

VIABILIDADE DA IMPRESSÃO 3D NA PROTOTIPAGEM DE ASAS SUBSCALE PARA ESTUDOS APLICADOS AO DESEMPENHO DE ASA DE AERONAVES ODS (9)

Este trabalho está alinhado ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) que busca “construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação”. A utilização da impressão 3D para prototipagem de asas subscale contribui diretamente para este objetivo ao incentivar práticas de inovação tecnológica, reduzir custos de desenvolvimento e promover soluções sustentáveis na área aeronáutica.

Guilherme de Oliveira Morais Rizzi (Universidade de Taubaté – UNITAU)
Luis Fernando de Almeida (Universidade de Taubaté – UNITAU)

Resumo

A manufatura aditiva tem se consolidado como ferramenta estratégica na engenharia aeronáutica por permitir a rápida transformação de conceitos inovadores em protótipos funcionais, reduzindo tempo e custo em comparação a métodos tradicionais, além de viabilizar a experimentação de geometrias complexas e soluções bioinspiradas. Este artigo analisa a viabilidade da utilização da impressão 3D na prototipagem de asas em escala reduzida (subscale), com foco em estudos aplicados ao desempenho de asas de aeronaves. Apresenta-se uma revisão bibliográfica exploratória fundamentada em três pesquisas: Morton et al. (2023), que desenvolveram uma asa baseada em compósitos autônomos capazes de realizar *morphing* em três graus de liberdade; Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025), que aplicaram impressão 3D no robô Floaty com flaps morfológicos para voo eficiente em correntes ascendentes; e Negahban, Saci e Botez (2025), que fabricaram e testaram um bordo de fuga contínuo bioinspirado do tipo *elephant trunk*. A análise comparativa desses estudos mostra que a impressão 3D tem sido decisiva para acelerar o ciclo de concepção, fabricação e ensaio, permitindo a validação rápida de hipóteses de projeto em túnel de vento e em experimentos de voo controlado. Entre os benefícios evidenciados destacam-se a flexibilidade para integrar sensores, atuadores e peles flexíveis diretamente no protótipo, a capacidade de explorar topologias internas otimizadas como estruturas *lattice* e a redução significativa de custos de desenvolvimento. Além disso, observou-se que a manufatura aditiva contribui para ganhos de desempenho ao possibilitar deformações contínuas sem descontinuidades aerodinâmicas, como flaps flexíveis, que melhoram a eficiência em baixos números de Reynolds e reduzem ruído e perdas de escoamento. Apesar de limitações como anisotropia entre camadas, rugosidade superficial e restrições de escala dos materiais poliméricos, os trabalhos revisados demonstraram que ajustes em parâmetros de impressão, padrões de infill, orientação das camadas e aplicação de pós-processos podem mitigar esses problemas de forma eficaz. Dessa forma, o estudo conclui que a impressão 3D não apenas se mostra viável, mas representa uma estratégia de alto potencial para a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias aeronáuticas em asas subscale, contribuindo para um processo de inovação mais ágil, sustentável e

acessível, em consonância com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura).

Palavras-chave: Impressão 3D; Prototipagem rápida; Asas subscale; Morphing wings; Manufatura aditiva.

