CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE ESTANQUEIDADE E MODOS DE FALHA DE MATERIAL POLIMÉRICO FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA COM DIFERENTES REVESTIMENTOS

Pedro Humberto de Accioly Costa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Doina Mariana Banea

Rio de Janeiro
Maio de 2024

ANÁLISE DE ESTANQUEIDADE E MODOS DE FALHA DE MATERIAL POLIMÉRICO FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA COM DIFERENTES REVESTIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

PEDRO HUMBERTO DE ACCIOLY COSTA

Banca Examinadora:

Presidente, Professora Dra. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ) (orientadora)

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

Professor Dr. João Marciano Laredo dos Reis (UFF/RJ)

Rio de Janeiro
Maio de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C837 Costa, Pedro Humberto de Accioly
Análise de estanqueidade e modos de falha de material polimérico fabricado por manufatura aditiva com diferentes revestimentos / Pedro Humberto de Accioly Costa. — 2024.
77f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 73-77
Orientadora: Doina Mariana Banea

1. Processos de fabricação - Projeto auxiliado por computador. 2. Polímeros. 3. Revestimentos - Propriedades mecânicas. I. Banea, Doina Mariana. (Orient.). II. Título.

CDD 670

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, pois sem Ele não teria o dom da vida, nem a saúde, paz e inteligência para conduzir este trabalho.
À minha esposa Sara Roberta, por ser minha melhor amiga e companheira em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins.
Aos meus pais Humberto e Mônica, e irmã Paula, pelo apoio, incentivo e orações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida e por me prover saúde, paz e inteligência necessária para desenvolver este estudo. Agradeço também à minha esposa, Sara Roberta, meus pais Humberto e Mônica, e irmã, Paula Helena, pelo apoio e orações que me sustentaram ao longo desta jornada. Bem como aos demais componentes da minha família, que tanto me incentivaram.

À minha orientadora, Professora Dra. Doina Mariana Banea, pelo apoio ao longo de toda à pesquisa, me orientando em todas as etapas, com quem aprendi muito sobre a área acadêmica e humanização dentro da Engenharia. Ao laboratório LADES, e à universidade CEFET/RJ, fundamentais para meu crescimento como profissional e por disponibilizar uma infraestrutura de excelência para execução dos experimentos.

Aos meus colegas, em especial à Camille Duarte, grande companheira e que em muito auxiliou ao longo de todo o curso, e ao Henrique Queiroz e Daniel Kawasaki pela parceria.

Ao meu colega de trabalho Dr. Vilson Berilli, grande amigo, que me orientou nos primeiros passos da profissão e ao Instituto de Pesquisas da Marinha, que permitiu o estudo de um tema relacionado ao projeto Raia Virtual de Tiro, do qual participei no desenvolvimento do projeto e fabricação mecânica.

É com coração grato que agradeço a todos que de alguma forma contribuíram nesta fase da minha vida.

“Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.” 1 Tessalonicenses 5.18.

RESUMO

ANÁLISE DE ESTANQUEIDADE E MODOS DE FALHA DE MATERIAL POLIMÉRICO FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA COM DIFERENTES REVESTIMENTOS

A manufatura aditiva permite a produção de geometrias complexas, com baixo custo e múltiplos tipos de materiais. Este processo de fabricação tem potencial para ser muito popular na produção em baixa escala no ambiente naval, pois permite a variação da densidade do enchimento interno e a fabricação de produtos com flutuabilidade controlada. O objetivo deste estudo é analisar a estanqueidade de corpos de prova fabricados em impressora 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM), confeccionados em ácido polilático (PLA) revestidos com 3 tipos diferentes de revestimentos. Os corpos de prova foram divididos em 4 grupos: tinta à base de epóxi, resina epóxi, resina poliéster e grupo controle sem qualquer revestimento. Todo o revestimento foi aplicado em 3 camadas. Para simular pequenas falhas de fabricação, foi feito um furo de 0,5mm de diâmetro utilizando uma micro retificadora em uma face de cada corpo de prova antes da aplicação do revestimento. Os corpos de prova foram imersos em água destilada por 15 dias para teste de impermeabilidade. Além disso, os 4 grupos foram submetidos a testes de tração (n=3) e flexão (n=3) antes (T0) e após 15 dias de envelhecimento em água doce (T1). Após o envelhecimento, os grupos revestidos apresentaram aumento de peso não significativo (<1%), que se estabilizou com o tempo. O grupo controle apresentou aumento significativo (>7%), com padrão crescente. As propriedades mecânicas das amostras diminuíram quando envelhecidas, mas o grupo de revestimento com resina epóxi apresentou melhores resultados em geral. Pode-se concluir que os 3 diferentes tipos de revestimentos podem garantir a estanqueidade após 15 dias em água doce, sendo que o revestimento de Resina Epóxi apresentou melhores propriedades mecânicas no longo prazo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, estanqueidade, envelhecimento, propriedades mecânicas

ABSTRACT

WATERTIGHT AND FAILURE MODES OF ADDITIVE MANUFACTURED POLYMERIC MATERIAL WITH DIFFERENT COATS

Additive manufacturing allows the production of complex geometries, at low cost and multiple types of materials. This process of fabrication has the potencial to be very popular among low-scale production in the naval environment, since it allows a variation of the density of the internal filling, and the manufacturing of products with controlled buoyancy. The aim of this study is to analyze the watertight of specimens fabricated in a Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer, made of polylactic acid (PLA) covered with 3 different types of coatings. The specimens were divided into 4 groups: epoxy-based paint, epoxy resin, polyester resin, and a control group without any coating. All coating were applied in 3 layers. To simulate small flaws in the manufacturing, a 0.5mm diameter hole was made using a micro grinder on one face of each specimen before the application of the coating. Specimens were immersed in fresh water for 15 days for an impermeability test. Beyond that, the 4 groups underwent traction (n=3) and bending (n=3) tests before (T0) and after the 15 days of aging in fresh water (T1). After the aging process, the coated groups showed a non-significant increase in weight (<1%), which stabilized with time. The control group showed a significant increase (>7%), with an increasing pattern. Mechanical properties of specimens decreased when aged, but the Epoxy Resin coating group showed best results overall. It can be concluded that the 3 different types of coats can guarantee watertight after 15 days in fresh water, whoever the Epoxy Resin coating showed better mechanical properties in the long-term.

Keywords: Additive Manufacturing, watertight, ageing, mechanical properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do projeto Raia Virtual de Tiro (RVT). 14
Figura 2 - Protótipos da nova Boia da RVT com flutuadores comerciais. 15
Figura 3 – Chuck Hull, criador da primeira técnica de MA, a estereolitografia (SLA) [14]. 20
Figura 4 - Aplicações mais comuns da Manufatura Aditiva [15]. 21
Figura 5 - Sete técnicas de Manufatura Aditiva reconhecida pela ASTM [13]. 23
Figura 6 - Etapas do processo de impressão 3D FDM [19]. 25
Figura 7 - Estrutura de uma impressora 3D FDM [20]. 27
Figura 8 - Peças com diferentes densidades de preenchimento [21]. 28
Figura 9 - Diferentes padrões de preenchimento interno das peças [22]. 29
Figura 10 - Bobina de filamento, insumo das máquinas FDM. 30
Figura 11 - Estrutura química do PLA [26]. 32
Figura 12 - Estrutura química do ABS [31]. 34
Figura 13 - Peça com fios finos entre parte (*stringing*). 35
Figura 14 - Peça com subextrusão. 36
Figura 15 - Peça com delaminação. 36
Figura 16 - Peça com borda curvada para cima (*warping*). 37
Figura 17 - Flutuadores. a) de mango/mangueira, b) boia salva-vidas, c) boia de sinalização. 39
Figura 18 - Impressora 3D Ender 3 S1 da marca Creality. Fonte: autor. 45
Figura 19 - Filamento PLA Plus da empresa GTMax [39]. 46
Figura 20 – Dimensões, em milímetros, do corpo de prova de tração estilo *dogbone* [8]. 47
Figura 21 - Corpo de prova de absorção. a) furação com micro retífica, b) espécime com furo. Fonte: autor. 48
Figura 22 - Revestimentos utilizados. a) resina epóxi, b) resina poliéster, c) tinta epóxi à base de água. 49
Figura 23 - Recipiente com corpos de prova para processo de envelhecimento. Fonte: autor. 52
Figura 24 - Ensaio de tração. Fonte: autor. 53
Figura 25 - Ensaio de flexão. Fonte: autor. 54
Figura 26 - Espécimes para ensaio de absorção. Fonte: autor. 55
Figura 27 - Medição da massa dos espécimes. Fonte: autor. 56
Figura 28 - Curvas representativas tensão-deformação em tração dos espécimes sem envelhecimento. 58
Figura 29 - Tensão máxima em tração dos espécimes sem envelhecimento. 58
Figura 30 - Módulo de Young dos espécimes sem envelhecimento. 59
Figura 31 - Curvas representativas tensão-deformação em tração dos espécimes envelhecidos. 59
Figura 32 - Tensão máxima em tração dos espécimes envelhecidos. 60
Figura 33 - Módulo de Young dos espécimes envelhecidos. 60
Figura 34 - Tensão máxima em tração dos espécimes antes e depois do envelhecimento. 61
Figura 35 - Módulo de Young dos espécimes antes e depois do envelhecimento. 61
Figura 36 - Curvas representativas tensão-deformação em flexão dos espécimes sem envelhecimento. 62
Figura 37 – Tensão de Flexão máxima dos espécimes sem envelhecimento. 63
Figura 38 - Módulo de flexão dos espécimes sem envelhecimento. 63
Figura 39 - Flexão máxima dos espécimes envelhecidos. 64
Figura 40 - Módulo de flexão dos espécimes envelhecidos. 64

Figura 41 – Tensão de Flexão máxima dos espécimes antes e depois do envelhecimento. 65
Figura 42 - Módulo de flexão máximo dos espécimes antes e depois do envelhecimento. 66
Figura 43 - Ganho percentual de massa em função do tempo de absorção. 67
Figura 44 - Ganho percentual máximo de massa devido à absorção dos espécimes. 67
Figura 45 - Micrografia dos corpos de prova de tração em T0 (sem envelhecimento). a) tinta à base de epóxi, b) resina poliéster, c) resina epóxi. 69
Figura 46 - Micrografia dos corpos de prova de tração em T1 (com envelhecimento). a) tinta à base de epóxi, b) resina poliéster, c) resina epóxi. 69
Figura 47 - Micrografia do corpo de prova revestido com resina epóxi em T1 após ensaio de flexão. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do PLA Plus, fornecidos pelo fabricante (GTMax) [39].... 46
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para confecção dos corpos de prova. 46
Tabela 3 - Características da resina epóxi utilizada [44]..... 49
Tabela 4 - Dados fornecidos pelo fabricante da resina epóxi utilizada [44]. 49
Tabela 5 - Especificações da resina poliéster utilizada fornecidas pelo fabricante [45]. 50
Tabela 6 - Valores típicos da resina poliéster utilizada fornecidos pelo fabricante [45]..... 50

SUMÁRIO

Capítulo 1 13
Introdução 13
1.1. Motivação 14
1.2. Objetivos geral e específicos 16
1.3. Metodologia 17
1.3.1 Ensaios 18
1.4 Organização do Trabalho 18
Capítulo 2 19
Revisão Bibliográfica 19
2.1 Manufatura Aditiva 19
2.1.1 História da Manufatura Aditiva 20
2.1.2 Técnicas de Manufatura Aditiva 21
2.1.3 Fabricação por Filamento Fundido (FFF) 24
2.1.3.1 Componentes de uma impressora 3D FFF 25
2.1.3.2 Parâmetros de impressão 3D (FDM) 27
2.1.3.3 Filamentos 30
2.1.3.4 Falhas comuns no processo de impressão 35
2.2 Flutuadores 37
2.2.1 Processos de Fabricação de Flutuadores 39
2.2.2 Materiais dos flutuadores 40
2.3 Revestimentos 41
2.3.2 Revestimentos usados em ambiente naval 42
Capítulo 3 44
Metodologia 44
3.1 Máquina, filamento e parâmetros 44
3.2 Fabricação dos corpos de prova 47
3.3 Revestimentos utilizados 48
3.4 Processo de envelhecimento 51
3.5 Ensaio de tração 52
3.6 Ensaio de flexão 53
3.7 Ensaio de absorção 54
Capítulo 4 57
Resultados e discussão 57

4.1 Tração 57
4.2 Flexão 62
4.3 Absorção 66
4.4 Modos de falha 69
Capítulo 5 71
Conclusões 71
5.1 Trabalhos futuros 72
Referências 73

Capítulo 1

Introdução

A Manufatura Aditiva é um processo de fabricação que possibilita a confecção de peças com geometria complexa [1]. Nos últimos anos, esse processo de fabricação ganhou força devido à uma redução do custo das máquinas e do tempo de fabricação das mesmas, à tornando cada vez mais competitiva quando comparada a processos tradicionais de fabricação [1]. Dentre as sete técnicas de Manufatura Aditiva reconhecidas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a Fabricação por Filamento Fundido (FFF) é a técnica mais popular por apresentar máquinas de baixo custo, sendo acessível à pequenas empresas e até mesmo para uso residencial [2]. Através da técnica FFF é possível utilizar uma variedade de termoplásticos para produzir objetos através da sobreposição de camadas [1].

Por se tratar de uma tecnologia que permite a fabricação de geometrias complexas, pode ser utilizada nos mais variados setores. Dentre eles, o Naval, no qual a Manufatura Aditiva pode ser utilizada de diversas maneiras, desde a produção de peças de reposição de embarcações antigas a peças com geometria hidrodinâmica, de componentes para compartimentos internos da embarcação até grandes estruturas como o casco de um barco [3].

Além da facilidade de se produzir geometrias complexas, há outras vantagens da Manufatura Aditiva para o setor Naval como a existência de máquinas *desktop*, permitindo a fabricação de peças in loco, e a possibilidade de utilizar materiais mais sustentáveis, como o termoplástico ácido poliláctico (PLA) – um bioplástico produzido a partir de fontes renováveis e biodegradável em condições ideais [4].

No entanto, uma condição sensível para grande parte de seu uso nesta indústria é a estanqueidade das peças produzidas, além de alterações em suas propriedades mecânicas após envelhecimento em ambiente marinho [3]. Peças externas, como o casco de uma embarcação, flutuadores e estrutura de veículos autônomos precisam ser

estanques para garantir que dispositivos eletrônicos e demais componentes em seu interior não tenham contato com a água. Uma vez que a Manufatura Aditiva é um processo de fabricação por sobreposição de camadas, é preciso garantir que não haja nenhum problema de adesão entre elas, como a delaminação e subextrusão [5, 6].

Dessa forma, esta pesquisa propõe a aplicação de um revestimento para preencher eventuais vazios resultantes do processo de impressão 3D, com o intuito de avaliar a estanqueidade e aprimorar a confiabilidade da peça destinada à aplicação na Raia Virtual de Tiro (RVT).

1.1.Motivação

A Marinha do Brasil está desenvolvendo um projeto de modernização do seu aparato da Raia Virtual de Tiro (RVT). O objetivo da RVT é permitir que a tripulação seja capacitada para realizar um tiro em um alvo virtual determinado e ajustar as coordenadas para um segundo disparo, caso o primeiro tenha desviado do ponto inicial especificado. O exercício é feito com um conjunto de boias que, através de sensores acústicos, captam o ponto de queda do projétil. Tais boias, com auxílio de GPS e antenas de comunicação, conseguem triangular a informação e enviar o local em que o projétil de fato atingiu a água para o Dispositivo de Comunicação de Bordo (DCB), presente na embarcação (Figura 1). Com isso, através Estação de Operação (EO), também presente na embarcação, é possível visualizar o alvo virtual e compará-lo com o local real onde a munição atingiu. Desta forma, possibilita-se o ajuste das coordenadas para um segundo tiro.

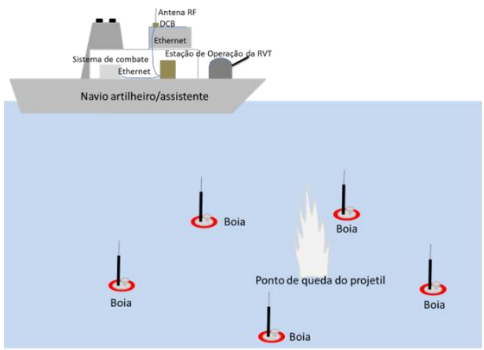


Figura 1 – Representação do projeto Raia Virtual de Tiro (RVT).

No contexto das boias desenvolvidas para a RVT, é imprescindível empregar flutuadores que não apenas assegurem a flutuação do sistema, mas também garantam sua estabilidade. Os flutuadores comerciais empregados nas versões anteriores das boias não são adequados à geometria projetada, demandando a utilização de múltiplos flutuadores, o que eleva o centro de massa. Para contrabalançar esse efeito, é necessário adicionar lastro à parte inferior da estrutura, visando estabilizar o sistema. Foram feitos testes com boias comerciais de diâmetro externo de 500 e 700 mm, sendo o de 70 cm o mais estável. Contudo, foi necessário adicionar um flange para funcionar como batente superior para o flutuador, além de um lastro de aproximadamente 4 kg (Figura 2).



Figura 2 - Protótipos da nova Boia da RVT com flutuadores comerciais.

Devido as limitações dos flutuadores comerciais, foi proposto a fabricação por Manufatura Aditiva de um flutuador com geometria otimizada, utilizando o PLA, material *ecofriendly* [4]. O uso deste processo de fabricação também é recomendado por ser uma tecnologia presente no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), organização militar (OM) onde a boia está sendo desenvolvida. Desta forma, será possível realizar um controle mais eficaz sobre a confidencialidade do processo, além

de garantir uma autonomia tecnológica para a fabricação de peças de reposição, caso seja requerido.

