O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VII | Volume 24 | Nº 72 | Boa Vista | 2025

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.17808506

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE AEROFÓLIOS EM POLÍMERO BIODEGRADÁVEL PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Luiz Artur dos Santos da Silva[1]

Ralph Wendel Oliveira Araujo[2]

Deivson Nacim Teixeira Sousa[3]

Ariston de Lima Cardoso[4]

Geisa Nascimento de Santana[5]

Resumo

O presente estudo investiga a viabilidade do uso de um polímero biodegradável de origem renovável na fabricação de aerofólios destinados a veículos aéreos não tripulados de pequeno porte. O problema de pesquisa centra-se na necessidade de identificar alternativas estruturais que conciliem baixo peso, resistência mecânica adequada e facilidade de fabricação, considerando as limitações da madeira balsa e do alumínio em termos de custo, disponibilidade, impacto ambiental e processos de produção. A pesquisa adotou uma abordagem experimental e comparativa. Inicialmente, foram produzidos dez aerofólios por manufatura aditiva, variando configurações de preenchimento e espessura de parede. Os dados primários incluíram massa, densidade, comportamento estrutural observado em testes qualitativos e resultados gerados por simulações de elementos finitos. Dados secundários foram utilizados para caracterização físico-mecânica dos materiais analisados e para fundamentação de parâmetros de impressão, propriedades de polímeros e comportamento estrutural de aerofólios leves. As análises envolveram medições diretas, modelagem digital, cálculo de densidade e avaliação mecânica comparativa com modelos equivalentes em madeira balsa e alumínio 6061-T6, utilizando tensões de von Mises e deslocamentos como métricas de desempenho. Os resultados mostraram que configurações de parede externa de 0,8 mm oferecem o melhor equilíbrio entre rigidez e massa, enquanto paredes de 0,4 mm apresentaram falhas estruturais e paredes de 1,2 mm resultaram em penalização de peso. As simulações indicaram que o polímero biodegradável apresenta resistência superior à madeira balsa, mas permanece inferior ao alumínio em rigidez absoluta, embora com vantagens em sustentabilidade e flexibilidade de fabricação. Conclui-se que o material analisado é tecnicamente viável para aerofólios de pequenos veículos aéreos não tripulados quando são adotadas configurações otimizadas de impressão, especialmente espessura de 0,8 mm e orientação de camadas alinhada às trajetórias de tensão. Com base nos resultados, recomenda-se seu uso em estruturas leves que priorizem relação resistência-peso, sustentabilidade do material e economia de fabricação, mantendo-se a atenção às limitações térmicas e à necessidade de ajustes estruturais conforme a missão.

Palavras-chave: Desempenho Aerodinâmico; Impressão 3D; Manufatura Aditiva; Polímeros; Propriedades Mecânicas.

Abstract

This study investigates the feasibility of using a biodegradable polymer of renewable origin in the manufacture of airfoils for small unmanned aerial vehicles. The research problem centers on the need to identify structural alternatives that combine low weight, adequate mechanical strength, and ease of fabrication, considering the limitations of balsa wood and aluminum in terms of cost, availability, environmental impact, and production processes. The research adopted an experimental and comparative approach. Initially, ten airfoils were produced by additive manufacturing, varying infill configurations and wall thickness. Primary data included mass, density, structural behavior observed in qualitative tests, and results generated by finite element simulations. Secondary data were used for the physico-mechanical characterization of the materials analyzed and to support the choice of printing parameters, polymer properties, and the structural behavior of lightweight airfoils. The analyses involved direct measurements, digital modeling, density calculation, and comparative mechanical assessment against equivalent models in balsa wood and 6061-T6 aluminum, using von Mises stresses and displacements as performance metrics. The results showed that external wall configurations of 0.8 mm offer the best balance between stiffness and mass, whereas 0.4 mm walls exhibited structural failures and 1.2 mm walls led to a weight penalty. The simulations indicated that the biodegradable polymer has higher strength than balsa wood but remains inferior to aluminum in absolute stiffness, although it offers advantages in sustainability and manufacturing flexibility. It is concluded that the material analyzed is technically feasible for airfoils of small unmanned aerial vehicles when optimized printing configurations are adopted, especially a wall thickness of 0.8 mm and layer orientation aligned with stress trajectories. Based on the results, its use is recommended in lightweight structures that prioritize strength-to-weight ratio, material sustainability, and manufacturing economy, while maintaining attention to thermal limitations and the need for structural adjustments according to mission requirements.

Keywords: 3D Printing; Additive Manufacturing; Aerodynamic Performance; Mechanical Properties; Polymers.

[1] Doutorando em Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). E-mail: luiz.atr@ufrb.edu.br

[2] Doutorando em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). E-mail: ralpharaujo2015@gmail.com

[3] Mestrando em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). E-mail: deivsonnascim@gmail.com

[4] Professor da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Doutor em Geociências. E-mail: ariston@ufrb.edu.br

[5] Doutoranda em Geociências pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). E-mail: gns-santana@outlook.com

INTRODUÇÃO

Os plásticos desempenham um papel fundamental na sociedade moderna, sendo amplamente utilizados em diversas indústrias, como a automobilística, aeroespacial, embalagens e dispositivos médicos. Sua popularidade advém da combinação de leveza, durabilidade e versatilidade, permitindo a criação de produtos com diferentes propriedades físicas e mecânicas. Além disso, a possibilidade de reciclagem e desenvolvimento de plásticos biodegradáveis tem impulsionado novas pesquisas e inovações para reduzir o impacto ambiental desses materiais.

Os plásticos podem ser classificados em diversas categorias, sendo as principais os termoplásticos e os termorrígidos. Os termoplásticos, como o polietileno (PE) e o politereftalato de etileno (PET), podem ser reaquecidos e remodelados, tornando-se ideais para processos de reciclagem. Por outro lado, os plásticos termorrígidos, como a resina epóxi, sofrem uma transformação química irreversível ao serem aquecidos, o que lhes confere maior estabilidade estrutural, mas dificulta sua reutilização.

Os polímeros, macromoléculas compostas por unidades repetitivas chamadas monômeros, são a base para a fabricação dos plásticos. Eles podem ser classificados em naturais, como a celulose e a borracha, e sintéticos, como o poliestireno e o polipropileno. A estrutura química dos polímeros influencia diretamente suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, o que permite seu emprego em aplicações específicas, como a produção de componentes leves e resistentes para a indústria aeroespacial.

O ácido polilático (PLA) é um polímero biodegradável derivado de recursos renováveis, como o amido de milho e a cana-de-açúcar. Sua popularidade na impressão 3D deve-se à sua facilidade de uso, baixa temperatura de fusão e boa precisão dimensional. No entanto, apresenta desafios em termos de resistência mecânica e estabilidade térmica, fatores cruciais para sua aplicação na fabricação de aerofólios para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Portanto, a otimização das configurações de impressão é essencial para garantir que o material atenda aos requisitos estruturais e funcionais desses dispositivos.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar as configurações de impressão 3D em PLA para a fabricação de aerofólios destinados a VANTs de pequeno porte, buscando determinar as melhores condições para maximizar a resistência mecânica e aerodinâmica das peças impressas, através da análise de parâmetros como: temperatura de extrusão, velocidade de impressão, preenchimento interno e orientação das camadas.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: seção introdutória, referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussão e conclusões. A introdução contextualiza a problemática do trabalho, após isso apresenta-se um referencial teórico que discute materiais poliméricos de interesse, com destaque para o ácido polilático e suas características relevantes para aplicações estruturais, bem como aspectos

gerais da manufatura aditiva aplicada à construção de componentes leves para a aviação. Os materiais e métodos descrevem o processo de fabricação por manufatura aditiva, as configurações de impressão avaliadas e os procedimentos empregados nas simulações numéricas. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com ênfase na comparação entre os diferentes materiais e configurações quanto a tensões e deslocamentos. Por fim, a seção de conclusões sintetiza as principais evidências encontradas, explicita limitações do estudo e indica perspectivas para trabalhos futuros.

MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os materiais poliméricos são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais chamadas monômeros, podendo ser naturais, como a celulose e a borracha, ou sintéticos, como os plásticos e os elastômeros (SCHROEDER, 2024).

Esses materiais têm ampla aplicação industrial devido à sua versatilidade, leveza e propriedades mecânicas ajustáveis, sendo utilizados na indústria automotiva, eletrônica, embalagens e dispositivos biomédicos (DUTTA *et al.,* 2024).

A capacidade de modificação química dos polímeros permite o desenvolvimento de materiais com diferentes propriedades térmicas e elásticas, possibilitando aplicações específicas em diversas áreas (NIKHADE *et al., 2025*).

O uso crescente de polímeros, principalmente sintéticos, causa impactos ambientais e sociais profundamente negativos, dada sua resistência e lenta degradação, características que permitem o seu acúmulo em ecossistemas terrestres e aquáticos, promovendo a poluição por microplásticos, perturbando os processos ecológicos e ameaçando a saúde humana e a biodiversidade (UDO, 2025).

A poluição plástica nos ecossistemas marinhos impacta profundamente a fauna, pois organismos são submetidos à ingestão e ao emaranhamento de detritos plásticos, o que compromete sua saúde, capacidade reprodutiva e aumenta a bioacumulação ao longo da cadeia alimentar (PAUL *et al.*, 2024).

A descoberta de novas tecnologias poliméricas tem impulsionado o desenvolvimento de materiais biodegradáveis e recicláveis, como polímeros à base de biofontes e redes covalentes dinâmicas, além da aplicação de métodos químicos e biológicos inovadores de reciclagem (AJIOLA *et al.,* 2025).

O ácido polilático (PLA) se apresenta como uma alternativa promissora. Trata-se de um polímero biodegradável de origem renovável, sintetizado a partir de fontes como amido de milho, cana-de-açúcar ou beterraba açucareira, que demonstra características mecânicas comparáveis a alguns plásticos convencionais, por exemplo, resistência à tração e módulo elástico, apesar de sua maior fragilidade (O'LOUGHLIN, 2023).

Dentre as suas principais características, sua elevada rigidez, processabilidade eficiente, biocompatibilidade, transparência, resistência térmica e compatibilidade com ambientes biológicos o fazem altamente adequado para aplicações biomédicas e para embalagens sustentáveis (inclusive para alimentos), tornando-o ideal para aplicações na indústria e um potencial alternativa sustentável aos polímeros à base de petróleo (SENILA, 2025).

A ductilidade do PLA pode ser significativamente melhorada por meio da incorporação de plastificantes e elastômeros, como o látex de borracha natural, elevando sua capacidade de absorção de energia e alongamento (KOEDTHIP *et al*., 2025).

Apesar das vantagens, suas limitações mais recorrentes incluem baixa resistência térmica e fragilidade mecânica, especialmente em aplicações exigentes. Para contornar tais restrições, modificações estruturais são frequentemente empregadas como o uso de copolímeros, blends e aditivos reforçadores (ANDRZEJEWSKI, 2024).

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado significativamente a relevância comercial do PLA, especialmente dentro do setor de embalagens e bioplásticos. O mercado global de PLA foi estimado em aproximadamente US$ 713 milhões em 2023 e projeta-se que alcance quase US$ 2,8 bilhões em 2030, com movimento fortemente ancorado no aumento da aplicação em embalagens sustentáveis, da mesma forma, o segmento global de bioplásticos, com forte presença do PLA, foi avaliado em US$ 15,57 bilhões em 2024 (GRANDVIEW RESEARCH, 2025).

O PLA se destaca por sua produção a partir de recursos renováveis que capturam carbono durante o crescimento das plantas, além disso, oferece múltiplas rotas de destinação (fim de vida), incluindo compostagem industrial, reciclagem mecânica e reciclagem química, o que o alinha fortemente aos conceitos de economia circular (WORLD ECONOMIC FORUM, 2025).

O avanço nas técnicas de produção e na formulação do PLA e melhorias em suas propriedades mecânicas como a incorporação de aditivos reforçadores e copolímeros, têm melhorado suas propriedades mecânicas e térmicas, ampliando sua aplicação em impressão 3D (FDM), embalagens alimentícias ativas e dispositivos médicos personalizados (PLAMADIALA *et al.,* 2025; BARCENA *et al.,* 2024).

MANUFATURA ADITIVA

Máquinas operadas por comandos programáveis (CNC), permitem a fabricação automatizada de componentes com elevada precisão e repetitividade, graças ao controle computacional acoplado a sistemas mecânicos avançados, tais sistemas asseguram a execução de instruções com alto nível de fidelidade e consistência ao longo de múltiplos ciclos de produção (ELMELEGY *et al.,* 2024).

A automação desses sistemas, especialmente via integração de CNC com robótica, minimiza a necessidade de intervenção manual, o que reduz significativamente os erros humanos, melhora a utilização da máquina e aumenta a produtividade (SOORI *et al*., 2023).

O uso das máquinas CNC se estende por vários setores industriais, incluindo o automotivo, aeroespacial, metalúrgico e médico, devido à sua capacidade de produzir componentes complexos com alta qualidade, precisão e confiabilidade (DASSAULT SYSTÈMES, 2023).

A adoção de práticas avançadas de usinagem CNC, como a otimização dos parâmetros de corte e a melhoria no design das ferramentas, pode reduzir substancialmente o desperdício de material, resultando em processos produtivos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (SOORI *et al*., 2023)

Estudos de caso envolvendo pequenas empresas indicam que a adoção de automação programável, como a usinagem CNC, reduziu significativamente os fatores de risco relacionados a distúrbios musculoesqueléticos (MSDs), evidenciando uma melhora relevante na segurança ocupacional (LOWE *et al*., 2022).

O uso intensivo de energia elétrica pelas máquinas CNC, especialmente em seus modos de operação como “idle”, “standby” e durante a própria usinagem, representa uma significativa contribuição para a emissão de carbono na indústria manufatureira. Estudos indicam que essas operações contribuem substancialmente para a pegada ambiental dos processos produtivos (SOORI *et al*., 2024).

A intensificação da automação, especialmente com o uso de tecnologias como máquinas CNC, tem efeitos desiguais no mercado de trabalho: enquanto aumenta a demanda por trabalhadores altamente qualificados, reduz significativamente as oportunidades para trabalhadores com menor nível de escolaridade (AUTOR, DORN *et al.*, 2022).

A manufatura aditiva (ou impressão 3D) é definida como o processo de criação de objetos a partir de modelos digitais, construídos gradualmente por depositar material camada sobre camada, em contraste com métodos tradicionais subtrativos (ZHOU *et al.,* 2024).

A manufatura aditiva permite redução significativa do desperdício de material, pois constrói peças com precisão, utilizando apenas a quantidade necessária de material, além de permitir produtos altamente personalizados com formas complexas, adequadas para aplicações médicas, aeroespaciais e automotivas (BEN SAID *et al*., 2025).

A manufatura aditiva (impressão 3D) permite a produção de componentes complexos sem a necessidade de moldes ou usinagem subtrativa, impulsionando uma verdadeira revolução na manufatura moderna ao viabilizar designs que seriam inviáveis por métodos tradicionais (ZHOU *et al.,* 2024).

EMPREGO AERONÁUTICO DA MANUFATURA ADITIVA

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou drones) tornaram-se ferramentas cruciais em muitas áreas, como monitoramento ambiental, agricultura de precisão e segurança pública, devido à sua habilidade de coletar dados em tempo real e atuarem em locais de difícil acesso, promovendo intervenções mais eficientes e informadas (GUEBSI, *et al.,* 2024).

