

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

RAUL OLIMPIO MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA PROJETO DE
HIDROFÓLIOS PARA A EMBARCAÇÃO SAMBAQUI

Joinville

2024

RAUL OLIMPIO MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA PROJETO DE
HIDROFÓLIOS PARA A EMBARCAÇÃO SAMBAQUI

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto.

Joinville

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Martini, Raul Olimpio
DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA PROJETO DE
HIDROFÓLIOS PARA A EMBARCAÇÃO SAMBAQUI / Raul Olimpio
Martini ; orientador, Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, 2024.
81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Hidrofólios. 3. Monocasco. 4.
Barco solar. I. Pinto, Ricardo Aurélio Quinhões. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Naval. III. Título.

RAUL OLIMPIO MARTINI

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA PROJETO DE
HIDROFÓLIOS PARA A EMBARCAÇÃO SAMBAQUI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 06 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos que confiaram e me apoiaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me capacitado em todos os momentos que me forjaram a concluir esta jornada.

À minha família, em especial meus pais, Edinei e Caroline, e minha amada irmã Mariana, que sempre me incentivaram nos estudos, me apoiaram e me guiaram em todo o caminho.

Ao meu irmão José, que foi abençoado com a graça divina, e sempre será o anjo da guarda a qual me guia e protege.

Ao meu avô Doraci, que com suas histórias fascinantes em seus trabalhos com motores, fez com que minha paixão por engenharia aflorasse.

Meus amigos de sempre, Bruno e Gabriel, que estiveram comigo nos bons e maus períodos da vida.

Aos meus amigos da universidade, em especial Guilherme, Johnne, Julián, Júlio e Vitória presentes desde o início do curso, no qual juntos, encaramos desafios para este tão sonhado momento.

Aos amigos Arthur, Iuri, Jean e João que com momentos de felicidades e desafios, a equipe Babitonga, nos uniu nesta difícil caminhada.

Ao Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, que confiou em minha pessoa e orientou-me neste estudo, com muita paciência e dedicação.

Ao Profs. da UFSC, em especial Dr. Thiago Pontin Tancredi e Dr. André Luís Condino Fugarra, que com seus ensinamentos, tornaram-se figuras fundamentais em minha formação.

Por fim, a equipe Babitonga, a qual foi um incentivo para aprimorar meus conhecimentos durante a graduação e um prazer todo o tempo investido durante esses anos.

Vencer é o que importa. O resto é a consequência.
(Ayrton Senna, 1989).

RESUMO

O princípio fundamental de operação das embarcações com hidrofólios é a utilização da sua força de sustentação para reduzir o calado da embarcação em movimento, com o intuito de minimizar a resistência ao avanço. Este trabalho, apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta em Excel para o projeto e implementação de hidrofólios com formato de asa delta, para o monocasco Sambaqui da equipe Babitonga, com o intuito de tornar a embarcação mais veloz e estável. O desenvolvimento da ferramenta foi com base em literatura atualizada. Os coeficientes de sustentação e arrasto, além do perfil hidrodinâmico foram definidos utilizando o site Airfoiltools. A ferramenta foi validada através da conferência de resultados de um estudo de caso. Como resultado, foram determinados os parâmetros de projeto para o conjunto de hidrofólios destinados ao monocasco Sambaqui da equipe Babitonga. Apesar desta ferramenta poder ser utilizada em outras embarcações, ela se limita a calcular o desempenho de hidrofólios com formato de asa delta, totalmente submersos, sem variação de ângulo de ataque e flaps. Essa limitação se deve à parametrização adotada durante o desenvolvimento da ferramenta, que foca em simplificar as condições de análise para atender ao projeto específico.

Palavras-chave: barco solar; desempenho; hidrofólios; monocasco; Sambaqui.

ABSTRACT

The fundamental operational principle of hydrofoil-equipped vessels is the use of their lift force to reduce the vessel's draft while in motion, thereby minimizing drag. This study presents the development of an Excel-based tool for the design and implementation of delta-wing-shaped hydrofoils for the Sambaqui monohull of the Babitonga team, aiming to make the vessel faster and more stable. The tool's development was based on updated literature. Lift and drag coefficients, as well as the hydrodynamic profile, were defined using the Airfoiltools website. The tool was validated by cross-checking the results with a case study. As a result, the design parameters for the hydrofoil set intended for the Sambaqui monohull of the Babitonga team were determined. While this tool can be applied to other vessels, it is limited to calculating the performance of fully submerged delta-wing hydrofoils without angle-of-attack variation or flaps. This limitation arises from the parameterization adopted during the tool's development, focusing on simplifying the analysis conditions to meet the specific project requirements.

Keywords: solar boat; performance; hydrofoils; monohull; Sambaqui.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Força e vorticidade distribuída em uma asa	18
Figura 2 - Parâmetros de asa de hidrofólio	20
Figura 3 - Perfil de asa e seus esforços	22
Figura 4 - Parâmetros de um perfil de hidrofólio	24
Figura 5 - Hidrofólio secante e hidrofólio submerso, respectivamente	24
Figura 6 - Configuração básica de hidrofólios	25
Figura 7 - V-foil e T-foil	26
Figura 8 - Variações de hidrofólios	27
Figura 9 - Resistência com e sem os hidrofólios	28
Figura 10 - Seis graus de liberdade de uma embarcação	31
Figura 11 - Componentes de forças verticais	32
Figura 12 - Variação da sustentação do hidrofólio conforme a profundidade	33
Figura 13 - Utilização de torpedo nos hidrofólios	36
Figura 14 - Monocasco Sambaqui	39
Figura 15 - Metodologia empregada	41
Figura 16 - Parâmetros de entrada da ferramenta	42
Figura 17 - Dados dos hidrofólios e suporte	45
Figura 18 - Sustentação nos hidrofólios variando ângulo de ataque	51
Figura 19 - Sustentação total	56
Figura 20 - Sustentação total na zona de decolagem	56
Figura 21 - Arrasto total	57
Figura 22 - Arrasto total na zona de decolagem	57
Figura 23 - Arrasto do monocasco	58
Figura 24 - Potência efetiva necessária	58
Figura 25 - Hidrofólios e suportes do monocasco	60
Figura 26 - Hidrofólios e suportes integrados ao monocasco	60
Figura 27 - Cálculo da ferramenta para razão C_L/C_D	66
Figura 28 - Cálculo da ferramenta para sustentação	68
Figura 29 - Cálculo da ferramenta para arrasto em regime submerso	70
Figura 30 - Cálculo da ferramenta para arrasto em regime de planeio	73

Figura 31 - Cálculo da ferramenta para união dos regimes de arrasto	75
Figura 32 - Cálculo da ferramenta para equilíbrio e momentos	76
Figura 33 - Cálculo da ferramenta para configuração longitudinal e lateral	77
Figura 34 - Sintetização dos resultados na ferramenta	78
Figura 35 - Ensaio de resistência ao avanço e potência efetiva	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do monocasco	39
Tabela 2 - Comparação de resultados do estudo de caso	46
Tabela 3 - Parâmetros iniciais dos hidrofólios	47
Tabela 4 - Coeficientes de sustentação e arrasto	49
Tabela 5 - Razão C_L/C_D dos hidrofólios	49
Tabela 6 - Parâmetros do suporte dos hidrofólios	52
Tabela 7 - Equilíbrio vertical	53
Tabela 8 - Momento de rolagem	53
Tabela 9 - Momento de arfagem	54
Tabela 10 - Parâmetros finais para hidrofólio e suporte de meia-nau	55
Tabela 11 - Parâmetros finais para hidrofólio e suporte de Popa	55
Tabela 12 - Equilíbrio, momentos e configurações	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A_1 – Área projetada na direção da sustentação
 A_2 – Área projetada na direção do fluxo
AR – Relação de aspecto
 c – Corda
 \bar{c} – Corda média
 c_1 – Corda de maior comprimento
 c_2 – Corda de menor comprimento
 C_D – Coeficiente de arrasto
 C_{Di} – Coeficiente de arrasto induzido
 C_{Dj} – Coeficiente de arrasto de junção
 C_{Dw} – Coeficiente de arrasto de onda
 C_{Dws} – Coeficiente de arrasto de onda e spray
 C_L – Coeficiente de sustentação
 C_L^{2D} – Coeficiente de sustentação 2D
CTJ – Centro Tecnológico de Joinville
 D – Força de arrasto total
 D_i – Força de arrasto induzido
 D_j – Força de arrasto de junção
 D_p – Força de arrasto de perfil
 D_w – Força de arrasto de onda
 D_{ws} – Força de arrasto de onda e spray
 h – Profundidade do hidrofólio
 K_i – Fator de eficiência de AR
 L – Força de sustentação
 P – Pressão
 t – Espessura
 t_m – Espessura média
TR – Relação de Conicidade
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
 V – Velocidade

α – Ângulo de ataque

ρ – Densidade do fluido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. TEORIA CLÁSSICA DA ASA	18
2.1.1. Parâmetros da asa	19
2.2. HIDROFÓLIOS	21
2.2.1. Funcionamento dos hidrofólios	21
2.2.2. Razão CLCD	23
2.2.3. Geometria de hidrofólios	23
2.2.4. Configuração de hidrofólios	24
2.2.4.1. Diferenças de configuração dos hidrofólios	25
2.2.5. Força de sustentação e arrasto	27
<u>2.2.5.1. Força de sustentação</u>	<u>28</u>
<u>2.2.5.2. Força de arrasto</u>	<u>29</u>
2.2.6. Equilíbrio de Esforços	31
<u>2.2.6.1. Equilíbrio de forças verticais</u>	<u>32</u>
<u>2.2.6.2. Equilíbrio de momento de arfagem</u>	<u>34</u>
<u>2.2.6.3. Equilíbrio de momento de rolagem</u>	<u>34</u>
2.2.7. Área e forma dos hidrofólios	35
<u>2.2.7.1. Hidrofólio de meia-nau</u>	<u>35</u>
<u>2.2.7.2. Hidrofólio de leme</u>	<u>36</u>
<u>2.2.7.3. Suporte dos hidrofólios</u>	<u>36</u>
2.2.8. Perfil dos hidrofólios	37
3. METODOLOGIA	39
3.1. MONOCASCO SAMBAQUI	39
3.2. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA EM EXCEL	40
3.2.1. Requisitos de projeto	40
3.2.2. Criação do Modelo	41
<u>3.2.2.1. Coeficiente de sustentação e arrasto</u>	<u>42</u>

3.2.2.2. Cálculo de sustentação nos hidrofólios	43
3.2.2.3. Cálculo de arrasto nos hidrofólios	43
3.2.2.4. Cálculo de equilíbrio, momentos e configurações nos hidrofólios	44
3.2.3. Validação dos Cálculos	44
3.2.4. Modelagem no software Rhinoceros	44
4. ESTUDO DE CASO DO MONOCASCO DA EQUIPE BABITONGA	45
4.1. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA	45
4.2. CARACTERIZAÇÃO DE RESULTADOS	47
4.2.1. Razão CLCD	48
4.2.2. Cálculo de sustentação e arrasto	50
4.2.3. Cálculo de equilíbrio, momentos e configuração.....	52
4.2.4. Sintetização de resultados	55
4.3. MODELAGEM DOS HIDROFÓLIOS.....	59
5. CONCLUSÃO	61
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E LIMITES DA FERRAMENTA	61
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A – RAZÃO CLCD.....	66
APÊNDICE B – CÁLCULO DE SUSTENTAÇÃO.....	68
APÊNDICE C – CÁLCULOS DE ARRASTO.....	70
APÊNDICE D – CÁLCULO DE EQUILÍBRIO, MOMENTOS E CONFIGURAÇÕES	76
APÊNDICE E – SINTETIZAÇÃO DOS RESULTADOS NA FERRAMENTA	78
ANEXO A – ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO E POTÊNCIA EFETIVA DO MONOCASCO	80

1. INTRODUÇÃO

A equipe de desenvolvimento de barcos solares Babitonga foi fundada em 2010, por estudantes de engenharia naval do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A missão da equipe é se dedicar ao desenvolvimento de uma embarcação movida a energia solar, visando a participação em competições universitárias em todo o Brasil e, eventualmente, em âmbito internacional (Babitonga, 2023).

Desde a criação, a equipe de desenvolvimento de barcos solares Babitonga sempre manteve como objetivo construir o melhor, mais eficiente e mais veloz barco para as competições e, para atingir essa meta, pensou – se no desenvolvimento de hidrofólios para a embarcação.

Esse tipo de embarcação apresenta uma característica de sustentação dinâmica, que é relativamente incomum em comparação com as embarcações convencionais. O princípio fundamental subjacente é a elevação do casco, retirando-o completamente da água (Faltinsen, 2005).

Entretanto, é importante observar que esse tipo de embarcação também apresenta desafios, como a capacidade de carga limitada e complexidades na configuração da propulsão devido à considerável distância vertical entre o casco e a superfície da água (Meyer; Wilkins, 1992).

Os hidrofólios tem como principal benefício a redução das forças de arrasto que atuam sobre a embarcação, resultando em um consumo de energia menor para alcançar a mesma velocidade. Além disso, essa configuração contribui para a diminuição da resistência ao avanço do casco, mitigando potenciais problemas relacionados ao comportamento da embarcação em ondas devido à alteração de pressão distribuída (Duncan; Matveev, 2005).

O sistema de hidrofólios também desempenha papel fundamental na asseguarção da estabilidade, tanto transversal quanto longitudinal do monocasco, especialmente durante o regime de planeio. Isso resulta não apenas em velocidades elevadas, mas também em curvas suaves, resultando em eficiência energética devido à significativa redução da resistência ao avanço da embarcação (Faltinsen, 2005).

Esse aprimoramento na eficiência poderá contribuir para a economia do consumo de energia, tornando o barco solar mais competitivo em termos de

desempenho e durabilidade energética. Portanto, o desenvolvimento do hidrofólio desempenha papel estratégico no alcance dos objetivos da equipe, permitindo tanto velocidades superiores quanto um desempenho notável em termos de estabilidade e eficiência energética durante as competições de barcos solares (Lamb, 2003; Meyer; Wilkins, 1992).

1.1. OBJETIVOS

Para auxiliar a Equipe Babitonga no desenvolvimento de hidrofólios e alcançar maiores velocidades de navegação com menor consumo de energia, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Projetar um sistema com hidrofólios para melhorar o desempenho do monocasco Sambaqui da Equipe de desenvolvimento de barcos solares Babitonga.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar a teoria que envolve o projeto de hidrofólios;
- Desenvolver uma ferramenta em Excel para o cálculo das características hidrodinâmicas e de projeto dos hidrofólios;
- Executar um estudo de caso com a ferramenta elaborada, comparando os resultados obtidos com os disponíveis na literatura.
- Definir os requisitos de projeto dos hidrofólios a serem desenvolvidos;
- Realizar a modelagem dos hidrofólios, utilizando o software Rhinoceros, seguindo os valores determinados;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

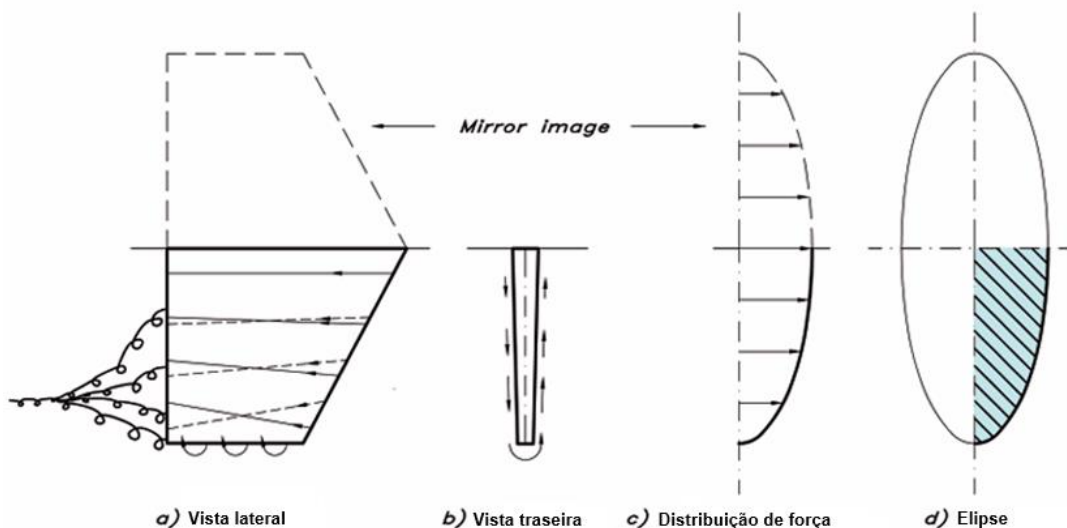
Considerando a busca por altas velocidades com eficiência energética para embarcações do tipo monocasco semi-planantes, apresenta-se neste capítulo a fundamentação teórica necessária à consecução do desafio de desenvolver hidrofólios para o monocasco Sambaqui da equipe Babitonga. Esse esforço visa alcançar vantagem nas competições solares em que a equipe participa.

Neste capítulo serão descritos os principais fundamentos teóricos que serviram como base para o projeto. Serão abordados cálculos relacionados à força de sustentação de hidrofólios, bem como as relações entre peso, área e a corda necessária, considerando as geometrias específicas.

2.1. TEORIA CLÁSSICA DA ASA

A teoria clássica da asa revela que a distribuição de vorticidade, e consequentemente a distribuição de força ao longo da asa, é idealmente elíptica. Quando a distribuição de força se desvia dessa forma elíptica, ocorre um aumento no arrasto e uma diminuição na sustentação, devido a formação de vórtices em suas extremidades que contrapõem e reduzem o efeito de sustentação, como representado na Figura 1 a seguir (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Figura 1 – Força e vorticidade distribuída em uma asa



Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 104).

A relação de aspecto (AR) é um parâmetro crucial que influencia a sustentação e o arrasto das asas. Embora a distribuição de força elíptica seja considerada a melhor opção, as asas com planta elíptica apresentam desvantagens práticas, levando à prevalência de formas trapezoidais na construção de asas. No entanto, é possível aproximar uma distribuição de força elíptica em asas trapezoidais, desde que a relação de conicidade (TR) seja adequada (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Em termos práticos, recomenda-se que a relação de conicidade seja mantida acima de 0,2, embora muitos projetistas optem por proporções mais elevadas, geralmente entre 0,4 e 0,6, para garantir maior estabilidade (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Esses fatores são essenciais para o projeto de asas eficientes, equilibrando sustentação, arrasto e estabilidade em diferentes condições.

2.1.1. Parâmetros da asa

De acordo com Eliasson; Larsson e Orych (2022), diversos parâmetros das asas, ou hidrofólios, são fundamentais para a análise e projeto.

Entre esses parâmetros, destaca-se a corda (c), que se refere à distância horizontal entre os bordos de ataque e de fuga da asa, podendo ser representada pela corda de maior comprimento (c_1) e a de menor comprimento (c_2).

A corda média (\bar{c}), é calculada como a média entre (c_1) e (c_2), oferecendo uma medida representativa das dimensões da asa.

Outro parâmetro crucial é a relação de aspecto (AR), representada pela razão da envergadura da asa pela corda média, fornecendo uma relação geométrica inicial de projeto. Este parâmetro é vital, especialmente em embarcações de competição, onde o perfil do hidrofólio deve estar em uma faixa de $5 \leq AR \leq 8$. Valores mais altos de AR indicam uma maior sustentação do hidrofólio em velocidades mais baixas.

Para embarcações que buscam maior estabilidade, a relação de aspecto do suporte das asas dos hidrofólios deve estar entre $2 \leq AR \leq 6$, o que também ajuda na determinação da profundidade do hidrofólio (h).

Além disso, a relação de conicidade (TR), que é a razão entre c_2 e c_1 , deve ser superior a 0,2. Este parâmetro é importante para garantir a eficiência

hidrodinâmica do hidrofólio, contribuindo para a redução do arrasto e aumento da sustentação.

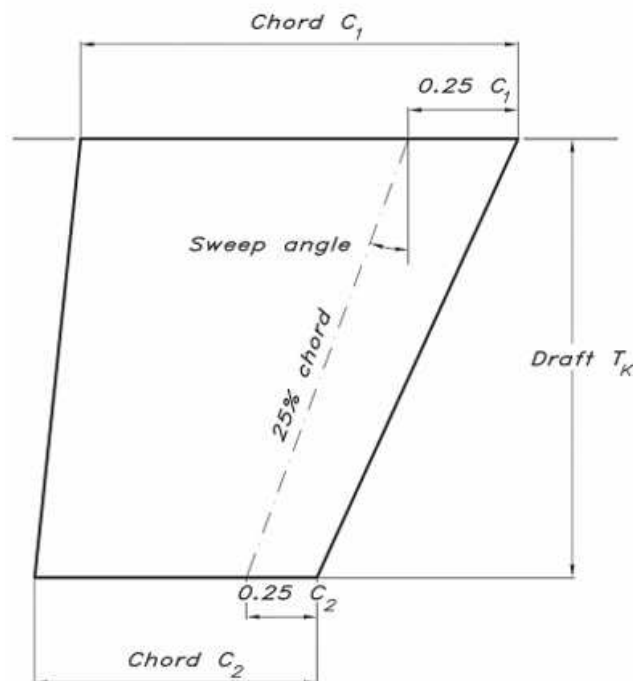
A relação de conicidade permite aproximar a distribuição de sustentação ao longo da asa, considerado ideal para minimizar o arrasto, que é gerado pela criação de sustentação. Esse arranjo torna a asa mais eficiente, reduzindo as perdas associadas ao escoamento em torno do hidrofólio (Fossati, 2009).

Além disso, a redução da carga de sustentação nas extremidades, promovida pela conicidade, minimiza a formação de vórtices de ponta, que são responsáveis por uma parcela significativa do arrasto e da redução do efeito de sustentação ao longo do perfil. Com isso, o desempenho hidrodinâmico é otimizado, uma vez que o fluxo de água ao redor da asa é mais controlado, mantendo-se mais uniforme e estável ao longo de sua superfície (Fossati, 2009).

Outra vantagem significativa é a redução da probabilidade de separação de fluxo, especialmente em altas velocidades ou ângulos de ataque moderados. A conicidade contribui para manter o escoamento laminar por uma extensão maior da asa, melhorando a eficiência e reduzindo as perdas de sustentação (Fossati, 2009).

Estes parâmetros podem ser observados na Figura 2 a seguir:

Figura 2 – Parâmetros de asa de hidrofólio



Esses parâmetros não apenas definem as características de desempenho das embarcações, mas também influenciam diretamente na manobrabilidade, elementos essenciais em projetos de hidrofólios. A escolha adequada desses valores é fundamental para otimizar o desempenho das embarcações em diferentes condições de operação, alinhando-se aos objetivos de eficiência e eficácia desejados (Fossati, 2009).

2.2. HIDROFÓLIOS

O princípio fundamental de operação de embarcações equipadas com hidrofólios é elevar a embarcação acima da superfície da água, sustentando-a de forma dinâmica por meio da diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior do hidrofólio (Lamb, 2003).

2.2.1. Funcionamento dos hidrofólios

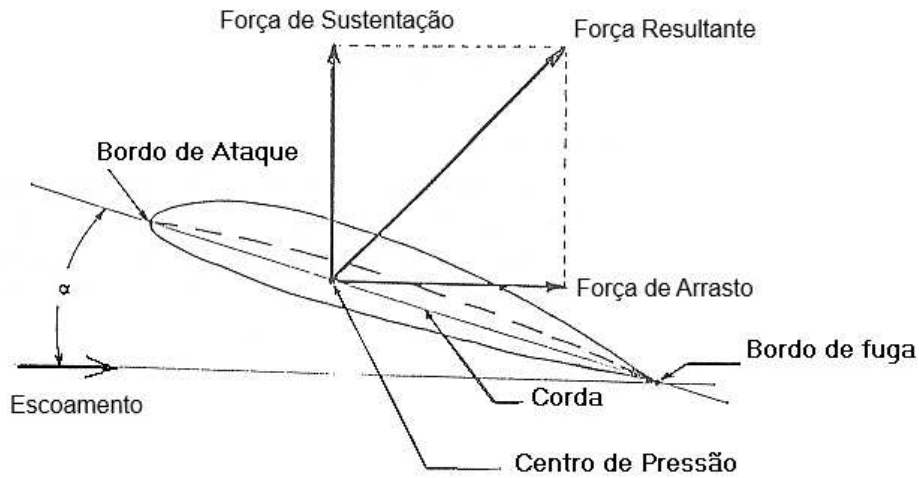
Para manter um fluxo constante, é necessário que todo o fluido que chegue ao bordo de ataque alcance o bordo de fuga simultaneamente. Devido à geometria do perfil, isso só é possível se o fluido que passa pelo bordo superior desenvolver uma velocidade maior em comparação com o fluido que passa pelo bordo inferior, de acordo com a Equação 1, de Bernoulli (White, 2011).

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \text{constante} \quad (1)$$

Um aumento na velocidade requer uma diminuição na pressão, a fim de manter constante a soma das duas parcelas. Essa redução de pressão no bordo superior cria uma diferença de pressão entre os bordos, o que resulta na geração de sustentação em um perfil de asa (White, 2011).

