019.
- [29] O. S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, "Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 15, pp. 107–122, 2007.
- [30] S. R. Rajpurohit and H. K. Dave, "Flexural Strength of Fused Filament Fabricated (FFF) PLA Parts on an Open-source 3D Printer," *Adv. Manuf.*, 2018.
- [31] K. G. Jaya Christiyana, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, "Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer," *J. Inst. Eng. Ser. C*, 2016.
- [32] *User Guide Cel Robox*, 1.4. Cel Technology.
- [33] 3d Matter, "What is the influence of infill%, layer height and infill pattern on my 3D prints?" 2015.
- [34] M. Behzadnasab and A. A. Yousefi, "Effects of 3D printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product," *12th Int. Semin. Polym. Sci. Technol.*, p. 2, 2016.
- [35] CustomPartNet Corporation, "Fused Deposition Modeling." [Online]. Available: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
- [36] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no. October 2007, pp. 72–80, 2008.
- [37] "Validating Isotropy in SLA 3D Printing." Formlabs, p. 8.
- [38] S. Tibbits and TED, *The emergence of "4D printing."* 2013.
- [39] F. Momeni, S. M. M. H. N, X. Liu, and J. Ni, "A review of 4D printing," *Mater. Des.*, 2017.
- [40] S. Tibbits, "4D Printing," pp. 116–121, 2014.

- [41] A. Garcia, J. A. Spim, and C. A. dos Santos, *Ensaio dos Materiais*. LTC Editora.
- [42] A. Zeemann, “Resistência Mecânica.” LinkedIn, 2016.
- [43] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, *Ciência e Engenharia de Materiais*, 9th ed. LTC, 2018.
- [44] ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (D638 - 14),” *ASTM Stand.*, no. C, p. 17, 2014.
- [45] P. H. N. Pereira, “Estudo do Comportamento Mecânico do Policloreto de Vinila (PVC) Através de Ensaio de Tração.” Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- [46] K. Eun-Seob, Y.-J. Shin, and S.-H. Ahn, “The Effects of Moisture and Temperature on the Mechanical Properties of Additive Manufacturing Components: Fused Deposition Modeling,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 6, 2016.
- [47] J. F. M. Fernandes, “Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA.” Instituto Superior Técnico Lisboa, p. 113, 2016.
- [48] ASTM, “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics (D570 - 98 2018),” *ASTM Stand.*, vol. 16, no. Reapproved, pp. 1–4, 2018.
- [49] Y. Hindieh, “Flexural Analysis of 3D Printed Members.” South Dakota State University, 2018.
- [50] ASTM, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (D790 - 17),” *ASTM Stand.*, p. 12, 2017.
- [51] A. S. Maxwell, W. R. Broughton, G. Dean, and G. D. Sims, “Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials,” 2005.
- [52] ASTM, “Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials (G154 - 16),” *ASTM Stand.*, p. 11, 2016.
- [53] ASTM, “Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources (G151 - 19),” *ASTM Stand.*, p. 15, 2019.
- [54] ASTM, “Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics (D4329 - 13),” *ASTM Stand.*, vol. i, pp. 1–6, 2013.

- [55] ASTM, “Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Tests (G147 - 17),” *ASTM Stand.*, pp. 1–7, 2017.
- [56] Formlabs, “What Does Resolution Mean in 3D Printing?” [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/3d-printer-resolution-meaning/>.
- [57] B. Obudho, “High Resolution 3D Printer – What Does It Mean,” All3DP, 2018.
- [58] 3Space, “What Does Resolution Mean in 3D Printing?” [Online]. Available: <https://3space.com/blog/what-does-resolution-mean-in-3d-printing/>.
- [59] ISO/ASTM, “Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (ISO/ ASTM 52902:2019),” *ASTM Stand.*, no. July, p. 24, 2019.
- [60] T. H. C. Childs and N. P. Juster, “Linear and Geometric Accuracies from Layer Manufacturing,” vol. 43, pp. 163–166, 1994.
- [61] D. Jayaram, A. Bagchi, C. C. Jara-Almonte, and S. O’Reilly, “Benchmarking of Rapid Prototyping Systems - Beginning to Set Standards.” pp. 146–153, 1994.
- [62] R. I. Campbell, D. J. De Beer, E. Pei, and M. Martorelli, “Benchmarking Of Material Extrusion Entry-Level 3D Printers.” 2019.
- [63] R. Ippolito, L. Iuliano, and A. Gatto, “Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 157–160, 1995.
- [64] H. S. Byun and K. H. Lee, “Design of a New Test Part for Benchmarking the Accuracy and Surface Finish of Rapid Prototyping Processes.” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 731–740, 2003.
- [65] J.-P. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Van Vaerenbergh, and P. Mercelis, “Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques,” *International Conference on Polymers and Moulds Innovations*. p. 7, 2005.
- [66] H. G. Lemu and S. Kurtovic, “3D Printing for Rapid Manufacturing: Study of Dimensional and Geometrical Accuracy.” International Federation for Information Processing, pp. 470–479, 2012.
- [67] M. Fahad and N. Hopkinson, “A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing ( AM ) processes,” *2nd Int.*