Os VANTs têm sido cada vez mais empregados na indústria aeroespacial para inspeções tanto de aeronaves quanto da infraestrutura aeroportuária, promovendo melhorias na segurança operacional, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a eficiência das manutenções (RODRÍGUEZ *et al*., 2024).

A utilização de sistemas aéreos não tripulados (drones) em operações de busca e salvamento (search and rescue – SAR) permite minimizar a exposição humana a ambientes perigosos, atuando em locais isolados ou sob condições adversas, o que contribui para a segurança de equipes envolvidas em missões de alto risco (LYU *et al*., 2023).

A manufatura aditiva tem transformado significativamente o setor aeronáutico, ao permitir a produção de componentes de geometria complexa com maior eficiência e uma redução substancial no desperdício de material em relação aos métodos convencionais de usinagem (SU *et al.,* 2024).

Estudos têm demonstrado que componentes aeronáuticos estruturais produzidos via manufatura aditiva (utilizando materiais otimizados e geometrias leve e resistentes, muitas vezes obtidas por topologia otimizada) podem gerar reduções significativas no peso da aeronave, levando a menores consumos de combustível e uma diminuição correspondente nas emissões de CO_2 (SU *et al*., 2024).

A manufatura aditiva tem transformado significativamente os processos de Manutenção, Reparo e Revisão (MRO) aeroespacial, permitindo a produção rápida de componentes sob demanda, o que reduz consideravelmente os prazos de entrega e o tempo de inatividade das aeronaves (ALOGLA *et al*., 2023).

A integração da manufatura aditiva na produção de VANTs possibilita a concepção de estruturas significativamente mais leves, por meio da adoção de geometrias otimizadas e materiais avançados. Além disso, a impressão 3D permite ajustes rápidos e adaptações às exigências de cada missão como configuração de sensores, formas aerodinâmicas ou capacidades de carga o que aumenta a flexibilidade operacional (ŠOSTAKAITĖ *et al*., 2024).

O emprego de materiais compósitos (como filamentos reforçados com fibras de carbono, vidro ou Kevlar) em conjunto com técnicas de manufatura aditiva permite a construção de componentes aerodinâmicos com excelente relação resistência-peso, elevando a eficiência estrutural, tais estruturas otimizadas proporcionam maior rigidez e durabilidade, ao mesmo tempo em que reduzem o peso total, fator crítico em aplicações nos setores aeroespacial e de VANTs (KANTAROS *et al*., 2025).

A produção sob demanda de peças via manufatura aditiva permite reduzir significativamente a dependência de estoques físicos e longas cadeias de transporte, especialmente em operações remotas ou em campo. Isso resulta em economia logística, diminuição do lead time de reposição e maior eficiência operacional, tal como demonstrado em setores como aeroespacial e defesa (ALZAHMI *et al*., 2025).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo adotou um método experimental-computacional, de caráter descritivo e comparativo quanto aos fins e com abordagem quantitativa quanto aos meios (REIS *et al.*, 2024; CHIUSOLI *et al.*, 2024), voltado à avaliação do desempenho estrutural de perfis de asa produzidos em ácido polilático (PLA) por manufatura aditiva e sua comparação com modelos equivalentes em madeira balsa e alumínio 6061-T6. Corroborando com trabalhos recentes sobre estruturas de PLA impressas em 3D que combinam ensaios mecânicos, variação sistemática de parâmetros de impressão (espessura de casca, preenchimento, orientação de camadas) e simulações numéricas para otimizar rigidez específica e massa (PORTER *et al*., 2018; DOBOS *et al*., 2024; RAUF; MEHAT; KAMARUDDIN, 2024; SLAVKOVIĆ *et al*., 2024; WEINSCHENK *et al*., 2024).

Conforme revisões recentes sobre PLA e manufatura aditiva, o uso de modelos CAD integrados ao fluxo de impressão e à simulação numérica é uma estratégia consolidada para projetar componentes leves de uso estrutural (ZHOU *et al*., 2024; ANDRZEJEWSKI, 2024; PLAMADIALA *et al*., 2025; SENILA, 2025). Em aplicações aeroespaciais e de veículos aéreos não tripulados, a combinação entre manufatura aditiva em polímeros e análises numéricas tem sido empregada para avaliar a viabilidade de estruturas de baixo peso e alto desempenho (ŠOSTAKAITĖ *et al*., 2024; KANTAROS *et al*., 2025).

O trabalho foi conduzido em quatro etapas principais: a primeira foi a definição dos materiais e propriedades empregados nas simulações numéricas (PLA, madeira balsa e alumínio 6061-T6). Logo após, o projeto e a fabricação de aerofólios em PLA por manufatura aditiva, com variação controlada de número de paredes e percentual de preenchimento interno. Seguiu-se com o levantamento experimental de massa, cálculo de densidade aparente e avaliação qualitativa do comportamento estrutural sob carregamento. Sendo o trabalho finalizado com a realização de simulações numéricas por Elementos Finitos, com comparação entre os três materiais em termos de tensões de von Mises e deslocamentos".

Foram utilizados: computador com software de simulação por Elementos Finitos, impressora 3D do tipo FFF/FDM com bico de 0,4 mm, filamento de PLA de 1,75 mm, balança de precisão e madeira balsa. Os aerofólios em alumínio 6061-T6 foram modelados numericamente a partir da mesma geometria

CAD adotada para os modelos físicos em PLA, de modo a garantir comparabilidade entre os casos simulados.

Os dados primários deste estudo compreendem a massa de cada aerofólio em PLA, obtida em balança de precisão, o volume geométrico de cada modelo, extraído do arquivo CAD, e a densidade aparente, calculada pela razão massa/volume para cada configuração. Incluem ainda o registro qualitativo do comportamento estrutural dos aerofólios em PLA sob carregamento flexional, considerando deformações visíveis, instabilidades locais e eventual colapso de paredes, bem como os campos de tensões de von Mises e os deslocamentos máximos obtidos nas simulações numéricas para cada material (PLA, madeira balsa e alumínio 6061-T6).

Os dados secundários, por sua vez, incluem as propriedades físico-mecânicas de PLA, madeira balsa e alumínio 6061-T6, reunidas a partir de literatura técnico-científica e fichas de materiais, além de estudos que investigam a relação entre parâmetros de impressão (percentual de preenchimento, espessura de casca, topologia interna) e propriedades mecânicas de componentes em PLA (CHRISTIYAN *et al.*, 2016; PORTER *et al*., 2018; SUDER *et al*., 2021; DOBOS *et al*., 2024; RAUF *et al*, 2024; SLAVKOVIĆ *et al*., 2024). Também compõem esse conjunto as revisões sobre o desempenho de PLA e de filamentos modificados em aplicações técnicas e estruturais (AWAD *et al*., 2023; ANDRZEJEWSKI, 2024; PLAMADIALA *et al*., 2025; SENILA, 2025).

A seleção dos materiais, conforme Tabela 1, baseou-se em sua aplicação recorrente na construção de aerofólios para veículos aéreos não tripulados, considerando leveza estrutural, rigidez específica e viabilidade de fabricação. A madeira balsa é amplamente reconhecida pela sua baixa densidade e boa relação resistência-peso, característica observada em componentes aeronáuticos e em estruturas sanduíche leves (SALA *et al*., 2022). O polímero biodegradável utilizado, por sua vez, apresenta vantagens como maior resistência mecânica em comparação à balsa, além de elevada compatibilidade com manufatura aditiva (AWAD *et al*., 2023; SLAVKOVIĆ *et al*., 2024; PLAMADIALA *et al*., 2025). O alumínio 6061-T6 permanece como referência estrutural na indústria aeronáutica devido à alta rigidez mecânica e desempenho sob tensão, mesmo apresentando densidade superior aos demais materiais analizados (RODRÍGUEZ *et al*., 2024; SU *et al*., 2024).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais analisados

Propriedade	Madeira Balsa	PLA	Alumínio	Unidade
Densidade	140	1240	2700	kg/m³
Coeficiente de Poisson	0,38	0,35	0,33	–
Módulo de cisalhamento	$2{,}3 \times 10^{8}$	$2{,}4 \times 10^{9}$	$2{,}6 \times 10^{10}$	Pa
Resistência à tração última	$1{,}4 \times 10^{7}$	$5{,}0 \times 10^{7}$	$2{,}7 \times 10^{8}$	Pa
Módulo de elasticidade	3000	3640	69000	MPa

Fonte: Elaboração própria.