Além da força de sustentação, há uma segunda componente de força que atua sobre o perfil, conhecida como força de arrasto. Essa força representa a interação viscosa tangencial entre o fluido e a superfície do perfil. Para fins de modelagem, assume-se que a resultante dessas duas componentes de forças atua no centro de pressão do perfil, como demonstrado na Figura 3 (Weltner, 2001).

Figura 3 – Perfil de asa e seus esforços



Fonte: Adaptado de Weltner (2001, p. 9).

Segundo Meyers e Wilkins (1992), a relação entre a força de sustentação e a pressão dinâmica é expressa pelo coeficiente de sustentação (C_L), o qual depende tanto da forma do perfil quanto do ângulo de ataque, conforme definido na Equação 2.

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_1} \quad (2)$$

Em que A_1 , é a área projetada na direção da sustentação.

Outro coeficiente essencial a ser estabelecido é o coeficiente de arrasto, (C_D), fundamental para determinar a quantidade de arrasto gerada pelo hidrofólio conforme descrito na Equação 3 (Meyer; Wilkins, 1992).

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_2} \quad (3)$$

Em que A_2 , é a área projetada na direção do fluxo.

Com base nesses fundamentos, podemos avançar na elaboração do projeto e na estruturação dos hidrofólios.

2.2.2. Razão C_L/C_D

A razão C_L/C_D , relaciona o coeficiente de sustentação ao coeficiente de arrasto, que são parâmetros fundamentais na análise de desempenho dos hidrofólios. Esta relação é crucial para entender a eficiência de um hidrofólio em gerar sustentação em comparação com a resistência que ele enfrenta ao se mover pela água. Esta razão, é um indicador da eficiência hidrodinâmica do hidrofólio. Quanto maior essa razão, maior é a sustentação para cada unidade de arrasto (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

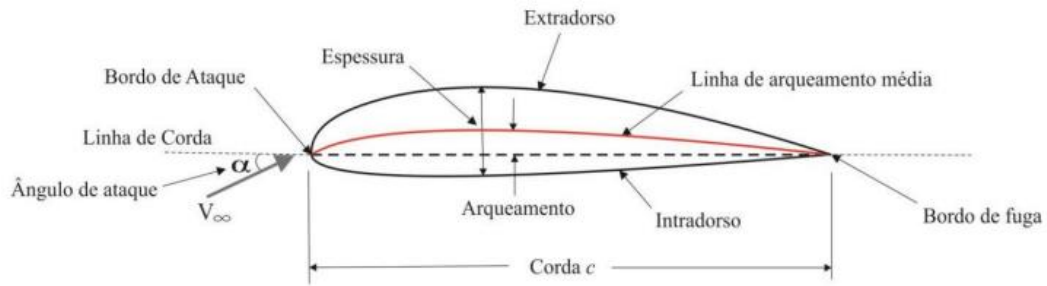
A relação varia com o ângulo de ataque do hidrofólio (α). Em ângulos de ataque baixos, o hidrofólio pode operar em um regime onde a sustentação é alta e o arrasto é relativamente baixo, resultando em uma razão favorável. No entanto, à medida que o α aumenta, pode ocorrer uma elevação abrupta do arrasto, levando a uma diminuição da razão (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

O site Airfoiltools (<http://airfoiltools.com/>, acessado em 04 de set. de 2024) foi utilizado exclusivamente para coleta dos valores dos coeficientes de sustentação e arrasto, bem como para definir o perfil do hidrofólio. A ferramenta desenvolvida neste trabalho utiliza esses valores iniciais como base e realiza ajustes em função das condições operacionais, como a velocidade e o tipo de fluido, variando o número de Reynolds. Após a coleta e processamento dos valores ajustados, a ferramenta emite como resultados os coeficientes de sustentação e arrasto corrigidos, além da razão C_L/C_D , proporcionando dados para análise e dimensionamento dos hidrofólios de meia-nau, popa e o suporte.

2.2.3. Geometria de hidrofólios

A geometria do hidrofólio é determinada por quatro parâmetros fundamentais, conforme ilustrado na Figura 4, que incluem: a corda, a linha de arqueamento média, a posição da altura da linha média e a distribuição da espessura ao longo da corda (Meyer, Wilkins, 1992).

Figura 4 – Parâmetros de um perfil de hidrofólio

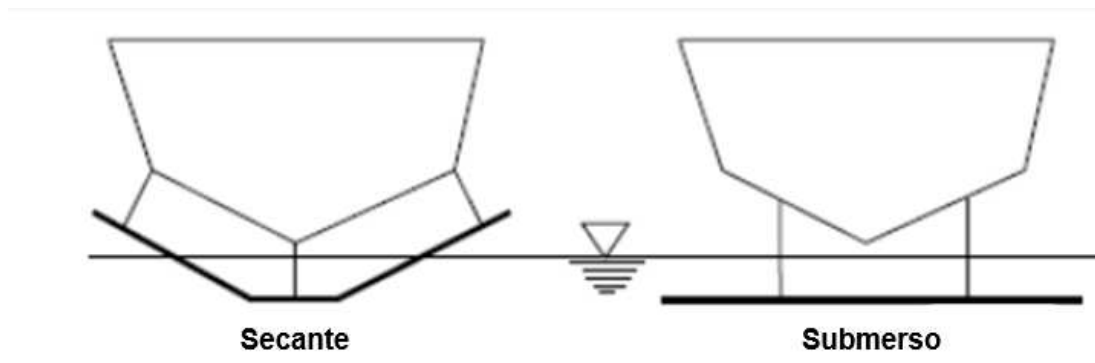


Fonte: Donini (2014, p. 21).

2.2.4. Configuração de hidrofólios

Os hidrofólios podem ser categorizados em dois principais tipos: os secantes e os totalmente submersos, conforme representado na Figura 5.

Figura 5 – Hidrofólio secante e hidrofólio submerso, respectivamente

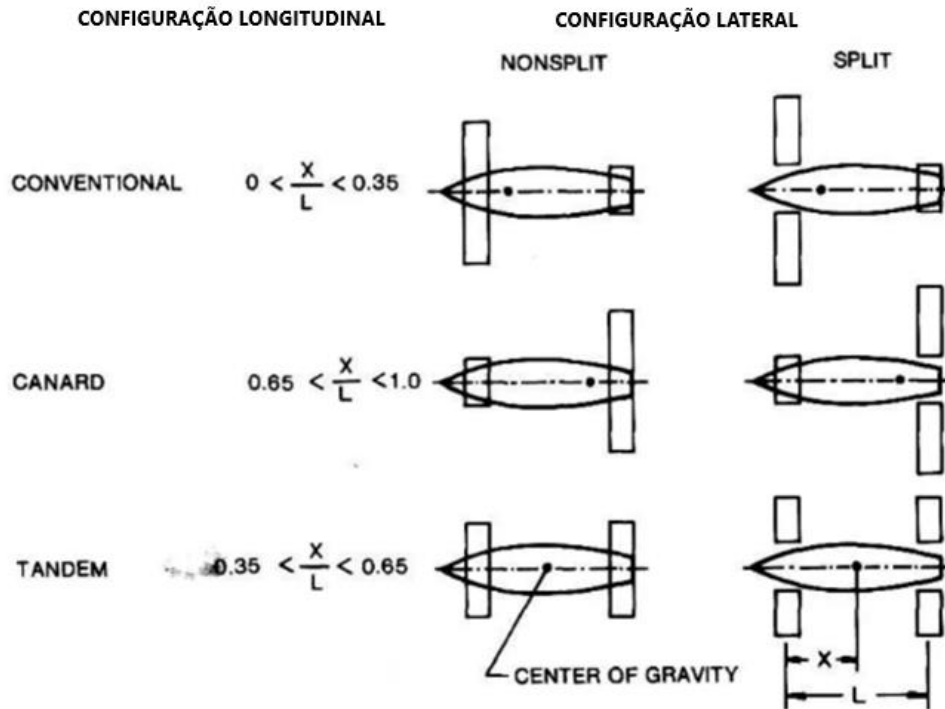


Fonte: Adaptado de Hollup (2020, p.18).

Os hidrofólios secantes são projetados para funcionar parcialmente acima da superfície da água, enquanto os totalmente submersos podem conter mecanismos adicionais, como flaps, para gerar a sustentação necessária à embarcação (Faltinsen, 2005).

De acordo Meyers e Wilkins (1992), existem três configurações principais de hidrofólios: Canard, Convencional e Tandem, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Configuração básica de hidrofólios



Fonte: Adaptado de Meyers e Wilkins (1992, p. 16).

A configuração longitudinal é definida pela relação entre o centro de gravidade da embarcação e a distância longitudinal entre os hidrofólios, em que cada uma dessas configurações apresenta uma faixa de valores, determinada por Meyer e Wilkins (1992), que caracterizará a melhor para o projeto. Enquanto a configuração lateral define se a sustentação pelos hidrofólios será garantida em velocidades mais baixas, tipo nonsplit, ou em velocidades elevadas, tipo split (Meyer; Wilkins, 1992).

A configuração longitudinal do tipo Conventional, apresentará maior sustentação da embarcação no hidrofólio de meia-nau, a do tipo Canard no hidrofólio de leme e por último a do tipo Tandem, dividida em parcelas iguais de sustentação entre o hidrofólio de meia-nau e de leme (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

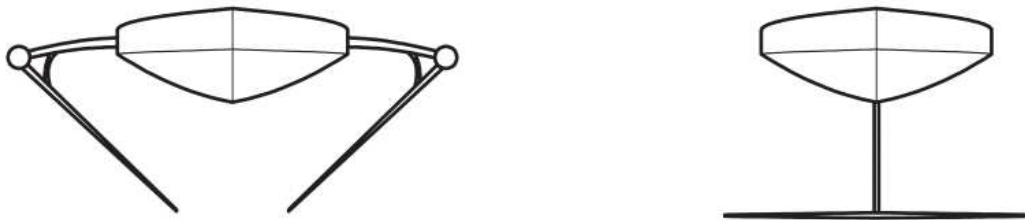
Essa abordagem torna mais acessível a compreensão e análise da geometria e do tipo de hidrofólios que podem ser utilizados no monocasco.

2.2.4.1. Diferenças de configuração dos hidrofólios

Existem duas configurações básicas de hidrofólios, o V-foil e o T-foil onde ambos permitem diversas variações de projetos para melhor atender a especificidade de cada embarcação. Como característica principal o V-foil permite que a sustentação

necessária se desenvolva conforme o aumento da velocidade, quanto maior a velocidade menor a área submersa de hidrofólio, enquanto o T-foil independe da velocidade e altura da navegação, sempre estará com a mesma área submersa, vide Figura 7 (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Figura 7 – V-foil e T-foil



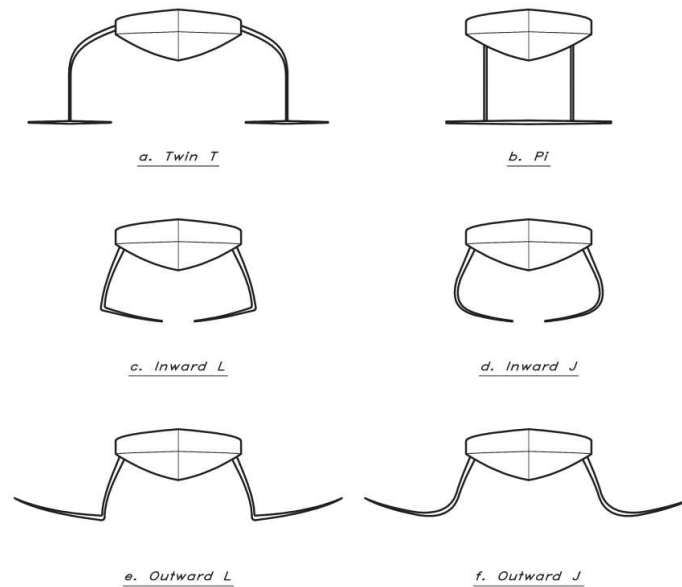
Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 146).

Em ambos os modelos, são necessários dois hidrofólios separados entre o de meia-nau e o de leme, para obter-se uma boa estabilidade longitudinal, distribuindo linearmente as cargas a serem suportadas (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

A principal diferença entre os modelos de hidrofólios em V e T está na forma como eles interagem com a água e na estabilidade. A configuração V-foil, tende a oferecer melhor desempenho em altas velocidades e pode ser mais eficiente em condições de água agitada. A sua estrutura ajuda a cortar as ondas, proporcionando uma navegação mais suave. A configuração T-foil, geralmente é mais estável em baixas velocidades e facilita o controle da embarcação, especialmente para iniciantes. Esta configuração também tende a oferecer uma melhor flutuabilidade em condições de águas mais calmas (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Na Figura 8 a seguir, é ilustrado as variações adotadas dos V-foils e T-foils para os hidrofólios de meia-nau e de leme.

Figura 8 – Variações de hidrofólios



Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 147).

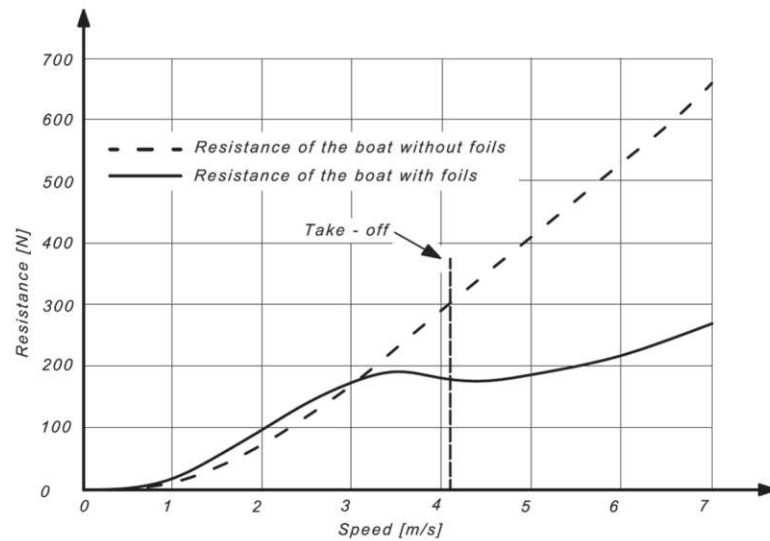
Para cada configuração adotada teremos pontos positivos e negativos. Por exemplo, o aumento da envergadura do hidrofólio, garante a sustentação da embarcação em velocidades mais baixas, junto do aumento da estabilidade em momentos de rolagem, em contrapartida, neste caso o arrasto total dos hidrofólios será maior comparado a uma configuração onde a envergadura total dos hidrofólios é menor do que a própria boca da embarcação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Em resumo, se o objetivo for velocidade e desempenho em águas turbulentas, a configuração V-foil, pode ser a melhor escolha. Se a estabilidade e facilidade de uso são as prioridades, a configuração T-foil pode ser a mais apropriada. Isto varia de acordo com as características da embarcação e qual projeto de hidrofólio será adotado (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.5. Força de sustentação e arrasto

Enquanto a embarcação navega no modo de deslocamento, existe o acréscimo da resistência dos hidrofólios. Abaixo da velocidade de decolagem a superfície molhada é aumentada, conseqüentemente, o arrasto é aumentado. Logo, a resistência ao avanço em baixas velocidades é maior com os hidrofólios, do que sem eles conforme apresentado na Figura 9 (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Figura 9 – Resistência com e sem os hidrofólios



Fonte: Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 145).

A sustentação dos hidrofólios se intensifica à medida que a velocidade da embarcação aumenta, o que contribui para a redução gradual da resistência antes da decolagem. Uma vez que a embarcação decola, a resistência predominante passa a ser gerada pelos hidrofólios, de forma que o casco da embarcação está completamente fora da água (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.5.1. Força de sustentação

Para o cálculo da força de sustentação nos hidrofólios, segundo Eliasson; Larsson e Orych (2022), a Equação 2 apresentada anteriormente, pode ser rearranjada dando origem a Equação 4.

$$L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_1 \quad (4)$$

Em que C_L , necessita ser corrigido pelo coeficiente de sustentação 2D (C_L^{2D}), segundo a Equação 5.

$$C_L = \frac{C_L^{2D}}{(1 + 2/AR)} \quad (5)$$

2.2.5.2. Força de arrasto

O arrasto, que é a resistência encontrada pelo corpo ao se mover na água, desempenha um papel crucial na eficiência e na velocidade dos hidrofólios. De acordo com Eliasson; Larsson e Orych (2022), para o cálculo da força total de arrasto (D), podemos caracterizar as seguintes parcelas:

- Arrasto de perfil (D_p), válido para o hidrofólio e o suporte, conforme a Equação 6.

$$D_p = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_2 \quad (6)$$

- Arrasto induzido (D_i), válido para o hidrofólio e o suporte, conforme a Equação 7.

$$D_i = 0,5 \cdot C_{Di} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_2 \quad (7)$$

Em que o coeficiente de arrasto induzido (C_{Di}), é representado pela Equação 7.1.

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{(\pi \cdot K_i \cdot AR)} \quad (7.1)$$

Em que o fator de eficiência de AR (K_i), é igual a 2 para o suporte e igual a 1 para o hidrofólio (Findlay; Turnock, 2008).

- Arrasto de onda e spray (D_{ws}), válido para o suporte, conforme a Equação 8.

$$D_{ws} = 0,5 \cdot C_{Dws} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot t^2 \quad (8)$$

Em que t é a espessura e (C_{Dws}) , o coeficiente de arrasto de onda e spray representado pela Equação 8.1.

$$C_{Dws} = C_{Dws,wave} + C_{Dws,spray} \quad (8.1)$$

Em que $C_{Dws,wave} = 0,30$ e $C_{Dws,spray} = 0,24$, válido para correção da parcela de arrasto de onda e spray gerada pelo suporte do hidrofólio (Hoerner, 1965).

- Arrasto de onda (D_w), válido para o hidrofólio, conforme a Equação 9.

$$D_w = 0,5 \cdot C_{Dw} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_2 \quad (9)$$

Em que o coeficiente de arrasto de onda (C_{Dw}), é representado pela Equação 9.1.

$$C_{Dw} = 0,025 \cdot C_L^2 \cdot c/h \quad (9.1)$$

Válido para correção da parcela de arrasto de onda gerado pelo hidrofólio (Beaver; Zselezky, 2009).

- Arrasto de junção (D_j), válido para o hidrofólio e suporte, conforme a Equação 10.

$$D_j = 0,5 \cdot C_{Dj} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot t_m^2 \quad (10)$$

Em que (t_m) é a espessura média da asa do hidrofólio e do suporte e o coeficiente de arrasto de junção (C_{Dj}), é representado pela Equação 10.1.

$$C_{Dj} = 17 \cdot (t_m/c)^2 - 0,05 \quad (10.1)$$

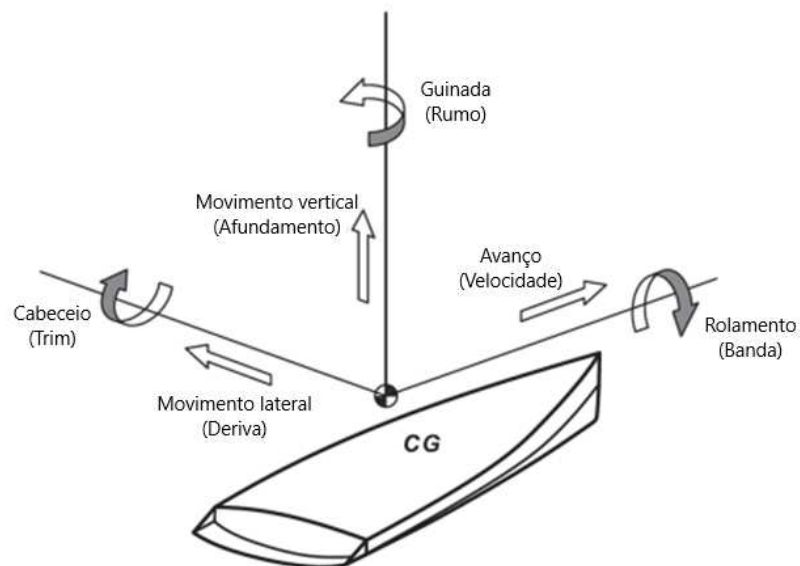
Por fim, com o somatório das equações apresentadas, é obtido o arrasto total (D) conforme a Equação 11.

$$D = D_p + D_i + D_{ws} + D_w + D_j \quad (11)$$

2.2.6. Equilíbrio de Esforços

Um corpo está em equilíbrio quando a soma de forças e momentos é igual a zero. No âmbito naval uma embarcação sofre movimentos nos seis graus de liberdade, todas elas podem ser vistas na Figura 10 a seguir (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Figura 10 – Seis graus de liberdade de uma embarcação



Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 149).

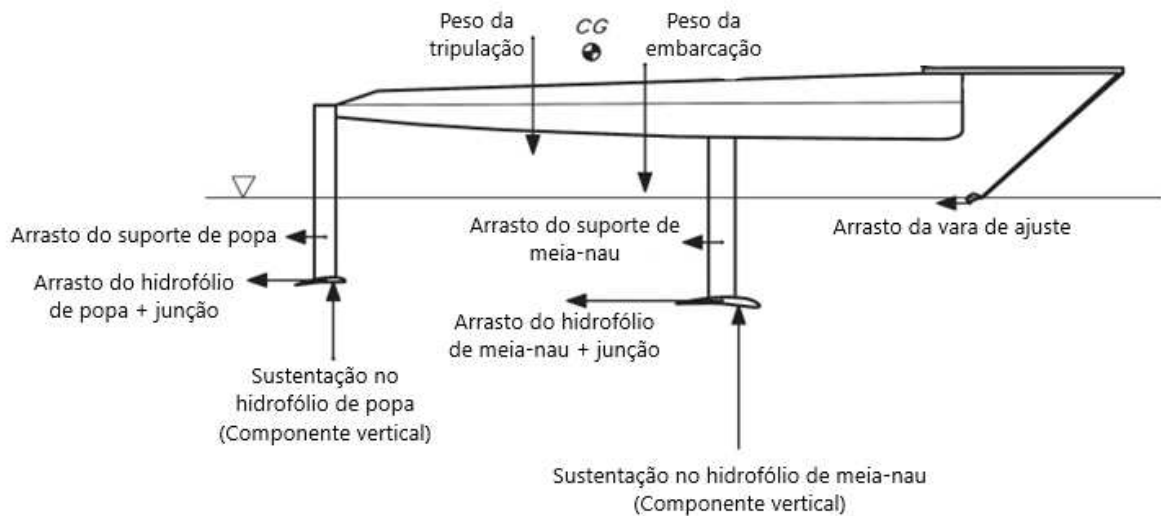
Com o emprego dos hidrofólios focaremos em três destes seis graus de liberdade, sendo eles o equilíbrio de forças verticais e os momentos de rolagem e arfagem.

Vale ressaltar que na Figura 10, os termos fora dos parênteses são os nomes técnicos usados em engenharia e arquitetura naval para descrever os movimentos nos eixos correspondentes. Enquanto os termos entre parênteses correspondem a nomes coloquiais ou conceitos relacionados ao impacto prático do movimento, como percebido no uso ou operação da embarcação.

2.2.6.1. Equilíbrio de forças verticais

Para o equilíbrio ser garantido a soma das forças verticais deve ser igual a zero. O peso da embarcação, componentes e tripulação devem ser iguais ou menores que a força de sustentação oriunda dos hidrofólios de meia-nau e de leme, isto pode ser visto na Figura 11 a seguir (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Figura 11 – Componentes de forças verticais



Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 150).

