

DESEMPENHO AERODINÂMICO DE PERFIS MODIFICADOS COM BIOMIMÉTICA

A. R. Antunes^a, L. M. Reisdorfer^a, L. T. P. Schneider^b, G. Demarco^b

^a Engenharia Aeroespacial - Universidade Federal de Santa Maria

^b Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) - Universidade Federal de Santa Maria

Santa Maria - Rio Grande do Sul - Brasil

E-mail: aline.rabelo@acad.ufsm.br

RESUMO

A natureza nos apresenta com soluções evolutivas notáveis, que engenheiros se esforçam para emular. Essa abordagem de desenvolvimento de projetos é conhecida como biomimética. Neste estudo preliminar, examinamos o impacto da aplicação de princípios naturais ao projeto de aeronaves, especificamente investigando a introdução de protuberâncias semelhantes a tubérculos no bordo de ataque das asas para aprimorar sua eficiência aerodinâmica. Nosso enfoque recaiu sobre dois perfis de asa: o simétrico e o supercrítico. Através de simulações computacionais, desenvolvemos quatro diferentes geometrias de aerofólios, cada uma delas incluindo modelos de referência e versões modificadas com os tubérculos propostos. Esses tubérculos, com uma amplitude de 0,03 vezes a corda da asa e um comprimento de onda de 0,11 vezes a corda da asa, foram avaliados em uma variedade de ângulos de ataque. Nossos resultados revelaram um pequeno decréscimo no coeficiente de sustentação (C_L) e uma redução significativa no coeficiente de arrasto (C_D) ao incorporar os tubérculos. Além disso, observou-se uma considerável melhoria na relação sustentação/arrasto (L/D), indicando uma substancial elevação na eficiência aerodinâmica. Um benefício adicional observado foi a suavização das transições em condições de estol, o que sugere uma maior estabilidade em situações de baixa velocidade. Em conclusão, a adoção desses tubérculos inspirados na natureza pode ter um impacto positivo no desempenho das asas, alinhando-se com os princípios da biomimética no contexto da otimização aeroespacial.

Palavras chave: BIOMIMÉTICA, OPENFOAM, AERODINÂMICA.

INTRODUÇÃO

A biomimética, amplamente empregada por profissionais da engenharia, representa uma estratégia de desenvolvimento de projeto que busca aprender com a Natureza, suas estratégias e soluções. A área busca compreender as estruturas biológicas e suas funções, visando utilizar esse conhecimento em outras áreas do conhecimento. Essa abordagem parte da premissa de que todas as espécies que coexistem no ambiente natural demonstram uma propensão para evoluir e se adaptar às condições circundantes [3].

A natureza tem uma grande vantagem sobre qualquer equipe de pesquisa humana: muito tempo. Bilhões de anos, na verdade. E durante todo esse tempo, produziu alguns materiais verdadeiramente surpreendentes - usando blocos de construção fracos que os engenheiros humanos ainda não descobriram como usar para aplicações de alta tecnologia e com muitas propriedades que os humanos ainda precisam encontrar maneiras de duplicar. [4]. Portanto, aproveitar essas soluções da natureza se configura como uma medida de alta eficácia.

A otimização da aerodinâmica das asas é um tópico crucial para diversas aplicações, como aeronaves comerciais, planadores, drones e veículos aéreos não tripulados. A busca por estratégias que possam aumentar a performance aerodinâmica de asas é um desafio central na Engenharia Aeroespacial e na otimização de estruturas [5]. A utilização da biomimética oferece uma oportunidade promissora para abordar esse problema complexo. Por isso, a investigação apresentada

neste trabalho se concentra na influência da introdução de tubérculos no bordo de ataque de perfis de asas, com o objetivo de melhorar o desempenho aerodinâmico.

A nadadeira peitoral da baleia jubarte, que pode ser observada na **Figura 1**, proporciona aos cientistas uma perspectiva inovadora para a otimização do desempenho aerodinâmico de asas. Durante o ato de natação da baleia jubarte nas águas oceânicas, as saliências presentes nas extremidades das nadadeiras geram uma quantidade significativa de vórtices direcionados no sentido da corrente [6]. Esses vórtices resultam no incremento da força de sustentação sobre as nadadeiras, promovendo um impulso adicional à baleia e, conseqüentemente, acelerando o seu deslocamento.