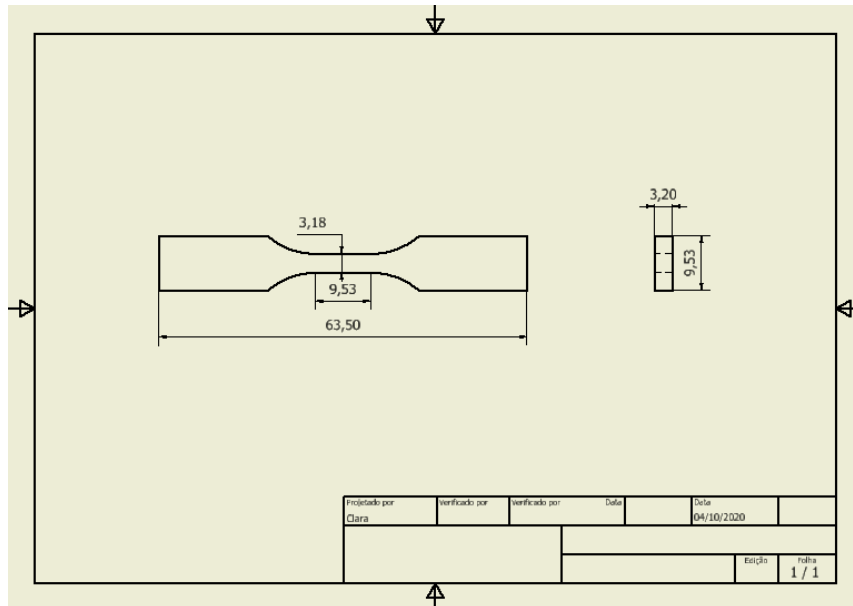
*Conf. Mech. Prod. Automob. Eng.*, 2012.

- [68] J. Kacmarcik, D. Spahic, K. Varda, E. Porca, and N. Zaimovic-Uzunovic, “An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM,” 2018.
- [69] M. Mahesh, “Rapid Prototyping and Manufacturing Benchmarking,” National University of Singapore, 2004.
- [70] R. M. Santos, G. L. Botelho, and A. V. Machado, “Artificial and Natural Weathering of ABS,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, pp. 2005–2014, 2010.
- [71] Creative Tools, “3D Benchy.” [Online]. Available: <http://www.3dbenchy.com/>.
- [72] MakerBot Industries, “Thingiverse.” [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2806295>.
- [73] L. Novakova-marcincinova and J. Novak-marcincin, “Testing of ABS Material Tensile Strength for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Method,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 912–914, pp. 370–373, 2014.
- [74] R. C. Kanu, C. Hale, and P. O. Piper, “The Use of 3D Printing to Introduce Students to ASTM Standards for Testing Tensile Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene ( ABS ) Plastic Material,” New Orleans, 2016.
- [75] B. Banjanin *et al.*, “Consistency Analysis of Mechanical Properties of Elements Produced by FDM Additive Manufacturing Technology,” *Rev. Mater.*, vol. 23, no. 4, 2018.
- [76] T. Letcher, B. Rankouhi, and S. Javadpour, “Experimental Study of Mechanical Properties of Additively Manufactured ABS Plastic as a Function of Layer Parameters.” International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, pp. 1–8, 2015.
- [77] J. Lovo and C. A. Fortulan, “Estudo de Propriedades Mecânicas e Anisotropia em Peças Fabricadas por Manufatura Aditiva Tipo FDM,” 2017.
- [78] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, “Mechanical Properties of Components Fabricated With Open-source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions,” *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 242–246, 2014.
- [79] S. A. Kumar and Y. S. Narayan, *Tensile Testing and Evaluation of 3D-Printed PLA Specimens as per ASTM D638 Type IV Standard*. Springer Singapore, 2018.
- [80] G. Radaelli, “Estudo da Permeabilidade a Gases de Nanocompósitos de Poliiolefina,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

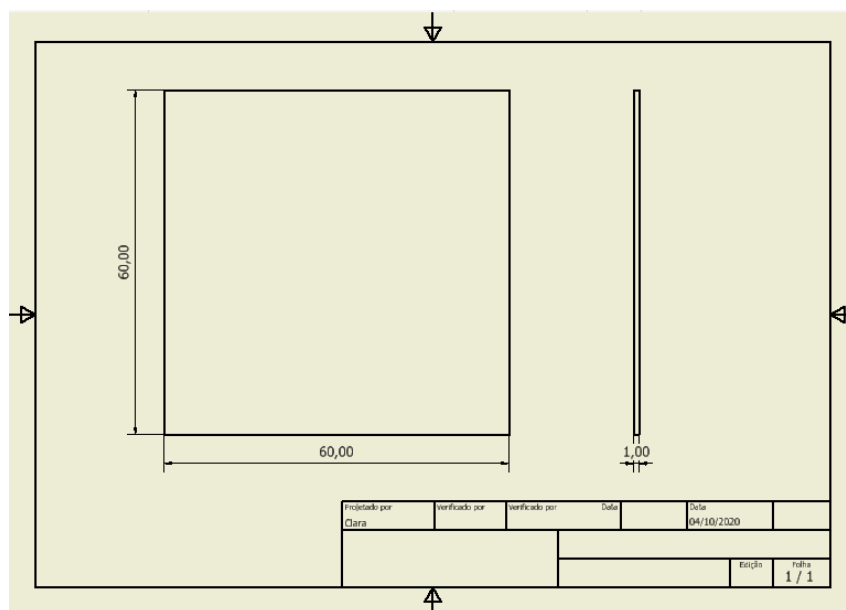
- [81] I. Durgun and R. Ertan, “Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 228–235, 2014.
- [82] M. Dawoud, I. Taha, and S. J. Ebeid, “Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques,” *J. Manuf. Process.*, vol. 21, pp. 39–45, 2016.
- [83] A. Nugroho, R. Ardiansyah, L. Rusita, and I. L. Larasati, “Effect of Layer Thickness on Flexural Properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D Printing,” *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018.
- [84] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, “Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection,” *Mater. Des.*, 2017.
- [85] F. Knoop, A. Kloke, and V. Schoeppner, “Quality Improvement of FDM Parts by Parameter,” *Am. Inst. Phys.*, 2017.
- [86] Simplify3D, “Print Quality Troubleshooting Guide.” [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>.
- [87] N. Rudenko, *Máquinas de Elevação e Transporte*. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1976.
- [88] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica*. 2011.
- [89] J. A. Collins, H. Busby, and G. Staab, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*, 2nd ed. 2009.
- [90] ABNT, “Rosca métrica ISO de uso geral - Dimensões Básicas (NBR ISO 724),” *Abnt*, 2004.

