

ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR IMPRESSÃO 3D DE DUTOS PROPULSORES DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (DRONES).

Gabriel Rocha

Luis Antonio Oliveira Araujo

Depto Eng. Mecânica, UFSCar, CEP 13565-905, Rod. Washington Luiz, São Carlos – SP, Brasil
gabrielnme@gmail.com
luis.araujo@ufscar.br

Resumo. Este artigo tem como objetivo principal analisar e obter o melhor perfil para dutos propulsores Nacele e avaliar sua viabilidade de fabricação pelo processo de manufatura aditiva por extrusão de material. Sendo que estes dutos serão aplicados na construção de aeronaves autônomas do tipo quadrimotor. Para tanto, foi desenvolvido um estudo dos perfis tipo NACA quatro dígitos e dos principais parâmetros do processo de manufatura aditiva. Em seguida, foi simulado a respectiva estratégia de fabricação para três tipos de dutos: i) Um com rugosidade baixa e recoberto com resina epóxi. ii) Um com rugosidade alta, com micro ranhuras paralelas a linha de fluxo de ar. iii) E um com rugosidade alta com micro ranhuras perpendiculares a linha de fluxo de ar. Com base nos estudos e simulações realizadas, foi obtido o melhor perfil (com base nas características geométricas do respectivo projeto) para dutos propulsores e, também, foi observado sua viabilidade de fabricação a partir do processo de manufatura aditiva por extrusão de material. Sendo o aerofólio NACA 8312 o que apresentou o melhor conjunto de características geométricas que podem fornecer o melhor desempenho aerodinâmico.

Palavras chave: Impressão 3D. Drones. Dutos Propulsores. Qualidade Superficial. Extrusão de Material.

1. INTRODUÇÃO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs), *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) ou Drones são os nomes mais comuns, dados às aeronaves capazes de voar e de se sustentar na atmosfera sem a necessidade de um piloto humano a bordo, sendo operadas por controle remoto ou por um sistema autônomo (Pounds, 2007). No Brasil, a regulamentação é definida pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que nomeia esses veículos como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) (ANAC, 2017). Estes veículos variam em tamanho, desde aeronaves em grande escala, semelhantes às tripuladas por seres humanos, até aeronaves em miniatura. Eles também apresentam uma variedade de tipos de motores responsáveis por fornecer potência para as diversas operações de voo, destacando os motores a gasolina, turbinas a gás e motores elétricos (Pounds, 2007).

Nos últimos anos, os VANTs têm tido destaque em todo o mundo devido as suas diversas aplicações, como, por exemplo, na área agrícola, construção, logística e socorro médico. Para essas aplicações, em sua grande maioria, os VANTs do tipo Multi-Rotor, são classificados como a melhor opção, devido as suas particularidades: a capacidade de decolagem e pouso em áreas limitadas, controle de velocidade de voo, habilidade de pairar sobre o ar, como também, um custo relativamente baixo quando comparado aos outros tipos construtivos. Nota-se que, apesar da variedade de aplicações, atualmente, vários modelos comerciais das empresas que compõem o mercado de Drones Multi-Rotor apresentam geometrias construtivas semelhantes, sendo que algumas, por deixarem as pás das hélices expostas, podem causar acidentes às pessoas nas proximidades.

Um exemplo de uma nova concepção para os VANTs Multi-Rotor é o modelo AEVA, da empresa norte-americana Olaeris. Desenvolvido para patrulhamento, sua estrutura utiliza dutos propulsores (Nacele) associados às hélices. Dutos propulsores foram desenvolvidos com o intuito de oferecer vantagens para o sistema que o utilize, como, por exemplo, possibilitar um aumento na força de tração (propulsão) de aeronaves. Outra vantagem, sendo uma das principais, é a segurança que o sistema hélice/duto oferece em comparação às aplicações sem o mesmo, visto que, trata-se de uma barreira mecânica entre hélice e objetos, pessoas, etc., que eventualmente possam colidir com a aeronave.

Diversos fatores influenciam a eficiência aerodinâmica de dutos propulsores, dentre as quais, pode-se citar as características geométricas. Em se tratando de geometrias específicas a serem construídas, fica evidente que o processo fabril é uma etapa relevante no processo de construção de uma estrutura de VANT equipada com esses tipos de propulsores. A escolha de uma estratégia de manufatura adequada é fundamental para a obtenção de uma geometria minimamente fiel ao projeto aerodinâmico proposto. Além disso, é possível encontrar no mercado, tendências no uso de determinados materiais associados a processos fabris específicos.

A manufatura aditiva vem ganhando espaço como processo de fabricação de peças com formas complexas, seja para protótipos ou peças para uma aplicação propriamente dita. Existem trabalhos como Ferro, *et al.* (2016) que utilizam a impressão 3D como processo fabril de estruturas de VANTs. De acordo com Ramirez, *et al.* (2019), a técnica de impressão 3D por extrusão de material, em algumas literaturas, também citado como FDM (do inglês, *Fused Deposition Modeling*), demonstrou ser uma ferramenta eficiente para a manufatura de pequenos elementos aerodinâmicos sujeitos a baixos carregamentos estruturais e número de Reynolds em torno de 5×10^5 .