Um detalhe, é que o peso permanece constante, porém a sustentação aumenta rapidamente conforme a velocidade, conforme observado na Equação 4. Se o hidrofólio de leme for fixo, a sustentação é oriunda do hidrofólio de meia-nau, onde a carga é distribuída ao hidrofólio do leme gradualmente (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

A “vara de ajuste”, representada na Figura 11, é um componente essencial que possibilita a variação do ângulo de ataque do hidrofólio. Essa capacidade de ajuste é crucial para otimizar o desempenho dos hidrofólios, permitindo que o piloto

da embarcação adapte o sistema às condições específicas de operação e maximize a eficiência hidrodinâmica (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

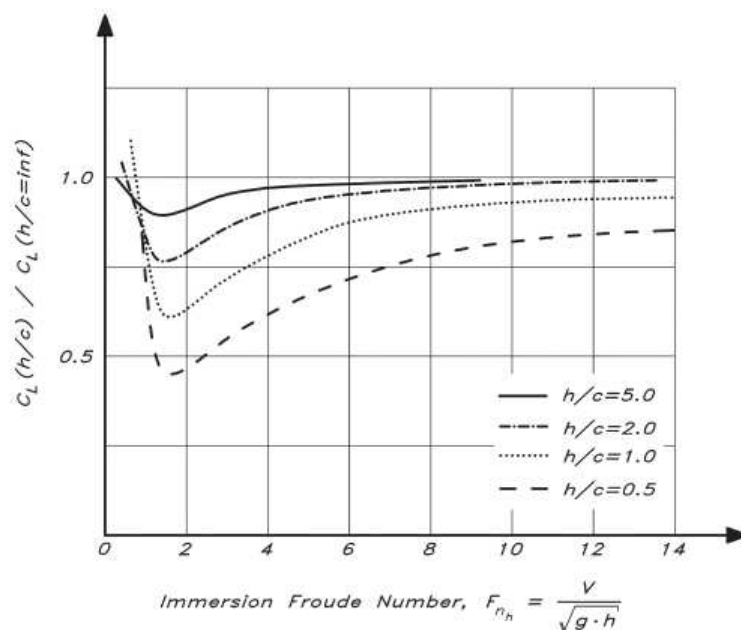
Em velocidades mais baixas, o ângulo de ataque é ajustado entre 2 e 6 graus, otimizando a sustentação. Após a decolagem da embarcação, com o aumento da velocidade, o ângulo de ataque é reduzido para uma faixa de 0 a 2 graus. Esse ajuste é essencial para garantir a sustentação da embarcação, mesmo em condições de ângulo de ataque mais baixo, assegurando a eficiência operacional dos hidrofólios durante todo o seu funcionamento (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

A omissão da vara de ajuste, simplifica o processo de projeto e construtivo dos hidrofólios, pois reduz a complexidade mecânica e a necessidade de componentes adicionais. No entanto, essa simplificação vem com um custo: a falta de ajuste do ângulo de ataque, resultando em um aumento significativo do arrasto (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Sem a capacidade de ajuste do ângulo de ataque, os hidrofólios podem não operar na melhor condição de eficiência, comprometendo o desempenho em diferentes velocidades e condições de navegação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

A Figura 12 mostra a redução do coeficiente de sustentação em relação a faixas de profundidade dos hidrofólios, expressa na forma da razão h/c .

Figura 12 – Variação da sustentação do hidrofólio conforme a profundidade



Fonte: Adaptado de Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 152).

Os dados apresentados na Figura 12, mostram a relação entre a sustentação obtida em profundidades finitas e a sustentação em profundidade infinita, onde a superfície não exerce influência. A escala horizontal é baseada no número de Froude, considerando a imersão do hidrofólio.

Ao se aproximar da superfície os hidrofólios perdem sustentação, ocasionando no afundamento do hidrofólio. Este efeito se repete a cada vez que a embarcação decola novamente, devido ao ganho de sustentação, e afunda novamente, devido a perda de sustentação. A repetição deste fenômeno é conhecida como Porpoising, e uma das soluções para evitar que isto ocorra é o emprego de flaps, que variam o ângulo de ataque dos hidrofólios de meia-nau (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

A análise deste efeito, no entanto é complexa, no qual é recomendado para projetos iniciais o emprego de hidrofólios sem a instalação de flaps nas asas (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.6.2. Equilíbrio de momento de arfagem

O equilíbrio na arfagem é garantido quando os momentos longitudinais gerados são iguais a zero, com ponto de rotação no centro de gravidade da embarcação. Enquanto um momento de proa para baixo é criado devido a propulsão, a sustentação do hidrofólio garante momentos positivos em relação ao peso (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Dependendo da disposição dos pesos internos, tripulação e arrasto podem gerar tanto momentos positivos quanto negativos, isto será avaliado de acordo com o centro de gravidade da embarcação na longitudinal (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Existem diversas abordagens para calcular o momento de arfagem de hidrofólios, como por exemplo, métodos experimentais com ensaios em túnel de água ou testes de campo, que são amplamente utilizados para validar e ajustar os modelos teóricos na integração embarcação - hidrofólios.

2.2.6.3. Equilíbrio de momento de rolagem

O equilíbrio do momento de rolagem de uma embarcação com hidrofólios é alcançado quando os momentos resultantes das forças aerodinâmicas e

hidrodinâmicas, gerados pelos efeitos do vento e do movimento da embarcação em relação à água, se anulam. Quando a embarcação está fora da água os momentos induzidos pelas forças aerodinâmicas laterais são compensados pelos efeitos de sustentação hidrodinâmica dos hidrofólios (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Assim, para garantir que não ocorra a mudança no momento de rolagem da embarcação, após o emprego dos hidrofólios, de maneira que ela possa vir a emborcar, é realizado o projeto dos hidrofólios de meia-nau com envergadura superior a boca da embarcação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.7. Área e forma dos hidrofólios

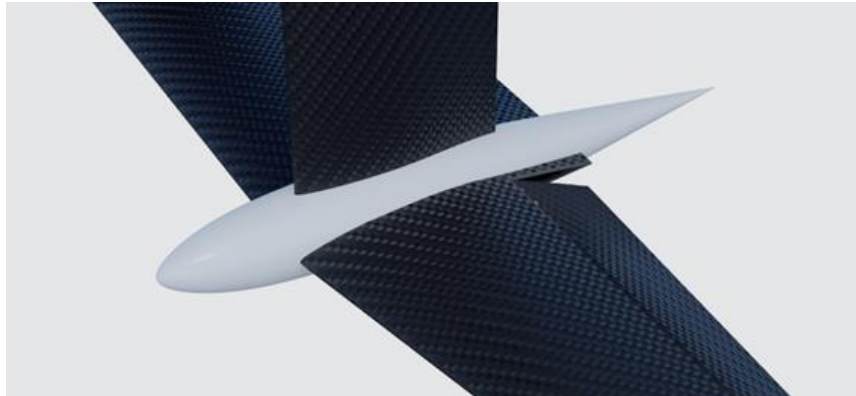
A área e a forma dos hidrofólios são aspectos cruciais no projeto e na performance das embarcações que utilizam essa tecnologia. A escolha adequada dessas características pode influenciar diretamente a eficiência hidrodinâmica, a estabilidade e o desempenho geral da embarcação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.7.1. Hidrofólio de meia-nau

A área do hidrofólio de meia-nau é definida pelo equilíbrio entre a decolagem antecipada e o desempenho em alta velocidade. Áreas maiores geram uma maior sustentação, porém, maior arrasto. Logo, um projeto de hidrofólio de meia-nau com valores de áreas elevados, garantem uma decolagem em velocidades inferiores comparado a projetos com áreas menores. Em contrapartida, o arrasto dos hidrofólios com área maior, será significadamente mais elevado comparado aos de menor área (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Quando duas asas são unidas elas devem ter a adição de um torpedo para evitar com que as pressões mínimas em ambas as seções coincidam, como representado na Figura 13 a seguir.

Figura 13 – Utilização de torpedo nos hidrofólios



Fonte: Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 154).

Além do torpedo garantir que isso não ocorra, a integridade estrutural do hidrofólio é aumentada (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.7.2. Hidrofólio de leme

No hidrofólio de leme, conforme descrito no Item 2.2.3, a área deve ser determinada de acordo com a configuração longitudinal, sendo elas: Conventional, Canard e Tandem, além da configuração lateral: Nonsplit e Split. Com a sustentação definida, o valor da área do hidrofólio pode ser escolhida (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Para hidrofólios de leme, uma alta AR é recomendada, comentado no Item 2.1.1., onde a alta relação de aspecto resulta em priorizar a decolagem em menores velocidades em consequência do aumento do arrasto, porém, alivia o problema de estabilidade (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.7.3. Suporte dos hidrofólios

O suporte da asa do hidrofólio, desempenha um papel crucial na conexão entre o hidrofólio e o casco da embarcação. Essa estrutura não apenas suporta fisicamente o hidrofólio, mas também é fundamental para a eficácia do sistema como um todo (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

O suporte deve ser robusto o suficiente para aguentar as forças dinâmicas geradas pela interação do hidrofólio com a água. Isso inclui tanto as forças de

sustentação quanto o arrasto, que variam significativamente em diferentes condições de navegação. Essa transmissão deve ser eficiente para evitar falhas estruturais, garantindo que a força não se concentre em um único ponto, o que poderia levar a danos (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

O projeto do suporte deve ser hidrodinâmico, de modo a minimizar o arrasto. Um suporte bem projetado reduz a resistência ao movimento da embarcação e contribui para um bom desempenho (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Logo, o suporte é um componente crítico que afeta diretamente a performance, estabilidade e segurança da embarcação. Um projeto cuidadoso e uma construção de qualidade são fundamentais para garantir que essa conexão funcione de maneira eficiente, contribuindo para o sucesso do uso de hidrofólios em diferentes tipos de navegação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

2.2.8. Perfil dos hidrofólios

Diferentemente de quilhas e lemes, os hidrofólios são concebidos com perfis assimétricos, isso se dá pelo motivo de que mesmo em ângulo de ataque zero, eles garantam sustentação (Fossati, 2009).

Os perfis NACA foram originalmente desenvolvidas para aplicações que operam em números de Reynolds relativamente altos. É sabido que o atrito diminui à medida que o número de Reynolds aumenta, especialmente quando a camada limite na seção se torna completamente turbulenta. No entanto, em números de Reynolds mais baixos, a transição do fluxo laminar para o turbulento se torna um fator crítico. A geometria da seção pode ser projetada de forma a atrasar essa transição, resultando na redução do arrasto. Embora essa abordagem também possa ser aplicada às seções NACA em números de Reynolds mais altos, o atraso na transição é mais efetivo e, portanto, mais facilmente alcançado em condições de números de Reynolds baixos (Fossati, 2009).

Essa consideração é essencial para a otimização de desempenhos em embarcações, com hidrofólios, que frequentemente operam em faixas de números de Reynolds acima de um milhão (Fossati, 2009).

Os perfis NACA de quatro dígitos são simples e comumente usados em aplicações que não exigem alto desempenho, sendo definidos pela espessura máxima e curvatura média. Os perfis de cinco dígitos oferecem maior eficiência em termos de

sustentação, sendo adequados para aplicações que demandam maior estabilidade em velocidades variáveis. Já os perfis de seis dígitos são projetados para maximizar a eficiência em faixas específicas de números de Reynolds, tornando-se ideais para aplicações de alta performance (Fossati, 2009).

Como o foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para o cálculo das características hidrodinâmicas dos hidrofólios voltados para a equipe Babitonga, a análise estrutural não foi contemplada. De acordo com Eliasson; Larsson e Orych (2022), a análise estrutural dos hidrofólios exige atenção especial devido à complexidade do perfil das asas, recomendando o uso de softwares especializados que permitam realizar esses cálculos de forma precisa e eficiente. Assim, as características mecânicas dos hidrofólios não foram abordadas neste estudo, visando manter o escopo alinhado ao objetivo principal.

O cálculo de hidrofólios é um processo complexo que envolve a interação de diversos fatores hidrodinâmicos e estruturais. Aspectos como a análise de forças de sustentação, arrasto, cavitação e estabilidade dinâmica exigem o uso de ferramentas avançadas e métodos analíticos específicos. Além disso, a escolha adequada do perfil, o ajuste preciso de ângulos de ataque e o dimensionamento da geometria são fundamentais para garantir eficiência e segurança no desempenho.

Essa complexidade é ampliada pela necessidade de otimizar o desempenho do hidrofólio para condições operacionais específicas, como velocidades variáveis e diferentes números de Reynolds, além de atender a requisitos de durabilidade estrutural e custo-benefício. Dessa forma, a aplicação de métodos precisos e criteriosos é essencial para garantir que os hidrofólios desempenhem seu papel de forma eficiente e confiável no projeto da embarcação.

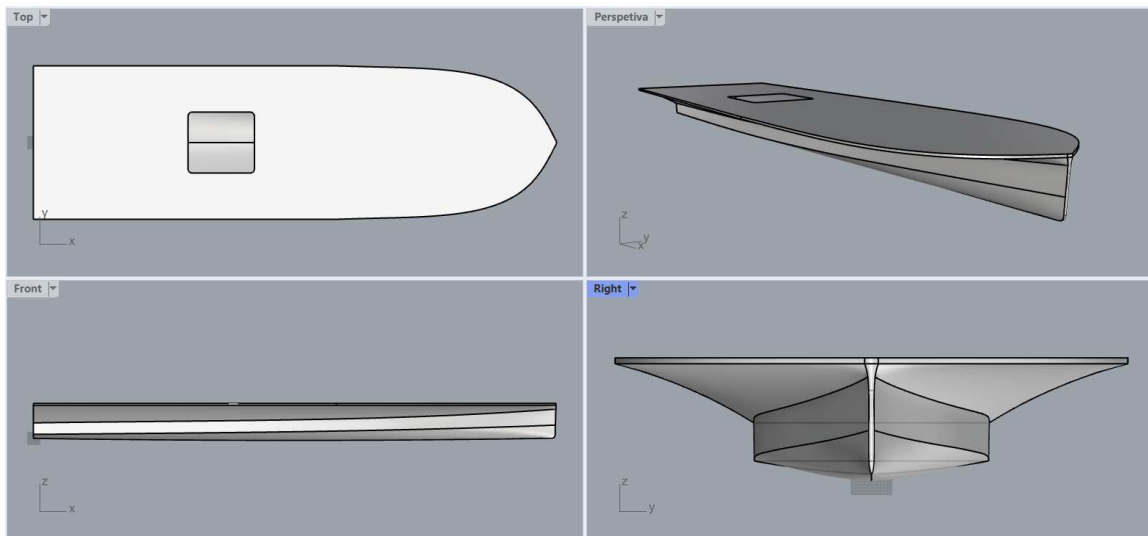
3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho visa detalhar as etapas de desenvolvimento de uma ferramenta em Excel para o projeto de hidrofólios do monocasco da equipe Babitonga, além da modelagem no software Rhinoceros. O objetivo principal é otimizar o processo de projeto e garantir a eficiência dos hidrofólios.

3.1. MONOCASCO SAMBAQUI

O monocasco Sambaqui da equipe Babitonga, representado na Figura 14, é a embarcação estudada a qual se planeja o emprego dos hidrofólios e na Tabela 1, foram fornecidos os dados do Sambaqui pela equipe, a qual são empregados nos cálculos.

Figura 14 – Monocasco Sambaqui



Fonte: Equipe Babitonga (2024).

Tabela 1 – Dados do monocasco

DADOS	VALORES	UNIDADE
Comprimento	6,00	m
Boca	1,80	m
CGlongitudinal	2,30	m
Peso atual	230	kg

Fonte: Equipe Babitonga (2024).

3.2. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA EM EXCEL

3.2.1. Requisitos de projeto

Inicialmente, foi realizado um levantamento dos requisitos necessários para operação da ferramenta, que incluiu a obtenção dos valores de C_L e C_D do perfil NACA selecionado, ensaiado em túnel de vento, além de parâmetros como envergadura total e relação de aspecto dos hidrofólios de meia-nau e de popa, os quais são valores de entrada da ferramenta.

Após esta etapa, em contato com a equipe Babitonga, foram obtidos alguns dados, características do monocasco e informações base para início do projeto, como a faixa de velocidade desejada para o planeio e peso da embarcação.

Para iniciar a criação do modelo da ferramenta, algumas hipóteses foram listadas após estudo da teoria dos hidrofólios, como:

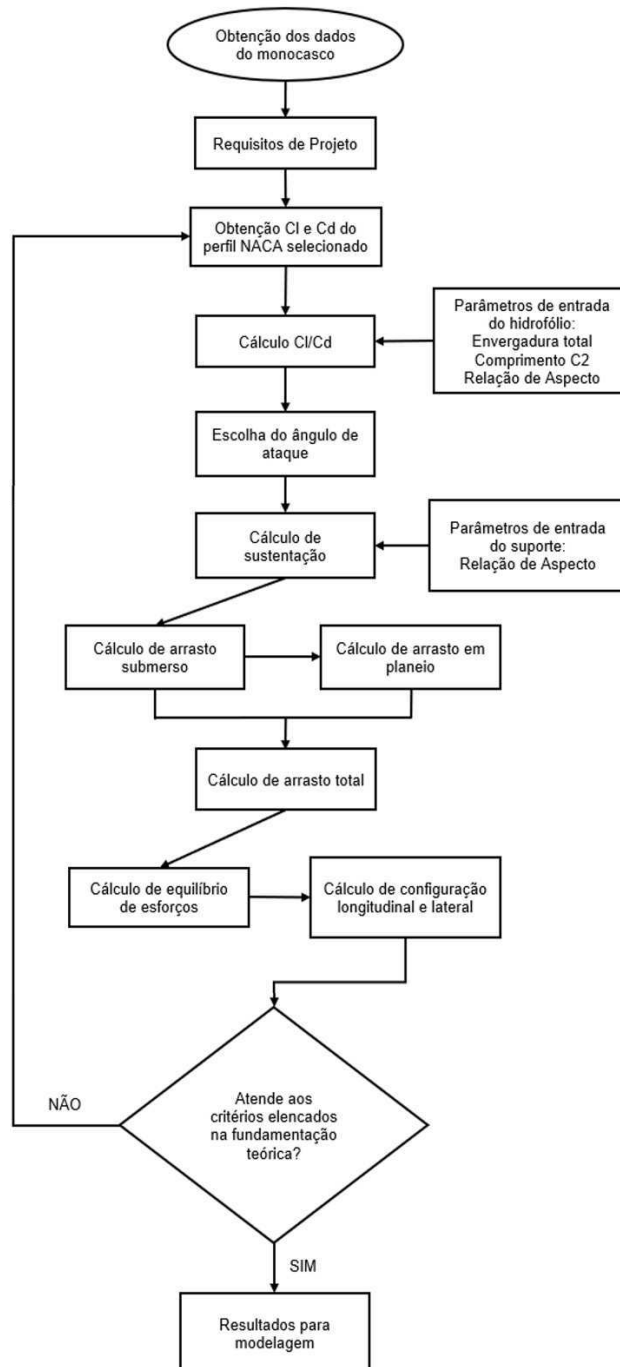
- Utilização de perfil NACA assimétrico de quatro dígitos, facilitando a capacidade de planeio do monocasco;
- Priorizado pela equipe a sustentação por hidrofólios em velocidades mais baixas, desta forma a envergadura do hidrofólio de meia-nau é maior que a boca da embarcação;
- Sustentação do monocasco proveniente do hidrofólio de meia-nau, em que o hidrofólio de popa tenha ângulo de ataque de zero graus;
- Por fim, por viés de facilitar a construção e projeto, foi estabelecido que o formato das asas dos hidrofólios seja a delta e o ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau seja fixo, sem o emprego de flaps.

Vale ressaltar que a criação desta ferramenta foi centrada em modelos de asa no formato delta, devido a capacidade deste formato apresentar características semelhantes ao formato elíptico, segundo a teoria da asa clássica, como mencionado no Item 2.1.

3.2.2. Criação do Modelo

Com os requisitos definidos, a ferramenta foi desenvolvida em Excel, no qual organizou-se as planilhas em seções listadas a seguir. Para facilitar o entendimento do passo-a-passo do processo, a metodologia empregada é representada no fluxograma a seguir, vide Figura 15, e posteriormente detalhada cada passo.

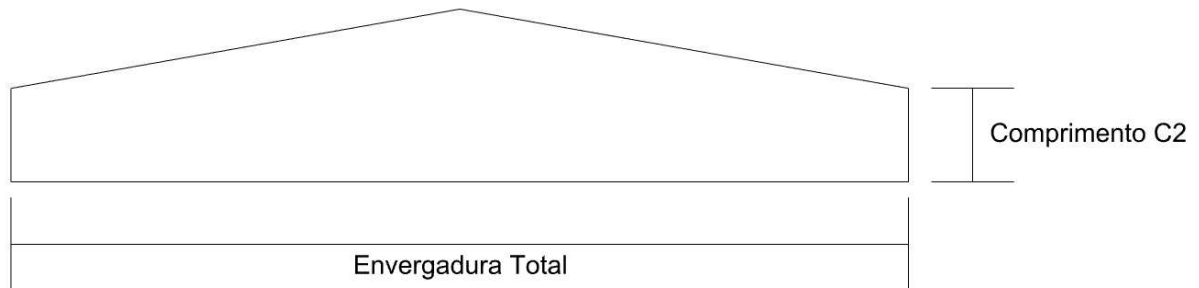
Figura 15 – Metodologia empregada



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 16, é apresentados os parâmetros de entrada da ferramenta para melhor entendimento, citados no fluxograma.

Figura 16 – Parâmetros de entrada da ferramenta



Fonte: Autor (2024).

A metodologia adotada para a composição e o dimensionamento dos hidrofólios foi desenvolvida com base na fundamentação teórica previamente estudada, considerando os conceitos hidrodinâmicos mais relevantes para o desempenho e a eficiência das embarcações.

Apesar de bem fundamentada, essa abordagem representa apenas uma dentre as várias possíveis para o cálculo e a otimização de hidrofólios, sendo possível empregar outras técnicas, como métodos analíticos alternativos, simulações avançadas em CFD ou testes experimentais.

É importante ressaltar que o cálculo e o dimensionamento de hidrofólios são processos extremamente complexos, que exigem a consideração de múltiplos fatores, como ângulo de ataque, cavitação, estabilidade dinâmica e resistência estrutural, além de um equilíbrio entre desempenho e viabilidade prática. Assim, o desenvolvimento dessa metodologia buscou atender às demandas específicas do projeto, respeitando as limitações e os recursos disponíveis.

3.2.2.1. Coeficiente de sustentação e arrasto

Através dos ensaios em túneis de vento, C_L e C_D dos perfis NACA estão disponíveis no site Airfoiltools a determinadas faixas de operação e número de Reynolds. Estes valores foram obtidos e corrigidos, conforme o perfil da asa selecionado, as velocidades de operação do monocasco, além da correção das características do fluido e então número de Reynolds.

Nesta seção, alguns parâmetros de entrada das características dos hidrofólios são requisitadas, em que, com a teoria apresentada e seguindo as formulações específicas, são obtidas dimensões preliminares dos hidrofólios de meia-nau e popa, que futuramente são, ou não, validadas conforme avanço do projeto.

É importante salientar, que também nesta seção, as razões C_L/C_D para diferentes ângulos de ataque dos hidrofólios são fornecidas pela ferramenta, permitindo a escolha do ângulo de ataque conforme hipóteses do projeto.

Vale ressaltar que uma das maneiras utilizadas para a seleção do ângulo de ataque ideal de um hidrofólio é a análise da razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto. Essa razão permite identificar o ângulo que maximiza a eficiência hidrodinâmica, otimizando o desempenho do hidrofólio. No entanto, essa não é a única abordagem. Outros fatores também podem ser considerados, como a estabilidade do fluxo em torno do perfil, a resistência à cavitação e a influência das condições operacionais, como a velocidade relativa e o número de Reynolds.

3.2.2.2. Cálculo de sustentação nos hidrofólios

Nesta parte do desenvolvimento da ferramenta, foi realizado o cálculo da sustentação do hidrofólio de meia-nau e de popa, e conseqüentemente, a sustentação total dos hidrofólios para os ângulos de ataque definidos.

3.2.2.3. Cálculo de arrasto nos hidrofólios

Para o cálculo de arrasto, a ferramenta coleta dados provenientes das seções anteriores, e através das formulações de arrasto anteriormente apresentadas, realiza os cálculos provenientes das duas condições de navegação: o arrasto com os hidrofólios submersos e o arrasto em condição de planeio.

Em sequência, estas parcelas são unidas, e com as informações do monocasco fornecidas pelos estudos da equipe Babitonga, é possível realizar a integração do arrasto total dos hidrofólios, e do suporte com a embarcação, e assim obter valores estimados desta integração monocasco-hidrofólios, além de uma estimativa de potência necessária.

3.2.2.4. Cálculo de equilíbrio, momentos e configurações nos hidrofólios

Como penúltimo passo, esta seção da ferramenta é de extrema importância para validação dos cálculos anteriormente realizados, pois segundo a teoria dos hidrofólios, é neste instante que o equilíbrio vertical e os momentos de arfagem e rolagem são garantidos.

Proveniente dos valores já fornecidos e calculados, após a validação do equilíbrio e de momentos, é definido então a configuração longitudinal e lateral dos hidrofólios que serão empregados na embarcação.

3.2.3. Validação dos Cálculos

Com a ferramenta finalizada, realizou-se a validação das fórmulas e resultados empregando os valores do estudo de caso do capítulo 7, do livro Principles of Yacht Design de Eliasson; Larsson e Orych (2022).

3.2.4. Modelagem no software Rhinoceros

Com os dados obtidos pela ferramenta em Excel, os resultados foram sintetizados e então realizado a modelagem 3D dos hidrofólios e suportes, seguindo os parâmetros geométricos e hidrodinâmicos, além dos requisitos de fabricação e montagem.

A metodologia adotada permitiu não apenas o desenvolvimento da ferramenta em Excel, mas também uma modelagem no Rhinoceros, que contribuiu significativamente para o projeto dos hidrofólios da equipe Babitonga. A interação entre as duas etapas possibilitou uma abordagem integrada e eficiente para o desenvolvimento do projeto.

4. ESTUDO DE CASO DO MONOCASCO DA EQUIPE BABITONGA

Após a seleção do perfil e a obtenção dos coeficientes C_L e C_D , a ferramenta determinou a razão C_L/C_D para diferentes ângulos de ataque do hidrofólio, além dos valores de sustentação, arrasto, momentos e configuração dos mesmos. Ademais neste capítulo será abordado o emprego da ferramenta no estudo de caso comentado e, por fim, a modelagem dos hidrofólios.

