



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ANÁLISE DO EFEITO DO MATERIAL NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPONENTES POLIMÉRICOS
PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA**

Matheus Santos Medina
Natan do Nascimento Medeiros

Rio de Janeiro
Janeiro de 2021

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TÉCNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ANÁLISE DO EFEITO DO MATERIAL NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPONENTES POLIMÉRICOS
PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA**

Matheus Santos Medina
Natan do Nascimento Medeiros

Artigo apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso na disciplina de Projeto Final, conforme as normas do Departamento de Educação Superior, parte dos requisitos para obtenção do bacharelado em Engenharia Mecânica no CEFET/RJ.

Orientador(a): Profa. Doina Mariana Banea

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M491 Medina, Matheus Santos
Análise do efeito do material nas propriedades mecânicas de componentes poliméricos produzidos por manufatura aditiva / Matheus Santos Medina [e] Natan do Nascimento Medeiros — 2020.
93f.: il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2020.
Bibliografia : f. 86-93
Orientadora: Doina Mariana Banea

1. Engenharia mecânica. 2. Impressão tri-dimensional. 3. Polímeros. 4. Polímeros - Propriedades mecânicas . I. Medeiros, Natan do Nascimento II. Banea, Doina Mariana (Orient.). III. Título.

CDD 621

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos nossos familiares e amigos pelo apoio e motivação durante esse longo e árduo período, além da compreensão e paciência pelos momentos de ausência. Agradecemos também, em grande parte, à nossa professora e orientadora Doina Mariana Banea por nos guiar em nossos estudos, sobretudo por sua dedicação com o estudo, paciência em nos corrigir, concessão de conhecimento e pelo acompanhamento constante do nosso projeto. Aos amigos Henrique Queiroz e Daniel Kawasaki agradecemos por todo o suporte, ensinamentos e disposição contínua em nos ajudar, principalmente o último, sem o qual esse trabalho não teria sido finalizado. Por último, mas não menos importante, agradecemos também à instituição CEFET/RJ pelas instalações laboratoriais e a todos que contribuíram indiretamente para a realização deste projeto.

Resumo

Manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, é um processo emergente no setor de manufatura com um número crescente de aplicações na indústria aeroespacial, de prototipagem, dispositivos médicos, entre outros. A resistência de uma peça fabricada por MA é determinada pelo material escolhido e os parâmetros de impressão. Ao passo que novos materiais e métodos de MA são continuamente sendo desenvolvidos, há uma necessidade pelo desenvolvimento e caracterização mecânica de materiais apropriados para a impressão 3D. Neste estudo, a influência do material e dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de termoplástico manufaturados aditivamente foi investigada. Três filamentos diferentes que estão disponíveis comercialmente – *polylactic acid* (PLA), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) e Tritan – foram utilizados. Testes trativos e fletores foram executados, em acordo com as normas ASTM, para investigar e comparar as propriedades mecânicas das peças fabricadas por MA em função do material utilizado. Os resultados mostram que o tipo dos filamentos teve a maior influência nas propriedades mecânicas dessas peças. A resistência e rigidez máximas foram obtidas para os espécimes de PLA. Tritan apresentou a maior deformação, já o PLA demonstrou a menor capacidade para deformação. As propriedades mecânicas das peças também dependem dos parâmetros de impressão. Os parâmetros utilizados nesse trabalho apresentaram uma boa relação entre tempo de impressão e as propriedades mecânicas.

Palavras-chave: manufatura aditiva, impressão 3D, parâmetros de impressão, polímeros, propriedades mecânicas, resistência mecânica, comportamento mecânico

Abstract

Additive manufacturing (AM), also called 3D printing, is an emerging process in the manufacturing sector with increasing new applications in aerospace, prototyping, medical devices and product development, among others. The AM part's resistance is determined by the chosen material and printing parameters. As novel materials and AM methods are continuously being developed, there is a need for developing and mechanical characterization of suitable materials for 3D printing. In this study, the influence of material and the 3D-printing parameters on the mechanical properties of additive manufactured thermoplastic parts was investigated. Three different filaments that are commercially available: Polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and Tritan were used. Tensile and flexural tests were carried out, in accordance with ASTM standards, to investigate and compare the mechanical properties of the AM parts as a function of material used. The results show that the type of filaments had the biggest influence on the mechanical properties of the AM parts. The maximum strength and stiffness were obtained for the PLA specimens. Tritan presented the highest deformation, while the PLA displayed the lowest deformation capacity. The mechanical properties of the printed parts also depend on the printing parameters. The parameters used in this work presented a good compromise between printing time and the mechanical properties.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, printing parameters, polymers, mechanical properties, mechanical strength, mechanical behavior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Organização do Projeto	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Manufatura Aditiva	5
2.1.1. Fases de um Processo de MA	6
2.1.2. Métodos de Impressão	7
2.1.3. Parâmetros de Impressão	14
2.1.4. Materiais Utilizados em MA	19
2.2. Materiais Poliméricos	21
2.2.1. PLA e ABS	25
2.2.2. Tritan	28
2.3. Influência dos Parâmetros na Manufatura Aditiva	30
2.4. Aplicações	37
2.4.1. Metais	38
2.4.1.1. Indústria Aeroespacial	38
2.4.1.2. Indústria Automobilística	38
2.4.2. Polímeros	39
2.4.2.1. Indústria de Calçados	39
2.4.2.2. Indústria Médica	39
2.4.2.3. Design Artístico	41
2.4.2.4. Drones	42
2.5. Ensaio Destrutivos	43
2.5.1. Ensaio de Tração	43
2.5.2. Ensaio de Flexão	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47

3.1. Parâmetros de Impressão Ideais.....	48
3.2. Fabricação das Amostras.....	50
3.3. Ensaio 54	
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Resultados	57
4.1.1. Comparação Entre os Resultados dos Ensaio Mecânicos	57
4.1.2. Comparação com Outros Resultados da Literatura.....	62
4.2. Discussão	68
4.2.1. PLA.....	69
4.2.2. ABS	72
4.2.3. Tritan	75
4.2.4. Tritan a 280 °C	82
5. CONCLUSÕES	83
5.1. Trabalhos Futuros.....	85
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de manufatura aditiva [8].	6
Figura 2 - Fases do processo de manufatura aditiva [9].	7
Figura 3 - Diagramas dos quatro principais métodos de manufatura aditiva: (a) Modelagem por Fusão e Deposição (FDM); (b) Inkjet Printing; (c) Estereolitografia (SLA); (d) Powder Bed Fusion [1].	8
Figura 4 - Esquema indicando os parâmetros de impressão (a) Orientação de construção, (b) Espessura de camada e (c) Parâmetros FDM do caminho percorrido pelo bico extrusor de material durante impressão [10].	15
Figura 5 - Visão geral dos tipos de materiais poliméricos para diferentes métodos de manufatura aditiva [47].	20
Figura 6 - Curvas tensão versus deformação obtidas no ensaio de tração de diferentes tipos de polímeros: comportamento frágil (A), comportamento dúctil (B) e comportamento elástico (C) [48].	23
Figura 7 - Curva tensão-deformação para um polímero dúctil [48].	23
Figura 8 - Efeito da temperatura no comportamento mecânico de um termoplástico amorfo. A região sombreada representa a faixa de uso [48].	24
Figura 9 - Efeito da temperatura no comportamento mecânico de um termoplástico parcialmente cristalino. A região sombreada representa a faixa de uso [48].	25
Figura 10 - Orientação da peça [11].	32
Figura 11 - Orientação de impressão [7].	32
Figura 12 - Protótipos e modelos fabricados por SLA (Estereolitografia) e DLP (Digital light processing) [67].	37
Figura 13 - (a) Invólucro de aparelho de auxílio auditivo (b) Bypass coronário [67].	40
Figura 14 - Modelos anatômicos utilizados em planejamento cirúrgico [9].	40
Figura 15 - Exemplo de Órtese tornozelo-pé produzida através da Manufatura Aditiva [68].	41
Figura 16 - A direita, um soquete. A esquerda, uma prótese. Ambas impressas por Manufatura Aditiva [68].	41
Figura 17 - Design artístico auxiliado por MA: (a) Modelo artístico, (b) modelo de jóia fabricado por MA, (c) Anel de prata produzido por fundição à vácuo [67].	42
Figura 18 - Possibilidade para a quantidade de pernas inclusas dependendo da configuração escolhida [16].	42

Figura 19 - Esquema do teste de flexão [69].	46
Figura 20 - Orientação de Raster em contorno [7].	50
Figura 21 - Impressora GTMAX3D CORE A1V2 disponibilizada pelo LADES, CEFET/RJ.	51
Figura 22 - Esquema dos Corpos de Prova a) Trativos e b) Fletores.	53
Figura 23 - Amostra de Tritan sendo ensaiada. Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.	54
Figura 24 - Amostra de Tritan sendo ensaiada. Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.	55
Figura 25 - Curvas representativas de Tensão-deformação em tração.	58
Figura 26 - Tensão-deformação em tração – Destaque na tensão máxima.	58
Figura 27 - Curvas representativas de Força-deslocamento em flexão.	59
Figura 28 - Gráfico comparativo da resistência à tração média dos materiais testados.	59
Figura 29 - Gráfico comparativo da resistência à flexão média dos materiais testados.	60
Figura 30 - Gráfico comparativo com materiais impressos por FDM encontrados na literatura e como os materiais impressos para este trabalho se comparam quanto à resistência à tração.	63
Figura 31 - Gráfico comparativo com materiais impressos por FDM encontrados na literatura e como os materiais impressos para este trabalho se comparam quanto à resistência à flexão.	63
Figura 32 - Curvas de tensão x deformação para os testes de tração com espécimes de PLA.	69
Figura 33 – Espécime de PLA fraturado após teste de tração, em que (a) vista de topo e (b) vista da região da fratura.	70
Figura 34 - Falhas trativas representativas de: a) Seção transversal do espécime de PLA, b) Micrografia do PLA.	70
Figura 35 - Modo de fratura do tipo AGM [70].	71
Figura 36 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de PLA.	71
Figura 37 - Curvas tensão x deformação para os testes de tração com CPs de ABS.	72
Figura 38 - Corpo de prova de ABS fraturado após teste de tração, em que (a) vista de topo e (b) vista da região da fratura.	73
Figura 39 - Falhas trativas representativas de: a) Seção transversal do espécime de ABS, b) Micrografia do ABS.	73
Figura 40 - Modos de fratura do tipo LGM [70].	74
Figura 41 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de ABS.	74

Figura 42 - Curvas tensão x deformação para os testes de tração com CPs de Tritan.....	75
Figura 43 - Corpo de prova de Tritan fraturado após teste de tração.	75
Figura 44 - Falha trativa representativa de: (a) Ruptura por fibrilação do Tritan a 250°C, (b) e (c) Micrografias do Tritan a 280°C.....	76
Figura 45 - Modos de fratura do tipo SGM [70].	77
Figura 46 - Deslocamento no ensaio de tração em função do tempo (t) para o teste de Tritan: a) t=0s, b) t=15s, c) t=30s, d) t=60s, e) t=120s, f) t=150s, g) t=180s, h) t=195s, i) t=210s, j) t=240s.....	78
Figura 47 - Configuração inicial da amostra (t=0s), representado por (a).	79
Figura 48 - Configuração pré-ruptura da amostra (t=180s), representado por (g).	79
Figura 49 - Configuração após a ruptura da amostra (t=195s), representado por (h).	80
Figura 50 - Configuração final da amostra (t=240s), representado por (j).	80
Figura 51 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de Tritan.	81
Figura 52 - Curva tensão x deformação para o teste de tração com CP de Tritan a 280°C.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Um sumário de materiais, aplicações, vantagens e desvantagens dos principais métodos de manufatura aditiva [1].	12
Tabela 2 - Sumário dos trabalhos publicados sobre otimização de processos FDM [13].....	17
Tabela 3 - Quadro contendo as propriedades de PLA e ABS [49]......	27
Tabela 4 – Quadro contendo as propriedades de Tritan [53].	29
Tabela 5 - Parâmetros de impressão para atingir alta resistência em diferentes materiais [11].	31
Tabela 6 – Resultados dos testes de tração de amostras com parâmetros de impressão variados [61]......	34
Tabela 7 - Parâmetros relevantes de fabricação [61].	34
Tabela 8 - Sumário dos parâmetros de impressão utilizados em FDM baseado no entendimento geral da literatura [7]......	36
Tabela 9 - Requerimentos geométricos para corpos de prova [70].	44
Tabela 10 - Recomendações para geometria de corpo de prova [70]......	45
Tabela 11 - Parâmetros de impressão utilizados para construção dos substratos.....	49
Tabela 12 - Propriedades Mecânicas dos materiais usados.....	50
Tabela 13 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas de tração.	60
Tabela 14 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas de flexão.	60
Tabela 15 - Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de tração.	64
Tabela 16 - Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de flexão.....	66
Tabela 17 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas comparadas entre si e com a resistência do filamento.....	67

1. INTRODUÇÃO

Dentre a gama de processos de fabricação disponíveis na indústria atual, a Manufatura Aditiva (MA) é um dos que mais ganha espaço nas cadeias produtivas. Conhecida popularmente como “impressão 3D”, é um processo de fabricação voltado para a produção de uma ampla variedade de estruturas e formas geométricas complexas. Muitos ainda a reconheceriam por Prototipagem Rápida, se guiando sobretudo por sua concepção original. Porém, o conhecimento sobre o processo em si ainda não é muito difundido e requer esclarecimentos [1][2].

O crescente consenso de priorizar os sistemas de manufatura 3D em lugar das técnicas tradicionais é atribuído a diversas vantagens, como a fabricação de geometrias complexas com alta precisão, economia de material, flexibilidade de projeto e customização individual (já que não há dependência de moldes ou modelos). Contudo, as propriedades mecânicas inferiores às de peças fabricadas por outros processos e o comportamento anisotrópico de partes impressas em 3D ainda limita o potencial para impressão em larga escala [1].

Considerando ainda a enorme gama de materiais que podem ser processados e as possíveis aplicações, não é de se admirar o crescimento promissor da Manufatura Aditiva. Por isso, essa é digna de ser equiparada aos processos clássicos e tornar-se uma disciplina por si só, uma que pode ter implicações radicais na maneira com a qual o mercado estrutura projetos, planeja a produção e comercializa produtos [2].

Dessa maneira, para que se compreenda de forma adequada aquilo que será abordado nesse projeto, se faz necessário explicar em tópicos distintos os conhecimentos que caracterizam a Manufatura Aditiva. Além disso, esse processo produtivo será aprofundado e estudado, o que permite uma exposição aos seus conceitos fundamentais.

1.1. Motivação

Esse trabalho é motivado pela consolidação da Manufatura Aditiva diante de conceitos mais reconhecidos no campo da ciência dos materiais e pela necessidade de melhoria contínua na tecnologia de Processos de Fabricação, a fim de torná-los mais competitivos, confiáveis e abrangentes. Com o aumento na acessibilidade e no uso da impressão 3D, principalmente em aplicações domésticas, é evidente que as possibilidades tendem a se expandir. Esse crescimento suscita a realização de estudos que providenciem uma melhora na precisão e qualidade das peças, buscando garantir a melhor performance possível durante o serviço.

Nesse mesmo contexto, o desenvolvimento da manufatura aditiva causou uma revolução no campo científico. Com o progresso da tecnologia e dos materiais disponíveis, essa tecnologia passou da produção de protótipos para a manufatura de produtos finais. O processo em si, entretanto, ainda requer aperfeiçoamento e maior domínio para que possa competir com métodos tradicionais de fabricação em massa, o que por sua vez vai favorecer a realização de outros estudos. Com isso, outra força motivadora desse trabalho esteve envolvida com a otimização mecânica desse processo de fabricação.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência do material e dos próprios parâmetros do processo (nesse caso, parâmetros de impressão 3D) nas propriedades mecânicas de peças termoplásticas produzidas por manufatura aditiva.

Os objetivos específicos deste trabalho são otimizar os parâmetros de impressão para maximizar as propriedades de cada material, determinar as propriedades mecânicas em tensão e flexão para os materiais escolhidos e comparar os resultados dos testes com a literatura e com dados comerciais.

1.3. Metodologia

A organização deste Trabalho de Conclusão de Curso se caracteriza como um artigo científico. Portanto, as etapas desta pesquisa devem compreender uma revisão bibliográfica para aprofundar e organizar o embasamento teórico disponível sobre o assunto, seguida de um procedimento experimental, no qual são especificados os meios de trabalho e acompanha-se um método de coleta de dados através de experimentos, terminando com uma análise dos resultados obtidos a partir das informações levantadas nas etapas anteriores, visando discutir se o previsto na literatura condiz com os resultados.

Tendo estabelecido a correlação entre as etapas no âmbito da pesquisa, a seguinte hipótese foi levantada: como o material afeta as propriedades mecânicas de componentes poliméricos produzidos por manufatura aditiva?

Seguindo com a premissa de estudar a fundo esse tema, a revisão bibliográfica começa por estabelecer os alicerces daquilo que se sabe sobre a manufatura aditiva e o método de impressão específico que esse trabalho busca abordar, sendo este o FDM. Depois, é necessário averiguar as características da matéria-prima do processo – nesse caso,

termoplásticos com alta disponibilidade no mercado – pois assim fica estabelecido um modelo geral para os resultados esperados. A seguir, as aplicações para o estudo e as formas de ensaio mecânico são abordadas. Por fim, uma revisão dos estudos mais recentes na área será feita para buscar por conhecimentos abrangentes sobre os parâmetros do processo, garantindo que o conjunto dos “melhores parâmetros” do ponto de vista mecânico seja selecionado e os frutos deste estudo sejam atualizados com o que é atualmente aceito na área acadêmica.

Concluída a primeira etapa, ficará evidente que outros estudiosos do assunto concluíram quais fatores afetam as propriedades mecânicas da peça. Seguindo o procedimento adotado por muitos desses pesquisadores, testes destrutivos de tração e flexão seguindo as normas ASTM serão aplicados em ambiente laboratorial com corpos de prova padronizados e produzidos in situ. Dessa forma, poderá ser comprovado, usando os resultados de outros estudos na e os próprios dados do fornecedor, se a otimização desejada foi alcançada.

Com os resultados obtidos, foi feita uma comparação para verificar se houve ganho de propriedades quanto ao esperado do material de acordo com outras fontes ou como o trabalho se situa diante de outros na literatura. Essa parte é acompanhada da discussão sobre o comportamento mecânico do material e formulação de teorias que associem os valores registrados pela máquina durante o ensaio e aquilo que é visível e palpável nas peças danificadas.

Na conclusão se reúne brevemente tudo aquilo que já foi feito a fim de elaborar uma resposta para o problema inicial gerado pela motivação desse trabalho, de forma a satisfazer seus objetivos principal e específicos.

1.4. Organização do Projeto

Visando uma organização do conteúdo, o mesmo foi disposto da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Uma compilação da pesquisa na literatura disponível que abrange os tópicos de manufatura aditiva, incluindo estudos científicos, aplicações e normas;
- Capítulo 3: Apresentação dos parâmetros utilizados na produção das amostras, as geometrias dos corpos de prova e o procedimento de fabricação para análise experimental;
- Capítulo 4: Resultados experimentais por meio de gráficos e tabelas acompanhadas de documentação fotográfica das fraturas. A análise dos resultados se dará por meio da discussão e averiguação desses;

- Capítulo 5: Conclusão sobre os desdobramentos dessa pesquisa, observação do histórico desse trabalho e do conteúdo reservado para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA) passou a ter uso mais expressivo a partir dos anos 80, quando houve muitas pesquisas e discussão de métodos que eventualmente se concretizaram em patentes, permitindo às impressoras 3D atingirem o patamar que hoje têm. Dessa forma, a manufatura aditiva teve grande crescimento e é tida como uma tecnologia com potencial para revolucionar a indústria [1,2].

É inerente a esse processo o uso de Desenho Assistido por Computador, do inglês *Computer Aided Design* (CAD), como base para a produção de uma ampla variedade de estruturas complexas a partir de dados de um modelo tridimensional. O termo “aditivo” se refere à produção de sucessivas camadas de material que serão são ligadas umas sobre as outras para formar o produto final. Em geral, as peças resultantes não necessitam da intervenção de ferramentas, mas podem passar por pós-processamento [1].

Comparada com a manufatura tradicional, a impressão 3D permite mais liberdade para a fabricação de geometrias complexas e peças personalizadas. Pode processar materiais resistentes como metais, silicões e polímeros, e uma das vantagens mais evidentes é a liberdade geométrica e flexibilidade, possibilitando a produção de peças únicas e complexas já que não há necessidade de molde ou modelo prévio. Em contrapartida, muitos problemas precisam ser resolvidos, como acabamento superficial, precisão e repetibilidade [2].

Até os anos 60 destacaram-se conceitos para construção de ferramentas a partir de camadas cordadas ou laminadas. Desde então, foram feitas variadas propostas de impressoras 3D que utilizavam a solidificação de líquidos fotocuráveis até que a Estereolitografia – SLA (*Stereolithography*) fosse patenteada. Essa foi a técnica utilizada pela primeira impressora 3D, criada por Chuck Hull em 1984 e que implicou na fundação da 3D System, uma das líderes no segmento [4].

Destacam-se também as patentes de Crump em 1989, que originou a Stratasys, e uma das mais difundidas tecnologias de manufatura aditiva: a Modelagem por Fusão e Deposição do inglês *Fused Deposition Modelling* (FDM). Ainda, outras tecnologias como a Sinterização Seletiva por Laser, do inglês *Selective Laser Sintering* (SLS), e a Modelagem de Objetos Laminados, do inglês *Laminated Object Manufacturing*(LOM), tiveram seu início nos anos 80 e 90 [4].

2.1.1. Fases de um Processo de MA

O processo começa com o desenho assistido por computador tridimensional (CAD) do modelo de uma peça a ser fabricada, que é criado em um software de modelagem 3D como o SolidWorks. Feita a modelagem, o arquivo CAD é convertido para o formato STL e transferido para softwares conhecidos como *slicers*. No *slicer* ocorre o fatiamento, no qual a peça é eletronicamente segmentada em camadas horizontais de fina espessura, similares a lâminas bidimensionais, para então serem impressas camada por camada. Além disso, no *slicer* são definidos os parâmetros de impressão e as características que a peça deve ter [5]. Ainda no *slicer*, o arquivo é convertido para o formato GCODE, a linguagem de programação padronizada com a qual o *software* das impressoras 3D trabalham e que também é utilizada por máquinas de ferramenta que possuem CNC [6].

Finalmente, os dados são enviados para a máquina de Manufatura Aditiva onde cada uma das seções transversais são construídas encima das anteriores para criar a peça representada no modelo 3D feito por CAD [5]. Entretanto, ao invés de imprimir uma peça inteira, a impressão 3D também pode ser utilizada para produzir apenas as partes mais complexas, que podem ser combinadas com outras partes não impressas de outros materiais para criar o produto final [5]. As fases do processo de *design* da peça são mostradas na Figura 1.

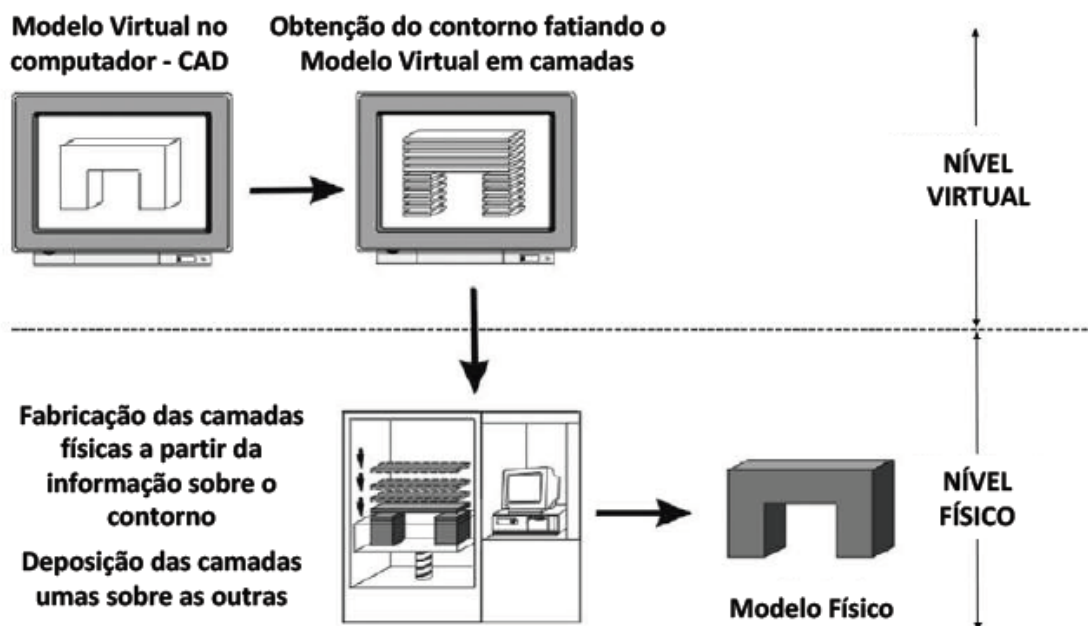


Figura 1 - Etapas do processo de manufatura aditiva [8].

Um processo de MA tem três principais fases, a fase do design, a manufatura e a fase de testes, na Figura 2 os principais processos que envolvem as fases da fabricação são organizados [9].

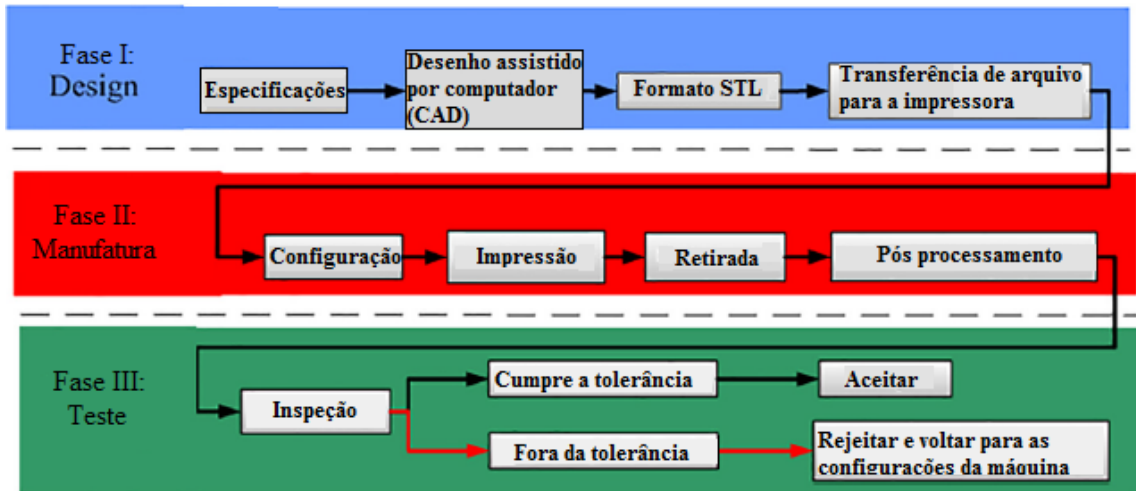


Figura 2 - Fases do processo de manufatura aditiva [9].

2.1.2. Métodos de Impressão

Existem diversos métodos de manufatura aditiva, e o fabricante pode utilizar o mais adequado para suprir sua demanda. Os métodos foram desenvolvidos para atenderem essas demandas, como prototipagem rápida, reduzir defeitos de impressão, aumentar propriedades mecânicas e diversos outros fatores que impulsionam o desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva [1]. Além disso, cada método possui seu próprio preparo do material, técnica para produção de camadas, fenômenos de mudança de fase, tipo de material e os requerimentos da aplicação da peça impressa [9].