Com base no panorama apresentado, o tema deste trabalho aborda o estudo da fabricação de dutos propulsores aplicados em VANTs, a partir de estratégias de impressão por extrusão de material. Sendo o objetivo principal obter o melhor perfil para esses dutos e avaliar sua viabilidade de fabricação pelo processo de impressão 3D. Este estudo também contempla uma investigação sobre perfis de dutos propulsores e o que melhor se aplica no caso dos Drones.

2. DUTOS PROPULSORES

Para VANTs, que operam em baixas altitudes, os dutos tornam-se uma escolha adequada por isolar as pontas das hélices da região externa, evitando potenciais acidentes às pessoas e colisões desastrosas. Outra vantagem proporcionada por esse sistema é sua propriedade de aumentar a eficiência do conjunto propulsor.

É datado na literatura que esse sistema impacta em uma melhora na performance das hélices devido a minimização dos efeitos de ponta, porém, muitos estudos têm mostrado que em condições de média a alta velocidade de voo, o aumento na performance é prejudicado devido ao arrasto induzido pelo duto. Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu (2015) investigaram o efeito dos dutos em um sistema de propulsão de VANTs do tipo VTOL (*Vertical Take-Off Landing*) de forma experimental, e mostraram que a força de tração obtida pelo duto diminui e alcança valores negativos (arrasto) com o aumento da razão de avanço, J (razão entre a distância percorrida pela hélice no sentido axial e o diâmetro da pá, Eq. (1)), o que o faz desfavorável para altas velocidades de corrente livre, V_∞ .

$$J = \frac{V_\infty}{nD} \quad (1)$$

Sendo n rotação e D diâmetro da hélice.

Os perfis de dutos têm um efeito significativo na eficiência das hélices. Conforme apresentado por Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu (2015), a força axial total do sistema hélice mais duto é maior do que para o sistema sem ele. Pelos experimentos realizados em vários tipos de perfis de dutos (conforme apresentado pela Fig. 1) eles obtiveram um baixo coeficiente de potência, o que indica que a energia necessária para produção de uma tração equivalente ou maior do que o sistema sem é bem menor.

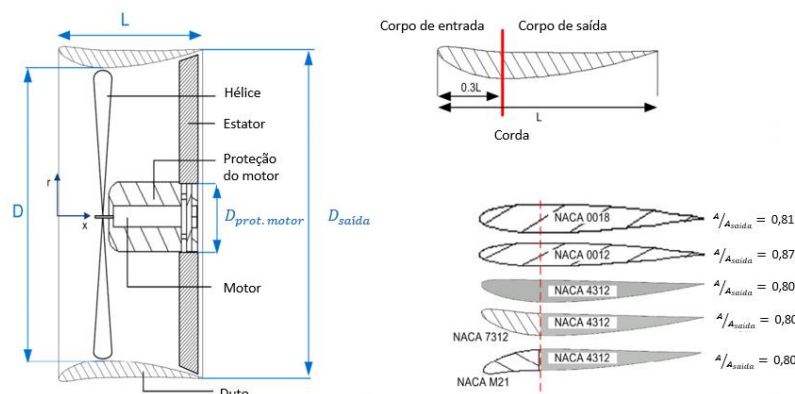


Figura 1. Perfis NACA 4 dígitos para dutos propulsores.
(adaptado de Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu, 2015)

Segundo Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu (2015), os perfis de duto com bordo de ataque inclinado para fora são os mais eficientes, ou seja, sistema de hélice com dutos cujo perfil de entrada é curvo para cima (perfil NACA 7312 + 4312, Fig. 1) produzem mais força de tração sem necessidade de uma potência adicional. A curvatura convergente na entrada, possui uma área de captação de ar maior que outros perfis, gerando um maior volume de ar que passa pelas hélices. Segundo Jasadavisus (2009), esse tipo de entrada evita o fenômeno de separação do escoamento no bordo de ataque, evitando, consequentemente, uma região de fluxo reverso próximo a parede do duto. Logo, o escoamento de ar na entrada permanece “colado” na superfície de entrada, o que implica em um ganho de performance em relação a outros perfis de dutos propulsores.

