

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

DIEGO BANDEIRA DE MELO AKEL THOMAZ¹, TÁSSIA CAROLINA FORASTEIRO PINTO² EDUARDO RAFAEL BARREDA DEL CAMPO³

¹Graduando em Engenharia Mecânica, UEA, Manaus-AM, diegoakell@gmail.com;

²Graduanda em Engenharia Mecânica, UEA, Manaus-AM, tassiaforasteiro@gmail.com;

³Dr. em Engenharia Mecânica, Prof. Titular UEA, Manaus-AM, eduardoserapio@yahoo.com.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

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 (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 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, conseqüentemente reduzindo o arrasto (Gunkler & Archibald, 2011). Com um arrasto reduzido é possível atingir maiores velocidades com o mesmo gasto de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrodinâmica, hidrofólio, desafio solar brasil, energia solar.

THEORETICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF SUPPORTING HYDROFOILS IN A SOLAR BOAT

ABSTRACT: When it comes to transport vehicles, competitions are the perfect environment to test new performance improvements, which can later be applied massively in passenger vehicles. Looking at international naval competitions and specifically at those that limit the type of energy allowed to charge batteries for solar, being efficiency of great importance, hydrofoils are present in many boats of that kind (Folle, 2016). Hydrofoils are underside attachments, with geometry and purpose similar to those of an airplane's wings. There are several classes of hydrofoils, this project aims to study the application of lifting hydrofoils, which generate a lifting force to raise the boat and remove part of the hull water contact area, consequently reducing the drag (Gunkler & Archibald, 2011). With reduced drag it is possible to achieve higher speeds with the same energy expenditure.

KEYWORDS: Hydrodynamics, hydrofoils, brazil solar challenge, solar energy.

INTRODUÇÃO

Hidrofólios de sustentação são aparatos vastamente utilizados em competições internacionais que visam alta eficiência energética sem abrir mão de altas velocidades, no entanto, o uso dessa técnica ainda é pouco explorado no Brasil. Atualmente, nenhuma das equipes do Desafio Solar Brasil, competição de embarcações solares desenvolvidas por alunos que acontece anualmente no estado do Rio de Janeiro (DSB, 2018), utiliza hidrofólios. Com o objetivo de inserir o Brasil no âmbito internacional, um projeto de hidrofólios foi desenvolvido para a equipe Leviatã da Universidade do Estado do Amazonas, com o objetivo de elevar o conjunto embarcação e piloto de massa conjunta 150kg.

As equipes optam por não usar hidrofólios pela dificuldade extra que o desenvolvimento destes adiciona no projeto. Sendo assim, esse trabalho também tem como objetivo tornar esse conhecimento mais acessível para os alunos que desenvolvem as embarcações.

MATERIAL E MÉTODOS

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 (Anderson, 1995).

Figura 1. Pontos de estudo da Mecânica dos Fluidos. Fonte: Autor



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, 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 (Imagem traduzida). Fonte: NASA (2015)

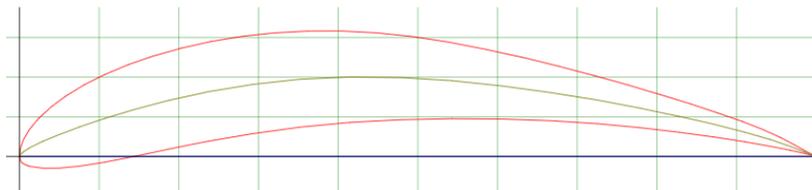


Contudo, segundo Bertram (2012), modelos com fluidos invíscidos (ou seja, de viscosidade igual a zero) têm sido usados em análises hidrodinâmicas devido a complexidade de tratar com a camada limite em fluxos de água. Sendo assim, o método para fluxos invíscidos VLM (*Vortex lattice method*) presente 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

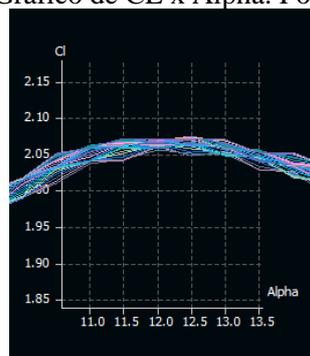
Várias análises em 2D foram realizadas, usando dados de diferentes tipos de aerofólios, obtidos através do site *Airfoil Tools*. Dentre eles, o perfil EPPLER 423 foi escolhido por apresentar um alto coeficiente de sustentação, alta eficiência aerodinâmica e facilidade construtiva. Além disso, esse perfil é muito utilizado em projetos aerodinâmicos e hidrodinâmicos, sendo assim, existe uma vasta bibliografia sobre dados obtidos com ele.

Figura 3. E423. Fonte: <http://airfoiltools.com>



Através dessa análise foi possível definir o ângulo de estol desse perfil, que é o ponto em que devido o 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. 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 está em regime de cruzeiro.