A partir do perfil aerodinâmico selecionado, foram gerados modelos de aerofólios com geometria externa idêntica e variação apenas na configuração interna. Os modelos CAD foram processados em um software de fatiamento, definindo-se uma matriz experimental que combinou percentuais de preenchimento interno (0 %, 5 %, 10 % e 100 %) e número de paredes (1, 2 e 3), totalizando dez configurações distintas, assim como mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 – Configurações de impressão em PLA

Configuração	Preenchimento (%)	Paredes Internas
1	100	–
2	10	3
3	10	2
4	10	1
5	5	3
6	5	2
7	5	1
8	0	3
9	0	2
10	0	1

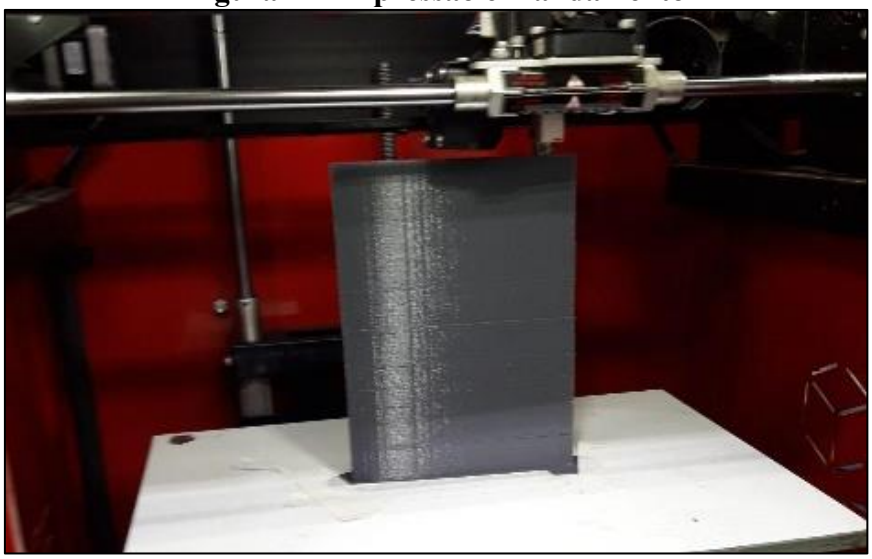
Fonte: Elaboração própria.

A espessura média da parede externa foi determinada pelo número de perímetros especificados no fatiador, resultando em aproximadamente 0,4 mm (1 parede), 0,8 mm (2 paredes) e 1,2 mm (3 paredes). Estudos experimentais e numéricos mostram que exatamente esses parâmetros – densidade de preenchimento, espessura de casca e topologia interna – são determinantes para a rigidez à flexão e o comportamento em serviço de estruturas impressas em PLA (PORTER *et al*., 2018; DOBOS *et al*., 2024; RAUF; MEHAT; KAMARUDDIN, 2024; SLAVKOVIĆ *et al*., 2024; VITALE *et al*., 2024).

Todos os aerofólios em PLA foram impressos com o mesmo filamento, mesmo diâmetro de bico (0,4 mm) e condições padronizadas de temperatura e velocidade, de modo a isolar o efeito das variáveis “preenchimento” e “paredes internas” sobre o comportamento estrutural (Figura 1). Estratégia semelhante de padronização de parâmetros de processo é adotada em estudos que avaliam resistência, rigidez e estabilidade térmica de componentes impressos em PLA (BURGE *et al*., 2020; SUDER *et al*., 2021; SLAVKOVIĆ *et al*., 2024).

A resistência estrutural dos perfis foi avaliada de forma qualitativa através da avaliação das características necessárias para o movimento de uma turbina eólica e por simulação numérica no software de Elementos Finitos, considerando a aplicação de cargas uniformemente distribuídas e condições de apoio em ambas as extremidades do perfil. As simulações foram utilizadas para comparar os níveis de tensão e deslocamento entre os diferentes materiais e configurações de impressão, visando identificar as combinações mais adequadas para a produção de aerofólios com desempenho mecânico satisfatório.

Figura 1 – Impressão em andamento



Fonte: Elaboração própria.

O levantamento experimental de massa dos aerofólios foi realizado para o cálculo de densidade aparente e comparação direta entre as variações de preenchimento e espessura de parede. O processamento dos valores de massa foi realizado através de medição direta, obtendo-se densidade a partir da razão entre massa medida e volume geométrico do modelo CAD, procedimento amplamente adotado em estudos de caracterização mecânica de PLA processado por manufatura aditiva (SLAVKOVIĆ *et al*., 2024; KOEDTHIP *et al*., 2025). A avaliação estrutural dos protótipos foi conduzida de forma qualitativa, observando-se o comportamento das paredes sob carregamento e identificando-se condições de flexão, colapso ou estabilidade, metodologia compatível com pesquisas recentes que investigam a resposta mecânica de peças impressas, especialmente em estruturas delgadas e suscetíveis a delaminação (RAUF *et al*., 2024; DOBOS *et al*., 2024; PLAMADIALA *et al*., 2025). Essa etapa permitiu estabelecer relações diretas entre densidade, rigidez perceptível e confiabilidade estrutural dos aerofólios fabricados.

O trabalho foi finalizado com a realização de simulações numéricas por Elementos Finitos, nas quais se compararam os três materiais analisados em termos de tensões equivalentes de von Mises e deslocamentos máximos. O uso de análise FEA permitiu estimar o comportamento estrutural dos aerofólios sob carregamento, reproduzindo com maior precisão a resposta mecânica esperada em operação e possibilitando identificar limites de rigidez e capacidade de deformação. A escolha dessa abordagem se fundamenta no fato de o método ser amplamente utilizado em pesquisas recentes que analisam materiais empregados em estruturas aeronáuticas e componentes impressos por manufatura aditiva (SU *et al*., 2024; ŠOSTAKAITĖ *et al*., 2024). Além disso, estudos sobre validação mecânica de peças poliméricas submetidas a cargas simuladas reforçam a confiabilidade do uso de tensões de von Mises como critério comparativo entre materiais com diferentes módulos elásticos e densidades (WEINSCHENK *et al*., 2024;

RAUF *et al*., 2024). A aplicação integrada da simulação numérica possibilitou, portanto, uma análise comparativa robusta entre madeira balsa, polímero biodegradável e alumínio, contribuindo para a avaliação final de viabilidade estrutural dos aerofólios.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação qualitativa dos aerofólios impressos com diferentes espessuras de parede revelou importantes implicações no desempenho estrutural e no peso das peças. Os modelos foram classificados conforme três critérios: espessura da parede, estrutura (resistência) e peso. Os resultados estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Avaliação qualitativa das configurações de parede externa em PLA

Preenchimento (%)	Espessura da parede (mm)	Estrutura	Peso	Avaliação geral
10	1,2	Resistente	Pesado	Muito pesado
10	0,8	Ótimo	Pesado	Muito pesado
10	0,4	Muito finas	Pesado	Muito pesado
5	1,2	Resistente	Resistente	Pesado
5	0,8	Ótimo	Resistente	Pesado
5	0,4	Muito finas	Resistente	Paredes romperam
0	1,2	Resistente	Leve	Resistente
0	0,8	Ótimo	Leve	Ótimo
0	0,4	Muito finas	Leve	Colapsou

Fonte: Elaboração própria.