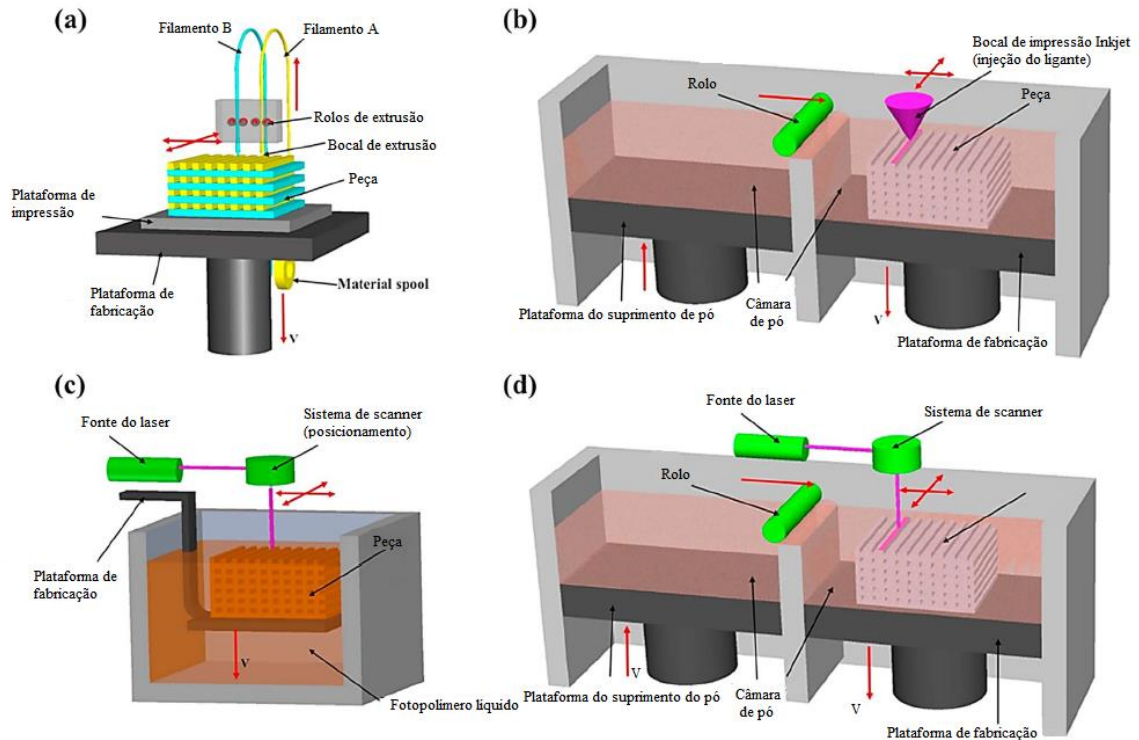


Figura 3 - Diagramas dos quatro principais métodos de manufatura aditiva: (a) Modelagem por Fusão e Deposição (FDM); (b) Inkjet Printing; (c) Estereolitografia (SLA); (d) Powder Bed Fusion [1].

A Figura 3 ilustra brevemente os 4 principais métodos de manufatura aditiva.

Há diversos tipos de tecnologias de manufatura aditiva, uma das formas de classificá-las é pelo estado do material base utilizado pela impressão [4]:

- Tecnologias que utilizam material sólido. Como por exemplo a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Manufatura com laminados (LOM), entre outras;
- Tecnologias que utilizam material líquido. Como a Estereolitografia (SLA).
- Tecnologias que utilizam material em pó. Como a Fusão em cama de pó (*Powder Bed Fusion*), e as tecnologias a laser para sinterização (SLS) e para derretimento (SLM).

Algumas técnicas fazem uso de material em pó em suspensão em um líquido, como em *Inkjet Printing*, ou de material pastoso como em *Contour Crafting*. Porém, se faz necessário explicar da forma abrangente como as técnicas mais utilizadas se utilizam dessas tecnologias. Assim sendo, lista-se:

- Modelagem por Fusão e Deposição ou *Fused Deposition Modelling (FDM)*

É uma tecnologia a base de fusão e deposição. Também chamada de Fused Filament Fabrication (FFF) é uma técnica de manufatura aditiva adequada para produzir peças de geometria complexa com tempo e custos menores se comparada a processos tradicionais de fabricação. Nesse método, é utilizado um filamento contínuo de polímero termoplástico. O filamento é aquecido no bocal até atingir um estado semilíquido e em seguida é extrudado em um padrão específico sobre a base da plataforma ou sobre uma camada anteriormente impressa do material. Enquanto é depositado, o filamento esfria até a temperatura da câmara, endurece e se funde com o material adjacente. A termoplasticidade do filamento polimérico é essencial para esse método, pois permite que os filamentos se fundam durante a impressão para depois solidificarem em temperatura ambiente após a impressão. Após a impressão de uma camada, a base move-se para baixo ou a extrusora se move para cima antes da impressão da próxima camada ter início. O processo é totalmente automatizado, e é cada vez mais usado para produção de produtos customizados em diferentes áreas [1].

Alguns dos principais benefícios do FDM em relação aos outros métodos é o baixo custo, velocidade de impressão e a relativa simplicidade do processo. Em contrapartida, as principais desvantagens são baixas propriedades mecânicas, acabamento de superfície ruim [12] e baixa variedade de materiais termoplásticos [13]. Orientação (*fibre orientation*), adesão entre fibra e matriz e formação de vazios são os principais desafios para a impressão 3D de compósitos [12].

- *Powder Bed Fusion*

Camadas de pó muito fino são espalhadas cuidadosamente sobre uma plataforma. Em cada camada o pó é fundido por um feixe de laser ou um ligante/aglutinante (em inglês *binder*). As camadas subsequentes de pó são depositadas (empurradas por um rolo) por cima de camada anteriores e são fundidas criando a nova camada de material sólido até que a peça final esteja concluída. O excesso de pó é removido por um aspirador quando necessário, os processos adicionais e detalhamento seguintes como revestimento (*coating*), sinterização e infiltração. O tamanho dos grãos do pó utilizado e o empacotamento (a proximidade entre cada grão/packing), que determina a densidade da peça impressa, são os fatores mais cruciais para a eficácia deste método [1].

- *Selective laser sintering (SLS)*

Só pode ser utilizada para alguns polímeros, metais e pó de ligas enquanto *Selective laser melting (SLM)* só pode ser utilizada para certos metais como aço e alumínio. Quando for usado um ligante líquido o método é chamado de Impressão tridimensional (*three-dimensional printing 3DP*) [1].

- *Inkjet Printing and contour crafting*

Inkjet Printing é um dos principais métodos de manufatura aditiva para cerâmicos [1]. Neste método, partículas de um material cerâmico estável em suspensão em um líquido, como por exemplo, pó de óxido de zircônio em água, são depositados no substrato através de um bocal em forma de gotículas. As gotículas formam um padrão contínuo que solidifica com resistência suficiente para sustentar as camadas seguintes de material impresso [1].

Contour crafting é uma tecnologia similar, que é usada para a manufatura aditiva de grandes estruturas de construção civil. Este método é capaz de extrudar pasta de concreto e solo através de bocais maiores que funcionam a altas pressões [1]. Este método é considerado em caso de possível construção de estruturas na lua [15].

- Estereolitografia (*Stereolithography*)

É um dos primeiros métodos de manufatura aditiva, datado de 1986. Utiliza luz ultravioleta ou um feixe de elétrons para iniciar uma reação na camada de resina ou solução com monômero. Os monômeros (principalmente os baseados em acrílico ou epóxi) são fotoativos e se convertem em cadeias poliméricas após a ativação (radicalização). Com a polimerização, é solidificado um padrão na camada de resina ou solução com monômero que forma a primeira camada, e sobre ela, as camadas seguintes são formadas. Com a peça pronta, a resina que não reagiu é removida. As peças impressas podem passar por tratamento de aquecimento ou foto-cura para que atinjam a performance mecânica desejada. Partículas cerâmicas dispersas em monômeros podem ser usadas imprimir compósitos de cerâmica com polímero. Estereolitografia é capaz de imprimir peças de alta qualidade, com resolução que chega a 10 μm . Por outro lado, é um método lento, caro e trabalha com poucas opções de materiais. A cinética da reação e o processo de cura são complexos. A energia da fonte de luz

e exposição são os principais fatores que controlam a espessura de cada camada. Estereolitografia pode ser usada para a manufatura aditiva de nanocompósitos complexos [1].

- *Direct Energy Deposition (DED)*

Usada para manufatura de super ligas de alta performance. Este método utiliza uma fonte de energia, laser ou feixe de elétrons, que é diretamente focada em uma pequena região do substrato e é usada para fundir o material de deposição (pó ou fio) simultaneamente. O material fundido é depositado sobre o substrato fundido e ambos são solidificados após o laser mover-se. Neste método o material depositado é fundido antes da deposição de forma similar ao método FDM porém com muito mais energia para fundir metais. Por isso é utilizado para fazer reparos em peças com trincas e no *retrofitting* de peças. Esse método permite uso de vários materiais e deposição em vários eixos ao mesmo tempo. Esta técnica é usada com frequência em titânio, Inconel, aço inoxidável, alumínio e as ligas relacionadas à aplicações aeroespaciais. Em geral, DED é rápido e possui grandes câmaras de impressão (até 6 m x 1,4 m x 1,4 m para impressoras comerciais). Entretanto, possui baixa precisão (0,25 mm), baixa qualidade superficial e produz peças menos complexas se comparado com métodos SLS e SLM, ambos métodos do tipo *Power bed fusion*. Com isso, DED é utilizado para peças grandes e de baixa complexidade e para o reparo de grandes componentes. *Direct Energy Deposition* reduz o tempo e custo de produção, produz peça com propriedades mecânicas excelentes, permite controle da microestrutura e da composição [1].

- *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

Laminated object manufacturing (LOM) é um dos primeiros métodos de manufatura aditiva disponíveis comercialmente, que é baseado em corte e laminação de chapas e rolos de material camada por camada. As camadas são cortadas com um cortador mecânico ou laser e depois são unidas por adição de calor. O material em excesso é usado como suporte e no fim do processo são removidos e reciclados. LOM utiliza polímeros, compósitos, cerâmicas, papel e fitas preenchidas com metal. Tratamentos após fabricação da peça como tratamento em altas temperaturas podem ser necessários dependendo do tipo de material utilizado e das propriedades mecânicas desejadas. Este método foi utilizado em diversas indústrias como manufatura de papel, indústrias de fundição, eletrônicos e estruturas que utilizam materiais inteligentes. LOM pode reduzir custos com ferramentas e tempo de fabricação, é um dos

melhores métodos de manufatura aditiva para grandes estruturas. Porém, LOM resulta em qualidade superficial inferior (sem pós processamento) e sua precisão dimensional é menor do que a dos métodos que utilizam pó (como *powder bed fusion*). Remoção de material em excesso dos laminados depois da conclusão da peça consome muito tempo se comparado com outros métodos. Por isso, não é recomendado para peças com formas complexas [1].

A Tabela 1 organiza as informações dispostas anteriormente numa configuração mais acessível, em categorias objetivas quanto às características inerentes a cada técnica.

Tabela 1 - Um sumário de materiais, aplicações, vantagens e desvantagens dos principais métodos de manufatura aditiva [1].

Métodos	Materiais	Aplicações	Vantagens	Desvantagens	Resolução
Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Filamentos contínuos de polímeros termoplásticos Polímeros contínuos reforçados com fibras	Prototipagem rápida Brinquedos Peças de compósitos avançados	Baixo custo Grande velocidade Simplicidade	Baixas propriedades mecânicas Limitação de materiais (apenas termoplásticos) Acabamento entre camadas	50-200 μm
<i>Powder bed fusion (SLS, SLM, 3DP)</i>	Pós compactados Metais, ligas e alguns polímeros (nos métodos SLS ou SLM) Cerâmica e polímeros (no método 3DP)	Biomedicina Eletrônicos Aeroespacial Estruturas leves	Alta resolução Alta qualidade	Impressão lenta Alto custo Alta porosidade quando usa aglutinante (3DP)	80-250 μm
<i>Inkjet printing e contour crafting</i>	Concentração de partículas dispersas em um líquido ou pasta Cerâmica, concreto e solo	Biomedicina Grandes estruturas Construções	Possibilidade de imprimir grandes estruturas Rápida impressão	Mantém trabalhabilidade Resolução grosseira Falta de adesão entre camadas Acabamento camada por camada	<i>Inkjet</i> : 5-200 μm <i>Contour crafting</i> : 25-40 mm
Estereolitografia	Resina com monômeros fotoativos Híbridos de polímeros com cerâmica	Biomedicina Prototipagem	Alta resolução Alta qualidade	Escassez de materiais Impressão lenta Alto custo	10 μm

Continuação da tabela 1					
<i>Direct Energy Deposition</i>	Metais e ligas em pó ou fio Cerâmicas e polímeros	Aeroespacial <i>Retrofitting</i> Reparo Revestimento Biomedicina	Redução do tempo e custo de manufatura Excelentes propriedades mecânicas Controle da microestrutura e composição Excelente para reparos e <i>retrofitting</i>	Baixa precisão Baixa qualidade de superfície Precisa de estrutura de suporte robusta Limitação para imprimir formas complexas com detalhes	250 µm
<i>Laminated Object Manufacturing</i>	Compósitos poliméricos Cerâmica Papel Fitas de metal Rolos de metal	Manufatura de papel Indústrias de fundição Eletrônicos Estruturas inteligentes	Redução do gasto com ferramentas e no tempo de manufatura Grande gama de materiais Baixo custo Excelente para manufatura de grandes estruturas	Qualidade superficial e precisão dimensional inferiores Limitação na manufatura de peças com formas complexas	Depende da espessura dos laminados

2.1.3. Parâmetros de Impressão

Dada a natureza do estudo científico, há a necessidade em se satisfazer com a escolha de um método de impressão para padronizar o experimento. Considerado o mais difundido e acessível, a Modelagem por Fusão e Deposição, ou *Fused Deposition Modelling* (FDM), deverá ser utilizada na manufatura dos substratos, sobretudo por sua capacidade utilizar-se de materiais termoplásticos baratos e abundantes para a impressão, dentre eles o ABS e o PLA [12].

FDM foi desenvolvido na década de 80 e comercializado nos anos 90 como tecnologia de prototipagem, e é uma técnica de manufatura aditiva apropriada para produzir partes com formas internas intrínsecas. Retomando o que já foi explicado, uma impressora FDM é uma máquina em pórtico com uma ou mais tubeiras extrusoras. As partes são manufaturadas através de “fusão” e extrusão do filamento polimérico através da tubeira (ou bico de extrusão) aquecida num padrão pré-definido na plataforma de impressão. Enquanto o filamento termoplástico é depositado, ele resfria até a temperatura ambiente e endurece, aderindo ao material vizinho num processo similar a soldagem. Após a deposição de uma camada do padrão, a plataforma se move para baixo ou a cabeça de impressão se move para cima antes da próxima camada começar [11].

As camadas formam o contorno de *raster*, também conhecidas como cascas ou *shells*. Cascas são preenchidas com mais *raster*. Tipicamente, o *slicer* prepara o caminho do bico começando pela fusão dos contornos que esboçam as camadas, delineando os limites externos. Depois de imprimir os esboços, a extrusora preenche a área dentro dos contornos. Na maioria dos softwares disponíveis o usuário também pode definir o vão entre os *raster*, o que é chamado de sobreposição quando a lacuna de ar (*air gap*) é negativa [11].

Como o processo é completamente automatizado, ele é capaz de produzir objetos com propriedades graduadas, como porosidade, densidade e propriedades estruturais [11].

Uma vez sabendo que alguns parâmetros de fabrico são próprios à FDM, vale observar que na bibliografia em português constatou-se que alguns dos parâmetros de impressão estavam traduzidos, como a espessura de camada, mas em outros casos não, como o *raster angle*, que ocasionalmente é referido com “ângulo de *raster*”. Devido à frequência com que a bibliografia e os fabricantes se referem aos parâmetros em inglês, optou-se por utilizar todos os nomes dos parâmetros de impressão da fonte, em inglês, cada um com sua devida definição na língua portuguesa.

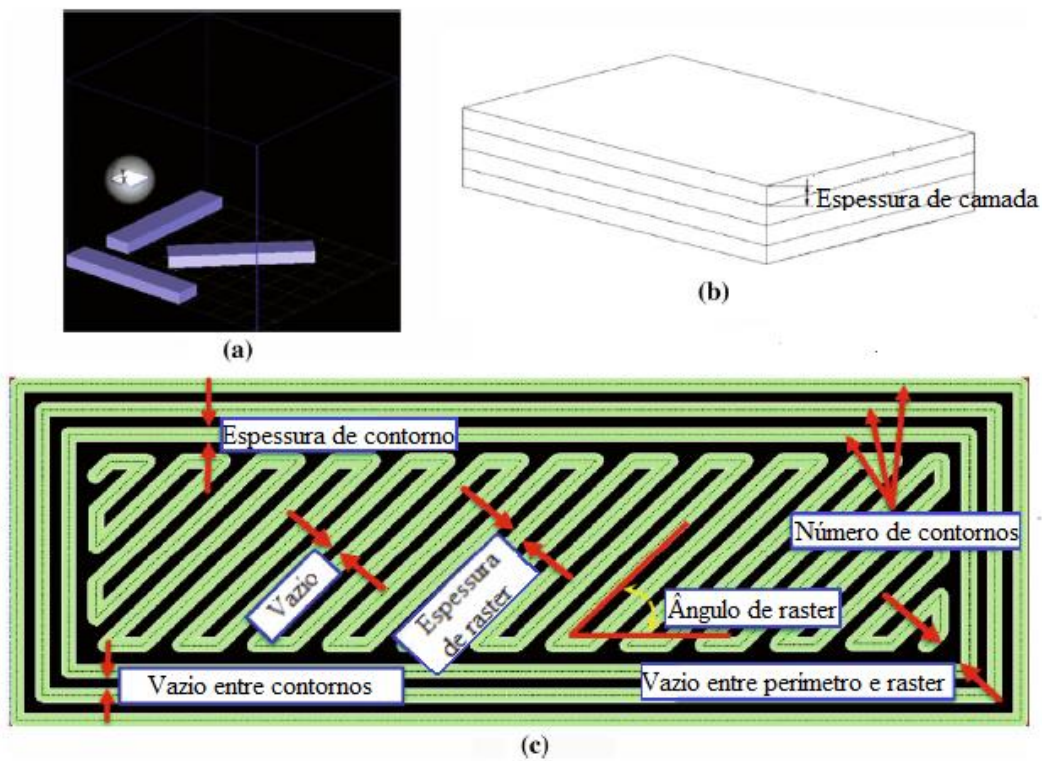


Figura 4 - Esquema indicando os parâmetros de impressão (a) Orientação de construção, (b) Espessura de camada e (c) Parâmetros FDM do caminho percorrido pelo bico extrusor de material durante impressão [10].

A Figura 4 esquematiza os parâmetros de impressão presentes na modelagem por fusão e deposição com base na vista isométrica (para a espessura de camada e altura) e superior interna (para as estruturas internas da camada, largura e comprimento) de uma peça inacabada. Levando em consideração essas configurações, de acordo com Goh et al. [11] suas definições são:

- a) *Layer thickness*, medida em milímetros, é a espessura de cada camada da peça impressa;
- b) *Raster angle*, medido em graus, também chamado de ângulo de *raster*, ou ângulo de varredura, é o ângulo em que o bocal deposita o termoplástico linha por linha para cada camada, varia de 0° a 180° , os ângulos mais frequentemente usados são -45° , $+45^\circ$, 0° e 90° ;
- c) *Contour/shell perimeters*, são as camadas usadas no exterior da peça, principais responsáveis pela qualidade da superfície da peça, usada também para furos internos da peça, o número de contornos e sua largura pode ser usado para variar a largura da parede externa;

- d) *Contour/shell width*, medida em milímetros, a largura de cada uma das camadas exteriores;
- e) *Raster width*, medido em milímetros, é a largura de *raster*, ou largura de varredura, ou seja, o diâmetro do filamento fundido extrudado pelo bico de extrusão;
- f) *Air gap*, medido em milímetros, é a distância entre caminhos de filamentos adjacentes, um vazio, *air gap* negativo corresponde a uma sobreposição entre dois filamentos adjacentes;
- g) *Deposition speed*, medido em milímetros por minuto. Há a velocidade do bico, que corresponde à velocidade com que o bocal se move sobre a plataforma de impressão. E há a velocidade de deposição, quanto filamento é extrudado por minuto. Está diretamente relacionado à velocidade de impressão;
- h) *Fill density* ou *infill*, medido em porcentagem, é a densidade de preenchimento, ou seja, a quantidade de material que preenche uma peça. Quanto maior a porcentagem menos vazios há dentro da peça. Em geral, quanto maior a porcentagem de *fill density*, melhores as propriedades mecânicas da peça, porém, o tempo de impressão será maior e mais material será gasto. O preenchimento interno da peça também pode ter diferentes padrões, cada um com suas próprias características mecânicas;
- i) *Platform/bed temperature*, medida em graus Celsius, é a temperatura da plataforma de impressão onde o material é depositado, esse parâmetro determina a taxa de resfriamento do filamento extrudado, principalmente na primeira camada por estar em contato direto com a plataforma. É um parâmetro importante para garantir uma boa adesão da primeira camada com a plataforma e prevenir efeitos de distorção durante o resfriamento do filamento;
- j) *Nozzle temperature*, medida em graus Celsius, temperatura na qual o material é extrudado. A temperatura normalmente é poucos graus Celsius acima do ponto de fusão do material do filamento extrudado;
- k) *Chamber temperature*, medida em graus Celsius, algumas impressoras FDM têm controle da temperatura do ambiente para obter resultados mais consistentes na impressão das peças. É a temperatura da câmara onde ocorre a impressão;
- l) *Build orientation*, denota a direção da peça na plataforma de impressão e a direção de construção, tendo como referência eixos x, y, e z.

Esses parâmetros de processo têm um efeito substancial na qualidade e na performance mecânica das partes impressas por FDM, sendo decisivos para sua funcionalidade. O conhecimento atual ainda é escasso nesse campo, sobretudo quanto à partes processadas por impressoras de baixo custo. Como resultado, nos últimos anos houve um aumento de pesquisas realçando a otimização das propriedades mecânicas obtidas em peças impressas por esse método, bem como o desenvolvimento de novos materiais para serem usados na impressão por FDM. Alguns dos parâmetros de impressão estudados foram: temperatura de extrusão [17], ângulo de varredura ou *raster (raster angle)* [17,22], espessura de camada (*layer thickness*) [18,21,22][18], *air gap* [17,18,21,22], espessura de varredura ou *raster (raster width)* [17,18,21,22][17], espessura do contorno (*contour width*) [21] e orientação [18].

Na Tabela 2 são indicados vários métodos estatísticos de otimização para estudar os parâmetros de processo de impressão FDM e seus efeitos na qualidade de cada característica das peças estudadas.

Tabela 2 - Sumário dos trabalhos publicados sobre otimização de processos FDM [13].

Referências	Métodos	Material	Inputs	Outputs	Inputs relevantes
Anitha et al. [24]	Método Taguchi, (S/N) & Procedimento ANOVA	ABS	Espessura de camada, espessura do raster, velocidade de deposição	Rugosidade	<i>Layer thickness</i>
Thrimurthulu et al. [25]	GA	ABS	Espessura de camada, orientação da peça	Acabamento superficial e tempo de impressão	Todos os parâmetros no input
Nancharaiah et al. [26]	Método Taguchi, procedimento ANOVA	ABS	Espessura de camada, espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i> , <i>air gap</i>	Acabamento superficial e precisão dimensional	Todos os parâmetros no input
Horvath et al. [27]	2 ³ e 3 ² design fatoriais	ABS	Temperatura da peça, espessura de camada, padrão de preenchimento	Rugosidade	<i>Layer thickness</i>
Wang et al. [28]	Método Taguchi, procedimento ANOVA com análise relacional Gray	ABS	Espessura de camada, padrão de deposição, padrão dos suportes, orientação	Resistência à tração, precisão dimensional e rugosidade	Espessura de camada, orientação

Sood et al. [29]	Método Gray-Taguchi, ANN	ABS	Orientação da peça, espessura do <i>raster</i> , espessura de camada, <i>air gap</i> , ângulo de <i>raster</i>	Precisão dimensional	Orientação da peça
Zhang e Peng [30]	Método Taguchi	ABS	Compensação da espessura de <i>raster</i> , velocidade de deposição, velocidade de preenchimento, espessura de camada	Erro dimensional e deformação	Todos os parâmetros no input
Sahu et al. [31]	Método Taguchi, lógica fuzzy	ABS	Espessura de camada, orientação, ângulo de <i>raster</i> , espessura do <i>raster</i> , <i>air gap</i>	Precisão dimensional	Todos os parâmetros no input
Lee et al. [32]	Método Taguchi, procedimento ANOVA	ABS	<i>Air gap</i> , ângulo de <i>raster</i> , espessura do <i>raster</i> , espessura de camada	Desempenho elástico	<i>Air gap</i> , ângulo de <i>raster</i> e espessura de camada
Laeng et al. [33]	Método Taguchi, procedimento ANOVA	ABS	<i>Air gap</i> , ângulo <i>raster</i> , espessura do <i>raster</i> , espessura de camada	Desempenho elastic	<i>Air gap</i> , ângulo de <i>raster</i> e espessura de camada
Zhang e Chou [34]	Análise de elementos finitos, CCD e ANOVA	ABS	Velocidade de deposição, espessura de camada, espessura do <i>raster</i>	Tensões residuais e distorções na peça	Velocidade de deposição, espessura de camada
Nancharaiah [35]	Método Taguchi, procedimento ANOVA	ABS	Espessura de camada, <i>air gap</i> , <i>raster angle</i>	Tempo de produção	Espessura de camada, <i>air gap</i>
Kumar e Regalla [36]	2 ⁵ design factorial, procedimento ANOVA	ABS	Espessura de camada, ângulo <i>raster</i> , orientação, espessura do contorno externo, espessura do <i>raster</i>	Volume de material de suporte e tempo de impressão	Todos os parâmetros no input
Ahn et al. [37]	2 ⁵ design fatorial	ABS	<i>Air gap</i> , orientação de <i>raster</i> , espessura do <i>raster</i> , temperatura da peça, cor	Resistência à tensão e compressão	<i>Air gap</i> , orientação de <i>raster</i>
Ang et al. [38]	2 ⁵ design fatorial	ABS	<i>Air gap</i> , espessura do <i>raster</i> , orientação da peça, padrão de impressão	Porosidade, Tensão compressiva de escoamento, Módulo de compressão	Todos os parâmetros no input
Sood et al. [39]	CCD, procedimento	ABS	Espessura de camada, orientação, ângulo de	Resistência à tensão, flexão e	Todos os parâmetros no

	ANOVA		<i>raster</i> , espessura do <i>raster</i> , <i>air gap</i>	impacto	input
Percoco et al. [40]	CCD	ABS	Espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i> , tempo de imersão	Resistência à compressão	Espessura do <i>raster</i>
Rayegani e Onwubolu [41]	2 ⁴ design factorial, GMDH e DE	ABS	Orientação da peça, Espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i> , <i>air gap</i>	Resistência à tensão	Todos os parâmetros no input
Masood et al. [42]	Experimento em laboratório	PC	Forma de preenchimento, Espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i>	Resistência à tensão	Não aplicável
Arivazhagan et al. [43]	Experimento em laboratório	PC	Padrão de impressão, Espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i>	<i>Storage modulus</i> , <i>complex viscosity</i> , <i>loss modulus</i>	Não aplicável
Arivazhagan e Masood [44]	Experimento em laboratório	ABS	Padrão de impressão, Espessura do <i>raster</i> , ângulo de <i>raster</i>	<i>Storage modulus</i> , <i>complex viscosity</i> , <i>loss modulus</i> e <i>Tan d</i>	Não aplicável

2.1.4. Materiais Utilizados em MA

Na manufatura aditiva como um todo, diversos materiais podem ser empregados. Polímeros são utilizados nos métodos FDM, *Powder Bed Fusion* e *Direct Energy Deposition*. Metais, por outro lado, são frequentemente utilizados nos métodos de *Powder Bed Fusion* e *Direct Energy Deposition*. Cerâmicas se fazem necessárias nos métodos de *Inkjet Printing* e concreto no método de *Contour Crafting*. Compósitos, por fim, são aplicados no método *Laminated Object*, entre outros [1].

Para impressão FDM uma das famílias de materiais mais resistentes é a do *polyaryletherketone* (PAEK). São plásticos semi-cristalinos, conhecidos pela resistência, rigidez, capacidade como retardante de chama e resistência química, além disso, PAEK suporta temperaturas mais altas enquanto mantém resistência mecânicas. O filamento mais utilizado deste tipo é o PEEK (polieter-eter-ketona) [46].

A empresa *Ninjatek* produz filamentos flexíveis conhecidos como *NinjaFlex* e *SemiFlex*. São poliuretanos termoplásticos que podem ser usados para imprimir solas internas para calçados, botões para controles, pneus para carros de controle remoto, entre outros [46].

A empresa alemã Nanoscribe é conhecida por levar a fotopolimerização à escala nanométrica através do sistema Photonic Professional GT que usa um processo chamado de fotopolimerização de dois fótons, em que lasers de alta potência direcionam dois fótons de luz quase infravermelha (sigla em inglês, NIR) em pulsos ultracurtos em uma resina fotocurável, combinada com atuadores piezo-ativados e ótica focal, isso permite a impressão de objetos com detalhes menores que 200 nm [46].

A depender das propriedades de cada material polimérico, estes podem ser depositados na forma de resina, pó, filamento ou filme. Há diferentes formas de fundir o material, quando necessário, e isso pode ser feito por métodos ópticos, químicos, mecânicos ou térmicos. Cada método de impressão utiliza materiais e métodos de fusão apropriados para o tipo de indústria em que são empregados. A Figura 5 resume bem os métodos de fusão mais frequentemente utilizados para materiais poliméricos, e os métodos de impressão que os usam [47].