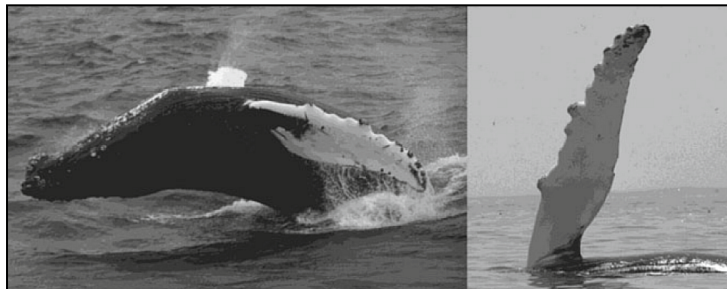


Figura 1. Baleia Jubarte

O objetivo deste estudo preliminar é avaliar os impactos decorrentes da inserção de protuberâncias semelhantes a tubérculos no bordo de ataque de uma asa, bem como examinar os efeitos resultantes dessa modificação no comportamento aerodinâmico do perfil, especialmente em baixos números de Reynolds, nesse estudo adotamos $Re = 5 \times 10^5$. Esse enfoque em baixos números de Reynolds considera o cenário de aeronaves, como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e planadores, onde essas mudanças podem ter relevância significativa considerando suas condições de operação. Portanto, entender os efeitos dessas modificações geométricas em baixos números de Reynolds é crucial para aprimorar o desempenho e a eficiência de VANTs, planadores e aeronaves de operação semelhante [1].

Para alcançar esse propósito, foram escolhidos dois tipos distintos de perfis aerodinâmicos para análise: um de configuração simétrica (NACA 0012) e outro de perfil supercrítico (SC 2-0714). Esse enfoque permite a oportunidade de contrastar o desempenho dos tubérculos em diferentes arranjos geométricos, os quais estão intrinsecamente ligados a variadas condições operacionais. Dentro deste contexto, foram desenvolvidas quatro distintas geometrias de aerofólios, englobando dois modelos de referência e outros dois modelos modificados com tubérculos no bordo de ataque. Estes perfis apresentam uma corda média (c) de 1000 mm, enquanto os tubérculos possuem uma amplitude (A) equivalente a $0,03c$ e um comprimento de onda (λ) correspondente a $0,11c$. Logo, a razão A/λ para os tubérculos é estabelecida em $0,27$ [3]. A simulação dos modelos é efetuada por meio do software *OpenFOAM* (do inglês, *Open source Field Operation And Manipulation*), de forma que seja realizada uma análise dos coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D), com ângulos de ataque (α) variando entre 0° a 30° .

Ao avaliar os efeitos dos tubérculos nas asas por simulações, observa-se um aumento no coeficiente de sustentação (C_L), sobretudo na região após o estol, acompanhado de um processo de estol suavizado, de forma que a análise das condições de estol mostrou transições suaves com tubérculos. Esses resultados apoiam a hipótese de que tubérculos podem aprimorar o desempenho aerodinâmico das asas, respaldando a biomimética na otimização aeroespacial para eficiência e desempenho aprimorados.

METODOLOGIA

Nesta seção, é introduzida a abordagem metodológica que está sendo atualmente utilizada e que será empregada para a criação das configurações geométricas utilizando o software *Solidworks*. Além disso, é abordado em detalhes a estratégia empregada na construção do domínio computacional, na geração da malha e na definição das condições de contorno essenciais para a realização das simulações numéricas.

Geometria

No processo de elaboração das geometrias com tubérculos, foi utilizado o software *Solidworks*. Isso foi realizado por meio da combinação de planos de corda $c = 1$ com planos de ampliação de escala, onde a corda será $c = 1 + A$, sendo A a amplitude desejada dos tubérculos. A amplitude é definida como $0,03c$, e o comprimento de onda é de $0,11c$, representando a distância entre tubérculos adjacentes. A **Figura 2** ilustra de forma detalhada o processo de construção da geometria. Além das configurações biomiméticas com tubérculos, também foram desenvolvidos dois perfis de referência, visando validar os resultados em comparação com informações disponíveis na literatura. Estes perfis de referência foram empregados para a análise comparativa dos coeficientes de arrasto e sustentação, entre os perfis com e sem tubérculos, permitindo uma avaliação abrangente do impacto dos tubérculos no desempenho aerodinâmico de cada aerofólio.