Os dados qualitativos indicam que configurações com paredes de 0,8 mm representam o melhor equilíbrio entre rigidez e leveza, com avaliações gerais classificadas como "ótimo" quando associadas a estruturas leves. Paredes de 1,2 mm, embora estruturalmente robustas, adicionam massa considerável ao modelo, comprometendo seu desempenho aerodinâmico. Já as paredes de 0,4 mm, mesmo quando associadas a estruturas leves, apresentaram falhas críticas como colapsos ou ruptura das paredes sob carga, revelando baixa confiabilidade estrutural para esse nível de espessura.

Trabalhos recentes sobre estruturas sanduíche e perfis curvos impressos em PLA indicam justamente a existência de uma faixa ótima de espessura de casca, na qual incrementos adicionais resultam em ganho marginal de rigidez e penalização expressiva de massa, enquanto reduções abaixo desse limiar favorecem o surgimento de colapsos e flambagens localizadas sob carga (DOBOS *et al*., 2024; RAUF *et al*., 2024). Nesse sentido, a classificação de paredes de 0,4 mm como estruturalmente frágeis e de 1,2 mm como excessivamente pesadas reforça, em um contexto aplicado a aerofólios de VANTs, a mesma tendência observada em geometrias de vigas e painéis planos reportada na literatura.

Os resultados obtidos para o aerofólio em PLA com casca de 0,8 mm confirmam que a estratégia de “pele dominante + miolo rarefeito” garante rigidez flexional e distribuição de tensões compatíveis com asas leves de VANTs, desde que a orientação das trajetórias de filamento seja alinhada com as principais direções de tensão. Estudos experimentais demonstram que a espessura da casca exerce influência direta sobre a capacidade de carga, havendo um limiar crítico de espessura a partir do qual ganhos adicionais são marginais (DOBOS *et al*., 2024). Além disso, a rigidez específica e a resistência à flexão são fortemente afetadas pela densidade e padrão de preenchimento, com resultados otimizados em níveis intermediários de infill (PORTER *et al*., 2018), bem como pelo controle de parâmetros de camada e orientação de deposição (CHRISTIYAN *et al*., 2016); (BÜRGE *et al*., 2020). Assim, o ajuste da espessura de casca, do padrão de preenchimento e da orientação de impressão mostra-se decisivo para assegurar margens de segurança em flexão sem penalizações excessivas de massa.

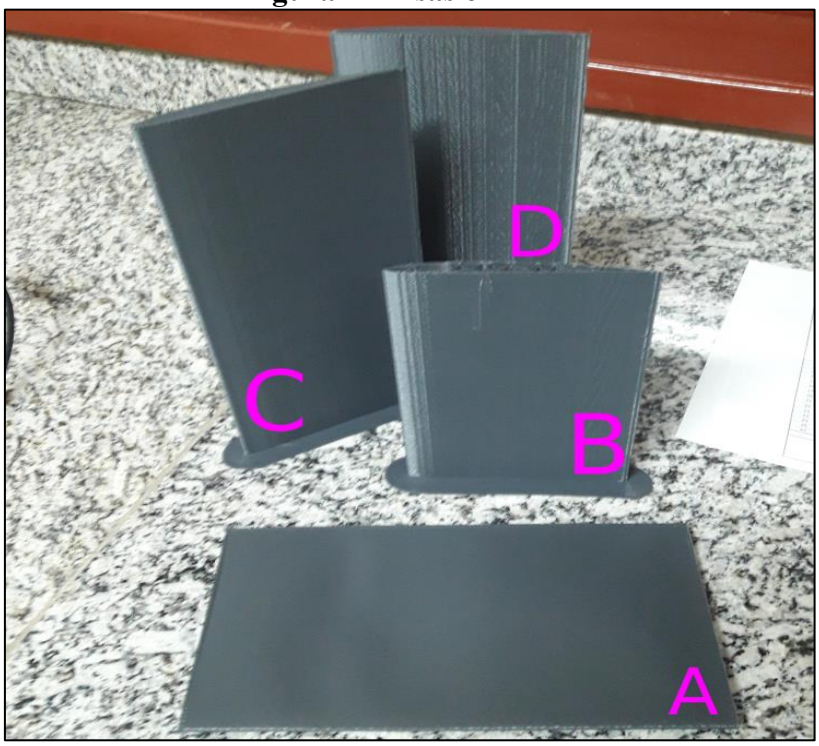
Quando se observa o problema sob a ótica do projeto de veículos aéreos não tripulados completos, o compromisso identificado entre espessura de casca, rigidez e massa tem implicações diretas sobre o envelope de voo e sobre o dimensionamento de outros subsistemas. Estruturas de asa em polímeros impressos que concentram material na pele, associadas a preenchimentos internos rarefeitos, vêm sendo utilizadas em protótipos de aeronaves leves e VANTs, justamente pela possibilidade de reduzir o peso estrutural mantendo rigidez compatível com regimes de carga moderados (ŠOSTAKAITĖ *et al*., 2024). Estudos que empregam filamentos compósitos para partes de drones, combinando reforços em fibra e arquiteturas de casca espessa em regiões mais solicitadas, apontam na mesma direção ao priorizar a rigidez específica como indicador-chave de desempenho estrutural (KANTAROS *et al*., 2025). Os resultados obtidos neste trabalho, ao apontarem a espessura de 0,8 mm como configuração mais equilibrada, alinham-se a essa tendência e fornecem valores numéricos que podem servir de referência preliminar para projetos de asas de pequeno porte em PLA.

Do ponto de vista de projeto, os resultados reforçam a necessidade de encontrar um ponto de compromisso entre rigidez e massa na seleção de parâmetros de impressão. A espessura de 0,8 mm se destaca por garantir bom desempenho mecânico com peso reduzido, o que é essencial para aplicações em VANTs. A avaliação também evidencia que, mesmo sem preenchimento interno significativo, a qualidade da parede externa exerce papel fundamental na integridade estrutural da peça impressa. Portanto, a otimização da espessura da parede é uma variável crítica no desenvolvimento de componentes estruturais em PLA para aplicações aeronáuticas leves.

A análise paramétrica indica a influência marcante dos parâmetros de fabricação aditiva na resposta mecânica do PLA. Incrementos no número de perímetros (walls), densidade de preenchimento (infill) e redução da altura de camada elevam módulo e resistência, mas com custo de massa e tempo de

fabricação; o benefício marginal decresce quando o infill se aproxima do sólido e quando se excede o número ótimo de perímetros para uma estrutura casca-dominante (MINH *et al*., 2024). A anisotropia é fator crítico: a orientação “on-edge” (plana) e trajetórias alinhadas ao eixo de solicitação maximizam resistência e módulo, enquanto orientações “upright” penalizam o desempenho devido à delaminação intercamadas (CHRISTIYAN *et al*., 2016). Estratégias que concentram material na pele (2–3 perímetros, 0,8–1,2 mm) associadas a um miolo estabilizante de baixa fração volumétrica preservam o balanço massa-rigidez mais favorável (WEINSCHENK *et al*., 2024; RAUF *et al*., 2024).