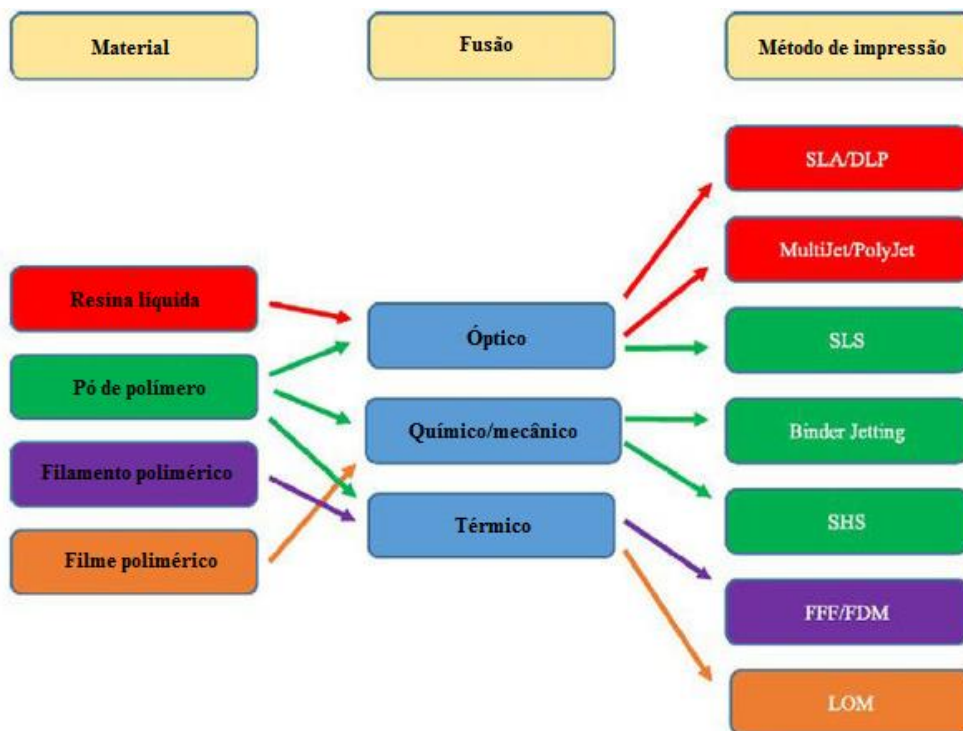


Figura 5 - Visão geral dos tipos de materiais poliméricos para diferentes métodos de manufatura aditiva [47].

Dentre os materiais citados, os polímeros e os métodos de MA que os utilizam são os mais fáceis de se trabalhar pela simplicidade do processo e o baixo custo. Essas informações reforçam a escolha deste trabalho pelo uso de polímeros no método FDM de impressão.

A manufatura aditiva foi escolhida pela facilidade com que ela pode ser utilizada para criar as mais complexas geometrias de interface para junta com pouca dificuldade e baixo

custo. FDM trabalha apenas com polímeros termoplásticos, o que limitou a escolha do material, mas é o processo mais simples, rápido e barato de manufatura aditiva.

2.2. Materiais Poliméricos

Os polímeros, também conhecidos popularmente como plásticos, se estabeleceram no mercado como um material versátil e barato, que está presente em inúmeros setores, sobretudo na composição de objetos de uso cotidiano. Esse tipo de material acaba também sendo o mais utilizado na composição de adesivos em razão da sua acessibilidade, no caso de disponibilidade e preço, para a manufatura aditiva. É, contudo, sensato que se façam algumas ponderações sobre as características e classificação dos polímeros, uma vez que seu comportamento não é estudado de forma tão extensiva quanto o de ligas metálicas [48].

Os polímeros são constituídos de macromoléculas orgânicas, sintéticas ou naturais. São baseados nos átomos de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, flúor e em outros elementos não metálicos. A ligação química entre átomos da cadeia é covalente, enquanto a ligação intercadeias é fraca, secundária, geralmente dipolar [48].

Os materiais poliméricos são geralmente leves, isolantes elétricos e térmicos, flexíveis e apresentam boa resistência à corrosão e baixa resistência ao calor [48].

Materiais naturais de origem animal ou vegetal, como madeira, borracha, fibras têxteis, couro e ossos, são todos polímeros. A baquelita, descoberta em 1905, foi a primeira da série dos plásticos sintéticos. A maioria dos polímeros foi descoberta no período entre 1930 e 1950, mas a indústria dos polímeros não chegou à sua maturidade antes dos anos 60. O desenvolvimento foi, a partir daí exponencial [48].

Os polímeros podem ser classificados em três grupos principais [48]:

- a) *Termoplásticos*: Podem ser repetidamente conformados mecanicamente desde que reaquecidos. Portanto, não só a conformação a quente de componentes é possível, mas também a reutilização de restos de produção, que podem ser reintroduzidos no processo de fabricação (reciclagem). Muitos termoplásticos são parcialmente cristalinos e alguns são totalmente amorfos. É o mais utilizado industrialmente. Exemplos típicos de termoplásticos são: polietileno, policloreto de vinila (PVC), polipropileno e poliestireno.

- b) Termorrígidos:** São conformáveis plasticamente apenas em um estágio intermediário de sua fabricação. O produto final é duro e não amolece mais com o aumento da temperatura. Uma conformação plástica posterior não é, portanto, possível. Não são atualmente recicláveis. Os termorrígidos são completamente amorfos, isto é, não apresentam estrutura cristalina. Exemplos típicos de termorrígidos são: baquelite, resinas epoxídicas, poliésteres e poliuretanos.
- c) Elastômeros (borrachas):** São também materiais conformáveis plasticamente, que se alongam elasticamente de maneira acentuada até a temperatura de decomposição e mantêm estas características em baixas temperaturas. Os elastômeros são estruturalmente similares aos termoplásticos, isto é, eles são parcialmente cristalinos. Exemplos típicos de elastômeros são: borracha natural, neopreno, borracha de estireno, borracha de butila e borracha de nitrila.

Compreender o comportamento mecânico de materiais poliméricos é imprescindível para o estudo, já que é o critério de avaliação para a qualidade de uma peça composta por tal material. Seria difícil examinar a influência dos parâmetros de impressão sem o mínimo conhecimento do resultado esperado. Nesse sentido, as curvas tensão-deformação podem ser associadas a cada grupo.

Essa classe de materiais apresenta um comportamento mecânico pouco uniforme. Por exemplo, um material termorrígido ou termoplástico vítreo apresenta comportamento muito frágil, comparável ao de um material cerâmico. Por outro lado, os materiais termoplásticos parcialmente cristalinos apresentam curvas de tensão-deformação no ensaio de tração que lembram as de metais dúcteis. Os elastômeros, por outro lado, apresentam comportamento atípico, que se manifesta na forma de uma extensa região elástica. Além disso, esta região não é totalmente linear, ao contrário da maioria dos sólidos [48].

Estes três tipos de comportamento são ilustrados na Figura 6. A curva A é típica de um termorrígido, a curva B é típica de um termoplástico parcialmente cristalino enquanto a curva C é típica de um elastômero. Além dos diferentes níveis de alongamento, é notável os diferentes níveis de resistência dos três materiais [48].

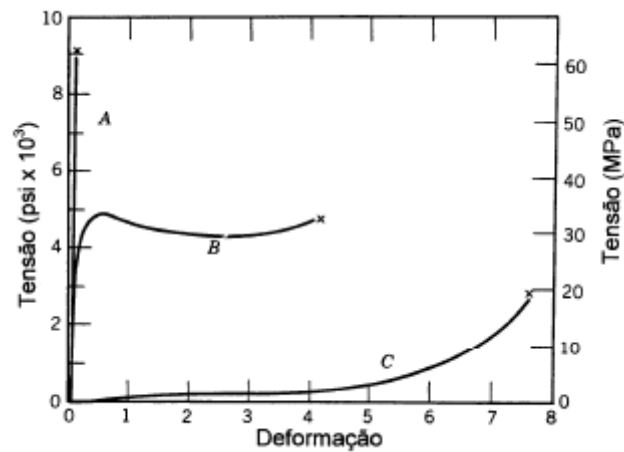


Figura 6 - Curvas tensão versus deformação obtidas no ensaio de tração de diferentes tipos de polímeros: comportamento frágil (A), comportamento dúctil (B) e comportamento elástico (C) [48].

Os polímeros dúcteis apresentam particularidades que devem ser esclarecidas. A Figura 7 apresenta uma curva tensão-deformação típica deste tipo de material. Observe que o ponto de máximo está associado com o início da deformação plástica, a qual propaga-se ao longo do corpo de prova à medida que o ensaio prossegue [48]. Dessa maneira, a tensão limite de escoamento pode ser associada a tensão máxima.

O início da deformação plástica na curva da Figura 7 está associado com a distribuição de tensões e com as condições de instabilidade ao longo do corpo de prova. No regime plástico, as cadeias ficam orientadas e o material torna-se mais resistente à deformação [48].

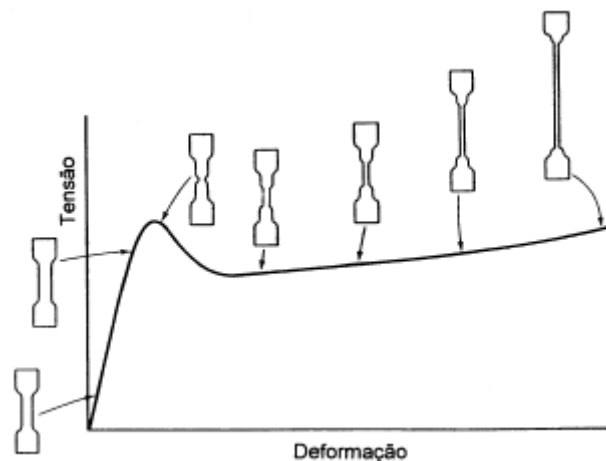


Figura 7 - Curva tensão-deformação para um polímero dúctil [48].

Como também é de interesse para o estudo saber a influência da temperatura nas propriedades mecânicas de materiais poliméricos, observações podem ser feitas para cada grupo, sobretudo no referente à temperatura de transição vítrea.

O efeito do aumento da temperatura na resistência mecânica e no alongamento de um polímero termorrígido é desprezível. A temperatura máxima de uso é limitada pela temperatura de decomposição [48].

O efeito da temperatura no comportamento mecânico de um elastômero é drástico. É sabido que a temperatura de transição vítrea (T_g) define a faixa de uso deste tipo de material, pois abaixo de T_g o elastômero é duro e frágil. As temperaturas T_g dos elastômeros estão bem abaixo da temperatura ambiente [48].

O efeito da temperatura no comportamento mecânico polímeros termoplásticos é diverso. No caso totalmente amorfo a temperatura máxima de uso é definida pela temperatura de transição vítrea. Os valores de T_g para esta classe de polímeros situam-se na faixa de 70 a 150°C. Quanto aos parcialmente cristalinos, a temperatura mínima de uso é definida pelo valor de T_g e a temperatura máxima de uso é definida pela temperatura em que as regiões cristalinas se tornam amorfas. As Figura 8 e Figura 9 abaixo indicam a resistência mecânica e alongamento em função da temperatura [48].

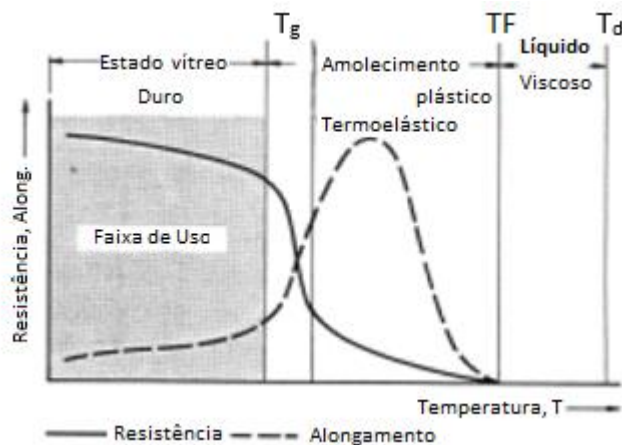


Figura 8 - Efeito da temperatura no comportamento mecânico de um termoplástico amorfo. A região sombreada representa a faixa de uso [48].

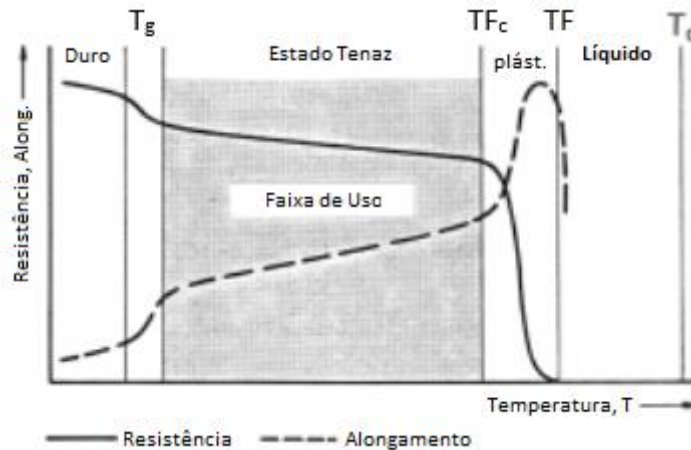


Figura 9 - Efeito da temperatura no comportamento mecânico de um termoplástico parcialmente cristalino. A região sombreada representa a faixa de uso [48].

As temperaturas T_g dos polímeros parcialmente cristalinos situam-se muito abaixo da temperatura ambiente e suas temperaturas de fusão estão situadas na faixa de 100 a 200°C [48].

É importante destacar que a velocidade de deformação tem grande influência no comportamento mecânico dos polímeros. O aumento da velocidade de deformação tem efeito similar ao efeito da diminuição da temperatura de deformação, isto é, aumentam a resistência mecânica e diminuem o alongamento [48].

2.2.1. PLA e ABS

Dentre os termoplásticos de uso mais popular temos o polipropileno, o polietileno, o ABS (“*Acrylonitrile Butadiene Styrene*”) e o PLA (“*Polylactic Acid*”), que têm em comum a fundamental característica de poderem ser fundidos e reutilizados. Essa qualidade leva tais materiais a terem uma alta demanda para impressão 3D, em que ABS e PLA são os mais comumente utilizados em aplicações domésticas no processo de FDM, nas quais ambos são aquecidos e extrudados pela tubeira em forma de camadas que devem compor uma peça maior. Esse processo só se torna possível em função do caráter reciclável dos materiais, mas há diferenças pontuais entre eles que os favorecem em determinados cenários.

PLA é um termoplástico biológico derivado de recursos renováveis como amido de milho ou cana de açúcar, e suas propriedades ecológicas o tornam uma alternativa promissora para polímeros baseados em petróleo [49]. Com propriedades comparáveis a outros polímeros muito utilizados, como PVC e PET, teve uma rápida ascensão no mercado por substituir o

ABS em muitas das suas aplicações. A temperatura recomendada de extrusão do PLA em aplicações de FDM vai de 200 a 220 °C [50].

Dentre as suas qualidades principais, cita-se:

- a) Termoplástico de alta resistência e módulo de elasticidade somados a uma boa aparência;
- b) Apresenta comportamento frágil e pouco flexível, o que limita seu uso;
- c) Requer menos energia em sua produção devido a sua baixa temperatura de trabalho aliada de um bom processamento térmico;
- d) Baixa temperatura de transição vítrea e instabilidade térmica.

Pode ser mantido em contato com alimentos, sendo usado na embalagem de produtos alimentícios (empacotamento de frutas e vegetais) e contêiner de líquidos (copos descartáveis). Sua extrema compatibilidade biológica também permite uso como membrana de fermentos, implantes e dispositivos médicos ou ainda em tratamentos dermatológicos. Tem visto uso crescente em aplicações estruturais [50].

ABS é um termoplástico de engenharia amplamente utilizado e conhecido pela versatilidade e alta resistência ao impacto, somados a uma alta reciclabilidade e baixa toxicidade. A temperatura recomendada de extrusão do ABS em aplicações de FDM vai de 210 a 240 °C [49].

Dentre as suas diversas qualidades, é possível contar:

- a) Mecanicamente, mostra ter alta rigidez aliadas boa resistências a abrasão e tração;
- b) Boa estabilidade dimensional ao longo do tempo e aparência agradável, principalmente após tratamento;
- c) Baixa temperatura de serviço contínuo;
- d) Instabilidade química, sendo altamente resistente a ácidos e bases, porém facilmente atacado por hidrocarbonetos solventes, sobretudo os aromáticos, como cetonas e ésteres.

É o plástico mais favorecidos pela indústria automotiva, sobretudo na substituição de peças metálicas (redução de peso), e alguns exemplos incluem a alça das portas, os encostos dos bancos, componentes dos cintos e o painel de controle. Eletrodomésticos também se beneficiam de suas propriedades, seja para confeccionar painéis de controle, invólucros

(aspiradores de pó e processadores de alimento) ou proteções, como as teclas de um teclado. Por último, é reconhecido por compor as peças do brinquedo LEGO [51].

Elaborada por Ken Giang [49] e baseada em dados do produto conforme informado por revendedores (como através da rede Optimatter) e fabricantes, a Tabela 3 ressalta as propriedades dos dois termoplásticos em questão.

Tabela 3 - Quadro contendo as propriedades de PLA e ABS [49].

Propriedades	ABS	PLA
Resistência a Tração	27 MPa	37 MPa
Alongamento Percentual	3.5 - 50%	6%
Módulo de Flexão	2.1 - 7.6 Gpa	4 Gpa
Densidade	1.0 – 1.4 g/cm ³	1.3 g/cm ³
Temperatura de Fusão	Amorfo	173 °C
Impacto Ambiental	Reciclável	Biodegradável
Transição Vítre	105 °C	60 °C
Preço do filamento	\$USD 21.99	\$USD 22.99

Vale ressaltar a informação de que os valores de resistência à tração foram realizados em corpos de prova com 100% de preenchimento ou *infill* (um valor padrão) altura da camada de 0.2 mm num padrão linear. O preço do filamento teve seus valores como ofertado pela Amazon.com [49].

Além disso, há fatores ambientais e desdobramentos das informações contidas na tabela que influenciam a escolha de material. Assim sendo, sabe-se que ambos PLA e ABS são recicláveis e biocompatíveis, porém apenas o primeiro é biodegradável. Quanto ao

acabamento superficial, tem-se que o PLA apresenta resultados mais satisfatórios sem nenhum pós-processamento ao passo que ABS é susceptível a ataque químico, notavelmente por acetona, uma desvantagem que acaba se tornando conveniente na obtenção de uma superfície mais polida e bem acabada [49].

Sabendo das propriedades mecânicas, deduz-se que a resistência mecânica do ABS é maior em função da sua alta ductilidade combinada a uma dureza não tão acentuada. Por outro lado, a precisão dimensional das peças é afetada pelo gradiente da temperatura provindo do aquecimento no bocal durante a fabricação, em que se busca atingir a temperatura de fusão dos materiais. No caso do PLA, para o qual esse fenômeno ocorre em temperaturas mais baixas, há um gradiente térmico menor dentro da própria peça e mesmo com o ambiente em si, o que gera menos distorções dimensionais.

2.2.2. Tritan

Filamentos do tipo Tritan são filamentos de copoliéster, ou seja, são filamentos de poliéster que sofreram modificações através da adição de moléculas buscando aprimorar as propriedades mecânicas do material. Quando a macromolécula do polímero é constituída de molécula (*mero*), ele é denominado *copolímero* [48].

Tritan tem uma estrutura cristalina amorfa com aparência e claridade agradáveis, demonstrando boa transparência até em objetos de paredes grossas [52]. As propriedades mecânicas do Tritan rivalizam diretamente com as dos policarbonatos. A Temperatura recomendada de extrusão do Tritan em aplicações FDM vai de 255 a 302 °C [53].

As vantagens para impressão 3D com o filamento Tritan são [52]:

- a) Excelente tenacidade, alta resistência mecânica e ao impacto;
- b) Excelente aderência e resistência entre as camadas depositadas;
- c) Boa resistência química, térmica e estabilidade hidrolítica;
- d) Tem baixa contração térmica e, portanto, baixa deformação;
- e) Incrível aderência à mesa e pode ser trabalhado em impressoras abertas ou impressoras fechadas.

Com uma gama de aplicações similar à do ABS, é aconselhável o uso de Tritan em utensílios como [53]:

- a) Carcaças e recipientes para eletrodomésticos, como processadores de alimento;

- b) Engrenagens e peças que precisam de alta resistência à tração;
- c) Embalagens que tenham contato com comida e garrafas d'água;
- d) Utensílios domésticos;

A Tabela 4 foi construída com informações da ficha de dados técnicos de um fabricante, e ressalta as propriedades mais relevantes do material em questão.

Tabela 4 – Quadro contendo as propriedades de Tritan [53].

Propriedades	Tritan
Resistência a Tração	52 MPa
Alongamento Percentual	272%
Módulo de Flexão	2.25 Gpa
Densidade	1.24 g/cm ³
Temperatura de Fusão	Amorfo
Impacto Ambiental	Reciclável
Transição Vítreia	119 °C
Preço do filamento	R\$ 124.99

2.3. Influência dos Parâmetros na Manufatura Aditiva

Atualmente, os processos de manufatura aditiva, incluindo FDM, são requisitados de entregar melhor qualidade de peças, alta taxa de produtividade, baixo custo de fabricação e baixo tempo de processamento. Para atender às necessidades do cliente e satisfazê-lo, as condições do processo devem ser estabelecidas para cada aplicação. A chave para o sucesso da MA depende da seleção apropriada das condições do processo. Essa parte desempenha um papel importante na asseguarção da qualidade dos produtos, aperfeiçoamento da precisão dimensional e prevenção de gastos desnecessários [13].

FDM é um processo complexo que demonstra grande dificuldade na determinação de parâmetros ótimos em razão da presença de muitos parâmetros conflituosos que irão influenciar a qualidade da peça e propriedades do material, tornando a combinação desses fatores difícil de compreender.

Portanto, foram estudados diversos trabalhos produzidos com o objetivo de entender como cada parâmetro de impressão influencia as propriedades mecânicas de peças impressas por manufatura aditiva. Por fim, o projeto reuniu essa revisão compreensiva buscando definir quais parâmetros do processo afetam quais propriedades mecânicas, além da sua otimização para o método de Modelagem por Fusão e Deposição.

Dentre os parâmetros estudados os mais importantes são a espessura da camada (*layer thickness*), a orientação de construção da peça (*build orientation*), o ângulo de *raster*, densidade do *infill* (preenchimento), temperatura de impressão, e velocidade de impressão são os parâmetros que mais afetam as propriedades mecânicas de peças impressas [7,13,39,61,66,71,72]. Deve-se considerar que o tempo de impressão aumenta consideravelmente conforme a espessura de camada diminui devido ao aumento do número de camadas [13].

A Tabela 5 dispõe de forma objetiva os resultados de alguns dos testes com melhores resultados encontrados na literatura que estudavam os parâmetros ótimos de impressão para obter a maior resistência à tração possível. Nesse sentido, uma gama de valores para cada variável foram considerados e comparados. Infelizmente, não houve registro do controle ambiental.

Tabela 5 - Parâmetros de impressão para atingir alta resistência em diferentes materiais [7,11,61].

Material	Variáveis de processo			Resistência à tração (Mpa)
	Variáveis	Valores das variáveis	Variável ótima	
PLA[60]	Orientação de impressão	<i>Flat, on-edge, upright</i>	<i>Flat</i>	89.1
	Espessura de camada	0.06 mm, 0.12 mm, 0.18 mm, 0.24 mm	0.06 mm	
	Taxa de alimentação	20 mm/s, 50 mm/s e 80 mm/s	50 mm/s	
	Ângulo de raster	(Não variou)	0°	
PLA[62]	Ângulo de raster	0°, 45° e 90°	45°	61.42
	Espessura de camada	(Não variou)	0.2 mm	
	Temperatura de extrusão	(Não variou)	220 °C	
	Taxa de alimentação	(Não variou)	60 mm/s	
ABS[63]	Espessura de camada	0.2 mm, 0.3 mm e 0.4 mm	0.2 mm	29.7
PLA[63]	Espessura de camada	0.2 mm, 0.3 mm e 0.4 mm	0.2 mm	50.4
ABS[64]	Orientação de impressão	XYZ, ZXY	XYZ	33.9
PLA[65]	Cristalinidade	0.93%, 2.62% e 4.79%	0.93%	57
PLA-Grafeno [61]	Porcentagem de <i>infill</i>	10%, 22%, 50%, 78% e 89%	89%	33.7
	Espessura da camada	0.1 mm, 0.13 mm, 0.2 mm, 0.27 mm e 0.3 mm	0.3 mm	

O sistema de orientação apresentado na Figura 10 é frequentemente utilizado na literatura. Por praticidade, as orientações mais utilizadas em pesquisas e na indústria e suas

respectivas nomenclaturas são apresentadas a seguir: *Flat* corresponde à peça com orientação XYZ, na Figura 11 é a peça amarela. *On edge* corresponde à peça com orientação XZY, na Figura 11 é a peça azul. *Upright* corresponde à peça com orientação ZXY, na Figura 11 é a peça vermelha.

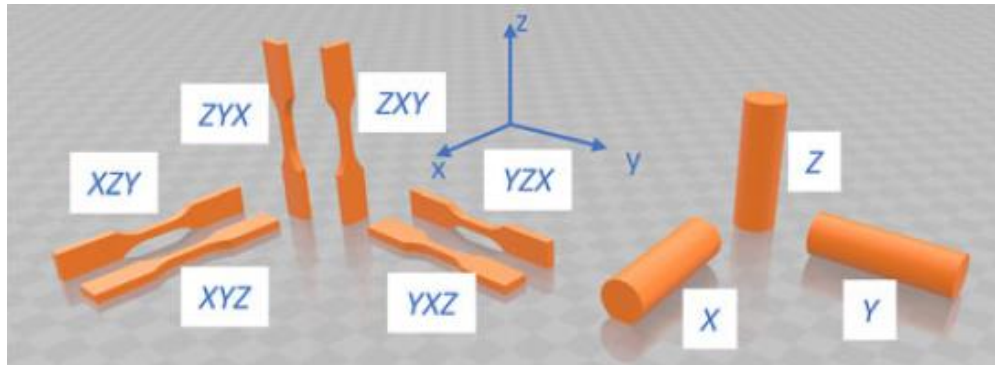


Figura 10 - Orientação da peça [11].

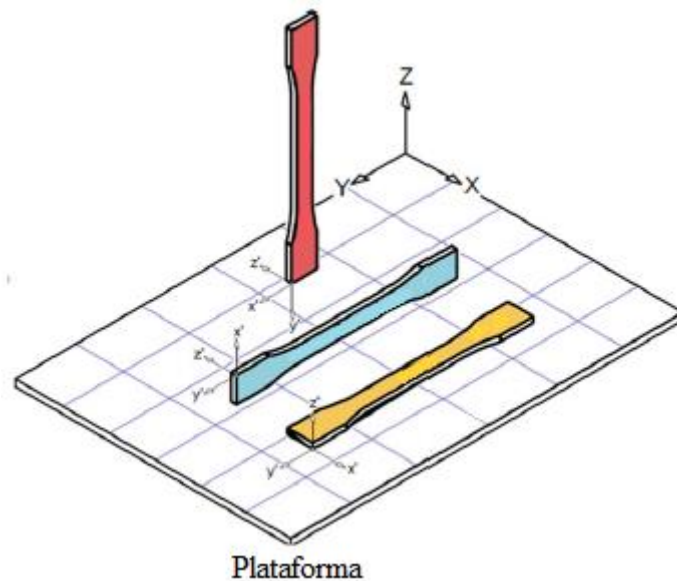


Figura 11 - Orientação de impressão [7].

No geral, melhores resultados costumam ser obtidos com: Orientação XYZ [7][60][64], diminuindo a espessura de camada [22,59,60,63], aumentando temperaturas de plataforma de impressão e de extrusão [65,66], ângulo de raster 0° [7,39,60].

Dentre esses parâmetros, como já foi explicado, a espessura de camada e a orientação da peça têm grande influência no tempo de impressão, no caso da orientação vai depender da

geometria e dimensões da peça, enquanto que para a espessura de camada quando menor ela for maior será o tempo de impressão [13].

É importante salientar que os trabalhos citados neste projeto usam materiais de fabricantes diferentes, e na maioria dos casos o fabricante não detalha todos os aditivos presentes no filamento.

Rankouhi et al. [58] afirmam que estudos mais detalhados devem ser conduzidos a respeito do efeito que a espessura de camada tem na resistência mecânica da peça pois há discrepância de resultados nos estudos existentes, como pode ser observado nos trabalhos a seguir.