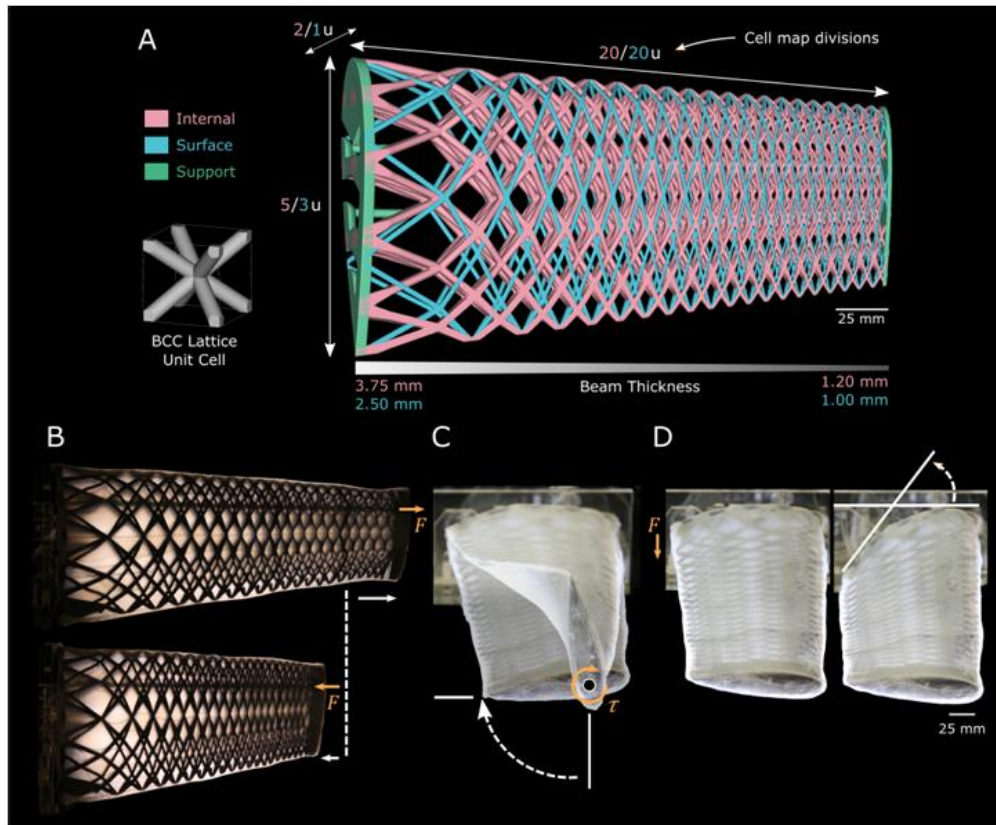
Introdução

A evolução da engenharia aeronáutica tem sido marcada pela busca por soluções que aumentem a eficiência aerodinâmica, reduzam custos e acelerem o ciclo de desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse contexto, a prototipagem rápida por impressão 3D tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para a construção de asas em escala reduzida (subscale), permitindo a realização de testes experimentais que antecipam o desempenho estrutural e aerodinâmico de geometrias inovadoras.

O problema central enfrentado pela pesquisa em asas protótipo está relacionado ao alto custo e à complexidade da fabricação tradicional de modelos experimentais. Métodos convencionais de manufatura muitas vezes limitam a rapidez de interação entre projeto e validação, criando barreiras para o avanço de tecnologias como asas com morphing, superfícies de controle adaptativas e conceitos bioinspirados (Barbarino et al., 2011; Weisshaar, 2013).

Nesse cenário, a impressão 3D surge como alternativa viável, pois possibilita a fabricação de protótipos funcionais com precisão geométrica, materiais avançados e flexibilidade de projeto. Estudos recentes comprovam essa tendência: Morton et al. (2023) desenvolveram uma asa com materiais compósitos autônomos impressos em 3D, capazes de realizar morphing em três graus de liberdade (torção, camber e extensão), com desempenho validado em túnel de vento, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura *lattice* projetada em CAD e capacidade de *morphing*: (A) modelo CAD no software nTopology com parâmetros principais; (B) *morphing* por extensão/compressão; (C) *morphing* por torção; (D) *morphing* por curvatura (*camber*).



