



AERODINÂMICA EXPERIMENTAL DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE BORDO DE FUGA EM UM AEROFÓLIO CONVENCIONAL

Maria Eugenia Cordeiro, mariascordeiro@live.com¹

Odenir de Almeida, odenir.almeida@ufu.br¹

Lohanna Paiva, lohanna.ufu@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121.

Resumo. Nesse estudo o propósito principal é a análise experimental da influência de diferentes geometrias de bordo de fuga nas características aerodinâmicas de um aerofólio convencional, especificamente um NACA 0012. Serão analisadas três diferentes geometrias do bordo de fuga, sendo elas, uma triangular, trapezoidal e wish-bone. Para realização dos experimentos será utilizado um Túnel de Vento de pequeno porte, instrumentação acessória através de recursos como balança aerodinâmica para medidas de arrasto e sustentação, Anemometria de fio quente para a medição de perfis de velocidade na esteira do bordo de fuga, e visualização através do uso de técnicas como china clay (parietal) e visualização por fumaça para o escoamento geral. Essa é uma pesquisa ainda em desenvolvimento, de tal forma que resultados parciais serão compartilhados nesse documento.

Palavras chave: Aerodinâmica. Túnel de Vento. Aerofólio. Bordo de fuga. Visualização.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e rápida expansão do setor aeronáutico, as aeronaves foram atingindo velocidades cada vez maiores, produzindo assim efeitos aerodinâmicos relevantes no projeto conceitual. A obtenção de forças aerodinâmicas é primordial em projeto de aeronaves, uma vez que a determinação do arrasto e da sustentação sobre perfis são de extrema importância (Anderson, 2001). Também, é importante observar, que a aerodinâmica de perfis/aerofólios encontra aplicação em outras áreas da engenharia, como por exemplo, veículos esportivos e turbinas eólicas.

A interação aeroacústica também possui grande relevância nos projetos aeronáuticos e projetos de turbinas eólicas, com isso, muitos trabalhos vêm sendo realizados através do estudo científico de diferentes aerofólios com o bordo de fuga serrilhado e/ou modificado geometricamente. Howe (1991), sugeriu uma teoria para prever a redução de ruído em um aerofólio 2D com o bordo de fuga serrilhado, ele definiu as variáveis dependendo das formas das arestas e identificou diferenças na redução de ruído dependendo de proporções do serrilhado.

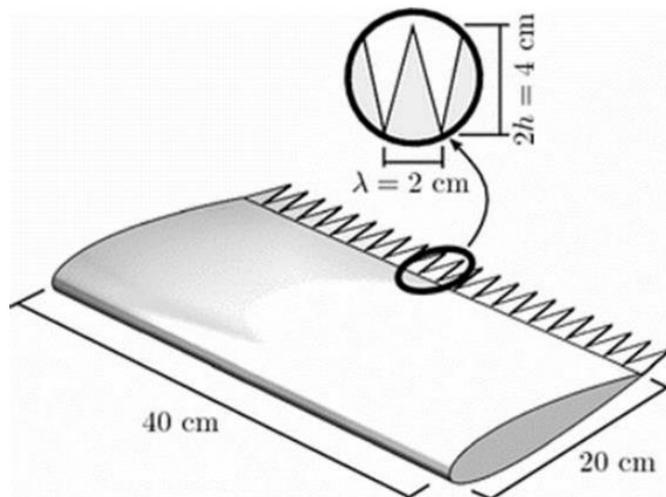
Baseado na teoria de Howe (1991), Um estudo experimental recente por Jaeha Ryi e Jong-Soo Choi (2018) foi realizado utilizando um aerofólio, com o bordo de fuga serrilhado, com intenção de redução de ruído em rotor de turbina, investigando diferentes serrilhados com forma geométrica triangular (dentes de serra). Outras trabalhos recentes realizados por Azarpeyvand, *et al.*, 2013 mostraram analiticamente e experimentalmente por Gruber, *et al.* 2013 a performance do uso do serrilhado, em uma ampla faixa de frequências e os resultados foram que o ruído gerado nessa região do aerofólio pode apresentar redução significativa. No estudo apresentado por Catalano e Santana (2016) analisou além do serrilhado triangular, outras geometrias como o *wish-bone* (osso da sorte) e o trapezoidal, obtendo resultados que confirmaram a contribuição das três diferentes geometrias analisadas na redução de ruído gerado no bordo de fuga, com a conclusão de que a forma wish-bone obteve o melhor desempenho.