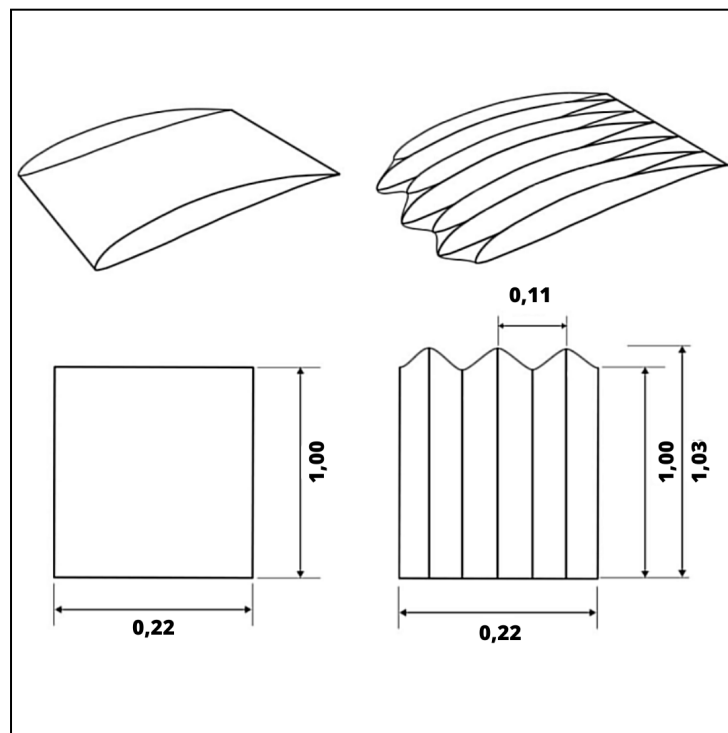


Figura 2. Geometria das asas com tubérculos e sem tubérculos

Domínio computacional e malha

A malha foi gerada usando a ferramenta *blockMesh* do *OpenFOAM*, e a superfície da aerofólio foi extrudada com o *snappyHexMesh*. O domínio computacional básico é mostrado na **Figura 3** e na **Figura 4** (a), enquanto (b) mostra em detalhes a extrusão dos perfis. As laterais do domínio foram tratadas com uma condição de simetria na direção da envergadura. O domínio foi dividido em seis blocos, conforme a **Figura 7**, permitindo maior refinamento da malha nos blocos que estão próximos à superfície do aerofólio. Os blocos B3 e B6 foram divididos em 20 células

na direção horizontal e os blocos B2 e B5 em 10 células. Já os blocos B1 e B4 foram divididos em 20 células. Todos os blocos foram divididos em 40 células na direção vertical.

O domínio de simulação possui dimensões de $12c$ na região anterior ao perfil aerodinâmico e se estende até $20c$ na área posterior, sendo também composto por extensões de $12c$ acima e abaixo do perfil. Estas configurações foram delineadas para atender aos requisitos pertinentes ao domínio de simulação sob tais circunstâncias. Um Número de Reynolds (Re) estimado em torno de 10^5 é empregado nas simulações, com os resultados sendo validados por meio de referências bibliográficas.