Além do flutuador, outras peças como a tampa superior e a estrutura interna que fixa a bateria e componentes eletrônicos serão produzidos por Manufatura Aditiva. Isso resulta na redução do tempo e dos custos de fabricação, ao mesmo tempo em que promove a produção de peças mais leves e sustentáveis. A expectativa é que não seja necessário o uso de lastro para estabilizar o sistema. Em comparação com a boia utilizada anteriormente pela Marinha do Brasil, espera-se que a massa seja reduzida de 55 kg para 12kg (se não for necessário o uso de lastro) por boia, o que facilitaria a manipulação.

Segundo os operadores do exercício de tiro da RVT, o tempo das boias na água corresponde à duração máxima prevista de 8 horas por missão. Além disso, a expectativa é de que sejam feitos em torno de 6 testes por ano. Sendo assim, nossos experimentos de envelhecimento terão tempo de 15 dias (360 horas), correspondendo a 45 exercícios. Após este período, é provável que haja uma modernização dos componentes eletrônicos, sendo necessária a fabricação de novas peças mecânicas, compatíveis com a geometria da nova eletrônica.

1.2. Objetivos geral e específicos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a estanqueidade e as propriedades mecânicas de corpos de prova produzidos por Manufatura Aditiva. Para isso, foi utilizado o bioplástico PLA em combinação com diferentes revestimentos, comumente empregados em flutuadores e cascos de embarcações. Adicionalmente, pretende-se analisar o efeito do envelhecimento por imersão em água destilada em suas propriedades mecânicas.

Os objetivos específicos podem ser divididos da seguinte maneira:

•. Comparar a estanqueidade de corpos de prova produzidos por Manufatura Aditiva utilizando o material PLA, por meio de teste de absorção, tanto sem

revestimento quanto com diferentes revestimentos, tais como tinta à base de epóxi, resina epóxi e resina poliéster;

•. Avaliar as propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por Manufatura Aditiva utilizando o material PLA, sem revestimento e com diferentes revestimentos (tinta à base de epóxi, resina epóxi e resina poliéster), por meio de ensiaos de tração e flexão realizados antes do envelhecimento (T0) e após 15 dias de envelhecimento (T1) em água destilada.

1.3. Metodologia

A metodologia deste trabalho consistiu em uma extensa revisão bibliográfica referente à Manufatura Aditiva e sua história, técnicas reconhecidas pela ASTM e tecnologia FFF, seus insumos, aplicações e limitações. Além disso, foi realizada a revisão bibliográfica de flutuadores, revestimentos comumente utilizados em flutuadores e ensaios mecânicos que serão realizados neste trabalho.

Após a revisão bibliográfica, definiu-se a máquina a ser utilizada, os parâmetros de impressão e os polímeros para confecção dos corpos de prova, além dos materiais para o revestimento.

Foram impressos 60 corpos de prova, divididos em 4 grupos referentes aos tipos de revestimento: tinta à base de epóxi, resina epóxi, resina poliéster e grupo controle (sem revestimento). Cada um dos grupos foi divido segundo os 3 diferentes ensaios performados: tração (T0 e T1), flexão (T0 e T1) e absorção. Para cada teste foram produzidos 3 corpos de prova para cada um dos revestimentos.

Após a confecção dos corpos de prova, procedeu-se à caracterização dos materiais antes do envelhecimento (T0) por meio de ensaios mecânicos de tração e flexão. Posteriormente, outros espécimes foram envelhecidos por 15 dias em água destilada (T1) e submetidos aos mesmos testes para fins comparativos. Em seguida, realizou-se o teste de absorção em outros corpos de prova avaliar a estanqueidade da amostra com diferentes revestimentos.

A etapa final foi composta pela análise dos dados obtidos experimentalmente

nos ensaios mecânicos e de absorção.

1.3.1 Ensaios

Neste trabalho foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: tração, flexão e absorção. Os ensaios foram executados de acordo com as normas específicas, respeitando a geometria do corpo de prova, parâmetros utilizados no ensaio e o tratamento dos dados aferidos.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

O Capítulo 1 trata da Introdução, Motivação, Objetivos, Metodologia, com ênfase nos Ensaios e Organização da Dissertação.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica acerca da Manufatura Aditiva, apresentando sua evolução ao longo do tempo, as principais técnicas empregadas, com ênfase na técnica FFF utilizada neste trabalho, seus insumos, aplicações e limitações. Em seguida, explora-se o setor naval, com foco especial nos flutuadores, os materiais que os constituem e os processos de fabricação mais convencionais. Esse capítulo é concluído com a apresentação dos revestimentos usualmente empregados em meio naval, particularmente na confecção de cascos de embarcações.

O Capítulo 3 apresenta os materiais selecionados, assim como o maquinário e métodos experimentais utilizados nos ensaios.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais representados através de gráficos, tabelas e fotos, bem como sua discussão.

O Capítulo 5 descreve as conclusões obtidas e sugestões para futuras pesquisas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados conceitos fundamentais para este trabalho. Trata-se do alicerce que sustenta tal pesquisa, sendo produzido visando condensar as informações extraídas de artigos científicos atuais sobre cada área. Nele serão abordados, com profundidade, os temas de Manufatura Aditiva, Fluturadores e Revestimentos.

2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA), também conhecida por Impressão 3D, pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material, geralmente pela sobreposição de camadas, através de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Tal processo se diferencia dos métodos tradicionais de fabricação que geralmente envolvem a subtração de material, como a usinagem, ou a conformação do material, como na moldagem [8].

Nesse processo, um objeto é projetado em programa de modelagem 3D e, em seguida, um dispositivo de impressão 3D constrói o objeto físico camada por camada, adicionando material de acordo com as especificações do modelo digital. Isso pode ser feito com uma variedade de materiais, incluindo plásticos, metais, cerâmicas e até mesmo materiais biológicos em algumas aplicações [11].

Ela oferece diversas vantagens, como a capacidade de criar geometrias complexas que seriam difíceis ou impossíveis de se produzir de maneira convencional, a produção de peças personalizadas em massa e a redução de resíduos de material. É um processo amplamente utilizado em várias indústrias, como aeroespacial, automotiva,

saúde, arquitetura, moda, entre outras [12].

2.1.1 História da Manufatura Aditiva

A história da Manufatura Aditiva remete às décadas de 1980 e 1990. Durante esse período, pioneiros como Chuck Hull (Figura 3), que patenteou a primeira técnica de estereolitografia (SLA), e Scott Crump, que inventou a modelagem por deposição fundida (*Fused Deposition Modeling* - FDM), também conhecida por fabricação por filamento fundido (FFF), deram os primeiros passos para transformar a ideia de impressão 3D em uma realidade tangível. A estereolitografia permite a criação de modelos tridimensionais a partir de resinas fotossensíveis, enquanto a FFF utiliza filamentos termoplásticos para construir objetos em camadas [11].



Figura 3 – Chuck Hull, criador da primeira técnica de MA, a estereolitografia (SLA) [14].

As empresas criadas por Chuck Hull e Scott Crump focavam em aplicações para a indústria, e de certa forma restringiam a propagação da tecnologia devido às patentes que detinham. Porém, no início dos anos 2000, com a queda das patentes, começam a surgir máquinas de baixo custo desenvolvidas pela comunidade RepRap. Desde então, a Manufatura Aditiva começou a ganhar destaque, principalmente como uma ferramenta de prototipagem rápida [11, 12].

As aplicações se expandiram para diferentes áreas, como design de produtos, arquitetura e odontologia. A capacidade de criar protótipos complexos de maneira

rápida e acessível atraiu a atenção de empresas e instituições de pesquisa [13].

Apenas no início da década de 2010 surgem as máquinas *desktop* comerciais, democratizando e facilitando ainda mais o acesso à tecnologia que amadurecia também nas técnicas voltadas à indústria. Também nesse período surgem as bibliotecas de arquivos online com centenas de milhares de modelos digitais e os programas de modelagem 3D se tornam cada vez mais acessíveis. A gama de materiais disponíveis cresceu significativamente, incluindo plásticos, metais, cerâmicas e materiais compósitos [12]. Essa diversificação de materiais abriu novas possibilidades, permitindo a fabricação de peças funcionais para uma variedade de indústrias. À medida que a tecnologia avança, a Manufatura Aditiva continua a impactar profundamente a indústria e a sociedade [13].

Na Figura 4 pode-se observar as principais aplicações da impressão 3D, na qual se destaca a fabricação de peças funcionais. Isto evidencia seu potencial para revolucionar a produção de produtos em diferentes setores.

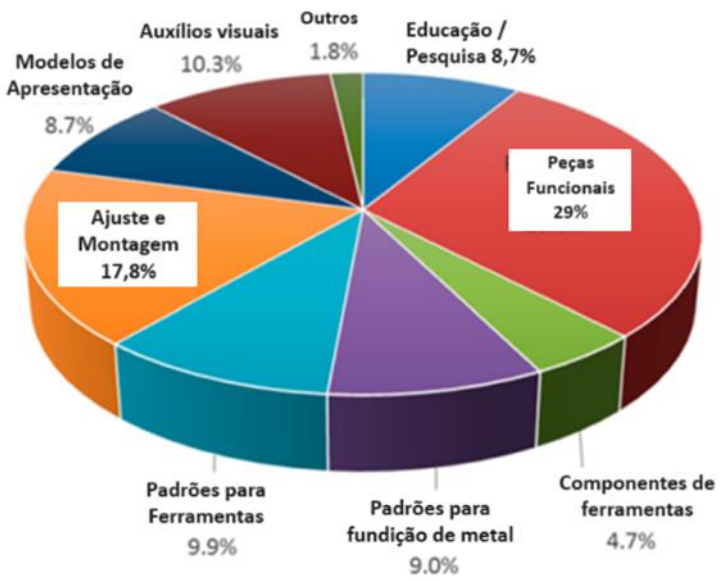


Figura 4 - Aplicações mais comuns da Manufatura Aditiva [15].

2.1.2 Técnicas de Manufatura Aditiva

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é uma organização que estabelece normas técnicas para diversas indústrias, incluindo a Manufatura Aditiva (MA). A ASTM reconhece sete técnicas principais de Manufatura Aditiva (Figura 5), cada uma com suas características distintas [11, 12, 13]:

1. Foto Polimerização *(Vat-Photo Polymerization)*:
    - Processo: Utiliza um laser ultravioleta para solidificar camadas de resina fotossensível.
    - Características: Alta precisão e qualidade superficial. Amplamente utilizado para prototipagem e fabricação de peças com detalhes intricados.
2. Extrusão de material (*Material Extrusion*):
    - Processo: Extrusão de filamento termoplástico derretido para criar camadas.
    - Características: Ampla disponibilidade de materiais. Amplamente utilizado para prototipagem e fabricação de peças funcionais.
3. Fusão em Leito de Pó *(Powder Bed Fusion):*
    - Processo: Utiliza um laser para sinterizar ou fundir material em pó, geralmente polímeros ou metais.
    - Características: Boa resistência e durabilidade. Amplamente usado na produção de peças finais, especialmente na indústria aeroespacial e médica.
4. Laminação em Folha *(Sheet Lamination)*:
    - Processo: Utiliza um agente ligante e pressão para fundir lâminas que podem ser de polímero, metal ou até mesmo papel.
    - Características: Geralmente permite a fabricação de peças multicoloridas, sendo muito utilizada para a prototipagem.
5. Jateamento de Colante *(Binder Jetting)*:
    - Processo: Um agente ligante é pulverizado sobre camadas de material em pó para solidificar as camadas.
    - Características: Eficiente para a produção de peças coloridas e de grande porte, mas pode exigir pós-processamento adicional.

6. Jateamento de Material *(Material Jetting)*:
    - Processo: Semelhante à impressão a jato de tinta, onde gotas de material líquido são depositadas e curadas por UV.
    - Características: Alta precisão e resolução. Usado para criar modelos de alta qualidade e protótipos.
7. Deposição por Energia Direta *(Direct Energy Deposition)*:
    - Processo: Um feixe de energia (laser ou arco elétrico) é direcionado para fundir um material em pó ou arame, geralmente metálico.
    - Características: Amplamente utilizado na reparação e fabricação de peças de grande porte. Pode ser usado para adicionar material a peças existentes.



Figura 5 - Sete técnicas de Manufatura Aditiva reconhecida pela ASTM [13].

Dentre as técnicas apresentadas, o processo FFF, que está incluída na técnica de Extrusão de Material (*Material Extrusion*) é a mais utilizada. Isto se deve a alguns fatores como o custo acessível da máquina e insumos, facilidade de operação, variedade

de materiais disponíveis com suas diferentes propriedades mecânicas e químicas, versatilidade de aplicação, facilidade de manutenção, tamanho da comunidade e informações disponíveis, além da rapidez de fabricação [16, 17].

2.1.3 Fabricação por Filamento Fundido (FFF)

O processo de Modelagem por Deposição Fundida, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou Fabricação por Filamento Fundido (FFF) funciona seguindo um processo relativamente simples, mas eficaz, que envolve a deposição de material termoplástico camada por camada para construir um objeto tridimensional. O passo a passo do processo de impressão 3D FDM é o segiunte (Figura 6) [16, 17]:

1. **Preparação do Modelo 3D**: O processo começa com a criação de um modelo 3D digital do objeto que você deseja imprimir. Esse modelo é projetado usando software de modelagem 3D, ou pode ser obtido a partir de um arquivo CAD (*Computer-Aided Design*).
2. **Geração do Caminho de Impressão (*Slicing*)**: O próximo passo é o fatiamento, que é realizado por um programa de fatiamento (*slicer*). O programa divide o modelo 3D em camadas finas, criando uma série de caminhos de impressão (*paths*) para a impressora seguir. Isso determina como o bico da impressora irá se mover para depositar o material em cada camada.
3. **Configuração da Máquina**: Antes de iniciar a impressão, a impressora 3D FDM deve ser configurada corretamente. Isso inclui carregar o filamento de material no extrusor, aquecer a plataforma de construção (plataforma de impressão) e o bico da impressora à temperatura adequada e calibrar a impressora para garantir que a distância entre o bico e a plataforma esteja correta.
4. **Impressão Camada por Camada**: Com a impressora configurada, o processo de impressão começa. O bico da impressora se move ao longo da plataforma de construção, depositando o material termoplástico derretido em camadas sucessivas. Cada camada se funde à camada anterior à medida que o material esfria e endurece.

5. **Resfriamento e Solidificação**: Após a deposição do material, um sistema de resfriamento pode ser usado para acelerar o endurecimento do material. Isso é especialmente importante para evitar deformações e garantir a precisão da peça.
6. **Repetição do Processo**: O processo de deposição e solidificação de camadas é repetido até que todas as camadas tenham sido impressas, resultando na peça 3D concluída.
7. **Remoção e Acabamento**: Após a conclusão da impressão, a peça impressa é cuidadosamente removida da plataforma de construção. Dependendo da aplicação, pode ser necessário realizar pós-processamento, como lixar, pintar ou montar peças adicionais.

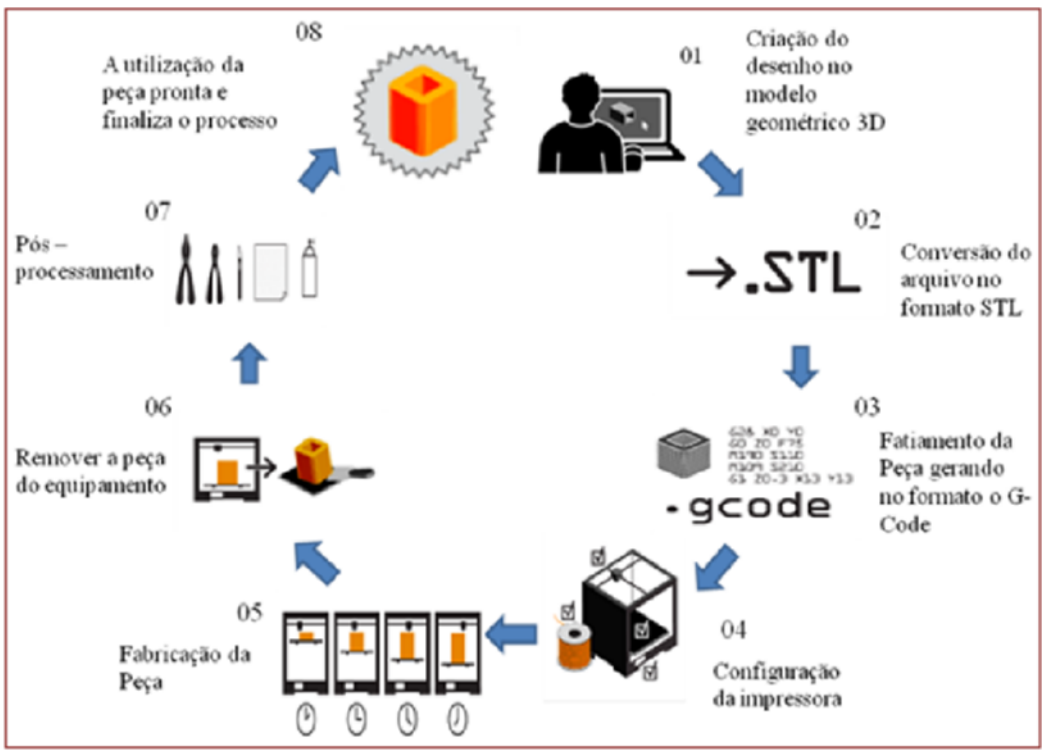


Figura 6 - Etapas do processo de impressão 3D FDM [19].