4.1. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

Para fins de validação da ferramenta, foi realizado um estudo de caso seguindo o exemplo do capítulo 7, do livro Principles of Yacht Design de Eliasson; Larsson e Orych (2022). Em que, na Figura 17 a seguir, são os dados utilizados na ferramenta para validação de todos os procedimentos citados neste estudo.

Figura 17 – Dados dos hidrofólios e suporte

	Centreboard, CB	Centre foil, CF	Rudder, RB	Rudder foil, RF
Span [m]	1.32 from hull	2.1	1.35 fr. Dwl.	1.0
Tip chord [m]	0.2	0.163	0.16	0.078
Root chord [m]	0.2	0.362	0.16	0.172
Mean chord [m]	0.2	0.263	0.16	0.125
Aspect ratio	6.6	8.0	8.4	8.0
Area [m ²]	0.264 from hull	0.551	0.216 fr. Dwl.	0.125
Section	NACA 0012	Wortmann	NACA 0012	Wortmann
Ang. of att. [deg]	-	0.0	-	0.0

Fonte: Eliasson, Larsson e Orych (2022, p. 166).

Com estes dados da Figura 17, foi realizado os mesmos procedimentos metodológicos aplicados na ferramenta desenvolvida para o cálculo dos hidrofólios do monocasco da equipe Babitonga. Seguindo o exemplo do livro, os cálculos são realizados a uma velocidade de 10 nós.

Desta maneira, após todo o procedimento comentado, os dados foram obtidos e comparados, apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Comparação de resultados do estudo de caso

DADOS	LIVRO		FERRAMENTA		ERRO	
	VALOR	UNIDADE	VALOR	UNIDADE		
Sustentação	3041,00	N	3081,45	N	1,31	%
Arrasto total	60,00	N	65,45	N	8,33	%
Alteração em C_L para Arfagem - Meia-nau	15,6	%	36,01	%	56,68	%
Alteração em C_L para Arfagem - Popa	23,7	%	36,01	%	34,18	%

Fonte: Autor (2024).

É perceptível que, os resultados colhidos referente a análise de sustentação e arrasto total do estudo de caso, utilizando a ferramenta desenvolvida são satisfatórios, apresentando erros relativos abaixo de 10%.

As discrepâncias observadas nos valores de sustentação e arrasto podem ser atribuídas à utilização de um perfil hidrodinâmico do tipo Wortmann, em substituição ao perfil NACA, amplamente adotado como padrão de referência. Adicionalmente, as variações no ângulo de ataque e a profundidade do suporte também contribuíram para os desvios nos resultados esperados.

Porém, os valores referentes ao C_L de arfagem, no qual valida o momento de arfagem depois do emprego dos hidrofólios na embarcação de estudo, apresentaram erros relativo elevados.

Isto ocorre por um fator esperado: a variação do ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau. No estudo de caso do livro de referência, o ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau é variável, devido a presença de flaps nas asas, desta maneira, após a decolagem da embarcação o ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau é ajustado a 0 graus, diferenciando-se do cálculo da ferramenta desenvolvida no qual não varia o ângulo de ataque para emprego dos hidrofólios.

Devido a isto, o resultado do C_L de arfagem utilizando a ferramenta desenvolvida para o estudo de caso, apresenta erro relativo elevado, pois a ferramenta foi desenvolvida para este cálculo com ângulo de ataque fixo e não variável.

Desta forma, com os resultados obtidos, pode-se dizer que a ferramenta apresenta valores confiáveis para o estudo realizado e então, o possível projeto e emprego de hidrofólios no monocasco da equipe Babitonga.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DE RESULTADOS

Para início do projeto, foi necessário colher algumas informações do monocasco da equipe Babitonga, conforme apresentado na Tabela 1 da Item 3.1.

Vale ressaltar, que o ponto de referência zero para o valor do centro de gravidade longitudinal fornecido pela equipe Babitonga, é o espelho de popa do monocasco.

O objetivo deste trabalho não é validar os dados de arrasto do monocasco, mas, para fins comparativos, a equipe Babitonga forneceu um estudo de resistência ao avanço da embarcação, orientado pelo professor Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, conforme apresentado no Anexo A. Em uma etapa futura, após a caracterização de todos os resultados, será realizado um comparativo entre a resistência ao avanço com e sem a aplicação dos hidrofólios, a fim de avaliar o impacto dessa tecnologia no desempenho da embarcação.

Com estes dados fornecidos, foi possível o início da ferramenta seguindo a teoria e formulações apresentadas, além das hipóteses estabelecidas no Item 3.1.1 propostas para o desenvolvimento do projeto. Na Tabela 3 a seguir, é apresentado os parâmetros iniciais dos hidrofólios de meia-nau e de popa.

Tabela 3 – Parâmetros iniciais dos hidrofólios

Meia-Nau			Popa		
DADOS	VALOR	UNIDADE	DADOS	VALOR	UNIDADE
Envergadura Total	2,10	m	Envergadura Total	1,05	m
Comprimento C1	0,325	m	Comprimento C1	0,163	m
Comprimento C2	0,200	m	Comprimento C2	0,100	m
Espessura t1	0,039	m	Espessura t1	0,020	m
Espessura t2	0,024	m	Espessura t2	0,012	m
Corda Média	0,263	m	Corda Média	0,131	m
Área Projetada	0,551	m ²	Área Projetada	0,138	m ²
Relação de Aspecto	8	-	Relação de Aspecto	8	-
Relação de Conicidade	0,62	-	Relação de Conicidade	0,62	-
Âng Borda Ataque	6,79	Graus	Âng Borda Ataque	6,79	Graus

Fonte: Autor (2024).

É perceptível a necessidade de estabelecer valores de entrada para realização dos cálculos, na ferramenta desenvolvida, estes parâmetros, vide Figura

16, são a envergadura total, comprimento C2 (corda do perfil NACA nas extremidades do hidrofólio) e relação de aspecto, observados na Tabela 2. Futuramente com outros parâmetros estabelecidos, estes valores são validados ou não. Caso estes parâmetros não sejam validados, será necessário alterá-los, e então retomar os passos da ferramenta conforme explicado na metodologia deste estudo.

4.2.1. Razão C_L/C_D

Seguindo as hipóteses levantadas anteriormente, retomando:

- Utilização de perfil NACA assimétrico de quatro dígitos, facilitando a capacidade de planeio do monocasco;
- Priorizado pela equipe a sustentação por hidrofólios em velocidades mais baixas, desta forma a envergadura do hidrofólio de meia-nau é maior que a boca da embarcação;
- Sustentação do monocasco proveniente do hidrofólio de meia-nau, em que o hidrofólio de popa tenha ângulo de ataque de zero graus;
- Por fim, por viés de facilitar a construção e projeto, foi estabelecido que o formato das asas dos hidrofólios seja a delta e o ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau seja fixo, sem o emprego de flaps.

Foi definido a utilização de um perfil NACA assimétrico para o projeto dos hidrofólios. O perfil selecionado foi o NACA 4412, que além de assimétrico tem seu fundo plano, facilitando a construção dos hidrofólios. Os coeficientes de sustentação e arrasto para os hidrofólios de meia-nau e popa, foram coletados no site Airfoiltools ensaiados com número de Reynolds $1,00E+06$, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de sustentação e arrasto

Perfil NACA		4412	
Número de Reynolds		1,00E+06	
Ângulo de Ataque	Coeficiente	Meia-nau	Popa
		Valor	
0	Cl	0,4773	0,4833
	Cd	0,0078	0,0068
1	Cl	0,5884	0,5842
	Cd	0,0077	0,0059
2	Cl	0,6964	0,7055
	Cd	0,0072	0,0062
3	Cl	0,8076	0,8405
	Cd	0,0071	0,0068
4	Cl	0,9142	0,9210
	Cd	0,0077	0,0072
5	Cl	1,1035	1,0254
	Cd	0,0089	0,0080
6	Cl	1,1082	1,1280
	Cd	0,0104	0,0088

Fonte: Autor (2024).

É necessário o ajuste destes coeficientes para as diferentes velocidades de operação da embarcação, conseqüentemente o número de Reynolds é alterado devido a mudança de velocidade. Com os valores fornecidos na Tabela 4, a ferramenta desenvolvida ajusta estes coeficientes, para os hidrofólios de meia-nau e popa, a uma faixa de velocidade de 0 a 20 nós, vide Apêndice A, e então a partir deste ajuste é possível obter as razões C_L/C_D para os hidrofólios, conforme apresentado na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Razão C_L/C_D dos hidrofólios

Ângulo de Ataque	Meia-nau			Popa		
	Cl/Cd	Cl	Cd	Cl/Cd	Cl	Cd
0	61,59	0,4773	0,0078	71,28	0,4833	0,0068
1	76,32	0,5884	0,0077	98,35	0,5842	0,0059
2	96,59	0,6964	0,0072	113,42	0,7055	0,0062
3	114,39	0,8076	0,0071	123,42	0,8405	0,0068
4	118,88	0,9142	0,0077	127,56	0,9210	0,0072
5	124,55	1,1035	0,0089	128,66	1,0254	0,0080
6	107,07	1,1082	0,0104	127,60	1,1280	0,0088

Fonte: Autor (2024).

Com estes valores obtidos é possível definir o ângulo de ataque dos hidrofólios, lembrando que quanto maior a razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto, maior a eficiência dos hidrofólios e, quanto maior o ângulo de ataque, maior o arrasto desenvolvido conforme o aumento da velocidade.

O ângulo de ataque de 3 graus foi escolhido para o hidrofólio de meia-nau, mesmo apresentando uma razão C_L/C_D menor em comparação com ângulos de 4, 5 e 6 graus, devido ao fato de que a 3 graus o coeficiente de arrasto é significativamente menor, conforme visto na Tabela 5. Essa escolha foi feita com o objetivo de otimizar o desempenho hidrodinâmico, minimizando o arrasto enquanto ainda se obtém sustentação para a embarcação.

Já para o hidrofólio de popa, o ângulo de ataque escolhido foi de 0 graus. Apesar de a 1 grau o coeficiente de arrasto ser menor, vide Tabela 5. A escolha de 0 graus se justificou para garantir o equilíbrio da embarcação e a distribuição correta das forças de sustentação.

Vale ressaltar, que a escolha deste ângulo de ataque é validada na ferramenta no cálculo de sustentação, isto ocorre, pois, a sustentação nos hidrofólios deve ser igual ao peso da embarcação.

A hipótese adotada para a escolha do ângulo de ataque dos hidrofólios não levou em consideração o ângulo de trim do monocasco. Essa simplificação foi feita com o intuito de focar nos efeitos diretos do hidrofólio em condições ideais de operação, desconsiderando, por ora, o impacto do ângulo de trim, que pode influenciar a distribuição de carga e o comportamento hidrodinâmico da embarcação.

No entanto, é importante ressaltar que o ângulo de trim tem um papel relevante no desempenho geral, podendo afetar o ângulo de ataque efetivo do hidrofólio durante a operação, o que será considerado em estudos futuros para uma análise mais abrangente e precisa.

4.2.2. Cálculo de sustentação e arrasto

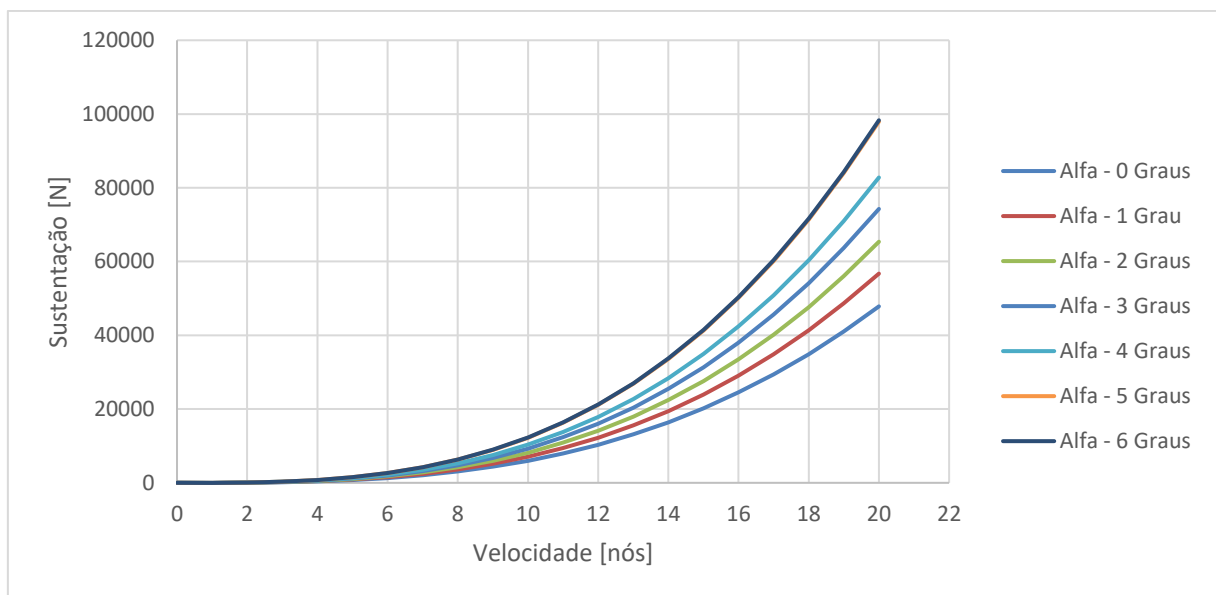
Com os ângulos de ataque dos hidrofólios definidos, é possível calcular a sustentação e posteriormente o arrasto, tanto no regime em que os hidrofólios estão submersos, quanto em planeio, e posteriormente o arrasto total, combinando estes dois fatores.

A equipe Babitonga, seguindo a análise de resistência ao avanço do monocasco realizada, vide Anexo A, planeja que a embarcação seja sustentada pelos hidrofólios em baixa velocidade. Desta forma, o ângulo de ataque definido para o hidrofólio de meia-nau, deve superar os 230kg do monocasco.

Para realização do cálculo de sustentação, a ferramenta coleta os valores dos coeficientes de sustentação já fornecidos, e corrige seguindo a relação de aspecto definida pelo operador, desta maneira, é possível calcular a sustentação proveniente no hidrofólio de meia-nau e no hidrofólio de popa, vide Apêndice B.

Por fim, validado se a sustentação no hidrofólio de meia-nau supera o peso da embarcação, a ferramenta fornece a sustentação total dos hidrofólios nos diferentes ângulos de ataque do hidrofólio meia-nau, mantendo ângulo de ataque de 0 graus para o hidrofólio de popa, observado na Figura 18 apresentada.

Figura 18 – Sustentação nos hidrofólios variando ângulo de ataque



Fonte: Autor (2024).

Notado que, a sustentação cresce exponencialmente conforme o aumento da velocidade, devido ao projeto dos hidrofólios não apresentarem flaps para variação do ângulo de ataque do hidrofólio, isto pode amplificar o fenômeno de Porpoising além do aumento significativo no arrasto total em velocidades elevadas.

Para o cálculo do arrasto, além dos hidrofólios, é necessário considerar o efeito do suporte que está agregado, para garantir a união dos hidrofólios no

monocasco. No caso do suporte, o perfil NACA deve ser simétrico, para que não se desenvolva o efeito de sustentação para nenhum dos bordos.

A ferramenta realiza o mesmo processo citado no Item 4.2.1. para o cálculo do coeficiente de arrasto do suporte, e então o ajuste para diferentes velocidades, sintetizados na Tabela 6, em que o único parâmetro de entrada é a relação de aspecto, os demais são calculados seguindo as formulações apresentadas na fundamentação teórica.

Tabela 6 – Parâmetros do suporte dos hidrofólios

SUPORTE					
Meia-nau			Popa		
DADOS	VALOR	UNID	DADOS	VALOR	UNID
Comprimento Total	0,58	m	Comprimento Total	0,58	m
Espessura	0,032	m	Espessura	0,016	m
Corda	0,263	m	Corda	0,131	m
Área Projetada Arrasto	0,018	m ²	Área Projetada Arrasto	0,009	m ²
Relação de Aspecto	2,2	-	Relação de Aspecto	4,4	-
Perfil NACA	0012	-	Perfil NACA	0012	-
Número de Reynolds	1,00E+06	-	Número de Reynolds	1,00E+06	-
Ângulo de ataque	Coefficiente	Valor	Ângulo de ataque	Coefficiente	Valor
0	Cl	0	0	Cl	0
	Cd	0,02085		Cd	0,02085

Fonte: Autor (2024).

No Apêndice C, é apresentado este procedimento para o cálculo do arrasto na condição com os hidrofólios submersos, condição de planeio e por fim sintetizados nas duas condições.

É perceptível que, com a sintetização destes valores obtidos no cálculo do arrasto, seja possível estimar uma potência efetiva preliminar em que a equipe Babitonga tenha como base. Desta forma, a ferramenta desenvolvida apresenta esta potência efetiva preliminar, somente dos hidrofólios e suporte, e posteriormente com a união monocasco-hidrofólios.

4.2.3. Cálculo de equilíbrio, momentos e configuração

Nesta seção, a ferramenta desenvolvida válida ou não os parâmetros iniciais anteriormente obtidos e calculados, lembrando que caso não ocorra a validação, é

necessário a retomada dos processos, conforme elencados na metodologia, até aprovação dos parâmetros.

Para garantia do equilíbrio vertical, retomamos a fundamentação teórica, no qual é garantido através dos cálculos do coeficiente de sustentação, em que, o coeficiente de sustentação precisa superar o peso da embarcação na velocidade estimada para o início do planeio. Com os valores definidos e calculados pela ferramenta, seguindo as hipóteses estabelecidas, na Tabela 7 é observado que o equilíbrio vertical é garantido pois a sustentação supera o peso do monocasco.

Tabela 7 – Equilíbrio vertical

DADOS	VALOR	UNIDADE
Peso atual do monocasco	230	Kg
	2256,30	N
Velocidade estimada de decolagem	7	Nós
Sustentação	2769,60	N

Fonte: Autor (2024).

Como próximo passo, será necessário garantir que o momento de rolagem seja devidamente controlado, evitando que a embarcação seja afetada por movimentos indesejados de rolagem após a instalação dos hidrofólios. Para isto eles necessitam estar alinhados com a linha de centro da embarcação, e o hidrofólio de meia-nau precisa necessariamente ser maior ou igual a boca máxima da embarcação (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Esta garantia é obtida, conforme representado na Tabela 8.

Tabela 8 – Momento de rolagem

DADOS	VALOR	UNIDADE
Boca máxima do monocasco	1,80	m
Envergadura hidrofólio de meia-nau	2,10	m

Fonte: Autor (2024).

Antes que a ferramenta forneça as configurações longitudinal e lateral dos hidrofólios, é necessário garantir o equilíbrio do momento de arfagem. Para isso, torna-se imprescindível ajustar o coeficiente de sustentação C_L do hidrofólio localizado na meia-nau.

Esta correção é realizada seguindo as relações de aspecto já definidas, no qual, o parâmetro de alteração do C_L para arfagem no hidrofólio de meia-nau, necessita ser menor do que, a alteração do C_L para arfagem no hidrofólio de popa (Eliasson; Larsson; Orych, 2022).

Isto garante que, a embarcação após o emprego dos hidrofólios não sofra com o momento de arfagem.

Na Tabela 9 a seguir, estes valores são então calculados e fornecidos.

Tabela 9 – Momento de arfagem

Meia-nau			Popa		
DADOS	VALOR	UNIDADE	DADOS	VALOR	UNIDADE
Distância Popa - Hidrofólio	3	m			
Incremento ângulo de ataque	0,157	Graus	Incremento ângulo de ataque	0	Graus
Cl 2D por Grau	0,204	-	Cl 2D por Grau	0,189	-
Cl 2D por Grau Total	0,047	-	Cl 2D por Grau Total	0,189	-
Relação de aspecto	8	-	Relação de aspecto	8	-
Cl Arfagem	0,0391	-	Cl Arfagem	0,1574	-
Cl	0,7561	-	Cl	0,4525	-
Alteração em Cl para Arfagem	5,17	%	Alteração em Cl para Arfagem	34,80	%

Fonte: Autor (2024).

O parâmetro da distância da popa até o hidrofólio, na Tabela 9 apresentada, necessita ser fornecido pelo operador, os demais são calculados e fornecidos pela ferramenta.

Como pode ser visto no Apêndice D, a ferramenta apresenta testes e validações no cálculo de equilíbrio e nos cálculos de momentos, conforme o passo a passo do projeto. Desta forma, para o operador avançar com o projeto, é necessário a aprovação destas validações, garantindo que os valores que o mesmo forneça a ferramenta, não sejam incoerentes conforme toda fundamentação teórica apresentada.

Por fim, ainda nesta seção, a ferramenta fornece a configuração longitudinal e a configuração lateral dos hidrofólios, conforme descritos no Item 2.2.4.

4.2.4. Sintetização de resultados

Por fim, após todo o processo de metodologia apresentado, além de todos os passos da ferramenta exemplificados nos Apêndices deste trabalho, foi possível sintetizar todos resultados obtidos, com validações e parâmetros garantidos.

No Apêndice E, é possível visualizar como os resultados são fornecidos na ferramenta desenvolvida. Nesta seção, são sintetizados estes resultados obtidos, referente ao emprego dos hidrofólios no monocasco da equipe Babitonga.

Na Tabela 10, é representado os parâmetros e validações para o hidrofólio e suporte de meia-nau e na Tabela 11, para o hidrofólio e suporte de Popa.

Tabela 10 – Parâmetros finais para hidrofólio e suporte de meia-nau

Meia-nau						
HIDROFÓLIO				SUPORTE		
DADOS	VALOR	UNIDADE	VERIFICAÇÃO	DADOS	VALOR	UNIDADE
Envergadura Total	2,10	m		Comprimento Total	0,58	m
Comprimento C1	0,325	m		Espessura	0,032	m
Comprimento C2	0,200	m		Corda	0,263	m
Espessura t1	0,039	m		Área Projetada Arrasto	0,018	m ²
Espessura t2	0,024	m		Relação de Aspecto	2,2	-
Corda Média	0,263	m		Perfil NACA	0012	-
Área Projetada	0,551	m ²				
Relação de Aspecto	8	-				
Relação de Conicidade	0,62	-	OK			
Âng Borda Ataque	6,79	Graus	OK			
Perfil NACA	4412	-				
Ângulo de Ataque	3	Graus				

Fonte: Autor (2024).

Tabela 11 – Parâmetros finais para hidrofólio e suporte de Popa

Popa						
HIDROFÓLIO				SUPORTE		
DADOS	VALOR	UNIDADE	VERIFICAÇÃO	DADOS	VALOR	UNIDADE
Envergadura Total	1,05	m		Comprimento Total	0,58	m
Comprimento C1	0,163	m		Espessura	0,016	m
Comprimento C2	0,100	m		Corda	0,131	m
Espessura t1	0,020	m		Área Projetada Arrasto	0,009	m ²
Espessura t2	0,012	m		Relação de Aspecto	4,4	-
Corda Média	0,131	m		Perfil NACA	0012	-
Área Projetada	0,138	m ²				
Relação de Aspecto	8	-				
Relação de Conicidade	0,62	-	OK			
Âng Borda Ataque	6,79	Graus	OK			
Perfil NACA	4412	-				
Ângulo de Ataque	0	Graus				

Fonte: Autor (2024).

Posteriormente, na Tabela 12, o retorno das validações de equilíbrio e momentos, além da configuração longitudinal e lateral dos hidrofólios.

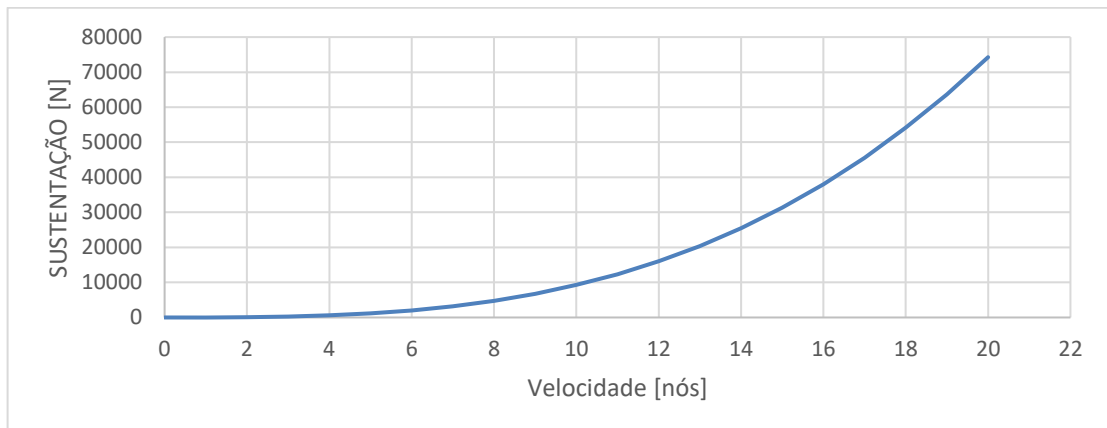
Tabela 12 – Equilíbrio, momentos e configurações

Verificação de equilíbrio e momentos		
Equilíbrio Vertical	OK	
Momento de Rolagem	OK	
Momento de Arfagem	OK	
Posicionamento e configuração		
DADOS	VALOR	UNIDADE
Ponto referência	0,00	m
Posição hidrofólio de Meia-nau	3,00	m
Posição hidrofólio de Popa	0,00	m
CONFIGURAÇÃO LONGITUDINAL	CONVENTIONAL	
CONFIGURAÇÃO LATERAL	NONSPILT	

Fonte: Autor (2024).