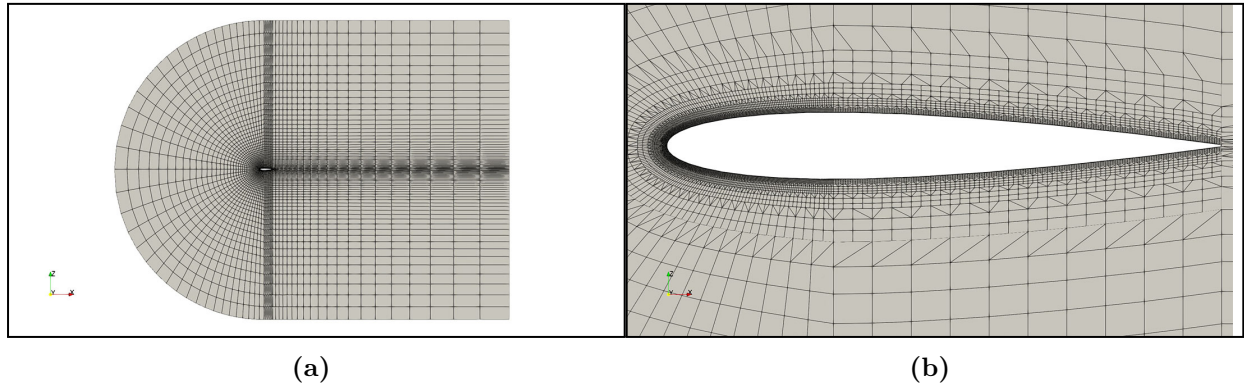


Figura 3. Malha NACA0012 (a) domínio (b) detalhe do aerofólio

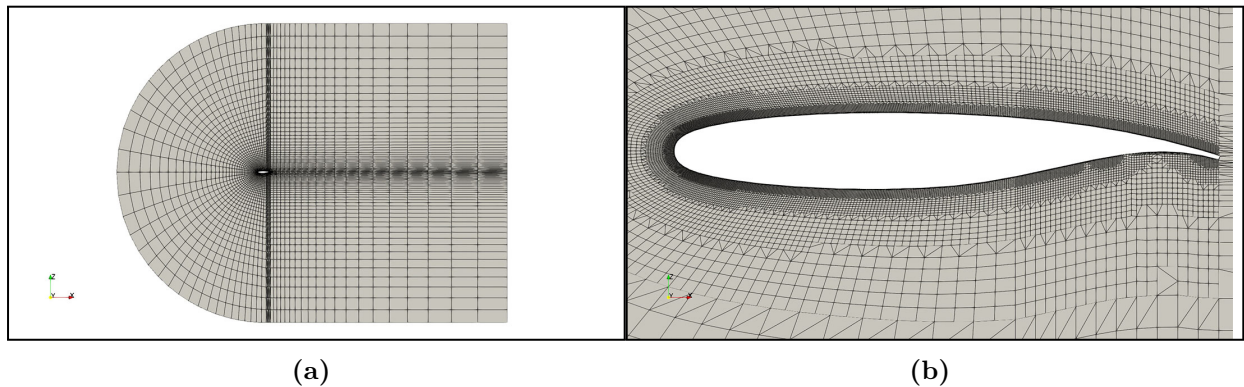


Figura 4. Malha SC20714 (a) domínio (b) detalhe do aerofólio

A **Figura 5** e a **Figura 6** apresentam a malha da superfície dos aerofólios (a) sem tubérculos e (b) com tubérculos. Os perfis foram extrudados a partir do domínio utilizando a ferramenta snappyHexMesh do OpenFoam. Para isso, foram criadas 12 camadas paralelas à superfície, a fim de melhorar o refino da malha na região. É possível identificar regiões de descontinuidade da malha, geradas durante o processo de extrusão pelo snappyHexMesh, principalmente nos perfis com tubérculos. Apesar de tais fatores, foi possível validar os resultados numéricos das simulações. Todavia, novos estudos utilizando malhas mais refinadas são de grande interesse para auxiliar na compreensão dos fenômenos envolvidos na aerodinâmica dos tubérculos.

