



ANÁLISE TEÓRICA E NUMÉRICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE HIDROFÓLIOS DE SUSTENTAÇÃO EM UMA EMBARCAÇÃO SOLAR

Diego Bandeira de Melo Akel Thomaz, dbdmat.eng16@uea.edu.br¹

Tássia Carolina Forasteiro Pinto, tcfp.eng16@uea.edu.br¹

Eduardo Rafael Barreda del Campo, eduardoserapio@yahoo.com.br¹

¹Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia. Avenida Darcy Vargas, 1200 – Parque Dez de Novembro, Manaus – AM, 69050-020

Resumo. *Quando se trata de veículos de transporte, competições são os ambientes perfeitos para se testar novas melhorias performáticas, as quais podem posteriormente ser aplicadas em massa nos veículos de transporte para passageiros comuns. Olhando para competições navais internacionais e especificamente para aquelas que limitam o carregamento das baterias a somente energia solar, sendo eficiência a maior preocupação, o uso de hidrofólios é presente em muitas equipes. Hidrofólios são anexos, com geometria e propósito semelhantes aos das asas de um avião, que são fixados na parte inferior externa de uma embarcação. Existem várias classes de hidrofólios, esse trabalho estuda a aplicação de hidrofólios do tipo de planeio, que geram uma força de sustentação para elevar o barco e remover parte da área de contato do casco com a água, consequentemente reduzindo o arrasto, com um arrasto reduzido é possível atingir maiores velocidades com o mesmo gasto de energia. Até hoje não existe nenhuma embarcação brasileira que utilize hidrofólios do tipo planeio, o objetivo deste trabalho é realizar o projeto de hidrofólios para um barco solar da Universidade do Estado do Amazonas que participa da competição universitária Desafio Solar Brasil.*

Palavras chave: Hidrodinâmica, hidrofólio, desafio solar brasil, energia solar.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de veículos de transporte, competições são os ambientes perfeitos para se testar novas melhorias performáticas, as quais podem posteriormente ser aplicadas em massa nos veículos de transporte para passageiros comuns. Olhando para competições navais internacionais e especificamente para aquelas que limitam a forma de energia para solar, sendo eficiência a maior preocupação, o uso de hidrofólios é presente em muitas equipes (Folle, 2016).

Hidrofólios são anexos com geometria e propósito semelhantes aos das asas de um avião, que são fixados na parte inferior externa de uma embarcação. Existem duas classes de hidrofólios: aqueles com o propósito de aumentar a estabilidade e aqueles de planeio que geram uma força de sustentação para elevar o barco e remover a área de contato do casco com a água, consequentemente reduzindo bastante o arrasto. Com um arrasto reduzido é possível atingir maiores velocidades com o mesmo gasto de energia. Esse projeto visa estudar a aplicação de hidrofólios do tipo de planeio (Gunkler, 2011).

Os primeiros veículos que faziam o uso desse segundo tipo de hidrofólio datam do século XIX. Posteriormente, quando começou a ser melhor compreendido, o uso dessa tecnologia passou a ser usada por várias embarcações militares, de competições e de transporte de civis (Acosta, 1973).

Nesse trabalho, será demonstrado o projeto que foi feito de um conjunto de hidrofólios para a embarcação universitária da equipe Leviatã da Universidade do Estado do Amazonas, tendo como objetivo final a participação desta na competição Desafio Solar Brasil, um rali nacional de barcos universitários movidos a energia solar, onde atualmente nenhum hidrofólio é utilizado.

O Desafio Solar Brasil iniciou em 2009 por iniciativa de uma equipe interdisciplinar do Pólo Náutico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, após participarem da *Frisian Solar Challenge*, competição de embarcações solares que acontece a cada dois anos na Holanda, detentora de grande renome internacional. Após a participação da equipe brasileira no evento, os anfitriões apoiaram a realização de um evento semelhante no Brasil. Atualmente o evento acontece anualmente no Rio de Janeiro com a presença de, em média, 16 embarcações universitárias. A competição visa popularizar o uso de energia solar, promover o intercâmbio universitário e qualificar jovens no uso de energia sustentável (DSB, 2019).