Tymrak et al. [63] testou espessuras de camada de: 0,2, 0,3 e 0,4 mm. Na orientação de construção XYZ, tanto para PLA como ABS. No ABS os valores da resistência à tração e módulo de elasticidade foram muito próximos, com resistências à tração de 29,7 MPa, 27,6 MPa e 28,2 MPa para as espessuras de 0,2, 0,3 e 0,4 mm respectivamente. Com o PLA as resistências à tração obtidas foram: 60,4 MPa, 48,5 MPa e 54,9 MPa para espessuras de 0,2, 0,3 e 0,4 mm respectivamente, enquanto os módulos de elasticidade aumentaram pouco conforme a espessura de camada diminuiu, variando de 3,28 GPa para 0,4 mm até 3,48 para 0,2 mm de espessura.

Sood et al. [18] encontrou em seu estudo que a resistência mecânica da peça primeiramente caiu de 16 MPa para 15 MPa ao aumentar a espessura de camada de 0,127 mm para 0,178 mm mas eventualmente subiu para 16,6 MPa quando continuou a aumentar a espessura de camada até 0,254 mm, já Vaezi e Chua [59] e Onwubolu and Rayegani [22] apontam que quanto menor a espessura de camada maior a resistência mecânica da peça, também foi constatado por Vaezi e Chua [59] que os filamentos do tipo PLA possuem a maior variação de propriedades mecânicas em decorrência de mudanças nos parâmetros de impressão.

Camargo et al. [61] fez estudos criando um modelo estatístico capaz de obter propriedades mecânicas em função da porcentagem de preenchimento (*infill*) e a espessura de camada, além disso fez diversos testes empíricos para relacionar estes parâmetros às propriedades mecânicas das peças. O material utilizado para impressão nesse estudo foi PLA-grafeno (fabricado pela Haydale), grafeno é um dos materiais que pode ser adicionado ao polímero para aumentar suas propriedades mecânicas. Na Tabela 6 são demonstradas as combinações de fatores que foram testadas e os valores experimentais obtidos para a resistência à tração de cada amostra. Os parâmetros de impressão fixos mais relevantes são mostrados na Tabela 7.

Tabela 6 – Resultados dos testes de tração de amostras com parâmetros de impressão variados [61].

Fator	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Infill (%)	22	22	78	78	10	89	50	50	50
Espessura de camada (mm)	0,13	0,27	0,13	0,27	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2
Resistência à tração (Mpa)	15,3	24,6	21,4	33,7	12,9	30,7	21,1	32,5	27,5

Tabela 7 - Parâmetros relevantes de fabricação [61].

Parâmetros	Especificação
Material	PLA-grafeno
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,40
Orientação de construção	Flat
Temperatura de extrusão (°C)	200
Temperatura da plataforma de impressão (°C)	60
Taxa de alimentação (mm/s)	50

Os testes foram realizados em temperatura de 23 °C e umidade relativa de 5%, com velocidade de teste recomendada pela norma ASTM 638 (5 mm/min \pm 25%) [61].

No material testado, com aumento da espessura de camada de 0,1 a 0,3 para um mesmo *infill* de 50% observou-se aumento de 50% na resistência mecânica entre a menor e a maior espessura, no geral houve aumento contínuo da resistência à tração conforme a espessura de camada aumentou até os 0,3 mm mesmo para diferentes porcentagens de preenchimento (*infill*), o mesmo foi observado com o *infill* que quando aumenta entre 10 e 89% para uma mesma espessura de camada observa-se aumento de 137% na resistência à tração, e no geral observou-se que quanto maior o *infill* maior a resistência mecânica [61].

Um estudo mais detalhado por Chacón et al. [60] consta que a variação na resistência mecânica de acordo com a espessura de camada depende da orientação da peça. Peças impressas na direção XYZ têm aumento da resistência a tração com diminuição da espessura de camada, já peças na direção ZXY têm perda de resistência mecânica com a diminuição da espessura de camada, na direção YXZ nenhum padrão pode ser visto. As espessuras testadas

foram de: 0,06 mm, 0,12 mm e 0,24 mm [60]. A orientação XYZ com espessura de 0,06 mm obteve o melhor resultado como pode ser visto na Tabela 5.

Igualmente importante a se considerar são as tensões residuais e distorções na peça, fatores que Zhang e Chou descobriram ser influenciados por parâmetros como a velocidade de deposição e a espessura de camada [1].

Para se obter uma junta com boa resistência mecânica a orientação da peça deve ser tal que o plano das camadas não seja perpendicular com as tensões à qual a peça está submetida. O fator mais expressivo no tempo de impressão é, por fim, a orientação da peça [1][13].

Harris et al. [7] observam que a relação da espessura de camada com a resistência mecânica varia a depender do material utilizado e fabricante.

A performance mecânica de peças impressas por FDM se dá em função da qualidade da adesão entre camadas. No trabalho de Aliheidari et al. [66] uma metodologia de mecânica da fratura foi utilizada para caracterizar a resistência à fratura de amostras impressas por FDM de ABS em função das temperaturas de extrusão e da plataforma de impressão. Os resultados demonstraram que a carga crítica para aumento das trincas e a resistência à fratura aumentou com as temperaturas de extrusão e da plataforma de impressão, a temperatura de extrusão demonstrou ter mais efeito sobre a resistência.

A temperatura de extrusão variou entre 210, 230 e 240°C. A temperatura da plataforma de impressão variou entre 85, 95 e 105°C. Quanto maiores as temperaturas nestes intervalos, maior a carga máxima suportada pela amostra, maior a resistência à fratura da peça e a resistência à fratura entre camadas [66].

Harris et al. [7] também observam que o ângulo de *raster* tem melhor desempenho quando coincidem com a direção da carga, e que para os testes de tração o valor mais significativo costuma ser o de 0°, como pode ser observado na Tabela 8.

Em dois trabalhos o melhor desempenho em teste de tração foi com ângulo de 45° [62,74] mas em um destes no teste de flexão o melhor foi o ângulo de 0° [74].

A Tabela 8 resume o entendimento geral que há na literatura sobre os valores mais comuns utilizados para cada parâmetro de impressão, bem como os valores que obtêm melhor desempenho mecânico e a relação que cada parâmetro de impressão tem com a resistência mecânica das peças impressas por manufatura aditiva.

Tabela 8 - Sumário dos parâmetros de impressão utilizados em FDM baseado no entendimento geral da literatura [7].

Parâmetro	Valores comuns	Valores significativos	Relação com resistência mecânica
Porcentagem de infill	50 a 100%	100%	Diminuição da resistência com diminuição da porcentagem do infill
Orientação de construção	<i>Flat, upright, on-edge</i>	<i>Flat</i>	<i>Flat > Vertical > On-edge</i>
Ângulo de raster	0°, 45°, -45°, 60° 90° e 120°	0° Na direção da carga	0° > 45°/-45° > 90°
Espessura de camada	0,6 a 1 mm	0,06 e 0,2 mm	Varia Depende do tipo de material
Taxa de alimentação	(Não há valores comuns, há pouca pesquisa)	Dependente da orientação de construção e espessura de camada	Dependente da orientação de construção e espessura de camada: <ul style="list-style-type: none"> • Para <i>flat</i> e <i>on-edge</i>: Resistência α taxa de alimentação; • Para <i>upright</i>: resistência α (1/taxa de alimentação)
Velocidade de impressão	(Não há valores comuns, há pouca pesquisa)	Dependente da orientação de construção e espessura de camada	Quanto mais velocidade, menos material, menos difusão e consequentemente baixa resistência
Diâmetro do bico de extrusão	0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 mm	0,3 e 0,4 mm	Aumento no diâmetro inversamente proporcional à resistência

Polímeros de ABS demonstraram ter resistência à tração variando de 34 a 43 MPa quando produzidos por injeção. Para PLA, espécimes injetados foram observados apresentando resistência à tração entre 30 e 63 MPa [63].

2.4. Aplicações

A Manufatura Aditiva (MA) é um processo de fabricação inerentemente versátil, ainda que de certa forma restrito. Ao passo que possibilita um tempo relativamente curto de fabricação, baixo gasto de material, alto nível de complexidade e personalização, suas limitações não podem ser ignoradas, como baixa produtividade, tamanho máximo de peça restringido pela impressora e produto final com propriedades mecânicas indesejáveis (alto grau de anisotropia) [9]. Porém, inovações científicas têm se aproveitado cada vez mais das possibilidades latentes providenciadas pela MA, e um dos muitos encargos desse trabalho é introduzir tanto as aplicações clássicas como as mais recentes.

Vale ressaltar que muitas das aplicações da impressão 3D, senão todas, têm como ponto de convergência o caráter personalizável e de alta complexidade dos produtos, possivelmente o maior atrativo desse processo. Em função dessa qualidade, o propósito original de peças produzidas por MA era a confecção de protótipos que facilitassem a visualização do produto final e de montagens. Nesse cenário, encontram-se também moldes e modelos para fundição. A Figura 12 exemplifica alguns desses usos.

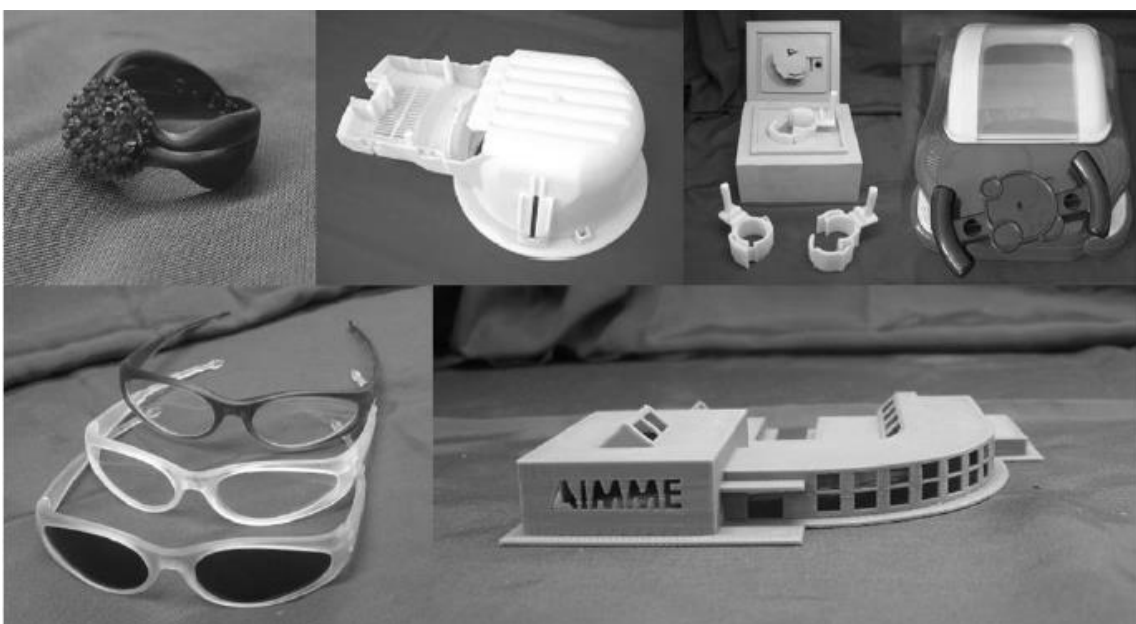


Figura 12 - Protótipos e modelos fabricados por SLA(Estereolitografia) e DLP(Digital light processing) [67].

O conteúdo a seguir introduz os ramos industriais com as aplicações mais expressivas e dá foco, mas não se limita, aos exemplos de impressão em FDM (ou replicável nesse método) que podem necessitar ou se beneficiar de adesivos como método de união de partes.

2.4.1. Metais

2.4.1.1. Indústria Aeroespacial

Devido às necessidades particulares da indústria aeroespacial, que por vezes requer peças complexas e de bom acabamento, a Manufatura Aditiva ganhou destaque nesse meio. Desde a produção das peças diretamente, no caso do titânio usado na aviação, à impressão dos modelos usados em cera perdida na fabricação dos motores, esse processo trouxe ainda outros benefícios para a produtividade desses setores. Abdulhameed et al. [9] listam esses benefícios como: decréscimo do tempo de entrega do produto e diminuição de custos.

Dadas as necessidades específicas dessa indústria, há grande benefício na redução do peso da estrutura. Peças aeroespaciais são muito caras pois processos convencionais são operações com alto desperdício de material. Ao utilizar MA no setor aeroespacial, peças são redesenhadas e seu peso é reduzido, o que diminui os custos de fabricação significativamente. Além disso, essa redução tem impacto positivo no consumo de combustível, reduzindo razão a compra-para-voar e a energia total gasta [67].

2.4.1.2. Indústria Automobilística

Alguns estudos empíricos comparam processos tradicionais para peças automotivas e aeroespaciais com o processo de fusão por laser (um dos processos de MA voltado para materiais metálicos). Foi demonstrado que a mesma peça, redesenhada para fusão por laser, teve as mesmas propriedades mecânicas e 40% menos material. Quando peças leves são introduzidas em veículos e aeronaves, muita energia é preservada por utilizar-se menos material na fabricação de peças e pela redução do consumo de combustível na vida útil do veículo [67].

2.4.2. Polímeros

2.4.2.1. Indústria de Calçados

A indústria de calçados é intrinsecamente relacionada com a utilização de adesivos durante a manufatura, já que as solas são em geral coladas ao resto do calçado. Dito isso, há a possibilidade de que as descobertas desse estudo sejam relevantes para esse setor, mesmo que a impressão se dê por um método diferente do abordado.

A empresa Adidas havia anunciado que iria produzir em larga escala sua nova linha de sapatos, o Futurecraft 4D, que usa uma tecnologia de MA única na confecção das suas solas. Com essa tecnologia CLIP, disponibilizada pela empresa Carbon, um alto nível de produtividade pôde ser alcançado graças à alta velocidade de impressão [46].

2.4.2.2. Indústria Médica

O processo de FDM encontrou sucesso generalizado no meio médico, em que sua prototipagem rápida e simplificada auxilia com a solução de problemas que por outros métodos seriam menos atraentes, e muitas dessas soluções estão sujeitas ao auxílio de juntas coladas. As aplicações mais relevantes para o âmbito do estudo incluem modelos cirúrgicos, próteses e órteses.

Materiais poliméricos são muito importantes para o setor biomédico. Existem três tipos de polímeros que podem ser utilizados neste setor. Há polímeros biocompatíveis para uso externo, polímeros biocompatíveis para implantes e polímeros biodegradáveis para implantes também [67].

Os Polímeros biocompatíveis para uso externo podem ser utilizados para uso médico ou próteses. Um exemplo é a série EnvisionTEC e-Shell 200 de fotopolímeros que foi criada especificamente para aplicações na indústria de aparelhos auditivos e é caracterizada por sua rigidez e durabilidade. É apropriado para invólucros de paredes finas para aparelhos auditivos e produtos otoplásticos (podem ser protetores auditivos, material utilizado em cirurgias plásticas) [67]. Um exemplo é mostrado na Figura 13 (a).

Os Polímeros biocompatíveis também são utilizados na indústria de implantes cirúrgicos. Estes materiais não são agressivos ao corpo humano e não causam rejeição. Na Figura 13 (b) é mostrado um implante de bypass coronário com canais internos muito

pequenos. Este modelo foi fabricado com o material fotopolímero R11. Além disso, guias para cirurgias bucomaxilofacial foram fabricados com fotopolímeros transparentes [67].

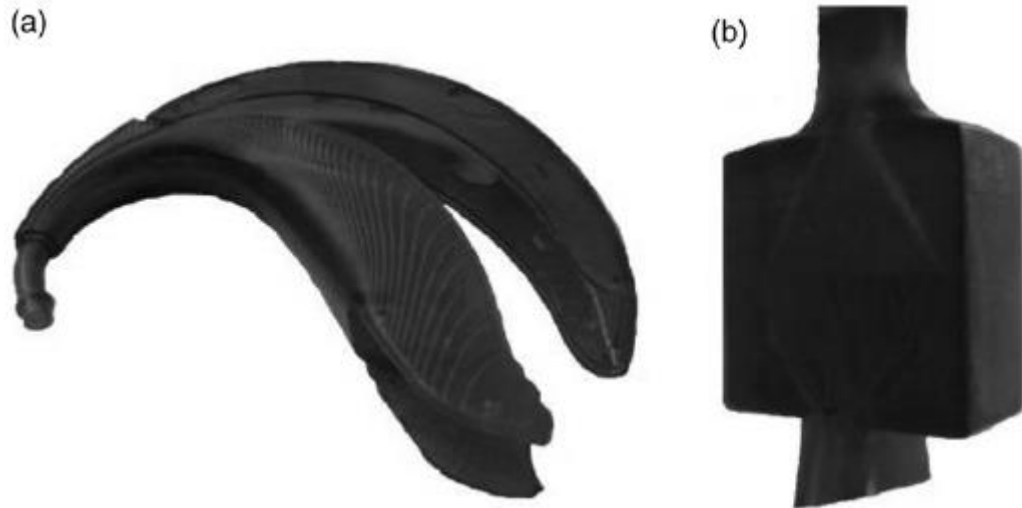


Figura 13 - (a) Invólucro de aparelho de auxílio auditivo (b) Bypass coronário [67].

Através da Manufatura Aditiva partes anatômicas complexas podem ser fabricadas diretamente de imagens de tomografia computadorizada e providenciam uma melhor visualização de anatomias específicas. Além disso, auxilia com um planejamento pré-cirúrgico mais preciso, ajuda cirurgiões e estudantes de medicina a revisar de forma prática os procedimentos cirúrgicos e ainda age como uma ferramenta de comunicação entre cirurgião e paciente. Como mostra a próxima figura, o processo foi utilizado na separação de gêmeas siamesas através do ensaio do procedimento pré-cirúrgico nos modelos impressos [9].



Figura 14 - Modelos anatômicos utilizados em planejamento cirúrgico [9].

Quanto às próteses, os soquetes do membro vestigial ou apoio são produzidas por intermédio de impressoras 3D, enquanto a totalidade das Órteses são fabricadas por esse método. Esse processo é utilizado não só pela praticidade na fabricação, mas também pela alta personalização do produto final, em que as necessidades únicas de cada paciente são atendidas. O material utilizado é um majoritariamente polímero [68]. As Figura 15 e Figura 16 são ilustrações das órteses e próteses citadas.



Figura 15 – Exemplo de Órtese tornozelo-pé produzida através da Manufatura Aditiva [68].



Figura 16 - A direita, um soquete. A esquerda, uma prótese. Ambas impressas por Manufatura Aditiva [68].

2.4.2.3. Design Artístico

Em razão de sua extraordinária capacidade para obter formas complexas, MA é frequentemente utilizada em design artístico. Peças como a que pode ser vista abaixo só podem ser fabricadas em uma única parte por tecnologias aditivas. Outro ramo onde a manufatura aditiva é utilizada seria o de joalheria, em que desenhos sofisticados tornam-se realidade com o processamento de polímeros. Modelos de polímeros podem servir como modelos para fundição à vácuo ou podem servir como joias e acessórios. A Figura 17 exhibe, em conjunto, essas formas [67].



Figura 17 - Design artístico auxiliado por MA: (a) Modelo artístico, (b) modelo de jóia fabricado por MA, (c) Anel de prata produzido por fundição à vácuo [67].

2.4.2.4. Drones

Pesquisadores utilizaram manufatura aditiva com o processo FDM para construir um drone modular com braços ajustáveis que permitem 12 diferentes configurações, assim um único drone pode ser adaptado para tipos diferentes de usos tanto comerciais como industriais. A ideia é propor uma solução que ajuda o consumidor final (fotógrafos, agências de segurança, etc) a ter soluções simples e baratas de otimização do uso do drone e do processo de produção do mesmo, pois as diferentes configurações podem ser obtidas simplesmente alterando o número e tipo de braços e componentes do drone. Para colocar a ideia em prática, os autores viram na manufatura aditiva a forma mais prática e barata de fazê-lo. Na figura abaixo consta-se as diferentes configurações que o drone pode assumir [16].

Os materiais selecionados para o drone foram o PLA e o ABS. ABS é mais leve e possui melhor desempenho mecânico. Vale relembrar que PLA é 100% biodegradável, qualidade que pode classificar o drone como ecológico [16].

A Figura 18 justapõe algumas das possibilidades para configuração do drone.

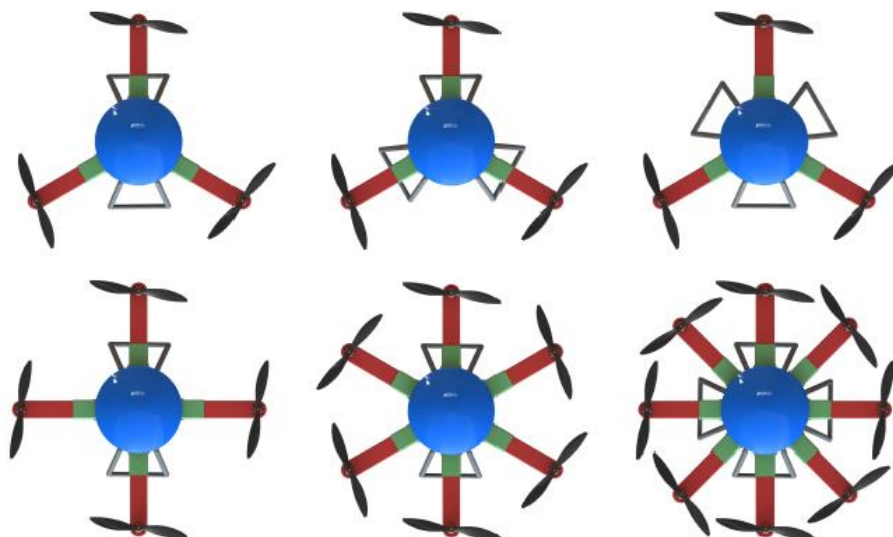


Figura 18 - Possibilidade para a quantidade de pernas inclusas dependendo da configuração escolhida [16].

2.5. Ensaios Destrutivos

Um ensaio destrutivo consiste na aplicação de técnicas que visam caracterizar o comportamento das propriedades de um material por meio de uma amostra ou corpo de prova. As propriedades avaliadas podem ter caráter físico, químico, térmico, mecânico etc. Os métodos desse tipo de ensaio danificam o corpo de prova, buscando analisar os limites e as razões por trás da falha do material. Por isso, ao elaborar a metodologia dos experimentos, é importante considerar as técnicas empregadas além de estabelecer um controle sobre as condições dos testes e padronização dos parâmetros nos corpos de prova.

Quanto ao âmbito técnico, sobretudo na avaliação das propriedades mecânicas, é necessário decidir qual situação de carregamento e a respectiva resistência que se deseja estudar. Essas resistências à podem ser tração, compressão, cisalhamento, torção, impacto, fadiga ou fluência. É ainda possível realizar ensaios a partir do modo de fratura que se deseja obter.

2.5.1. Ensaio de Tração

O ensaio de tração, por exemplo, é um dos métodos mais comuns de ensaios mecânicos destrutivos em que se determina o módulo de Young e alongamento percentual de um material através da aplicação de uma tensão no corpo de prova, que tende a alongá-lo até ocorrer fratura. Os resultados desse teste indicam o limite de ruptura e de resistência para tensão normal de tração (σ) no substrato. Essa tensão relaciona-se com a carga de ruptura ($F_{M\acute{a}x}$), a largura (b) e a espessura (d) do CP em milímetros, da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{F_{M\acute{a}x}}{db} \quad [1]$$

Esse teste é registrado de forma digital, possibilitando o cálculo da tensão máxima, mais conhecida como limite de resistência. Essa propriedade servirá, por sua vez, de referência para avaliação da resistência mecânica em polímeros como um todo. Por isso, obter esse valor é de grande utilidade para fins comparativos.

Na questão de controle, é essencial seguir a orientação de procedimentos normatizados. A norma ASTM D3039 [70] recomenda que a temperatura ambiente para testes e armazenamento de $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e $50 \pm 10\%$ de umidade relativa. A velocidade do teste deve ser tal que a taxa de deformação na seção medida seja quase constante. A taxa de deformação

deve ser selecionada de forma que a falha ocorra entre 1 e 10 minutos. Uma taxa de deformação padrão para testes é de $0,01 \text{ min}^{-1}$. Uma velocidade de descolamento de cabeçote padrão é de 2 mm/min. Os requerimentos geométricos para corpos de prova submetidos a ensaios de tração podem ser consultados nas Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Requerimentos geométricos para corpos de prova [70].

Parâmetro	Requerimento
Requerimentos do corpo de prova	
Forma	Seção transversal retangular constante
Comprimento mínimo	<i>Gripping</i> +2 vezes largura + comprimento da medição
Largura da amostra	Conforme necessário (recomendações na Tabela 10)
Tolerância da largura da amostra	$\pm 1 \%$ da largura
Espessura da amostra	Conforme necessário
Tolerância da espessura da amostra	$\pm 4 \%$ da espessura
<i>Flatness</i> da amostra	<i>Flat</i> com leve pressão do dedo
Requerimentos para <i>Tab</i>	
Material da <i>Tab</i>	Conforme necessário
Orientação da fibra (<i>tabs</i> de compósito)	Conforme necessário
Espessura da <i>tab</i>	Conforme necessário
Variação da espessura da <i>tab</i> entre <i>tabs</i>	$\pm 1 \%$ da espessura de <i>tab</i>
<i>Tab bevel angle</i>	5 a 90° , inclusivo(?)
<i>Tab step at bevel to specimen</i>	<i>Feathered</i> (limpar?) sem danificar amostra

Tabela 10 - Recomendações para geometria de corpo de prova [70].

Orientação da fibra	Largura [mm]	Comprimento total [mm]	Espessura [mm]	Comprimento da tab [mm]	Espessura da tab [mm]	Tab Bevel Angle [°]
0° unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Balanceado e simétrico	25	250	2,5	Pano de esmeril	-	-
Descontínuo aleatório	25	250	2,5	Pano de esmeril	-	-

2.5.2. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão é feito para determinar as propriedades de flexão de um material através de um sistema de carregamento aplicado a uma viga de apoio simples. Algumas das propriedades determinadas são: módulo de ruptura σ_f (tensão máxima nas fibras externas do CP), máxima tensão sob flexão no ensaio σ_{fM} , tensão de flexão na ruptura σ_{fb} , módulo de elasticidade secante ou tangente E_f e deformação sob flexão ε_{fr} . A configuração do teste pode ser visualizada na Figura 19.

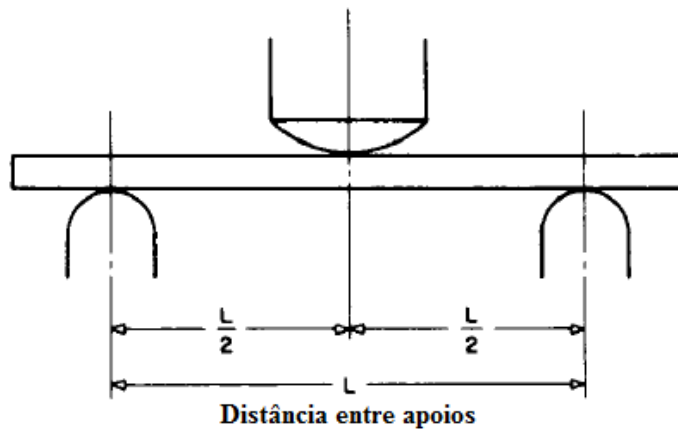


Figura 19 - Esquema do teste de flexão [69].

O módulo de ruptura é caracterizado por:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [2]$$

Sendo P a carga em newtons, L a distância entre apoios em milímetros, b a largura do CP em milímetros e d a espessura do CP em milímetros.

Os ensaios de flexão são padronizados por meio da norma ASTM D790 [69].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma análise mais profunda da revisão bibliográfica permitirá avaliar quais estratégias outros grupos de pesquisa adotaram para alcançar um único objetivo: a otimização do desempenho de peças impressas por Modelagem por Fusão e Deposição, sem recorrer a materiais com aditivos de propriedades inerentemente superiores, apenas envolvendo a manipulação das configurações do processo. Todos esses dados auxiliaram na seleção do conjunto de parâmetros com os melhores resultados, em que uma análise experimental visa validar métodos analíticos e numéricos.

A expectativa desse trabalho é de confrontar as principais dificuldades da manufatura aditiva num ambiente de viés científico, em que produtividade não é uma prioridade, apesar do impacto no tempo de fabricação ser considerado. Dessa forma, foram fabricados espécimes de diferentes tipos de material para serem submetidos a testes de tração e flexão para a constatação da performance mecânica e comparação dos resultados entre materiais. Como há muitos fatores que determinam a qualidade do produto final, esse capítulo se encarrega de descrever os materiais usados na fabricação dos corpos de prova (CPs), as especificações paramétricas e ambientais do processo em si e como os ensaios foram realizados.