Pelas medições de pressão nesse perfil, Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu (2015) identificaram que os valores obtidos na superfície interna do corpo de entrada convergente do duto são menores que as pressões atuantes na parte da saída divergente e, também, na superfície externa do mesmo. Esse efeito contribui diretamente para a geração de tração axial do duto, impactando no aumento da eficiência do respectivo conjunto de propulsão. Porém, com o aumento da razão de avanço, há uma diminuição na diferença das pressões experimentadas pelas superfícies internas e externas na parte convergente do duto, resultando em uma diminuição nessa tração adicional. Conforme Bontempo e Manna (2016), a contribuição mais importante para a força gerada nesse equipamento aerodinâmico é, de fato, em sua entrada convergente, devido ao comportamento do coeficiente de pressão nessa superfície. Entretanto, a partir de análises de modelos analíticos, eles demonstraram que os perfis de dutos com maiores valores de camber, ou seja, perfis que tanto o bordo de ataque quanto o bordo de fuga são inclinados no sentido oposto do eixo principal do duto (α_a e α_f , Fig.2), possuem grande potencial de aumento da força de tração do sistema propulsivo, mesmo para valores médios de razão de avanço.



Figura 2. Ângulo entre bordo de ataque e linha de centro do duto (α_a) e ângulo entre bordo de fuga e linha de centro (α_f).

Dessa forma, o perfil da seção de saída do duto também tem grande influência no desempenho do conjunto. Conforme apresentado por Yilmaz, Erdem e Kavsaoglu (2015), esse equipamento por possuir seção de saída divergente, emulando um difusor, há uma diminuição da velocidade média de exaustão e, no modo pairar, sistemas hélices em duto que possuam um baixo valor de razão de área (ϕ próximo a 0,8) a eficiência pode ser aumentada em 58%, resguardando um ótimo projeto aerodinâmico para o mesmo. Entretanto, conforme apresentado por Jasudavissu (2009), a inclinação do bordo de fuga tem suas limitações, uma vez que à medida que se aumenta sua inclinação, α_f , de tal forma a deixa-lo com elevada inclinação para fora, o efeito pode ser o oposto, voltando então a aumentar as forças de arrasto do duto.

3. MANUFATURA ADITIVA

Manufatura aditiva é o termo usado para definir um processo de fabricação por adição de material, onde um produto pode ser diretamente fabricado a partir de sua modelagem computacional 3D. Esse processo é também conhecido por outros nomes, tais como *Digital Manufacturing* e impressão 3D (Lovo, 2017).

Com a expansão desse processo, atualmente há diversas técnicas de fabricação por manufatura aditiva, cada qual com suas especificidades e classificação quanto ao tipo de material utilizado. Conforme apresentado por Lovo (2017), as principais técnicas são as que utilizam polímeros e compósitos líquidos, material fundido, partículas discretas e sólidos laminados. Tem-se que cada uma dessas técnicas fornece objetos com propriedades superficiais diferentes umas das outras.

A técnica que utiliza material fundido é a mais comum na impressão 3D. O processo por extrusão de material fabrica peças/produtos pela deposição de material fundido, em geral um termoplástico, a partir de um cabeçote extrusor. Os filamentos extrudados são organizados e empilhados sobre uma plataforma de fabricação até formar a geometria desejada. O perfil de rugosidade das superfícies resultantes da impressão que se utiliza dessa técnica pode conferir propriedades peculiares para elementos aerodinâmicos. De acordo com Ramirez, *et al.* (2019), essa rugosidade pode atuar como micro ranhuras (*riblets*), as quais conferem propriedades de atraso e controle da ocorrência de fluxos turbulentos, desde que estejam orientadas na direção do escoamento de ar (Fig. 3).

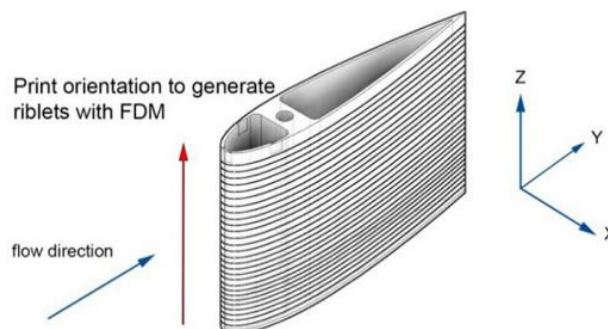


Figura 3. Representação de micro ranhuras (*riblets*) de elementos aerodinâmicos impressos por extrusão de material (Ramirez, *et al.*, 2019)

4. METODOLOGIA

4.1. Modelagem CAD e fatiamento

O sistema de dutos propulsores é uma ótima alternativa em aplicações de aeronaves que operam em condições de média a baixas velocidades de voo. Sendo seus perfis os que desempenham um importante papel quanto ao aumento da eficiência da propulsão da aeronave. Tendo em vista os diversos tipos de perfis e o impacto deles na força de tração, foi utilizado o padrão de seção de asa NACA de 4 dígitos para selecionar a melhor geometria que atenda aos requisitos desejados. Dessa forma, a partir dessa metodologia, foram definidos os parâmetros necessários para gerar uma distribuição de pontos que dão forma a seção transversal do duto (Fig. 4) a ser modelado em CAD (*Computer Aided Design*).