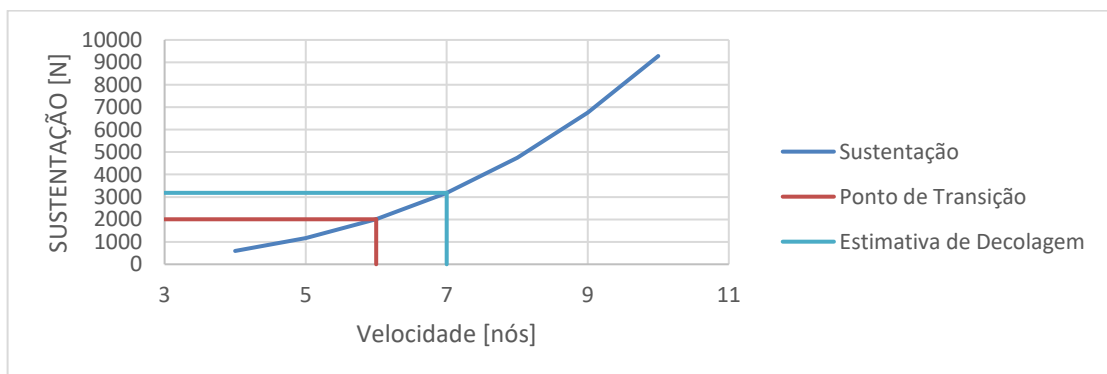
Com estes parâmetros definidos e validados pela ferramenta, é representado graficamente os valores como sustentação total, arrasto total e potência efetiva. Na Figura 19, é observado a sustentação total e posteriormente na Figura 20, a sustentação total na zona de decolagem.

Figura 19 – Sustentação total



Fonte: Autor (2024).

Figura 20 – Sustentação total na zona de decolagem

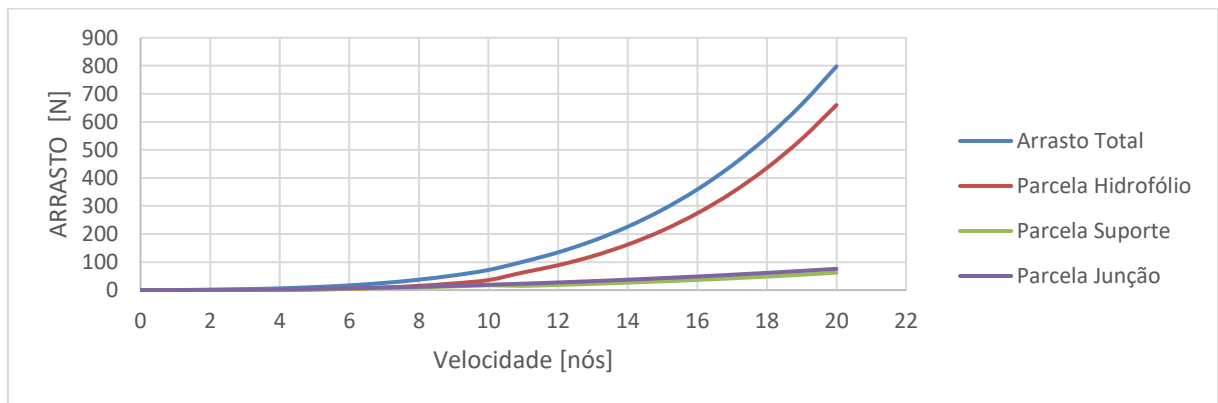


Fonte: Autor (2024).

Conforme comentado anteriormente, a sustentação tende a crescer de forma exponencial com o aumento da velocidade, devido ao design dos hidrofólios, que não incorporam flaps para ajuste do ângulo de ataque.

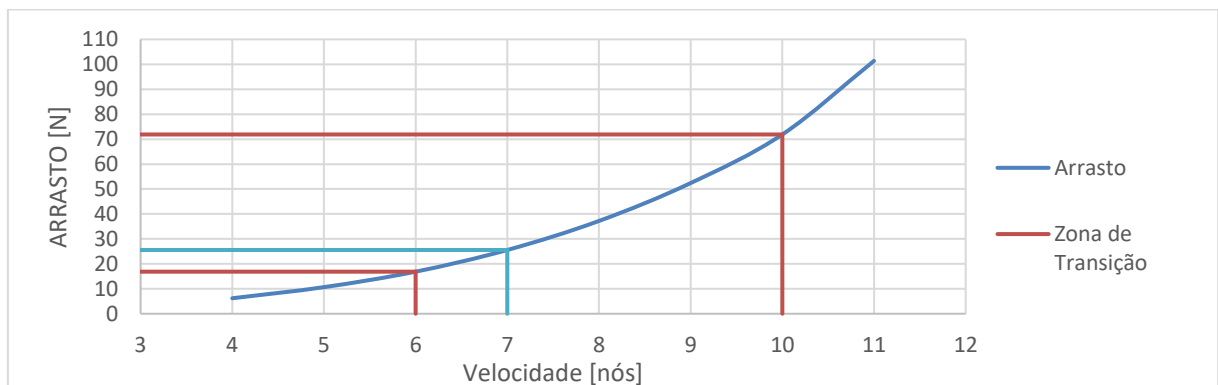
Seguindo, obtém-se o arrasto total, vide Figura 21, e o arrasto total na zona de decolagem, representado na Figura 22.

Figura 21 – Arrasto total



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Arrasto total na zona de decolagem



Fonte: Autor (2024).

Vale ressaltar que, a composição final para o arrasto total, leva em consideração a união dos fenômenos com os hidrofólios submersos, no período de decolagem e em planeio. É perceptível que, o arrasto total também cresce exponencialmente conforme o aumento da velocidade, isto ocorre, novamente, pelo projeto dos hidrofólios não conterem flaps que alterem o ângulo de ataque.

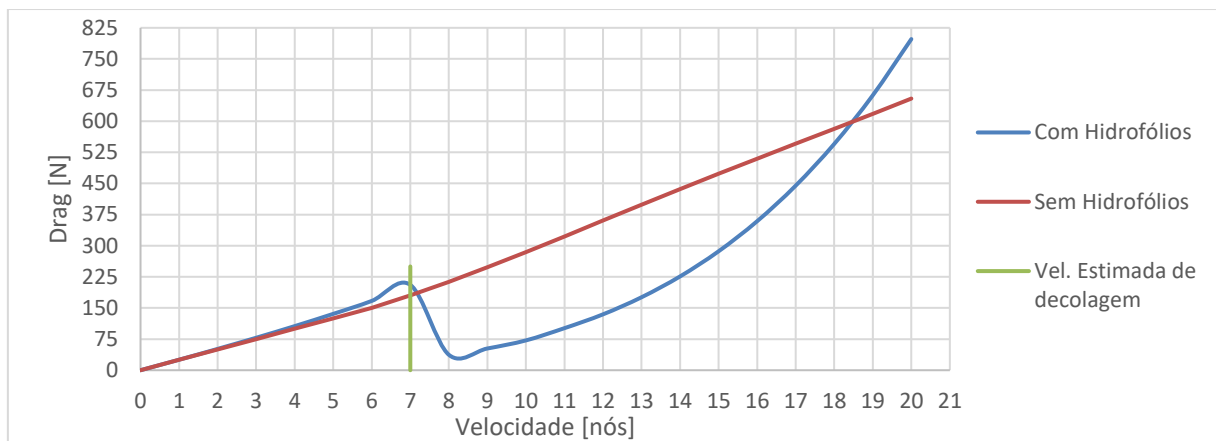
Com esta etapa concluída, e com os valores da resistência ao avanço do monocasco fornecido pela equipe Babitonga, vide Anexo A, é possível realizar um

comparativo do arrasto do monocasco com e sem os hidrofólios, representado na Figura 23 a seguir.

Obviamente, que esta integração monocasco-hidrofólios, para análise de arrasto, necessita ser refinada com métodos computacionais mais precisos, como por exemplo, a utilização do método de dinâmica de fluidos computacionais.

A ferramenta desenvolvida, serve para o cálculo e projeto dos hidrofólios e suporte com valores de efeitos hidrodinâmicos fornecidos na literatura, em que estes valores foram fixados para que a ferramenta opere, estes comentados no Item 2.2.5.2.

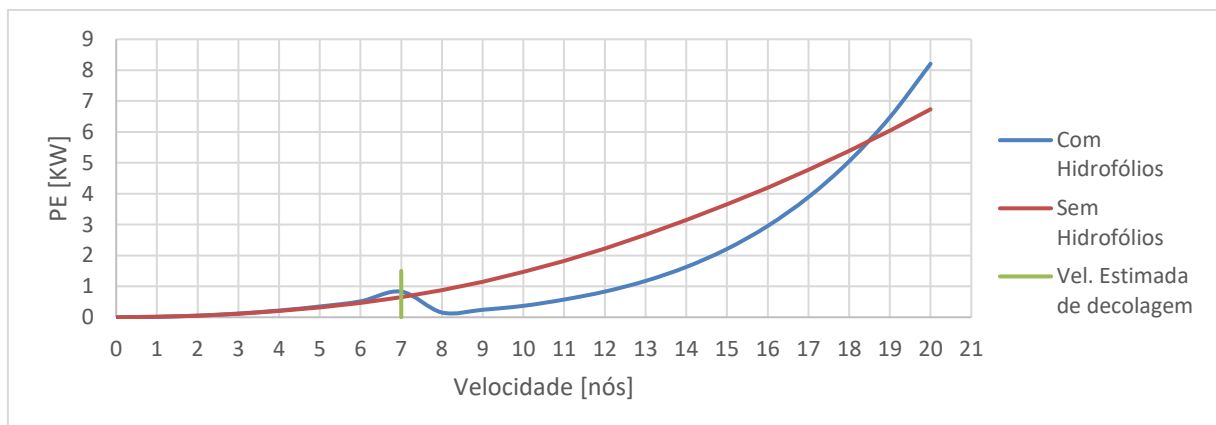
Figura 23 – Arrasto do monocasco



Fonte: Autor (2024).

Conseqüentemente, com os valores de arrasto fornecido foi possível representar, conforme na Figura 24, a potência efetiva necessária para navegação do monocasco com os hidrofólios.

Figura 24 – Potência efetiva necessária



Fonte: Autor (2024).

O valor da potência efetiva necessária para navegação do monocasco sem os hidrofólios, foi obtida com a equipe Babitonga, conforme representado no Anexo A deste estudo.

O ensaio de resistência ao avanço do monocasco foi realizado utilizando o método empírico de Savitsky, implementado no software Maxsurf Resistance. O modelo analisado consistiu exclusivamente do casco nu, sem a inclusão de apêndices ou sistemas auxiliares. Essa abordagem foi adotada devido à necessidade de obter resultados confiáveis para baixas velocidades.

A decisão de não utilizar o software Orca3D para esta análise deve-se à limitação do mesmo em fornecer valores confiáveis de resistência ao avanço apenas a partir de 10 nós. Essa característica gerava incertezas significativas para a análise de desempenho em velocidades inferiores, que são de grande relevância no contexto do projeto.

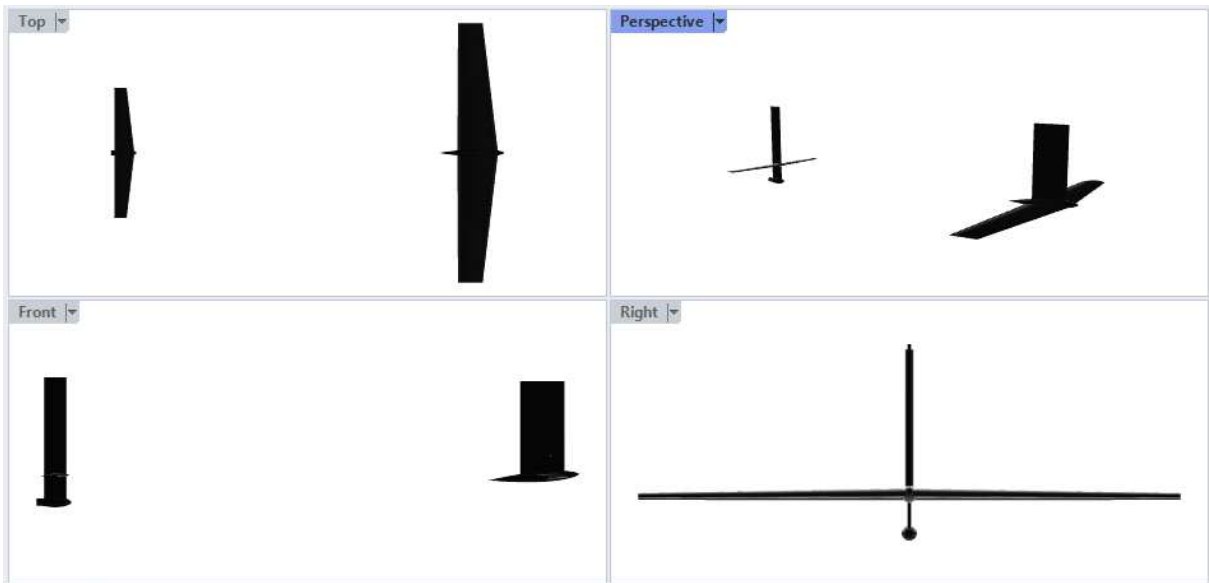
Além disso, os resultados obtidos para o monocasco nu e para o modelo equipado com hidrofólios foram comparados e somados, constituindo uma base de dados sólida para futuras melhorias e ajustes em trabalhos subsequentes.

4.3. MODELAGEM DOS HIDROFÓLIOS

Finalizada a validação da ferramenta, aplicando o estudo de caso do livro Principles of Yacht Design de Eliasson; Larsson e Orych (2022), foi possível a realização da modelagem dos hidrofólios e suporte, via software Rhinoceros.

Respeitando os parâmetros definidos, os hidrofólios e suportes do monocasco da equipe Babitonga, podem ser observados na Figura 25 a seguir, nas seguintes vistas: superior, isométrica, frontal (de proa a popa) e lateral (de boreste a bombordo).

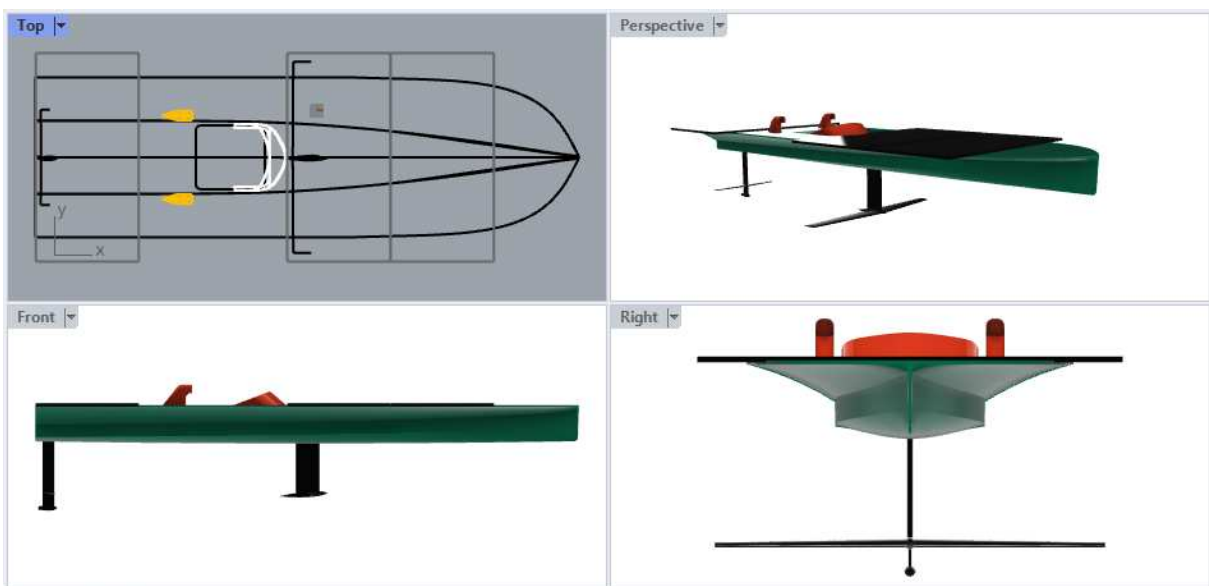
Figura 25 – Hidrofólios e suportes do monocasco



Fonte: Autor (2024).

Partindo desta caracterização, foi empregado a modelagem, dos hidrofólios e suportes, no monocasco da equipe Babitonga, vide Figura 26, lembrando que todas as dimensões e parâmetros foram obtidos via ferramenta desenvolvida, e, os resultados apresentados no Apêndice E, além da validação da ferramenta, aplicando-a no estudo de caso do livro Principles of Yacht Design de Eliasson; Larsson e Orych (2022).

Figura 26 – Hidrofólios e suportes integrados ao monocasco



Fonte: Autor (2024).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto de hidrofólios para o barco solar Sambaqui da equipe Babitonga, que demonstra um avanço significativo em termos de eficiência energética e desempenho. A análise detalhada e a modelagem 3D permitiram determinar os parâmetros iniciais para os hidrofólios, que foram validados por meio do estudo de caso livro Principles of Yacht Design de Eliasson; Larsson e Orych (2022).

A principal vantagem observada foi a diminuição substancial da resistência ao avanço. Os testes de equilíbrio vertical e dos momentos de rolagem e arfagem do monocasco confirmaram a eficácia do projeto, garantindo que a distribuição de forças fosse adequada.

A modelagem dos hidrofólios, incorporando perfis otimizados e ângulos de ataque específicos, resultou em uma configuração que maximiza a relação C_L/C_D , conforme indicado pelos coeficientes C_L e C_D calculados. Além disso, a economia de energia proporcionada pelos hidrofólios reforça a competitividade do monocasco em competições, alinhando-se com os objetivos da equipe Babitonga de criar uma embarcação veloz e estável.

Futuras iterações e testes contínuos podem ainda aprimorar este projeto, visto que a aplicação de uma análise estrutural sofisticada pode otimizar ainda mais o desenvolvimento da ferramenta.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS E LIMITES DA FERRAMENTA

Devido à aplicabilidade da metodologia desenvolvida neste estudo, existem diversos temas que podem ser estudados em projetos futuros. Dentre os quais é possível citar:

1. Comparar outros métodos de cálculo para hidrofólios, esses métodos podem proporcionar uma análise mais detalhada e precisa do comportamento hidrodinâmico dos hidrofólios em diferentes condições operacionais, possibilitando melhorias no desempenho e otimização do

- projeto. A utilização dessas abordagens também permitiria avaliar com maior rigor o impacto de variáveis como o ângulo de ataque, a cavitação e a interação com a embarcação em movimento;
2. Aprimorar a ferramenta desenvolvida em Excel para diferentes perfis de asa, além da variação de ângulo de ataque do hidrofólio de meia-nau, por meio de flaps, e perfis NACA assimétricos;
 3. Estudar os efeitos hidrodinâmicos causados na transição do regime dos hidrofólios submersos, para então a decolagem e depois planeio, otimizando os valores fixados para operação da ferramenta;
 4. Avaliar as modificações no equilíbrio da embarcação como um todo, considerando tanto o monocasco quanto o hidrofólio. Isso incluiria a análise integrada de como a aplicação do hidrofólio impacta o centro de massa, a estabilidade longitudinal, o trim e a distribuição de cargas da embarcação. A consideração dessas modificações permitirá uma compreensão mais abrangente do comportamento dinâmico do sistema, garantindo que os ajustes no hidrofólio não comprometam a segurança ou o desempenho da embarcação de forma geral;
 5. Realizar experimentos voltados para a avaliação das modificações no equilíbrio da embarcação como um todo, considerando a interação entre o monocasco e os hidrofólios. Esses experimentos poderiam incluir ensaios em tanques de provas ou testes em campo, com o objetivo de analisar como a instalação dos hidrofólios afeta fatores como o centro de gravidade, o trim, a estabilidade estática e dinâmica, e a distribuição de forças ao longo da estrutura. Os resultados desses estudos experimentais forneceriam dados empíricos valiosos para validar e refinar os modelos teóricos utilizados;
 6. Avaliar a influência da elasticidade do material e da estrutura dos hidrofólios no desempenho e na estabilidade da embarcação. Ensaios físicos e simulações poderiam ser conduzidos para investigar como a flexibilidade do material impacta fatores como distribuição de cargas, resistência à fadiga, vibrações e eficiência hidrodinâmica em diferentes condições operacionais.

Dentre os limites da ferramenta desenvolvida, para o emprego correto da mesma, são destacados os pontos:

1. A ferramenta foi projetada para trabalhar exclusivamente com hidrofólios de formato de asa delta, uma configuração específica que pode não ser aplicável a outras geometrias de hidrofólios;
2. A ferramenta considera apenas hidrofólios completamente submersos, desconsiderando qualquer interação entre a parte submersa e a parte emergente;
3. A ferramenta não contempla variações no ângulo de ataque, limitando os cálculos ao comportamento de hidrofólios com ângulo fixo. Na prática, o ângulo de ataque pode variar dependendo das condições de operação;
4. A ferramenta não leva em conta a presença de flaps nos hidrofólios, um fator importante em projetos que exigem maior controle sobre a sustentação e o arrasto. Flaps são comumente utilizados para alterar o ângulo de ataque de forma controlada, aumentando a flexibilidade do sistema e possibilitando ajustes para otimizar a performance em diferentes condições de operação;
5. Simplificação de modelos e parâmetros adotados durante o desenvolvimento da ferramenta visa facilitar a análise para o projeto específico, mas limita sua aplicabilidade a contextos mais complexos.

REFERÊNCIAS

- AIRFOILaTOOLS. **Airfoiltools**. Disponível em: <http://airfoiltools.com/>. Acesso em: 04 set. 2024.
- BEAVER, B.; ZSELECZKY, J. Full Scale Measurements on a Hydrofoil International Moth. Annapolis, MD: **Chesapeake Sailing Yacht Symposium**, Annapolis, 2009.
- DONINI, M. S. **Escoamento sobre perfil aerodinâmico NACA 4412**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.
- EQUIPE BABITONGA. **Equipe Barco Solar Babitonga**. Disponível em: <https://babitonga.webnode.page/>. Acesso em: 16 nov. 2023.
- FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. Nova Iorque, NY: Cambridge University Press, 2005.
- FINDLAY, M. W.; TURNOCK, S. R. Development and use of a velocity prediction program to compare the effects of changes to foil arrangement on a hydro-foiling Moth dinghy. Proceedings - Innovation in High Performance Sailing Yachts, **Royal Institution of Naval Architects**, p. 43-55, 2008.
- FOSSATI, F. **Aero-hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts: The Science Behind Sailing Yachts and their Design**. 1. ed. United Kingdom: Adlard Coles Nautical, 2009.
- HOLLUP, Y. L. **Avaliação de alternativa hidroviária para o transporte de passageiros no Rio de Janeiro (RJ): Ligação entre os aeroportos Galeão e Santos Dumont**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- HOERNER, S. **Fluid Dynamic Drag**. Albuquerque, NM, 1965.
- MEYER, J.; WILKINS, J. **Hydrofoil development and applications**. Washington, D.C.: Marine, 1992.
- LAMB, T. **Ship design and construction**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003. v. 1 e 2.
- LARSSON, L.; ELIASSON E. R.; ORYCH, M. **Principles of Yacht Design**. 5.ed. United Kingdom: British Library, 2022.
- MATVEEV, K.; DUNCAN, R. Development of the tool for predicting hydrofoil system performance and simulating motion of hydrofoil-assisted boats, **Institute of Physics and Technology**, v.1, n.1, p. 1-4, 2005.
- WELTNER, K. *et al.* A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 1-15, dez. 2001.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 6. ed. United States: University of Rhode Island, 2011.

APÊNDICE A – Razão C_L/C_D

Nesta seção é apresentado o cálculo da razão C_L/C_D , proveniente do desenvolvimento da ferramenta para o presente estudo, Figura 27.