2.1.3.1 Componentes de uma impressora 3D FFF

Uma impressora 3D FFF (ou FDM) é composta por vários componentes que trabalham juntos para realizar o processo de impressão tridimensional por deposição de

material termoplástico (Figura 7). Abaixo estão os principais componentes que compõem a estrutura de uma impressora 3D FFF típica [16]:

- **Estrutura da Impressora (*Frame*)**: A estrutura da impressora é a carcaça principal que abriga todos os componentes e fornece suporte estrutural. Ela pode ser feita de metal, acrílico ou outros materiais resistentes. A estrutura é projetada para garantir a estabilidade durante a impressão.
- **Plataforma de Construção (*Printer Bed*)**: A plataforma de construção é a superfície sobre a qual o objeto está sendo impresso. Ela é ajustável em altura e geralmente aquecida para melhor aderência do material à base. A altura da plataforma é ajustada manualmente ou automaticamente para controlar a distância entre o bico da impressora e a plataforma.
- **Bico Extrusor (*Noozle*)**: O extrusor é a parte da impressora que derrete e extrai o filamento de material termoplástico. Ele possui um bico aquecido que deposita o material derretido em camadas sucessivas para criar o objeto 3D. Alguns modelos de impressora têm múltiplos extrusores para permitir a impressão em cores diferentes ou com materiais diferentes.
- **Filamento**: O filamento é o material termoplástico em forma de fio que é alimentado na impressora. Os filamentos mais comuns incluem PLA, ABS e PETG, mas existem muitos outros materiais disponíveis. O filamento é alimentado a partir de um carretel e passa pelo extrusor, onde é aquecido e extrudado para a construção do objeto.
- **Sistema de Movimentação**: A impressora possui um sistema de movimentação composto por motores de passo que controlam o movimento do extrusor e da plataforma de construção em três eixos: X, Y e Z. Isso permite que a impressora mova o bico com precisão para depositar o material em locais específicos.
- **Placa de Controle (*Motherboard*)**: A placa de controle fornece os comandos da impressora 3D. Ela executa o software de controle da impressora, interpretando o código G e os comandos de movimento e temperatura. O controlador é responsável por coordenar todos os movimentos e operações da impressora.
- **Ventiladores de Resfriamento (*Cooling Fan*)**: Muitas impressoras FDM possuem ventiladores que ajudam a resfriar o material recém-depositado para acelerar a solidificação. Esses ventiladores são frequentemente direcionados

para a área de impressão e o extrusor.

- **Fonte de Alimentação (*Power Supply*)**: A fonte de alimentação fornece a energia necessária para operar a impressora. Ela converte a energia elétrica da tomada em uma forma que pode ser usada pelos motores, aquecedores e outros componentes eletrônicos da impressora.
- **Tela ou Interface de Controle (*Display Screen*)**: Alguns modelos de impressora 3D vêm com uma tela sensível ao toque ou uma interface de controle que permite ao usuário iniciar e monitorar o processo de impressão, ajustar configurações e fazer outras operações relacionadas à impressão.
- **Sensor de Nível**: Alguns modelos mais avançados incluem sensores de nível que ajudam a calibrar automaticamente a altura da plataforma de construção em relação ao bico da impressora.

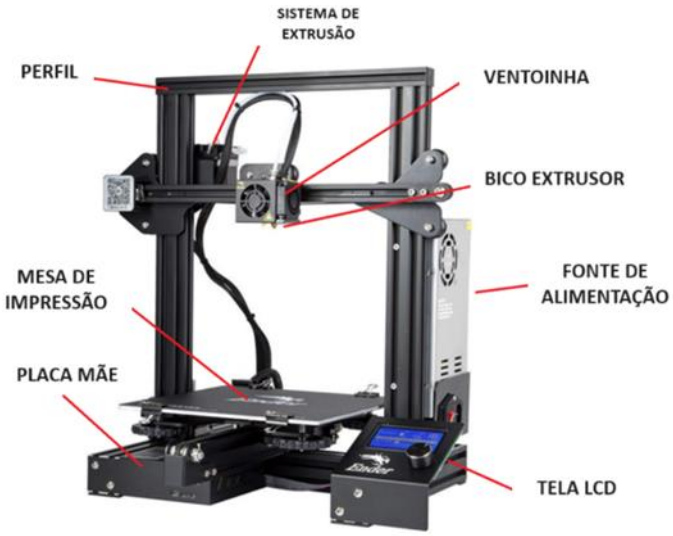


Figura 7 - Estrutura de uma impressora 3D FDM [20].

2.1.3.2 Parâmetros de impressão 3D (FDM)

Os parâmetros de impressão 3D FDM, definidos no programa fatiador (*slicer*), são cruciais para determinar a qualidade, a precisão e o sucesso da impressão. Aqui estão os principais parâmetros que você pode configurar em um fatiador [16, 17]:

- **Espessura da Camada (*Layer Height*)**: Esse parâmetro define a altura de cada

camada que será depositada durante a impressão. Uma camada mais fina resulta em uma superfície mais suave, mas aumenta o tempo de impressão. Camadas típicas variam de 0,1 a 0,3 mm, dependendo da impressora e da aplicação.

- **Perímetro (*Shell*)**: Isso define o número de paredes externas da peça, também chamadas de "casca". Geralmente, você pode especificar a espessura da casca em camadas. Um número maior de perímetros aumentará a resistência e a qualidade da peça, mas também aumentará o tempo de impressão.
- **Densidade de Preenchimento (*Infill Density*)**: Este parâmetro determina a densidade interna da peça, como podemos ver na Figura 8. Um preenchimento maior tornará a peça mais sólida, enquanto um preenchimento menor economizará material e tempo.

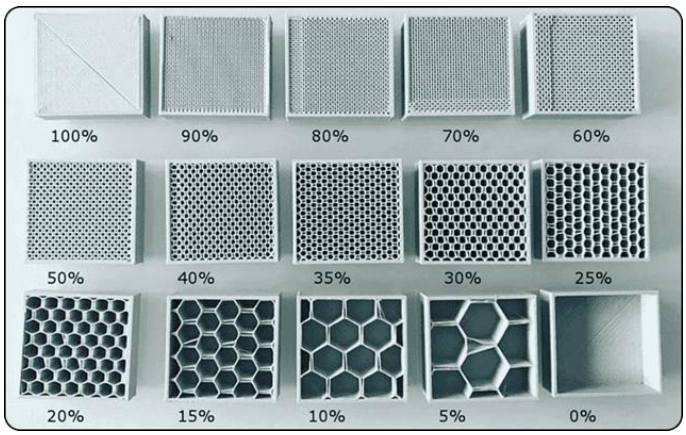


Figura 8 - Peças com diferentes densidades de preenchimento [21].

- **Padrão de Preenchimento (*Infill Pattern*)**: Define o padrão de preenchimento do interior da peça. Dentre os tipos de padrão temos o hexagonal, grade, linear, zig-zag, giróide, entre outros, como podemos ver na Figura 9. Padrão de preenchimento é um parâmetro que influencia no tempo de fabricação e na resistência mecânica das peças.

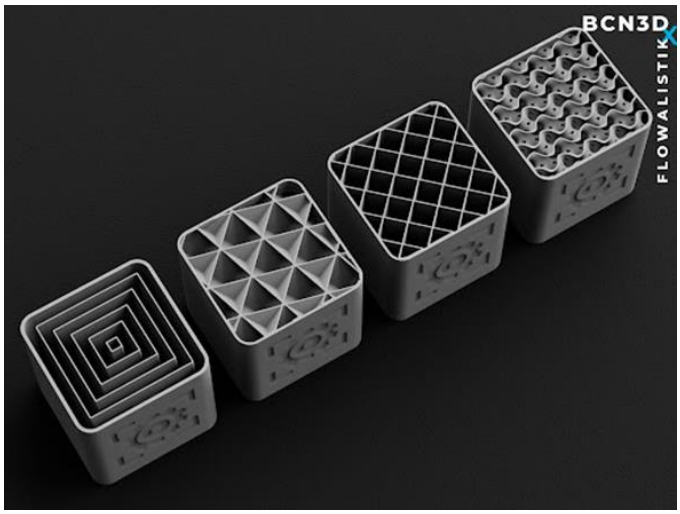


Figura 9 - Diferentes padrões de preenchimento interno das peças [22].

- **Suportes (*Supports*)**: Indica se a impressão requer suportes para áreas sobrepostas ou saliências. Os suportes são estruturas temporárias que sustentam partes da peça durante a impressão. Eles podem ser gerados automaticamente pelo fatiador.
- **Velocidade de Impressão (*Print Speed*)**: Define a velocidade em que o bico da impressora se move durante a impressão. Velocidades mais altas podem reduzir o tempo de impressão, mas podem afetar a qualidade e a precisão da peça.
- **Temperatura do Bico (*Nozzle Temperature*)**: A temperatura do bico define a temperatura em que o material termoplástico é extrudado. Ela varia de acordo com o tipo de material utilizado.
- **Temperatura da Plataforma (*Build Plate Temperature*)**: Isso controla a temperatura da plataforma de construção. Aquecê-la ajuda a aderência do material à plataforma e evita deformações.
- **Resfriamento (*Cooling*)**: Define a velocidade e a potência do ventilador de resfriamento que é direcionado à área de impressão. O resfriamento adequado pode melhorar a qualidade da impressão, especialmente em áreas pequenas e detalhadas.
- **Retração (*Retraction*)**: A retração controla a retirada temporária do filamento do bico quando a cabeça se move para evitar o gotejamento do material. É especialmente útil para evitar marcas de *stringing* (fios finos) na impressão.
- **Adesão à Plataforma (*Platform Adhesion*)**: Define as configurações para ajudar na adesão inicial do material à plataforma, incluindo a impressão de uma

"saia" ao redor do objeto.

Esses são alguns dos principais parâmetros passíveis de configuração em um programa fatiador ao preparar um arquivo de impressão 3D FDM. A combinação correta desses parâmetros depende da impressora, do material utilizado e dos requisitos específicos do projeto para obter os melhores resultados de impressão.

2.1.3.3 Filamentos

A impressão 3D FFF utiliza uma variedade de filamentos termoplásticos (Figura 10) que são alimentados nas impressoras para criar objetos tridimensionais.



Figura 10 - Bobina de filamento, insumo das máquinas FDM.

Dentre eles, os principais filamentos utilizados na impressão 3D são [19, 23, 24]:

- **PLA (Ácido Poliláctico):**
  - Características: Biodegradável, fácil de imprimir, amplamente disponível em várias cores, com baixo odor durante a impressão.
  - Aplicações: Prototipagem, peças decorativas, brinquedos, peças não submetidas a altas temperaturas ou estresse mecânico.
- **ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno):**
  - Características: Resistente, durável, pode ser pós-processado (lixado e

pintado), suporta temperaturas mais elevadas.

- Aplicações: Peças funcionais, carcaças de eletrônicos, brinquedos, objetos duráveis.

- **PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol):**
- Características: Resistente, durável, boa transparência, baixa deformação, menos propenso a encolher.
- Aplicações: Peças mecânicas, protótipos funcionais, garrafas, peças de iluminação.

- **TPU (Poliuretano Termoplástico):**
- Características: Flexível, elástico, resistente a impactos, alta durabilidade.
- Aplicações: Gaxetas, selos, capas de celular, peças flexíveis, calçados.

- **Nylon:**
- Características: Resistente, flexível, durável, boa aderência entre camadas.
- Aplicações: Peças mecânicas de alta resistência, engrenagens, rolamentos, componentes industriais.

- **HIPS (Poliestireno de Alto Impacto):**
- Características: Boa aderência entre camadas, facilmente dissolvido em limoneno (solvente), usado frequentemente como suporte solúvel.
- Aplicações: Peças de suporte, moldes, modelos arquitetônicos.

- **PVA (Álcool Polivinílico):**
- Características: Solúvel em água, usado como suporte solúvel para materiais como o PLA.
- Aplicações: Peças com geometrias complexas que exigem suporte solúvel.

- **PC (Policarbonato):**
- Características: Alta resistência térmica, alta resistência ao impacto, durável.
- Aplicações: Peças que requerem resistência a altas temperaturas, lentes, componentes de engenharia.

- **ASA (Acrilnitrila Estireno Acrilato):**
- Características: Resistente a UV, durável, boa resistência ao impacto, semelhante ao ABS.
- Aplicações: Componentes externos, peças para ambientes externos, aplicações de longa duração.

- **PP (Polipropileno):**

– Características: Leve, flexível, resistente à umidade, baixo coeficiente de fricção.

– Aplicações: Peças funcionais em ambientes úmidos, componentes de baixo atrito, embalagens.

É importante observar que as configurações de impressão, como temperatura do bico, temperatura da plataforma, velocidade de impressão e outras, podem variar de acordo com o tipo de filamento utilizado [18, 19]. Portanto, ao imprimir com qualquer um desses materiais é essencial consultar as recomendações do fabricante e ajustar as configurações de acordo com as necessidades específicas do projeto. Dos materiais citados, o PLA e o ABS são mais utilizados.

2.1.3.3.1 Ácido Poliláctico (PLA)

O PLA é um polímero formado por moléculas de ácido lático, um ácido orgânico de origem biológica que é obtido a partir de fontes renováveis [23, 24]. Um estudo conduzido por Lasprilla, Martinez e Hoss em 2011 [25] demonstrou que o PLA é um composto quiral com duas formas estereoisoméricas, o ácido L e o D-lático (Figura 11), que podem ser produzidas por síntese química.

Ele é derivado de fontes naturais renováveis que contêm amido ou açúcar, como milho, trigo, cana-de-açúcar, beterraba ou batata [23, 24, 25].

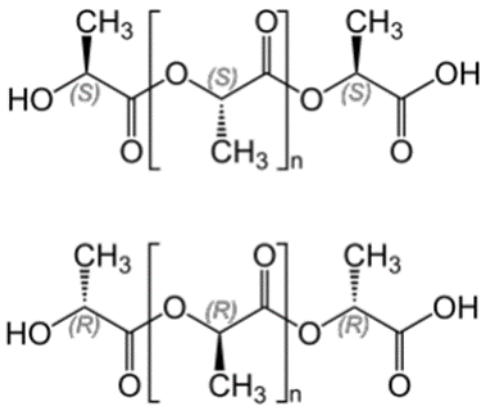


Figura 11 - Estrutura química do PLA [26].

Esse material é facilmente processado em impressoras 3D devido ao seu baixo

ponto de fusão, o que permite a impressão em temperaturas relativamente baixas. Além disso, ele pode ser facilmente colorido ou pigmentado, tornando-o uma escolha excelente para a fabricação de peças coloridas ou personalizadas [20].

Por outro lado, devido à sua baixa temperatura de fusão, as peças produzidas com PLA podem ter uma resistência térmica limitada, o que restringe sua aplicação em situações que requerem alta resistência a temperaturas relativamente elevadas. A transição vítrea do PLA ocorre em torno de 60°C e pode derreter completamente a temperaturas acima de 100°C. Além disso, o PLA tem a tendência de se deformar, o que pode ser uma limitação em aplicações que exigem tolerâncias rigorosas [19, 20].

O PLA também pode ser sensível à degradação causada pela exposição aos raios ultravioleta (UV), o que limita sua utilização em aplicações ao ar livre ou em ambientes com exposição direta à luz solar [24].

No entanto, buscam-se novas maneiras de melhorar as propriedades do PLA e superar esses desafios. Novas formulações e processos estão sendo desenvolvidos para aprimorar a resistência ao calor, a resistência à degradação causada pelos raios UV e a resistência ao impacto do PLA [26, 27]. Também é possível combinar o PLA com outros materiais, como revestimento com resinas, fibras de vidro ou carbono, que podem melhorar suas propriedades mecânicas, tornando-o mais adequado para aplicações específicas [28].

Em resumo, o PLA é um material de base popular na manufatura aditiva devido às suas propriedades mecânicas, disponibilidade, facilidade de uso, biocompatibilidade e capacidade de biodegradação.

2.1.3.3.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O ABS é um polímero termoplástico amorfo que oferece excelentes propriedades mecânicas, como resistência ao impacto, tenacidade, dureza e rigidez, quando comparado a outros polímeros comuns [29, 30]. Essas características fizeram dele um material amplamente adotado na MA, devido à sua notável versatilidade. Podemos ver sua composição química na Figura 12.

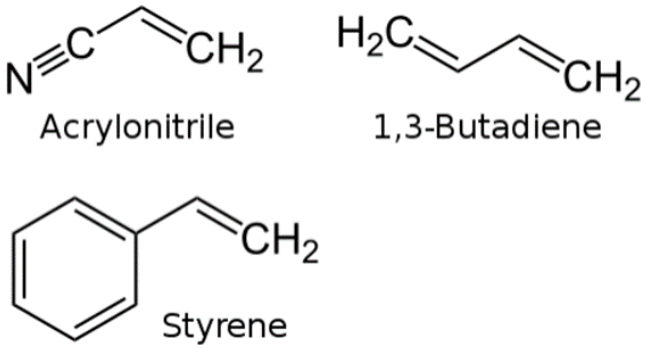


Figura 12 - Estrutura química do ABS [31].

Geralmente, as peças fabricadas em ABS podem ser usadas em uma faixa de temperatura que varia entre 20°C e 80°C. Isso significa que o ABS pode ser aplicado em situações que envolvam temperaturas elevadas, como na produção de componentes automotivos ou peças destinadas ao uso ao ar livre [29, 30].

O ABS é um dos materiais mais populares na impressão 3D, graças às suas boas propriedades mecânicas e baixo custo. Uma vantagem do ABS é a facilidade com que pode ser pós-processado, incluindo lixamento, pintura e perfuração, o que permite ajustar e melhorar ainda mais as peças impressas. No entanto, seu uso como matéria-prima requer certos cuidados, já que é suscetível a um fenômeno conhecido como empenamento (*warping*), o que significa que pode se deformar com o resfriamento rápido, além de sofrer com delaminação [5].