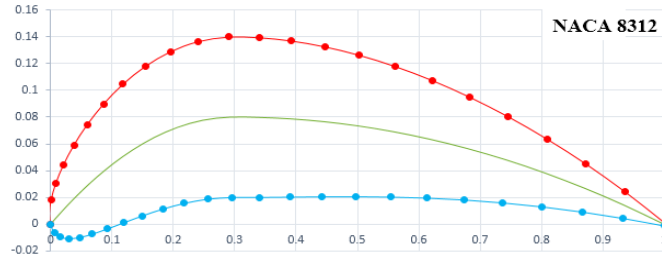


Figura 4. Distribuição de pontos para formação do perfil NACA 8312.

Os pontos foram gerados a partir de uma planilha de Excel e, em seguida, foram inseridos no *software* de modelagem 3D. Com isso, foi gerado o modelo CAD do duto a ser impresso (Fig. 5a) definindo o comprimento de corda (L), área de saída (A_s) e comprimento do corpo de entrada (L_e), Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente.

$$L = \frac{C_m}{(1 - p)} \quad (2)$$

$$A_s = \pi \cdot (R_h + \delta + y_u \cdot L)^2 \quad (3)$$

$$L_e = p \cdot L \quad (4)$$

Onde C_m é o comprimento do conjunto motor mais hélice, p representa o valor do segundo dígito NACA dividido por dez, R_h é o raio da hélice, δ é a folga admissível entre a ponta da hélice e o duto (Eq. (5), definida por Yilmaz, Erdem e Kavsoglu, 2015) e y_u é a coordenada superior do aerofólio padrão NACA 4 dígitos (Eq. (6)).

$$\delta = 0,024 \cdot R_h \quad (5)$$

$$y_u = y_c + (t/0,2) \cdot (0,2969 \cdot \sqrt{p} - 0,126 \cdot p - 0,3516 \cdot p^2 + 0,2843 \cdot p^3 - 0,1015 \cdot p^4) \cdot (\cos\theta) \quad (6)$$

Onde t é a espessura máxima em porcentagem de L , y_c é, nesse caso, o valor do camber máximo em porcentagem de L , e θ é dado pela Eq.(7).

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y_c}{\Delta x}\right) \quad (7)$$

Para a realização do processo de fatiamento e simulação da fabricação da peça foi utilizado o *software* Prusa Slicer 2.3.0 Alpha 1 (Fig. 5b), onde foram determinados todos os parâmetros de impressão. Esses parâmetros de processo adotados são de grande importância, uma vez que eles influenciam tanto o acabamento superficial como as características geométricas das peças.

Fazendo uso da metodologia de Taguchi e a análise de variância (ANOVA, do inglês, *Analysis of Variance*) Barrios e Romero (2019) identificaram que, para o processo de extrusão de material, os parâmetros de impressão que mais influenciam a rugosidade são: a velocidade e a aceleração de deposição como, também, a taxa de fluxo (ou multiplicador do fluxo da extrusão). Onde, para valores altos de aceleração e taxa de fluxo e valores pequenos de velocidade (aceleração de 1500 mm/s², taxa de fluxo de 100% e velocidade de 40 mm/s) verificou-se baixos valores de rugosidade quando comparado com amostras fabricadas com o conjunto oposto de parâmetros (aceleração de 500 mm/s², taxa de fluxo de 90% e velocidade de 60 mm/s).

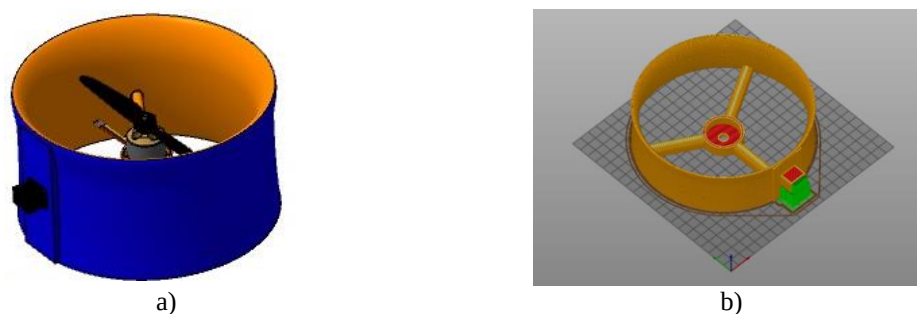


Figura 5. Duto propulsor utilizado no trabalho. a) Modelo CAD. b) Fatiamento no *software* Prusa Slicer 2.3.0 Alpha 1

No respectivo projeto, em etapas futuras, serão feitas análises do impacto do acabamento superficial dos dutos no desempenho aerodinâmico dos mesmos, logo serão fabricados três modelos de dutos propulsores que se diferenciam pelas características de suas superfícies internas. Sendo o primeiro modelo caracterizado como superfície lisa (baixa rugosidade, Fig. 6a), o segundo tipo de duto é caracterizado como superfície rugosa (alta rugosidade), onde as camadas depositadas formam micro-ranhurinhas paralelas a linha de escoamento de ar (Fig. 6b) e, por último, o terceiro modelo é o caracterizado como superfície rugosa com micro-ranhurinhas perpendiculares a linha de escoamento de ar (Fig. 6c). Na Tab. 1 são descritos todos os parâmetros de impressão utilizados para a simulação da manufatura de cada modelo, considerando os resultados de Barrios e Romero (2019) para definição de formação de superfícies lisas e rugosas.