Figura 27 – Cálculo da ferramenta para razão C_L/C_D

VALIDAÇÃO C_L/C_D HIDROFÓLIO										
Legenda										
	Parâmetros definidos pelo autor				DADOS FIXOS	SIGLA	VALOR	UNID		
	Valores obtidos do Perfil NACA ensaiados em túnel de vento				Densidade Água	RhoAgua	1025	kg/m ³		
					Gravidade	g	9,81	m/s ²		
					Viscosidade Cinemática	Vcin	1,00E-06	m ² /s		

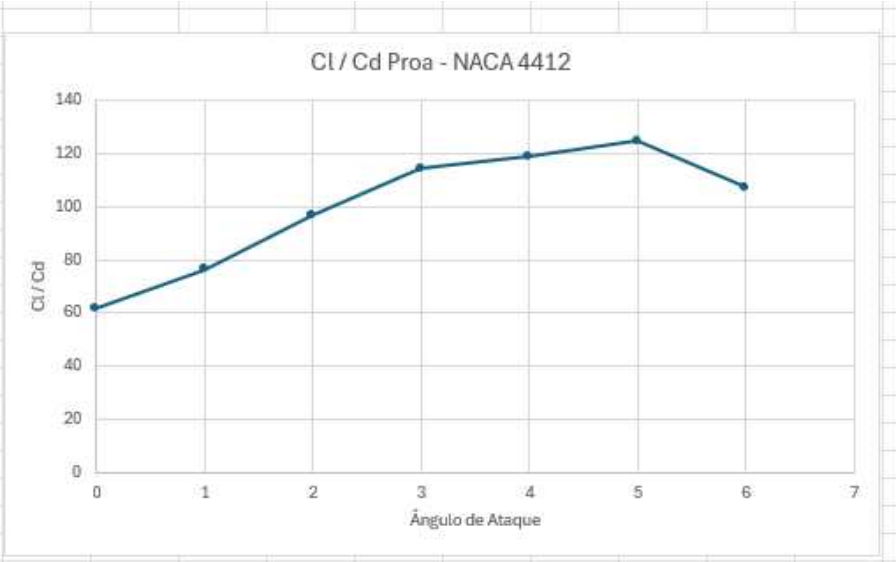
Meia-nau					Popa				
DADOS	SIGLA	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO	DADOS	SIGLA	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO
Envergadura Total	ET	2,100	m		Envergadura Total	ET	1,050	m	
Comprimento C1	CompC1	0,325	m		Comprimento C1	CompC1	0,163	m	
Comprimento C2	CompC2	0,200	m		Comprimento C2	CompC2	0,100	m	
Espessura t1	t1	0,039	m		Espessura t1	t1	0,020	m	
Espessura t2	t2	0,024	m		Espessura t2	t2	0,012	m	
Corda Média	CM	0,263	m		Corda Média	CM	0,131	m	
Área Projetada	Aproj	0,551	m ²		Área Projetada	Aproj	0,138	m ²	
Relação de Aspecto	AR	8			Relação de Aspecto	AR	8		
Relação de Conicidade	TR	0,62		OK	Relação de Conicidade	TR	0,62		OK
Âng Borda Ataque	AngBorda	6,79	Graus	OK	Âng Borda Ataque	AngBorda	6,79	Graus	OK
Perfil NACA		4412			Perfil NACA		4412		
Número de Reynolds		1,00E+06			Número de Reynolds		1,00E+06		
Graus	Coefficiente	Valor			Graus	Coefficiente	Valor		
0	Cl	0,47730			0	Cl	0,48330		
	Cd	0,00775				Cd	0,00678		
1	Cl	0,58840			1	Cl	0,58420		
	Cd	0,00771				Cd	0,00594		
2	Cl	0,69640			2	Cl	0,70550		
	Cd	0,00721				Cd	0,00622		
3	Cl	0,80760			3	Cl	0,84050		
	Cd	0,00706				Cd	0,00681		
4	Cl	0,91420			4	Cl	0,92100		
	Cd	0,00769				Cd	0,00722		
5	Cl	1,10350			5	Cl	1,02540		
	Cd	0,00886				Cd	0,00797		
6	Cl	1,10820			6	Cl	1,12800		
	Cd	0,01035				Cd	0,00884		

Vel. Nós	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Vel. m/s	0,0	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29	
Reynolds	0,00E+00	1,67E+05	3,34E+05	5,02E+05	6,69E+05	8,36E+05	1,00E+06	1,17E+06	1,34E+06	1,50E+06	1,67E+06	1,84E+06	2,01E+06	2,17E+06	2,34E+06	2,51E+06	2,67E+06	2,84E+06	3,01E+06	3,18E+06	3,34E+06	
Alfa																						
	0	0,00000	0,07980	0,15959	0,23939	0,31918	0,39898	0,47877	0,55857	0,63836	0,71816	0,79796	0,87775	0,95755	1,03734	1,11714	1,19693	1,27673	1,35652	1,43632	1,51611	1,59591
	1	0,00000	0,09837	0,19674	0,29511	0,39348	0,49185	0,59022	0,68859	0,78696	0,88532	0,98369	1,08206	1,18043	1,27880	1,37717	1,47554	1,57391	1,67228	1,77065	1,86902	1,96739
	2	0,00000	0,11642	0,23285	0,34927	0,46570	0,58212	0,69855	0,81497	0,93140	1,04782	1,16425	1,28067	1,39710	1,51352	1,62995	1,74637	1,86280	1,97922	2,09565	2,21207	2,32850
	3	0,00000	0,13502	0,27003	0,40505	0,54006	0,67508	0,81009	0,94511	1,08012	1,21514	1,35015	1,48517	1,62019	1,75520	1,89022	2,02523	2,16025	2,29526	2,43028	2,56529	2,70031
	4	0,00000	0,15284	0,30567	0,45851	0,61135	0,76418	0,91702	1,06986	1,22270	1,37553	1,52837	1,68121	1,83404	1,98688	2,13972	2,29255	2,44539	2,59823	2,75106	2,90390	3,05674
	5	0,00000	0,18448	0,36897	0,55345	0,73794	0,92242	1,10691	1,29139	1,47587	1,66036	1,84484	2,02933	2,21381	2,39830	2,58278	2,76726	2,95175	3,13623	3,32072	3,50520	3,68969
	6	0,00000	0,18527	0,37054	0,55581	0,74108	0,92635	1,11162	1,29689	1,48216	1,66743	1,85270	2,03797	2,22324	2,40851	2,59378	2,77905	2,96432	3,14959	3,33486	3,52013	3,70540
Alfa																						
	0	0,00000	0,00130	0,00259	0,00389	0,00518	0,00648	0,00777	0,00907	0,01037	0,01166	0,01296	0,01425	0,01555	0,01684	0,01814	0,01943	0,02073	0,02203	0,02332	0,02462	0,02591
	1	0,00000	0,00129	0,00258	0,00387	0,00516	0,00644	0,00773	0,00902	0,01031	0,01160	0,01289	0,01418	0,01547	0,01676	0,01805	0,01933	0,02062	0,02191	0,02320	0,02449	0,02578
	2	0,00000	0,00121	0,00241	0,00362	0,00482	0,00603	0,00723	0,00844	0,00964	0,01085	0,01205	0,01326	0,01446	0,01567	0,01688	0,01808	0,01929	0,02049	0,02170	0,02290	0,02411
	3	0,00000	0,00118	0,00236	0,00354	0,00472	0,00590	0,00708	0,00826	0,00944	0,01062	0,01180	0,01298	0,01416	0,01534	0,01652	0,01770	0,01888	0,02007	0,02125	0,02243	0,02361
	4	0,00000	0,00129	0,00257	0,00386	0,00514	0,00643	0,00771	0,00900	0,01028	0,01157	0,01286	0,01414	0,01543	0,01671	0,01800	0,01928	0,02057	0,02186	0,02314	0,02443	0,02571
	5	0,00000	0,00148	0,00296	0,00444	0,00592	0,00741	0,00889	0,01037	0,01185	0,01333	0,01481	0,01629	0,01777	0,01926	0,02074	0,02222	0,02370	0,02518	0,02666	0,02814	0,02962
	6	0,00000	0,00173	0,00346	0,00519	0,00692	0,00865	0,01038	0,01211	0,01384	0,01557	0,01730	0,01903	0,02076	0,02249	0,02422	0,02595	0,02769	0,02942	0,03115	0,03288	0,03461

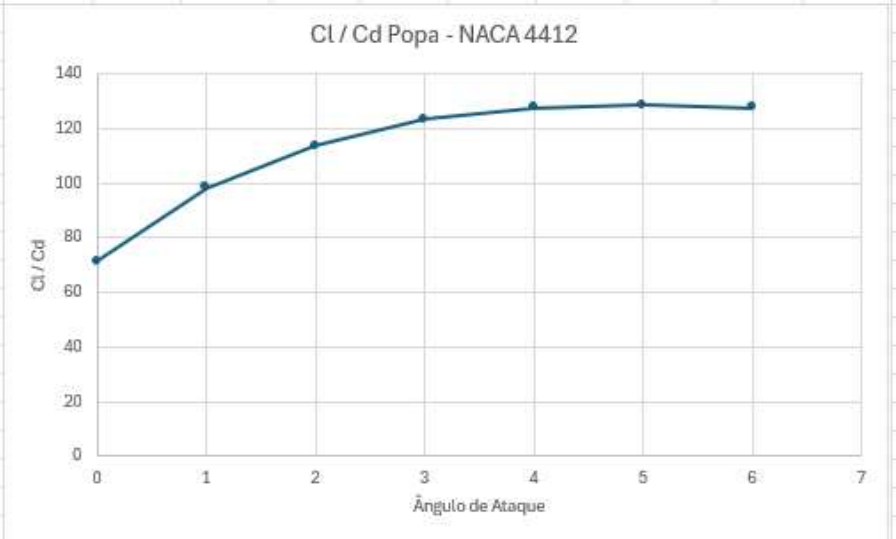
Alfa	Cl																				
0	0,00000	0,08080	0,16160	0,24240	0,32319	0,40399	0,48479	0,56559	0,64639	0,72719	0,80799	0,88878	0,96958	1,05038	1,13118	1,21198	1,29278	1,37358	1,45438	1,53517	1,61597
1	0,00000	0,09767	0,19533	0,29300	0,39067	0,48834	0,58600	0,68367	0,78134	0,87900	0,97667	1,07434	1,17201	1,26967	1,36734	1,46501	1,56267	1,66034	1,75801	1,85568	1,95334
2	0,00000	0,11795	0,23589	0,35384	0,47178	0,58973	0,70768	0,82562	0,94357	1,06152	1,17946	1,29741	1,41535	1,53330	1,65125	1,76919	1,88714	2,00509	2,12303	2,24098	2,35892
3	0,00000	0,14052	0,28103	0,42155	0,56206	0,70258	0,84309	0,98361	1,12413	1,26464	1,40516	1,54567	1,68619	1,82670	1,96722	2,10774	2,24825	2,38877	2,52928	2,66980	2,81031
4	0,00000	0,15397	0,30795	0,46192	0,61590	0,76987	0,92384	1,07782	1,23179	1,38576	1,53974	1,69371	1,84769	2,00166	2,15563	2,30961	2,46358	2,61755	2,77153	2,92550	3,07948
5	0,00000	0,17143	0,34285	0,51428	0,68571	0,85714	1,02856	1,19999	1,37142	1,54285	1,71427	1,88570	2,05713	2,22856	2,39998	2,57141	2,74284	2,91427	3,08569	3,25712	3,42855
6	0,00000	0,18858	0,37716	0,56574	0,75432	0,94290	1,13148	1,32006	1,50864	1,69722	1,88580	2,07438	2,26296	2,45154	2,64012	2,82870	3,01728	3,20586	3,39444	3,58302	3,77160

Alfa	Cd																				
0	0,00000	0,00113	0,00227	0,00340	0,00453	0,00567	0,00680	0,00793	0,00907	0,01020	0,01133	0,01247	0,01360	0,01474	0,01587	0,01700	0,01814	0,01927	0,02040	0,02154	0,02267
1	0,00000	0,00099	0,00199	0,00298	0,00397	0,00497	0,00596	0,00695	0,00794	0,00894	0,00993	0,01092	0,01192	0,01291	0,01390	0,01490	0,01589	0,01688	0,01788	0,01887	0,01986
2	0,00000	0,00104	0,00208	0,00312	0,00416	0,00520	0,00624	0,00728	0,00832	0,00936	0,01040	0,01144	0,01248	0,01352	0,01456	0,01560	0,01664	0,01768	0,01872	0,01976	0,02080
3	0,00000	0,00114	0,00228	0,00342	0,00455	0,00569	0,00683	0,00797	0,00911	0,01025	0,01139	0,01252	0,01366	0,01480	0,01594	0,01708	0,01822	0,01935	0,02049	0,02163	0,02277
4	0,00000	0,00121	0,00241	0,00362	0,00483	0,00604	0,00724	0,00845	0,00966	0,01086	0,01207	0,01328	0,01448	0,01569	0,01690	0,01811	0,01931	0,02052	0,02173	0,02293	0,02414
5	0,00000	0,00133	0,00266	0,00400	0,00533	0,00666	0,00799	0,00933	0,01066	0,01199	0,01332	0,01466	0,01599	0,01732	0,01865	0,01999	0,02132	0,02265	0,02398	0,02532	0,02665
6	0,00000	0,00148	0,00296	0,00443	0,00591	0,00739	0,00887	0,01035	0,01182	0,01330	0,01478	0,01626	0,01773	0,01921	0,02069	0,02217	0,02365	0,02512	0,02660	0,02808	0,02956

Alfa	Cl/Cd
0	61,5871
1	76,3165
2	96,5881
3	114,3909
4	118,8817
5	124,5485
6	107,0725



Alfa	Cl/Cd
0	71,2832
1	98,3502
2	113,4244
3	123,4214
4	127,5623
5	128,6575
6	127,6018



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE B – Cálculo de sustentação

Nesta seção é apresentado o cálculo da sustentação, proveniente do desenvolvimento da ferramenta para o presente estudo, Figura 28.

Figura 28 – Cálculo da ferramenta para sustentação

DADOS	VALOR	UNID	OBS
Peso atual do monocasco	230	kg	Valor obtido por informações da Equipe Babitonga
	2256,30	N	
Velocidade estimada de decolagem	7	Nós	Definido pelo autor
Força de sustentação	2769,60	N	Corrigir conforme ajuste do Cl
Ângulo de ataque hidrofólio de meia-na	3	Graus	Corrigir conforme ajuste do Cl

Meia-Nau				Popa			
DADOS	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO	DADOS	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO
Alfa	3	Graus		Alfa	0	Graus	Sust. no hidrofólio de meia-nau
Área	0,551	m ²	OK	Área	0,138	m ²	OK
Lift Total - velocidade decolagem	2769,60 N			Lift Total - velocidade decolagem	414,36 N		
Lift Total - máxima velocidade (estimada)	64597,15 N			Lift Total - máxima velocidade (estimada)	9664,38 N		

Alfa	Cl																				
0	0,0000	0,0798	0,1596	0,2394	0,3192	0,3990	0,4788	0,5586	0,6384	0,7182	0,7980	0,8778	0,9575	1,0373	1,1171	1,1969	1,2767	1,3565	1,4363	1,5161	1,5959
1	0,0000	0,0964	0,1967	0,2961	0,3935	0,4918	0,5902	0,6886	0,7870	0,8853	0,9837	1,0821	1,1804	1,2788	1,3772	1,4755	1,5739	1,6723	1,7706	1,8690	1,9674
2	0,0000	0,1164	0,2328	0,3493	0,4657	0,5821	0,6985	0,8150	0,9314	1,0478	1,1642	1,2807	1,3971	1,5135	1,6299	1,7464	1,8628	1,9792	2,0956	2,2121	2,3285
3	0,0000	0,1350	0,2700	0,4050	0,5401	0,6751	0,8101	0,9451	1,0801	1,2151	1,3502	1,4852	1,6202	1,7552	1,8902	2,0252	2,1602	2,2953	2,4303	2,5653	2,7003
4	0,0000	0,1528	0,3057	0,4585	0,6113	0,7642	0,9170	1,0699	1,2227	1,3755	1,5284	1,6812	1,8340	1,9869	2,1397	2,2926	2,4454	2,5982	2,7511	2,9039	3,0567
5	0,0000	0,1845	0,3690	0,5535	0,7379	0,9224	1,1069	1,2914	1,4759	1,6604	1,8448	2,0293	2,2138	2,3983	2,5828	2,7673	2,9517	3,1362	3,3207	3,5052	3,6897
6	0,0000	0,1853	0,3705	0,5558	0,7411	0,9264	1,1116	1,2969	1,4822	1,6674	1,8527	2,0380	2,2232	2,4085	2,5938	2,7791	2,9643	3,1496	3,3349	3,5201	3,7054

Alfa	Cl Corrigido																				
0	0,0000	0,0638	0,1277	0,1915	0,2553	0,3192	0,3830	0,4469	0,5107	0,5745	0,6384	0,7022	0,7660	0,8299	0,8937	0,9575	1,0214	1,0852	1,1491	1,2129	1,2767
1	0,0000	0,0787	0,1574	0,2361	0,3148	0,3935	0,4722	0,5509	0,6296	0,7083	0,7870	0,8657	0,9443	1,0230	1,1017	1,1804	1,2591	1,3378	1,4165	1,4952	1,5739
2	0,0000	0,0931	0,1863	0,2794	0,3726	0,4657	0,5588	0,6520	0,7451	0,8383	0,9314	1,0245	1,1177	1,2108	1,3040	1,3971	1,4902	1,5834	1,6765	1,7697	1,8628
3	0,0000	0,1080	0,2160	0,3240	0,4320	0,5401	0,6481	0,7561	0,8641	0,9721	1,0801	1,1881	1,2961	1,4042	1,5122	1,6202	1,7282	1,8362	1,9442	2,0522	2,1602
4	0,0000	0,1223	0,2446	0,3668	0,4891	0,6113	0,7336	0,8559	0,9782	1,1004	1,2227	1,3450	1,4672	1,5895	1,7118	1,8340	1,9563	2,0786	2,2009	2,3231	2,4454
5	0,0000	0,1476	0,2952	0,4428	0,5903	0,7379	0,8855	1,0331	1,1807	1,3283	1,4759	1,6235	1,7710	1,9186	2,0662	2,2138	2,3614	2,5090	2,6566	2,8042	2,9517
6	0,0000	0,1482	0,2964	0,4446	0,5929	0,7411	0,8893	1,0375	1,1857	1,3339	1,4822	1,6304	1,7786	1,9268	2,0750	2,2232	2,3715	2,5197	2,6679	2,8161	2,9643

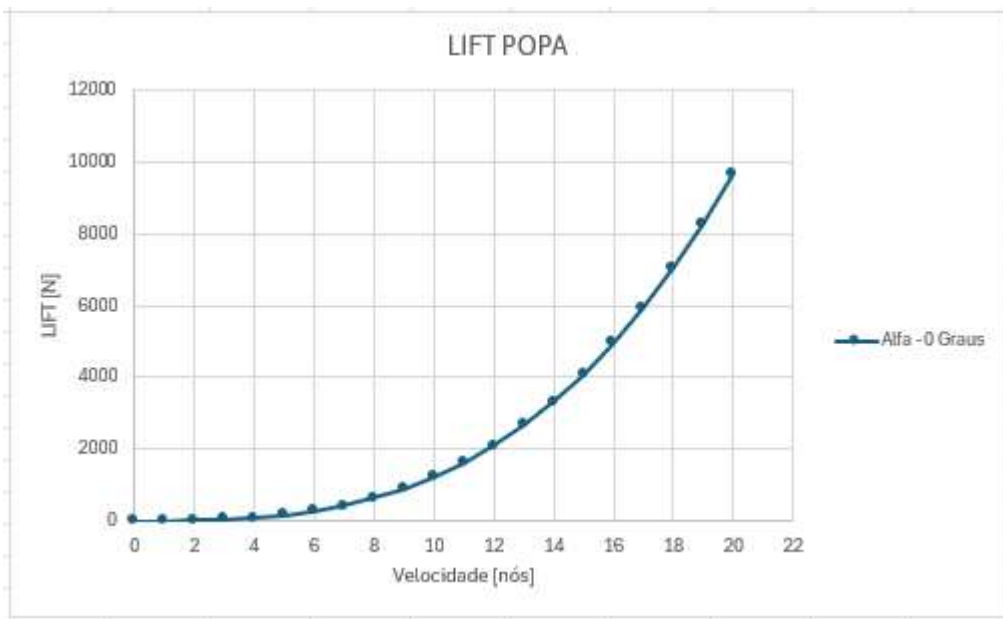
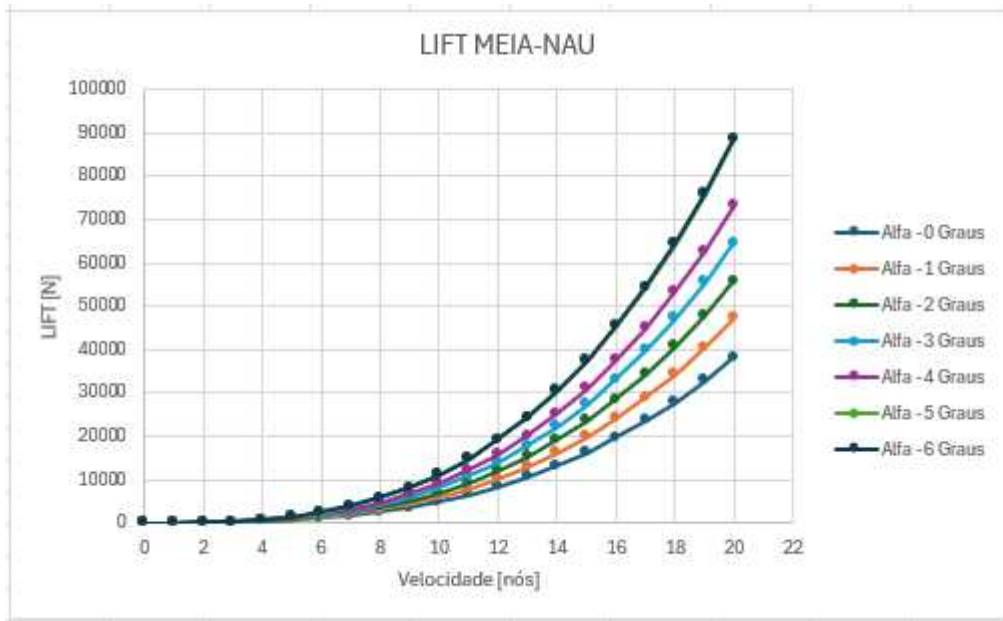
LIFT MEIA-NAU [N]																					
Vel. Nós	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel. m/s	0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Alfa																					
0	0,00	4,77	38,18	128,85	305,42	596,52	1030,79	1636,86	2443,37	3478,93	4772,20	6351,80	8246,36	10484,52	13094,91	16106,17	19546,92	23445,81	27831,46	32732,51	38177,59
1	0,00	5,88	47,06	158,84	376,51	735,38	1270,73	2017,87	3012,10	4288,72	5883,01	7830,29	10165,84	12924,98	16142,98	19855,16	24096,82	28903,24	34309,72	40351,58	47064,09
2	0,00	6,96	55,70	188,00	445,62	870,35	1503,97	2388,25	3564,97	5075,90	6962,83	9267,53	12031,77	15297,34	19106,01	23499,55	28519,75	34208,38	40607,23	47758,05	55702,64
3	0,00	8,07	64,60	218,02	516,78	1009,33	1744,12	2769,60	4134,22	5896,41	8074,64	10747,35	13952,98	17738,99	22156,82	27251,92	33073,74	39670,72	47091,32	55383,98	64597,15
4	0,00	9,14	73,12	246,79	584,99	1142,56	1974,34	3135,18	4679,92	6663,40	9140,46	12165,96	15794,72	20081,60	25081,43	30849,07	37439,34	44907,10	53307,19	62694,44	73123,71
5	0,00	11,03	88,27	297,89	706,12	1379,14	2383,16	3784,37	5548,97	8043,16	11033,15	14685,12	19065,28	24239,82	30274,95	37236,87	45191,77	54205,85	64345,31	75676,35	88265,17
6	0,00	11,08	88,64	299,16	709,13	1385,02	2393,31	3800,49	5673,03	8077,42	11080,14	14747,66	19146,48	24343,06	30403,90	37395,47	45384,25	54436,72	64619,37	75998,67	88641,11

Alfa	Cl																				
0	0,0000	0,0608	0,1616	0,2424	0,3232	0,4040	0,4848	0,5656	0,6464	0,7272	0,8080	0,8888	0,9696	1,0504	1,1312	1,2120	1,2928	1,3736	1,4544	1,5352	1,6160
1	0,0000	0,0977	0,1953	0,2930	0,3907	0,4883	0,5860	0,6837	0,7813	0,8790	0,9767	1,0743	1,1720	1,2697	1,3673	1,4650	1,5627	1,6603	1,7580	1,8557	1,9533
2	0,0000	0,1179	0,2359	0,3538	0,4718	0,5897	0,7077	0,8256	0,9436	1,0615	1,1795	1,2974	1,4154	1,5333	1,6512	1,7692	1,8871	2,0051	2,1230	2,2410	2,3589
3	0,0000	0,1405	0,2810	0,4215	0,5621	0,7026	0,8431	0,9836	1,1241	1,2646	1,4052	1,5457	1,6862	1,8267	1,9672	2,1077	2,2483	2,3888	2,5293	2,6698	2,8103
4	0,0000	0,1540	0,3079	0,4619	0,6159	0,7699	0,9238	1,0778	1,2318	1,3858	1,5397	1,6937	1,8477	2,0017	2,1556	2,3096	2,4636	2,6176	2,7715	2,9255	3,0795
5	0,0000	0,1714	0,3429	0,5143	0,6857	0,8571	1,0286	1,2000	1,3714	1,5428	1,7143	1,8857	2,0571	2,2286	2,4000	2,5714	2,7428	2,9143	3,0857	3,2571	3,4285
6	0,0000	0,1886	0,3772	0,5657	0,7543	0,9429	1,1315	1,3201	1,5086	1,6972	1,8858	2,0744	2,2630	2,4515	2,6401	2,8287	3,0173	3,2059	3,3944	3,5830	3,7716