A documentação dessa seção foi prejudicada gravemente pela pandemia de COVID-19, na qual foi determinado um isolamento social em larga escala que restringiu ou mesmo impediu o acesso dos estudantes aos laboratórios da universidade. Em função disso, uma das características inerentes a um estudo experimental, tal qual é a descrição minuciosa das etapas do procedimento, não pôde ser registrada devidamente. Aqui será descrito da melhor forma possível as etapas de forma isolada.

Outro desdobramento dessa condição foi a redução no tempo hábil para a parte de métodos, de forma que foi possível dispor de apenas um conjunto de configurações de trabalho. Além disso, uma baixa quantidade de espécimes esteve pronta para os ensaios. Contrário ao que seria ideal, o máximo disponível num mesmo grupo de peças foi de apenas 4, enquanto o menor foi de 2, empobrecendo a validade estatística dos resultados obtidos. Não obstante, informações relevantes ainda puderam ser inferidas.

3.1. Parâmetros de Impressão Ideais

Os parâmetros de impressão devem ser selecionados cuidadosamente para assegurar que os materiais sejam impressos com boas propriedades mecânicas, bom acabamento superficial e alta precisão. As configurações são fixadas para a maioria das amostras visando obter resultados comparáveis entre si, com exceção dos experimentos com Tritan a 280 °C de temperatura de extrusão.

Os parâmetros de impressão utilizados neste trabalho foram escolhidos baseando-se na literatura e em testes realizados em laboratório pelos pesquisadores do LADES no CEFET/RJ. Os parâmetros mais importantes para assegurar as qualidades desejáveis citadas anteriormente são: espessura de camada, orientação do *raster* e densidade do *infill* (preenchimento), orientação de construção, temperatura de impressão, e velocidade de impressão [7].

Sood et. al. [39] mostrou que o número de camadas impressas tem impacto direto na resistência das peças impressas. O número crescente de ciclos de aquecimento e resfriamento durante a impressão causa acúmulo de tensões residuais, resultando em distorções, falhas interlaminares e delaminação, reduzindo a resistência da peça como um todo. Por isso, aumentar a espessura de camada tem o benefício de reduzir este efeito. As espessuras de camada máxima e mínima possíveis de obter-se dependem do diâmetro do bico de extrusão, para esse trabalho o bico disponível tem 0,4 mm de diâmetro, considerando isso e os estudos encontrados na literatura a espessura de camada ideal será determinada. Foi demonstrado na literatura que o uso de uma camada com 0,3 mm apresentou as melhores propriedades mecânicas, de acordo com essa fonte, e menores tempos de produção para impressão 3D por FDM [61]. Considerando a limitação do tempo destinado à parte de métodos imposta pela pandemia, as conclusões de Camargo et al. [61] tiveram influência decisiva sobre certas configurações, como na escolha da espessura de camada para os corpos de prova deste experimento, que foi de 0.3 mm.

A largura do *raster* escolhida foi de 0,44 mm pois reduzirá os vazios internos produzidos por sobreposição de *rasters* [7]. O ângulo de *raster* escolhido foi o de 0°, uma vez que foi demonstrado na literatura que o ângulo de *raster* de 0° é a direção mais favorável para deposição em que alta resistência à tensão é desejada. O mesmo é válido para o preenchimento (*infill*), já que melhoras nas propriedades mecânicas do material impresso estão ligadas à redução de vazios internos [61].

As temperaturas de extrusão e da plataforma de impressão usadas foram escolhidas baseado no fato de que a temperatura tem impacto significativo nas propriedades da peça, que

melhoram conforme aumenta a temperatura do bico de extrusão, enquanto a temperatura da plataforma de 120°C foi escolhida para reduzir o gradiente de temperatura entre as camadas do topo e de baixo [66]. Finalmente, a taxa de alimentação escolhida foi de 45 mm/s pois foi esclarecido na literatura que esta velocidade apresenta os melhores resultados ao providenciar melhor difusão, maior largura interfacial e menos vazios internos [72].

Os parâmetros de processo introduzidos no software de fatiamento, ou *slicing*, podem ser vistos na Tabela 11. O número de contornos foi grande o suficiente para garantir que a impressão procedesse de forma que a peça fosse formada inteiramente por contornos, que são sempre impressos com ângulo de *raster* de 0°. Com isso, garantiu-se que toda a peça foi impressa com ângulo de *raster* de 0°, como mostra a Figura 20. A configuração usada é independente da orientação de construção XY.

Tabela 11 - Parâmetros de impressão utilizados para construção dos substratos.

Parâmetros de impressão	Valor
Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,40
Espessura de camada (mm)	0,30
Largura de <i>raster</i> (caminho) (mm)	0,44
Angulo de <i>Raster</i>	0°
Infill (%)	100
Temperatura de extrusão (C°)	250
Temperatura da plataforma de impressão (C°)	120
Taxa de alimentação (mm/s)	45
Número de contornos	44

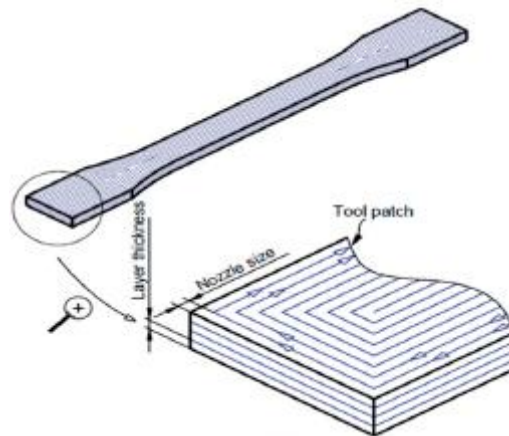


Figura 20 - Orientação de Raster em contorno [7].

3.2. Fabricação das Amostras

Os filamentos poliméricos utilizados nesse projeto foram ABS (“*Acrylonitrile Butadiene Styrene*”), PLA (“*Polylactic Acid*”) e Tritan. Esse material foi manufaturado e fornecido pela GTMax3D (Americana, SP, Brasil) na forma de filamentos com diâmetro de 1.75 mm. Valores típicos das principais propriedades mecânicas de substratos de PLA, ABS e Tritan manufaturados por tecnologia de Manufatura por Fusão e Deposição (FDM) foram apresentados previamente e servirão de comparativo na eficácia desse estudo. A ficha de dados técnicos provida pelos fornecedores está na Tabela 12. Não houve nenhum detalhamento da parte desses, e por isso especula-se muito a respeito de tais informações. Dessa forma, acredita-se que esses valores para resistência à tração tenham sido encontrados em testes de tração com o filamento em si.

Tabela 12 - Propriedades Mecânicas dos materiais usados

Material	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)	Deformação Trativa (%)
PLA	53	3.50	6
ABS	29	0.26	18
Tritan	43	1.55	210

A impressão dos substratos ocorreu no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) do CEFET/RJ por meio de uma impressora do tipo FDM, modelo GTMAX3D CORE A1V2, propriedade do laboratório, ilustrada na Figura 21. A máquina é um modelo comercial também fornecido pela GTMax3D (Americana, SP, Brasil), com dimensões para a área de impressão em 300 mm de altura, 300 mm de largura e 200 mm de comprimento. Esse modelo possui cama aquecida de alumínio com tampo de vidro, temperatura da tubeira (ou bico de extrusão) podendo chegar até 295°C e velocidade de impressão com limite de até 150 mm/s. Vale a constatação de que, apesar de não ser indicado pelo fabricante, a impressora é do tipo “fechada”, com câmara para isolamento térmico. Essa característica garante a precisão das indicações de temperatura nos leitores e que impede a peça de sofrer com o gradiente térmico criado pela troca de calor com o ambiente, prevenindo maiores distorções dimensionais e empenamento (ou *warping*).



Figura 21 - Impressora GTMAX3D CORE A1V2 disponibilizada pelo LADES, CEFET/RJ.

É ainda necessário especificar como foram passadas as instruções que possibilitaram à máquina construir em um formato específico, já que as amostras impressas para o estudo passaram por procedimento adaptado à manufatura aditiva, como explicado previamente. O software de modelagem em CAD Solidworks foi usado para o desenho, enquanto o programa de fatiamento, ou *slicing*, que criou o G-code foi o software gratuito Simplify3D®.

Um planejamento do processo foi traçado com 22 amostras no total, produzidas em grupos separados da seguinte maneira:

- a) 4 para Tração com PLA;
- b) 3 para Flexão com PLA;
- c) 3 para Tração com ABS;
- d) 3 para Flexão com ABS;
- e) 3 para Tração com Tritan;
- f) 3 para Flexão com Tritan;
- g) 3 para Tração com Tritan a 280 °C.

Porém, é oportuno comentar nessa parte que um dos corpos de prova para Tração com ABS viria a ter seus dados invalidados por desviarem muito do comportamento esperado no teste em questão.

A geometria dos corpos de prova para os dois testes pode ser visualizada na Figura 22 abaixo.

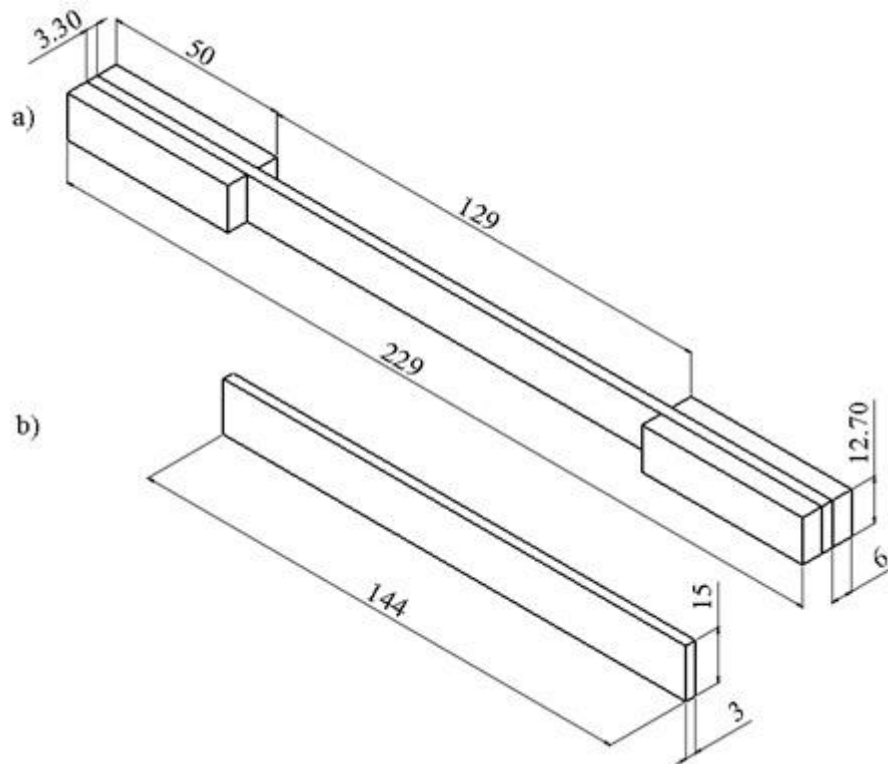


Figura 22 - Esquema dos Corpos de Prova a) Trativos e b) Fletores.

O desenho elaborado segue uma norma que orienta procedimentos experimentais, a ASTM D3039 [70], diretriz do método de teste padrão para propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica. A escolha desse esboço foi feita com base em constatações de testes laboratoriais, que identificaram problemas com a norma mais adequada, ASTM D 638 (método de teste padrão para propriedades mecânicas de plásticos), quando o corpo de prova é reforçado.

Os filamentos foram mantidos na caixa com sílica a fim de protegê-los contra degradação causada por umidade, até que fossem instalados com o carretel na parte traseira da máquina, com a ponta fixada em rolos de alimentação. Seguindo recomendações da empresa, a primeira camada de material só foi depositada na plataforma após a passagem de cola comercial comum sobre a superfície para evitar que a peça se deslocasse durante a manufatura. A alimentação dos filamentos é feita em tandem e com resfriamento natural dentro da máquina. Uma vez finalizada, a peça pôde ser retirada com simples esforço manual. O tempo médio de construção de 4 amostras girou em torno de 4 horas; logo, uma amostra era feita por hora.

3.3. Ensaaios

Testes de tração e flexão em três pontos foram realizados para determinar a resposta mecânica em termos de resistência, alongamento e rigidez nas amostras impressas.

As amostras foram ensaiadas na máquina de ensaios universal de bancada com coluna INSTRON 5966, disponível no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) do CEFET/RJ. Exemplos dos ensaios podem ser verificados nas Figura 23 e Figura 24. Os testes foram executados em temperatura ambiente ($23 \pm 3^\circ\text{C}$).

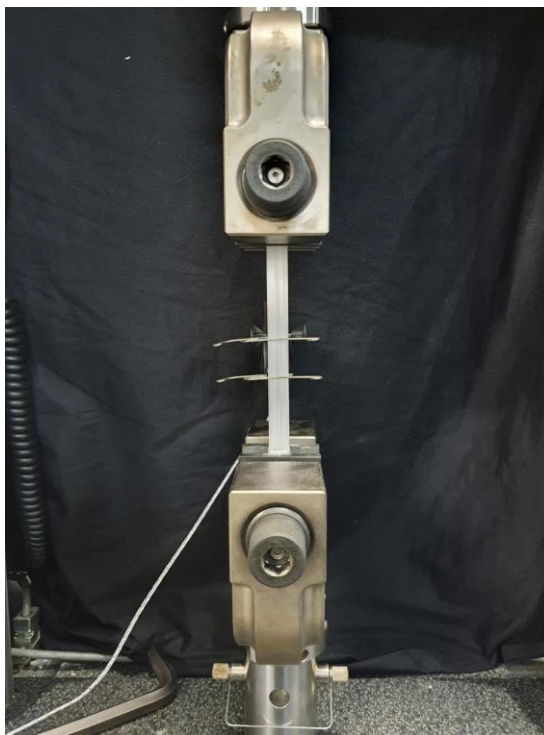


Figura 23 - Amostra de Tritan sendo ensaiada. Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.

Nos testes realizados para caracterizar as propriedades mecânicas das amostras tratativas, a célula de carga utilizada foi de 10 kN e a velocidade de teste foi de 2 mm/min. Seguiu-se a norma ASTM D3039 para determinar as propriedades mecânicas de resistência à tração (considerando a tensão máxima), alongamento percentual e módulo de elasticidade para tração.

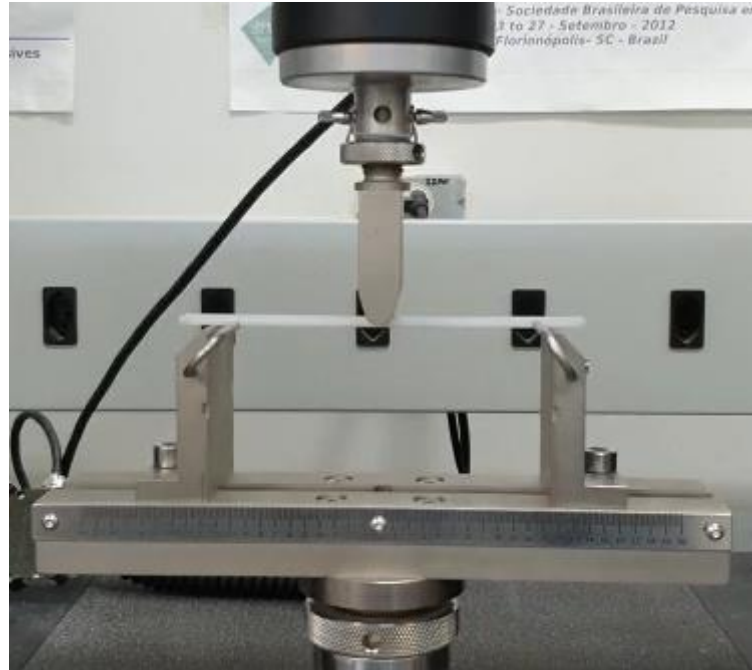


Figura 24 - Amostra de Tritan sendo ensaiada. Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.

Nos testes realizados para caracterizar as propriedades mecânicas das amostras fletoras, a célula de carga utilizada foi de 1 kN e a velocidade de teste foi de 1 mm/min. Seguiu-se a norma ASTM D790 para determinar as propriedades mecânicas de resistência à flexão (considerando a tensão máxima), carregamento máximo, deslocamento e módulo de elasticidade para flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, haverá uma constatação dos resultados inferidos dos espécimes sob tração e flexão, comparando-os àqueles obtidos na literatura a fim de se determinar o quão eficaz foram as escolhas de parâmetro de impressão para os materiais propostos. As comparações numéricas dos resultados terão caráter quantitativo, enquanto a análise do comportamento mecânico terá caráter qualitativo, conforme inspeção visual dos espécimes fraturados ao término dos ensaios destrutivos. Os valores apresentados para as propriedades mecânicas será a média dos resultados em cada grupo, com tratamento estatístico.

As propriedades obtidas a partir dos ensaios de tração foram a tensão trativa máxima, deformação relativa, alongamento máximo e Módulo de Elasticidade de Young. As fórmulas usadas para determinar essas grandezas são explicadas a seguir.

Tensão trativa máxima, um valor fornecido pela máquina e já explicado no capítulo 2:

$$\sigma_f = \frac{P}{bd} \quad [3]$$

Sendo P a carga em newtons, b a largura do CP em milímetros e d a espessura do CP em milímetros.

O alongamento ($L_f - L_i$) também é fornecido pela própria máquina diretamente.

A deformação relativa é função do comprimento do próprio CP:

$$\Delta L = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad [4]$$

O módulo de elasticidade foi calculado com a fórmula a seguir:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta L} \quad [5]$$

Com os dados obtidos da máquina também é possível projetar uma curva que relaciona tensão e deformação, calculando a inclinação da seção mais reta da curva obtém-se o módulo de elasticidade.

As fórmulas podem ser encontradas na norma ASTM D3039 para ensaios de tração [70].

Nos ensaios de flexão, as propriedades obtidas foram a tensão fletora máxima, deformação relativa de flexão, alongamento em flexão máximo e Módulo de Young de Flexão. As fórmulas usadas para determinar essas grandezas são explicadas a seguir.

Tensão fletora máxima, um valor fornecido pela máquina e já explicado anteriormente:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [6]$$

Sendo P a carga em newtons, L a distância entre apoios, b a largura do CP em milímetros e d a espessura do CP em milímetros.

O alongamento ($L_f - L_i$) também é fornecido pela própria máquina diretamente.

A deformação relativa de flexão é fornecida pela máquina.

O módulo de elasticidade para flexão, também chamado de Módulo de Elasticidade Tangente, foi calculado com a fórmula a seguir:

$$E = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad [7]$$

Sendo m a inclinação do trecho mais reto da curva que relaciona a carga e o alongamento de flexão em N/mm, L a distância entre apoios em milímetros, b a largura do CP em milímetros e d a espessura do CP em milímetros.

As fórmulas podem ser encontradas na norma ASTM D790 para ensaios de flexão [69].

4.1. Resultados

Uma vez finalizados os experimentos, os dados registrados pela máquina foram tratados de forma que pudessem ser apresentados na forma de tabelas e gráficos. Assim, as tabelas apresentam de forma sucinta os resultados obtidos, ao passo que os gráficos não só facilitam a visualização das informações, como também provém boa base comparativa. Estes registros foram segmentados de acordo com constatações para cada material e podem ser acompanhados ao longo dessa seção.

4.1.1. Comparação Entre os Resultados dos Ensaio Mecânicos

Os corpos de prova testados puderam ser expressos por tabelas e uma série de gráficos: primeiro através da curva característica de cada material, e depois pela comparação da média associada ao desvio padrão da tensão limite de escoamento. Estes dados também foram considerados para as curvas características de cada corpo de prova submetido a tração ou flexão.

A Figura 25, Figura 26 e Figura 27 mostram o desempenho dos materiais termoplásticos envolvidos nos ensaios, com curvas justapostas para tração e flexão.

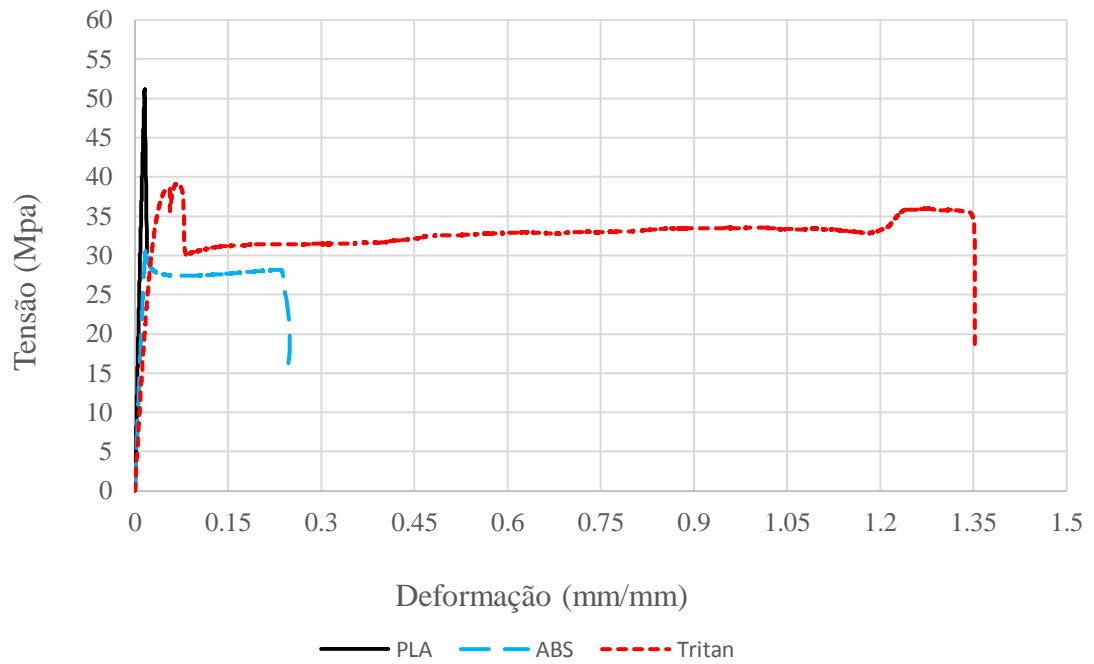


Figura 25 - Curvas representativas de Tensão-deformação em tração.

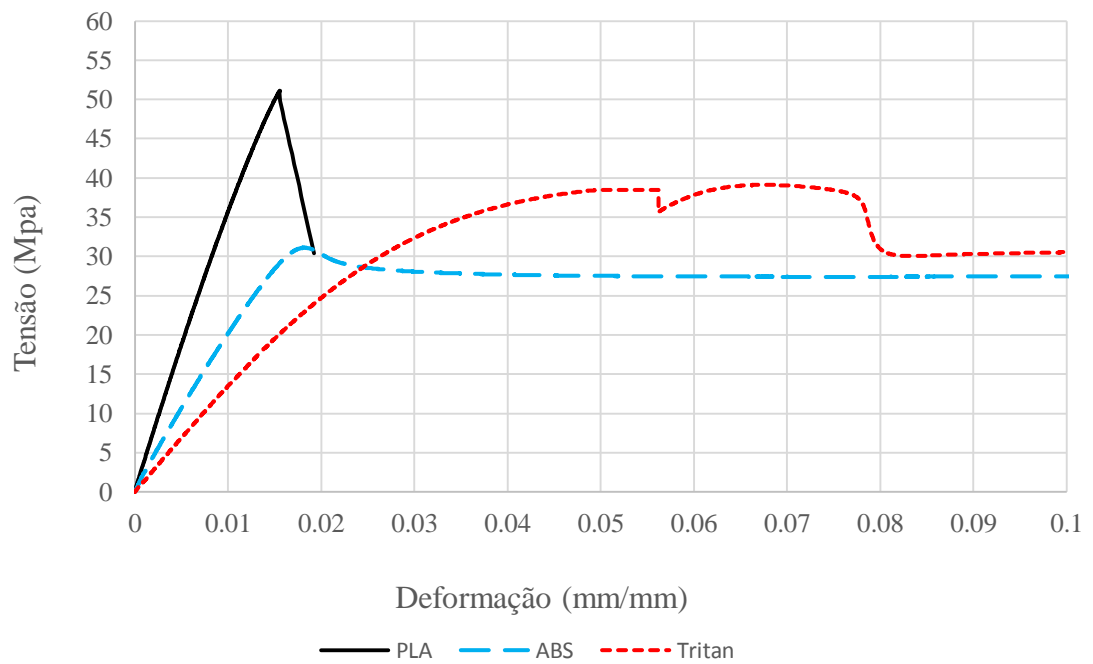


Figura 26 - Tensão-deformação em tração – Destaque na tensão máxima.

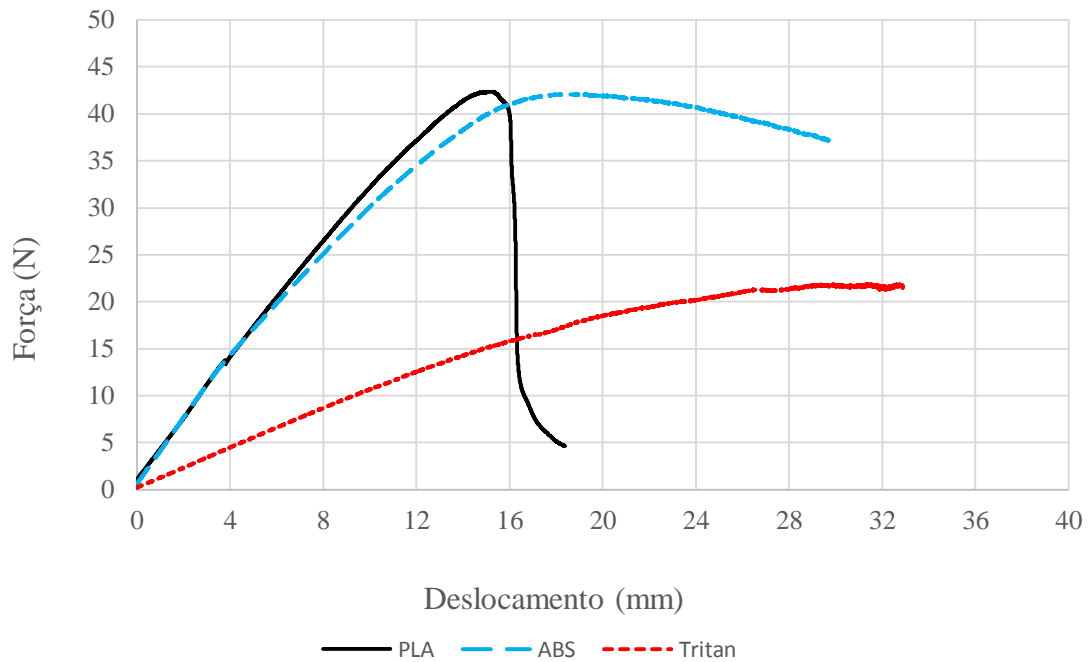


Figura 27 - Curvas representativas de Força-deslocamento em flexão.

Os gráficos de força-deslocamento e tensão-deformação acima representam os comportamentos característicos, típicos dos respectivos ensaios. À medida que a rigidez (ou o ângulo que a curva forma com a horizontal) diminui, o deslocamento aumenta. A maneira que essa relação se estabelece está relacionado ao material das amostras e suas dimensões.

O gráfico comparativo das médias da resistência ao escoamento encontradas nos dois carregamentos, em função do material, é demonstrada nas Figura 28 e Figura 29.



Figura 28 - Gráfico comparativo da resistência à tração média dos materiais testados.

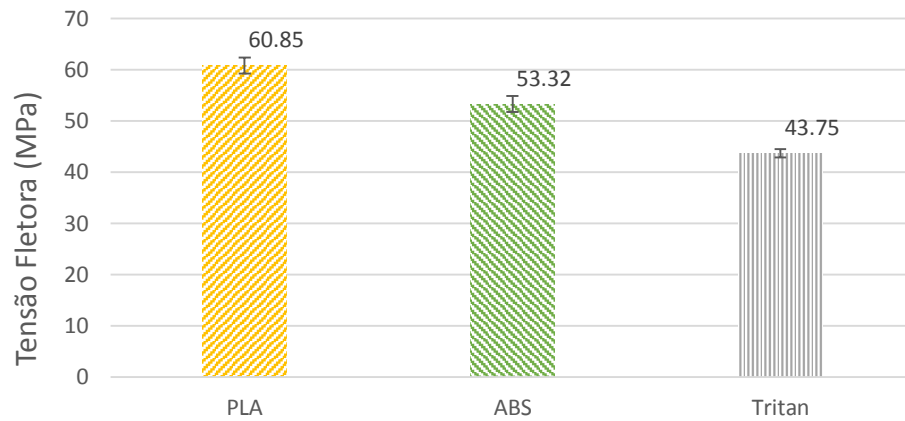


Figura 29 - Gráfico comparativo da resistência à flexão média dos materiais testados.