Figura 2 – Asas em PLA



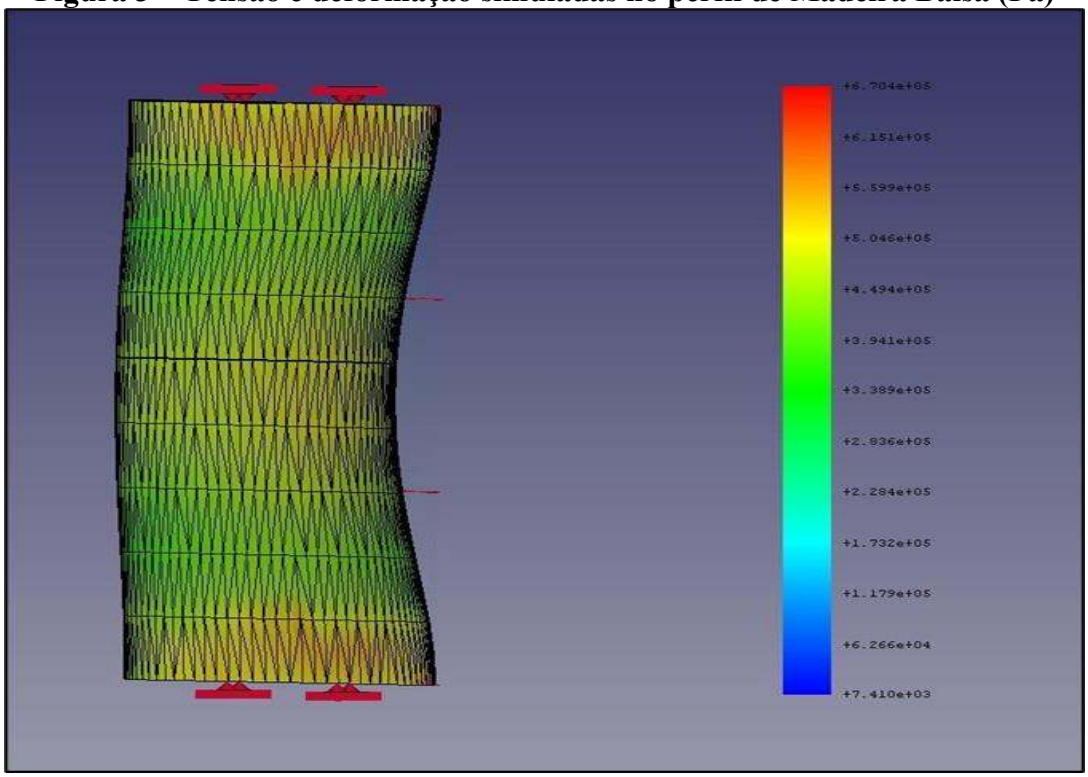
Fonte: Elaboração própria.
Nota: preenchimento (%) / paredes , A= 0%/1; B=10%/2; C=5%/2; D=10%/3.

Os resultados obtidos a partir da simulação computacional por elementos finitos permitiram comparar os perfis extrudados de asa construídos em três materiais diferentes: madeira balsa, PLA e alumínio 6061-T6. O ensaio consistiu em aplicar uma carga contínua uniformemente distribuída de 200 N sobre a face lateral da asa, apoiada em ambas as extremidades.

A análise dos resultados obtidos por meio de simulações computacionais por elementos finitos permitiu comparar o comportamento estrutural de aerofólios produzidos com madeira balsa, PLA e alumínio 6061-T6. Inicialmente, sob a aplicação de uma carga distribuída de 200 N ao longo da face lateral dos perfis apoiados nas extremidades, a madeira balsa apresentou uma tensão de von Mises de 670,38 kPa e deslocamento máximo de 0,30 mm. O PLA demonstrou desempenho semelhante, com

692,21 kPa de tensão e 0,25 mm de deslocamento, enquanto o alumínio, mais rígido, apresentou 722 kPa e deslocamento de apenas 0,013 mm (Figura 3).

Figura 3 – Tensão e deformação simuladas no perfil de Madeira Balsa (Pa)



Fonte: Elaboração própria.

Ao elevar-se a carga ao limite de projeto (1000 N), observaram-se aumentos proporcionais nas tensões e deslocamentos. A madeira balsa atingiu 3351 kPa e 1,48 mm de deslocamento, o PLA 3461 kPa e 1,23 mm, e o alumínio 3610 kPa e 0,065 mm. Esses dados destacam a superioridade do alumínio em termos de rigidez, sendo ideal para aplicações que exigem mínima deformação. Ainda assim, o PLA mostra-se uma alternativa viável à madeira balsa, situando-se entre ambos em desempenho estrutural.

A proximidade entre os valores de tensão e deslocamento obtidos para o ácido polilático e para a madeira balsa, nas duas condições de carregamento simuladas, sugere que o polímero biodegradável pode ocupar o mesmo nicho estrutural tradicionalmente reservado à madeira em aplicações de baixa e média exigência mecânica. Em estudos que analisam núcleos de balsa em painéis sanduíche sob cisalhamento e flexão, a balsa se destaca pela rigidez por massa, mas apresenta limitações de durabilidade e sensibilidade a variações higrotérmicas, o que exige cuidados adicionais de proteção e controle de umidade (GALOS *et al*., 2022). No presente caso, o ácido polilático mostrou capacidade de manter deslocamentos inferiores aos da madeira sob as mesmas cargas, ainda que à custa de maior densidade, o que indica um reposicionamento do compromisso clássico entre leveza e rigidez: passa a ser possível aceitar um leve

acréscimo de massa em troca de uma maior previsibilidade mecânica, compatibilidade com impressão 3D e menor variabilidade intrínseca de propriedades.

No confronto com materiais de referência, a leitura em termos de rigidez específica é elucidativa. Para o PLA processado por FFF, ensaios reportam módulo de elasticidade típico entre ~2,7–3,6 GPa e temperatura de transição vítrea (Tg) de ~55–65 °C, o que impõe restrições operacionais em clima quente e sob forte insolação (SLAVKOVIĆ *et al*., 2024). Assim, mesmo quando o alumínio oferece maior margem elástica absoluta, o PLA pode ser estruturalmente adequado quando a métrica decisiva é o desempenho por unidade de massa e a missão não exige elevadas temperaturas de serviço (AWAD *et al*., 2023).

Esse padrão de desempenho intermediário, no qual o ácido polilático se posiciona entre a madeira e o alumínio, também aparece em trabalhos que discutem a adoção de biopolímeros em componentes estruturais sujeitos a carregamentos moderados. Revisões recentes sobre o uso de PLA em aplicações técnicas destacam que, embora o material não alcance os níveis de rigidez absoluta de ligas metálicas, sua rigidez específica e sua capacidade de ser moldado em geometrias otimizadas por manufatura aditiva podem compensar parte dessa diferença em projetos onde o layout estrutural é flexível (ANDRZEJEWSKI, 2024). A combinação entre tensões e deslocamentos aceitáveis e possibilidade de ajuste fino de espessura de parede e topologia interna coloca o ácido polilático como candidato concreto para asas de VANTs em missões de curta e média duração, desde que respeitadas as restrições térmicas identificadas na literatura e consideradas margens de segurança adequadas.

O comportamento das tensões de von Mises evidencia a maior resistência do alumínio. No entanto, o PLA aproxima-se do desempenho da madeira balsa, o que o qualifica para aplicações menos críticas em termos de carga. Considerando-se o peso, tanto o PLA quanto a balsa são significativamente mais leves que o alumínio, o que favorece sua aplicação em projetos que demandam eficiência energética.

Além disso, o PLA apresenta vantagens ambientais e econômicas, com origem renovável e biodegradabilidade. Sua compatibilidade com impressão 3D permite redução de custos de manufatura e maior liberdade de design. A manufatura aditiva com PLA também possibilita a produção rápida de peças com geometria complexa, tornando o material promissor para prototipagem e ajustes iterativos de projeto.

Em uma segunda análise, foram realizadas simulações de uma viga de seção quadrada (10 mm × 10 mm, 100 mm de comprimento), submetida a uma carga concentrada de 500 N. A flecha obtida foi de 3,57 mm para o PLA, 41,67 mm para a madeira balsa e 0,18 mm para o alumínio. Com base nesses valores, ajustou-se a seção dos materiais para igualar a deformação à da balsa, resultando em seções de 5,41 mm para o PLA e 2,57 mm para o alumínio.

As massas resultantes das seções ajustadas foram de 3,63 g para o PLA, 1,78 g para o alumínio e 1,60 g para a madeira balsa. O alumínio, apesar de mais denso, se destacou pela sua rigidez, permitindo seções menores e mantendo leveza relativa. O PLA, mesmo reduzido, apresentou a maior massa, o que pode ser um limitante em aplicações críticas para peso.