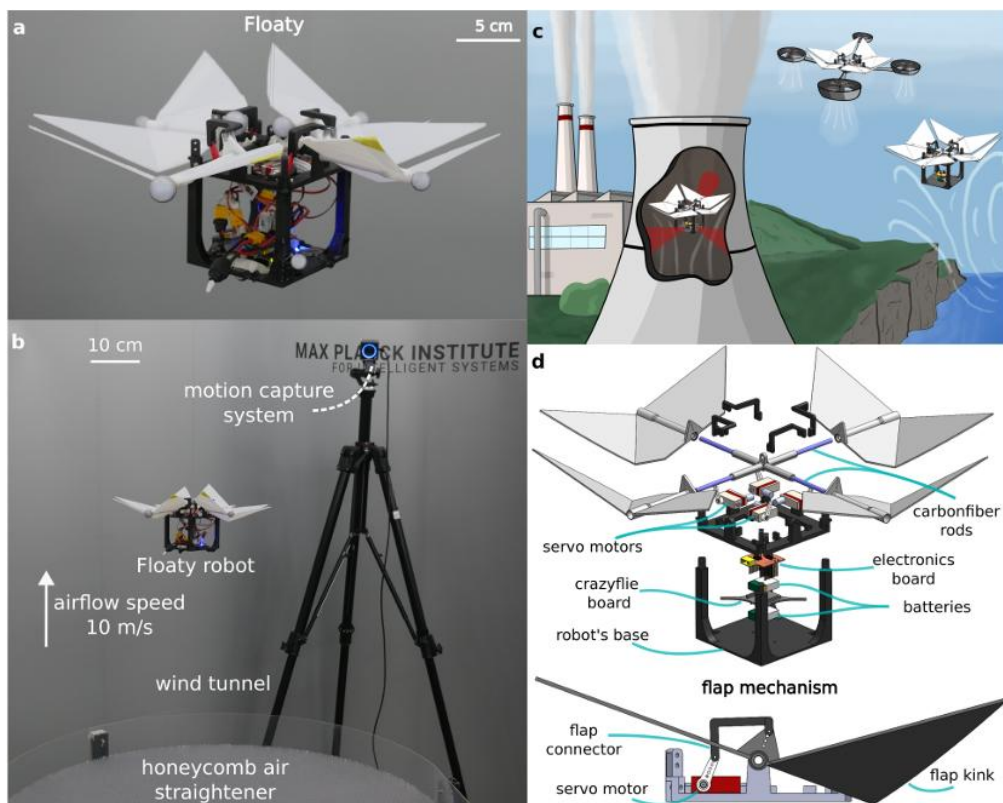
Fonte: Morton et al. (2023, p. 4).

A Figura 1 apresenta de forma detalhada tanto o modelo conceitual em CAD quanto os modos de deformação alcançados experimentalmente. Na parte (A), observa-se o modelo CAD gerado no software nTopology, no qual diferentes regiões do protótipo foram otimizadas para atender funções específicas: elementos internos em rosa (Internal), elementos de superfície em azul (Surface) e suportes estruturais em verde (Support). Essa divisão permitiu controlar a rigidez e a flexibilidade do componente, resultando em um arranjo *lattice* (rede estrutural composta por células repetitivas, geralmente em forma geométrica, projetada para otimizar leveza e resistência) com capacidade de deformação localizada. Já as partes (B), (C) e (D) demonstram a resposta mecânica do protótipo às cargas aplicadas: (B) evidencia o *morphing* por extensão e compressão, em que o protótipo se alonga ou se retrai sob esforço axial; (C) mostra o *morphing* por torção, em que a estrutura é capaz de girar

em torno do seu eixo longitudinal; e (D) representa o morphing por curvatura (camber), em que a seção adquire uma curvatura aerodinâmica contínua semelhante ao que ocorre em asas adaptativas. Esses resultados comprovam que a impressão 3D permitiu criar uma estrutura multifuncional, leve e com alta capacidade de deformação controlada, reforçando o potencial dessa técnica para prototipagem de asas em escala reduzida.

Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025) apresentaram o robô *Floaty*, construído com impressão 3D e flaps morfológicos, que demonstrou alta eficiência energética em voo passivo sustentado apenas por correntes de ar verticais, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Robô *Floaty* com asas e flaps morfológicos para voo sustentado: (a) protótipo físico; (b) ensaio em túnel de vento com sistema de captura de movimento; (c) aplicação ilustrativa em chaminé industrial; (d) esquema do mecanismo dos flaps; (e–f) seqüências de voo demonstrando estabilidade e controle.



Fonte: Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025, p. 3).