Finalmente, os valores máximos para as propriedades mecânicas obtidos nesse trabalho estão contidos nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas de tração.

Material	Tensão Trativa Máxima média (MPa)	Módulo de Young médio (GPa)	Deformação Trativa Máxima média (%)
PLA	51.88 ±3.92	3.77 ±0.15	2.18 ±0.68
ABS	31.03 ±0.11	2.18 ±0.05	24.98 ±0.10
Tritan	37.79 ±1.45	1.38 ±0.01	85.50 ±69.60

Tabela 14 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas de flexão.

Material	Tensão Fletora Máxima média (MPa)	Módulo de Young de Flexão médio (GPa)	Deformação Fletora Máxima média (%)
PLA	60.85 ±1.57	3.88 ±0.14	2.51 ±0.36
ABS	53.32 ±1.54	1.60 ±0.15	4.06 ±1.43
Tritan	43.75 ±0.83	1.26 ±0.07	4.03 ±0.30

Para Corpos de Prova (CPs) impressos em PLA, nos ensaios de tração foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de tração como: tensão máxima média de 51.88 MPa com desvio padrão de 3.92 MPa, deformação máxima média de 2.18% com desvio padrão de 0.68% e módulo de Young médio de 3.77 GPa com desvio padrão de 0.15 GPa.

Nos ensaios de flexão com CPs impressos em PLA foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de flexão tais como: tensão máxima média de 60.85 MPa com desvio padrão de 1.57 MPa, deformação máxima média de 2.51% com desvio padrão de 0.36% e módulo de flexão de Young médio de 3.88 GPa com desvio padrão de 0.14 GPa.

Quanto aos Corpos de Prova (CPs) impressos em ABS, nos ensaios de tração foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de tração como: tensão máxima média de 31.03 MPa com desvio padrão de 0.11 MPa, deformação máxima média de 24.98% com desvio padrão de 0.10% e módulo de Young médio de 2.18 GPa com desvio padrão de 0.05 GPa.

Nos ensaios de flexão com CPs impressos em ABS foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de flexão tais como: tensão máxima média de 53.32 MPa com desvio padrão de 1.54 MPa, deformação máxima média de 4.06% com desvio padrão de 1.43% e módulo de flexão de Young médio de 1.60 GPa com desvio padrão de 0.15 GPa.

Já os Corpos de Prova (CPs) impressos em Tritan, nos ensaios de tração foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de tração como: tensão máxima média de 37.79 MPa com desvio padrão de 1.45 MPa, deformação máxima média de 85.50% com desvio padrão de 69.60% e módulo de Young médio de 1.38 GPa com desvio padrão de 0.01 GPa.

Nos ensaios de flexão com CPs impressos em Tritan foram obtidas informações sobre propriedades mecânicas de flexão tais como: tensão máxima média de 43.75 MPa com desvio padrão de 0.83 MPa, deformação máxima média de 4.03% com desvio padrão de 0.30% e módulo de flexão de Young médio de 1.26 GPa com desvio padrão de 0.07 GPa.

Os *strain gage*'s foram retirados após atingir sua capacidade máxima de medição após os 0.05 (mm/mm) de deformação, os CPs continuaram a deformar plasticamente. Portanto, para além desse valor, a deformação foi estimada por $\Delta L/L_0$, o que ocorre no caso do Tritan.

4.1.2. Comparação com Outros Resultados da Literatura

Os valores máximos para a resistência à tração são um referencial significativo para se determinar a aplicação de um material. Muitos métodos buscam aumentá-la, e diante de tantos outros estudos na área de refinamento dos parâmetros de impressão para FDM, há a necessidade de destacar os resultados desse experimento. Por isso, a aplicabilidade desse estudo está atrelada a esses dados, que serão essenciais como critério de avaliação.

Nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível ver uma série de gráficos que comparam diversos materiais impressos por manufatura aditiva do tipo FDM encontrados na literatura, e como os materiais impressos no LADES com o intuito de obter máximo desempenho mecânico se comparam com esses materiais. Nestes gráficos, como forma de identificação, resultados de estudos com ABS estão com nome e referência em cor azul e marcados com x azuis, enquanto os resultados com PLA estão com nome e referências em cor preta e marcados com bolas azuis. Os resultados obtidos neste estudo têm seus nomes em negrito, são marcados em x e bola pretos e com linhas trespassando todo o gráfico para facilitar a comparação do resultado de cada estudo com o dos materiais deste trabalho, a linha preta contínua representa o PLA utilizado neste trabalho, enquanto a linha azul pontilhada representa o ABS utilizado neste trabalho.

Nas Tabela 15 e Tabela 16 constam os valores medidos em testes em laboratório das propriedades de tração e flexão das mesmas referências que as **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com os parâmetros de impressão dos corpos de prova e suas respectivas propriedades mecânicas.

Já a Tabela 17 mostra a média e desvio padrão das propriedades mecânicas comparadas entre si e, principalmente, com a resistência do filamento.

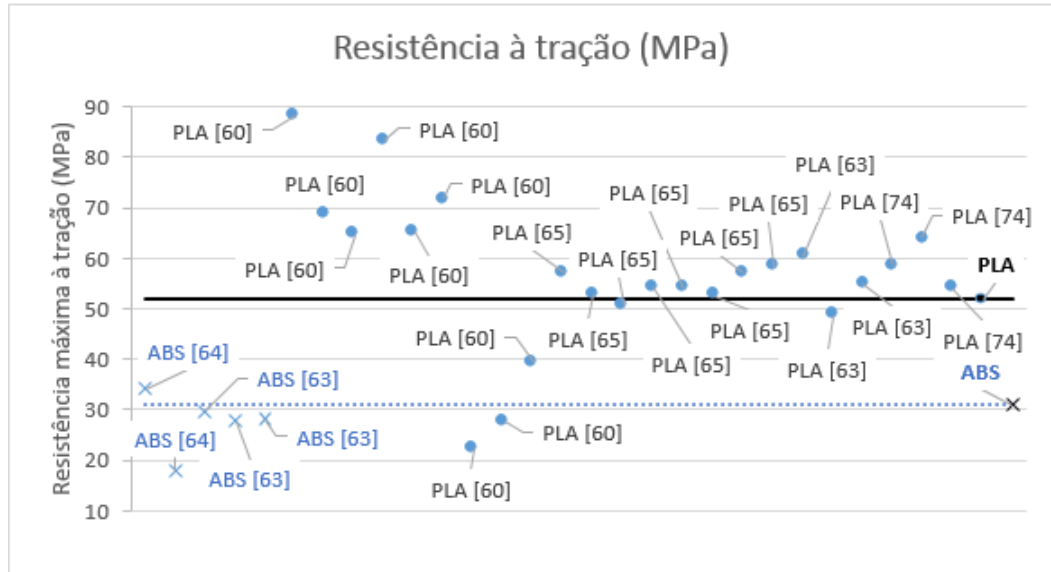


Figura 30 - Gráfico comparativo com materiais impressos por FDM encontrados na literatura e como os materiais impressos para este trabalho se comparam quanto à resistência à tração.

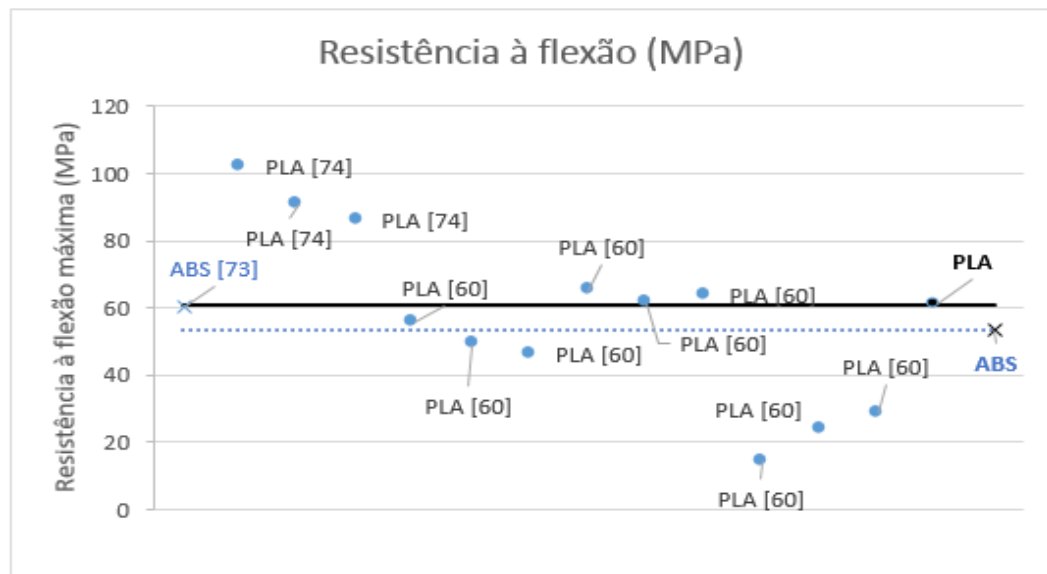


Figura 31 - Gráfico comparativo com materiais impressos por FDM encontrados na literatura e como os materiais impressos para este trabalho se comparam quanto à resistência à flexão.

Tabela 15 - Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de tração.

Material	Parâmetros de impressão		Resistência a tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento (%)	Referência
	Fixos	Variados				
ABS *	<i>Infill: 100% / Ângulo de raster: 0 e 90° variando</i>	<i>Flatwise Upright</i>	33,96 17,73	- -	8,64 2,08	[64]
PLA	<i>Infill: 100% / Flatwise</i>	<i>Ângulo de raster: 0° Ângulo de raster: 45° Ângulo de raster: 90°</i>	58,45 64,03 54,01	3,33 3,60 3,49	2,02 2,50 4,14	[74]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / Flatwise / 80 mm/s</i>	<i>Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm</i>	88,2 68,6 69,8 64,6	4,409 3,892 4,030 3,622	- - -	[60]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / On- edge / 80 mm/s</i>	<i>Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm</i>	83,4 65,4 66,1 71,9	4,040 3,976 3,955 3,934	- - -	[60]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / Upright / 80 mm/s</i>	<i>Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm</i>	22,4 27,5 32,6 39,5	3,266 3,796 3,668 3,468	- - -	[60]

PLA ***	<i>Infill</i> : 100% Temperatura de Extrusão: 190 °C Cama de impressão: 60 °C	Cor: natural (Cristalinidade 0,93%) Cor: preto (Cristalinidade 2,62%) Cor: cinza (Cristalinidade 4,79%) Cor: azul (Cristalinidade 4,85%) Cor: branco (Cristalinidade 5,05%)	57,16 52,81 50,84 54,11 53,97	- - - - -	2,35 2,02 1,98 2,13 2,22	[65]
PLA ***	<i>Infill</i> : 100% Cama de impressão: 60 °C Cor: branco	Temperatura de Extrusão: 200 °C (Cristalinidade 4,6%) Temperatura de Extrusão: 210 °C (Cristalinidade 13,9%) Temperatura de Extrusão: 215 °C (Cristalinidade 5,9%)	52,6 57,2 58,3	- - -	- - -	[65]
Ma- te- rial	Parâmetros de impressão		Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento (%)	Refe- rên- cias
	Fixos	Variados				
PLA	<i>Infill</i> : 100% <i>Flatwise</i>	Espessura de camada: 0,2 mm Espessura de camada: 0,3 mm Espessura de camada: 0,4 mm	60,4 48,5 54,9	3,48 3,34 3,286	1,96 1,71 1,94	[63]
ABS	<i>Infill</i> : 100% <i>Flatwise</i>	Espessura de camada: 0,2 mm Espessura de camada: 0,3 mm Espessura de camada: 0,4 mm	29,7 27,6 28,2	1,839 1,736 1,875	2,01 2,31 1,97	[63]

Tabela 16 - Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de flexão.

Material	Parâmetros de impressão		Resistência a flexão (MPa)	Módulo de flexão de Young (GPa)	Alongamento (%)	Referências
	Fixos	Variados				
ABS	<i>Infill: 100% / Ângulo de raster: 0° / Flatwise</i>	-	60	1,75	3	[73]
PLA	<i>Infill: 100% / Temperatura de Extrusão: 230 °C / Cama de impressão: 65 °C / Taxa de alimentação: 100 mm/s / Flatwise</i>	<i>Ângulo de raster: 0° Ângulo de raster: 45° Ângulo de raster: 90°</i>	102,2 90,65 86,14	3,187 2,985 3,0	10,6 7,8 4,5	[74]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / Flatwise / 80 mm/s</i>	Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm	56,0 49,0 51,4 46,2	1,596 1,434 1,518 1,246	- - -	[60]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / On-edge / 80 mm/s</i>	Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm	65,0 61,3 61,0 64,2	1,852 1,729 1,519 1,886	- - -	[60]
SM ART FIL ® PLA **	<i>Air gap: 0 mm / Temperatura de Extrusão: 210 °C / Ângulo de raster: 0° / Upright / 80 mm/s</i>	Espessura de camada: 0,06 mm Espessura de camada: 0,12 mm Espessura de camada: 0,18 mm Espessura de camada: 0,24 mm	14,3 23,8 19,4 28,4	1,318 1,392 1,302 1,414	- - -	[60]

*O material utilizado por Torrado et al. [64] foi fornecido por SABIC (Pittsfield, MA, EUA).

**O material utilizado por Chacón et al. [60] foi o SMART FIL® PLA (Smart Materials 3D, Espanha).

***O material utilizado por Wittbrodt e Pearce [65] foi disponibilizado por Luizbot (EUA).

Tabela 17 - Média e desvio padrão das propriedades mecânicas comparadas entre si e com a resistência do filamento.

Material	Propriedades de Tração			Propriedades de Flexão	
	Tensão Média Trativa (MPa)	Comparação com PLA	Resistência a Tração dos Filamentos (MPa)	Tensão Média Fletora (MPa)	Comparação com PLA
PLA	51,88 ±3,92	-	53	60,85 ±1,57	-
ABS	31,03 ±0,11	- 40%	29	53,32 ±1,54	- 12%
Tritan	37,79 ±1,45	- 27%	43	43,75 ±0,83	- 28%

Os CPs de ABS testados por Torrado et al. [64] obtiveram desempenho ligeiramente superior aos CPs de ABS testados neste trabalho, e compararam CPs impressos nas orientações *Flatwise* e *Upright* e como diversos outros trabalhos já mencionados constataram que a orientação *Flatwise* é a que obtém melhor desempenho mecânico. O filamento utilizado por Torrado et al. foi o SABIC Cyclicac® MG37CR ABS que tem tensão de escoamento de 41 MPa e tensão na quebra de 32 MPa, superior aos 29 MPa de resistência a tração do filamento utilizado no LADES utilizado neste trabalho.

Os CPs de PLA testados por Chacón et al. [60] tiveram desempenho muito superior devido ao material utilizado, o filamento SMART FIL® PLA possui resistência a tensão de 110 MPa, muito superior aos 53 MPa do material utilizado pelo LADES. Além disso o trabalho de Chacón et al. [60] pôde imprimir em espessuras que não seriam possíveis para nosso trabalho devido ao diâmetro do bico de extrusão disponível para uso. Nesse trabalho os autores estudaram os efeitos da orientação de impressão, espessura de camada e taxa de alimentação nas propriedades mecânicas de amostras de PLA. Além dos resultados para diferentes orientações e espessuras de camadas amostrados nas Tabela 15 e Tabela 16 para a taxa de alimentação de 80 mm/s também foram testadas as taxas de 20 e 50 mm/s. No estudo conclui-se que a orientação do tipo *On-edge* demonstrou o melhor desempenho em resistência, ductilidade e rigidez, pois teve valores ligeiramente inferiores que o tipo *Flat* para tração, e superiores para flexão. Além disso, a influência da espessura de camada variou

dependendo da orientação de impressão como já foi comentado anteriormente. A espessura de 0.06 mm resultou na resistência a tração mais alta na orientação do tipo *Flatwise* e na resistência a flexão mais baixa na orientação *Upright*. Os autores informaram que a ductilidade diminuiu conforme a espessura de camada aumentou. Nas orientações *On-edge* e *Flat* a taxa de alimentação teve pouco efeito nas resistências a tração e flexão, exceto na taxa de 80 mm/s que teve ótimos resultados com carga trativa. A ductilidade diminuiu conforme a taxa de alimentação aumentou. Os tempos de impressão para a taxa de 20 mm/s foram mais rápidos na orientação *Flat*, já nas taxas de 50 e 80 mm/s foram mais rápidos na orientação *On-edge*. Isso acontece porque o bico de extrusão se move menos e logo fica mais eficiente em relação ao tempo.

Wittbrodt e Pearce [65] realizaram testes de tração com filamentos processados a partir de PLA tipo 4043D com tensão de escoamento de 60 MPa e tensão na quebra de 53 MPa, superior a resistência a tração de 53 MPa do PLA utilizado no LADES. Para os autores há uma temperatura ótima para cada material, mas reforçam a necessidade de mais estudos.

Outros autores não especificaram o fabricante ou a classe de PLA e ABS utilizados, informando apenas se tratar de PLA ou ABS mais comuns no mercado.

4.2. Discussão

Nesta seção será discutido os resultados expostos no tópico anterior, explicando e apontando as particularidades dos casos trativos. A inspeção dos corpos de prova após os testes, sobretudo na região fraturada, acompanhada de um gráfico contendo os dados coletados, são indicativos majoritários de como se desenvolveu a mecânica da fratura e justificam as propriedades alcançadas. Nesse sentido, deve-se compreender algumas das qualidades que influenciam as falhas, como o comportamento mecânico de um material polimérico depositado em camadas, além dos parâmetros de impressão que o influenciam.

Os corpos de prova impressos por manufatura aditiva, diferente de um plástico extrudado, agem como se fossem compostos por um aglomerado de filamentos ou fibras. Foi estudado que em amostras com orientação de impressão XYZ ou YXZ e ângulo de *raster* 0° as fibras são submetidas a carga majoritariamente trativa durante o teste de tração. Dessa forma, com o princípio da ruptura do que será chamado de “fibras”, o resto da peça é sobrecarregada, resultando em uma falha catastrófica transcamadas, que ocorre quando as camadas impressas se rompem em sucessão [11]. Os vazios internos favorecem a propagação e crescimento de trincas, enquanto as fibras suportam a maior parte da carga trativa. Por essa

razão, no momento do rompimento a fratura tem característica frágil, mesmo depois de uma grande deformação plástica que denotaria uma fratura dúctil.

4.2.1. PLA

Considerando todas as características do processo explicitadas anteriormente, é possível concluir que, por ter sido impresso em camadas, o espécime age como um aglomerado de filamentos, aqui denominados como fibras. O comportamento geral do PLA antes do momento da fratura é característica de um material polimérico frágil, como pode ser observado pelo perfil das curvas mostradas na Figura 32. A queda brusca da resistência depois de alcançar a carga máxima expressa o momento da ruptura, que gera uma fratura de caráter majoritariamente frágil, o que é verificado pela conservação das dimensões do espécime na vista superior e pela superfície de fratura brilhante com planos lisos, sem escoamento, apresentada na Figura 33.

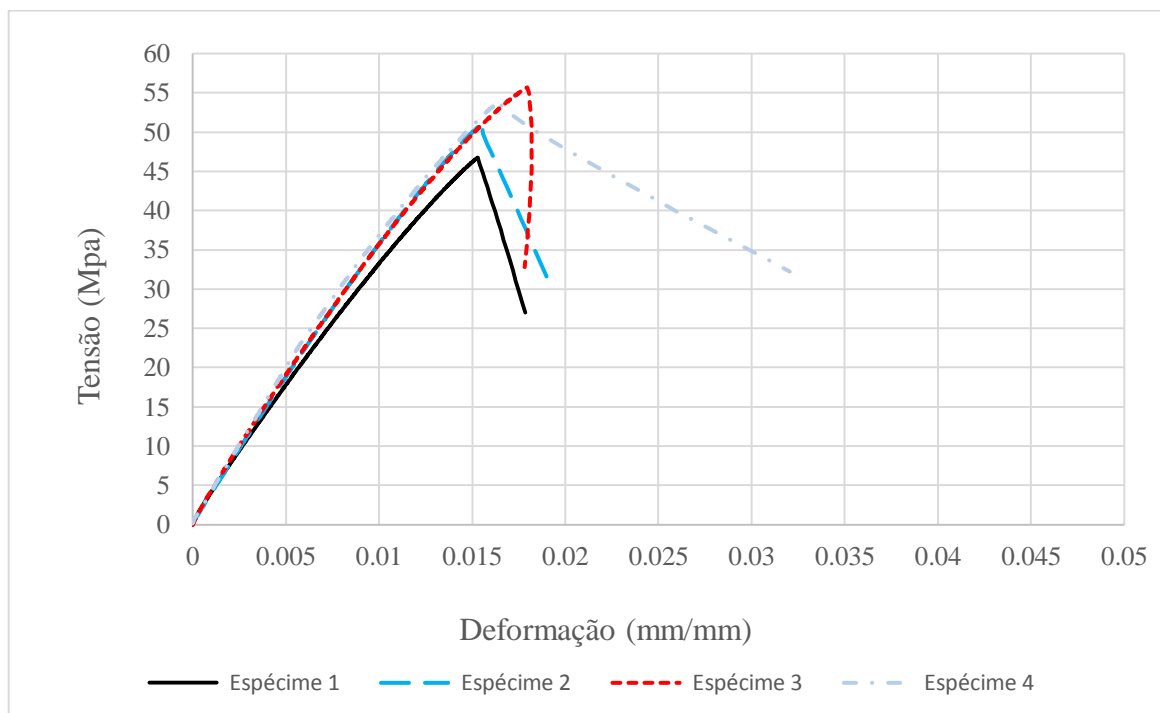


Figura 32 - Curvas de tensão x deformação para os testes de tração com espécimes de PLA.

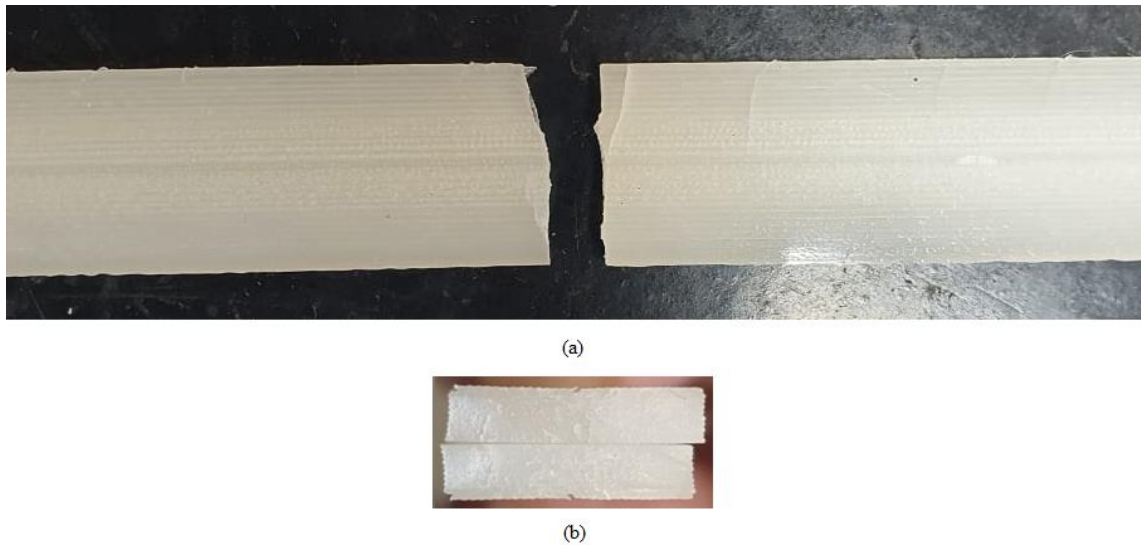


Figura 33 – Espécime de PLA fraturado após teste de tração, em que (a) vista de topo e (b) vista da região da fratura.

Essa dedução pode ser comprovada pela inspeção meticulosa da interface de fratura na seção transversal do espécime na figura 34 (a) e pela micrografia da região figura 34 (b), ambos ilustrados na Figura 34. A avaliação revela que, na verdade, uma parcela da falha se mostra dúctil, caracterizado pela distorção da seção transversal, geralmente normal ao comprimento. Já a micrografia indica que a temperatura de impressão foi o suficiente para proporcionar uma boa adesão entre os filamentos, além de ilustrar os inevitáveis vazios entre filamentos criados na fabricação.

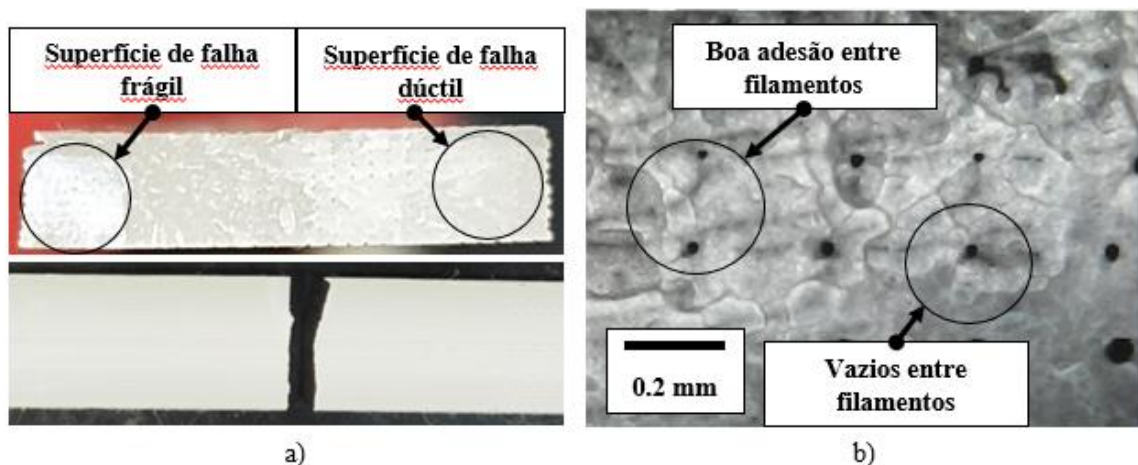


Figura 34 - Falhas trativas representativas de: a) Seção transversal do espécime de PLA, b) Micrografia do PLA.

O modo de falha ocorrido nos CPs de PLA, segundo a classificação da norma ASTM D3039, foi do tipo AGM. Essa classificação foi dada com base em inspeção visual, considerando que a fratura foi angulada, perpendicular à direção aplicada da carga e no meio

da área de medição dos *strain gage*'s. As letras da sigla, de acordo com a norma, podem ser entendidas como: a letra A corresponde a *Angled* (angulado), a letra G corresponde a *Gage* (medida) e a letra M corresponde a *Middle* (meio) [70]. Na Figura 35 pode ser observado o esquema de uma possível fratura em um corpo de prova submetido a esforços trativos [70].



Figura 35 - Modo de fratura do tipo AGM [70].

A tensão fletora exercida no material foi caracterizada no gráfico na figura 36.

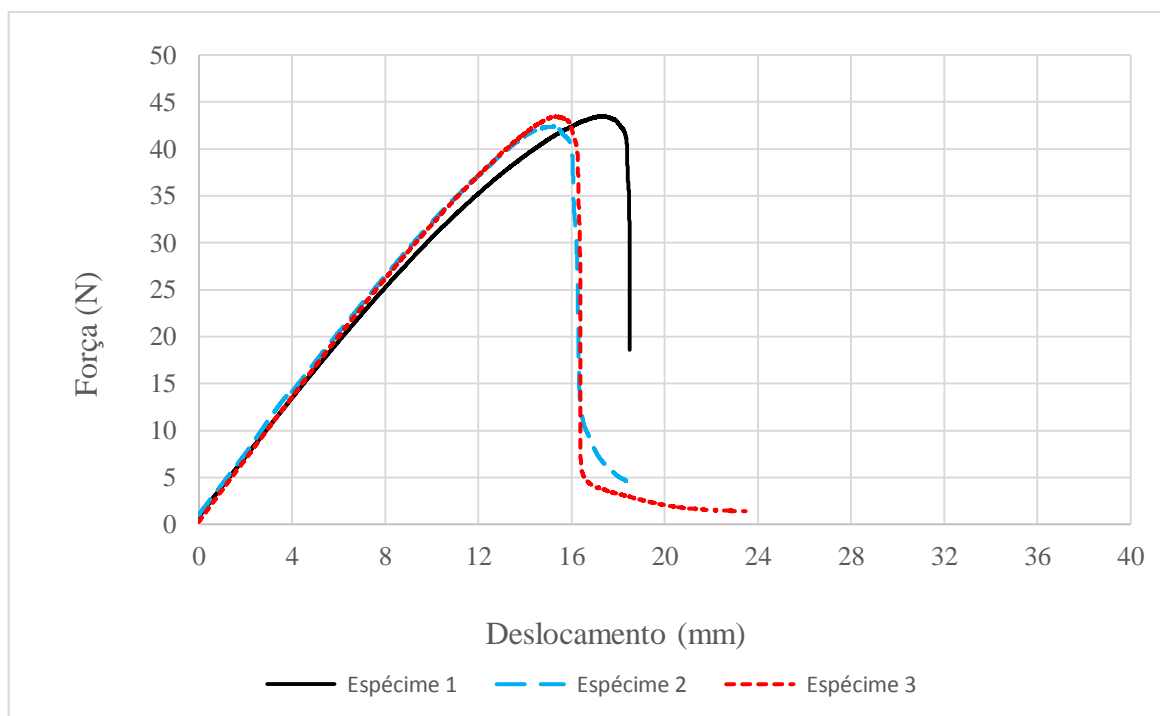


Figura 36 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de PLA.