Os resultados aerodinâmicos apresentados aqui, no entanto, revelaram que esse tratamento de fuga eficaz (em termos de ruído) é propenso a perdas aerodinâmicas significativas.

Embora o desempenho aeroacústico de tais tratamentos tenha sido extensivamente estudado nos últimos anos, poucos estudos foram realizados em relação à influência dessas modificações nas características aerodinâmicas dos perfis estudados. Na pesquisa realizada por (Liu, *et al.*, 2015) os resultados experimentais preliminares confirmaram que métodos de controle de fluxo no bordo de fuga, tais como o serrilhado, pode afetar significativamente o desempenho aerodinâmico do aerofólio, além de concluir que a forma geral das curvas cl x α e as propriedades de stall do mesmo aerofólio do presente estudo não se alteram, porém, reduz de forma significativa o coeficiente de sustentação. Neste contexto, esta pesquisa consiste em explorar essa área, com a análise da influência aerodinâmica – através do estudo experimental, inspirada nas três diferentes geometrias de serrilhado citadas anteriormente (triangular, trapezoidal e wishbone), no bordo de fuga de um aerofólio simétrico NACA 0012.

Para este presente estudo, será usada a medida para a amplitude do serrilhado apresentada por Arce León, *et al.*, 2016 que estudaram o perfil aerodinâmico do NACA 0018 utilizando um modelo de placa plana com inserções removíveis no bordo de fuga, na Fig.1 é mostrado o modelo do aerofólio com o bordo de fuga serrilhado, e as dimensões do perfil.

Figura 1: Dimensões do Aerofólio e serrilhado (Arce León, *et al.*, 2016)



Além do modelo apresentado na Fig.1, para as dimensões do aerofólio NACA 0012 investigado nesta pesquisa, as dimensões usadas no modelo estudado por (Liu, *et al.*, 2015) que realizou a inserção de uma placa plana no comprimento da corda do aerofólio, como mostrado na Fig.2 foram também consideradas.

Figura 2: Vista de montagem no CAD do NACA 0012 com a inserção do serrilhado (Liu, *et al.*, 2015)



Medidas aerodinâmicas de sustentação e arrasto foram analisadas em uma ampla faixa de ângulos de ataque, e para entender melhor a física da redução do arrasto e o desenvolvimento do escoamento ao redor do aerofólio com o serrilhado, serão realizadas medições de anemometria a fio quente e visualização do escoamento com máquina de fumaça e parietal com a técnica de china clay.

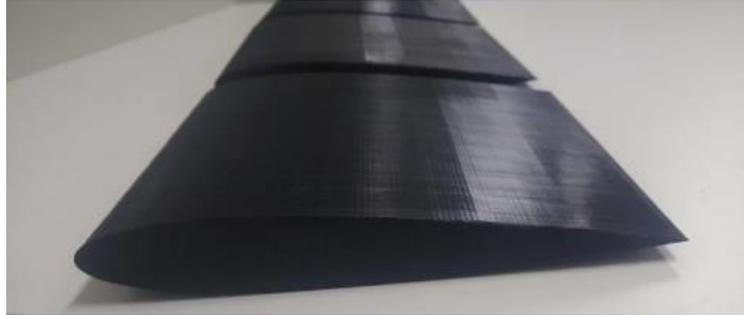
2. METODOLOGIA

Como trata-se de uma pesquisa teórico-experimental, aplicada à análise do escoamento ao redor do aerofólio, em principal para o fluxo de ar na esteira do bordo de fuga, a metodologia será realizada a partir dos seguintes procedimentos.