No entanto, é importante estar ciente de que uma desvantagem significativa do ABS é a emissão de gases tóxicos durante o processo de impressão. Portanto, é fundamental que a impressão 3D seja realizada em um ambiente bem ventilado. Contraditoriamente, é preferível que a impressora esteja em um espaço fechado para reduzir a perda de calor da peça para o ambiente durante o processo de impressão, evitando assim o empenamento e delaminação [29].

Em resumo, o ABS é um material amplamente adotado na manufatura aditiva devido às suas excelentes propriedades mecânicas, durabilidade, resistência a altas temperaturas e relativa facilidade de processamento. No entanto, é importante considerar suas desvantagens, como a possibilidade de deformação e empenamento da peça e a emissão de gases tóxicos durante o processo de impressão [5, 29].

2.1.3.4 Falhas comuns no processo de impressão

A impressão 3D por FFF pode ser um processo complexo, e vários problemas podem surgir durante a impressão. Alguns dos principais erros de impressão 3D FFF são os seguintes [5]:

- **Adesão insuficiente à plataforma**: A peça não adere adequadamente à plataforma de construção, resultando em deformações ou deslocamento. Isso pode ocorrer devido à temperatura da plataforma muito baixa, sujeira na superfície de construção ou configurações inadequadas do fatiador (*slicer*).
- **Formação de fios (*Stringing*)**: O material cria fios finos entre partes da peça que não deveriam estar conectadas (Figura 13). Isso ocorre quando o material é puxado do bico enquanto se move entre áreas de impressão.

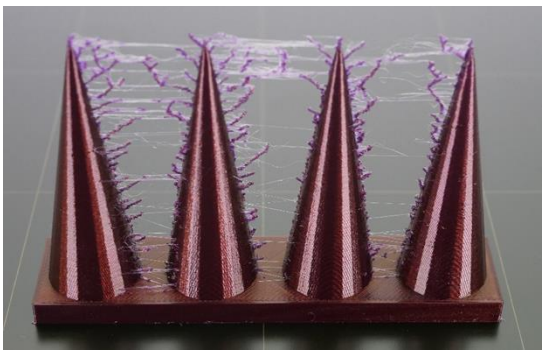


Figura 13 - Peça com fios finos entre parte (*stringing*).

- **Saliências não suportadas**: Partes da peça que se projetam horizontalmente sem suporte podem ceder ou deformar durante a impressão. O uso de suportes adequados é essencial para resolver esse problema.
- **Excesso de preenchimento (*Over-extrusion*)**: O material é extrudado em excesso, resultando em peças com dimensões imprecisas e detalhes imprecisos. Isso pode acontecer devido a configurações incorretas do fatiador (*slicer*), como a taxa de fluxo ou a espessura da linha.
- **Subextrusão**: O material é extrudado insuficientemente, levando a lacunas ou descontinuidades nas camadas ou na superfície da peça (Figura 14). Isso pode

ocorrer devido a um bico entupido, falta de aderência entre a camada anterior e a nova camada ou configurações de temperatura inadequadas.

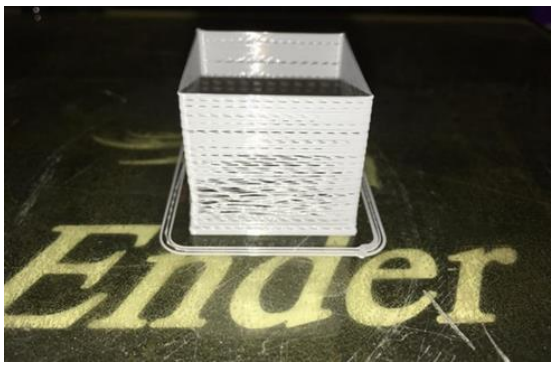


Figura 14 - Peça com subextrusão.

- **Camadas separadas / delaminação (*Layer Separation / Delamination*)**: As camadas da peça não aderem adequadamente umas às outras, resultando em um objeto frágil (Figura 15). Isso pode ocorrer devido a problemas de temperatura, resfriamento insuficiente ou má aderência entre camadas.

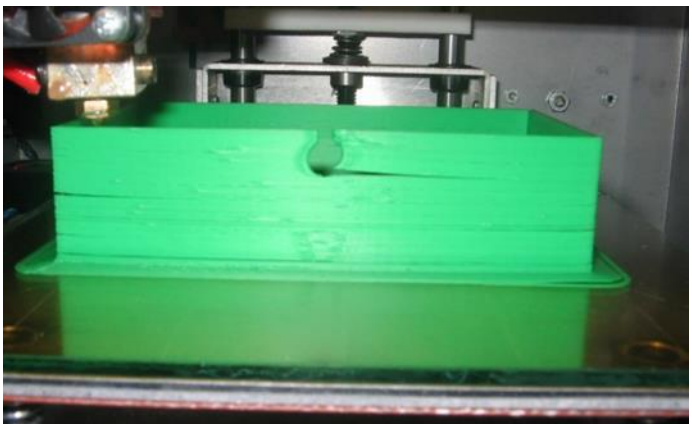


Figura 15 - Peça com delaminação.

- **Deformação (*Warping*)**: As bordas da peça se curvam para cima ou para baixo durante a impressão, geralmente devido a um resfriamento desigual ou às tensões internas no material (Figura 16). O uso de uma plataforma de construção aquecida e o controle da temperatura ambiente podem ajudar a minimizar esse problema.



Figura 16 - Peça com borda curvada para cima (*warping*).

- **Distorção geométrica**: A peça final não possui as dimensões ou a formas corretas, muitas vezes devido a variações de temperatura ao longo da impressão, alterações no nível da plataforma ou problemas de dimensionamento no fatiador (*slicer*).
- **Extrusão irregular**: A extrusão do material é inconsistente, resultando em superfícies irregulares e detalhes imprecisos na peça.

A solução para esses problemas pode variar de acordo com a causa específica. Para resolvê-los, é essencial entender as configurações da impressora, os materiais utilizados e as características do modelo 3D. Muitas vezes, ajustar as configurações no fatiador (*slicer*), como temperatura, velocidade e taxa de preenchimento, pode ajudar a melhorar a qualidade da impressão e reduzir esses erros. Além disso, manter a impressora e o ambiente de impressão limpos e bem calibrados é fundamental para evitar muitos desses problemas. Alguns destes podem não ser perceptíveis facilmente através de uma inspeção visual e podem tornar a superfície permeável.

2.2 Flutuadores

Os flutuadores são dispositivos projetados para manter objetos ou estruturas na superfície da água ou para fornecer flutuabilidade [32, 33]. Existem vários tipos de flutuadores, cada um projetado para atender a uma finalidade específica. Alguns dos principais tipos de flutuadores incluem [32, 33, 34]:

- **Boias**: Boias são objetos ocos que flutuam na água. Elas podem ter várias

formas e tamanhos, desde boias esféricas pequenas até boias cilíndricas maiores. As boias são frequentemente usadas para marcar áreas perigosas, como bancos de areia, recifes ou áreas de natação segura. Elas também são usadas em embarcações para fornecer flutuabilidade adicional ou como dispositivos de sinalização.

- **Balsas salva-vidas**: As balsas salva-vidas são projetadas para fornecer flutuabilidade e abrigo em emergências no mar. Elas vêm em vários tamanhos e estilos e geralmente são equipadas com suprimentos de sobrevivência, como alimentos, água, luzes de sinalização e dispositivos de comunicação.
- **Boias de navegação / sinalização**: Boias de navegação são usadas como marcos para auxiliar na navegação de embarcações. Elas podem ser flutuantes ou fixas ao fundo do mar e geralmente são coloridas e têm sinais luminosos para indicar a posição e a direção.
- **Flutuadores de pesca**: Os flutuadores de pesca são pequenos dispositivos flutuantes que são usados na pesca com anzol e linha. Eles ajudam a indicar quando um peixe morde a isca, fazendo com que o flutuador se mova ou afunde.
- **Flutuadores para natação**: Esses flutuadores são frequentemente usados em atividades de natação e segurança aquática. Eles podem incluir coletes salva-vidas, boias infláveis, esteiras infláveis e outros dispositivos que proporcionam flutuabilidade e segurança ao nadador.
- **Flutuadores industriais**: Em ambientes industriais e de construção, os flutuadores são usados para fornecer flutuabilidade a objetos pesados, como tubulações, cabos e estruturas temporárias que precisam ser posicionadas na água.
- **Flutuadores para aeronaves anfíbias**: Aeronaves anfíbias, como hidroaviões, podem ser equipadas com flutuadores que permitem a decolagem e o pouso na água. Esses flutuadores são projetados para fornecer sustentação e estabilidade na água.
- **Flutuadores de plataformas offshore**: Na indústria de petróleo e gás, flutuadores são usados para ancorar e dar estabilidade a plataformas offshore. Eles podem ser do tipo semissubmersível ou outros designs especializados.
- **Flutuadores de equipamentos de mergulho**: Equipamentos de mergulho,

como cilindros de ar, são frequentemente equipados com flutuadores para ajudar os mergulhadores a manter a flutuabilidade subaquática.

- **Flutuadores de barcos e embarcações**: Os flutuadores são usados em várias embarcações para fornecer flutuabilidade e estabilidade. Isso inclui barcos infláveis, botes salva-vidas, jangadas infláveis e outros.

Esses são alguns dos principais tipos de flutuadores utilizados em diferentes aplicações (Figura 17). Cada tipo de flutuador é projetado para atender a necessidades específicas de flutuabilidade, segurança ou navegação em ambientes aquáticos.

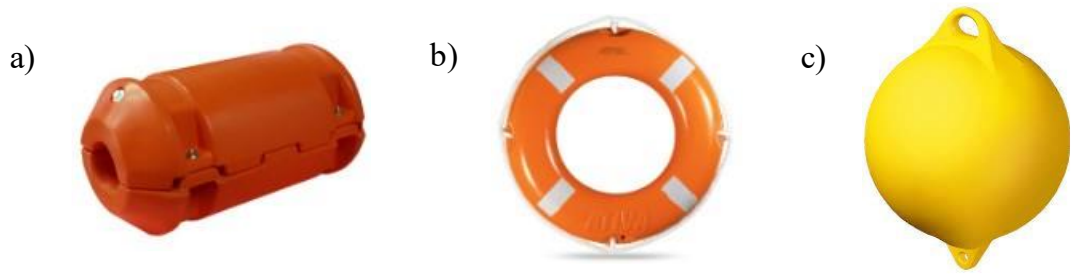


Figura 17 - Flutuadores. a) de mango/mangueira, b) boia salva-vidas, c) boia de sinalização.

2.2.1 Processos de Fabricação de Flutuadores

A fabricação de flutuadores pode envolver diversos processos, dependendo do tipo de flutuador, dos materiais utilizados e das especificações do projeto. Aqui estão alguns dos principais processos de fabricação de flutuadores [36]:

- **Moldagem por injeção de plástico**: Este é um dos métodos mais comuns para a fabricação de flutuadores de plástico, como boias e balsas salva-vidas. O plástico derretido é injetado em moldes pré-fabricados, onde resfria e solidifica para formar a peça final. Esse processo é rápido e eficiente para produções em massa.
- **Moldagem por sopro de plástico**: Nesse processo, o plástico é aquecido até que se torne uma bolha oca. A pressão do ar é usada para inflar o plástico dentro de um molde, que assume a forma desejada do flutuador quando resfriado. É comumente utilizado na fabricação de boias infláveis e brinquedos de piscina.
- **Rotomoldagem**: É uma técnica de moldagem por rotação do polímero fundido que permite criar peças ocas e complexas, como flutuadores de pesca e

sinalização, de forma eficiente e econômica.

- **Usinagem de Espuma de Poliuretano**: A espuma de poliuretano é usada para criar flutuadores de alta densidade, frequentemente usados em estruturas offshore e barcos. A espuma é usinada em formas precisas, e a superfície é revestida com uma camada protetora para melhor durabilidade.
- **Laminação de fibra de vidro**: Para flutuadores de fibra de vidro, um processo de laminação é utilizado. Camadas de fibra de vidro são impregnadas com resina epóxi e moldadas sobre um molde. Isso cria uma estrutura resistente e durável.
- **Moldagem por compressão**: Esse processo é utilizado para criar flutuadores de borracha ou elastômero. O material é colocado em um molde e submetido a alta pressão e temperatura, fazendo com que adote a forma do molde.

A escolha do processo de fabricação depende das necessidades específicas do projeto, do material a ser utilizado e do tamanho e da quantidade dos flutuadores a serem produzidos. Cada processo tem suas vantagens e desvantagens, e é importante selecionar o método mais adequado para atender aos requisitos de flutuabilidade, resistência e durabilidade do flutuador [37].

2.2.2 Materiais dos flutuadores

Os materiais utilizados na composição dos flutuadores podem variar de acordo com o tipo de flutuador e sua aplicação específica. Aqui estão alguns dos principais materiais que são comumente usados na fabricação de flutuadores [37]:

- **Plástico de Alta Densidade (HDPE - *High-Density Polyethylene*)**: O HDPE é um dos materiais plásticos mais comuns para a fabricação de boias e flutuadores, especialmente aqueles usados em docas, embarcações pequenas e projetos de aquicultura. É conhecido por sua resistência à água salgada e sua durabilidade.
- **Polietileno Expandido (EPS - *Expanded Polystyrene*)**: O EPS, também conhecido como isopor, é frequentemente usado em flutuadores de baixo custo, como boias de sinalização, devido à sua flutuabilidade e facilidade de moldagem.
- **PVC (Policloreto de Vinila)**: O PVC é comumente utilizado em flutuadores infláveis, como jangadas e botes. É leve, durável e pode ser soldado ou

costurado para criar formas infláveis.

- **Borracha**: A borracha é usada em flutuadores de elastômero, especialmente aqueles que precisam de alta resistência à abrasão ou produtos químicos. Pode ser usado em aplicações como boias de amarração em portos e áreas industriais.
- **Espuma de Poliuretano**: A espuma de poliuretano é usada para criar flutuadores de alta densidade em aplicações como docas flutuantes e estruturas marítimas. Ela é leve, resistente à água e oferece excelente flutuabilidade.
- **Nylon revestido de PVC**: Em alguns casos, como em balsas salva-vidas, flutuadores podem ser feitos de nylon revestido de PVC para proporcionar durabilidade e resistência à água.
- **Materiais compósitos**: Em algumas aplicações, materiais compósitos que combinam resinas e fibras podem ser usados para criar flutuadores com uma combinação de resistência e leveza.

A seleção do material de flutuador depende das características específicas necessárias para a aplicação, como resistência à água, flutuabilidade, durabilidade, resistência a produtos químicos e resistência ao desgaste.

2.3 Revestimentos

Os revestimentos têm várias finalidades, e suas aplicações abrangem uma ampla gama de setores e indústrias. A principal finalidade dos revestimentos é proteger e melhorar a qualidade e o desempenho das superfícies e substratos aos quais são aplicados. Aqui estão algumas das principais finalidades dos revestimentos [38]:

- **Proteção contra corrosão**: Muitos revestimentos são projetados para proteger metais contra a corrosão, impedindo que entrem em contato com a água ou agentes corrosivos, como produtos químicos ou poluentes atmosféricos.
- **Impermeabilização**: Os revestimentos podem tornar superfícies impermeáveis à água e à umidade, evitando danos causados pela infiltração de água. Isso é especialmente importante em aplicações como telhados, paredes, fundações e estruturas subterrâneas.
- **Proteção contra desgaste e abrasão**: Revestimentos resistentes ao desgaste são

usados em superfícies que estão sujeitas a desgaste constante, como pisos industriais, estruturas de equipamentos pesados e superfícies de transporte.

- **Melhoria da aparência**: Revestimentos podem ser aplicados para melhorar a aparência de superfícies, fornecendo um acabamento estético, cores, texturas ou brilho desejados.
- **Resistência química**: Alguns revestimentos são formulados para resistir a produtos químicos corrosivos, ácidos ou substâncias químicas agressivas, protegendo assim os substratos contra danos químicos.
- **Resistência a altas temperaturas**: Revestimentos resistentes ao calor são usados em superfícies que estão expostas a altas temperaturas, como dutos de escape de veículos, fornos industriais e equipamentos de processamento de calor.
- **Melhoria do desempenho de superfícies**: Revestimentos podem ser aplicados para melhorar o desempenho de superfícies em termos de resistência ao deslizamento, aderência, isolamento elétrico, resistência ao fogo, isolamento térmico e outras características.

Essas são apenas algumas das muitas finalidades dos revestimentos. A escolha do tipo de revestimento depende das necessidades específicas do projeto, das condições ambientais, dos substratos envolvidos e dos objetivos desejados. Os revestimentos desempenham um papel fundamental em proteger ativos, melhorar a durabilidade e a estética e garantir a segurança em uma variedade de aplicações [38].

2.3.2 Revestimentos usados em ambiente naval

Há uma grande variedade de revestimentos para embarcações e flutuadores dependendo do material do flutuador/embarcação e da finalidade. Entre os mais comuns estão [40]:

- **Tinta antivegetativa**: Este tipo de revestimento é projetado para evitar o crescimento de organismos marinhos, como algas, mexilhões e cracas, no casco de uma embarcação. As tintas antivegetativas geralmente contêm biocidas ou

substâncias químicas que inibem o crescimento de organismos marinhos, ajudando a manter a eficiência e a velocidade da embarcação.