Essa competição tem como objetivo incentivar as equipes a desenvolver tecnologias que ajudem a aproveitar melhor a baixa quantidade de energia disponível na embarcação, limitado em 1500Wh. A equipe universitária em questão já participou três vezes do Desafio Solar Brasil e teve melhoras perceptíveis desde a sua primeira vez. Com a implantação

dos hidrofólios espera-se uma grande melhoria nos resultados, servindo também para motivar as outras equipes a seguirem a tendência do uso dessa tecnologia.

2. METODOLOGIA

Até meados da década de 1960, todo o estudo e desenvolvimento na área de mecânica dos fluidos ocorria através da pura teoria somada da experimentação. Com a necessidade da corrida espacial, técnicas numéricas resolvidas computacionalmente foram sendo mais desenvolvidas. Inicialmente esse campo era aplicado unicamente a veículos espaciais, mas com o barateamento dos computadores todas as áreas que realizam estudos de fluidos se beneficiaram.

Hoje, a aplicação de Fluidodinâmica Computacional (em inglês: *Computational Fluid Dynamics* – CFD) é uma etapa comum e importante, presente em projetos de empresas de construção civil a empresas aeroespaciais. Contudo, CFD não se tornou a única forma de se trabalhar com fluidos, só foi mais uma abordagem somada junta com teoria e prática, como ilustrado na Fig. 1 (Anderson, 1995).

Figura 1. Pontos de estudo da Mecânica dos Fluidos



Em mecânica dos fluidos existem três equações fundamentais, que regem o comportamento de um fluido em qualquer situação. Estas são:

- Equação da Continuidade: Baseada na equação de massa, aplicada a fluidos.
- Equação da Conservação de Quantidade de Movimento: Baseada na Segunda Lei de Newton, aplicada a fluidos.
- Equação da Conservação de Energia: Baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, aplicada a fluidos.

Existem diversas formas de representar essas equações, dependendo do referencial a que estão sendo aplicadas, mas todas são diferentes formatos do mesmo princípio. Todo o campo de CFD é baseado em resolver essas equações numericamente em pontos discretos. Segundo Dalongaro (2015) qualquer análise fluidodinâmica é composta pelos seguintes estágios:

- Modelagem do objeto a ser analisado: Os objetos a serem analisados, nesse caso os hidrofólios, são modelados em algum software de CAD 3D.
- Modelagem das condições de contorno (ou domínio computacional): Etapa em que o ambiente computacional em torno do corpo a ser analisado é modelado de tal forma que se aproxime das condições do ambiente real.
- Definição da malha: Esse processo compreende na decomposição da região a ser analisada em regiões menores, possibilitando a utilização de métodos numéricos nessas sub-regiões.
- Pré-Processamento: Nesta etapa são informadas características da geometria, da malha e das condições de contorno. Assim como os métodos numéricos que serão utilizados e as características do fluido de trabalho.
- Solucionador: As equações lineares algébricas definidas no método escolhido na etapa de pré-processamento são aplicadas na malha já definida, obtendo-se o resultado destas equações para vários pontos discretos ao longo da região analisada.
- Pós-processamento: Nesta etapa, finalmente, ocorre a visualização e análise dos resultados de forma interativa, para que a relação entre a variação dos parâmetros e os resultados obtidos seja melhor compreendida.

Com o intuito de realizar uma análise mais simples, para tornar esse método mais acessível a alunos que queiram projetar e construir hidrofólios, o XFLR5 foi utilizado. Este é um software *open source* para análise simplificada de aeronaves, muito utilizado em projetos universitários pelo fato de permitir a modelagem da asa, das condições de contorno, definir a malha automaticamente, permitir a escolha do tipo de análise a ser aplicada, calcular as equações lineares algébricas e organizar os resultados em gráficos. Na sua interface é possível realizar tanto análise 3D de asas finitas quanto análises 2D de perfis aerodinâmicos, que segundo Anderson (2011), são apenas formas simplificadas do conceito teórico de uma asa de alongamento infinito, situação em que os efeitos 3D são desprezíveis.