4.2.2. ABS

Considera-se mais uma vez que, por ter sido impresso em camadas, o espécime age como vários filamentos aglomerados. O comportamento geral do ABS antes do momento da fratura é característico de um material polimérico dúctil, como pode ser observado na Figura 37 pelo perfil de curvas alongadas, com um grande platô de resistência constante enquanto o material deforma, logo após atingir a tensão de escoamento. Apesar de apresentar bom escoamento, houve uma transição dúctil-frágil no momento da ruptura depois do segundo pico de resistência, provocando uma fratura de caráter frágil. A redução da seção transversal causada pelo empescoamento na deformação e a falha são verificados pela vista superior e superfície de fratura brilhante com planos lisos, sem distorção, apresentada na Figura 38. Esse é o tipo de falha esperada para peças impressas e que os espécimes de ABS obtiveram uma deformação 5 vezes maior que os de PLA, porém uma resistência menor, demonstrando a tendência de que um ganho considerável na ductilidade seria acompanhado de queda na resistência.

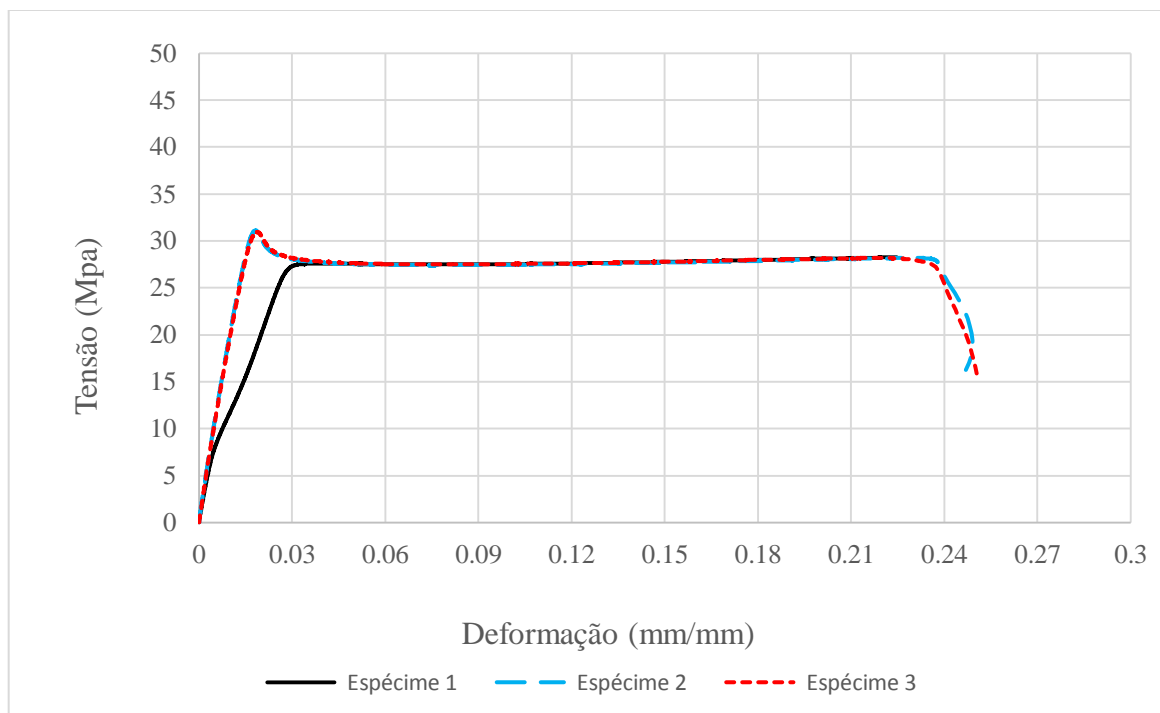


Figura 37 - Curvas tensão x deformação para os testes de tração com CPs de ABS.

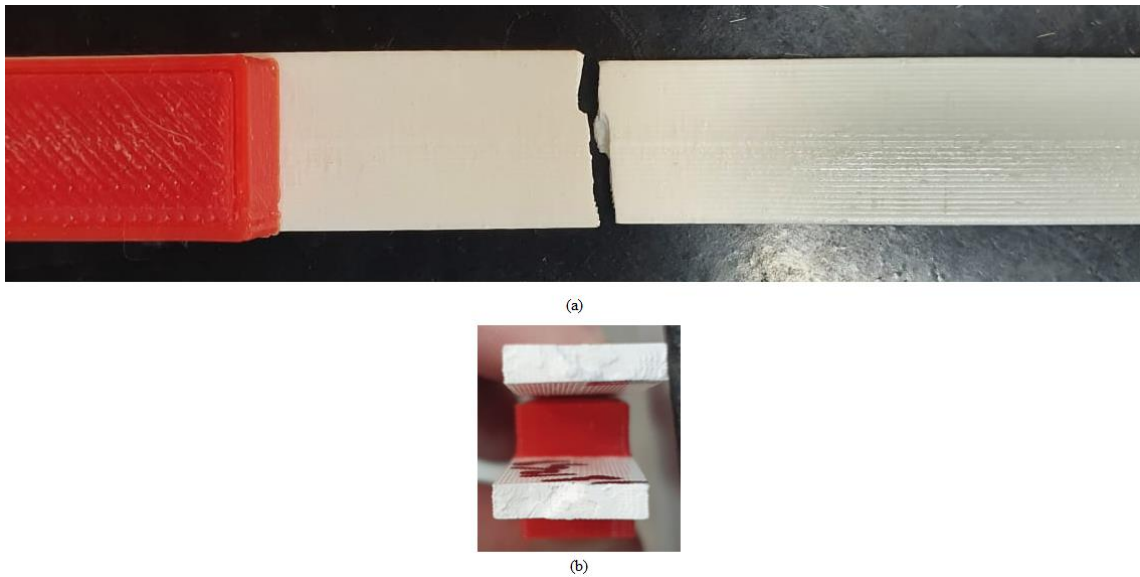


Figura 38 - Corpo de prova de ABS fraturado após teste de tração, em que (a) vista de topo e (b) vista da região da fratura.

Esse raciocínio também pode ser comprovado pela inspeção minuciosa da interface de fratura na seção transversal do espécime e pela micrografia da região, ambos ilustrados na Figura 39. A avaliação revela a falha frágil, sem distorção, na qual a região central parece ter sofrido uma sobreposição de raster. Já a micrografia registra o caminho percorrido pela trinca e indica que a temperatura de impressão foi tal que proporcionou uma boa adesão entre os filamentos, além de ilustrar os inevitáveis vazios entre filamentos criados na fabricação.

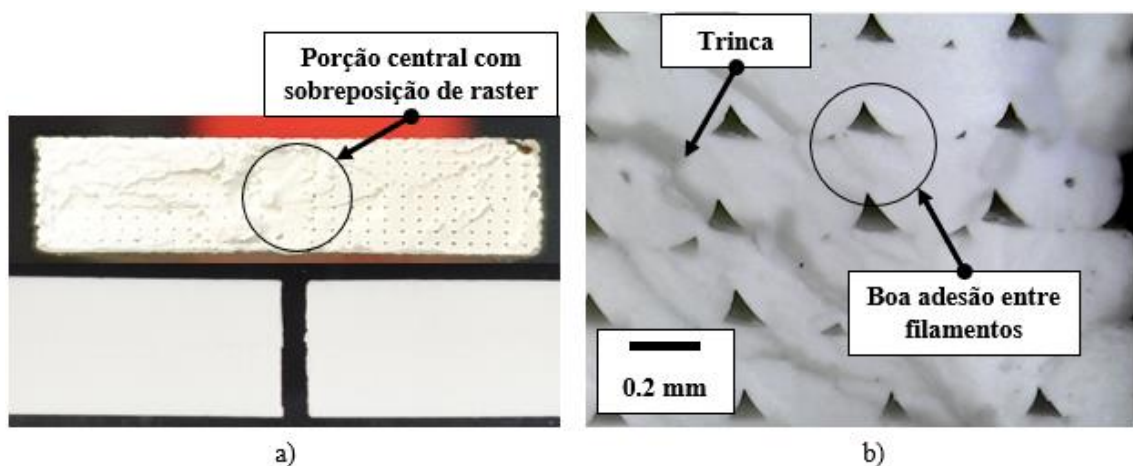


Figura 39 - Falhas trativas representativas de: a) Seção transversal do espécime de ABS, b) Micrografia do ABS.

O modo de falha apresentado pelos CPs de ABS, segundo a classificação da norma ASTM D3039, foi do tipo LGM. Essa classificação foi dada com base em inspeção visual, considerando que a fratura foi reta, perpendicular à direção da aplicação da carga e no meio

da área de medição dos *strain gage*'s. As letras da sigla, segundo a norma, podem ser entendidas como: a letra L corresponde a lateral, a letra G corresponde a *Gage* (medida) e a letra M corresponde a *Middle* (meio) [70]. Na Figura 40 pode ser observado o esquema de uma possível fratura em um corpo de prova submetido a esforços trativos [70].



Figura 40 - Modos de fratura do tipo LGM [70].

A tensão fletora exercida no material foi caracterizada no gráfico na figura 41.

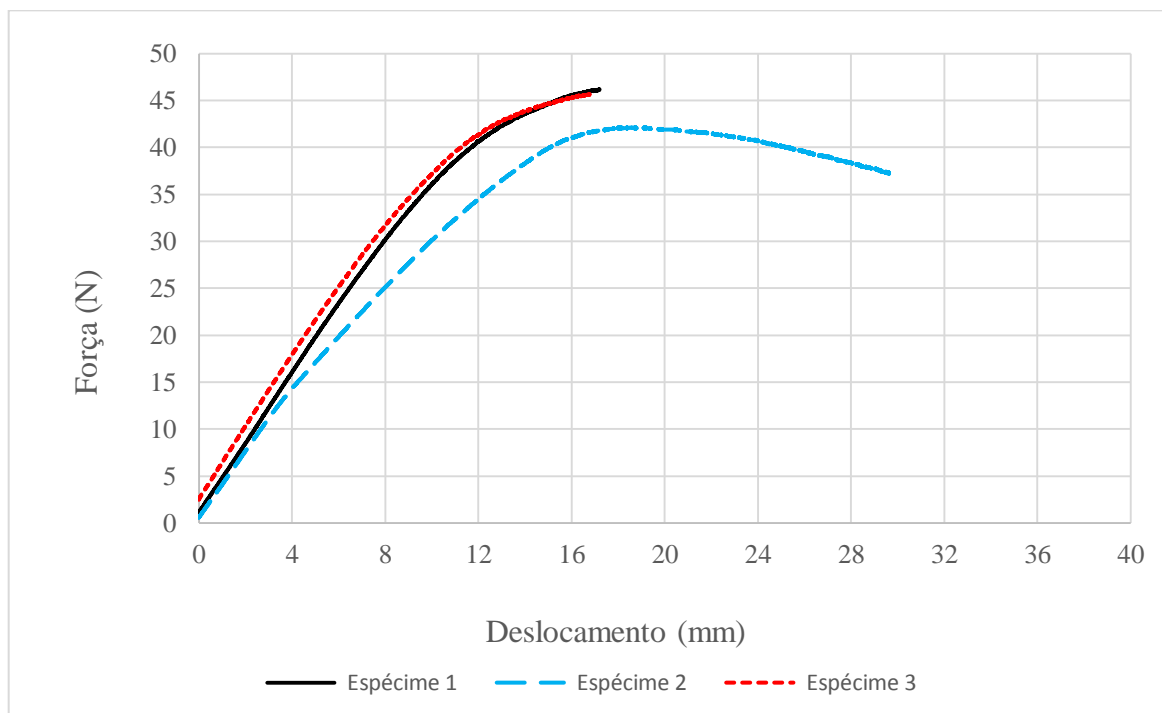


Figura 41 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de ABS.

4.2.3. Tritan

De imediato, as curvas na Figura 42 mostram que os espécimes de Tritan tiveram comportamento dúctil, com uma deformação plástica bastante similar à do ABS. É de bom grado assumir novamente que o espécime age como vários filamentos aglomerados devido à impressão. Entretanto, no caso do Tritan, a Figura 43 mostra que a ruptura das suas fibras não deixa uma superfície que torne aparente o modo de fratura, além de ressaltar que, diferente dos outros materiais, ocorreu delaminação entre as fibras na seção longitudinal, provocada pelo fenômeno chamado de fibrilação. O rompimento foi gradual, com as fibras das camadas internas dos espécimes rompendo primeiro.

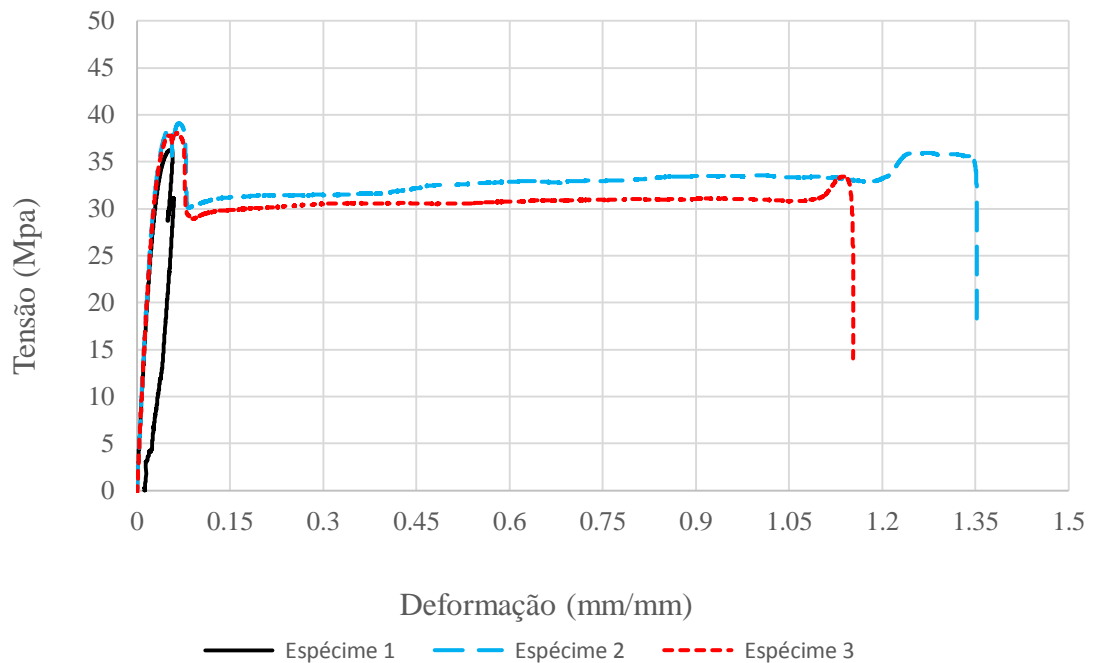


Figura 42 - Curvas tensão x deformação para os testes de tração com CPs de Tritan.

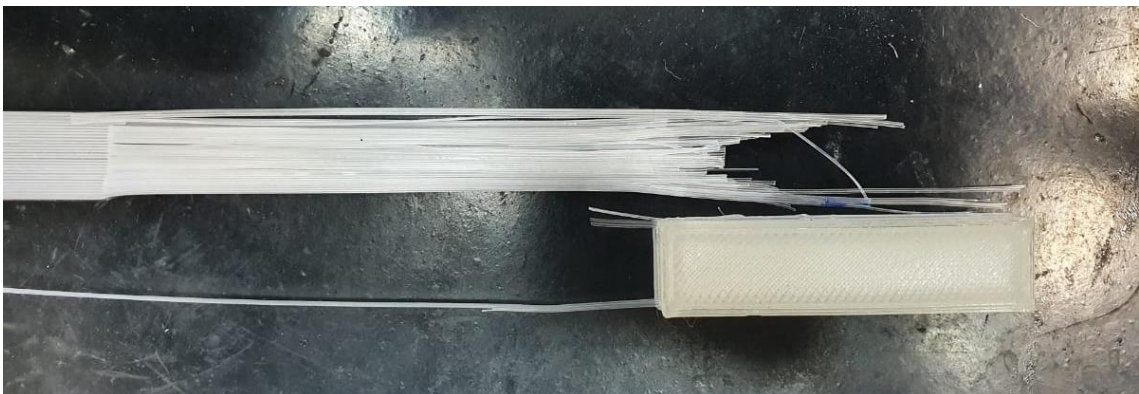


Figura 43 - Corpo de prova de Tritan fraturado após teste de tração.

Esse argumento é validado pela investigação minuciosa da fratura do espécime, ilustrada em detalhe na Figura 44 (a). A inspeção revela que houve empescoçamento, ou seja, uma deformação plástica prévia à ruptura dos filamentos. Em contraste, a micrografia confirma que houve a propagação de trincas a partir dos vazios, induzindo uma transição dúctil-frágil parcial do modo de falha bem demarcada por duas zonas dentro de um mesmo filamento. Além do mais, há grandes vazios entre esses, o que indica a falta de uma união plena dos filamentos durante a fabricação, resultado da escolha para temperatura de impressão. Aliás, é necessário ressaltar que essas micrografias foram verificadas para os testes de Tritan a 280°C, em que comportamento mecânico em si não foi muito alterado.

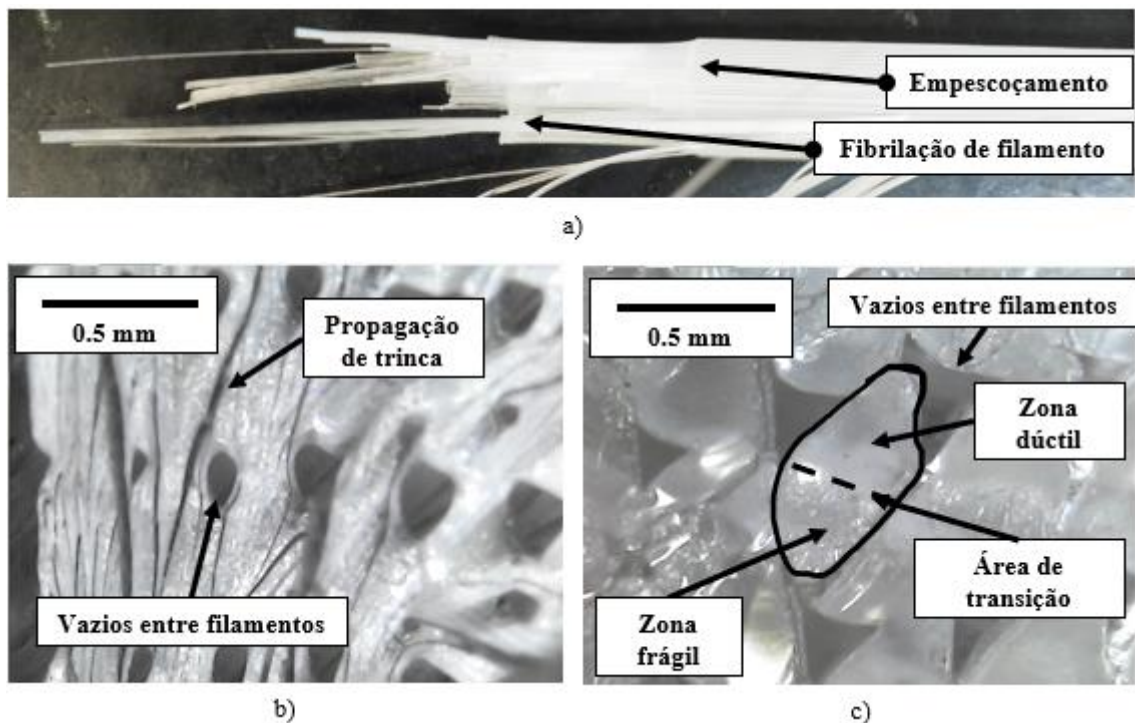


Figura 44 - Falha trativa representativa de: (a) Ruptura por fibrilação do Tritan a 250°C, (b) e (c) Micrografias do Tritan a 280°C.

O modo de falha apresentado pelos CPs de Tritan, segundo a classificação da norma ASTM D3039, foi majoritariamente SGM. Tendo como base inspeção visual, foi considerado que a fratura se propagou em seção quase reta, no meio da área de medição dos *strain gage*'s. As letras da sigla, segundo a norma, podem ser entendidas como: a letra S corresponde a *long. Splitting* (divisão longitudinal), a letra G corresponde a *Gage* (medida) e a letra M corresponde a *Middle* (meio) [70]. Na Figura 45 pode ser observado o esquema de uma possível fratura em um corpo de prova submetido a esforços trativos [70].



Figura 45 - Modos de fratura do tipo SGM [70].

Tendo em vista os resultados usuais obtidos para o Tritan, recorreu-se à gravação do ensaio para testemunhar o fenômeno ocorrido. A Figura 46 abaixo mostra o posicionamento da amostra na máquina INSTRON, na qual é registrado o deslocamento sob tração em função do tempo.

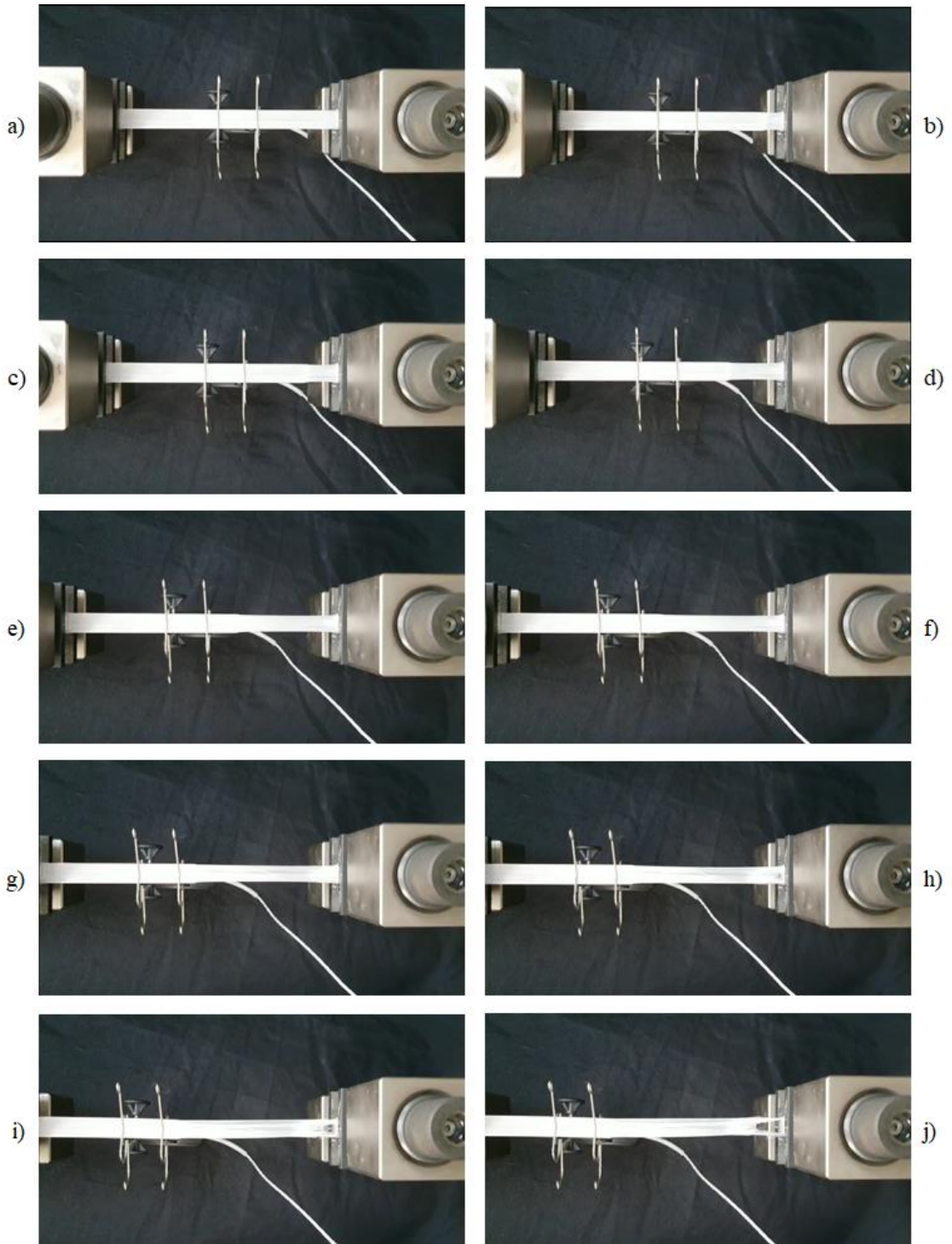


Figura 46 - Deslocamento no ensaio de tração em função do tempo (t) para o teste de Tritan:
 a) $t=0s$, b) $t=15s$, c) $t=30s$, d) $t=60s$, e) $t=120s$, f) $t=150s$, g) $t=180s$, h) $t=195s$, i) $t=210s$, j) $t=240s$.

Inicialmente, em 0 segundos, tem-se a amostra intacta. Ela atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente até que, em $t=180s$, há o princípio do rompimento das fibras (ou filamentos unidos) da peça polimérica – produto da fibrilação – até que em $t=195s$ o crescimento da trinca se torna evidente. Quando $t=240s$, a amostra encontra-se em sua

configuração final. As Figuras 47 a 50 exibem com detalhe esses instantes de interesse. A duração total foi de 280 segundos.

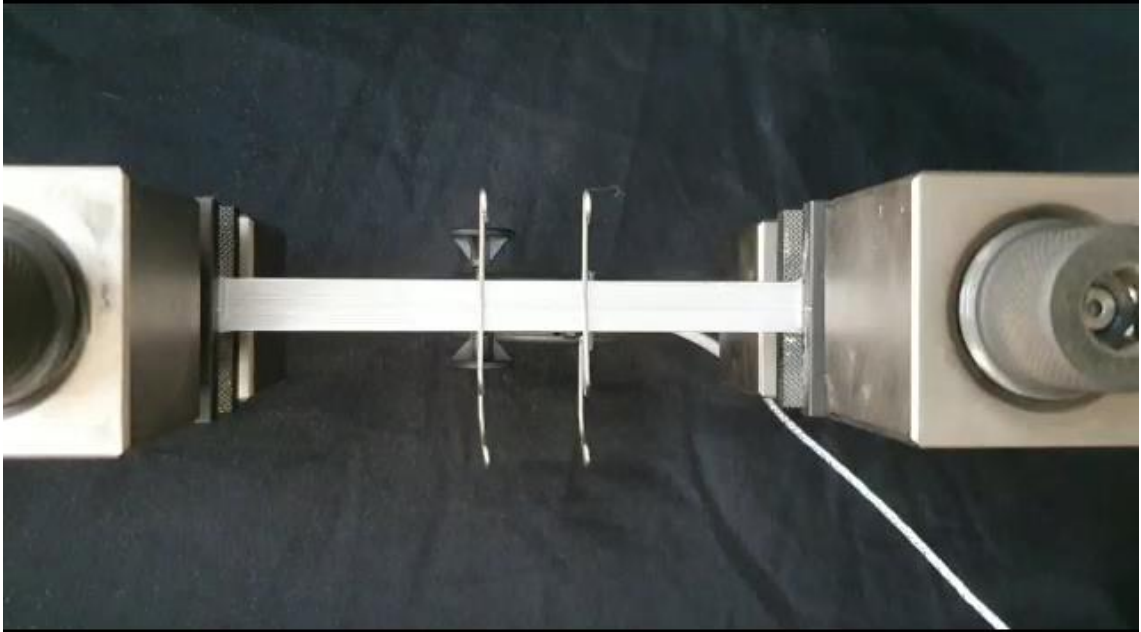


Figura 47 - Configuração inicial da amostra ($t=0s$), representado por (a).