A comparação baseada em vigas de seção simples reforça a importância de se pensar o dimensionamento de componentes em PLA a partir de índices que combinem tensão admissível, rigidez e massa, em vez de apenas comparar propriedades de material em separado. Abordagens recentes de otimização topológica aplicadas a estruturas impressas em PLA mostram que é possível reduzir significativamente a massa mantendo a resposta mecânica dentro de limites de projeto, por meio de redistribuição do material nas trajetórias principais de tensão e formação de núcleos internos tipo lattice (RAUF *et al*., 2024). Assim, os resultados da viga indicam que, embora o ácido polilático demande seções maiores que o alumínio para igualar deformações, há espaço para compensar essa desvantagem geométrica com soluções de projeto mais sofisticadas, especialmente em estruturas de asa onde o formato aerodinâmico já induz uma distribuição favorável de material ao longo do extradorso e intradorso.

Essas observações reforçam que a escolha do material deve considerar um balanço entre propriedades mecânicas, massa e viabilidade de fabricação. O PLA pode substituir a balsa em estruturas leves, com vantagem adicional de ser compatível com processos de impressão 3D, especialmente quando estratégias de otimização topológica forem empregadas para mitigar seu peso adicional.

Por fim, foi realizada a análise da densidade dos dez modelos de aerofólios impressos em PLA. As densidades variaram conforme as configurações de preenchimento e número de paredes internas. O modelo com 100% de preenchimento apresentou densidade de 1,23 g/cm³. Os modelos com 0% de preenchimento variaram entre 0,24 e 0,35 g/cm³. Configurações intermediárias, com 5% e 10% de preenchimento e até três paredes, demonstraram que o número de perímetros influencia mais significativamente a densidade do que o infill em baixos níveis.

Tabela 4 – Densidade das configurações de impressão em PLA

Configuração	Preenchimento (%)	Paredes Internas	Densidade (g/cm³)
1	100	–	1,23
2	10	3	0,65
3	10	2	0,55
4	10	1	0,43
5	5	3	0,48
6	5	2	0,38
7	5	1	0,31
8	0	3	0,35
9	0	2	0,29
10	0	1	0,24

Fonte: Elaboração própria.

Para missões em ambientes quentes, devem-se considerar margens adicionais no fator de segurança, acabamentos de alta refletância e eventuais hibridizações locais para mitigar a susceptibilidade termo-viscoelástica do PLA (SUDER *et al*., 2021). Como referência de teto de desempenho específico, painéis sanduíche com núcleo de balsa continuam oferecendo rigidez/força por massa superiores em flexão e sob cargas pontuais, ainda que com menor tenacidade ao impacto que alternativas espumadas (SALA *et al*., 2022). No entanto, arquiteturas de núcleo impressas já atingem níveis de cisalhamento e rigidez comparáveis aos de balsa quando parametrizadas para estabilidade de paredes finas e boa aderência pele-núcleo, especialmente com faces em CFRP (VITALE *et al*., 2024).

O modelo em madeira balsa apresentou densidade inferior a 0,2 g/cm³, confirmando sua leveza. Entretanto, sua resistência estrutural limitada reforça a necessidade de análise comparativa para validar sua aplicação em estruturas aeronáuticas submetidas a cargas constantes.

Quando os resultados de densidade dos aerofólios são analisados em conjunto com as simulações estruturais, emerge um quadro mais completo sobre o potencial do ácido polilático na construção de asas de VANTs. Painéis sanduíche com núcleo de balsa ainda representam o teto de desempenho em termos de rigidez por massa em flexão, especialmente quando combinados com faces em compósitos de alta rigidez (GALOS *et al*., 2022).

No entanto, estudos sobre núcleos impressos em polímeros e combinações de faces em compósitos têm mostrado que geometrias internas otimizadas, como estruturas do tipo body centered cubic, podem atingir níveis de rigidez e resistência comparáveis aos sistemas com balsa, com a vantagem adicional de eliminar variabilidade natural do material e facilitar reparos e reposição em campo (ŠOSTAKAITĖ *et al*., 2024). Os valores de densidade intermediária obtidos para configurações com casca de 0,8 mm e baixos teores de preenchimento em PLA sugerem que soluções híbridas e arquiteturas internas inteligentes podem aproximar ainda mais o desempenho do polímero dos sistemas tradicionais, mantendo a compatibilidade com manufatura aditiva e reduzindo dependências de cadeias de suprimento mais complexas.

Desta forma, observa-se que os resultados indicam que o aerofólio em PLA (casca 0,8 mm) é tecnicamente viável para VANTs de pequeno porte quando dimensionado com foco em rigidez específica, orientação de trajetórias e controle térmico.

CONCLUSÕES

À luz dos resultados obtidos, conclui-se que aerofólios fabricados em ácido polilático por manufatura aditiva, configurados com espessura de parede de 0,8 mm e parâmetros de impressão

adequados, apresentam desempenho estrutural superior ao de aerofólios equivalentes em madeira balsa e estruturalmente aceitável quando comparados a modelos em alumínio 6061 T6, embora ainda inferiores a este último em termos de rigidez e resistência máximas.

Dessa forma, o estudo confirma a viabilidade técnica do ácido polilático como material alternativo para aerofólios de veículos aéreos não tripulados de pequeno porte em condições de operação moderada, contribuindo para o avanço do uso de materiais biodegradáveis e da manufatura aditiva na engenharia aeronáutica leve.

Além dos aspectos mecânicos, o PLA se destaca por seu apelo ambiental, sendo derivado de fontes renováveis e biodegradável. Sua aplicabilidade na manufatura aditiva, aliada à redução de custo e facilidade de prototipagem, fortalece sua adoção em fases de desenvolvimento e testes estruturais.

No plano tecnológico e ambiental, o estudo reforça o potencial do ácido polilático ao combinar origem renovável, biodegradabilidade e forte aderência a processos de manufatura aditiva. A possibilidade de fabricar aerofólios com geometrias complexas, com baixo desperdício de material e alta repetibilidade dimensional, amplia o escopo de aplicação do polímero em projetos de veículos aéreos de pequeno porte. Essa combinação de fatores contribui para consolidar o uso da manufatura aditiva como rota atrativa para desenvolvimento, prototipagem e eventual produção de componentes estruturais em contextos nos quais sustentabilidade, custo e flexibilidade de projeto são variáveis estratégicas.

Este estudo, contudo, apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação e generalização dos resultados. A investigação concentrou-se em um único perfil de aerofólio, em condições de carregamento estático e regime linear elástico, não contemplando efeitos dinâmicos, de fadiga ou de interação fluido estrutura. Além disso, foi utilizado apenas um tipo de filamento de ácido polilático e um conjunto delimitado de parâmetros de impressão, o que restringe a extrapolação direta dos resultados para outros materiais, geometrias, escalas de asa ou condições ambientais, como variações de temperatura e umidade. A ausência de ensaios experimentais de longo prazo, sobretudo em ambiente real de operação, também limita a avaliação do desempenho em serviço e da durabilidade do material em aplicações aeronáuticas.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se investigar aerofólios fabricados com ácido polilático reforçado com fibras curtas ou cargas particuladas, de modo a elevar rigidez e resistência específica sem aumentar de forma expressiva a massa. Estudos adicionais podem explorar topologias internas otimizadas, por meio de técnicas de otimização estrutural, visando reduzir massa mantendo ou melhorando o desempenho mecânico, bem como avaliar comportamento em fadiga, resistência a impactos e degradação frente a ciclos térmicos e ambientais. A ampliação do escopo para outros perfis aerodinâmicos, escalas de aeronaves e combinações híbridas de materiais tende a enriquecer o

entendimento sobre os limites e potencialidades do uso de polímeros biodegradáveis na construção aeronáutica leve.