2.1. Modelo do Aerofólio para ensaio

Para realizar esse estudo, o desempenho aerodinâmico do aerofólio simétrico NACA 0012 foi investigado. Um modelo geométrico inicial (*baseline*) foi construído em CAD (3D-tridimensional), com base nas coordenadas do banco de dados para o aerofólio em questão. Para construção do protótipo, é utilizada tecnologia de impressão 3D. O modelo está exposto na Fig. 3.

Figura 3: Aerofólio *baseline* em construção



O aerofólio de base mostrado na Fig. 3 possui um comprimento de corda $C = 0,198\text{m}$ e envergadura de $L = 0,585\text{m}$, cobrindo toda a largura da seção de teste. Para a facilidade de impressão o protótipo foi dividido em três partes iguais de $0,195\text{m}$ de envergadura. Na construção do protótipo com a inserção do bordo de fuga serrilhado, será feito um corte de $0,396\text{m}$ no comprimento da corda (esse comprimento é a amplitude do serrilhado) baseado nos estudos realizados por (Arce Léon, *et al.*, 2017) e (Arce Léon, *et al.*, 2016) que definiram a amplitude do serrilhado como $2h = 0,2C$, além disso, uma ranhura de $0,10\text{m}$ de profundidade foi desenhada para encaixe do bordo de fuga, como mostrado na Fig. 4.

Figura 4: Aerofólio *baseline* e com o bordo de fuga serrilhado

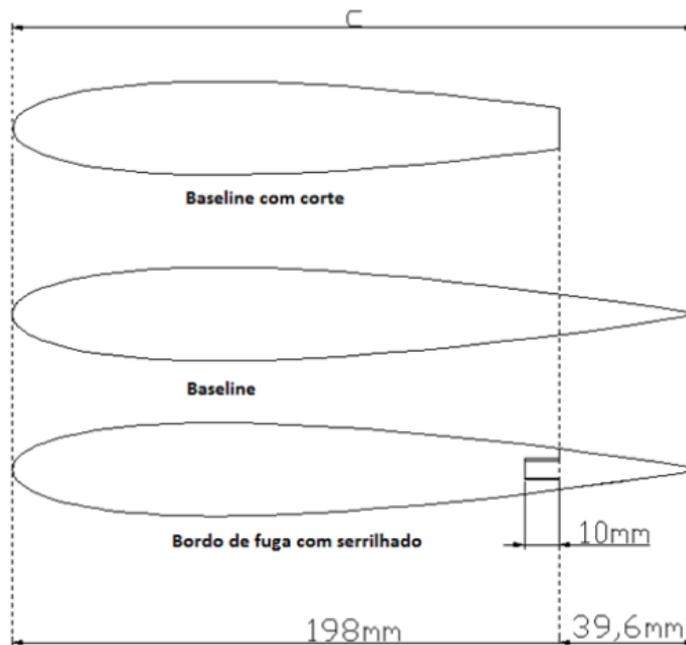


Figura 5: Modelo do perfil em CAD do aerofólio com o corte e o bordo de fuga serrilhado para inserção