A maior diferença entre análises aerodinâmicas e hidrodinâmicas consiste na variação que os valores de viscosidade de cada um desses fluidos causam na espessura da camada limite (Fig. 2), que segundo Fox et al. (2011) e White (2011) é a região imediatamente próxima ao corpo imerso no fluido onde as tensões viscosas são predominantes.

Figura 2. Camada limite (NASA, 2019)



Contudo, segundo Bertram (2012), modelos com fluidos invíscidos (ou seja, de viscosidade igual a zero) têm sido usados em análises hidrodinâmicas devido à complexidade de tratar com a camada limite em fluxos de água. Sendo assim, o método para fluxos invíscidos VLM (*Vortex lattice method*), presente no XFLR5, foi escolhido para realizar as análises 3D dos hidrofólios. E para as análises em 2D, o método XFOIL desenvolvido em Drela (1989) foi escolhido, sendo o único para esse tipo de análise presente no XFLR5.

2.1. XFOIL

O XFOIL foi desenvolvido no departamento de Aeronáutica e Astronáutica do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) por Mark Drela com o objetivo de projetar e realizar análises de perfis aerodinâmicos subsônicos. Possibilita a utilização tanto em fluxos viscosos como não-viscosos (invíscidos). Esse algoritmo utiliza o método dos painéis, que consiste em discretizar um formato geométrico em vários segmentos de reta, chamados painéis, ilustrado na Fig. 3. Entre cada painel há um ponto de controle (chamado de N) onde são aplicadas singularidades fluidodinâmicas teóricas chamadas de vórtices (Fig. 4), representadas pela letra γ , em cada painel e na esteira, gerada pela presença do aerofólio, temos outras singularidades chamadas de fontes (Fig. 4), representadas pela letra σ . Através dessas distribuições de singularidades do corpo é possível calcular propriedades do fluxo como distribuições de velocidade, através das quais é possível obter os coeficientes aerodinâmicos (Drela, 1989). O método dos painéis é muito utilizado em projetos fluidodinâmicos, como em Lima (2011), Lopes (2011), Pereira (2005) e Petrucci et al. (2001).

Figura 3. Método dos painéis (Drela, 1989)

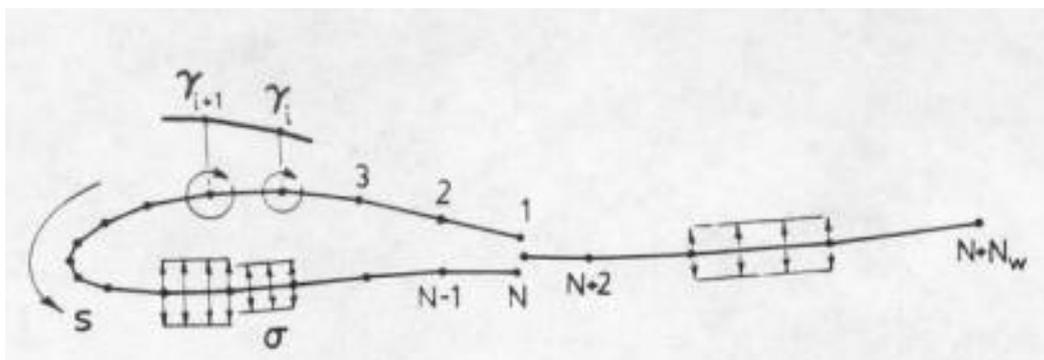
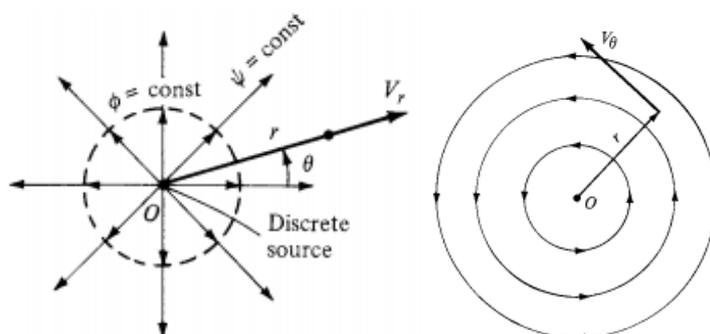