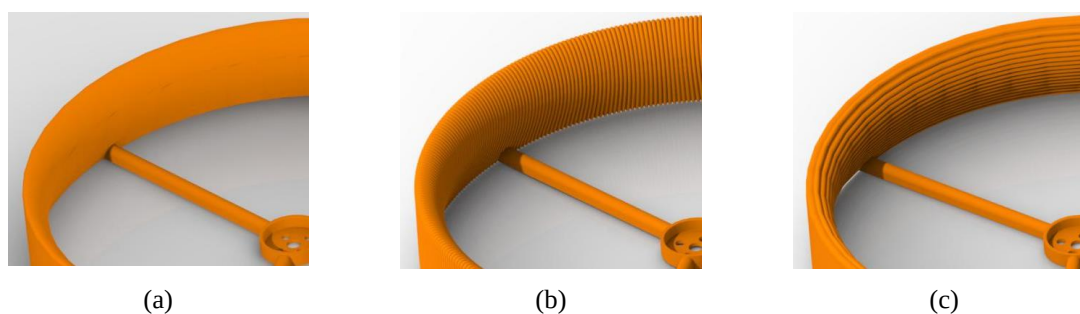


Figura 6. Modelos e versões de dutos fabricados por manufatura aditiva. a) rugosidade baixa. b) rugosa com micro-ranhurinhas paralelas. c) rugosas com micro-ranhurinhas perpendiculares.

Tabela 1. Parâmetros de impressão utilizados para a simulação da manufatura de cada modelo

Parâmetros de impressão	Primeiro modelo	Segundo modelo	Terceiro modelo
Altura de camada [mm]	0,3	0,4	0,4
Velocidade de deposição [mm/s]	40,0	50	60
Aceleração de deposição [mm/s ²]	1000	1500	750
Temperatura de fusão [°C]	190	190	190
Fluxo da extrusão [%]	100	100	100
Adição de resina epóxi	Sim	Não	Não

4.2. Impressão 3D

O material selecionado para a fabricação dos dutos foi o filamento de PLA (do inglês, *Polylactic Acid*), o qual possui uma temperatura de fusão baixa (180°C) e temperatura de transição vítrea de 60°C. Devido a essas propriedades, esse material pode ser impresso, a partir da técnica de extrusão de material, utilizando-se de impressoras abertas e com baixas temperaturas de mesa, fornecendo boa aderência.

A impressora 3D selecionada para uma posterior confecção das peças foi a Creality Ender 3. Essa impressora utiliza-se da técnica de extrusão de material para a produção das peças. Vale comentar que ela possui uma espessura de camada de 0,1 mm à 0,4 mm (Ajustável) com uma precisão de posicionamento XYZ de 0,05 mm, uma velocidade máxima de impressão de 180 mm/s, temperatura máxima de extrusão de 260°C e temperatura máxima da mesa de 110°C. Um total de 36 dutos serão impressos, sendo 12 do primeiro modelo, 12 do segundo e 12 do terceiro modelo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Estudo do perfil NACA 4 dígitos

Para a determinação do melhor perfil para a modelagem 3D do respectivo duto propulsor foi estudado cinco diferentes padrões de seção de asa NACA 4 dígitos. O primeiro perfil, o NACA 7312, foi selecionado com base nos resultados disponíveis na literatura, conforme comentado na Seção 2. Para verificar a influência da variação do camber nos outros parâmetros geométricos, foram escolhidos os outros perfis, sendo eles o NACA 8312 que significa 8% de camber máximo, o NACA 9312 representando 9% de camber máximo e o NACA 8412 que remete a um perfil com 8% de camber máximo posicionado a quatro décimos do comprimento da corda. Por último, foi selecionado o padrão NACA 9312 + 5312, que representa uma combinação de perfis, sendo o NACA 9312 o que define o corpo superior e o NACA 5312 o corpo inferior do duto propulsor. Todos possuem uma espessura máxima equivalente à 12% do comprimento da corda. Para a geração dos pontos que formam a geometria de cada seção foi utilizado uma planilha de Excel parametrizada. Cada um dos padrões são apresentados na Fig. 7.