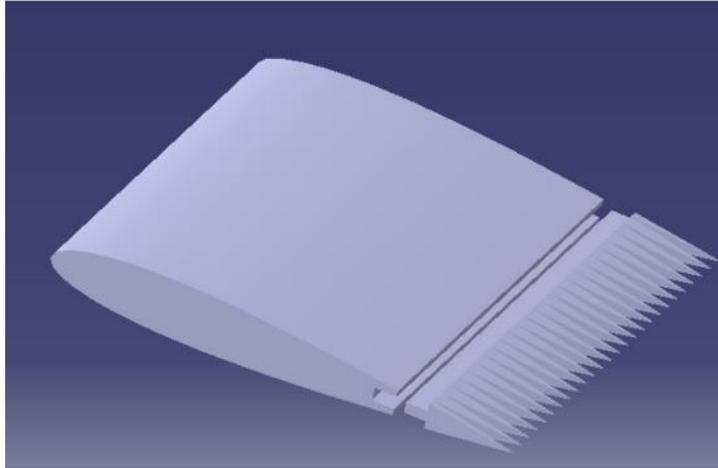
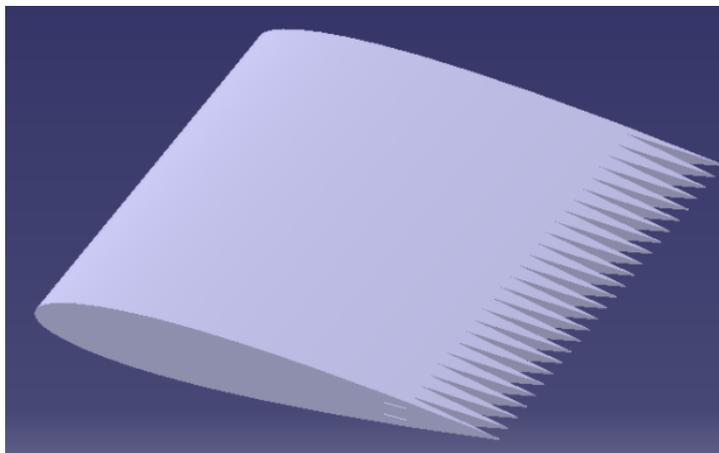


Figura 6: Montagem do perfil no CAD com a inserção do bordo de fuga serrilhado



Com base em resultados experimentais prévios de efeitos de redução de ruído usando serrilhado no bordo de fuga, o serrilhado que obteve melhor desempenho de redução de ruído do estudo feito por (Liu, *et al.*, 2015), foi selecionado para este estudo aerodinâmico. Como mostrado na Fig. 5 os parâmetros geométricos (amplitude, profundidade de ranhura, comprimento de onda de periodicidade) serão usadas para medidas detalhadas. Mesmo usando a referência do modelo dessa pesquisa, para a construção do serrilhado deste trabalho, não será inserida uma placa plana, e sim o serrilhado foi desenhado no próprio bordo de fuga, sendo assim, a espessura original do bordo de fuga é mantida. Muitos pesquisadores aplicaram o serrilhado em aerofólios existentes, de forma a aumentar a área de superfície do aerofólio (Arce León, *et al.*, 2017), enquanto outros tentaram manter a área superficial constante. Neste estudo o intuito é compreender os efeitos do serrilhado de forma a manter as dimensões iniciais do aerofólio. Para melhor desempenho da impressão 3D, o bordo de fuga serrilhado foi dividido em três partes iguais, para encaixe na ranhura mostrada no desenho das Fig.7 e Fig.8 apresentadas abaixo.