Alfa	Cl Corrigido																				
0	0,0000	0,0646	0,1293	0,1939	0,2586	0,3232	0,3878	0,4525	0,5171	0,5818	0,6464	0,7110	0,7757	0,8403	0,9049	0,9696	1,0342	1,0989	1,1635	1,2281	1,2928
1	0,0000	0,0781	0,1563	0,2344	0,3125	0,3907	0,4688	0,5469	0,6251	0,7032	0,7813	0,8595	0,9376	1,0157	1,0939	1,1720	1,2501	1,3283	1,4064	1,4845	1,5627
2	0,0000	0,0944	0,1887	0,2831	0,3774	0,4718	0,5661	0,6605	0,7549	0,8492	0,9436	1,0379	1,1323	1,2266	1,3210	1,4154	1,5097	1,6041	1,6984	1,7928	1,8871
3	0,0000	0,1124	0,2248	0,3372	0,4497	0,5621	0,6745	0,7869	0,8993	1,0117	1,1241	1,2365	1,3490	1,4614	1,5738	1,6862	1,7986	1,9110	2,0234	2,1358	2,2483
4	0,0000	0,1232	0,2464	0,3696	0,4927	0,6159	0,7391	0,8623	0,9854	1,1086	1,2318	1,3550	1,4781	1,6013	1,7245	1,8477	1,9709	2,0940	2,2172	2,3404	2,4636
5	0,0000	0,1371	0,2743	0,4114	0,5486	0,6857	0,8229	0,9600	1,0971	1,2343	1,3714	1,5086	1,6457	1,7828	1,9200	2,0571	2,1943	2,3314	2,4686	2,6057	2,7428
6	0,0000	0,1509	0,3017	0,4526	0,6035	0,7543	0,9052	1,0560	1,2069	1,3578	1,5086	1,6595	1,8104	1,9612	2,1121	2,2630	2,4138	2,5647	2,7156	2,8664	3,0173

		LIFT POPA [N]																				
Vel. Nós		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel. m/s		0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Alfa																						
0	0,00	1,21	9,66	32,62	77,32	151,01	260,94	414,36	618,52	880,67	1208,05	1607,91	2087,51	2654,08	3314,88	4077,16	4948,16	5935,14	7045,33	8285,99	9664,38	
1	0,00	1,46	11,68	39,43	93,46	182,53	315,42	500,87	747,65	1064,53	1460,25	1943,60	2523,32	3208,18	4006,94	4928,36	5981,20	7174,23	8516,21	10015,89	11682,04	
2	0,00	1,76	14,11	47,61	112,86	220,43	380,91	604,86	902,89	1285,56	1763,45	2347,16	3047,25	3874,31	4836,92	5951,66	7223,11	8663,85	10284,46	12095,53	14107,63	
3	0,00	2,10	16,81	56,72	134,46	262,61	453,79	720,61	1075,66	1531,55	2100,90	2796,29	3630,35	4615,67	5764,86	7090,53	8605,27	10321,71	12252,43	14410,05	16807,18	
4	0,00	2,30	18,42	62,16	147,34	287,76	497,26	789,62	1178,68	1678,24	2302,11	3064,11	3978,05	5057,74	6317,00	7769,63	9429,46	11310,28	13425,92	15790,19	18416,91	
5	0,00	2,56	20,50	69,20	164,04	320,38	553,62	879,13	1312,29	1868,48	2563,07	3411,45	4428,98	5631,06	7033,06	8650,36	10498,33	12592,36	14947,82	17580,09	20504,55	
6	0,00	2,82	22,56	76,13	180,45	352,44	609,02	967,10	1443,60	2055,43	2819,53	3752,79	4872,14	6194,50	7736,78	9515,90	11548,78	13852,33	16443,48	19339,13	22556,21	

		LIFT TOTAL HIDROFÓLIOS																				
Vel. Nós		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel. m/s		0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Alfa																						
0	0,00	5,98	47,84	161,47	382,74	747,53	1291,73	2051,22	3061,89	4359,60	5980,25	7959,71	10333,86	13138,60	16409,79	20183,33	24495,08	29380,94	34876,79	41018,50	47841,96	
1	0,00	7,09	56,73	191,46	453,83	886,38	1531,67	2432,23	3630,62	5169,38	7091,06	9438,20	12253,35	15579,06	19457,86	23932,32	29044,98	34838,37	41355,05	48637,57	56728,47	
2	0,00	8,17	65,37	220,61	522,94	1021,36	1764,91	2802,61	4183,49	5956,57	8170,88	10875,44	14119,28	17951,42	22420,89	27576,71	33467,91	40143,52	47652,56	56044,05	65367,02	
3	0,00	9,28	74,26	250,63	594,09	1160,34	2005,06	3183,96	4752,74	6767,08	9282,69	12355,26	16040,49	20394,07	25471,70	31329,08	38021,90	45605,86	54136,65	63669,97	74261,52	
4	0,00	10,35	82,79	279,41	662,30	1293,56	2235,28	3549,54	5298,44	7544,06	10348,51	13773,87	17882,23	22735,68	28396,32	34926,23	42387,50	50842,24	60352,52	70980,44	82786,09	
5	0,00	12,24	97,93	330,51	783,44	1530,15	2644,10	4198,73	6267,49	8923,83	12241,19	16293,03	21152,78	26893,90	33589,83	41314,03	50139,93	60140,98	71390,64	83962,34	97929,55	
6	0,00	12,29	98,31	331,78	786,44	1536,02	2654,25	4214,85	6291,55	8958,09	12288,19	16355,57	21233,98	26997,14	33718,78	41472,63	50332,41	60371,85	71664,70	84284,66	98305,48	



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE C – Cálculos de arrasto

Nesta seção é apresentado os cálculos de arrasto, proveniente do desenvolvimento da ferramenta para o presente estudo, na Figura 29 é representado o cálculo de arrasto com os hidrofólios submersos, na Figura 30, em regime de planeio e na Figura 31, a união dos fenômenos.

Figura 29 – Cálculo da ferramenta para arrasto em regime submerso

ARRASTO HIDROFÓLIO SUBMERSO			
Legenda			
		Parâmetros definidos pelo autor	
		Valores obtidos do Perfil NACA ensaiados em túnel de vento	
Variáveis para cálculo Arrasto			
DADOS	SIGLA	OBSERVAÇÕES	
Arrasto de Perfil	Dp	Válido para Hidrofólio e Suporte	
Arrasto Induzido	Di	Findlay and Turnock (2008)	Válido para Hidrofólio e Suporte
			Coeficiente de ajuste Ki
			Para Hidrofólio Ki = 1 Para Suporte Ki = 2
Arrasto de Onda / Spray	Dws	Hoerner (1965)	Válido para Suporte
			Cdws,onda = 0,30 Cdws, spray = 0,24
Arrasto de Onda	Dw	Beaver and Zseleczy (2009)	Válido para Hidrofólio
Arrasto de Junção	Dj		Válido para Hidrofólio e Suporte
Arrasto Total	Dt		

Meia-nau				Popa			
HIDROFÓLIO				HIDROFÓLIO			
DADOS	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO	DADOS	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO
Alfa	3	Graus		Alfa	0	Graus	
Área	0,551	m ²	OK	Área	0,138	m ²	OK
Área Projetada Arrasto	0,029	m ²		Área Projetada Arrasto	0,000	m ²	
SUPORTE				SUPORTE			
DADOS	SIGLA	VALOR	UNID	DADOS	SIGLA	VALOR	UNID
Comprimento Total	CT	0,58	m	Comprimento Total	CT	0,58	m
Espessura	t	0,032	m	Espessura	t	0,016	m
Corda	C	0,263	m	Corda	C	0,131	m
Área Projetada Arrasto	Aproj	0,018	m ²	Área Projetada Arrasto	Aproj	0,009	m ²
Relação de Aspecto	AR	2,2		Relação de Aspecto	AR	4,4	
Perfil NACA		0012		Perfil NACA		0012	
Número de Reynolds		1,00E+06		Número de Reynolds		1,00E+06	
	Graus	Coeficiente	Valor		Graus	Coeficiente	Valor
0		Cl	0,00000	0		Cl	0,00000
		Cd	0,02085			Cd	0,02085

Vel.Nós	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel.m/s	0,0	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Reynolds	0,00E+00	1,67E+05	3,34E+05	5,02E+05	6,69E+05	8,36E+05	1,00E+06	1,17E+06	1,34E+06	1,50E+06	1,67E+06	1,84E+06	2,01E+06	2,17E+06	2,34E+06	2,51E+06	2,67E+06	2,84E+06	3,01E+06	3,18E+06	3,34E+06
Alfa	CI Corrigido																				
0	0,0000	0,0638	0,1277	0,1915	0,2553	0,3192	0,3830	0,4469	0,5107	0,5745	0,6384	0,7022	0,7660	0,8299	0,8937	0,9575	1,0214	1,0852	1,1491	1,2129	1,2767
1	0,0000	0,0787	0,1574	0,2361	0,3148	0,3935	0,4722	0,5509	0,6296	0,7083	0,7870	0,8657	0,9443	1,0230	1,1017	1,1804	1,2591	1,3378	1,4165	1,4952	1,5739
2	0,0000	0,0931	0,1863	0,2794	0,3726	0,4657	0,5588	0,6520	0,7451	0,8383	0,9314	1,0245	1,1177	1,2108	1,3040	1,3971	1,4902	1,5834	1,6765	1,7697	1,8628
3	0,0000	0,1080	0,2160	0,3240	0,4320	0,5401	0,6481	0,7561	0,8641	0,9721	1,0801	1,1881	1,2961	1,4042	1,5122	1,6202	1,7282	1,8362	1,9442	2,0522	2,1602
4	0,0000	0,1223	0,2445	0,3668	0,4891	0,6113	0,7336	0,8559	0,9782	1,1004	1,2227	1,3450	1,4672	1,5895	1,7118	1,8340	1,9563	2,0786	2,2009	2,3231	2,4454
5	0,0000	0,1476	0,2952	0,4428	0,5903	0,7379	0,8855	1,0331	1,1807	1,3283	1,4759	1,6235	1,7710	1,9186	2,0662	2,2138	2,3614	2,5090	2,6566	2,8042	2,9517
6	0,0000	0,1482	0,2964	0,4446	0,5929	0,7411	0,8893	1,0375	1,1857	1,3339	1,4822	1,6304	1,7786	1,9268	2,0750	2,2232	2,3715	2,5197	2,6679	2,8161	2,9643

Alfa	Cd - HIDROFÓLIO																				
0	0,0000	0,0013	0,0026	0,0039	0,0052	0,0065	0,0078	0,0091	0,0104	0,0117	0,0130	0,0143	0,0155	0,0168	0,0181	0,0194	0,0207	0,0220	0,0233	0,0246	0,0259
1	0,0000	0,0013	0,0026	0,0039	0,0052	0,0064	0,0077	0,0090	0,0103	0,0116	0,0129	0,0142	0,0155	0,0168	0,0180	0,0193	0,0206	0,0219	0,0232	0,0245	0,0258
2	0,0000	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048	0,0060	0,0072	0,0084	0,0096	0,0108	0,0121	0,0133	0,0145	0,0157	0,0169	0,0181	0,0193	0,0205	0,0217	0,0229	0,0241
3	0,0000	0,0012	0,0024	0,0035	0,0047	0,0059	0,0071	0,0083	0,0094	0,0106	0,0118	0,0130	0,0142	0,0153	0,0165	0,0177	0,0189	0,0201	0,0212	0,0224	0,0236
4	0,0000	0,0013	0,0025	0,0037	0,0049	0,0061	0,0073	0,0085	0,0097	0,0109	0,0121	0,0133	0,0145	0,0157	0,0169	0,0181	0,0193	0,0205	0,0217	0,0229	0,0241
5	0,0000	0,0015	0,0030	0,0044	0,0059	0,0074	0,0089	0,0104	0,0118	0,0133	0,0148	0,0163	0,0178	0,0193	0,0207	0,0222	0,0237	0,0251	0,0267	0,0281	0,0296
6	0,0000	0,0017	0,0035	0,0052	0,0069	0,0087	0,0104	0,0121	0,0138	0,0156	0,0173	0,0190	0,0208	0,0225	0,0242	0,0260	0,0277	0,0294	0,0311	0,0329	0,0346

Alfa	Cd - SUPORTE																				
0	0,0000	0,0035	0,0070	0,0105	0,0139	0,0174	0,0209	0,0244	0,0279	0,0314	0,0349	0,0383	0,0418	0,0453	0,0488	0,0523	0,0558	0,0593	0,0627	0,0662	0,0697

ARRASTO MEIA-NAU																					
PARCELA HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
Di N	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
Dw N	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,32	0,67	1,25	2,13	3,41	5,19	7,60	10,76	14,82	19,94	26,28	34,02	43,35	54,49	67,64	83,05
DtH N	0,00	0,01	0,07	0,31	0,89	2,04	4,03	7,20	11,94	18,70	27,99	40,36	56,44	76,89	102,44	133,88	172,05	217,85	272,23	336,19	410,81

PARCELA SUPORTE																					
Dp N	0,00	0,01	0,07	0,23	0,55	1,07	1,86	2,95	4,40	6,27	8,60	11,45	14,86	18,89	23,60	29,02	35,22	42,25	50,15	58,98	68,79
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,07	0,29	0,65	1,16	1,82	2,62	3,56	4,65	5,89	7,27	8,79	10,46	12,28	14,24	16,35	18,60	21,00	23,54	26,23	29,07
DtS N	0,00	0,08	0,36	0,89	1,71	2,89	4,47	6,51	9,05	12,15	15,87	20,24	25,32	31,17	37,84	45,37	53,82	63,25	73,69	85,21	97,86

PARCELA JUNÇÃO																					
Dj N	0,00	0,15	0,61	1,36	2,43	3,79	5,46	7,43	9,70	12,28	15,16	18,35	21,83	25,62	29,72	34,12	38,82	43,82	49,13	54,74	60,65
Dt N	0,00	0,24	1,04	2,56	5,03	8,72	13,96	21,13	30,69	43,13	59,01	78,94	103,59	133,68	170,00	213,37	264,69	324,92	395,05	476,14	569,32

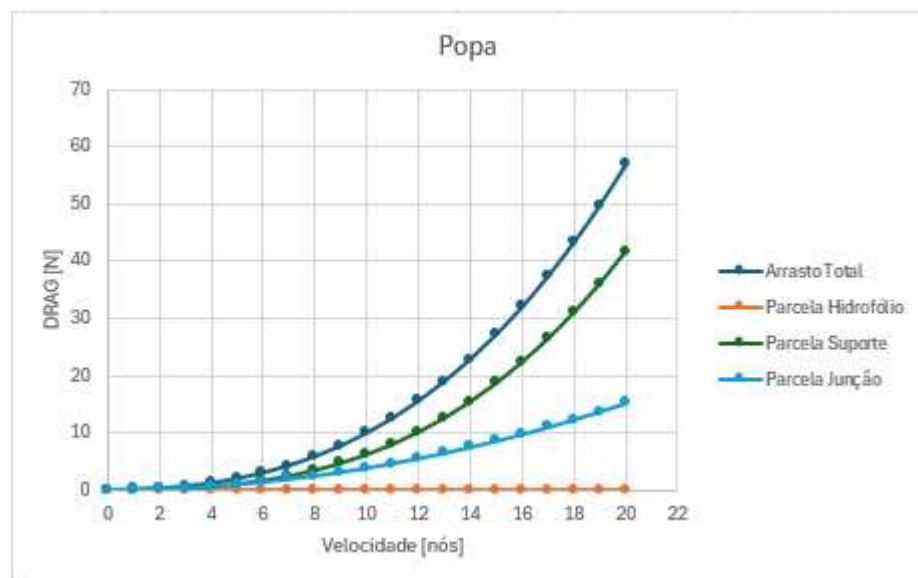
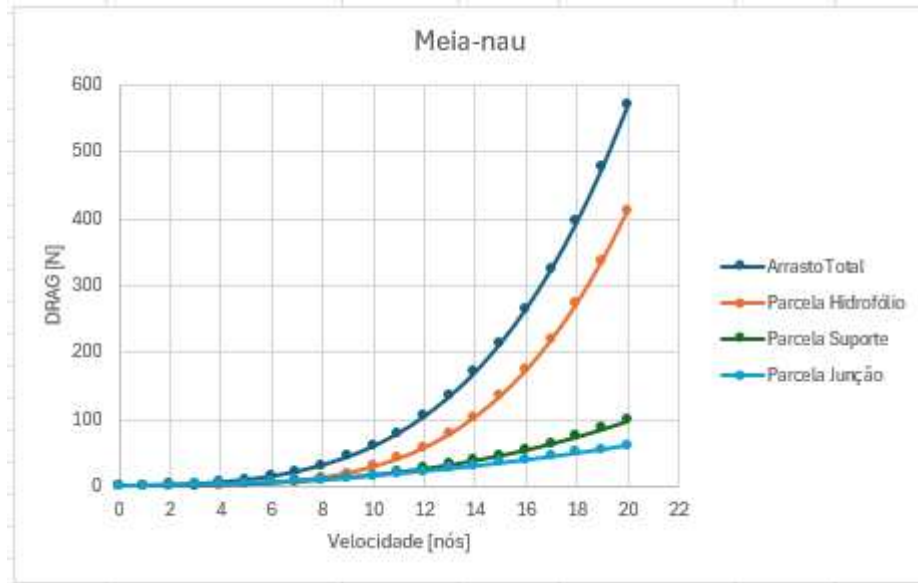
Alfa	CI Corrigido																				
0	0,0000	0,0646	0,1293	0,1939	0,2586	0,3232	0,3878	0,4525	0,5171	0,5818	0,6464	0,7110	0,7757	0,8403	0,9049	0,9696	1,0342	1,0989	1,1635	1,2281	1,2928
1	0,0000	0,0781	0,1563	0,2344	0,3125	0,3907	0,4688	0,5469	0,6251	0,7032	0,7813	0,8595	0,9376	1,0157	1,0939	1,1720	1,2501	1,3283	1,4064	1,4845	1,5627
2	0,0000	0,0944	0,1887	0,2831	0,3774	0,4718	0,5661	0,6605	0,7549	0,8492	0,9436	1,0379	1,1323	1,2266	1,3210	1,4154	1,5097	1,6041	1,6984	1,7928	1,8871
3	0,0000	0,1124	0,2248	0,3372	0,4497	0,5621	0,6745	0,7869	0,8993	1,0117	1,1241	1,2365	1,3490	1,4614	1,5738	1,6862	1,7986	1,9110	2,0234	2,1358	2,2483
4	0,0000	0,1232	0,2464	0,3696	0,4927	0,6159	0,7391	0,8623	0,9854	1,1086	1,2318	1,3550	1,4781	1,6013	1,7245	1,8477	1,9709	2,0940	2,2172	2,3404	2,4636
5	0,0000	0,1371	0,2743	0,4114	0,5486	0,6857	0,8229	0,9600	1,0971	1,2343	1,3714	1,5086	1,6457	1,7828	1,9200	2,0571	2,1943	2,3314	2,4686	2,6057	2,7428
6	0,0000	0,1509	0,3017	0,4526	0,6035	0,7543	0,9052	1,0560	1,2069	1,3578	1,5086	1,6595	1,8104	1,9612	2,1121	2,2630	2,4138	2,5647	2,7156	2,8664	3,0173

Alfa	Cd - HIDROFÓLIO																				
0	0,0000	0,0011	0,0023	0,0034	0,0045	0,0057	0,0068	0,0079	0,0091	0,0102	0,0113	0,0125	0,0136	0,0147	0,0159	0,0170	0,0181	0,0193	0,0204	0,0215	0,0227
1	0,0000	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0050	0,0060	0,0070	0,0079	0,0089	0,0099	0,0109	0,0119	0,0129	0,0139	0,0149	0,0159	0,0169	0,0179	0,0189	0,0199
2	0,0000	0,0010	0,0021	0,0031	0,0042	0,0052	0,0062	0,0073	0,0083	0,0094	0,0104	0,0114	0,0125	0,0135	0,0146	0,0156	0,0166	0,0177	0,0187	0,0198	0,0208
3	0,0000	0,0011	0,0023	0,0034	0,0046	0,0057	0,0068	0,0080	0,0091	0,0102	0,0114	0,0125	0,0137	0,0148	0,0159	0,0171	0,0182	0,0194	0,0205	0,0216	0,0228
4	0,0000	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048	0,0060	0,0072	0,0084	0,0096	0,0109	0,0121	0,0133	0,0145	0,0157	0,0169	0,0181	0,0193	0,0205	0,0217	0,0229	0,0241
5	0,0000	0,0013	0,0027	0,0040	0,0053	0,0067	0,0080	0,0093	0,0107	0,0120	0,0133	0,0147	0,0160	0,0173	0,0187	0,0200	0,0213	0,0227	0,0240	0,0253	0,0266
6	0,0000	0,0015	0,0030	0,0044	0,0059	0,0074	0,0089	0,0103	0,0118	0,0133	0,0148	0,0163	0,0177	0,0192	0,0207	0,0222	0,0236	0,0251	0,0266	0,0281	0,0296

Alfa	Cd - SUPORTE																				
0	0,0000	0,0035	0,0070	0,0105	0,0139	0,0174	0,0209	0,0244	0,0279	0,0314	0,0349	0,0383	0,0418	0,0453	0,0488	0,0523	0,0558	0,0593	0,0627	0,0662	0,0697

ARRASTO POPA																					
PARCELA HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dw N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DtH N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

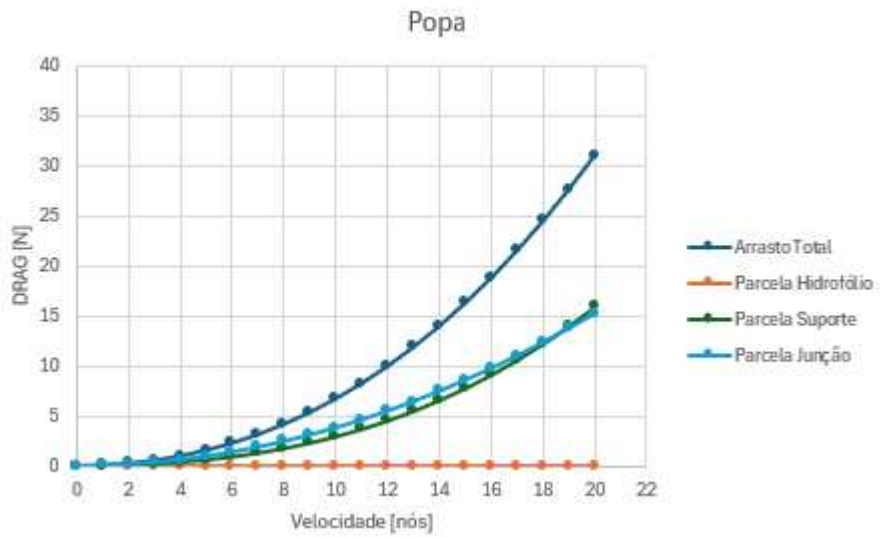
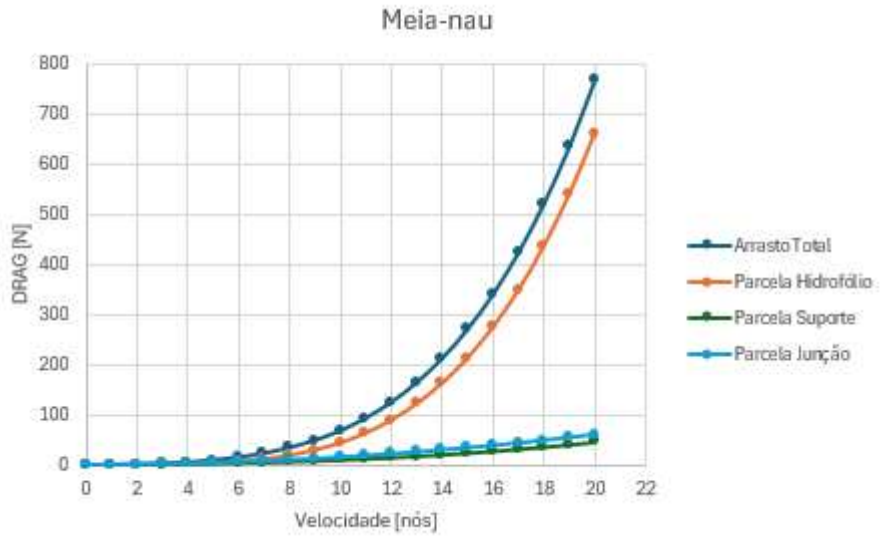
PARCELA SUPORTE																					
Dp N	0,00	0,00	0,03	0,12	0,28	0,54	0,93	1,47	2,20	3,13	4,30	5,72	7,43	9,45	11,80	14,51	17,61	21,12	25,08	29,49	34,40
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,02	0,07	0,16	0,29	0,45	0,65	0,89	1,16	1,47											



Fonte: Autor (2024).