A Figura 2 evidência tanto o protótipo físico quanto sua arquitetura funcional e aplicações potenciais. Na parte (a), observa-se o robô Floaty em sua configuração completa, com asas equipadas com flaps articulados, conectados por hastes de fibra de carbono e atuados por servomotores em miniatura. Na parte (b), é apresentado o ensaio em túnel de vento, no qual o robô foi submetido a um fluxo de ar controlado de 10 m/s, monitorado por um sistema de captura de movimento que permitiu avaliar a estabilidade e a resposta aerodinâmica em diferentes configurações de flap. A parte (c) traz uma representação ilustrativa das aplicações potenciais da tecnologia, mostrando o robô explorando correntes ascendentes próximas a estruturas industriais e ambientes naturais, destacando a possibilidade de monitoramento sustentável com baixo consumo energético. Já a parte (d) apresenta um esquema estrutural do robô, onde é possível identificar os principais componentes: base impressa em 3D, placas eletrônicas de controle, baterias, servomotores, hastes de fibra de carbono e o mecanismo dos flaps, que inclui conectores flexíveis e pontos de torção projetados para deformações suaves (flap kink).

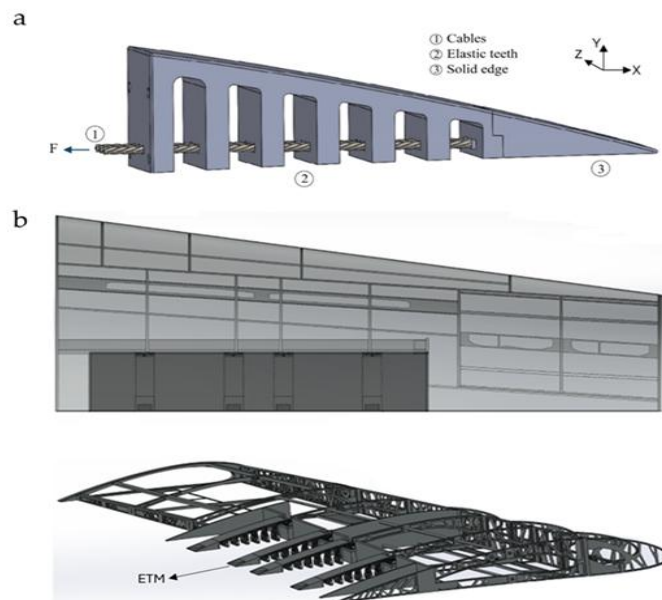
Essa configuração demonstra como a impressão 3D viabilizou a integração entre estrutura leve, mecanismos de atuação e alojamentos eletrônicos, criando uma plataforma experimental compacta, eficiente e de baixo custo. O resultado obtido pelos autores reforça que a manufatura aditiva pode desempenhar papel central na prototipagem de aeronaves bioinspiradas e sustentáveis, capazes de explorar fenômenos aerodinâmicos naturais para ampliar sua autonomia de voo.

Uma linha de pesquisa que tem despertado grande interesse envolve os bordos de fuga adaptativos com mecanismos bioinspirados (Figura 3), os quais demonstram o potencial da manufatura aditiva na viabilização de soluções inovadoras de controle aerodinâmico (Cramer et al., 2019; Jenett et al., 2017).

A Figura 3 apresenta o conceito de bordo de fuga contínuo (seamless trailing edge flap) baseado em um mecanismo bioinspirado do tipo elephant trunk mechanism (ETM), desenvolvido e fabricado por impressão 3D. Na parte (a), observa-se a estrutura simplificada do mecanismo, composta por cabos de atuação (1), dentes elásticos (2) e bordo sólido (3). Esse arranjo permite que a deformação seja distribuída de forma progressiva ao longo da superfície, imitando a flexibilidade natural observada no movimento da tromba de um elefante, daí a inspiração bioinspirada do sistema. Na

parte (b), é ilustrada a integração do mecanismo ETM em uma seção de asa, mostrando como quatro atuadores foram incorporados em série ao bordo de fuga, conectados por cabos de tração que induzem a curvatura. A figura evidencia ainda a forma como o flap contínuo substitui as tradicionais superfícies segmentadas, eliminando descontinuidades aerodinâmicas que geram arrasto e ruído.

Figura 3 - Ilustração do mecanismo de bordo de fuga adaptativo tipo *elephant trunk* (ETM) e montagem estrutural.



Fonte: WANG et al. (2023, p. 4).