- **Tinta epóxi**: Tintas epóxi são conhecidas por sua durabilidade e resistência à água. Elas são frequentemente usadas como revestimento protetor em embarcações e flutuadores de aço ou alumínio, ajudando a proteger contra a corrosão.
- **Gel *coat***: É um revestimento de resina de poliéster ou epóxi usado em cascos de embarcações de fibra de vidro. Ele proporciona uma superfície lisa e brilhante e protege a fibra de vidro contra os efeitos da exposição à água e ao sol.
- **Tintas à base de água**: Tintas à base de água são uma alternativa mais ambientalmente amigável às tintas à base de solventes tradicionais. Elas são usadas em cascos de embarcações e outras superfícies onde a emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs) é uma preocupação.

Capítulo 3

Metodologia

Com os avanços da Manufatura aditiva, que possibilita a produção de geometrias complexas de forma fácil, econômica e rápida, torna-se fundamental avaliar sua confiabilidade em aplicações específicas, garantindo assim seu uso de forma responsável. Nesse sentido, esse trabalho propõe analisar a estanqueidade e as propriedades mecânicas de corpos de prova impressos em filamento PLA *ecofriendly*, utilizando diferentes tipos de revestimentos comumente empregados na indústria naval, tanto antes quanto após o envelhecimento em água destilada.

Embora os exercícios da RVT ocorram em água salgada, optou-se por realizar o envelhecimento dos corpos de prova em água destilada para permitir uma comparação mais direta com outro estudo acadêmico [7]. É importante ressaltar que as regiões marítimas apresentam variações nas concentrações de sais minerais, além de outros fatores como exposição à luz UV, possíveis colisões com embarcações, interações com a fauna e flora marinha, e condições inadequadas de armazenamento entre exercícios, os quais não foram contemplados nos experimentos realizados. Portanto, este estudo representa uma contribuição significativa para fundamentar a viabilidade do uso de boias impressas em 3D com revestimento em ambientes aquáticos.

3.1 Máquina, filamento e parâmetros

Neste trabalho foi utilizada a impressora 3D da marca Creality, modelo Ender 3 S1 (Figura 18), por ser uma máquina de baixo custo e estar presente no Laboratório de Protótipos Mecânicos (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha. A única alteração feita na máquina em comparação com o modelo original foi a troca do bico

extrusor para um com o diâmetro de 0,6 mm (o original possui 0,4 mm de diâmetro), com o objetivo de produzir um fluxo maior de material e acelerar o processo de fabricação.

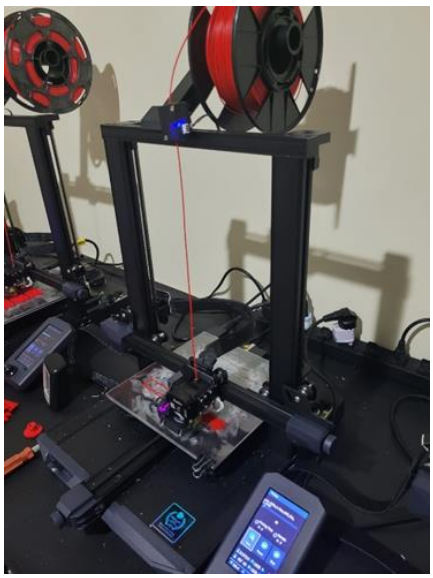


Figura 18 - Impressora 3D Ender 3 S1 da marca Creality. Fonte: autor.

A impressora Ender 3 S1 é uma máquina cartesiana que apresenta um tubo *bowden* entre as engrenagens que deslocam o filamento até o bico extrusor. Essa configuração reduz o peso do cabeçote de impressão, possibilitando uma impressão com maior velocidade. Além disso, ela é equipada com recursos como nivelamento automático, sensor de fim de filamento e utiliza uma mesa de impressão de vidro comum, com 4 mm de espessura. Para garantir a adesão do objeto à mesa sem a necessidade de recursos adicionais como *brim* ou *raft*, além do aquecimento da mesa, foi empregada uma fina camada de cola bastão da marca Scotch. Ela contém o composto polivinil, o qual facilita a adesão durante a fabricação.

O filamento escolhido foi o PLA Plus com 1,75mm de diâmetro, na cor vermelha, da marca nacional GTMax (Fig. 19). O PLA é o material mais popular da impressão 3D. Além de ser fácil de usar, é um bioplástico que tem propriedades mecânicas suficientes para a produção de um flutuador, já que não são previstos grandes esforços mecânicos nem temperaturas superiores à 50°C [23].



Figura 19 - Filamento PLA Plus da empresa GTMax [39].

No endereço eletrônico da GTMax temos as propriedades mecânicas do PLA Plus, presentes na Tabela 1 [39].

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do PLA Plus, fornecidos pelo fabricante (GTMax) [39]

Propriedade	**Método de teste**	**Unidade**	**Valor**
Resistência à tração	D882	MPa	7,700 (53)
Alongamento na ruptura	D882	%	6
Módulo de flexão	D882	GPa	500 (3,5)
Resistência ao impacto IZOD	D256	J/m	0,3 (16)

Para definir os parâmetros foi utilizado o programa *opensource* Ultimaker Cura, desenvolvido pela empresa holandesa Ultimaker, versão 5.4.0. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para confecção dos corpos de prova.

Altura da camada	0,2 mm
Diâmetro do Bico Extrusor	0,6 mm
Nº de paredes laterais	4 (2,4 mm)
Camadas de topo e base	12 (2,4 mm)
Padrão de preenchimento	Grade
Densidade de preenchimento	10 %
Direção de Impressão	+/- 45°
Temperatura do bico	210 ºC

Temperatura da mesa	65 ºC
Velocidade	60 mm/s

3.2 Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova (CPs) seguiu as dimensões estabelecidas pelas normas correspondentes. Para o ensaio de tração, as dimensões do corpo de prova estão representadas na Figura 20, enquanto para o ensaio de flexão foram utilizadas dimensões de 144 x 15 x 3,2 mm, e para o teste de absorção, as dimensões foram 40 x 40 x 25 mm.

Foram impressos 60 corpos de prova, divididos em 4 grupos referentes aos tipos de revestimento: tinta à base de epóxi, resina epóxi, resina poliéster e grupo controle (sem revestimento). Cada um dos grupos foi subdivido de acordo com os três diferentes ensaios realizados: tração e flexão, em T0 e T1 (totalizando 24 CPs para cada), e absorção (totalizando 12 CPs). Para cada teste, foram produzidos 3 corpos de prova para cada um dos revestimentos utilizados.

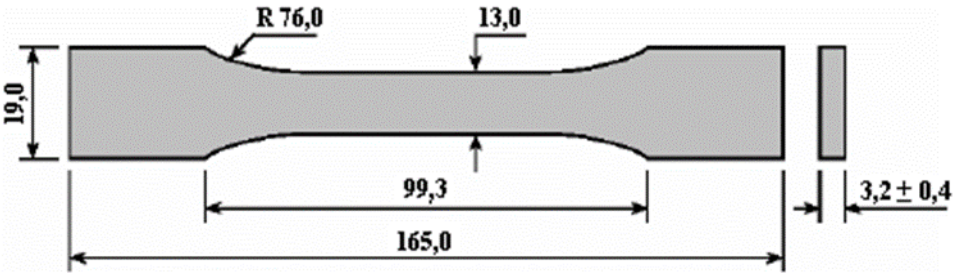


Figura 20 – Dimensões, em milímetros, do corpo de prova de tração estilo *dogbone* [8].

Todas as peças fabricadas foram submetidas a uma inspeção visual, resultando no descarte e substituição de 3 CPs do ensaio de tração e 1 CP do ensaio de flexão devido a um leve empenamento em uma das extremidades. Os CPs de tração, flexão e absorção, antes do envelhecimento, pesavam em torno de 10 g, 7 g e 18 g, respectivamente. Os espécimes foram fabricados com a deposição do material em forma diagonal ao seu comprimento, formando ângulos de 45 graus com o eixo vertical dos CPs.

Após a fabricação, fez-se um furo de 0,5mm de diâmetro, com profundidade de 1mm, em uma das faces de cada corpo de prova de absorção, utilizando uma micro retificadora, antes da aplicação do revestimento, como ilustrado na Figura 21. Essa etapa teve o propósito de simular defeitos comuns encontrados no processo de impressão 3D. Desta forma, será possível avaliar a eficácia dos revestimentos mesmo em peças que apresentem falhas de até 0,5mm de diâmetro em sua superfície. É importante destacar que em peças de maiores dimensões, tais erros podem ser imperceptíveis em uma inspeção visual. Portanto, o objetivo do ensaio é avaliar a eficácia dos revestimentos quanto a confiabilidade da estanqueidade, pois é inerente à este processo de fabricação pequenos erros provenientes de variações no fluxo de material depositado.

a) b)

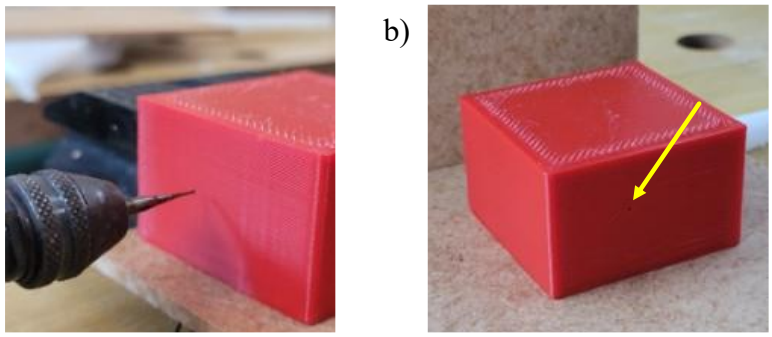


Figura 21 - Corpo de prova de absorção. a) furação com micro retífica, b) espécime com furo. Fonte: autor.

3.3 Revestimentos utilizados

O uso do revestimento nesse estudo visa principalmente garantir a estanqueidade dos espécimes. Os flutuadores em questão estão sendo desenvolvidos exclusivamente para as boias da Raia Virtual de Tiro, onde não se espera que estejam sujeitos a grandes esforços mecânicos ou expostos por longos períodos às intempéries do tempo. Isso se deve ao fato de que os exercícios têm duração máxima de 8 horas, após o qual os flutuadores são lavados e armazenados em local apropriado.

Além da função de garantir a estanqueidade, foram consideradas outras características importantes, como a facilidade de aquisição no mercado nacional e o

custo do revestimento. Com isso, foram selecionadas a Resina Epóxi Cristal 2001 da Redelease (Figura 22a), a Resina Poliéster Arazyn 25108 T-10 da Redelease (Figura 22b) e a Tinta Epóxi à base de água Diepoxi Multisuperfícies da Iquine (Figura 22c).

Todos os revestimentos são fornecidos por empresas nacionais relevantes no mercado e são materiais comumente utilizados em ambiente externo / naval, segundo os fabricantes.



Figura 22 - Revestimentos utilizados. a) resina epóxi, b) resina poliéster, c) tinta epóxi à base de água.

As resinas foram curadas através de mistura com endurecedor fornecido pelo fabricante, respeitando a proporção recomendada. As informações das resinas epóxi e poliéster pode ser observada nas Tabela 3Tabela 4Tabela 5 Tabela 6.

Tabela 3 - Características da resina epóxi utilizada [44].

Características	**Resina epóxi 2001**	**Endurecedor 3154**
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 20 ºC, cPs	10000 a 14000	200 máx.
Peso específico, 20 ºC, g/cm^3	1,16 ± 0,01	1,005 ± 0,015

Tabela 4 - Dados fornecidos pelo fabricante da resina epóxi utilizada [44].

Propriedades do sistema não curado	
Proporção de mistura (resina : endurecedor)	100:50 partes em peso
Temperatura de manipulação (ºC)	18 – 30
Tempo de utilização da mistura 100 g (get time) a 20 ºC	20 a 30 min.
Tempo de utilização da mistura (100 g em película, 20 ºC)	3 a 4 horas
Cura total a 20 ºC	7 dias

Propriedades do sistema curado	
Temperatura de deflexão térmica (HTD) (ºC)	95 – 100
Força de compressão (MPa)	34,5
Força de tensão (MPa)	20 – 43
Elongação (%)	2,8
Impacto IZOD (J/mm)	Min. 150

Tabela 5 - Especificações da resina poliéster utilizada fornecidas pelo fabricante [45].

Variáveis	**Unidade**	**Valores**
Viscosidade (25 ºC)	cPs	170 – 210
*Gel-time** (25 ºC)	Min.	10 – 14
Teor de estireno	%	42 máx.
Teor de sólidos	%	58
Pico exotérmico	ºC	170 máx.
Índice de acidez	Mg KOH/g	25
Intervalo de pico	Máx.	22 minutos

* Catálise para obtenção do *gel-time*: 100 g de resina pura à 25 ºC, com 1 % de Butanox M 50

Tabela 6 - Valores típicos da resina poliéster utilizada fornecidos pelo fabricante [45].

Teste	**Valor**	**Método de teste**
Resistência à tração, MPa	56	ASTM D-638
Módulo na tração, MPa	$186x10^{-4}$	ASTM D-638
Alongamento, %	3,2	ASTM D-638
Resistência à flexão, MPa	0,8	ASTM D-790
Módulo na flexão, MPa	$262x10^{-4}$	ASTM D-790
Temperatura de distorção térmica, ºC	65	ASTM D-648
Dureza Barcol, 2 horas	35 – 40 B	ASTM D-2583

De acordo com as instruções do fabricante, foi assegurado que a superfície das peças impressas estivesse limpa e seca antes da aplicação do revestimento. Foram então aplicadas 3 camadas do material, resultando em um aumento de espessura total de

aproximadamente de 0,2 mm (para a tinta) a 0,4 mm (para as resinas). Isso significa que a aplicação em cada face dos espécimes resultou em um aumento médio de 0,1 e 0,2 mm de espessura, respectivamente.

Entre cada aplicação, foi respeitado o tempo de secagem ou cura do revestimento. Os corpos de prova foram devidamente identificados com o auxílio de um marcador antes de serem enviados para a realização do teste de absorção e envelhecimento.

3.4 Processo de envelhecimento

Metade dos corpos de prova de tração e flexão foram submetidos ao envelhecimento em água destilada por um período de 15 dias. Os espécimes foram separados com o auxílio de uma espuma que entrava em contato apenas com as extremidades dos corpos de prova, respeitando a região de comprimento útil para realização dos testes.

Para armazenar os espécimes submersos, foi utilizado um galão de água transparente de 10 litros, possibilitando a inspeção visual ao longo dos dias. Isso assegurou que todos os corpos de prova permanecessem completamente submersos e sem contato uns com os outros, como ilustrado na Figura 23. O recipiente foi mantido em ambiente fechado, protegido da luz solar direta e em temperatura ambiente.



Figura 23 - Recipiente com corpos de prova para processo de envelhecimento. Fonte: autor.

3.5 Ensaio de tração

A partir do ensaio de tração é possível obter informações fundamentais do material como resistência à tração, alongamento na ruptura, Módulo de Young, limite elástico, entre outros. Tais propriedades costumam ser dispostas pelo gráfico tensão x deformação. A máquina utilizada foi a máquina de tração universal INSTRON® 5966 localizada no laboratório de compósitos e adesivos (LADES – CEFET/RJ). Extensômetro tipo *clip gauge* foi utilizado para a medida real de deformação. Foi utilizada taxa de 1 mm/min à temperatura ambiente. A geometria e dimensões dos corpos de prova estilo *dogbone* foram as estabelecidas pela norma ASTM D638 [8].

Foi utilizada uma célula de carga de 10 kN à uma velocidade de 1 mm/min (Figura 24). O comprimento inicial entre garras foi mantido em torno de 102 mm. Os corpos de prova tiveram suas extremidades lixadas para aumentar o atrito com as garras da máquina e evitar escorregamento. Foi utilizado um extensômetro do tipo *clip gauge* para realizar a medida real da deformação dos espécimes.

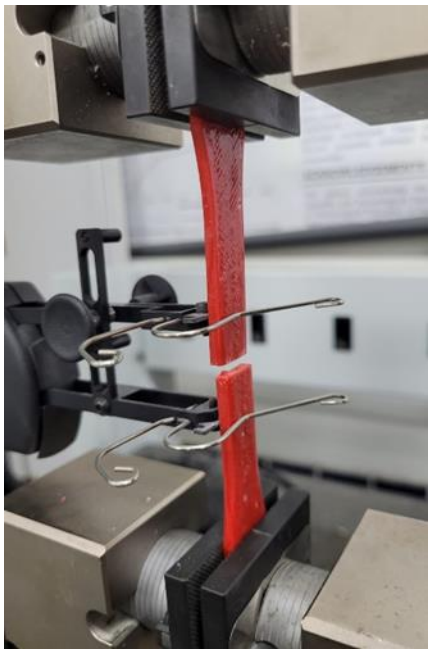


Figura 24 - Ensaio de tração. Fonte: autor.

Os ensaios de tração foram realizados ao longo de dois dias distintos: um para os espécimes sem envelhecimento (T0) e o outro para o grupo que foi submetido ao envelhecimento em água destilada por 15 dias (T1).

3.6 Ensaio de flexão

A partir do ensaio de flexão em três pontos é possível obter um outro grupo de informações relevantes do material, como módulo de flexão, tensão de flexão máxima, módulo de ruptura em flexão, entre outros. Os três pontos, referidos acima, são compostos por dois apoios nas extremidades, enquanto no terceiro ponto é aplicada a carga, no meio da peça. Com isso, uma face sofre compressão enquanto a face oposta sofre tração. Tal ensaio também foi realizado na mesma máquina (INSTRON® 5966), no LADES – CEFET/RJ. A geometria e dimensões dos corpos de prova foram as estabelecidas pela norma ASTM D7264 [9].