Figura 4. Singularidade de fonte e de vórtice, respectivamente (Anderson, 2011)



Contudo, através do método dos painéis obtemos resultados para um fluxo invíscido, mas na realidade todos os fluxos são viscosos. Para resolver esse problema o XFOIL aplica um fator de correção através das aplicações de mais fontes em torno do corpo e na sua esteira, para modelar a influência da existência da camada limite, região do fluxo colada no corpo onde os efeitos viscosos são predominantes.

De acordo com comparações presentes em Drela (1989), utilizando o número de painéis (N) de 160, a porcentagem de erro do coeficiente de sustentação fornecido pelo XFOIL, em comparação com dados de túnel de vento, é menor que 0,1% para um gasto computacional muito baixo, como mostrado na Tab. 1, sendo assim, todas as análises bidimensionais presentes nesse trabalho foram feitas utilizando o XFOIL com 160 painéis.

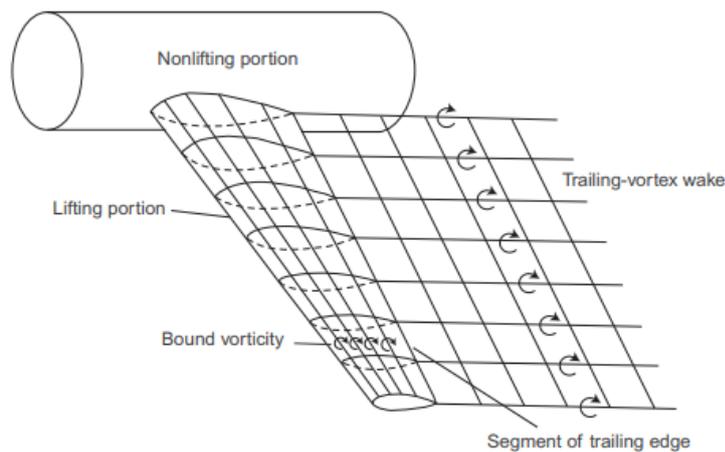
Tabela 1. Dados de confiabilidade do XFOIL (Drela, 1989)

Número de painéis (N)	Gasto computacional em segundos	Erro relativo do Coeficiente de Sustentação
40	4,0	0,766 %
60	7,5	0,340 %
100	20,0	0,175 %
160	54,0	0,086 %

2.2. VLM (Vortex Lattice Method)

O VLM consiste, semelhantemente ao método do XFOIL, em uma distribuição de painéis ao longo da superfície tridimensional de uma asa sustentadora. Contudo, ao invés de dividir o elemento analisado em painéis em formato de linhas como no XFOIL, o VLM aplica painéis bidimensionais em formato de trapézios, como visto na Fig. 5.

Figura 5. Painéis trapezoidais aplicados pelo VLM (Houghton et al., 2013)



Após essa divisão nesses elementos, um vórtice do tipo ferradura é aplicado em cada um dos painéis, através dos quais será calculado a curva de sustentação e de arrasto induzido da asa (Carvalho, 2018). Como citado anteriormente, o VLM não considera efeitos viscosos, sendo assim, os cálculos viscosos são feitos através de uma interpolação dos dados obtidos pelo XFOIL (Purdue, 2009). Algumas leis e teorias precisam ser consideradas para a aplicação e compreensão dos resultados do VLM (Budziak, 2015), estas são:

- Lei de Bio-Savart: Cada filamento de vórtice induz uma velocidade proporcional a sua circulação Γ . Em um ponto, posicionado a uma distância r de um segmento infinitesimal dessa linha de vórtice de tamanho dl , podemos descrever essa velocidade V como:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi} \int \frac{dl \times r}{|r|^3} \quad (1)$$

- Teorema de Kutta-Joukovsky: Um vórtice com uma certa circulação Γ , movendo com velocidade V_∞ em relação ao fluxo do fluido de densidade ρ , apresenta uma força, sendo esta a de sustentação L :

$$L = \rho V_\infty \Gamma \quad (2)$$

- Teoria de Hermann von Helmholtz: Todo filamento de vórtice precisa formar um circuito fechado (como um anel), sendo assim, os vórtices de ferradura na verdade se fecham no final, formando um quadrilátero, no entanto isso ocorre a uma distância muito grande da superfície sustentadora, logo pode ser negligenciado. A circulação Γ ao longo de um filamento de vórtice é constante, com isso podemos definir um valor de circulação para cada um dos painéis, já que para cada painel existe um único vórtice.

- Teoria da linha sustentadora de Prandtl: Como citado na teoria de Hermann von Helmholtz, todo vórtice precisa ser um circuito fechado, no entanto, Prandtl propôs a teoria da utilização de vórtices de ferradura, posicionando um trecho do vórtice muito longe da superfície, simplificando muito mais a análise fluidodinâmica sem prejudicar os resultados.

O VLM é muito utilizado em análises de superfícies sustentadoras de projetos universitários assim como em Vargas (2006), Dainezi et al. (2016) e Margason et al. (1985), principalmente nos casos em que essas superfícies não possuem geometrias tão simples, ou seja, não podem ser formadas por um único quadrilátero, que é o caso deste projeto.

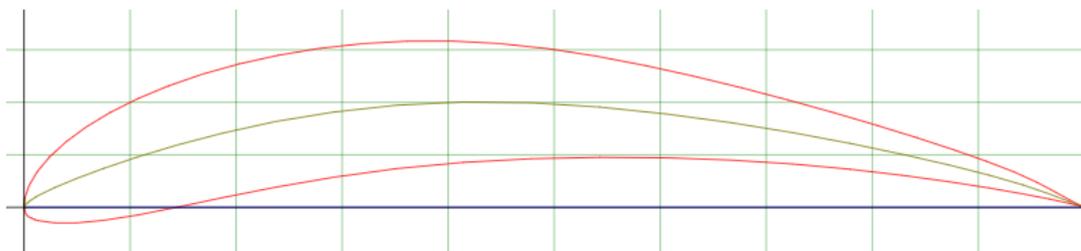
3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

3.1. Análises Bidimensionais

Várias análises em 2D foram realizadas no XFOIL, usando dados de diferentes tipos de aerofólios de alta sustentação, obtidos através do site AirfoilTools. Dentre eles, o perfil EPPLER 423, mostrado na Fig. 6, foi escolhido por apresentar um alto coeficiente de sustentação, alta eficiência aerodinâmica e facilidade construtiva. Além disso, esse perfil é muito utilizado em projetos aerodinâmicos e hidrodinâmicos, sendo assim, existe uma vasta bibliografia sobre dados obtidos com o mesmo.