Essa solução, viabilizada pela manufatura aditiva, demonstrou em ensaios de túnel de vento a capacidade de realizar deflexões suaves e contínuas, com significativa redução de perdas aerodinâmicas em comparação aos flaps convencionais. Além disso, a impressão 3D permitiu a rápida fabricação dos componentes internos, incluindo ajustes na geometria dos dentes elásticos e da pele externa, possibilitando iterações rápidas no ciclo de projeto e teste.

Portanto, a Figura 3 não apenas exemplifica a aplicação de conceitos bioinspirados em estruturas aeronáuticas, como também evidencia o papel central da impressão 3D na prototipagem de mecanismos adaptativos complexos, reforçando sua relevância como ferramenta de pesquisa para o desenvolvimento de novas tecnologias de controle aerodinâmico.

Vale destacar que a manufatura aditiva desempenhou papel central no desenvolvimento desses modelos experimentais. Conforme Negahban, Saci e Botez (2025), a impressão 3D “revolucionou o processo de prototipagem de asas morphing, tornando-o mais acessível, rápido e menos custoso em comparação aos métodos tradicionais” (p. 6). O processo inicia-se pelo design em software CAD, seguido pelo processamento computacional em camadas (slicing) do modelo, a geração de G-codes e a deposição do polímero camada por camada.

Essa técnica não apenas reduz tempo e custo, como também permite explorar diferentes arranjos de deposição (vertical e horizontal), que impactam diretamente nas propriedades mecânicas do protótipo. Além disso, a escolha de materiais como PLA+ para as seções de asa e nylon para os mecanismos internos mostrou-se adequada, garantindo resistência estrutural e flexibilidade para os ensaios em túnel de vento.

A justificativa para o presente estudo está na necessidade crescente de ferramentas acessíveis e rápidas para o desenvolvimento e teste de novas tecnologias em asas. A viabilidade da impressão 3D não se limita à redução de custos e tempo de fabricação, mas também inclui a possibilidade de integrar sensores, atuadores e mecanismos inteligentes diretamente nos protótipos, criando um ambiente experimental mais fiel às condições reais de voo.

O objetivo geral deste artigo é analisar a viabilidade da impressão 3D na construção de asas subscale para ensaios experimentais de novas tecnologias, explorando vantagens, limitações e potenciais aplicações a partir da análise crítica da literatura recente.

Revisão da literatura

A busca por materiais científicos relacionados ao tema da impressão 3D aplicada à prototipagem de asas em escala reduzida (subscale) resultou em um número expressivo de publicações, abrangendo desde estudos conceituais até experimentações práticas em túnel de vento. Entretanto, para melhor demonstrar a viabilidade da utilização da impressão 3D como recurso metodológico neste tipo de investigação, foram selecionados três trabalhos de referência, que apresentam resultados consistentes e diretamente relacionados ao escopo deste artigo: Morton et al. (2023), Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025) e Negahban, Saci e Botez (2025).

Segundo Barbarino et al. (2011, p.824), “as asas com capacidade de adaptação geométrica contínua apresentam vantagens significativas na redução do arrasto parasita e na melhoria da eficiência aerodinâmica em diferentes regimes de voo”. Weisshaar (2013) reforça essa perspectiva ao apontar que, embora conceitos de asas variáveis já tenham sido aplicados em aeronaves militares, os maiores benefícios do *morphing* contínuo ainda se concentram em aeronaves de pequeno e médio porte, onde há impacto direto na flexibilidade operacional e na ampliação do envelope de voo.

Com o avanço das técnicas de impressão 3D, estudos recentes têm demonstrado a viabilidade de prototipagem rápida de asas subscale para ensaios experimentais. Morton et al. (2023) descrevem a criação de uma asa com materiais compósitos autônomos, fabricada a partir de estruturas lattice com conformabilidade variável, obtendo *morphing* em três graus de liberdade como torção, camber e extensão, validando seu desempenho em túnel de vento.

Em outro trabalho, Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025) apresentaram o robô Floaty, no qual “a impressão 3D foi utilizada como processo central para a fabricação de asas morfológicas leves e adaptativas” (p. 3), permitindo a realização de voos passivos em correntes ascendentes com consumo energético mínimo.