O ensaio de flexão foi realizado na mesma máquina que o ensaio de tração, porém desta vez utilizando uma célula de carga de 1 kN e velocidade de 5 mm/min. O teste utilizou sistema de flexão de três pontos, sendo dois apoios e um ponto central, no

qual foi aplicada a carga (Figura 25). Os corpos de prova foram produzidos respeitando a geometria e dimensões propostas na norma ASTM D-7264 para a taxa comprimento/espessura de 1:32.

Os ensaios de flexão ocorreram em dois dias, sendo um para os espécimes sem envelhecimento (T0) e o outro dia para o grupo que passou pelos 15 dias de envelhecimento em água destilada (T1).



Figura 25 - Ensaio de flexão. Fonte: autor.

3.7 Ensaio de absorção

O ensaio de absorção de água consiste na imersão da peça em meio aquoso para avaliar a taxa de absorção do material, quantidade total absorvida e saturação. No contexto específico deste trabalho, além de avaliar a absorção do material, há interesse particular em avaliar a estanqueidade da superfície. Para isso, os corpos de prova foram fabricados com baixo preenchimento interno, resultando vazios em seu interior. Além disso, foi realizado um furo de 0,5mm de diâmetro em uma das faces de cada

corpo de prova antes da aplicação do revestimento, utilizando uma micro retificadora, a fim de simular defeitos comuns no processo de impressão 3D [5]. A geometria e dimensões dos corpos de prova foram as estabelecidas pela norma ASTM D570 [10].

Durante a fabricação, os corpos de prova foram preenchidos internamente em 10%, resultando em uma flutuabilidade positiva. Como resultado, foi necessário implementar uma tela impressa em 3D e utilizar um peso de 1 kg para evitar que a superfície superior dos corpos de prova entrasse em contato direto com o ambiente externo. Essa medida assegurou que todos os corpos de prova permanecessem completamente submersos, mantendo contato com a água em todas as suas faces, conforme ilustrado na Figura 26.

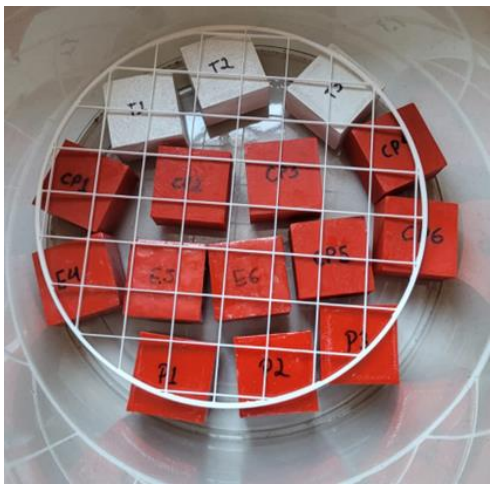


Figura 26 - Espécimes para ensaio de absorção. Fonte: autor.

Os espécimes eram removidos individualmente da água, levemente secados com o auxílio de um tecido de algodão limpo, e então pesados em balança de precisão (Figura 27). Tal processo foi realizado em intervalos de 30 minutos nas primeiras 2 horas, seguido de 2 intervalos de 1 hora, 2 intervalos de 2 horas e 2 intervalos de 8 horas, totalizando as primeiras 24 horas de absorção. As demais medições foram realizadas 1 vez ao dia, em intervalos de 24 horas, até completar 15 dias de teste.



Figura 27 - Medição da massa dos espécimes. Fonte: autor.

O período de 15 dias foi escolhido por ser equivalente a 45 ciclos de 8 horas de duração, que corresponde ao tempo máximo de cada exercício de tiro realizado pela Marinha do Brasil com o auxílio das boias da RVT.

Capítulo 4

Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de tração, flexão e absorção. Os dados foram tratados e apresentados por meio de gráficos e tabelas, permitindo a análise individual e comparativa de cada grupo de espécimes, bem como o efeito do envelhecimento em suas propriedades mecânicas.

4.1 Tração

Após a fabricação e aplicação do revestimento nos corpos de prova, os espécimes destinados ao ensaio de tração e flexão sem envelhecimento (T0) foram levados ao LADES. Os espécimes foram lixados em suas extremidades para aumentar sua rugosidade e consequentemente melhorar sua fixação nas garras da máquina, evitando seu escorregamento.

A Figura 28 apresenta as curvas representativas de tensão x deformação em tração para os corpos de prova em T0 (antes do envelhecimento) e as Figura 29 e 30 fornecem os dados quantitativos dos testes. Foram selecionados os corpos de prova com os resultados medianos para serem expostos em todos os gráficos que serão expostos a seguir.

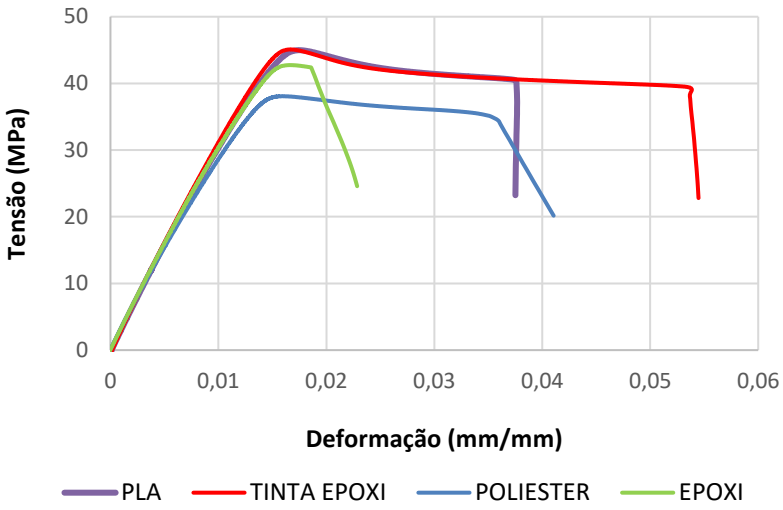


Figura 28 - Curvas representativas tensão-deformação em tração dos espécimes sem envelhecimento.

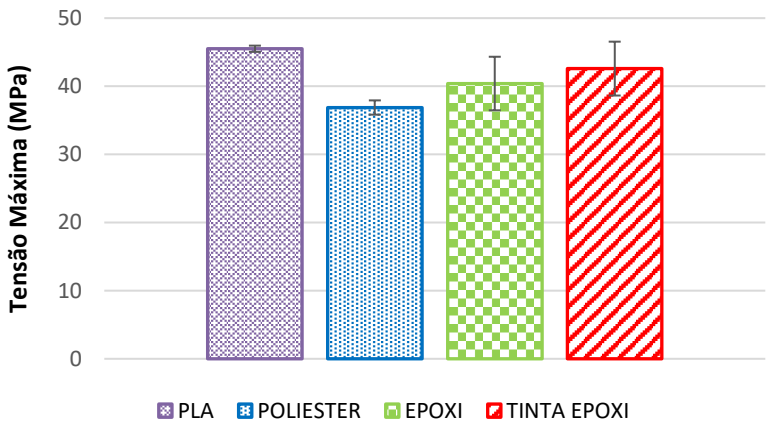


Figura 29 - Tensão máxima em tração dos espécimes sem envelhecimento.

Ao compararmos o grupo controle (PLA sem revestimento) com os demais, não foi observada variação significativa da tensão máxima (Figura 29), ao considerarmos o desvio-padrão referentes aos corpos de prova revestidos com resina epóxi e tinta epóxi, todos em torno de 40,4 (resina epóxi) à 45,5 (sem revestimento) MPa. Entretanto, os corpos de prova revestidos com Poliéster, apresentam uma tensão máxima de 36,9 MPa, 18,9% menor que o grupo controle.

A Figura 30 apresenta o módulo de Young em formato de gráfico de barras. Conforme indicado pelos resultados, todos os corpos de prova apresentaram rigidez similar, levando em conta o desvio-padrão.

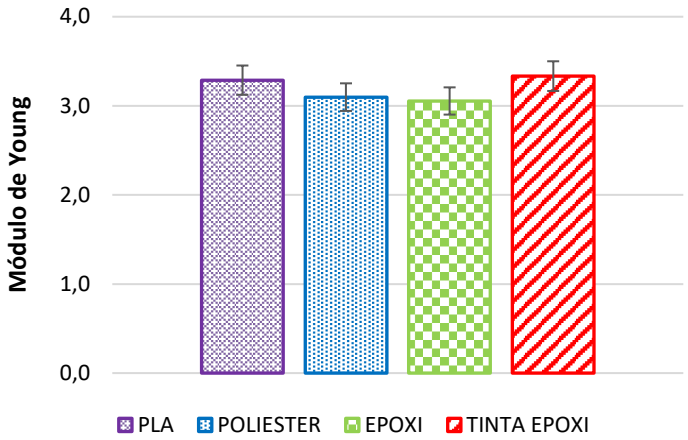


Figura 30 - Módulo de Young dos espécimes sem envelhecimento.

Outro grupo de corpos de prova para os ensaios de tração e flexão foi envelhecido em água destilada ao longo de 15 dias (T1), referente a 45 exercícios da RVT. Após o período de envelhecimento, os corpos de prova foram levados imediatamente para o LADES para a realização dos ensaios de tração e flexão, visando impedir variações nos resultados provenientes de longo período fora d'água. Nas Figura 31Figura 32 eFigura *33* é possível analisar os dados tratados através da curva tensão x deformação, tensão máxima e módulo de Young dos corpos de prova após envelhecimento (T1), respectivamente.

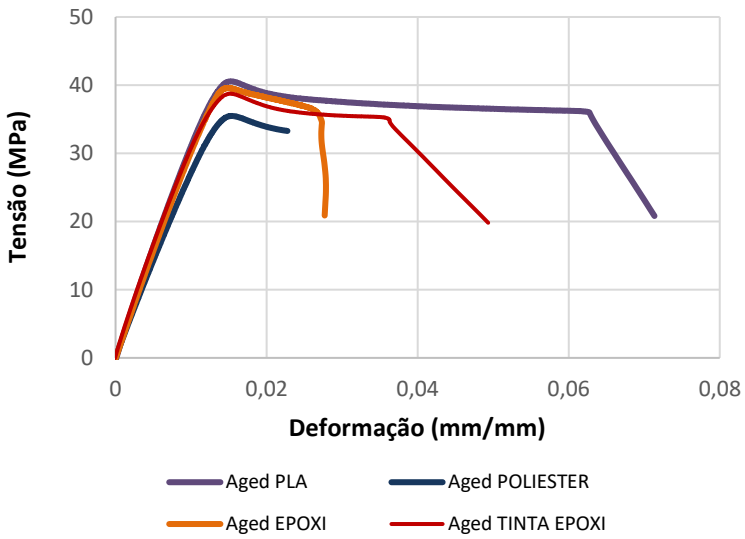


Figura 31 - Curvas representativas tensão-deformação em tração dos espécimes envelhecidos.

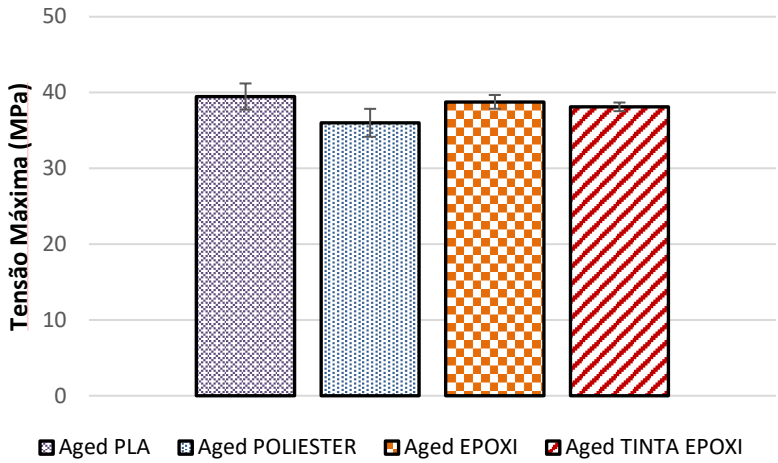


Figura 32 - Tensão máxima em tração dos espécimes envelhecidos.

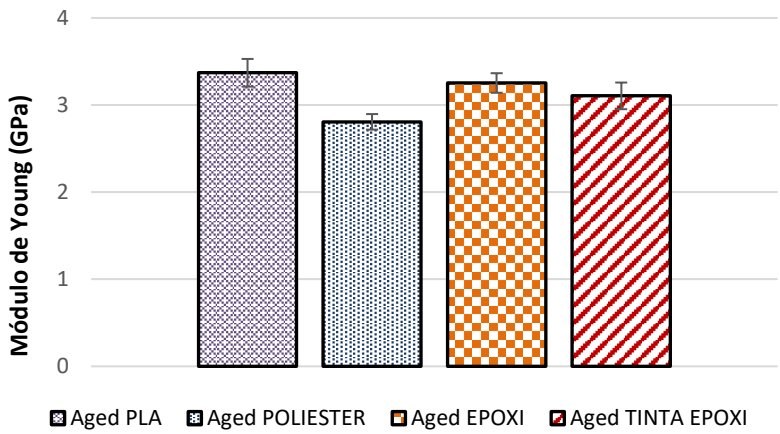


Figura 33 - Módulo de Young dos espécimes envelhecidos.

Assim como no grupo de corpos de prova sem envelhecimento (T0), a tensão máxima do grupo controle e dos revestidos com Resina Epóxi e Tinta à Base de Epóxi não apresentam diferença estatística relevante. Sendo o valor da tensão máxima entre 38,1 (tinta epóxi) e 39,5 (sem revestimento) MPa, com desvio padrão em torno de 1. Os corpos de prova revestidos com poliéster apresentaram uma tensão máxima média de 36 MPa, 8,9% abaixo da média apresentada pelo grupo controle. Em relação ao módulo de Young, o grupo controle, com resina epóxi e com tinta à base de epóxi apresentam valores em torno de 3,3 GPa, enquanto os espécimes com revestimento de poliéster apresentam um módulo de Young menor, de 2,8 GPa.

Também foram geradas figuras com a tensão máxima (Figura 34) e módulo de Young (Figura 35) dos resultados obtidos antes e após envelhecimento (T0 e T1), para

facilitar a comparação do efeito da água destilada nestas mensurações.

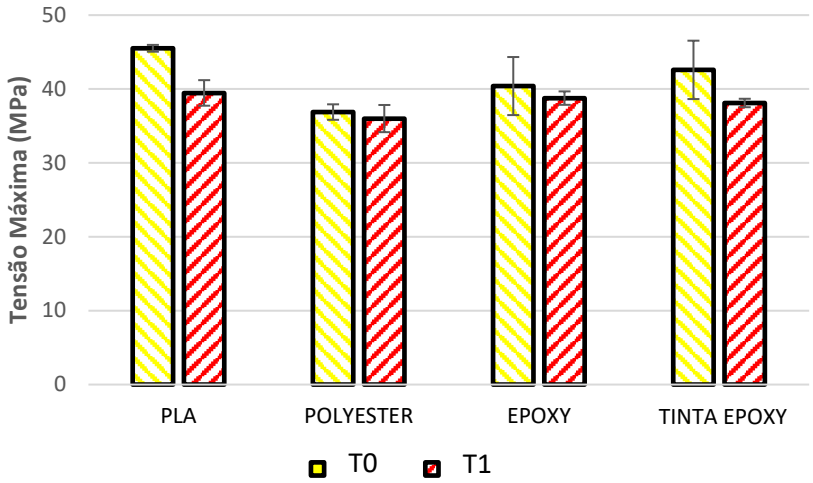


Figura 34 - Tensão máxima em tração dos espécimes antes e depois do envelhecimento.

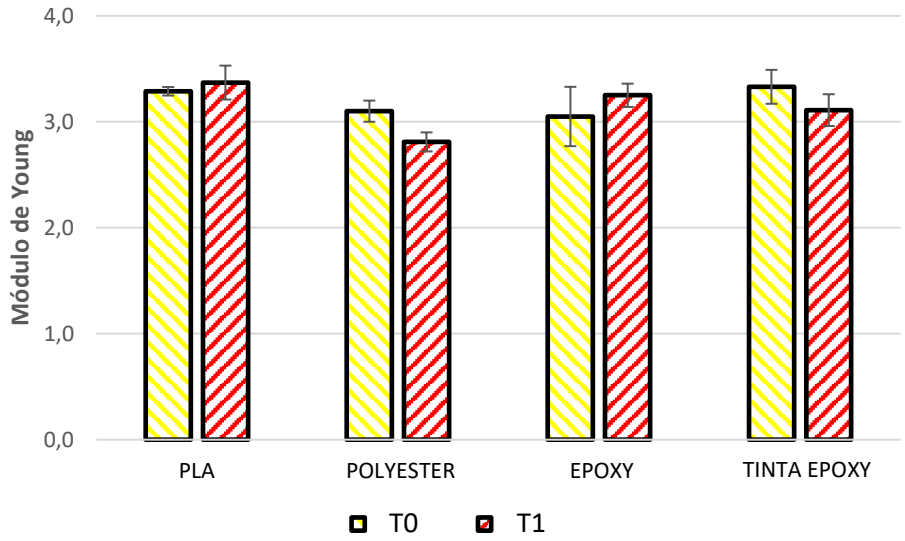


Figura 35 - Módulo de Young dos espécimes antes e depois do envelhecimento.

É possível observar na figura 34 uma tendência de queda da tensão máxima do PLA sem revestimento, com revestimento em resina epóxi e com tinta à base de epóxi. Enquanto a média da tensão máxima dos três espécimes em T0 é em torno de 42,8 MPa, em T1 é de 38,8 MPa, uma queda de quase 10%, para. Os CPs com revestimento de poliéster não apresentaram variação significativa em seu valor entre T0 e T1.