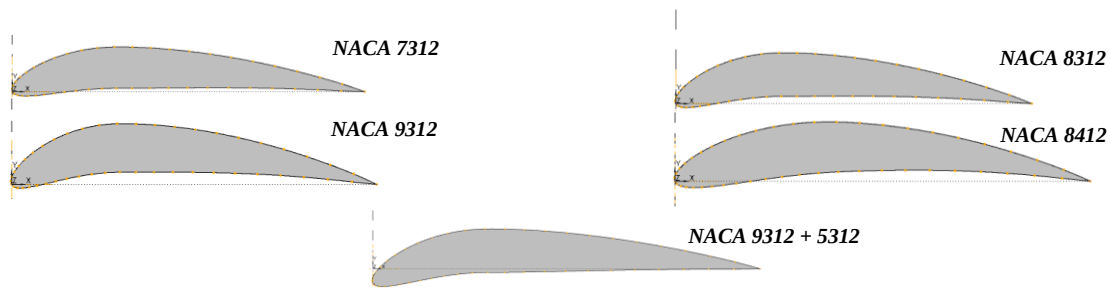


Figura 7. Padrões de seção de asa NACA 4 dígitos.

Pela Fig 7 nota-se que os perfis de dígito 3 (segundo dígito do padrão NACA) possuem um comprimento de corda menor que os de dígito 4. Esse fato tem relação com a parametrização das cotas no *software* de CAD, onde as dimensões de corda (L), área de saída (A_s) e comprimento do corpo de entrada (L_e) são funções dos valores selecionados para definição do aerofólio NACA, como também das dimensões da hélice e do motor selecionado para o conjunto de propulsão, Eq.(2), Eq. (3) e Eq (4), respectivamente. O motor selecionado foi o A2212/13T de 1000 KV com C_m igual a 35,76. A hélice selecionada foi do modelo 6x4,5, que indica 6" de diâmetro e 4,5" de passo. Logo, a partir de todos esses dados de entrada foi observado qual o efeito do perfil nas características geométricas do duto (Tab. 2).

Pela Tab. 2 verifica-se que o perfil NACA 8412 possui um comprimento de corda 16% maior que os outros perfis estudados, como também, a menor razão de área, 0,906. Porém, segundo Jasudavismus (2009), qualquer corpo aerodinâmico em um escoamento, tentando obter o mínimo de arrasto, deve ser o mais fino e curto possível. Dessa forma, apesar do NACA 8412 possuir o menor ϕ , algo desejado para esse equipamento, ele pode ter um desempenho comprometido por conta do seu comprimento de corda elevado. Outro perfil que apresenta um baixo valor de ϕ é o NACA 9312, entretanto, ele possui um dos maiores valores de α_f , o que pode gerar altas forças de arrasto e prejudicar o desempenho do duto. Dos perfis restantes, fazendo uma análise de qual possui a melhor relação de ϕ e α_f pequenos com um y_c relativamente grande, observou-se que a melhor seção é dada pelo padrão NACA 8312, o qual foi selecionado para a modelagem do duto propulsor.

Tabela 2. Propriedades geométricas dos perfis analisados

NACA	y_c	p	$\phi (A/A_s)$	$L[\text{mm}]$	α_f
7312	7%	0,3	0,922	50,4	2,4°
8312	8%	0,3	0,917	50,4	3,7°
9312	9%	0,3	0,911	50,4	5,2°
8412	8%	0,4	0,906	58,5	5,2°
9312 + 5312	9% + 5%	0,3	0,934	50,3	$\approx 0^\circ$

5.2. Estudo do processo de fabricação do duto propulsor

Uma vez determinado o perfil a ser impresso, a próxima etapa é o planejamento e simulação do processo de fabricação da peça. No respectivo projeto a técnica de impressão 3D por extrusão de material será empregada, em virtude de ela ser uma tecnologia com a maior variedade de materiais e impressoras disponíveis no mercado com o menor custo.

Porém, o processo por extrusão de material afeta o formato dos perfis, causando desvios na geometria final, o que pode implicar em um comprometimento do desempenho aerodinâmico do duto. Esses desvios têm a sua origem ao longo de várias fases e restrições inerentes aos equipamentos da impressão. Os erros que podem influenciar o perfil impresso

têm relação tanto com a etapa de conversão STL (do inglês, *Standard Triangle Language*), que aproxima a superfície real por um conjunto de pequenos triângulos, como durante a etapa de fatiamento, onde a geometria modelada no CAD é aproximada por uma geometria representada pelo padrão de preenchimento das camadas. Uma estrutura em camadas é o resultado dessas etapas que podem criar algumas regiões com espaços vazios (não preenchendo todo o volume determinado pelo CAD) e superfícies com uma atípica ondulação (Ramirez, *et al.*, 2019, Dalewski, *et al.*, 2017).

Segundo Dalewski, *et al.* (2017), para perfis NACA impressos por extrusão de material os desvios de forma locais tanto no bordo de ataque como no de fuga são pouco perceptíveis. Entretanto, outro efeito é mais dominante nesses locais, com maior ocorrência no bordo de fuga, onde nessa região mais material é depositado, ocasionando um superdimensionamento do perfil, levando ao aumento da espessura do mesmo. Em partes, segundo o autor, esse efeito tem pouca implicação no desempenho aerodinâmico. Contudo, um desvio de forma resultante de uma sobreposição indevida das camadas adjacentes implica em uma ondulação local da estrutura impressa, impactando negativamente o desempenho do aerofólio, podendo causar o fenômeno de separação do escoamento no bordo de ataque e reduzir consideravelmente a força de tração gerada pelo equipamento. Conforme os autores, esse desvio está diretamente relacionado aos efeitos térmicos do processo assim como o procedimento de fatiamento.