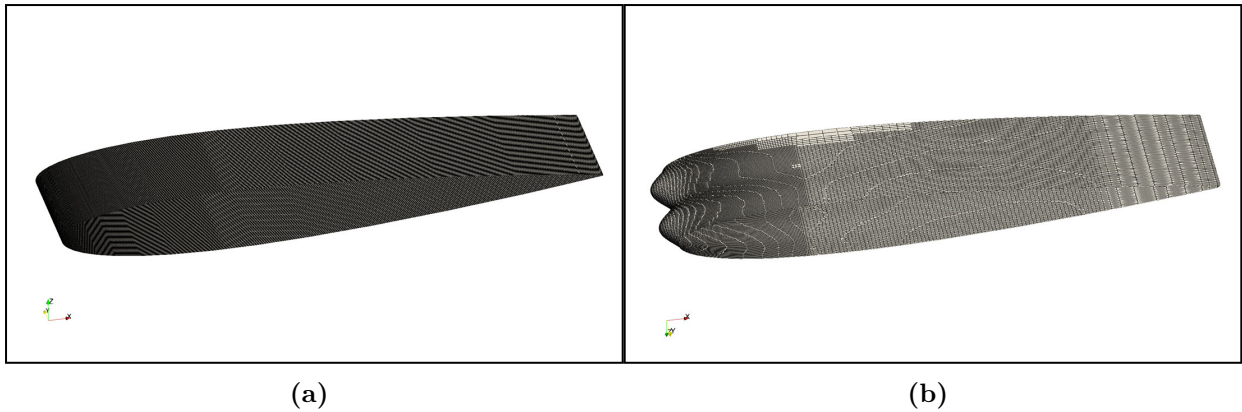


Figura 5. Malha NACA0012 (a) base (b) modificado

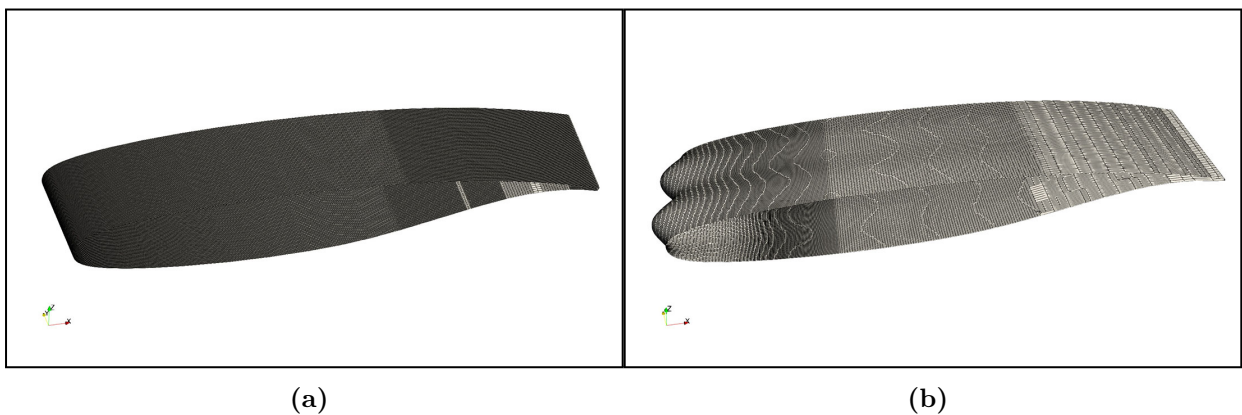


Figura 6. Malha SC20714 (a) base (b) modificado

Condições de contorno

Na entrada do domínio, é imposta uma velocidade de escoamento livre (U_∞) calculada com base em um número de Reynolds ($Re = 10^5$), utilizando valores de viscosidade $\mu = 1,82 \times 10^{-5} kg/ms$ e massa específica $\rho = 1,225 Kg/m^3$. As condições nas paredes do domínio foram configuradas com não deslizamento e adiabáticas. Foram examinados 7 ângulos de ataque: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° e 30° , focando especialmente na região pós-estol, onde o perfil com tubérculos demonstra desempenho superior em relação ao perfil de referência. A validação dos coeficientes de sustentação e arrasto é realizada por meio de comparações com dados presentes na literatura. Na **Figura 7** é esquematizada a dimensão do domínio da malha desenvolvida, que possui dimensões de $12c$ na região anterior ao perfil aerodinâmico e se estende até $20c$ na área posterior, sendo também composto por extensões de $12c$ acima e abaixo do perfil.

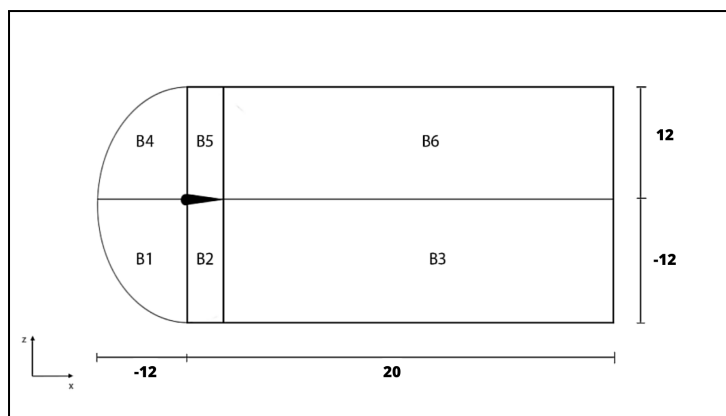


Figura 7. Dimensão do domínio

As simulações são conduzidas utilizando o solver SimpleFOAM do OpenFOAM, e o modelo de turbulência empregado foi o Spalart-Allmaras, um modelo de turbulência de uma equação, adotado devido à sua simplicidade e eficiência computacional [2]. Este modelo resolve uma equação de transporte para a viscosidade turbulenta, denotada como ν_t , que está relacionada com as tensões turbulentas no fluxo e ajuda a capturar os efeitos da turbulência.

Através das simulações, são obtidos os coeficientes de sustentação e arrasto dos perfis, que são comparados aos resultados do *AirfoilTools* (2023), uma plataforma online e um recurso gratuito utilizado por engenheiros, pesquisadores e entusiastas da aerodinâmica para acessar informações e dados relacionados a perfis aerodinâmicos, apresentam proximidade com os coeficientes obtidos na simulação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na **Figura 8** (a) e na **Figura 8** (b), são apresentados os valores dos coeficientes de sustentação (C_L) em função dos ângulos de ataque. Quando analisa-se o perfil NACA0012, representado no lado esquerdo da **Figura 8** (a), é perceptível verificar que os ganhos de sustentação são maiores quando os ângulos de ataque variam entre os valores 0° e 10° , quando comparamos os perfis modificados em relação ao perfil base. Quando se atingem valores superiores a 13° , ocorre uma inversão na curva de sustentação porém na região onde ocorre a perda de sustentação, o fenômeno de estol ocorre de forma mais suavizada e mantendo assim valores similares, quando comparado ao perfil de base, que não possui tubérculos.