## APÊNDICES

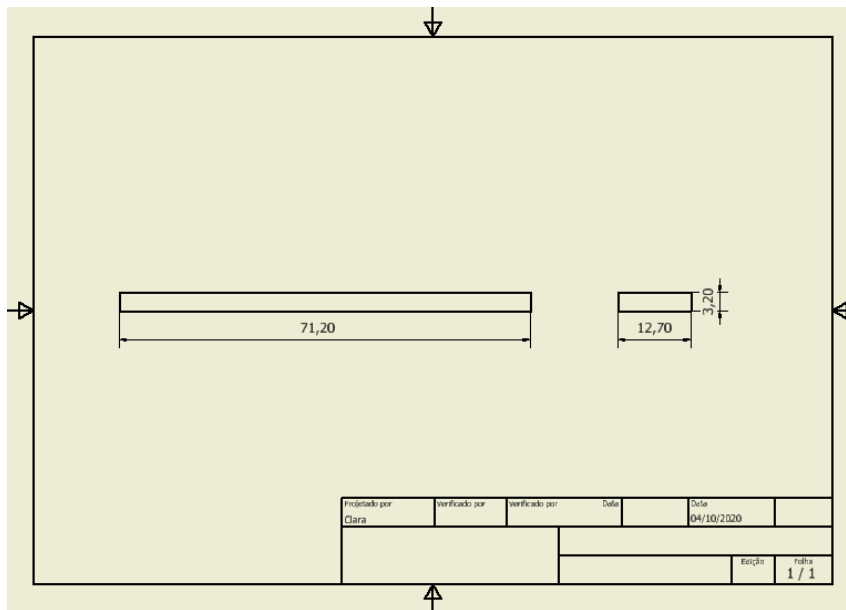
### APÊNDICE A – ESPÉCIME PARA O ENSAIO DE TRACÇÃO



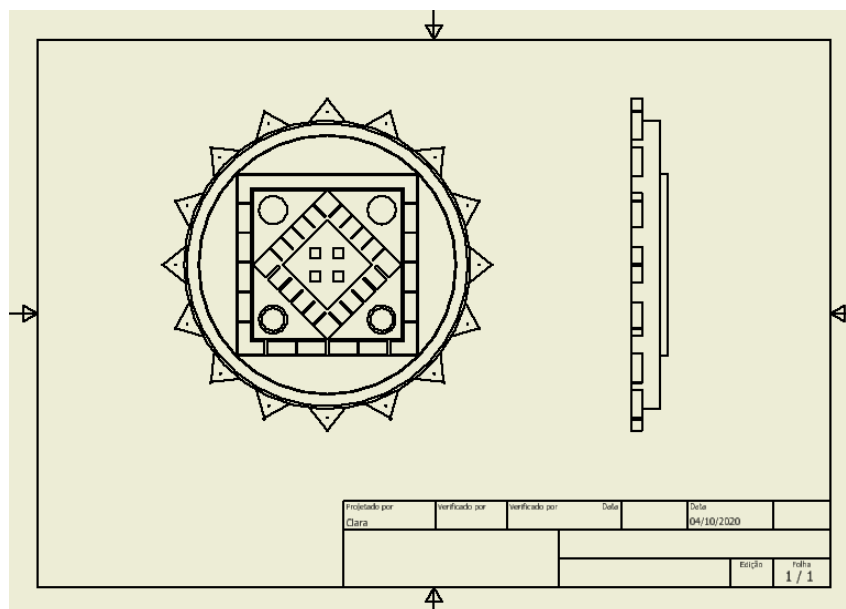
### APÊNDICE B – ESPÉCIME PARA O ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA



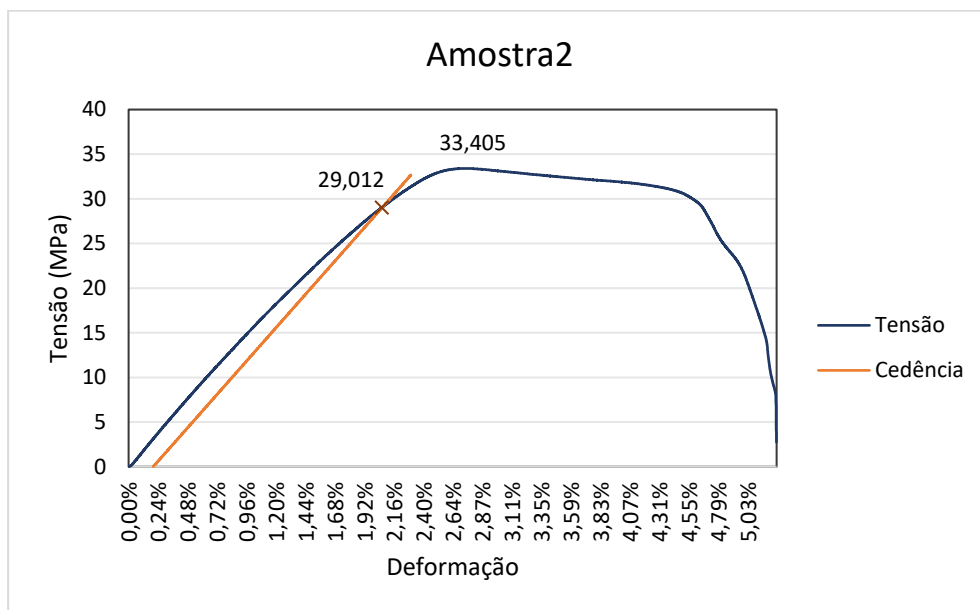
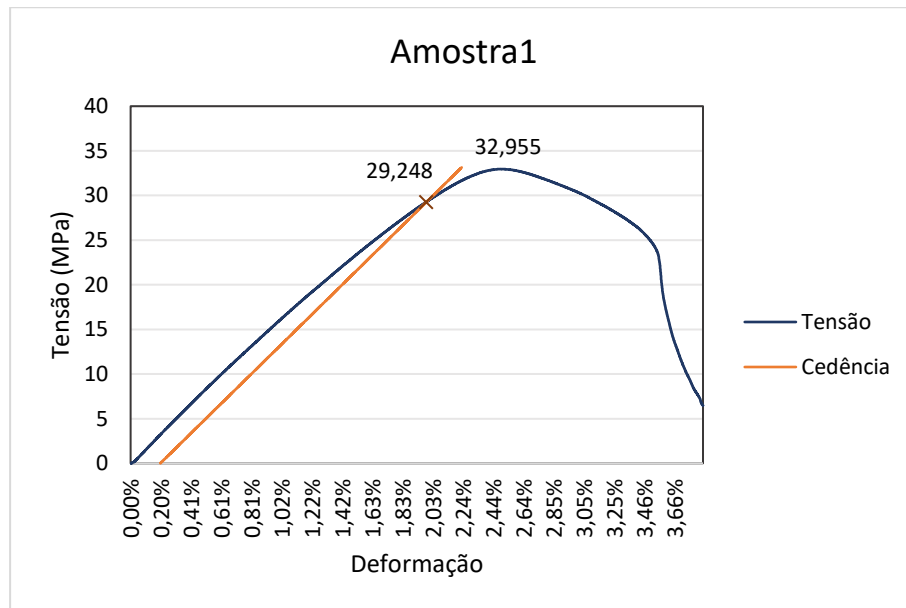
## APÊNDICE C – ESPÉCIME PARA ENSAIO DE FLEXÃO

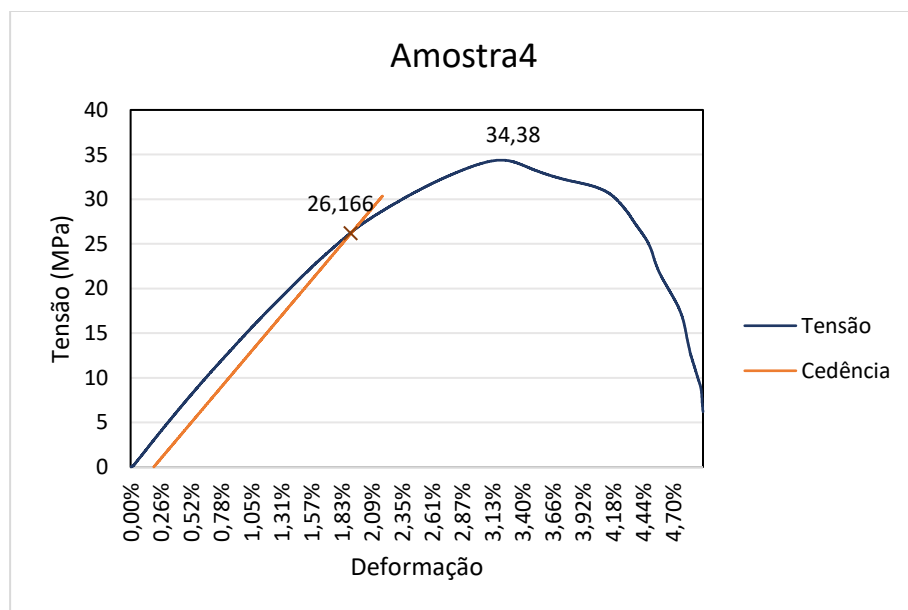
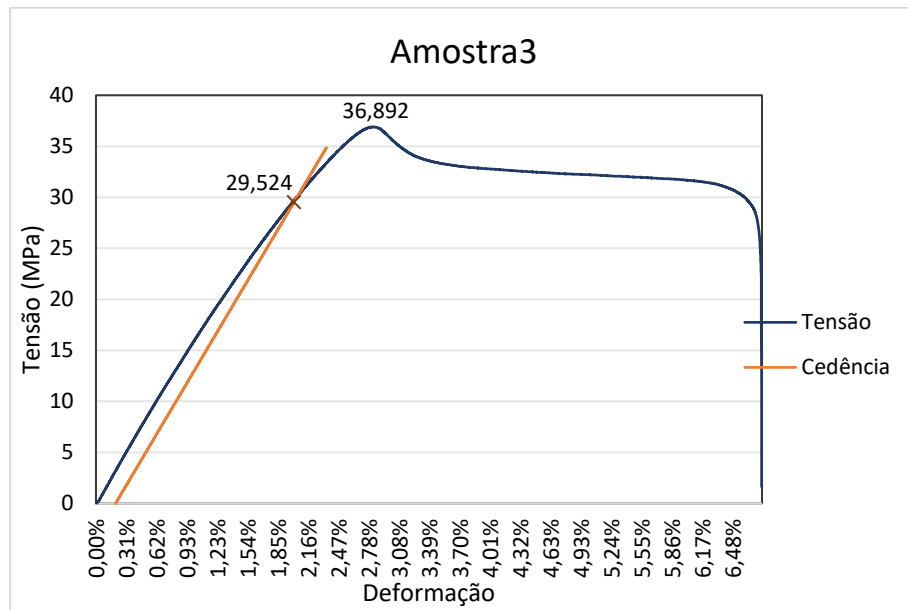