Figura 7: Dimensões do serrilhado triangular

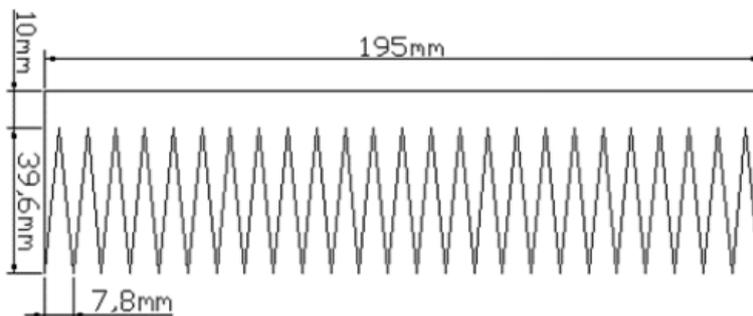
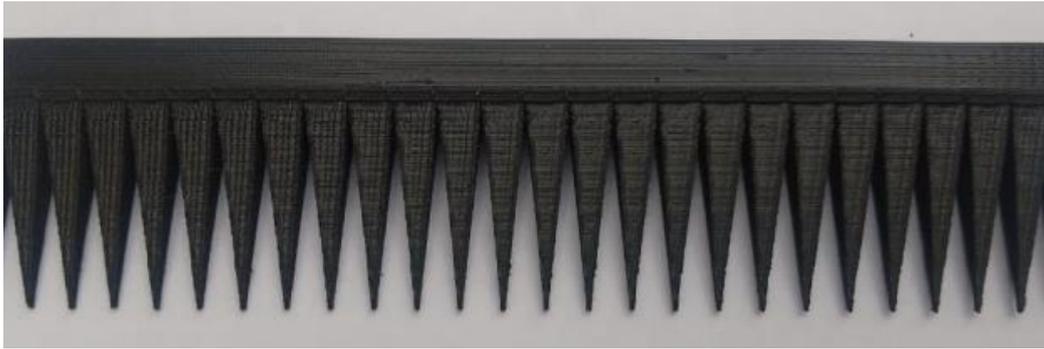


Figura 8: Bordo de fuga serrilhado impresso

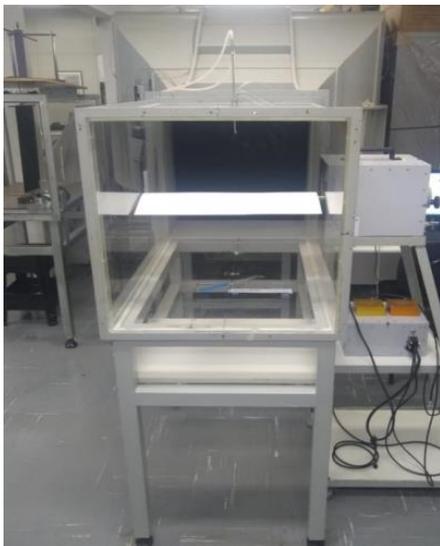


2.2. Ensaios em Túnel de Vento

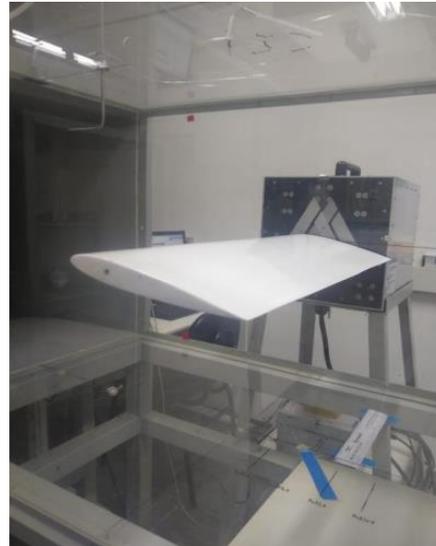
As medidas de forças aerodinâmicas (sustentação e arrasto) foram realizadas no túnel de vento (TV-60) do Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental (CPAERO) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), o qual possui seção de ensaio quadrada de 60 x 60 cm² por 1 m de comprimento, um anemômetro de fio quente DANTEC Dynamics Streamline Pro foi utilizado para produzir perfis de velocidade a montante e a jusante do modelo, um tubo de Pitot foi colocado no teto da seção de teste para a medida da velocidade na câmara de ensaio e uma máquina de fumaça para a obtenção do feixe de fumaça e visualização do escoamento. A indicação de velocidade foi utilizada para definir a condição de operação em termos do número de Reynolds e iniciar a aquisição com os instrumentos de medida. Uma balança aerodinâmica é alocada na lateral da seção de teste do túnel, na qual o modelo é fixado e com a variação do ângulo de ataque, são geradas as curvas de $c_l \times \alpha$ e $c_d \times \alpha$, para compreensão dos coeficientes de sustentação e arrasto do aerofólio em relação ao ângulo de ataque.