De maneira similar, ao analisar o perfil SC 2-0714, apresentado no lado direito da **Figura 8** (b), é evidente que para ângulos de ataque variando de 0° a 5° , as modificações devidas aos tubérculos não conferem benefícios significativos, uma vez que a sustentação nessa faixa é reduzida. Entretanto, acima desses valores, há um aumento na sustentação para esse perfil. Ainda que a perda de sustentação ocorra mais cedo para o perfil modificado, observa-se aqui uma diminuição mais gradual. Além disso, quando os ângulos de ataque ultrapassam 22° , a asa modificada mantém coeficientes de sustentação superiores aos da asa base.

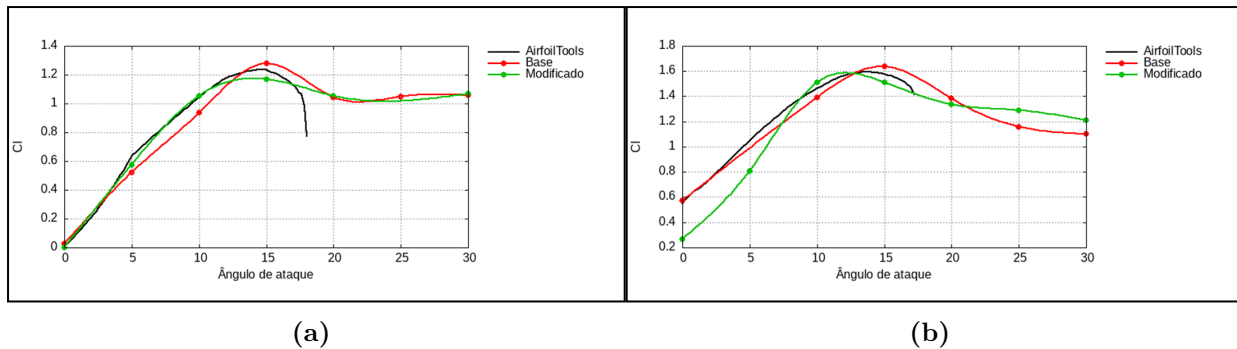


Figura 8. Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque (a) NACA 0012 (b) SC 2-0714

Na **Figura 9** (a) e (b) são apresentados os resultados preliminares da simulações e da referência do coeficientes de arrasto em função do ângulo de ataque. Pode-se observar um ligeiro aumento no coeficiente de arrasto nas duas asas modificadas em comparação com a asa base. Essa discrepância pode ser explicada pela diferença entre os métodos de análise. O método utilizado no *AirfoilTools* (método dos painéis) não considera turbulência, empregando o modelo de escoamento laminar, enquanto neste trabalho foi empregado o *Spalart-Allmaras*, que leva em consideração os efeitos turbulentos. Esse aumento foi mais proeminente na região correspondente ao ângulo crítico de ataque (ângulo de estol) em ambas as configurações das asas. Dessa maneira, caberá um estudo mais detalhado na região mais próxima a superfície, de forma a investigar tais observações.

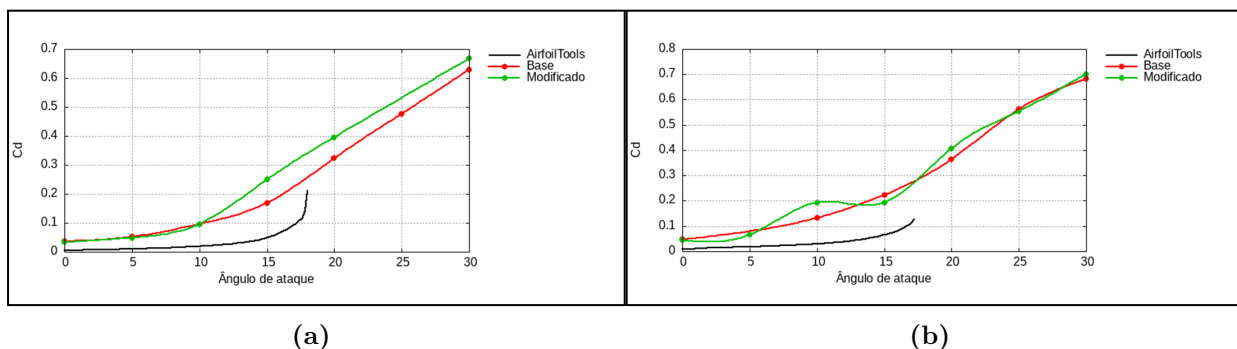


Figura 9. Coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque (a) NACA 0012 (b) SC 2-0714

Para as asas finitas modificadas utilizando os perfis NACA0012 e SC 2-0714, observou-se que na região pós-estol (15°) das asas modificadas, a redução nos valores de sustentação ocorre de forma mais gradual em comparação com o perfil não modificado e, com a referência (*AirfoilTools*). Essa característica oferece uma vantagem, pois uma diminuição abrupta no coeficiente de sustentação pode levar à perda de controle de uma aeronave. Quando a força de sustentação diminui rapidamente, a estabilidade da aeronave pode ser comprometida. No entanto, uma asa com uma diminuição suave no coeficiente de sustentação após o estol é capaz de manter a sustentação por um período prolongado. Isso proporciona ao piloto uma janela maior para recuperar o controle da aeronave com maior facilidade.