Já Negahban, Saci e Botez (2025) destacaram que a orientação de impressão e o padrão de infill são determinantes no desempenho estrutural de flaps contínuos bioinspirados. Segundo os autores, “a manufatura aditiva revolucionou o processo de prototipagem de asas *morphing*, tornando-o mais acessível, rápido e menos custoso em comparação aos métodos tradicionais” (p. 6).

Além desses avanços, trabalhos como os de Jenett et al. (2017) e Cramer et al. (2019) exploraram estruturas celulares programáveis e montagens ultraleves, apontando a manufatura aditiva como um vetor de inovação no design de asas adaptativas.

De forma geral, a revisão da literatura evidencia que a impressão 3D tem se consolidado como ferramenta estratégica para validação de novos conceitos aeronáuticos, permitindo experimentação ágil e de baixo custo, ao mesmo tempo em que oferece flexibilidade para incorporar soluções bioinspiradas e mecanismos de *morphing* contínuo.

Método

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de caráter exploratório e bibliográfico, fundamentada na análise crítica de trabalhos recentes que aplicaram a impressão 3D no desenvolvimento de asas em escala reduzida (subscale) para experimentação em túnel de vento e ensaios de validação estrutural e aerodinâmica.

A amostra considerada consiste em três estudos de referência internacional que empregaram a manufatura aditiva na prototipagem de asas com geometrias complexas e tecnologias inovadoras:

Morton et al. (2023), que investigaram a construção de uma asa com materiais compósitos autônomos capazes de realizar morphing em múltiplos graus de liberdade.

Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025), que apresentaram o robô Floaty, projetado com impressão 3D e dotado de flaps morfológicos para voo eficiente em correntes de ar verticais.

Negahban, Saci e Botez (2025), que desenvolveram e testaram um bordo de fuga contínuo com mecanismo bioinspirado do tipo elephant trunk, fabricado por impressão 3D e avaliado em túnel de vento.

As técnicas de coleta de dados consistiram na revisão sistemática da literatura com foco nos aspectos relacionados à manufatura aditiva, processos de prototipagem e desempenho experimental de asas impressas em 3D. Foram extraídas informações sobre:

- Materiais utilizados: PLA+, nylon, compósitos funcionais, etc.
- Parâmetros de impressão 3D: orientação vertical e horizontal, padrões de infill, fatiamento e geração de G-codes.
- Características estruturais dos modelos: lattice structures, flaps flexíveis, integração de mecanismos de atuação.
- Procedimentos experimentais: ensaios em túnel de vento, calibração de atuadores, comparação com resultados numéricos de CFD.

O procedimento de análise seguiu uma abordagem comparativa e interpretativa, em que os resultados relatados em cada estudo foram confrontados para identificar vantagens, limitações e implicações práticas da aplicação da

impressão 3D em protótipos de asas subscale. Essa análise qualitativa foi complementada por sínteses gráficas (figuras e tabelas) que ilustram tanto os processos de fabricação quanto os ensaios experimentais reportados pelos autores.

Dessa forma, o método empregado neste artigo permitiu sistematizar o conhecimento existente sobre a impressão 3D aplicada à prototipagem de asas aeronáuticas em escala reduzida, fornecendo base sólida para a discussão da sua viabilidade como ferramenta de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Resultados e discussão

A análise cruzada dos três estudos selecionados evidencia que a manufatura aditiva viabiliza, na prática, um ciclo rápido de concepção → fabricação → ensaio para asas em escala reduzida, com ganhos concretos em tempo, custo e capacidade de explorar arquiteturas morfológicas complexas. Os resultados convergem em três eixos: (i) desempenho aerodinâmico/estrutural, (ii) capacidade de morphing e (iii) eficiência de validação experimental.

1. Desempenho aerodinâmico e estrutural.

Nos protótipos de Morton et al. (2023), o emprego de estruturas internas do tipo lattice concebidas em CAD (nTopology) e impressas em 3D proporcionou rigidez específica suficiente para suportar deformações controladas sem colapso, mantendo a fidelidade geométrica requerida para ensaios em túnel de vento. Isso é crítico para modelos subscale, em que pequenas variações de forma impactam o escoamento e a distribuição de cargas.