REFERÊNCIAS

AJIOLA, D. I.; OSUMAH, A. P. "Recyclable polymers and circular material design for sustainable manufacturing". **International Journal of Scientific Research and Modern Technology**, vol. 4, 2025.

ALOGLA, A. A. *et al*. "The Role of Additive Manufacturing in Reducing Demand Volatility in Aerospace: A Conceptual Framework". **Aerospace**, vol. 10, n. 4, 2023.

ALZAHMI, W. *et al*. "The Role of Additive Manufacturing in Spare Parts Management: A Systematic Review". **Cleaner Engineering and Technology**, vol. 27, 2025.

ANDRZEJEWSKI, J. "The development of poly(lactic acid) (PLA)-based blends and modification strategies: methods of improving key properties towards technical applications — review". **Journal of Materials Science Research**, vol. 17, n. 2, 2024.

AWAD, S. *et al*. "Evaluation of characterisation efficiency of natural fibre-reinforced polylactic acid biocomposites for 3D printing applications". **Sustainable Materials and Technologies**, vol. 36, 2023.

BARCENA, A. J. R. *et al*. "Emerging biomedical and clinical applications of 3D-printed PLA". **BMC Marine Biotechnology**, vol. 11, n. 705, 2024.

BEN SAID, L. *et al*. "Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions". **Machines**, vol. 13, n. 9, 2025.

BURGE, G. *et al*. "An investigation on mechanical properties of PLA produced by 3D printing as an implant material". **IEEE Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies**, vol. 4, n. 1, 2020.

CHIUSOLI, C. L. *et al*. "ranking smart city: estudos de indicadores entre três cidades do estado do Paraná". **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 17, n. 50, 2024.

CHRISTIYAN, K. G. J. *et al*. "Flexural properties of PLA components under various test condition manufactured by 3D printer". **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, vol. 99, 2016.

DASSAULT SYSTÈMES SE. "CNC Machining in the Automotive Industry". **Portal Eletrônico 3D EXPERIENCE Make** [2023] Disponível em: <www.3ds.com>. Acesso em: 10/09/2025.

DOBOS, J. *et al*. "Threshold investigation of shell thickness for enhanced mechanical and tribological performance in 3D-printed curved sandwich structures". **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 46, n. 401, 2024.

DORN, D. *et al*. "Labor Market Effects of Machine Tool Automation". **NBER Digest** [2022]. Disponível em: <www.nber.org>. Acesso em: 10/09/2025.

DUTTA, D. *et al*. "A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging". **Food Biomacromolecules**, vol. 1, n. 2, 2024.

ELMELEGY, A. *et al*. "On straightness measurements of large CNC machine tools". **Scientific Reports**, vol. 14, 2024.

GALOS, J. *et al*. "Review of balsa core sandwich composite structures". **Composite Structures**, vol. 301, 2024.

GRANDVIEW RESEARCH. "Polylactic Acid (PLA) Market Size, Share and Growth Report, 2030". **GrandView Research** [2025]. Disponível em: <www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 10/09/2025.

GUEBSI, R. *et al*. "Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges". **Drones**, vol. 8, n. 11, 2024.

KANTAROS, A. *et al*. "Composite Filament Materials for 3D-Printed Drone Parts: Advancements in Mechanical Strength, Weight Optimization and Embedded Electronics". **Materials**, vol. 18, n. 11, 2025.

KOEDTHIP, D. *et al*. "Enhancing the ductility and properties of non-vulcanized polylactic acid-based thermoplastic natural rubber using acetyl tributyl citrate". **Polymers**, vol. 17, n. 5, 2025.

LOWE, B. D. *et al*. "Case studies of robots and automation as health/safety interventions in small manufacturing enterprises". **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries**, vol. 33, n. 4, 2022.

LYU, M. *et al*. "Unmanned Aerial Vehicles for Search and Rescue: A Survey". **Remote Sensing**, vol. 15, n. 13, 2023.

NIKHADE, R. *et al*. "Advancements in Polymer Modification: A Comprehensive Review on Techniques". **International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine**, vol. 10, n. 1, 2025.

O'LOUGHLIN, J. *et al*. "The potential of bio-based polylactic acid (PLA) as an alternative in reusable food containers: A review". **Sustainability**, vol. 15, n. 21, 2023.

PAUL, S. *et al*. S. "Unveiling the effects of microplastics pollution on marine fauna". **Blue Biotechnology**, vol. 1, n. 6, 2024.

PLAMADIALA, I. *et al*. "Enhancing Polylactic Acid (PLA) Performance: A Review of Additives in Fused Deposition Modelling (FDM) Filaments". **Polymers**, vol. 17, n. 2, 2025.

PORTER, J. H. *et al*. "Influence of infill properties on flexural rigidity of 3D-printed structural members". **Virtual and Physical Prototyping**, vol. 14, n. 2, 2018.

RAUF, N. A. A. A. *et al*. "Investigation of polylactic acid 3D printed hollow and thin-walled structures through topology and mechanical properties optimization". **Materials Science Forum**, vol. 1112, 2024.

REIS, T. N. F. *et al*. "uma proposta de classificação para rotular a eficiência energética na computação em nuvem verde". **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 17, n. 49, 2024.

RODRÍGUEZ, D. A. *et al*. "Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review". **Results in Engineering**, vol. 22, 2024.

SALA, B. *et al*. "Effect of hygrothermal ageing on the shear creep behaviour of eco-friendly sandwich cores". **Composites Part B: Engineering**, vol. 229, n. 1, 2022.

SCHROEDER, B. “The Polymer Development Process”. **Thermo Fisher Scientific** [2024]. Disponível em: <www.thermofisher.com>. Acesso em: 09/09/2025.

SENILA, L. “A review of Polylactic Acid (PLA) and Poly(3-hydroxypropionate) (PH3P): Properties and Applications”. **Membranes**, vol. 15, n. 7, 2025

SLAVKOVIĆ, V. *et al*. “Thermo-Mechanical Behavior and Strain Rate Sensitivity of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) below Glass Transition Temperature (Tg)”. **Polymers**, vol. 16, n. 11, 2024.

SOORI, M. *et al*. “Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review”. **Acta Mechanica et Automatica**, vol. 18, n. 3, 2023.

ŠOSTAKAITĖ, L. *et al*. “Investigating Additive Manufacturing Possibilities for an Unmanned Aerial Vehicle with Polymeric Materials”. **Polymers**, vol. 16, n. 18, 2024.

SU, J. *et al*. “Achieving sustainability by additive manufacturing: a state-of-the-art review and perspectives”. **Virtual and Physical Prototyping**, vol. 19, n. 1, 2024.

SUDER, J. *et al*. “Experimental analysis of temperature resistance of 3D printed PLA components”. **MM Science Journal**, vol. 18, n. 1, 2021.

UDO, I. I. “A comprehensive review on polymer degradation: Mechanisms, environmental implications, and sustainable mitigation strategies”. **Communication in Physical Sciences**, vol. 12, n. 2, 2025.

VITALE, P. *et al*. “Compressive behavior of Body-Centered-Cubic (BCC)-like ultra-lightweight Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) lattice-based sandwich structures”. **Composites Part C: Open Access**, vol. 13, n. 1, 2024.

WEINSCHENK, R. C. *et al*. “Three-dimensional-printed femoral diaphysis for biomechanical testing—Optimization and validation”. **Journal of Orthopaedic Research**, vol. 42, n. 12, 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. “Why PLA is a proven, scalable solution to tackle plastics pollution”. **World Economic Forum**, [2025]. Disponível em: <www.weforum.org>. Acesso em: 10 set. 2025.

ZHOU, L. *et al*. “Additive Manufacturing: A Comprehensive Review”. **Sensors**, vol. 24, n. 9, 2024.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano VII | Volume 24 | Nº 72 | Boa Vista|2025

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Tiou Kimar Clarke, University of Technology, Jamaica