Figura 9: Aerofólio posicionado na seção de teste do Túnel de vento (TV-60)

(a) Vista lateral da seção de teste



(b) Vista frontal da seção de teste



3. RESULTADOS PRELIMINARES

O presente trabalho está sendo executado, o qual ainda não contempla os resultados para o serrilhado. Os resultados aqui apresentados, trata-se de dados preliminares e foram obtidos para as medidas de sustentação e arrasto realizadas com o aerofólio NACA 0012 (sem o serrilhado), sendo apenas os resultados para força de sustentação serão apresentados nessa seção. Estes resultados foram obtidos para o modelo *baseline* (sem serrilhado). Visto que os dados coletados para o aerofólio *baseline* são necessários para compreensão do estudo da influência do serrilhado no bordo de fuga. Ainda, estão sendo testadas as configurações de montagem na balança aerodinâmica e efeitos como influência do escoamento 3D

(ponta de asa) nos resultados obtidos experimentalmente. Após as correções no modelo e montagem, serão considerados os ensaios com o modelo apresentando o serrilhado no bordo de fuga.

3.1. Número de Reynolds

O número de Reynolds constitui a base do comportamento do escoamento, para aplicações em perfis aerodinâmicos, o Reynolds é expresso em função da corda média aerodinâmica do perfil. No experimento realizado no Túnel de vento, foi definida uma velocidade de fluxo de $V = 12,1$ m/s. Com isso, calculou-se o número de Reynolds pela Eq. (1) e foi obtido $Re = 1,4 \times 10^5$, correspondendo a um escoamento laminar para aerofólios.

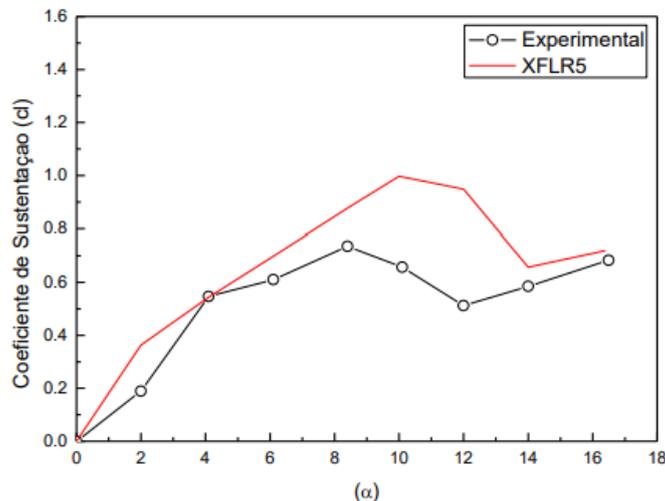
$$Re = \frac{V \cdot c \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

Na sequência é apresentado o resultado preliminar para a curva Cl vs α .

3.2 Sustentação vs alfa

Para coletar os dados da força de sustentação, foi utilizada uma balança aerodinâmica de três componentes. Sendo a variação do ângulo de ataque definida a partir da condição de incidência zero do aerofólio para o Reynolds calculado, ou seja, ajustando-se na balança a posição angular do aerofólio para a obtenção do cl nulo. Para esse conjunto de resultado os valores positivos de α de 0° a 16° foram observados, com variação de 2 em 2 graus. Com os dados das forças de sustentação obtidas, e calculando-se a área projetada do aerofólio, foi gerada a curva cl x α . Para verificação dos resultados do experimento, como mostrado na Fig. 5, realizou-se uma comparação dessa curva com a gerada no XFLR5®, dado o Reynolds obtido anteriormente e o perfil do aerofólio NACA 0012 fornecido pelo banco de dados.