Os efeitos dos tubérculos são mais significativos no perfil SC 2-0714, que apresenta sua espessura máxima a 37% da corda, em contraste com o perfil NACA 0012, cuja espessura máxima está localizada a 30% da corda. Embora ocorra uma redução na sustentação na região pré-estol, é possível observar uma melhora no desempenho pós-estol, caracterizado por uma suave diminuição do C_L após essa região. Esse padrão comportamental pode trazer vantagens em termos de condições operacionais para os perfis examinados.

Na **Figura 10** (a) e (b), são exibidas as linhas de corrente correspondentes a um ângulo de

ataque de 25° para a asa de referência e a asa modificada do perfil NACA 0012. É perceptível que áreas de baixa pressão surgem após o desprendimento do vórtice ao redor do perfil, ocorrendo aproximadamente a 85% da extensão da corda. Além disso, é possível deduzir que a asa modificada consegue promover maior aderência do escoamento à sua superfície, indicado pelo maior número de linhas de corrente presentes no extradorso dessa asa.

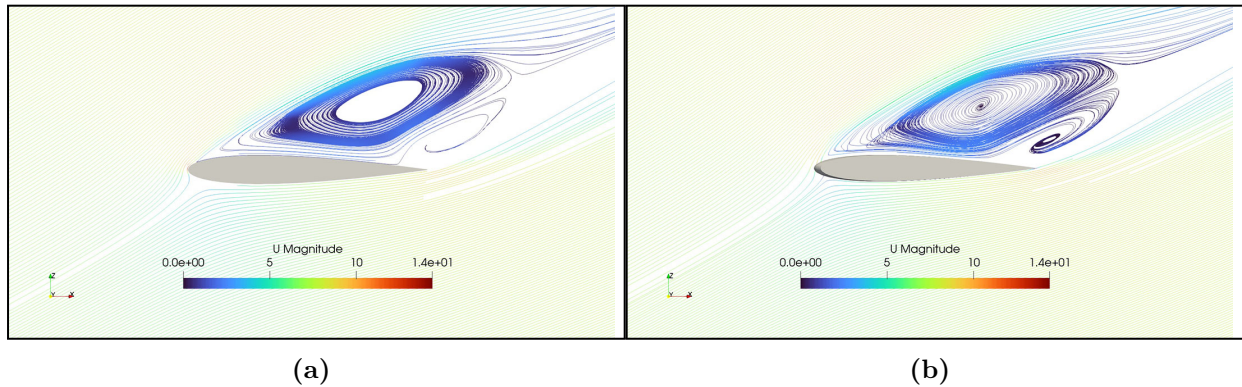


Figura 10. Linhas de corrente para um ângulo de ataque de 25° (a) NACA 0012 base (b) NACA 0012 modificado

A **Figura 11 (a)** e a **Figura 11 (b)** mostram as linhas de corrente correspondentes a um ângulo de ataque de 25° do perfil SC 2-0714. Uma notável semelhança pode ser observada no padrão de maior aderência do escoamento à superfície da asa modificada com abordagem biomimética, assim como na asa com o perfil NACA 0012. Fica evidente que as linhas de corrente apresentam descolamento da superfície em regiões muito similares, além de indicar um discreto aumento na velocidade do escoamento na região do bordo de ataque da asa modificada com biomimética. Essa análise das linhas de corrente reforça os indícios anteriores de que a modificação biomimética na asa por meio da introdução de tubérculos influencia no comportamento aerodinâmico, promovendo uma maior aderência do escoamento à superfície da asa e possivelmente reduzindo áreas de separação do escoamento.