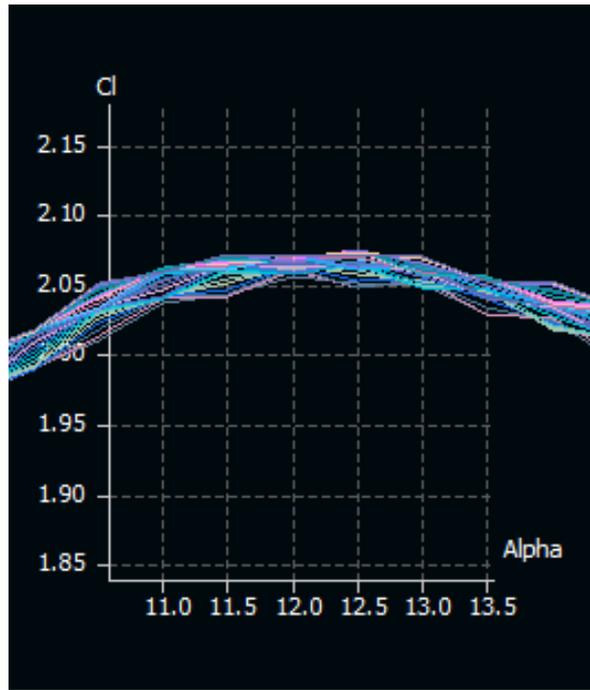
Um parâmetro importante para essas análises é o número de Reynolds, coeficiente adimensional que caracteriza o fluxo, para as condições de velocidade estudadas, o Reynolds utilizado foi de 500000.

Figura 6. EPPELER 423 (AirfoilTools, 2019)



Através dessa análise foi possível definir o ângulo de estol desse perfil, que é o ponto em que devido um alto ângulo de ataque, o fluxo hidrodinâmico se descola do perfil, formando uma bolsa de ar chamada esteira, com intensa recirculação de escoamento o que resulta numa redução de sustentação e aumento de arrasto, como ficou visível na Fig. 7. O estolamento ocorre em torno de 13 graus de ângulo de ataque nesse perfil, então foi definido um ângulo máximo de 12 graus para os hidrofólios. Esse é o ângulo que deve existir entre os hidrofólios e o fluxo de água quando a embarcação estiver em regime de cruzeiro.

Figura 7. Gráfico de CL x Ângulo de Ataque no XFRL5 representando o estol



Todos os dados do projeto bidimensional foram organizados na Tab. 2.

Tabela 2. Dados do projeto bidimensional

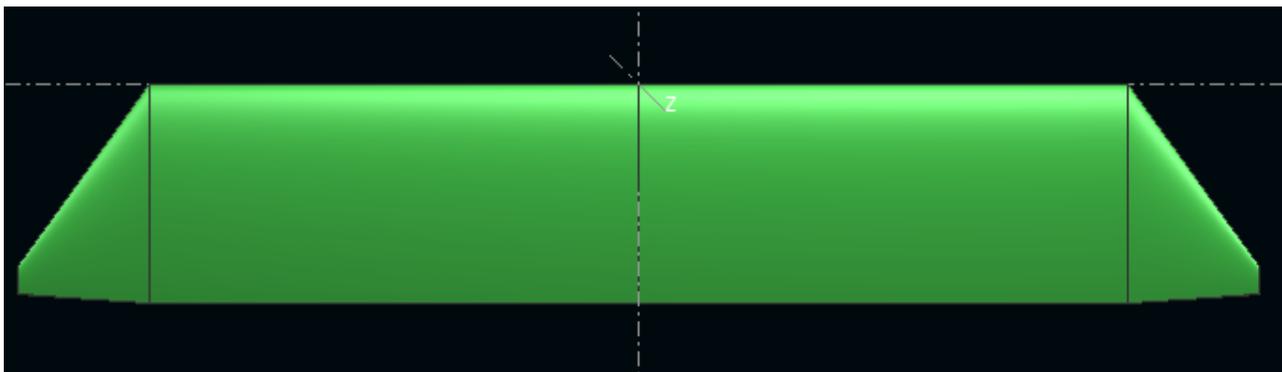
Perfil sustentador	E423
Número de Reynolds	500000,00
Máxima espessura do perfil em porcentagem de corda (medida que descreve o comprimento total do perfil)	12,50%
Posição da máxima espessura em porcentagem de corda	23,70%
Máximo arqueamento em porcentagem de corda	9,50%
Posição do máximo arqueamento em porcentagem de corda	41,40%
Coefficiente de sustentação máximo	2,06

3.2. Análises Tridimensionais

Um hidrofólio de geometria retangular foi projetado, sendo este o formato mais simples de ser manufaturado. Para melhor distribuição de peso, dois hidrofólios nesse formato foram desenvolvidos, sendo um para ser colocado na parte frontal da embarcação (próximo a proa) e um na parte traseira da embarcação (próximo da popa). Uma seção com alongamento mais alto foi incluída na ponta de cada hidrofólio, com o intuito de reduzir o arrasto induzido ocasionado pelos vórtices de ponta de asa, segundo Dalongaro (2015).