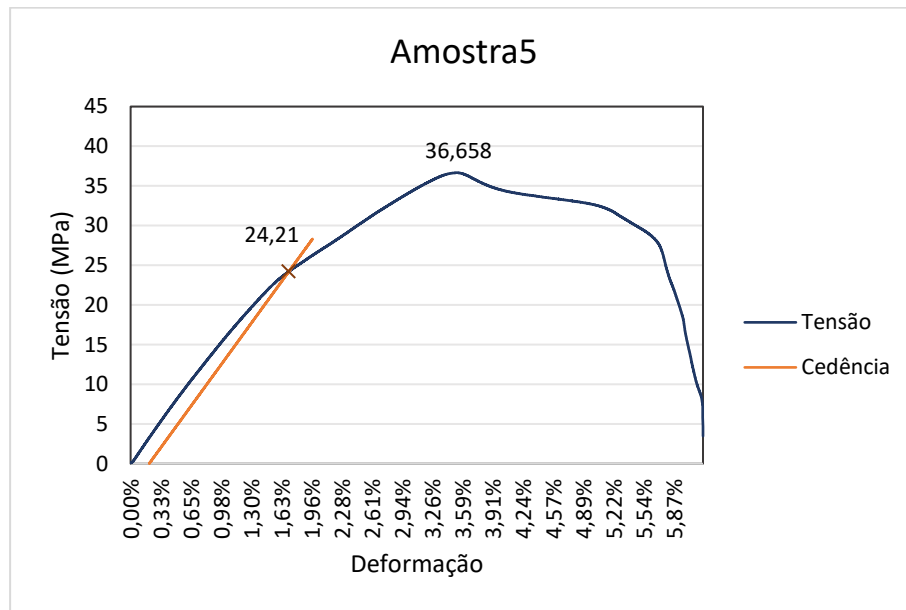
## APÊNDICE D – REPRESENTAÇÃO DESENHO TÉCNICO MANDALA



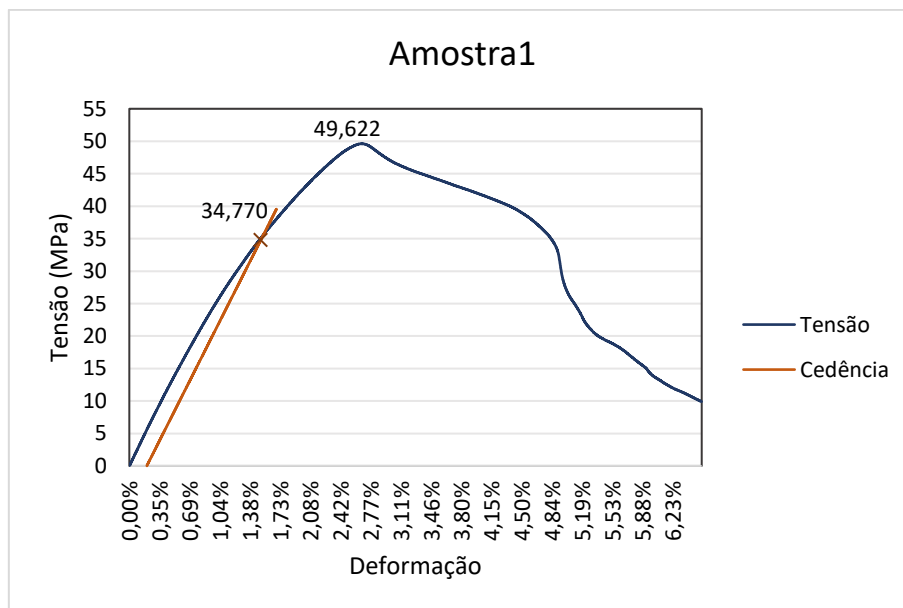
## APÊNDICE E – AMOSTRAS EM ABS (TRAÇÃO)