No estudo de Negahban, Saci e Botez (2025), a orientação de impressão, o padrão de infill e o pós-processamento (lixamento/pintura e aplicação de pele flexível) mostraram-se determinantes para a resposta estrutural do bordo de fuga contínuo. Em particular, orientar a deposição ao longo das trajetórias principais de tensão mitigou a anisotropia intercamadas e elevou o limite de deformação sem falha, um requisito para flaps contínuos que operam com grandes curvaturas locais.

2. Capacidade de morphing e autoridade de controle.

Morton et al. (2023) demonstraram morphing multi-DOF (torção, camber e extensão) em um único protótipo, viabilizado por topologias impressas que combinam conformabilidade local (regiões de baixa rigidez) com suporte global (ribs e spars reforçados). O benefício direto é a capacidade de modular a distribuição de sustentação e o momento de arfagem em tempo real, sem recorrer a múltiplos atuadores externos.

Negahban, Saci e Botez (2025) validaram um mecanismo bioinspirado tipo elephant trunk (ETM) impresso e encapsulado por pele flexível, obtendo deflexões suaves e contínuas no bordo de fuga, sem fendas. Além de reduzir perdas por escoamento de ponta e ruído, isso aumenta a eficiência do flap em baixos números de Reynolds.

Em Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025), a integração de flaps morfológicos impressos no robô Floaty viabilizou controle ativo suficiente para explorar e sustentar voo em correntes ascendentes com baixo consumo energético, reforçando que estruturas impressas podem atuar (não apenas “existir”) sob condições aerodinâmicas reais.

3. Eficiência do ciclo de validação.

Os três estudos reportam que a impressão 3D encurta a iteração entre hipóteses de projeto e verificação experimental. Morton et al. (2023) iteraram geometrias de lattice e envelopes com rapidez; Negahban, Saci e Botez (2025) ajustaram orientação de impressão, infill e pele para balancear rigidez/elasticidade conforme as medições em túnel; e Elmkaiel et al. (2025) integraram mecânica e instrumentação no próprio processo de prototipagem, reduzindo interfaces e retrabalhos. Em termos práticos:

- Tempo de ciclo: de dias/semanas (impressão, montagem, ensaio) em vez de semanas/meses em métodos tradicionais.
- Custo incremental baixo: pequenas alterações no CAD geram G-codes revisados sem refazer ferramentais.
- Integração funcional: alojamentos de sensores/atuadores e conduítes podem ser co-impressos, preservando continuidade aerodinâmica.

4. Limitações e mitigação.

Os estudos reconhecem desafios inerentes à manufatura aditiva de protótipos funcionais:

- Anisotropia mecânica entre camadas;
- Rugosidade superficial e camadas visíveis, que podem antecipar a transição da camada limite;
- Tolerâncias de interface com atuadores/pele flexível. Mitigações propostas e validadas incluem: (i) orientar a impressão conforme as principais tensões; (ii) selecionar padrões de infill que reforcem trajetórias de carga; (iii) pós-processar superfícies críticas; (iv) aplicar pele flexível para garantir continuidade aerodinâmica; e (v) realizar calibração conjunta experimental-numérica (túnel de vento e CFD) para fechar o ciclo de projeto.

5. Implicações para a viabilidade

Tomadas em conjunto, as evidências mostram que a impressão 3D não apenas viabiliza a construção de asas subscale, como melhora a relação custo-benefício da validação de novos conceitos:

- Morphing contínuo sem fendas (ETM e peles flexíveis);
- Topologias internas otimizadas (lattice) com boa razão rigidez/peso;
- Co-integração de elementos funcionais (suportes, passagens, alojamentos);
- Agilidade de iteração e redução de custos por eliminar ferramentais e permitir ajustes finos rápidos.

Esse conjunto de resultados reforça que a manufatura aditiva é estratégia eficaz para a prototipagem e validação de tecnologias de asa em fase inicial, diminuindo “tempo até dado experimental” e elevando a qualidade do aprendizado de engenharia. O Quadro 1 resume os principais aspectos metodológicos de cada estudo.