Cada um dos hidrofólios, como o mostrado na Fig. 8, ficou com uma envergadura final de 0,66 metros e uma área total de 0,072m². Devido a novos efeitos fluidodinâmicos que surgem na análise 3D, o coeficiente de sustentação é modificado, e na prática sempre é menor que o calculado para o perfil bidimensional.

Figura 8. Vista superior do hidrofólio no XFLR5



Analisando este hidrofólio através do VLM, obtemos o coeficiente de sustentação para cada ângulo de ataque. Como esse método utiliza uma análise invíscida, não obtemos o ângulo de estol nessa etapa, para isso devemos utilizar o mesmo ângulo obtido pelas análises no XFOIL.

Segundo Rodrigues (2011) podemos relacionar esse coeficiente CL com a força de sustentação L gerada pelo hidrofólio, usando a seguinte equação fundamental:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot CL \quad (3)$$

Onde:

ρ = Densidade da água

A = Área da superfície sustentadora

v = Velocidade da embarcação

Em 12 graus obtemos um $CL = 0,958$. Substituindo esse valor na equação e utilizando a densidade da água como 1000kg/m^3 obtemos a força de sustentação em função da velocidade da embarcação. Como citado inicialmente, a embarcação com o piloto tem 150kg, resultando em 1471,5N. Se dividirmos essa força entre os dois hidrofólios, temos que cada um precisa aplicar 735,8N para vencer a força peso. Pela Eq. 3 verificamos que cada hidrofólio alcança essa força em 4,62m/s. Todos os dados do projeto tridimensional foram organizados na Tab. 3.

Tabela 3. Dados do projeto tridimensional

CL com 12 graus de ângulo de ataque	0,958
Área do hidrofólio	0,072m ²
Envergadura do hidrofólio	0,660m
Corda máxima do hidrofólio	0,100m
Número de hidrofólios	2
Velocidade de planeio da embarcação com os hidrofólios	4,620m/s

3.3. Conclusões finais

Esse trabalho demonstrou uma problemática, uma possível solução através do uso de hidrofólios, o embasamento teórico por trás do trabalho realizado, os softwares utilizados juntamente com as suas vantagens e limitações e os valores de projeto para a aplicação de hidrofólios em uma embarcação solar tripulada obtidos através do processo descrito. Através dessas etapas e com o auxílio das bibliografias utilizadas e citadas ao longo do texto é possível desenvolver hidrofólios para embarcações de porte semelhantes à descrita.

Os hidrofólios projetados apresentaram uma envergadura relativamente pequena e permitiram que a embarcação de descolasse da água em uma velocidade comumente alcançável pelos barcos no Desafio Solar Brasil. Caso o funcionamento do projeto seja comprovado e posto em prática, a equipe irá obter uma vantagem competitiva significativa no Desafio Solar Brasil, difundindo entre outras equipes do Brasil a necessidade de buscar alternativas mais sofisticadas para melhorar o desempenho das embarcações.

Devido à falta de instalações, um teste experimental não foi realizado, deixando esse último ponto dos métodos de abordagem de estudo da mecânica dos fluidos em aberto. Sendo assim, fica como recomendação a realização de um trabalho de experimentação em escala real desses hidrofólios, para confirmar a funcionalidade dos mesmos. Outras recomendações para futuros trabalhos são: a realização de análises fluidodinâmicas mais sofisticadas, com o intuito de

comparar os resultados e avaliar a necessidade ou não de maiores gastos computacionais para essa aplicação, análises estruturais do modelo que será implantado na embarcação e análises de estabilidade e controle da embarcação com os hidrofólios.