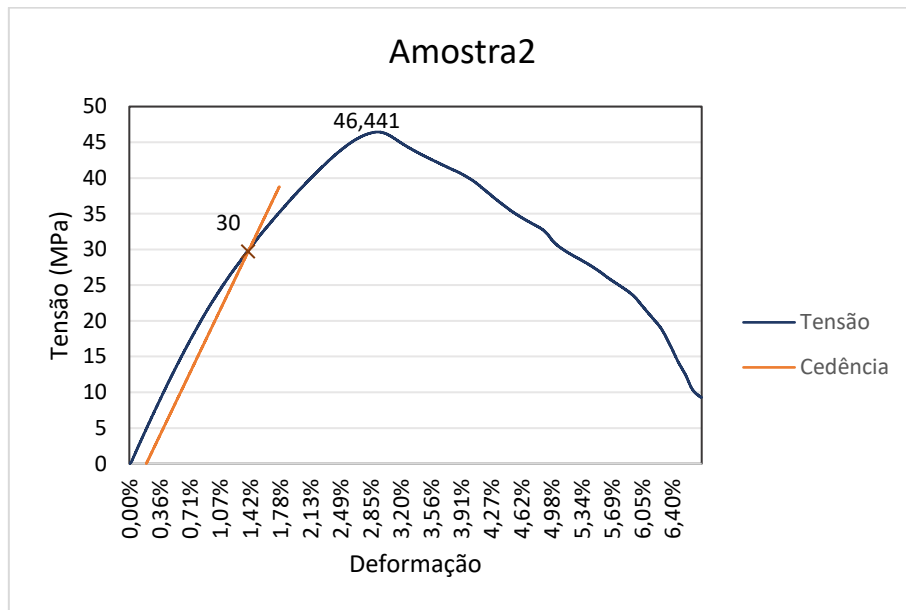


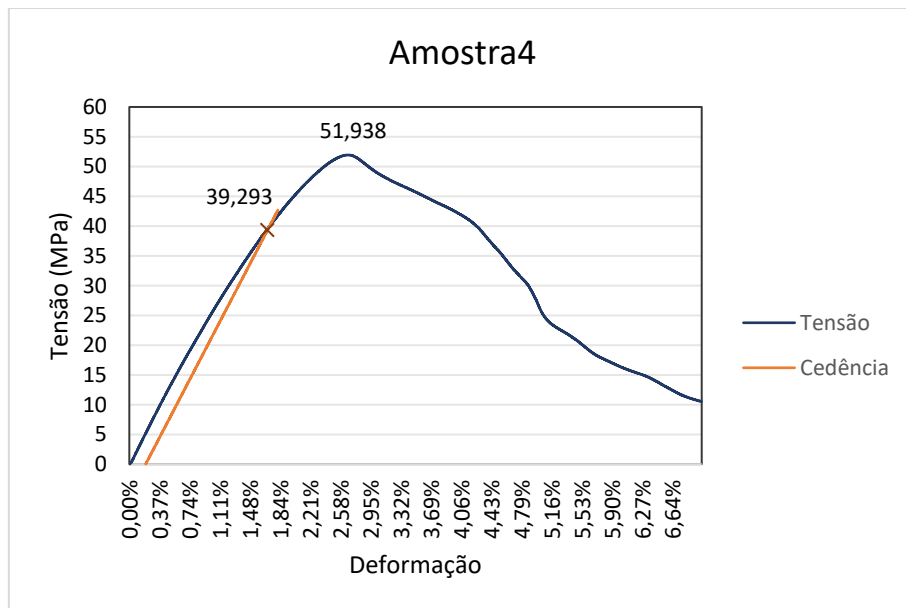
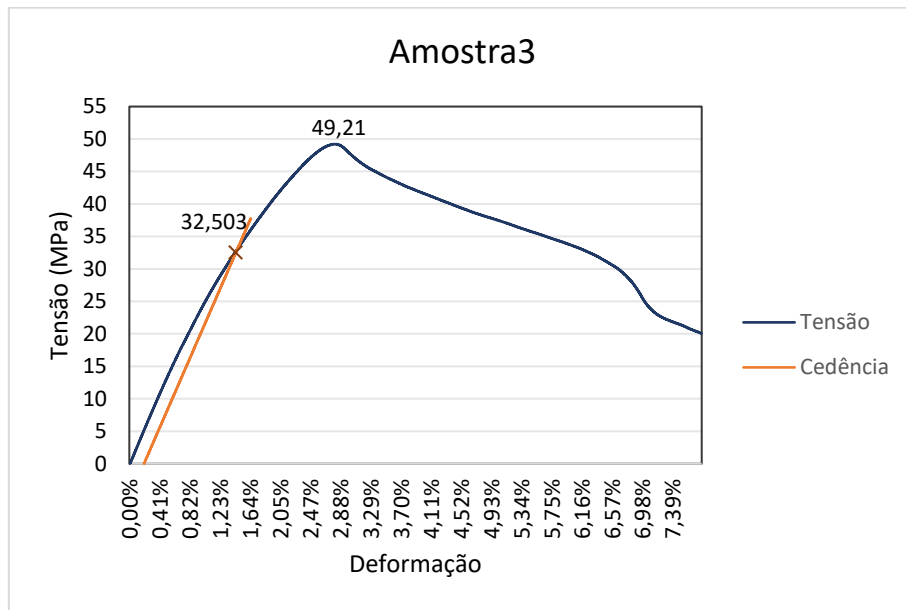