Isto posto, os parâmetros de impressão adotados na Tab. 1 foram selecionados para evitar tais problemas. Na Tab. 3 é apresentado os resultados da simulação de cada modelo a ser fabricado. Pelos resultados da simulação foi, de acordo com as estratégias adotadas, validado o processo de fabricação dos dutos propulsores. Porém, nota-se que para o segundo modelo (com micro ranhuras paralelas ao escoamento de ar) há a necessidade do uso de uma grande quantidade de material de suporte, devido as camadas suspensas inerentes a estratégia adotada. Na Fig. 8 é ilustrado as diferentes estratégias adotadas para impressão dos respectivos modelos.

Tabela 3. Resultados de tempo de impressão e quantidade de material para cada modelo fabricado

	Padrão preenchimento	Tempo impressão [h:m]	Quantidade de material [g]
Primeiro modelo	Concêntrico	7:24	133,51
Segundo modelo	Linha	15:31	266,32
Terceiro modelo	Concêntrico	4:25	135,19

A fabricação de geometrias suspensas é uma das maiores limitações que o processo de impressão por extrusão de material apresenta. Para essas geometrias o ângulo de construção costuma ser mais agudo, implicando em uma redução da capacidade de auto sustentação do filamento depositado (Vicente, Canyada e Conejero, 2015).

Para o segundo modelo, devido à grande quantidade de material de suporte, foi necessário um tempo de impressão acima de 15 horas, assim como um consumo de mais de 250 g de PLA. Outro impacto negativo do material de suporte é a necessidade de um pós-processamento para a sua retirada, o que, na maioria das vezes, é a fonte dos defeitos superficiais das peças. Durante sua remoção, a superfície da camada suspensa se torna toda marcada nos locais de contato direto com o suporte. Um acabamento superficial pode ser aplicado nessa situação, porém, esse tratamento pode afetar a precisão geométrica da peça, podendo afetar a eficiência aerodinâmica do respectivo duto.

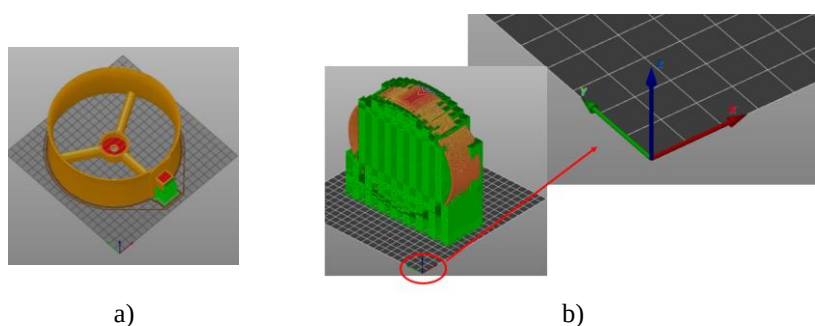


Figura 8. Fatiamento dos dutos propulsores. a) estratégia de impressão para o primeiro e terceiro modelo. b) estratégia de fabricação para o segundo modelo, sendo o material de suporte o de coloração verde.

Conforme apresentado por Vicente, Canyada e Conejero (2015), a capacidade de auto sustentação das camadas suspensas é uma função tanto do seu comprimento em balanço como da sua espessura. Onde, quanto maior o seu comprimento em balanço e menor a sua espessura, menor será sua capacidade de auto sustentação e, conseqüentemente, essa camada cederá, causando enormes desvios geométricos e até inutilidade da peça. Esses desvios e deformações não ocorrem apenas ao longo do comprimento em balanço da camada em suspensão, mas ocorrem também em todo o seu plano impresso. Dessa forma, como grande parte do segundo modelo de perfil está em balanço e possui uma espessura de 6 mm, na ausência do material de suporte, o perfil impresso teria uma má formação em cada camada fabricada, onde

na direção do eixo z da impressora (Fig. 8b) o PLA se deslocaria com a ação da gravidade, e no plano xy haveria uma deformação da peça, alterando o formato NACA estabelecido anteriormente.