Quadro 1 – Resumo metodológico dos três artigos analisados

Autor/Ano	Materiais	Técnicas de Impressão 3D	Procedimentos de Ensaio
Morton et al. (2023)	Compósitos funcionais	Estruturas lattice, fatiamento CAD → nTopology	Testes em túnel de vento, validação de morphing em 3 DOF
Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025)	Polímeros impressos em 3D para asas e flaps	Prototipagem integral do robô Floaty em impressão 3D	Ensaio em túnel de vento e voo passivo com captura de movimento
Negahban, Saci e Botez (2025)	PLA+ para asa, Nylon para mecanismos (ETM), Silicone para pele flexível	Impressão em orientação vertical, padrões de infill triangulares, pós-processamento (lixamento e pintura)	Ensaio em túnel de vento, comparação com CFD, calibração de atuadores

Considerações Finais

O presente estudo analisou a viabilidade da utilização da impressão 3D na prototipagem de asas em escala reduzida (subscale), tomando como base três pesquisas recentes que aplicaram a manufatura aditiva no desenvolvimento de conceitos inovadores de asas e mecanismos de morphing.

A revisão comparativa dos trabalhos de Morton et al. (2023), Elmkaiel, Schmitt e Muehlebach (2025) e Negahban, Saci e Botez (2025) evidenciou que a manufatura aditiva representa uma estratégia eficaz para a validação de novos conceitos aeronáuticos, por oferecer:

- Redução significativa de tempo e custo na fase de prototipagem;
- Flexibilidade geométrica, permitindo a exploração de arquiteturas complexas, como estruturas lattice e bordos de fuga contínuos;
- Integração funcional, com a possibilidade de incorporar sensores, atuadores e peles flexíveis ao próprio processo de fabricação;

Eficiência experimental, encurtando o ciclo entre concepção, fabricação e ensaio, o que acelera o aprendizado em engenharia.

Embora desafios ainda se façam presentes, como a anisotropia mecânica entre camadas, a rugosidade superficial e as limitações de escala dos materiais poliméricos, os estudos revisados mostram que tais restrições podem ser mitigadas com técnicas adequadas de orientação de impressão, padrões de infill, aplicação de pele flexível e pós-processamento superficial.

Assim, conclui-se que a impressão 3D se configura não apenas como uma alternativa viável, mas como uma ferramenta estratégica para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias aeronáuticas em asas subscale, possibilitando a experimentação de soluções bioinspiradas, adaptativas e sustentáveis com maior agilidade e menor custo.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a investigação para escalas maiores e integrar os protótipos a sistemas de monitoramento estrutural inteligente, de modo a validar em condições reais de voo os benefícios já comprovados em laboratório.

Referências

BARBARINO, S., BILGEN, O.; AJAJ, R. M.; FRISWELL, M. I.; INMAN, D. J. A review of morphing aircraft. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, n. 9, p. 823–877, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X11414084>.

CRAMER, N. B.; LANG, R. J.; SNYDER, R. E.; PELLEGRINO, S. Elastic shape morphing of ultralight structures by programmable assembly. **Smart Materials and Structures**, v. 28, n. 5, p. 055009, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0ea2>.

ELMKAIEL, G.; SCHMITT, S.; MUEHLEBACH, M. Embodied intelligence for sustainable flight: a soaring robot with active morphological control. *arXiv preprint*, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2508.19684>.

JENETT, B.; CELII, F.; TILTON, L.; et al. Digital morphing wing: Active wing shaping concept using composite lattice-based cellular structures. **Soft Robotics**, v. 4, n. 1, p. 33–48, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1089/soro.2016.0032>

MORTON, D.; XU, A.; MATUTE A.; SHEPHERD, R. F.. Autonomous material composite morphing wing. **Journal of Composite Materials**. v. 57, n.4, p.711-720, 2023. doi:10.1177/00219983231151397.

NEGAHBAN, M. H.; SACI, T.; BOTEZ, R. M. Development and experimental study of a seamless morphing trailing edge flap equipped with an elephant trunk actuation mechanism. **Applied Sciences**, v. 15, n. 5570, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15105570>.

WEISSHAAR, T. A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges. **Journal of Aircraft**, v. 50, n. 2, p. 337–353, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.C031456>.