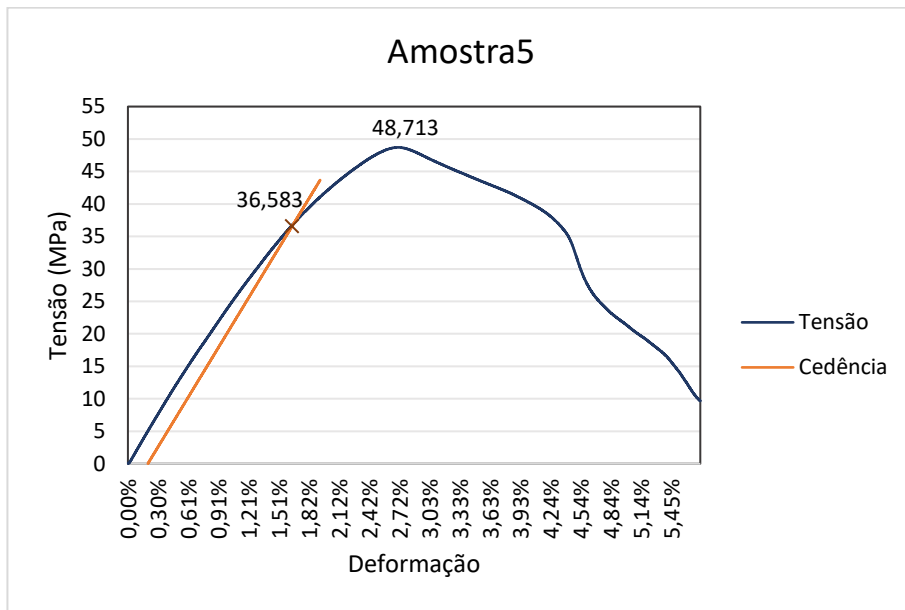


## APÊNDICE F – AMOSTRAS EM PLA+ (TRAÇÃO)

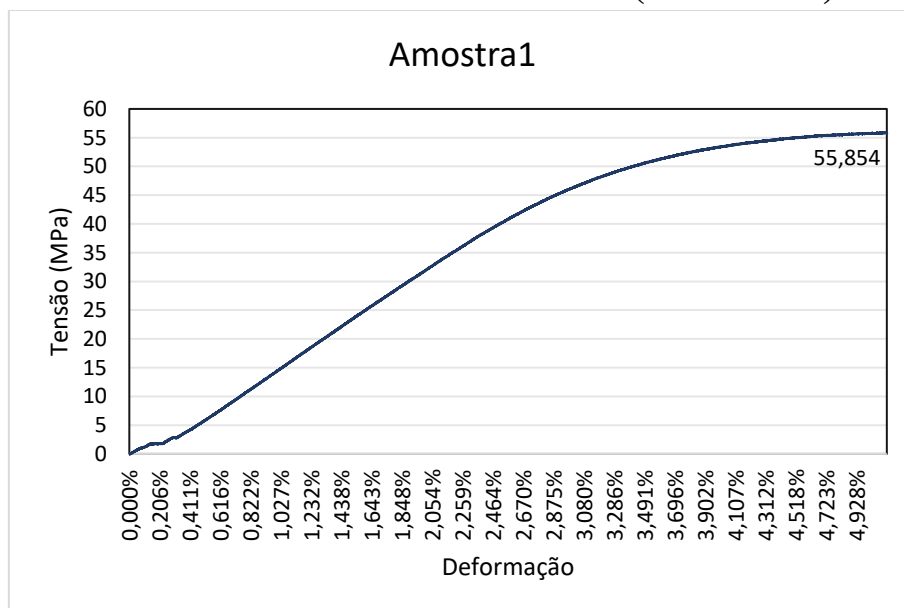


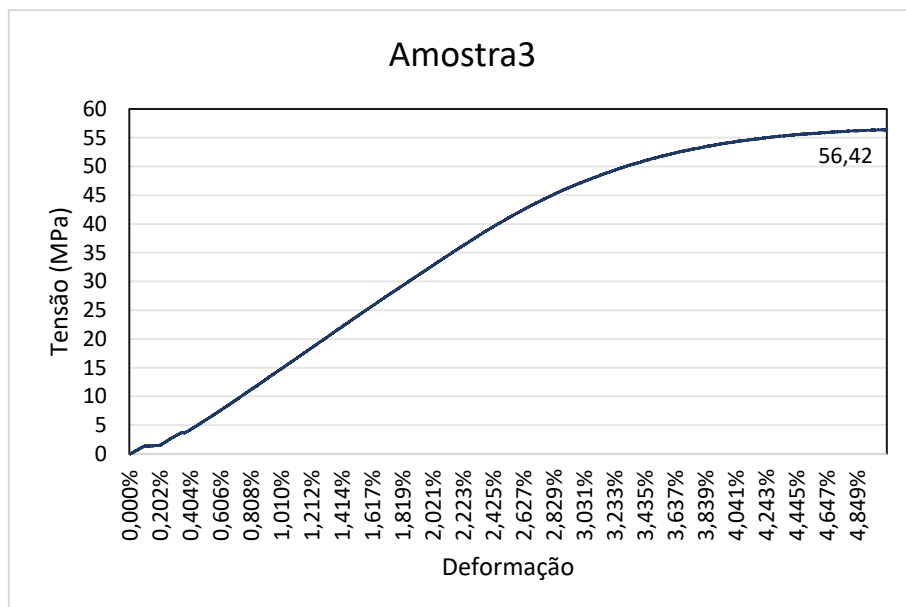
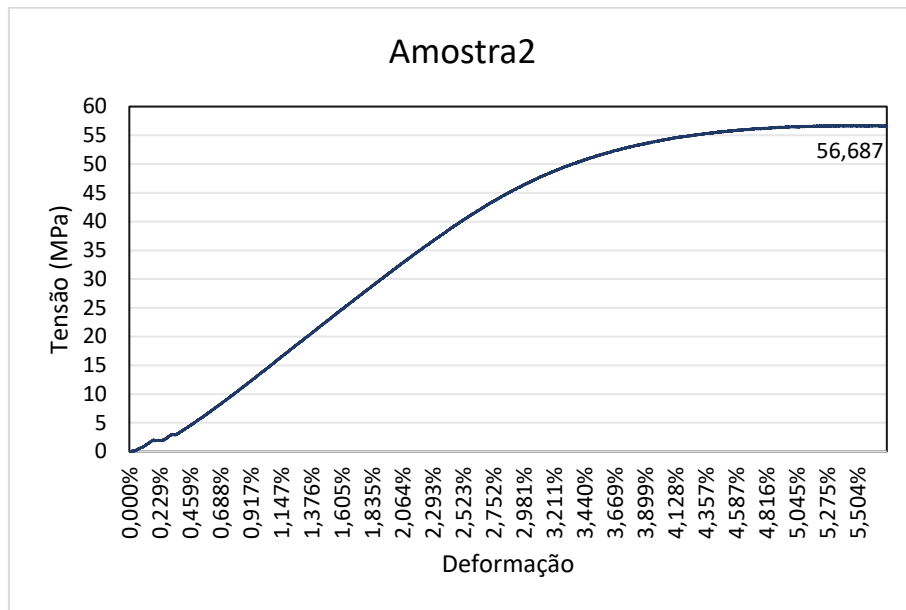