4. REFERÊNCIAS

- Acosta, A.J., 1973. Hydrofoils and Hydrofoil Craft. California Institute of Technology. AirfoilTools, 6 Jul. 2019 < <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e423-il>, 2019>.
- Anderson, J. D., 1995. Computational Fluid Dynamics: The basics with applications. 1.ed. McGraw Hill, New York.
- Anderson, J.D., 2011. Fundamentals of aerodynamics. 5.ed. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering, Nova York.
- Bertram, V., 2012. Practical Ship Hydrodynamics. 2.ed. Butterworth-Heinemann, Woburn.
- Budziak, K., 2015. Aerodynamics Analysis with Athena Vortex Lattice (AVL). Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department of Automotive and Aeronautical Engineering.
- Carvalho, A.R.D., 2018. Implementação de uma Plataforma para Análises Aerodinâmicas Não Lineares de Aeronaves de Geometrias Complexas em Regime Subsônico. Uberlândia: UFU. 46f. Monografia (Bacharel em Engenharia Aeronáutica).
- Dainezi, J.H.R., Moraes, J.S., Correa, A.P.R., 2016. Aerodinâmica 3D: Comparação de resultados em CFD com outros métodos. In: XIII Semana de Engenharia Aeronáutica.
- Dalongaro, R., 2015. Análise Comparativa de Eficiência Aerodinâmica entre dispositivos de ponta de asa aplicados em VANTS de competição. Caxias do Sul: UCS. 65f. Monografia (Bacharel em Engenharia Aeronáutica).
- Drela, M., 1989. XFOIL: An Analysis and Design System for low Reynolds Number Airfoils. Low Reynolds Number Aerodynamics. Springer-Verlag Lec. Notes in Eng. 54.
- DSB. Desafio Solar Brasil, 2018. Histórico. 6 Jul. 2019 < <https://desafiosolar.wordpress.com/odesafio/historico/>>.
- Folle, G.G., 2016. Análise Paramétrica de resistência ao avanço de embarcação catamarã utilizando método numérico. Joinville: UFSC. 82f. Monografia (Bacharel em Engenharia Naval).
- Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Pritchard, P. J., 2011. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. LTC, Rio de Janeiro. 1018p.
- Gunkler, A., Archibald, C.M., 2011. Human Powered Hydrofoil Design & Analytic Wing Optimization. In: Proceedings of the 2011 ASEE NC & IL/IN Section Conference.
- Houghton, E.L., Carpenter, P.W., Collicott, S.H., Valentine, D.T., 2013. Aerodynamics for Engineering Students 6ed.
- Margason, R.J., Kjelgaard, S.O., Sellers, W.L. Morris, C.E.K., Walkley, K.B., Shields, E.W., 1985. Subsonic Panel Methods – A comparison of several production codes.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Boundary Layer. 6 Jul. 2019 < <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/boundlay.html>>.
- Purdue University, 2009. XFLR5: Analysis of foils and wings operating at low Reynolds number. 6 Jul. 2019 < https://engineering.purdue.edu/~aerodyn/AAE333/FALL10/HOMEWORKS/HW13/XFLR5_v6.01_Beta_Win32%282%29/Release/Guidelines.pdf>.
- Rodrigues, L.E.M.J., 2011. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica Aplicações ao Projeto SAE-Aerodesign. 1.ed. Edição do Autor, São Paulo. 544p.
- Vargas, L.A.T., 2006. Desenvolvimento e implementação de um procedimento numérico para cálculo de conjuntos asa-empenagens de geometria complexa em regime de voo subsônico, assimétrico e não linear. Belo Horizonte: UFMG. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- White, F.M., 2011. Fluid Mechanics. 7.ed. McGraw-Hill, Nova York. 862p.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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