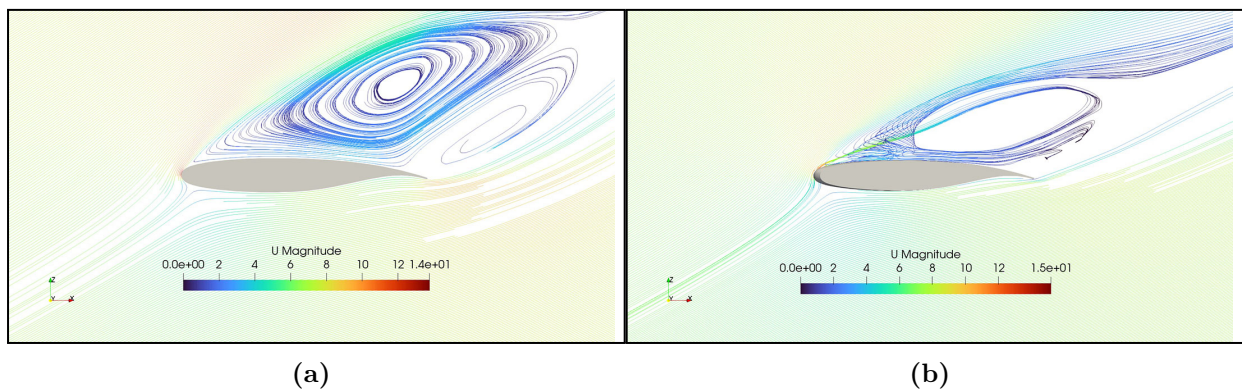


Figura 11. Linhas de corrente para um ângulo de ataque de 25° (a) SC 2-0714 base (b) SC 2-0714 modificado

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, podemos destacar que para as asas finitas modificadas utilizando os perfis NACA0012 e SC 2-0714, observou-se que na região pós-estol (15°) das asas modificadas, a redução nos valores de sustentação ocorre de forma mais gradual em comparação com o perfil não modificado e, com a referência (*AirfoilTools*). Essa característica oferece uma vantagem, pois uma diminuição abrupta no coeficiente de sustentação pode levar à perda de controle de uma

aeronave. Quando a força de sustentação diminui rapidamente, a estabilidade da aeronave pode ser comprometida. No entanto, uma asa com uma diminuição suave no coeficiente de sustentação após o estol é capaz de manter a sustentação por um período prolongado. Isso proporciona ao piloto uma janela maior para recuperar o controle da aeronave com maior facilidade.

Ademais, os efeitos dos tubérculos são mais significativos no perfil SC 2-0714, que apresenta sua espessura máxima a 37% da corda, em contraste com o perfil NACA 0012, cuja espessura máxima está localizada a 30% da corda. Embora ocorra uma redução na sustentação na região pré-estol, é possível observar uma melhora no desempenho pós-estol, caracterizado por uma suave diminuição do C_L após essa região. Esse padrão comportamental pode trazer vantagens em termos de condições operacionais para os perfis examinados.

Mediante a análise das linhas de corrente, é possível inferir que a introdução de tubérculos influencia o escoamento aerodinâmico, promovendo maior aderência do escoamento à superfície da asa.

Essas conclusões destacam que a introdução de tubérculos nos perfis aerodinâmicos proporciona uma notável melhoria no desempenho aerodinâmico, resultando em aumento do coeficiente de sustentação e redução do arrasto. Esse fenômeno sugere um potencial significativo para aplicações práticas em asas. Além disso, a incorporação de tubérculos parece contribuir positivamente para a eficiência aerodinâmica e estabilidade das asas. Como uma perspectiva adicional, investigações futuras poderiam aprofundar a compreensão do comportamento aerodinâmico dos tubérculos em diversas condições operacionais e cenários de voo, enriquecendo assim o entendimento das implicações práticas dessa abordagem inovadora.

REFERÊNCIAS

1. H. P. Carreira and M. Kobayashi. Numerical study of stall delay on humpback whale flippers. In *46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, page 584, 2008.
2. C. Greenshields. *OpenFOAM v10 User Guide*. The OpenFOAM Foundation, London, UK, 2022.
3. K. L. Hansen, R. M. Kelso, and B. B. Dally. Performance variations of leading-edge tubercles for distinct airfoil profiles. *AIAA Journal*, 49(1):185–194, Jan. 2011. doi: 10.2514/1.j050631. URL <https://doi.org/10.2514/1.j050631>.
4. MIT. Going nature one better | mit news | massachusetts institute of technology. <https://news.mit.edu/2010/biomaterials-1022>, outubro 2010. (Accessed on 08/09/2023).
5. J. B. R. Rose, S. G. Natarajan, and V. T. Gopinathan. Biomimetic flow control techniques for aerospace applications: a comprehensive review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(3):645–677, June 2021. doi: 10.1007/s11157-021-09583-z. URL <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09583-z>.
6. F. Wu, A. Han, W. Jiang, Y. Yue, and D. Xie. A biomimetic design of steam turbine blade to improve aerodynamic performance. *International Journal of Thermal Sciences*, 181:107782, Nov. 2022. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107782. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107782>.