Ao analisar os resultados alcançados, é possível justificar a piora na tensão

máxima dos corpos de prova revestidos com poliéster devido à similaridade dessa resina com o PLA, pertencente à mesma família de polímeros [43]. Com isso, é provável que tenha ocorrido uma interação entre os materiais, o que levou a uma piora na tensão. Os demais revestimentos, por aparentemente não terem reagido quimicamente com o PLA, não impactaram significativamente os resultados.

O envelhecimento em água destilada causou a uma piora, em torno de 10%, na tensão máxima. Tal comportamento já era esperado, ao compararmos com o resultado de outro estudo [42] que também apresentou a tendência de piora das propriedades. Os valores, entretanto, sofreram menor alteração pois o tempo de envelhecimento foi inferior a 15 dias. [42]

4.2 Flexão

Do mesmo modo que os testes de tração, os de flexão também ocorreram em duas etapas. Sendo inicialmente realizado nos espécimes sem envelhecimento (T0). Os dados gerados pelo programa vinculado à máquina do LADES foram tratados, sendo confeccionados os gráficos das figuras 36, 37 e 38 que representam a flexão x deformação, a flexão máxima e o módulo de flexão, respectivamente.

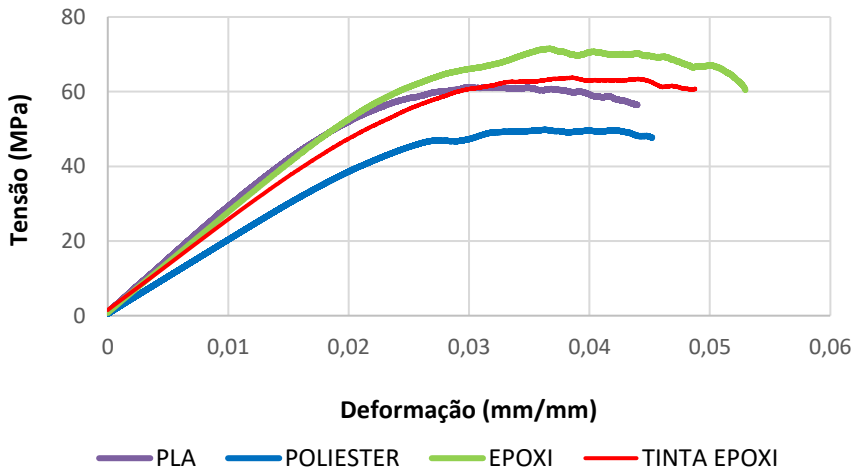


Figura 36 - Curvas representativas tensão-deformação em flexão dos espécimes sem envelhecimento.

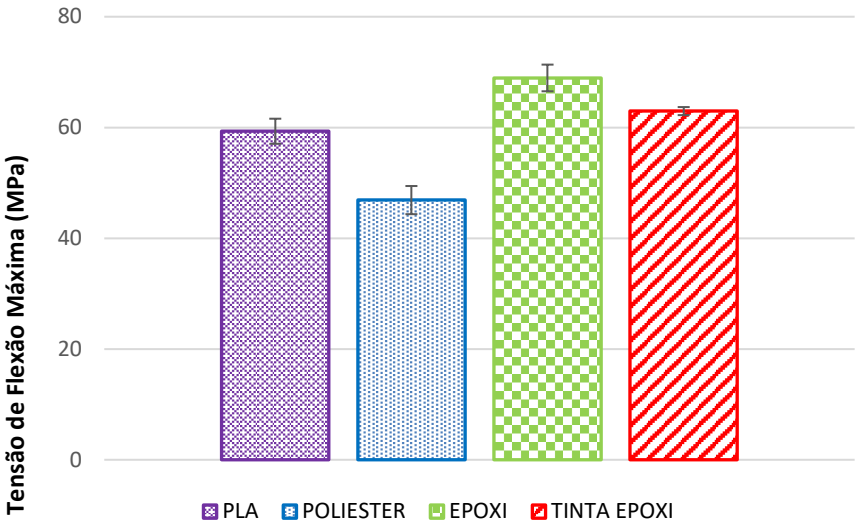


Figura 37 – Tensão de Flexão máxima dos espécimes sem envelhecimento.

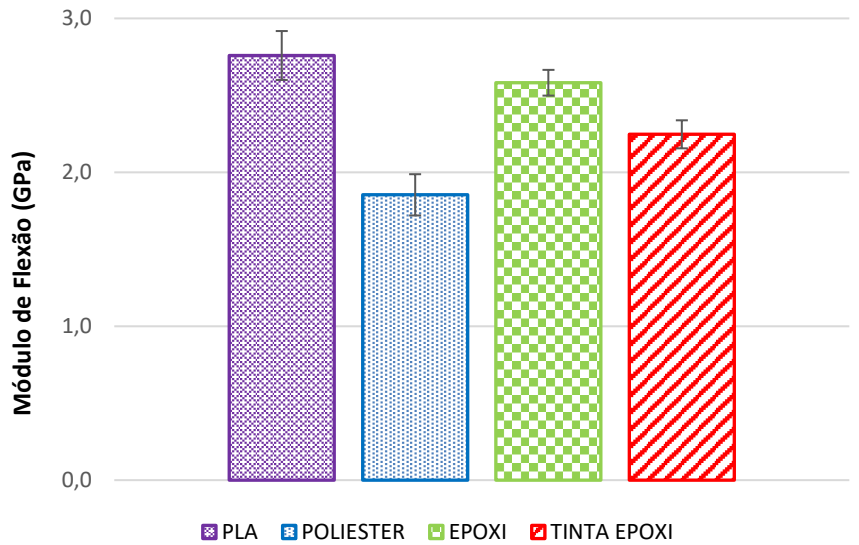


Figura 38 - Módulo de flexão dos espécimes sem envelhecimento.

Ao comparar os CPs com revestimento ao grupo controle, observou-se um aumento significativo da flexão máxima do grupo com resina epóxi, 68,9 MPa contra 59,3 MPa do grupo controle (aumento de 16%). Por sua vez, a tinta epóxi não apresentou uma influência significativa, demonstrando um desempenho semelhante ao do grupo controle, quando considerado o desvio padrão.

No entanto, a resina poliéster apresentou novamente uma piora de aproximadamente 20% ao comparado com o resultado médio obtido pelos espécimes de PLA sem revestimento, apresentando uma tensão de flexão máxima de 46,9 MPa.

Da mesma forma que nos ensaios de tração, é provável que a interação química entre o poliéster e o PLA tenha sido responsável pela diminuição da flexão máxima [43]. Em contrapartida, os CPs revestidos com resina epóxi apresentaram melhor desempenho. Uma possível justificativa são as propriedades mecânicas da resina epóxi que, segundo seu fabricante, apresenta tensão de flexão máxima de 120 MPa.

Os mesmos dados foram coletados dos espécimes envelhecidos (T1), produzindo as Figura 39 eFigura *40*, com flexão máxima e módulo de flexão, respectivamente.

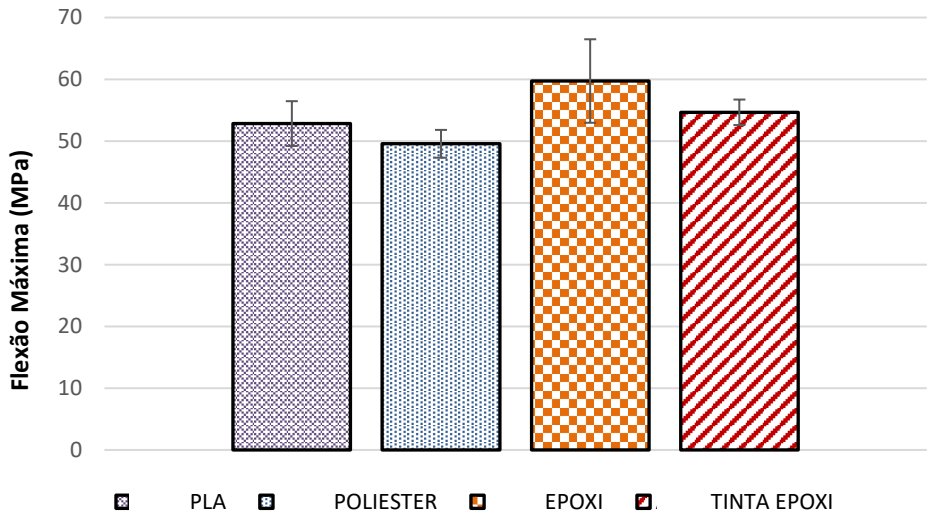


Figura 39 - Flexão máxima dos espécimes envelhecidos.

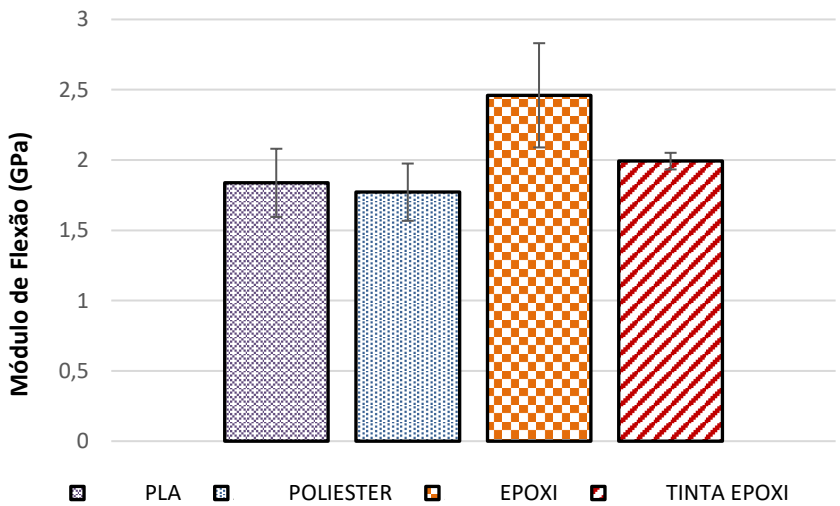


Figura 40 - Módulo de flexão dos espécimes envelhecidos.

Os espécimes com revestimento de resina epóxi seguem tendo um desempenho superior ao grupo controle (sem revestimento), 59,7 e 52,8 MPa, respectivamente. Já os com tinta à base de epóxi não apresentam alteração significativa em comparação ao grupo controle se levarmos em conta o desvio padrão de ambos os grupos. Os CPs com resina poliéster seguem tendo o pior desempenho, tal fator se dá pela interação do PLA com a resina, por serem materiais da mesma família de polímeros [43].

As Figura 41eFigura *42* apresentam uma comparação da flexão máxima e do módulo de flexão nos momentos T0 e T1.

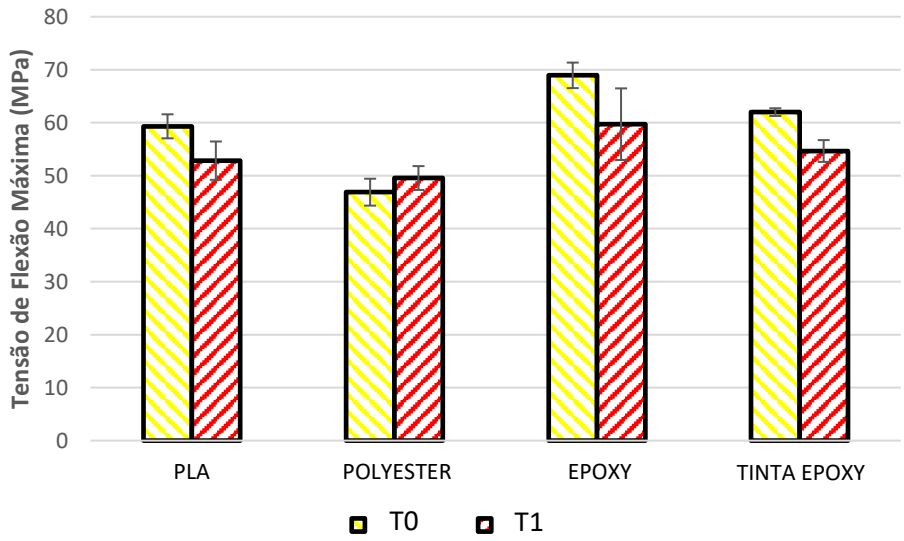


Figura 41 – Tensão de Flexão máxima dos espécimes antes e depois do envelhecimento.

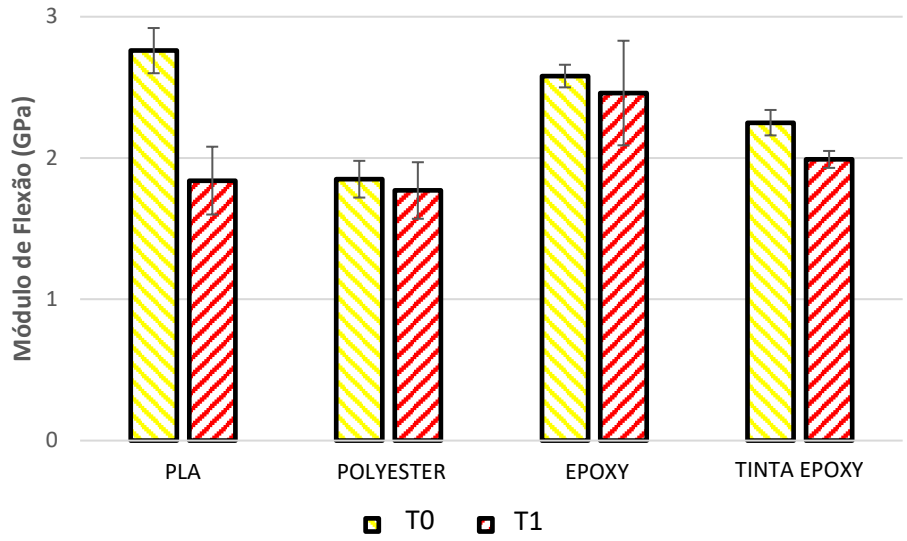


Figura 42 - Módulo de flexão máximo dos espécimes antes e depois do envelhecimento.

Os espécimes sem revestimento e os com revestimento de resina epóxi e tinta epóxi apresentaram uma piora na flexão máxima após os 15 dias de envelhecimento em água destilada. Tendo uma redução média entre 10% e 15%, dependendo do grupo. Já os espécimes com resina poliéster tiveram um pequeno ganho após o envelhecimento.

Porém, os CPs revestidos por poliéster seguiram apresentando a menor flexão máxima entre os 4 grupos. Em relação ao módulo de flexão, os CPs sem revestimento foram os que apresentaram uma maior alteração, sendo seu valor reduzido de 2,5 para 1,8 GPa, aproximadamente. Tal redução mostra que o efeito da água sobre os CPs os tornou mais elásticos e menos rígidos.

4.3 Absorção

Os espécimes destinados ao ensaio de absorção foram mantidos em água destilada por 15 dias, sendo levemente secados com uma folha de papel toalha e pesados em intervalos de tempo específicos. Os dados obtidos foram então tratados, sendo apresentados através da Figura 43, com o ganho percentual de massa ao longo do tempo. Na Figura 44 podemos ver o ganho máximo de massa adquirido, em todos os casos obtidos no final do período das medições. Da mesma forma que nos ensaios

de Tração e Flexão, foram selecionados as curvas reverentes a CPs que melhor representassem os dados encontrados.

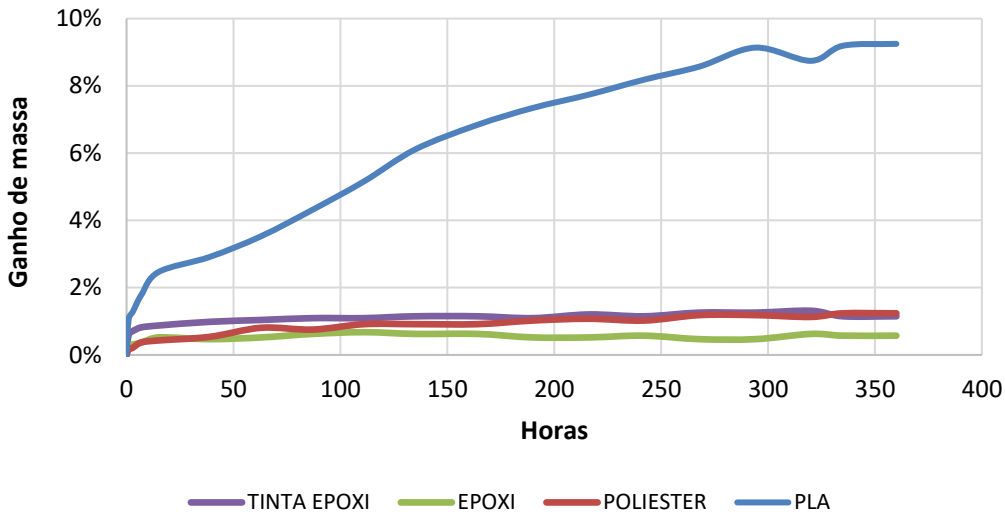


Figura 43 - Ganho percentual de massa em função do tempo de absorção.

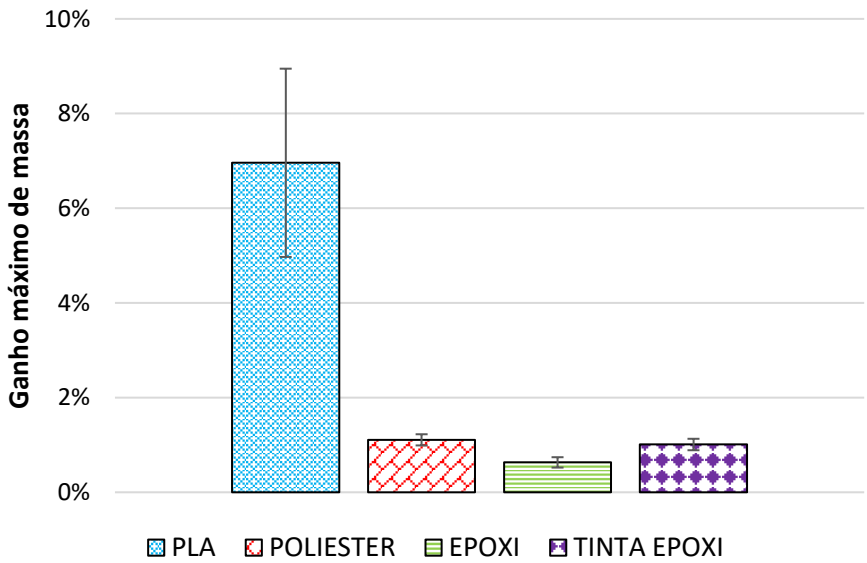


Figura 44 - Ganho percentual máximo de massa devido à absorção dos espécimes.