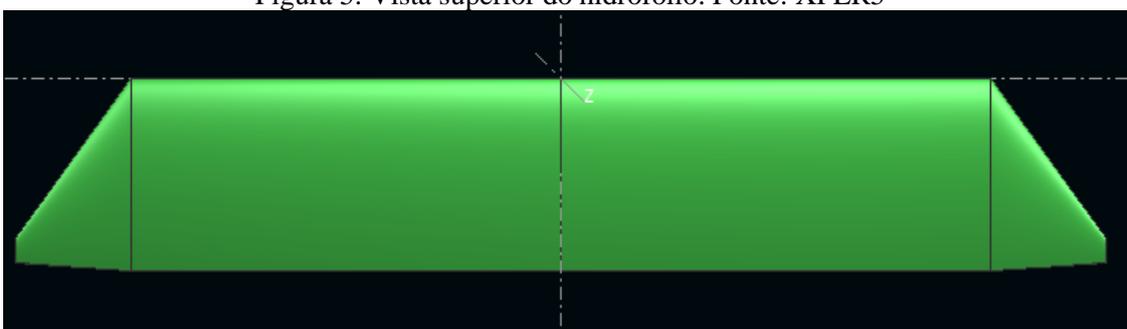
Figura 4. Gráfico de CL x Alpha. Fonte: XFLR5



Já na análise em 3D, o método VLM foi utilizado. O VLM consiste em modelar o formato a ser analisado em uma chapa infinitamente fina composta por singularidades fluidodinâmicas chamadas de vórtices e através dessas calcular a sustentação e o arrasto induzido atuante nos hidrofólios (Carvalho, 2018). Esse método é vastamente utilizado e aceito para aplicações que requerem menos precisão e dispõem de menos recursos computacionais, como projetos universitários, assim como mostrado em Vargas (2006), Dainezi et al. (2016) e Margason et al. (1985).

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 em cada hidrofólio, com o intuito de reduzir arrasto induzido, segundo Dalongaro (2015). Cada um dos hidrofólios ficou com uma envergadura final de 0,66 metros e uma área total de 0,072m².

Figura 5. Vista superior do hidrofólio. Fonte: XFLR5



Analisando este hidrofólio obtemos o coeficiente de sustentação para cada ângulo de ataque. Segundo Rodrigues (2011) podemos relacionar esse coeficiente com a força de sustentação gerada pelo hidrofólio usando a seguinte equação:

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

Onde:

- L = Força de sustentação
- ρ = Densidade da água
- A = Área da superfície sustentadora
- v = Velocidade da embarcação
- CL = Coeficiente de sustentação

Em 12 graus obtemos um $CL = 0,958$. Substituindo esse valor na equação e utilizando a densidade da água como 1000kg/m³ 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 dividindo essa força entre os dois hidrofólios temos que cada um precisa aplicar 735,8N. Pela equação (1) verificamos que cada hidrofólio alcança essa força em 4,62m/s.

Tabela 1. Dados do projeto.

CL com 12 graus de ângulo de ataque	0,958
Área do hidrofólio	0,072m ²
Envergadura do hidrofólio	0,66m
Número de hidrofólios	2
Velocidade de planeio da embarcação com os hidrofólios	4,62m/s

CONCLUSÃO

Os hidrofólios projetados apresentaram uma envergadura relativamente pequena e permitiram que a embarcação se 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.

Com o objetivo de difundir o conhecimento e auxiliar a equipe Leviatã a testar e possivelmente implementar os hidrofólios, todo o processo de referencial teórico e de projeto foi passado para o grupo universitário em forma de relatório técnico.

REFERÊNCIAS

- Anderson, J. D. Computational Fluid Dynamics: The basics with applications. 1.ed. McGraw Hill, New York, 1995. 547p.
- Anderson, J.D. Fundamentals of aerodynamics. 5.ed. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering, Nova York, 2011. 1131p.
- Betram, V. Practical Ship Hydrodynamics. 2.ed. Butterworth-Heinemann, Woburn, 2012. 390p.
- Carvalho, A.R.D. Implementação de uma Plataforma para Análises Aerodinâmicas Não Lineares de Aeronaves de Geometrias Complexas em Regime Subsônico. Uberlândia: UFU, 2018. 46f. Monografia (Bacharel em Engenharia Aeronáutica).
- Dainezi, J.H.R., Moraes, J.S., Correa, A.P.R. Aerodinâmica 3D: Comparação de resultados em CFD com outros métodos. In: XIII Semana de Engenharia Aeronáutica, 2016.
- Dalongaro, R. Análise Comparativa de Eficiência Aerodinâmica entre dispositivos de ponta de asa aplicados em VANTS de competição. Caxias do Sul: UCS, 2015. 65f. Monografia (Bacharel em Engenharia Aeronáutica).
- Drela, M. XFOIL: An Analysis and Design System for low Reynolds Number Airfoils. Low Reynolds Number Aerodynamics. Springer-Verlag Lec. Notes in Eng. 54, 1989.
- DSB. Desafio Solar Brasil, 2018. Disponível em: <https://desafiosolar.wordpress.com/odesafio/historico>
- Folle, G.G. Análise Paramétrica de resistência ao avanço de embarcação catamarã utilizando método numérico. Joinville: UFSC, 2016. 82f. Monografia (Bacharel em Engenharia Naval)
- Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Pritchard, P. J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. LTC, Rio de Janeiro, 2011. 1018p.
- Gunkler, A., Archibald, C.M. Human Powered Hydrofoil Design & Analytic Wing Optimization. In: Proceedings of the 2011 ASEE NC & IL/IN Section Conference.
- Margason, R.J., Kjelgaard, S.O., Sellers, W.L. Morris, C.E.K., Walkley, K.B., Shields, E.W. Subsonic Panel Methods – A comparison of several production codes, 1985.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2015. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/boundlay.html>
- Rodrigues, L.E.M.J., Fundamentos da Engenharia Aeronáutica Aplicações ao Projeto SAE-Aerodesign. 1.ed. Edição do Autor, São Paulo, 2011. 544p.
- Vargas, L.A.T. Desenvolvimento e implementação de um procedimento numérico para cálculo de conjuntos asa-empenagens de geometria complexa em regime de vôo subsônico, assimétrico e não linear. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- White, F.M., Fluid Mechanics. 7.ed. McGraw-Hill, Nova York, 2011. 862p.