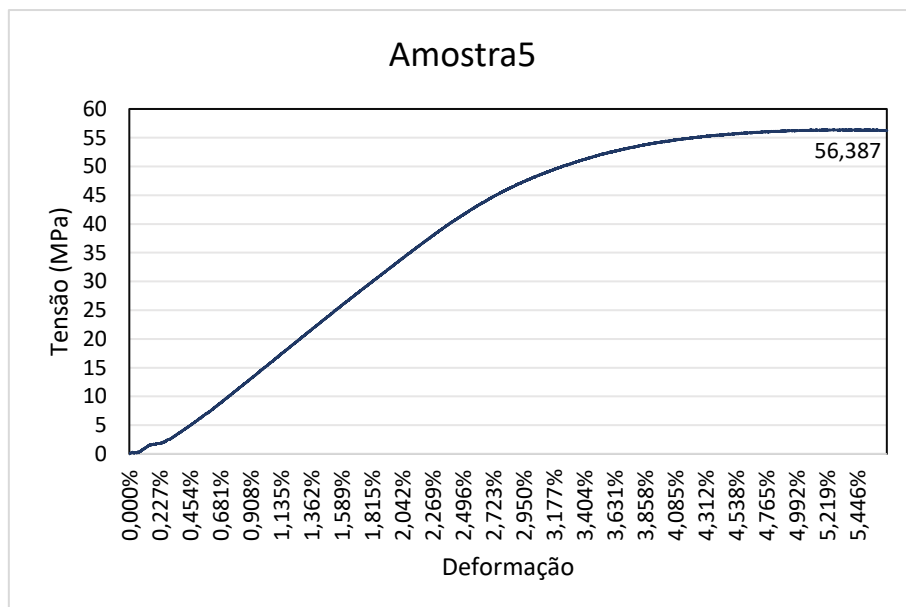
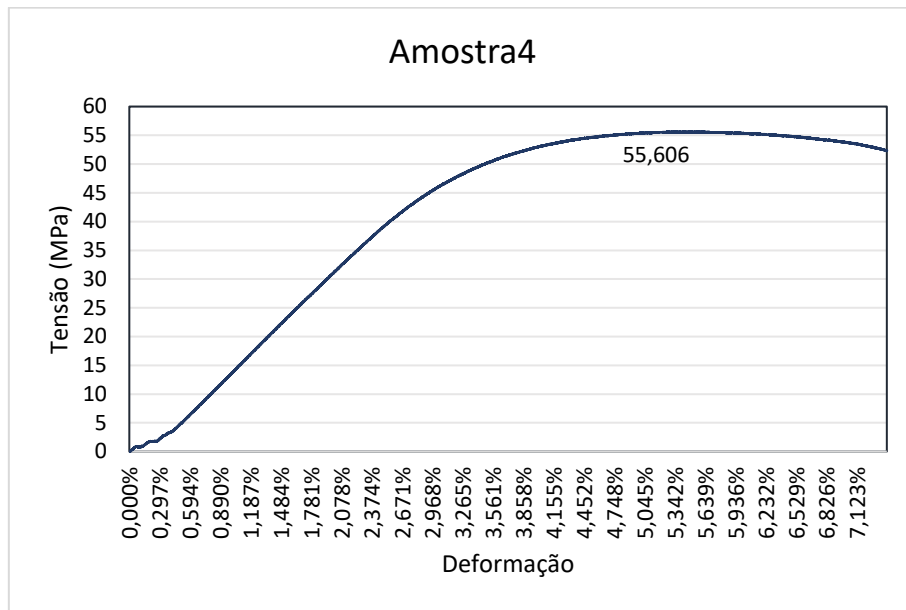




## APÊNDICE G – AMOSTRAS EM ABS (FLEXÃO)







## APÊNDICE H – AMOSTRAS EM PLA+ (FLEXÃO)