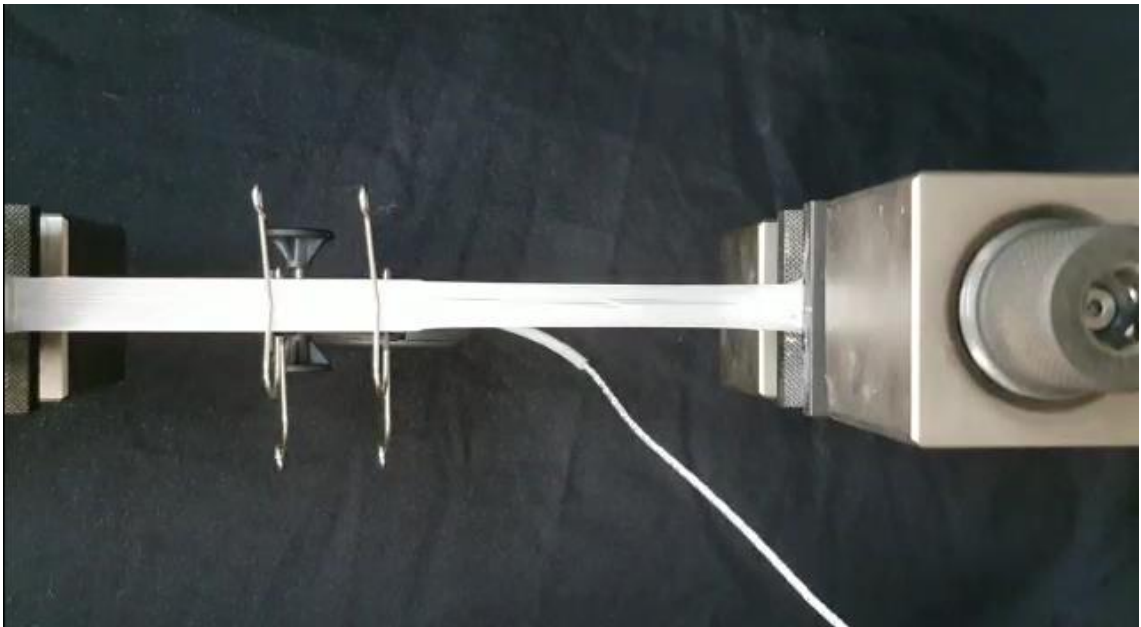


Figura 48 - Configuração pré-ruptura da amostra ($t=180s$), representado por (g).

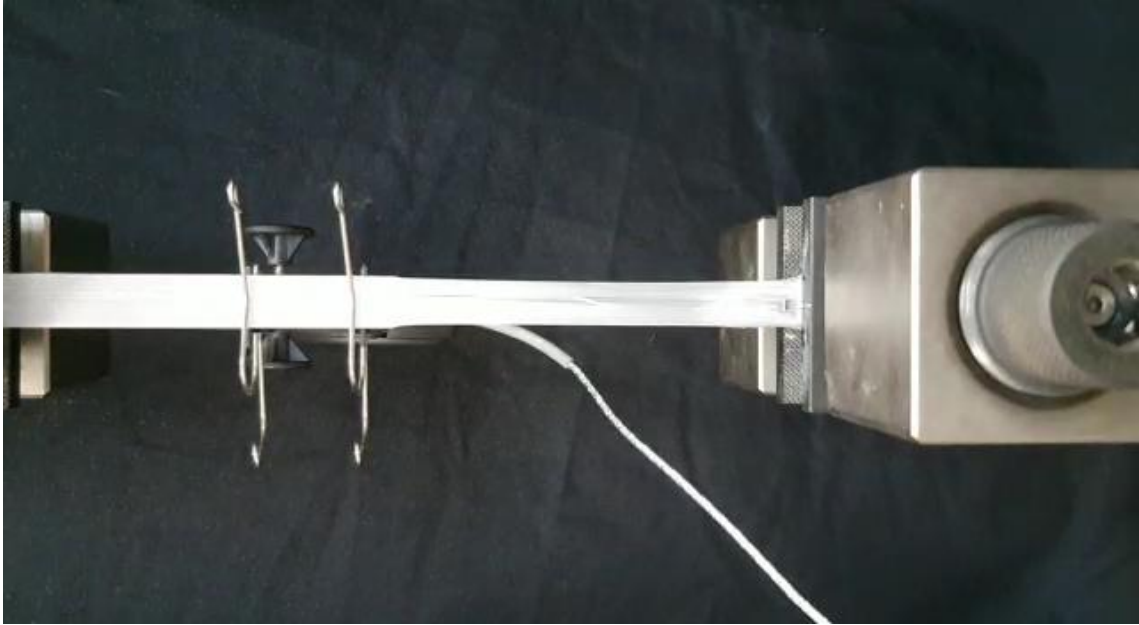


Figura 49 - Configuração após a ruptura da amostra ($t=195s$), representado por (h).

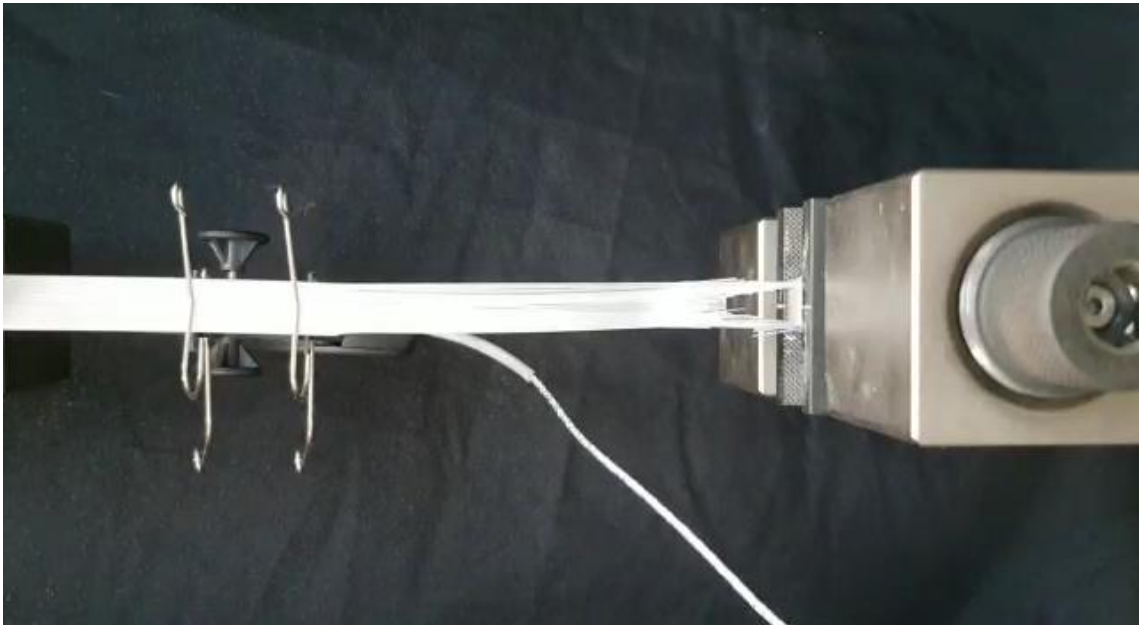


Figura 50 - Configuração final da amostra ($t=240s$), representado por (j).

A tensão fletora exercida no material foi caracterizada pelo gráfico na figura 51:

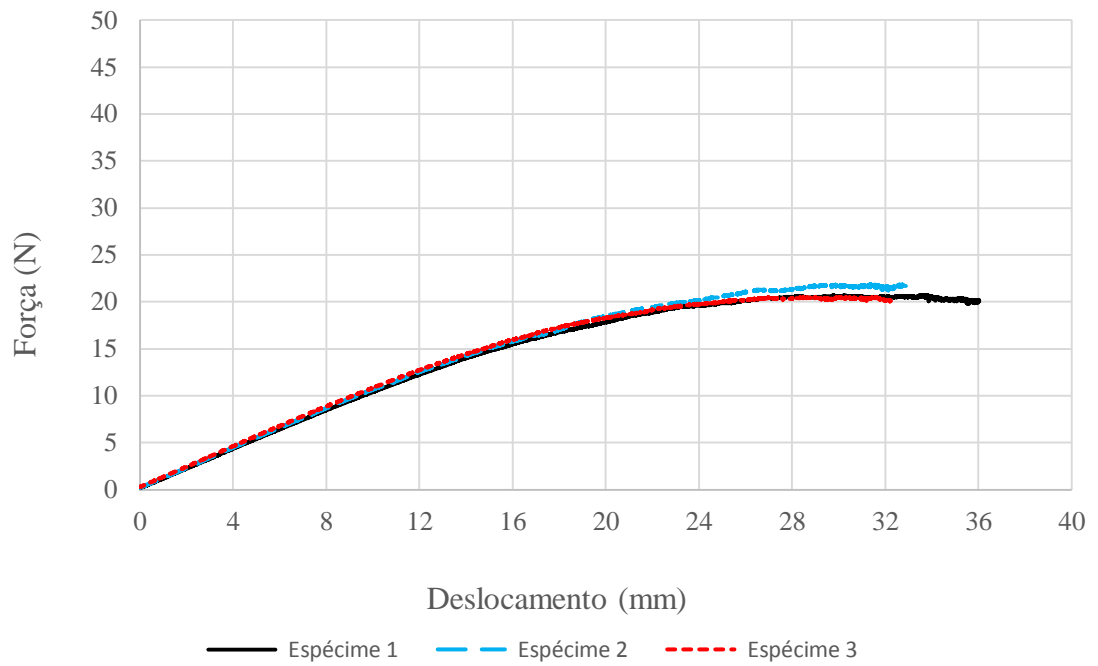


Figura 51 - Curvas carga x deslocamento para os testes de flexão com CPs de Tritan.

4.2.4. Tritan a 280 °C

Os Corpos de Prova (CPs) impressos em Tritan a 280°C passaram por ensaios de tração, em que as seguintes propriedades mecânicas trativas foram medidas: tensão máxima de 38 MPa, deformação máxima de 114,41% e módulo de Young de 1.36 GPa. A Figura 52 retrata uma curva modelo tensão-deformação correspondente a uma das amostras.

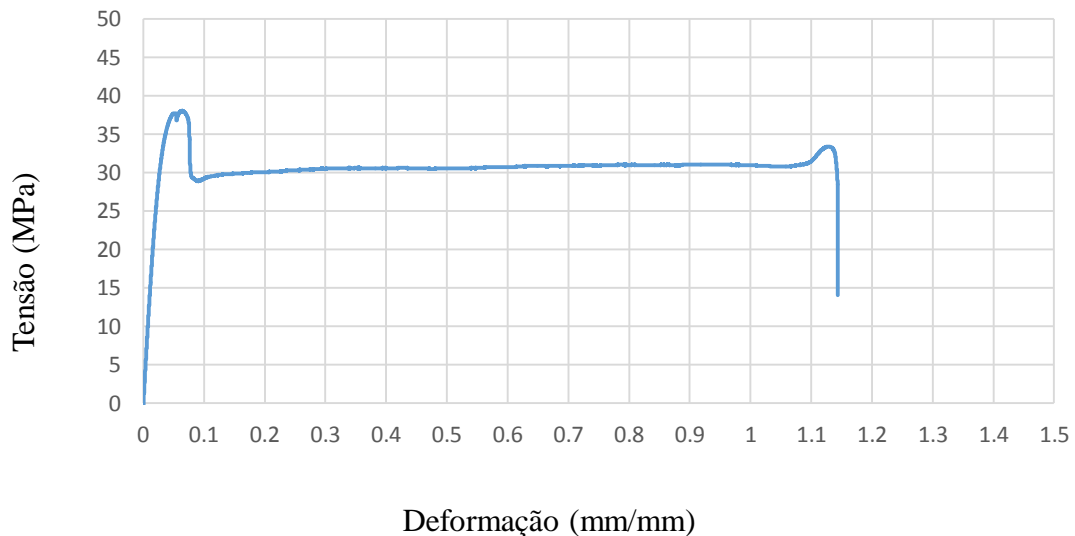


Figura 52 - Curva tensão x deformação para o teste de tração com CP de Tritan a 280°C.

Os *strain gage*'s foram retirados após atingir sua capacidade máxima de medição após os 0,05 (mm/mm) de deformação, os CPs continuaram a deformar plasticamente. Portanto, para além desse valor, a deformação foi estimada por $\Delta L/L_0$.

O motivo por trás deste teste excepcional foi a temperatura de extrusão recomendada para Tritan, que se situava num patamar acima dos parâmetros utilizados anteriormente. Por isso, um último grupo foi impresso, demonstrando um comportamento similar ao de testes anteriores, exceto que o modo de falha passou a ser frágil. Essa semelhança com o Tritan impresso a 250°C leva a crer que o ajuste da temperatura “ideal” não provoca nenhuma melhora notável mecanicamente, mas permite visualizar melhor a microestrutura, o que resulta de uma melhor adesão entre camadas.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, a influência do material e os parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças termoplásticas produzidas por manufatura aditiva foi investigado. As propriedades mecânicas das partes impressas dependem dos parâmetros do processo. Os parâmetros utilizados nesse trabalho tiveram boa relação entre tempo de impressão e as propriedades mecânicas das peças fabricadas por MA. As propriedades mecânicas dos materiais de MA foram otimizadas a fim de estimular seu uso em novas aplicações na indústria.

O efeito dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas foi estudado para termoplásticos extrudados pelo método de Modelagem por Fusão e Deposição em três materiais diferentes. O critério de avaliação dos resultados foi contabilizado em termos das propriedades para tração e flexão das peças impressas.

Além do mais, foram selecionados parâmetros de impressão que maximizassem as propriedades, configuradas no software gratuito de *slicing* Simplify3D®, verificadas através de testes laboratoriais para ambos os modos de carregamento em uma máquina de ensaios universal de bancada com coluna INSTRON 5966. Os corpos de prova foram fabricados pela máquina de modelo comercial GTMAX3D CORE A1V2 em PLA, ABS e Tritan, todos fornecidos pela GTMax3D (Americana, SP, Brasil).

As propriedades mecânicas de tração e flexão medidas nos testes em laboratório para cada material foram comparadas com resultados encontrados na literatura e com os dados comerciais disponibilizados pelos fabricantes. Além disso constatou-se se as diferenças encontradas devem-se ao material utilizado ou aos parâmetros de impressão e quais são os principais fatores.

As superfícies de ruptura foram observadas através de inspeção visual e de micrografias.

Por fim, para os parâmetros de impressão propostos nesse estudo, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a) Dentre os materiais testados, aquele de maior resistência mecânica, nesse caso, resistência à tração máxima média, foi o PLA, com 51.88 MPa, seguido pelo Tritan, com 37.79 MPa, e, por último, o ABS com 31.03 MPa. O material de maior deformação máxima média durante testes de tração foi o Tritan com 85.50%, seguido pelo ABS com 24.98% e por último o PLA com 2.18%. O material com maior Módulo

de Young para tração foi o PLA com 3.77 GPa, depois o ABS com 2.18 GPa e o Tritan com 1.38 GPa;

- b)** Quanto a resistência à tensão máxima média de flexão, o melhor desempenho foi novamente o do PLA com 60.85 MPa, enquanto o ABS obteve 53.32 MPa e o Tritan 43.75 MPa. O material com maior deformação máxima média nos testes de flexão foi o ABS com 4.06%, com desempenho similar ao Tritan com 4.03% e por último o PLA com 2.51%. Dos Módulos de Young para flexão calculados o maior foi o do PLA com 3.88 GPa, para o ABS foi calculado 1.60 GPa e para o Tritan 1.26 GPa.
- c)** No geral, o PLA apresentou maior resistência mecânica, ao passo que ABS e Tritan apresentaram resistência similar. O Tritan é o material com maior capacidade de deformação, enquanto o PLA é o que tem menor capacidade de deformação.
- d)** Quando comparados com materiais poliméricos fabricados por injeção, observou-se que os corpos de prova de PLA impressos neste trabalho apresentaram desempenho similar, já que os 51,88 MPa de tensão trativa máxima média medidos se encaixam no intervalo entre 30 e 63 MPa que os materiais injetados apresentam [63]. Por outro lado, os corpos de prova de ABS impressos neste trabalho tiveram desempenho inferior, com 31,03 MPa, comparado ao intervalo de 34 a 43 MPa de tensão trativa dos ABS produzidos por injeção [63].
- e)** Embora os corpos de prova testados tenham apresentado propriedades mecânicas superiores a muitos dos observados em outros estudos, as peças impressas neste projeto ainda tiveram desempenho inferior a alguns dos trabalhos observados na literatura por diversos motivos, alguns deles sendo: limitações quanto aos valores dos parâmetros de impressão, que não puderam ser aplicados neste trabalho tanto por limitações no equipamento como por limitações de tempo, o mais relevante deles sendo a espessura de camada, e os materiais mecanicamente superiores utilizados por alguns pesquisadores, como por exemplo, o SMART FIL® PLA, contendo aditivos que os materiais utilizados neste estudo não possuíam.
- f)** Foi observado que o método de fabricação por impressão 3D modificou o mecanismo de falha dos materiais. Esperava-se que a falha das peças poliméricas se desse por fratura dúctil, porém após análise dos corpos de prova rompidos percebeu-se que no momento da fratura o material se comportava de forma frágil. Essa transição foi favorecida pela fabricação de fibras fundidas empilhadas em camadas, própria da

manufatura aditiva, que cria vazios internos propícios para a propagação e o crescimento de trincas.

5.1. Trabalhos Futuros

Nem todas as possibilidades da utilização de materiais impressos por manufatura aditiva foram exploradas, como foi explicitado no início deste trabalho, os objetivos tiveram que ser adaptados devido à pandemia, considerando isso, algumas sugestões de trabalho futuros são:

- a) Testes mecânicos de tração e flexão com peças impressas em diferentes ângulo de *raster*, espessuras de camada, velocidades e temperaturas de impressão, além de temperaturas de plataforma de impressão.
- b) Registrar as mudanças no comportamento mecânico para filamentos de materiais poliméricos com aditivos.
- c) Efeito que uma camada de material mais rígido na superfície do corpo de prova pode provocar nas propriedades mecânicas da peça.
- d) Utilização de material polimérico impresso por Manufatura Aditiva do tipo FDM para o processo de fabricação de união de materiais. Além disso, alterações na superfície de interface dessa união serão facilitados, permitindo o desdobramento de uma pesquisa mais complexa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui. Additive manufacturing (3D printing): A review of material, methods, application and challenges. *Composites Part B* 143 (2018) 172-196.
- [2] N. Hopkinson, R.J.M. Hague and P.M. Dickens. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. © 2006 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-01613-2.
- [3] Lars Rossing, Rob B.N. Scharff, Bryan Chömpff, Charlie C.L. Wang, Eugeni L. Doubrovski. Bonding between silicones and thermoplastics using 3D printed mechanical interlocking. *Materials and Design* 186 (2020)
- [4] Marlon W. M. Cunico. *Impressoras 3D: O novo meio Produtivo*. Curitiba: Cocep3D Pesquisas Científicas Ltda, 2015.
- [5] Singh, S., S. Ramakrishna and R. Singh, "Material issues in additive manufacturing: A review." *Journal of Manufacturing Processes* vol. 25, 2017, pp.185-200.
- [6] D.K.K. Cavalcanti, M.D Banea, H.F.M. de Queiroz, *Mechanical Characterization of Bonded Joints Made of Additive Manufactured Adherends* © Galati University Press, 2019.
- [7] Harris, M., J. Potgieter, R. Archer and K. M. Arif., Effect of Material and Process Specific Factors on the Strength of Printed Parts in Fused Filament Fabrication: A Review of Recent Developments. *Materials*, vol. 12(10), 2019, Article number 1664.
- [8] GEBHARDT A.; HÖTTER J.S.; *Additive Manufacturing: 3D printing for Prototyping and Manufacturing*, Hanser Publish Munich 2016.
- [9] Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: challenges, trends and applications. *Advances in Mechanical Engineering*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1687814018822880>>. Acesso em 02 de Março, 2020.
- [10] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Compos B Eng* 2017;110:442-58.

- [11] G. D. Goh, T. L. Yap, H. K. J. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh & W. Y. Yeong. Process-Structure-Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* (2019).
- [12] Chohan JS, Singh R, Boparai KS, Penna R, Fraternali F. Dimensional accuracy analysis of couples fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications, *Composites Part B* (2017).
- [13] Mohamed O. A., Masood S. H., Bhowmik J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv Manuf* 2015;3(1):42-53.
- [14] Parandoush P, Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Compos Struct* 2017;182:36-53.
- [15] Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Autom ConStruct* 2004;13(1):5-19.
- [16] Salvatore Brischetto, Alessandro Ciano and Carlo G. Ferro. A multipurpose modular drone with adjustable arms produced via the FDM additive manufacturing process. *De Gruyter Open. Curved and Layer. Struct.* 2016; 3 (1)t 202-213.
- [17] M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S. –H. Ahn, and P.K. Wright, Material characterization of fused deposition modelling (FDM) ABS by designed experiments, *Soc. Manufact. Eng* 10, 13552540210441166 (2001).
- [18] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method, *Proc. Instit. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manufact.* 224, 134-145 (2010).
- [19] A. W. Fatimatuzahraa, B. Farahaina, and W. A. Y. Yusoff. The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of fused deposition modeling parts. Paper presented at the 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), IEEE Malaysia, Langkawi, Malaysia. 25-28 Sept. 2011 (2011).
- [20] C. Ziemian, M. Sharma, and S. Ziemian. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling, *InTech.* 159-180 (2012).

- [21] M. Alhubail. Statistical-Based Optimization of Process Parameters of Fused Deposition Modelling for Improved Quality, University of Portsmouth, Hampshire, England (2012).
- [22] G. C. Onwubolu, and F. Rayegani, Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process, *Int. J. Manufact. Eng.* 2014, 13 (2014).
- [23] F. G Orski, W. Kuczko, and R. Wichniarek, Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling technology, *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 7, 27-35 (2013).
- [24] Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P (2001) Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J Mater Process Technol* 118(1–3):385–388.
- [25] Thrimurthulu K, Pandey PM, Reddy NV (2004) Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *Int J Mach Tools Manuf* 44(6):585–594
- [26] Nancharaiah T, Raju DR, Raju VR (2010) An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *Int J Emerg Technol* 1(2):106-111
- [27] Horvath D, Noorani R, Mendelson M (2007) Improvement of surface roughness on ABS 400 polymer using design of experiments (DOE). *Mater Sci Forum* 561:2389–2392
- [28] Wang CC, Lin TW, Hu SS (2007) Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the gray relational analysis. *Rapid Prototyp J* 13(5):304–315
- [29] Sood AK, Ohdar R, Mahapatra S (2009) Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des* 30(10):4243–4252
- [30] Zhang JW, Peng AH (2012) Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method. *Adv Mater Res* 538:444–447
- [31] Sahu RK, Mahapatra S, Sood AK (2013) A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic. *J Manuf Sci Prod* 13(3):183–197

- [32] Lee B, Abdullah J, Khan Z (2005) Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *J Mater Process Technol* 169(1) :54–61
- [33] Laeng J, Khan ZA, Khu SY (2006) Optimizing flexible behavior of bow prototype using Taguchi approach. *J Appl Sci* 6:622–630
- [34] Zhang Y, Chou K (2008) A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proc Inst Mech Eng Part B* 222(8):959–968
- [35] Nancharaiah T (2011) Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments. *Int J Emerg Technol* 2(1):100-102
- [36] Kumar GP, Regalla SP (2012) Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM). *Appl Mech Mater* 110:2245–2251
- [37] Ahn SH, Montero M, Odell D et al (2002) Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp J* 8(4):248–257
- [38] Ang KC, Leong KF, Chua CK et al (2006) Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. *Rapid Prototyp J* 12(2):100–105
- [39] Sood AK., Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater Des* 2010; 31(1):287-95.
- [40] Percoco G, Lavecchia F, Galantucci LM (2012) Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing. *Res J Appl Sci Eng Technol* 4(19):3838–3842
- [41] Rayegani F, Onwubolu GC (2014) Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *Int J Adv Manuf Technol* 73(1-4):509-519
- [42] Masood SH, Mau K, Song WQ (2010) Tensile properties of processed FDM polycarbonate material. *Mater Sci Forum* 654:2556–2559
- [43] Arivazhagan A, Masood SH, Sbarski I (2011) Dynamic mechanical analysis of FDM rapid prototyping processed polycarbonate material. In: *Proceedings of the 69th annual technical conference of the society of plastics engineers 2011 (ANTEC 2011)*, vol 1. Boston, Massachusetts, United States, 1–5 May 2011, pp 950–955

- [44] Arivazhagan A, Masood SH (2012) Dynamic mechanical properties of ABS material processed by fused deposition modelling. *Int J Eng Res Appl* 2(3):2009–2014
- [45] Jami H, Masood SH, Song WQ (2013) Dynamic response of FDM made ABS parts in different part orientations. *Adv Mater Res* 748:291–294.
- [46] Michael Molitch-Hou, 3D Printing Materials - An overview of plastics, metals and other feedstock for additive manufacturing. *Engineering.com*, 2019.
- [47] J. Stansbury, M. Idacavage, 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities, *Dent. Mater.* 32 (2016) 54–64.
- [48] Angelo Fernando Padilha. *Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades*. Hemus Livraria, Editora e Distribuidora S.A., 2000.
- [49] Ken Giang. PLA vs ABS: What’s the difference? Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/>>. Acesso em 05 de Março, 2020.
- [50] Polylactide (PLA): Complete Guide to Accelerate your ‘Green’ Approach. Disponível em: <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polylactide-pla-bioplactic>>. Acesso em 05 de Março, 2020.
- [51] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features. Disponível em: <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic#production>>. Acesso em 05 de Março, 2020.
- [52] Daniel Lacerda. Filamento Tritan: saiba como imprimir esse material. 3D Lab Soluções em impressão 3D. <<https://3dlab.com.br/filamento-tritan/>>. Acesso em 15 de junho, 2020.
- [53] Tritan™ Copolyester DX4001 Natural – Ficha técnica disponível em: <https://www.eastman.com/Brands/Eastman_Tritan/Pages/ProductList.aspx>.
- [54] Catálogo de produtos da Eastman. <<https://www.eastman.com/Pages/ProductHome.aspx?product=71068024>>. Acesso em 22 de junho, 2020.
- [55] Catálogo 3D Fila. Filamento Tritan HT. <<https://3dfila.com.br/produto/filamento-tritan-ht/>>. Acesso em 21 de junho, 2020.

- [56] Catálogo Filament to print. Taulman Tritan bluprint.
<<https://filament2print.com/pt/copoliesteres-pet/609-taulman-tritan-bluprint.html>>.
Acesso em 21 de junho, 2020.
- [57] Catálogo Printer Playground. Taulman Tritan High Tensile Polyester Filament.
<<https://www.printerplayground.com/taulman-tritan-high-tensile-polyester-filament>>. Acesso em 22 de junho, 2020.
- [58] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, and T. Letcher, Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation, *J. Fail. Anal. Prev.* 16, 467–481 (2016).
- [59] M. Vaezi, and C. K. Chua, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 53, 275–284 (2011).
- [60] 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. Design.* 124, 143–157 (2017).
- [61] Camargo, J.C., et al., Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. 103(5): p. 2423-2443.
- [62] Song, Y.; Li, Y.; Song, W.; Yee, K.; Lee, K.-Y.; Tagarielli, V. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. *Mater. Des.* 2017, 123, 154–164.
- [63] 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. Design.* 58, 242–246 (2014).
- [64] R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English, Y. Lin, A. R. B. Wicker, and D. A. Roberson, Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Addit. Manufact.* 6, 16–29 (2015).
- [65] B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Addit. Manufact.* 8, 110–116 (2015).

- [66] Aliheidari, N., et al., The impact of nozzle and bed temperatures on the fracture resistance of FDM printed materials. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Vol. 10165. 2017: SPIE.
- [67] Vojislav Petrovic, Juan Vicente Haro Gonzalez, Olga Jordá Ferrando, Javier Delgado Gordillo, Jose Ramón Blasco Puchades & Luis Portolés Griñan (2011): Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies, International Journal of Production Research, 49:4, 1061-1079.
- [68] Yu-an Jin et al. Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses – A Review. Procedia CIRP 36 (2015) 199–204.
- [69] ASTM D790: Standard Test Methods Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (2003).
- [70] ASTM D 3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2000).
- [71] Kovan, V., G. Altan, and E.S. Topal, Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017. 31(5): p. 2197-2201.
- [72] Wang, L., et al., Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of a filled polypropylene. Progress in Additive Manufacturing, 2018. 3(4): p. 205-214.
- [73] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Composit. Part B: Eng. 80, 369–378 (2015).
- [74] T. Letcher, and M. Waytashek. Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. Paper presented at the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2014).
- [75] SABIC – Ficha técnica disponível em:
<<http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=617712e207be443f870d3f0cd6ca907a>>
- [76] SMARTFIL – Ficha técnica disponível em:
<<https://www.smartmaterials3d.com/pla-filamento#attachments>>

[77] PLA tipo 4043D – Ficha técnica disponível em:
<https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf?la=en>