Adicionalmente, vale comentar que o ângulo de inclinação entre as camadas suspensas e o plano da mesa de impressão, assim como a largura dessas camadas, também tem um forte impacto na peça final. Conforme apresentado por Vicente, Canyada e Conejero (2015), para valores pequenos de ângulos e larguras de camadas verifica-se uma elevada quantidade de defeitos superficiais. Esses defeitos se dão devido ao não resfriamento de camadas anteriores, que, por estarem inclinadas, quando sobrepostas tendem a se deslocar para fora do perímetro da peça determinado pelo CAD, gerando uma superfície com ondulações e elevada rugosidade. O respectivo perfil NACA impresso possui uma largura de camada definida pelo tamanho da corda, 50,4 mm. Segundo Vicente, Canyada e Conejero (2015), peças com larguras acima de 50 mm devem ser impressas com ângulos maiores que 40° com o plano da mesa, sem que haja perda da qualidade e a ocorrência de defeitos, uma vez que o tempo de deposição entre as camadas aumenta e, conseqüentemente, elas se resfriam antes de uma sobreposição. Dessa forma, foi adotado esse valor de ângulo para determinar quais as camadas que podem ser impressas sem material de suporte, de forma a garantir uma geometria fiel ao projeto aerodinâmico.

4. CONCLUSÕES

Com Base nos estudos e simulações realizadas, foi obtido o melhor perfil (com base nas características geométricas do padrão NACA) para dutos propulsores e, também, foi observado sua viabilidade de fabricação a partir do processo de manufatura aditiva por extrusão de material. O aerofólio NACA 8312 foi selecionado por apresentar o melhor conjunto de características geométricas que podem fornecer o melhor desempenho aerodinâmico para o duto a ser confeccionado. Essa seção de asa fornece uma razão de área de 0,917 e um comprimento de corda de 50,4 mm, que junto de um camber de 8% pode proporcionar um aumento na força de tração do conjunto propulsor, conforme apresentado na literatura.

Pelas simulações das estratégias de fabricação do respectivo perfil é observado uma baixa complexidade para a impressão dos modelos propostos. Entretanto, o segundo modelo apresentou um elevado tempo de impressão junto de uma necessidade de muito material de suporte, uma vez que, para a geração da superfície interna desejada, se faz necessária a impressão de camadas suspensas. Dessa forma, é necessário avaliar se o ganho na força de tração desse modelo em relação aos outros justifica o tempo e material gasto para sua fabricação.

5. REFERÊNCIAS

- ANAC, 2017. “Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017: Requisitos gerais para Aeronaves não Tripuladas de uso Civil”. 13 Out. 2020 <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>.
- Barrios, J. M. e Romero, P. E., 2019. “Improvement of surface roughness and hydrophobicity in PETG parts manufactured via Fused Deposition Modeling (FDM)”. *Materials*, Vol. 12.
- Bontempo, R. e Manna, M., 2016. “Effects os duct cross section camber and thickness on the performance of ducted propulsion systems for aeronautical applications”. *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2016.
- Dalewski, R. T., Gumowski, K., Barczak, T. e Godek, J., 2017. “Analysis of an Additive Manufacturing Process for an Unmanned Aerial Vehicle”. *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 30.
- Ferro, C. G. et. al., 2016. “Characterization of ABS specimens produced via the 3D printing technology for drone structural componentes”. *Curved and Layered Structures*, Vol. 1.
- Jasudavicius, A., 2007. *Optimization of a ducted fan propulsion system for a single engine aircraft*. Tese de doutorado. Ryerson University, Canada.
- Lovo, J. F. P., 2017. *Projeto de fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pounds, P. E. I., 2007. *Design, construction and control of a large quadrotor micro air vehicle*. Tese de doutorado. Australian National University, Camberra.
- Ramirez, A. S. el. al., 2019. “Aplication of FDM technology to reduce aerodynamic drag”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, p. 781 – 791.
- Vicente, M. F., Canyada, M. e Conejero, A., 2015. “Identifying limitations for design for manufacturing with desktop FFF 3D printers”. *International Journal Rapid Manufacturing*, Vol. 5, No.1, p. 116-128
- Yilmaz, S., Erdem, D. e Kavsoglu, M. S., 2015. “Perfirmance of a ducted propeller designed for UAV application at zero angle of attack flight: an experimental study”. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 45, p. 376-386.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STUDY OF THE MANUFACTURING PROCESS BY RAPID PROTOTYPING OF DUCTED PROPELLERS FOR UAV

Abstract. *The main objective of this paper is to analyze and get the best profile for ducted propellers as well as evaluate their manufacturing viability by additive manufacturing by fused deposition modeling. These ducts will be applied in the construction of autonomous quadrotor aircraft. For this purpose, a study of the NACA four-digit profiles and the main parameters of the additive manufacturing process was developed. Then, the respective manufacturing strategy for three types of ducts was simulated: i) one with low roughness and covered with epoxy resin. ii) one with high roughness, with micro-riblets parallel to the air flow line. iii) one with high roughness with micro-riblets perpendicular to the air flow line. Based on the studies and simulations carried out, the best profile (based on the geometric characteristics of the respective project) has been obtained for ducted propellers as well as its manufacturing feasibility has been observed from the material extrusion additive manufacturing process. The NACA 8312 airfoil has the best set of geometric characteristics that can provide the best aerodynamic performance.*

Keywords: 3D printing, Drones, Ducted Propeller, Surface Quality, Material Extrusion.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.