Na Figura 43 é possível observar que todos os corpos de prova que receberam algum tipo de revestimento apresentaram um ganho de massa em torno de 1,5%, o que representa em números absolutos um ganho de massa inferior a 0,5 gramas. Além disso, é possível observar que o módulo das curvas é praticamente linear, ou seja, rapidamente o ganho de massa foi estabilizado. Este platô é um indício que a água não

ultrapassou a camada maciça de 1,2 mm que compõe a superfície dos CPs, pois caso o mesmo ocorresse, haveria um ganho maior de peso, uma vez que o interior dos CPs foi fabricado com apenas 10% de preenchimento, apresentando assim cavidades que comportariam grandes volumes de água.

Com isso é provável que os espécimes adquiriram peso apenas por uma interação da água com a superfície da peça, hidratando-a. Já o grupo controle, sem revestimento, apresentou um comportamento bem diferente, tendo um aumento de massa contínuo, próximo de 10%, após 15 dias dentro d'água. Ao fim dos 15 dias, nota-se uma leve redução no ganho de massa, uma possível explicação para isso é o padrão de preenchimento interno do CP ser do tipo Grade, que leva a criação de seções internas, sendo provável que água tenha penetrado pelo orifício de 0,5 mm, o qual simula erros do processo de impressão, saturando uma dessas seções e dificultando sua penetração nas demais cavidades internas.

Tais cavidades não são todas do mesmo tamanho, o que é um possível motivo para o elevado desvio padrão do grupo controle (Figura 44), com corpos de prova apresentando ganho de massa entre 6% e 9,6%.

Uma informação importante dentro do foco desse estudo é que, segundo o fabricante, a densidade das Boia Salva-Vidas, utilizada na versão antiga da boia, é de 0,35 g/cm³. Já os CPs do teste de absorção sem revestimento, mais leves, apresentam densidade 0,45 g/cm³ e os com resina epóxi, mais pesados, apresentam densidade de 0,55 g/cm³, porém, a geometria influencia consideravelmente a densidade das peças: o somatório de sua parede, com 1,2mm de espessura, com o revestimento adicionado, é muito mais pesado proporcionalmente do que o interior da peça, já que este apresenta.

Com isso, ao simular uma estrutura com as mesmas dimensões da boia salva-vidas comercial, um toróide com seção de diâmetro 50 mm e diâmetro externo de 500 mm, chega-se a uma densidade de 0,2 g/cm³. Logo, em termos de flutuabilidade positiva, boias impressas em 3D têm o potencial de serem mais eficazes do que as soluções comerciais presentes atualmente no mercado. É possível ainda se gerar boias de geometria personalizada para cada dispositivo que venha a ser acoplado a elas, otimizando da relação entre volume e flutuabilidade do conjunto.

4.4 Modos de falha

Após serem submetidos aos ensaios de tração, os corpos de prova tiveram a região onde ocorreu a fratura inspecionada por meio de um microscópio, presente no laboratório LADES-CEFET/RJ. Foram geradas imagens de micrografia nos instantes T0 (Figura 45) e T1 (Figura 46), possibilitando a observação da qualidade do processo de impressão. Poucas lacunas de impressão foram perceptíveis, o que é comum Manufatura Aditiva FDM devido ao processo de deposição de material [46,47].

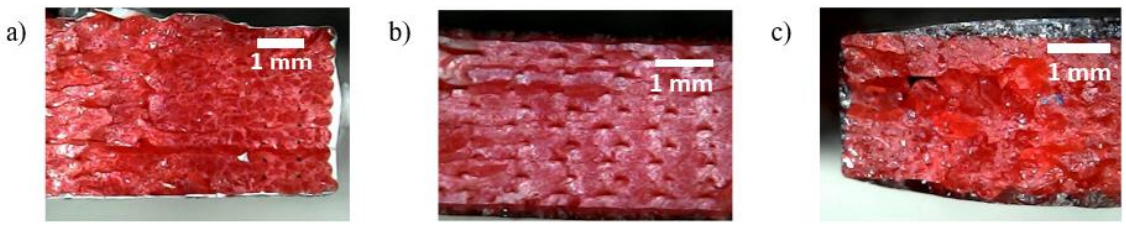


Figura 45 - Micrografia dos corpos de prova de tração em T0 (sem envelhecimento). a) tinta à base de epóxi, b) resina poliéster, c) resina epóxi.



Figura 46 - Micrografia dos corpos de prova de tração em T1 (com envelhecimento). a) tinta à base de epóxi, b) resina poliéster, c) resina epóxi.

Apesar do PLA ser suscetível a alterações em sua estrutura química quando exposto à umidade, nas imagens não foram observadas grandes mudanças entre os espécimes sem envelhecimento e após os 15 dias de envelhecimento em água destilada. Além disso, foi observado que, mesmo com os esforços e o método utilizado para aplicação dos revestimentos, houve uma diferença de espessura aplicada, principalmente nas resinas, sendo a camada de tinta à base de epóxi mais fina e homogênea [46,47,48].

Com o auxílio do microscópio, foi gerada a Figura 47 de um corpo de prova com revestimento de resina epóxi no momento T1 (envelhecido), que foi submetido ao

ensaio de flexão e fraturou durante o processo. Na imagem, é claramente visível uma variação na coloração da seção, correspondente à parte que sofreu compressão (parte superior da seção) e à parte que sofreu tração (parte inferior da seção), devido à flexão aplicada [49].

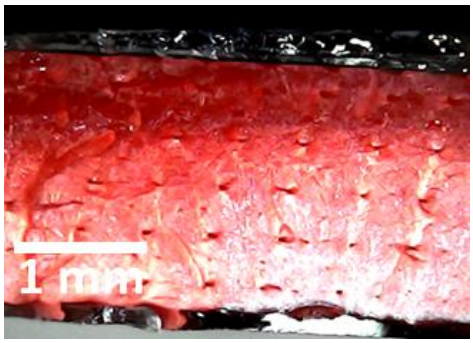


Figura 47 - Micrografia do corpo de prova revestido com resina epóxi em T1 após ensaio de flexão.

Capítulo 5

Conclusões

Após análise dos dados processados, torna-se evidente que o uso de revestimento é essencial para garantir a estanqueidade das peças impressas em 3D utilizando o material PLA, especialmente quando apresentam defeitos de até 0,5 mm no processo de fabricação, referentes a subextrusão. Isso é corroborado pelo fato de que o grupo controle, sem revestimento, apresentou um aumento significativo de massa, indicando a penetração de água destilada no interior das peças. Esse aumento de massa representa um risco para a utilização do material sem revestimento em aplicações como boias, pois resulta em um aumento de densidade que compromete a flutuabilidade do conjunto.

Ao comparar os revestimentos neste mesmo quesito, é perceptível que os três materiais tiveram desempenho similar, com uma absorção de água inferior a 2%, correspondendo a um acréscimo de apenas 0,4 g de massa. Portanto, todos os revestimentos foram considerados satisfatórios nesse aspecto, destacando a importância de analisar outros fatores para determinar a escolha do revestimento mais adequado para a aplicação em questão.

Além da comparação quanto à estanqueidade dos corpos de prova com diferentes revestimentos, foi realizada a caracterização das propriedades mecânicas do material por meio de ensaios de tração e flexão em dois momentos distintos: T0, anterior ao envelhecimento, e T1, após 15 dias de envelhecimento em água destilada. Ao analisar o desempenho dos corpos de prova, nota-se que em ambos os testes (tração e flexão), houve uma degradação nas propriedades mecânicas dos corpos de prova revestidos com poliéster em comparação ao grupo controle. Por outro lado, a tinta epóxi apresentou desempenho semelhante aos espécimes sem revestimento, enquanto a resina epóxi melhorou a resistência à flexão do corpo de prova.

Portanto, em termos de resistência mecânica, conclui-se que a resina poliéster obteve os piores resultados, enquanto a resina epóxi demonstrou uma melhoria na

resistência à flexão. Considerando o desempenho nos três testes, o material mais indicado para ser utilizado como revestimento é a resina epóxi, pois garantiu a estanqueidade e melhorou as propriedades de flexão do corpo de prova.

No entanto, na aplicação específica da RVT, o custo do material é um de grande relevância. Neste sentido, a tinta à base de epóxi é a opção mais econômica, além de oferecer um rendimento superior em comparação com as demais. Isso a torna a solução com o melhor custo-benefício. Além disso, a tinta foi o revestimento que adicionou menos massa à estrutura, resultando em um pequeno aumento na flutuabilidade.

Portanto, a tinta à base de epóxi é a mais indicada para a confecção das boias, pois, apesar de não melhorar a flexão máxima, ela não comprometeu as propriedades mecânicas, garantiu a estanqueidade e é a opção mais econômica entre os materiais analisados.

5.1 Trabalhos futuros

Ao buscar trabalhos relacionados ao uso de impressão 3D em meio naval foi visível que é uma área ainda pouco explorada, apesar do aumento das aplicações da Manufatura Aditiva neste setor. Com isso, é interessante realizar outros estudos nesta linha de pesquisa como a realização dos mesmos testes utilizando outros materiais como o ABS, material muito popular na Impressão 3D e utilizando outros revestimentos como a tintas *ecofriendly* que vem sendo criadas. Além disso, é interessante agregar ao estudo outros agentes de envelhecimento como a luz UV e a água salgada.

Há ainda a possibilidade do estudo da resistência à pressão externa nos corpos de prova com diferentes revestimentos, uma vez que há muitas aplicações onde pode-se utilizar a impressão 3D para a fabricação de estruturar de veículos submarinos autônomos, boias personalizadas para sensores fundeados, entre outros.

Referências

1. NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 15 jun. 2018.
2. JIMÉNEZ, M. et al. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. **Complexity**, v. 2019, p. 1–30, 19 fev. 2019.
3. GAROFALO, J. et al. Additive Manufacturing in the Maritime Industry: A Perspective on Current Trends and Future Needs. **Journal of ship production and design**, p. 1–8, 14 ago. 2023.
4. TOMY MURINGAYIL JOSEPH et al. 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 125, n. 3-4, p. 1015–1035, 7 jan. 2023.
5. IFTEKAR, S. F. et al. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2519, 1 jan. 2023.
6. EROKHIN, K. S.; NAUMOV, S.; ANANIKOV, V. P. Defects in 3D Printing and Strategies to Enhance Quality of FFF Additive Manufacturing. **A Review**. 3 out. 2023.
7. VICENTE, C. et al. Effect of protective coatings on the water absorption and mechanical properties of 3D printed PLA. **Frattura ed Integrità Strutturale,** v. 13, n. 48, p. 748–756, 15 mar. 2019.
8. ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. **ASTM International, West Conshohocken**. 2014.
9. **ASTM D7264/D7264M-07**, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2015.
10. **ASTM D570-98**, Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM International, West Conshohocken. 2018.
11. PRASHAR, G.; VASUDEV, H.; BHUDDHI, D. Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry

4.0. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, 6 jul. 2022.

12. BHUVANESH KUMAR, M.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, v. 159, p. 107228, 1 fev. 2021.
13. IFTEKAR, S. F. et al. Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2519, 1 jan. 2023.
14. Wishbox Technologies. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/chuck-hull/> . Acesso em: 20 de setembro de 2023
15. LIGON, S. C. et al. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. **Chemical Reviews**, v. 117, n. 15, p. 10212–10290, 30 jul. 2017.
16. ZAFAR, M. Q.; ZHAO, H. 4D Printing: Future Insight in Additive Manufacturing. **Metals and Materials International**, 17 set. 2019.
17. KUMAR, S. et al. Fused filament fabrication: A comprehensive review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, p. 089270572097062, 6 nov. 2020.
18. KRISTIAWAN, R. B. et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, v. 11, n. 1, p. 639–649, 1 jan. 2021.
19. SANTOS, L et al. Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por FDM: uma abordagem conceitual. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. A engenharia de produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil. Maceió. p. 2 out. 2018.
20. 3D LAB. Soluções em impressão 3D. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/ender-3-kit/> . Acesso em: 19 Fev. 2023.
21. Filament1001. Disponível em: <https://filament1001.ir/2023/06/17/slicer-software-settings-for-quality-printing-2/>. Acesso em: 10 Out. 2023

22. BCN3D. Disponível em: <https://www.bcn3d.com/bcn3d-slicing-guide-your-all-in-one-ebook/>. Acesso em: 10 Out. 2023
23. SEVVEL, P. et al. Design & Fabrication of Innovative Desktop 3D Printing Machine. Materials Today: **Proceedings**, v. 22, p. 3240–3249, 1 jan. 2020.
24. BHAGIA, S. et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. **Applied Materials Today**, v. 24, p. 101078, 1 set. 2021.
25. SHAO, L. et al. A chemical approach for the future of PLA upcycling: from plastic wastes to new 3D printing materials. **Green Chemistry**, v. 24, n. 22, p. 8716–8724, 2022.
26. PARK, H.-S.; HONG, C.-K. Relationship between the Stereocomplex Crystallization Behavior and Mechanical Properties of PLLA/PDLA Blends. **Polymers**, v. 13, n. 11, p. 1851, 2 jun. 2021.
27. ASTRID J.R. LASPRILLA et al. Synthesis and Characterization of Poly (latic Acid) for Use in Biomedical Field. **Chemical engineering transactions**, v. 24, p. 985–990, 20 abr. 2011.
28. AMZA, C. G. et al. Aging of 3D Printed Polymers under Sterilizing UV-C Radiation. **Polymers**, v. 13, n. 24, p. 4467, 20 dez. 2021.
29. HARYŃSKA, A. et al. PLA–Potato Thermoplastic Starch Filament as a Sustainable Alternative to the Conventional PLA Filament: Processing, Characterization, and FFF 3D Printing. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 20, p. 6923–6938, 10 maio 2021.
30. BHAGIA, S. et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. **Applied Materials Today**, v. 24, p. 101078, 1 set. 2021.
31. NUR-AZZAH AFIFAH BINTI TAIB; MD REZAUR RAHMAN; MUHAMMAD. Cellulose reinforcement in thermoplastic composites. **Elsevier eBooks**, p. 103–126, 1 jan. 2022.
32. VALVEZ, S. et al. 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA

composites: A short review. **Procedia Structural Integrity**, v. 25, p. 394–399, 2020.

33. SAMYKANO, M. et al. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9-12, p. 2779–2796, 6 fev. 2019.
34. OLIVERA, S. et al. Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. **Journal of Materials Science**, v. 51, n. 8, p. 3657–3674, 4 jan. 2016.
35. WESLER, J. E. Buoys as Platforms for Environmental Measurements. **Journal of Hydronautics**, 1 jul. 1969.
36. SOREIDE, N. N.; WOODY, C. E.; HOLT, S. M. Overview of ocean based buoys and drifters: present applications and future needs. **MTS/IEEE Oceans 2001**. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295), [s.d.].
37. WESLER, J. E. A Brief History Of The Development Of Navigational Buoys. **Naval Engineers Journal**, v. 78, n. 6, p. 1021–1027, dez. 1966.
38. AMAECHI, C. V. et al. Review on Fixed and Floating Offshore Structures. Part I: Types of Platforms with Some Applications. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 8, p. 1074, 5 ago. 2022.
39. GTMAX. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/pla/175mm-gtmax3d-vermelho-1kg>. Acesso em: 23 Out 2023
40. LIN, M.; YANG, C. Ocean Observation Technologies: A Review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 33, n. 1, 15 abr. 2020.
41. GAYTHWAITE, J. The Marine Environment and Structural Design. Nova Iorque, EUA: **Van Nostrand Reinhold**, 1981.
42. VERMA, S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review on protective polymeric coatings for marine applications. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 16, n. 2, p. 307–338, 20 fev. 2019.
43. DAMIANO BANDELLI et al. Polyester Stereocomplexes Beyond PLA:

Could Synthetic Opportunities Revolutionize Established Material Blending? **Macromolecular Rapid Communications**, v. 41, n. 1, 3 dez. 2019.

44. REDELEASE. Disponível em: <https://www.redelease.com.br/resina-epoxi-transparente-com-endurecedor-01-kg.html.html>. Acesso em 10 Jan 2024
45. REDELEASE. Disponível em: <https://www.redelease.com.br/resina-cristal-de-alta-viscosidade-com-catalisador-530-g.html>. Acesso em 10 Jan 2024.
46. NAVEED, N. Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM). **Materials Technology**, p. 1–14, 5 maio 2020.
47. LIVIU MARSAVINA et al. Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 274, p. 108766–108766, 1 set. 2022.
48. STAMOPOULOS, A. G.; SILVIA ILARIA SCIPIONI; LAMBIASE, F. Experimental characterization of the interlayer fracture toughness of FDM components. **Composite Structures**, v. 320, p. 117213–117213, 1 set. 2023.
49. LI et al. Flexural Properties and Fracture Behavior of CF/PEEK in Orthogonal Building Orientation by FDM: Microstructure and Mechanism. **Polymers**, v. 11, n. 4, p. 656, 10 abr. 2019.