Figura 10: Comparação da curva obtida com o experimento e da gerada no XFLR5®



Comparando o resultado experimental, como mostrado na Fig. 10, com a análise numérica (XFLR5®), observa-se discrepância, principalmente para a condição de “stall” do perfil. É importante ressaltar que efeitos tridimensionais podem estar afetando a medição, uma vez que não foram utilizadas placas separadoras (*splitter plates*) nas extremidades do perfil. Essa primeira observação, será investigada experimentalmente na próxima bateria de ensaios. Ainda, acredita-se que efeitos de montagem do aerofólio na balança aerodinâmica podem estar interferindo nos resultados. Para tanto, durante a execução dessa pesquisa, um novo aerofólio baseline está sendo construído, com peso reduzido e inserção de posicionador roscado para melhorar a fixação da haste.

4. CONCLUSÕES

O desempenho aerodinâmico e aeroacústico de aerofólios com o bordo de fuga serrilhado e/ou modificado geometricamente tem sido estudado. Estudos anteriores mostraram que tais tratamentos poderiam reduzir significativamente o ruído gerado nessa região de estudo do perfil aerodinâmico. Com a redução do ruído conseqüentemente existe a redução do arrasto gerado na esteira do bordo de fuga, sendo a influência aerodinâmica significativa para este estudo. Os resultados obtidos até o presente momento, são preliminares e estão em desenvolvimento, porém os procedimentos realizados servem como aprendizado para as etapas futuras do projeto. As

próximas etapas serão as medidas de forças aerodinâmicas (sustentação e arrasto) e seus respectivos coeficientes de sustentação e arrasto, para o modelo com as três geometrias de serrilhados (triangular, trapezoidal e wish-bone) e como citado anteriormente, serão realizadas medições de anemometria a fio quente e visualização do escoamento com máquina de fumaça e parietal com a técnica de china clay para melhor entender o escoamento ao redor do aerofólio, em específico na esteira do bordo de fuga.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a comissão do CREEM 2019 pelo espaço para apresentação deste trabalho, ao Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental – CPAERO da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio técnico-científico e estrutura.

6. REFERÊNCIAS

- Arce León, C., Ragni, D., Pröbsting S., Scarano F., Madsen J., 2016, “Flow topology and acoustic emissions of trailing edge serrations at incidence”. *Experiments in Fluids*, p. 57-91.
- Arce León, C., Martínez R.M., Ragni D., Avallone F., Scarano F., Pröbsting S., Snellen M., Simons D.G., Madsen J., 2017 “Effect of trailing edge serration-flow misalignment on airfoil noise emissions”, *Journal of Sound and Vibration*, p.19-33.
- Azarpeyvand, M., Gruber, M., Joseph, P. F., 2013, “An Analytical Investigation of Trailing-edge Noise Reduction Using Novel Serrations”, 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Berlin, Germany.
- Catalano F.M., Santana L.D., 2012, “Airfoil self-noise reduction by application of different types of trailing edge serrations”, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences – ICAS2012. Brisbane, Australia.
- Gruber, M., Joseph, P. F., Azarpeyvand, M., 2013, “An experimental investigation of novel trailing-edge geometries on airfoil trailing-edge noise reduction”, 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Berlin, Germany.
- Howe. MS, 1991 “Aerodynamic noise of a serrated trailing edge”, *Journal of Fluids and Structures*, p. 33-45.
- Jaeha Ryi e Jong-Soo Choi, 2018, “Estimation Method to Achieve a Noise Reduction Effect of Airfoil with a Serrated Trailing Edge for Wind Turbine Rotor” *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines*. 15 Abril. 2019 < <https://www.intechopen.com/books/stability-control-and-reliable-performance-of-wind-turbines>>.
- X.Liu, H. Kamliya Jawahar, M. Azarpeyvand e R. Theunissen, 2015, “Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of Serrated Airfoils” University of Bristol, Bristol, United Kingdom.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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