Figura 30 – Cálculo da ferramenta para arrasto em regime de planeio

Vel. Nós	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel.m/s	0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Reynolds	0,00E+00	1,67E+05	3,34E+05	5,02E+05	6,69E+05	8,36E+05	1,00E+06	1,17E+06	1,34E+06	1,50E+06	1,67E+06	1,84E+06	2,01E+06	2,17E+06	2,34E+06	2,51E+06	2,67E+06	2,84E+06	3,01E+06	3,18E+06	3,34E+06
Alfa	Cd Corrigido																				
0	0,0000	0,0638	0,1277	0,1915	0,2553	0,3192	0,3830	0,4469	0,5107	0,5745	0,6384	0,7022	0,7660	0,8299	0,8937	0,9575	1,0214	1,0852	1,1491	1,2129	1,2767
1	0,0000	0,0787	0,1574	0,2361	0,3148	0,3935	0,4722	0,5509	0,6296	0,7083	0,7870	0,8657	0,9443	1,0230	1,1017	1,1804	1,2591	1,3378	1,4165	1,4952	1,5739
2	0,0000	0,0931	0,1863	0,2794	0,3726	0,4657	0,5588	0,6520	0,7451	0,8383	0,9314	1,0245	1,1177	1,2108	1,3040	1,3971	1,4902	1,5834	1,6765	1,7697	1,8628
3	0,0000	0,1080	0,2160	0,3240	0,4320	0,5401	0,6481	0,7561	0,8641	0,9721	1,0801	1,1881	1,2961	1,4042	1,5122	1,6202	1,7282	1,8362	1,9442	2,0522	2,1602
4	0,0000	0,1223	0,2445	0,3668	0,4891	0,6113	0,7336	0,8559	0,9782	1,1004	1,2227	1,3450	1,4672	1,5895	1,7118	1,8340	1,9563	2,0786	2,2009	2,3231	2,4454
5	0,0000	0,1476	0,2952	0,4428	0,5903	0,7379	0,8855	1,0331	1,1807	1,3283	1,4759	1,6235	1,7710	1,9186	2,0662	2,2138	2,3614	2,5090	2,6566	2,8042	2,9517
6	0,0000	0,1482	0,2964	0,4446	0,5929	0,7411	0,8893	1,0375	1,1857	1,3339	1,4822	1,6304	1,7786	1,9268	2,0750	2,2232	2,3715	2,5197	2,6679	2,8161	2,9643
Alfa	Cd - HIDROFÓLIO																				
0	0,0000	0,0013	0,0026	0,0039	0,0052	0,0065	0,0078	0,0091	0,0104	0,0117	0,0130	0,0143	0,0155	0,0168	0,0181	0,0194	0,0207	0,0220	0,0233	0,0246	0,0259
1	0,0000	0,0013	0,0026	0,0039	0,0052	0,0064	0,0077	0,0090	0,0103	0,0116	0,0129	0,0142	0,0155	0,0168	0,0180	0,0193	0,0206	0,0219	0,0232	0,0245	0,0258
2	0,0000	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048	0,0060	0,0072	0,0084	0,0096	0,0108	0,0121	0,0133	0,0145	0,0157	0,0169	0,0181	0,0193	0,0205	0,0217	0,0229	0,0241
3	0,0000	0,0012	0,0024	0,0035	0,0047	0,0059	0,0071	0,0083	0,0094	0,0106	0,0118	0,0130	0,0142	0,0153	0,0165	0,0177	0,0189	0,0201	0,0212	0,0224	0,0236
4	0,0000	0,0013	0,0026	0,0039	0,0051	0,0064	0,0077	0,0090	0,0103	0,0116	0,0129	0,0141	0,0154	0,0167	0,0180	0,0193	0,0206	0,0219	0,0231	0,0244	0,0257
5	0,0000	0,0015	0,0030	0,0045	0,0059	0,0074	0,0089	0,0104	0,0118	0,0133	0,0148	0,0163	0,0178	0,0193	0,0207	0,0222	0,0237	0,0252	0,0267	0,0281	0,0296
6	0,0000	0,0017	0,0035	0,0052	0,0069	0,0087	0,0104	0,0121	0,0138	0,0156	0,0173	0,0190	0,0208	0,0225	0,0242	0,0260	0,0277	0,0294	0,0311	0,0329	0,0346
Alfa	Cd - SUPORTE																				
0	0,0000	0,0035	0,0070	0,0105	0,0139	0,0174	0,0209	0,0244	0,0279	0,0314	0,0349	0,0383	0,0418	0,0453	0,0488	0,0523	0,0558	0,0593	0,0627	0,0662	0,0697
ARRASTO MEIA-NAU																					
PARCELA HIDROFÓLIO																					
DpN	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
DiN	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
DwN	0,00	0,00	0,03	0,17	0,53	1,30	2,69	4,99	8,50	13,62	20,76	30,40	43,05	59,30	79,76	105,11	136,07	173,41	217,96	270,58	332,20
DtN	0,00	0,01	0,10	0,44	1,29	3,01	6,04	10,93	18,31	28,92	43,56	63,16	88,73	121,36	162,26	212,71	274,11	347,91	435,70	539,13	659,96
PARCELA SUPORTE																					
DpN	0,00	0,00	0,02	0,06	0,14	0,27	0,46	0,74	1,10	1,57	2,15	2,86	3,71	4,72	5,90	7,26	8,81	10,56	12,54	14,75	17,20
DiN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DwsN	0,00	0,07	0,29	0,65	1,16	1,82	2,62	3,56	4,65	5,89	7,27	8,79	10,46	12,28	14,24	16,35	18,60	21,00	23,54	26,23	29,07
DtsN	0,00	0,07	0,31	0,71	1,30	2,09	3,08	4,30	5,75	7,45	9,42	11,65	14,18	17,00	20,14	23,60	27,41	31,56	36,08	40,98	46,26
PARCELA JUNÇÃO																					
DjN	0,00	0,15	0,61	1,36	2,43	3,79	5,46	7,43	9,70	12,28	15,16	18,35	21,83	25,62	29,72	34,12	38,82	43,82	49,13	54,74	60,65
DtN	0,00	0,23	1,01	2,52	5,02	8,89	14,58	22,66	33,77	48,65	68,14	93,16	124,74	163,99	212,12	270,44	340,33	423,29	520,90	634,84	766,87
Alfa	Cd Corrigido																				
0	0,0000	0,0646	0,1293	0,1939	0,2586	0,3232	0,3878	0,4525	0,5171	0,5818	0,6464	0,7110	0,7757	0,8403	0,9049	0,9696	1,0342	1,0989	1,1635	1,2281	1,2928
1	0,0000	0,0781	0,1563	0,2344	0,3125	0,3907	0,4688	0,5469	0,6251	0,7032	0,7813	0,8595	0,9376	1,0157	1,0939	1,1720	1,2501	1,3283	1,4064	1,4845	1,5627
2	0,0000	0,0944	0,1887	0,2831	0,3774	0,4718	0,5661	0,6605	0,7549	0,8492	0,9436	1,0379	1,1323	1,2266	1,3210	1,4154	1,5097	1,6041	1,6984	1,7928	1,8871
3	0,0000	0,1124	0,2248	0,3372	0,4497	0,5621	0,6745	0,7869	0,8893	1,0117	1,1241	1,2365	1,3490	1,4614	1,5738	1,6862	1,7986	1,9110	2,0234	2,1358	2,2483
4	0,0000	0,1232	0,2464	0,3695	0,4927	0,6159	0,7391	0,8623	0,9854	1,1086	1,2318	1,3550	1,4781	1,6013	1,7245	1,8477	1,9709	2,0940	2,2172	2,3404	2,4636
5	0,0000	0,1371	0,2743	0,4114	0,5486	0,6857	0,8229	0,9600	1,0971	1,2343	1,3714	1,5086	1,6457	1,7828	1,9200	2,0571	2,1943	2,3314	2,4686	2,6057	2,7428
6	0,0000	0,1509	0,3017	0,4526	0,6035	0,7543	0,9052	1,0560	1,2069	1,3578	1,5086	1,6595	1,8104	1,9612	2,1121	2,2630	2,4138	2,5647	2,7156	2,8664	3,0173
Alfa	Cd - HIDROFÓLIO																				
0	0,0000	0,0011	0,0023	0,0034	0,0045	0,0057	0,0068	0,0079	0,0091	0,0102	0,0113	0,0125	0,0136	0,0147	0,0159	0,0170	0,0181	0,0193	0,0204	0,0215	0,0227
1	0,0000	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0050	0,0060	0,0070	0,0079	0,0089	0,0099	0,0109	0,0119	0,0129	0,0139	0,0149	0,0159	0,0169	0,0179	0,0189	0,0199
2	0,0000	0,0010	0,0021	0,0031	0,0042	0,0052	0,0062	0,0073	0,0083	0,0094	0,0104	0,0114	0,0125	0,0135	0,0146	0,0156	0,0166	0,0177	0,0187	0,0198	0,0208
3	0,0000	0,0011	0,0023	0,0034	0,0046	0,0057	0,0068	0,0080	0,0091	0,0102	0,0114	0,0125	0,0137	0,0148	0,0159	0,0171	0,0182	0,0194	0,0205	0,0216	0,0228
4	0,0000	0,0012	0,0024	0,0036	0,0048	0,0060	0,0072	0,0084	0,0097	0,0109	0,0121	0,0133	0,0145	0,0157	0,0169	0,0181	0,0193	0,0205	0,0217	0,0229	0,0241
5	0,0000	0,0013	0,0027	0,0040	0,0053	0,0067	0,0080	0,0093	0,0107	0,0120	0,0133	0,0147	0,0160	0,0173	0,0187	0,0200	0,0213	0,0227	0,0240	0,0253	0,0266
6	0,0000	0,0015	0,0030	0,0044	0,0059	0,0074	0,0089	0,0103	0,0118	0,0133	0,0148	0,0163	0,0177	0,0192	0,0207	0,0222	0,0236	0,0251	0,0266	0,0281	0,0296
Alfa	Cd - SUPORTE																				
0	0,0000	0,0035	0,0070	0,0105	0,0139	0,0174	0,0209	0,0244	0,0279	0,0314	0,0349	0,0383	0,0418	0,0453	0,0488	0,0523	0,0558	0,0593	0,0627	0,0662	0,0697
ARRASTO POPA																					
PARCELA HIDROFÓLIO																					
DpN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DiN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DwN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DtN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PARCELA SUPORTE																					
DpN	0,00	0,00	0,01	0,03	0,07	0,13	0,23	0,37	0,55	0,78	1,07	1,43	1,86	2,36	2,95	3,63	4,40	5,28	6,27	7,37	8,60
DiN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DwsN	0,00	0,00	0,02	0,07	0,16	0,29	0,45	0,65	0,89	1,16	1,47	1,82	2,20	2,62	3,07	3,56	4,09	4,65	5,25	5,89	6,56
DtsN	0,00	0,00	0,02	0,08	0,19	0,36	0,59	0,89	1,26	1,71	2,26	2,89	3,63	4,47	5,43	6,51	7,72	9,05	10,53	12,15	13,93
PARCELA JUNÇÃO																					
DjN	0,00	0,04</																			



Fonte: Autor (2024).

Figura 31 – Cálculo da ferramenta para união dos regimes de arrasto

ARRASTO REAL HIDROFÓLIO																					
Vel. nós	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel. m/s	0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
ARRASTO SUBMERSO																					
HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
Di N	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
Dw N	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,32	0,67	1,25	2,13	3,41	5,19	7,60	10,76	14,82	19,94	26,28	34,02	43,35	54,49	67,64	83,05
DtH N	0,00	0,01	0,07	0,31	0,89	2,04	4,03	7,20	11,94	18,70	27,99	40,36	56,44	76,89	102,44	133,88	172,05	217,85	272,23	336,19	410,81
SUPPORTO																					
Dp N	0,00	0,01	0,10	0,35	0,83	1,61	2,79	4,42	6,60	9,40	12,90	17,17	22,29	28,34	35,39	43,53	52,83	63,37	75,23	88,47	103,19
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,09	0,36	0,82	1,45	2,27	3,27	4,45	5,81	7,36	9,08	10,99	13,08	15,35	17,80	20,44	23,25	26,25	29,43	32,79	36,33
DtS N	0,00	0,10	0,47	1,17	2,28	3,88	6,06	8,87	12,42	16,76	21,98	28,16	35,37	43,69	53,20	63,97	76,09	89,62	104,65	121,26	139,52
JUNÇÃO																					
Dj N	0,00	0,19	0,76	1,71	3,03	4,74	6,82	9,29	12,13	15,35	18,95	22,93	27,29	32,03	37,15	42,64	48,52	54,77	61,41	68,42	75,81
Dt N	0,00	0,30	1,30	3,19	6,21	10,66	16,91	25,36	36,48	50,81	68,92	91,45	119,10	152,61	192,78	240,50	296,66	362,25	438,29	525,88	626,14
HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
Di N	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
Dw N	0,00	0,00	0,03	0,17	0,53	1,30	2,69	4,99	8,50	13,62	20,76	30,40	43,05	59,30	79,76	105,11	136,07	173,41	217,96	270,58	332,20
DtH N	0,00	0,01	0,10	0,44	1,29	3,01	6,04	10,93	18,31	28,92	43,56	63,16	88,73	121,36	162,26	212,71	274,11	347,91	435,70	539,13	659,96
SUPPORTO																					
Dp N	0,00	0,00	0,03	0,09	0,21	0,40	0,70	1,11	1,85	2,35	3,22	4,29	5,57	7,08	8,85	10,88	13,21	15,84	18,81	22,12	25,80
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,09	0,36	0,82	1,45	2,27	3,27	4,45	5,81	7,36	9,08	10,99	13,08	15,35	17,80	20,44	23,25	26,25	29,43	32,79	36,33
DtS N	0,00	0,09	0,39	0,90	1,66	2,67	3,97	5,56	7,46	9,71	12,31	15,28	18,65	22,43	26,65	31,32	36,46	42,09	48,24	54,91	62,13
JUNÇÃO																					
Dj N	0,00	0,19	0,76	1,71	3,03	4,74	6,82	9,29	12,13	15,35	18,95	22,93	27,29	32,03	37,15	42,64	48,52	54,77	61,41	68,42	75,81
Dt N	0,00	0,29	1,25	3,05	5,98	10,42	16,83	25,78	37,91	53,98	74,82	101,37	134,67	175,83	226,06	286,68	359,09	444,78	545,34	662,45	797,90
ARRASTO REAL HIDROFÓLIO																					
HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
Di N	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
Dw N	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,32	0,68	1,25	2,13	3,41	5,19	7,60	10,76	14,82	19,94	26,28	34,02	43,35	54,49	67,64	83,05
DtH N	0,00	0,01	0,07	0,31	0,89	2,04	4,03	7,20	11,94	18,70	27,99	40,36	56,44	76,89	102,44	133,88	172,05	217,85	272,23	336,19	410,81
SUPPORTO																					
Dp N	0,00	0,01	0,10	0,35	0,83	1,61	2,79	4,42	6,60	9,40	12,90	17,17	22,29	28,34	35,39	43,53	52,83	63,37	75,23	88,47	103,19
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,09	0,36	0,82	1,45	2,27	3,27	4,45	5,81	7,36	9,08	10,99	13,08	15,35	17,80	20,44	23,25	26,25	29,43	32,79	36,33
DtS N	0,00	0,10	0,47	1,17	2,28	3,88	6,06	8,87	12,42	16,76	21,98	28,16	35,37	43,69	53,20	63,97	76,09	89,62	104,65	121,26	139,52
JUNÇÃO																					
Dj N	0,00	0,19	0,76	1,71	3,03	4,74	6,82	9,29	12,13	15,35	18,95	22,93	27,29	32,03	37,15	42,64	48,52	54,77	61,41	68,42	75,81
Dt N	0,00	0,30	1,30	3,19	6,21	10,66	16,87	25,57	37,20	52,39	71,87	101,37	134,67	175,83	226,06	286,68	359,09	444,78	545,34	662,45	797,90
POTÊNCIA EFETIVA																					
PE KW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,09	0,15	0,24	0,37	0,57	0,83	1,18	1,63	2,21	2,96	3,89	5,05	6,47	8,21

Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE D – Cálculo de equilíbrio, momentos e configurações

Nesta seção é apresentado o cálculo do equilíbrio e momentos, proveniente do desenvolvimento da ferramenta para o presente estudo, Figura 32, e o cálculo de configuração longitudinal e lateral, Figura 33.

Figura 32 – Cálculo da ferramenta para equilíbrio e momentos

EQUILIBRIO VERTICAL			
Garantido através dos cálculos do coeficiente de sustentação, onde Cl, precisa superar o peso da embarcação na velocidade estimada para o início do planeio			Eliasson; Larsson; Orych (2022)
DADOS	VALOR	UNID	OBS
Peso atual do monocasco	230 Kg		Valor obtido por informações da Equipe Babitonga
	2256,30 N		
Velocidade estimada de decolagem	7 Nós		
Lift	2769,60 N		Somente hidrofólio de meia-nau
Equilíbrio Vertical	OK		
MOMENTO DE ROLAGEM			
Para garantir que a embarcação não sofra com o movimento de "roll" após a instalação dos hidrofólios, os mesmos necessitam estar alinhados com a linha de centro da embarcação (caso não possua um mecanismo de contra-peso instalado no barco) e o hidrofólio de proa precisa necessariamente ser maior ou igual a boca máxima da embarcação			Eliasson; Larsson; Orych (2022)
DADOS	VALOR	UNID	OBS
Boca máxima do monocasco	1,80 m		Valor obtido por informações da Equipe Babitonga
Envergadura hidrofólio de meia-nau	2,10 m		
Momento de Rolagem	OK		
MOMENTO DE ARFAGEM			
Alteração em Cl para Arfagem no hidrofólio de meia-nau, após correção com a Relação de aspecto de proa < Alteração em Cl para Arfagem no hidrofólio de popa, após correção com a Relação de aspecto de popa / Isto garante que caso a embarcação após o emprego dos hidrofólios sofra com o momento de arfagem, o mesmo estará garantida como no projeto da embarcação antes dos hidrofólios			Eliasson; Larsson; Orych (2022)
Meia-nau			
HIDROFÓLIO			
DADOS	VALOR	UNID	OBS
Distância Popa - Hidrofólio	3,00 m	OK	, Se OK = valor posicionamento do hidrofólio de meia-nau
Incremento ângulo de ataque	0,157	Graus	
Cl 2D por Grau	0,204		
Cl 2D por Grau Total	0,047		
Relação de aspecto	8		
Cl Arfagem	0,04		
Cl	0,75609		Valor do coeficiente de sustentação na Velocidade estimada de decolagem
Alteração em Cl para Arfagem	5,17 %		

Popa			
HIDROFÓLIO			
DADOS	VALOR	UNID	OBS
Incremento ângulo de ataque	0,000	Graus	
Cl 2D por Grau	0,189		
Cl 2D por Grau Total	0,189		
Relação de aspecto	8		
Cl Arfagem	0,16		
Cl	0,45247		Valor do coeficiente de sustentação na Velocidade estimada de decolagem
Alteração em Cl para Arfagem	34,80	%	
Momento de Arfagem		OK	

Fonte: Autor (2024).

Figura 33 – Cálculo da ferramenta para configuração longitudinal e lateral

CONFIGURAÇÃO DOS HIDROFÓLIOS			
CONFIGURAÇÃO LONGITUDINAL	CONFIGURAÇÃO LATERAL	x / L	
Conventional	NonSplit / Split	$0 < x < 0,35$	
Canard	NonSplit / Split	$0,65 < x < 1,00$	
Tandem	NonSplit / Split	$0,35 < x < 0,65$	
x : distância do hidrofólio de meia-nau até o CG da embarcação			
L : distância entre os hidrofólios			
Ponto referência zero : espelho de popa do monocasco			
DADOS	VALOR	UNID	OBS
Ponto referência	0,00	m	
CG atual do monocasco	2,30	m	Valor obtido por informações da Equipe Babitonga
Posição hidrofólio de Meia-nau	3,00	m	
Posição hidrofólio de Popa	0,00	m	
x / L	0,23		
CONFIGURAÇÃO LONGITUDINAL	CONFIGURAÇÃO LATERAL		
CONVENTIONAL	NONSPLIT		

Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE E – Sintetização dos resultados na ferramenta

Nesta seção é apresentado como é sintetizado os dados calculados na ferramenta, vide Figura 34.

Figura 34 – Sintetização dos resultados na ferramenta

HIDROFÓLIOS					SUPORTE			
Meia-nau								
DADOS	SIGLA	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO	DADOS	SIGLA	VALOR	UNID
Envergadura Total	ET	2,10 m			Comprimento Total	CT	0,58 m	
Comprimento C1	CompC1	0,33 m			Espessura	t	0,032 m	
Comprimento C2	CompC2	0,20 m			Corda	C	0,26 m	
Espessura t1	t1	0,039 m			Área Projetada Arrasto	Aproj	0,02 m ²	
Espessura t2	t2	0,024 m			Relação de Aspecto	AR	2,2	
Corda Média	CM	0,26 m			Perfil NACA		0012	
Área Projetada	Aproj	0,55 m ²						
Relação de Aspecto	AR	8						
Relação de Conicidade	TR	0,62		OK				
Âng Borda Ataque	AngBorda	6,79 Graus		OK				
Perfil NACA		4412						
Ângulo de Ataque	Alfa	3 Graus						
Popa								
DADOS	SIGLA	VALOR	UNID	VERIFICAÇÃO	DADOS	SIGLA	VALOR	UNID
Envergadura Total	ET	1,05 m			Comprimento Total	CT	0,58 m	
Comprimento C1	CompC1	0,16 m			Espessura	t	0,016 m	
Comprimento C2	CompC2	0,10 m			Corda	C	0,13 m	
Espessura t1	t1	0,020 m			Área Projetada Arrasto	Aproj	0,01 m ²	
Espessura t2	t2	0,012 m			Relação de Aspecto	AR	4,4	
Corda Média	CM	0,13 m			Perfil NACA	0	0012	
Área Projetada	Aproj	0,14 m ²						
Relação de Aspecto	AR	8						
Relação de Conicidade	TR	0,62		OK				
Âng Borda Ataque	AngBorda	6,79 Graus		OK				
Perfil NACA		4412						
Ângulo de Ataque	Alfa	0 Graus						
DADOS	VALOR	UNID						
Ponto referência	0,00 m		Ponto referência zero : espelho de popa do monocasco					
Posição hidrofólio de Meia-nau	3,00 m							
Posição hidrofólio de Popa	0,00 m							
CONFIGURAÇÃO LONGITUDINAL			CONVENTIONAL					
CONFIGURAÇÃO LATERAL			NONSPLIT					

Vel. Nds	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vel. m/s	0,00	0,51	1,03	1,54	2,06	2,57	3,09	3,60	4,12	4,63	5,14	5,66	6,17	6,69	7,20	7,72	8,23	8,74	9,26	9,77	10,29
Reynolds	0,00E+00	1,67E+05	3,34E+05	5,02E+05	6,69E+05	8,36E+05	1,00E+06	1,17E+06	1,34E+06	1,50E+06	1,67E+06	1,84E+06	2,01E+06	2,17E+06	2,34E+06	2,51E+06	2,67E+06	2,84E+06	3,01E+06	3,18E+06	3,34E+06
LIFT TOTAL HIDROFÓLIOS																					
Alfa	0,00	9,28	74,26	250,63	594,09	1160,34	2005,06	3183,96	4752,74	6767,08	9282,69	12355,26	16040,49	20394,07	25471,70	31329,08	38021,90	45605,86	54136,65	63669,97	74261,52
ARRASTO REAL HIDROFÓLIO																					
HIDROFÓLIO																					
Dp N	0,00	0,00	0,04	0,12	0,30	0,58	1,00	1,59	2,37	3,37	4,62	6,15	7,99	10,15	12,68	15,60	18,93	22,70	26,95	31,70	36,97
Di N	0,00	0,00	0,03	0,15	0,47	1,14	2,36	4,36	7,44	11,92	18,17	26,61	37,69	51,91	69,82	92,01	119,11	151,80	190,79	236,85	290,79
Dw N	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,32	1,68	3,12	5,32	8,51	12,98	30,40	43,05	59,30	79,76	105,11	136,07	173,41	217,96	270,58	332,20
DtH N	0,00	0,01	0,07	0,31	0,89	2,04	5,04	9,06	15,13	23,81	35,77	63,16	88,73	121,36	162,26	212,71	274,11	347,91	435,70	539,13	659,96
SUPORTE																					
Dp N	0,00	0,01	0,10	0,35	0,83	1,61	1,74	2,77	4,13	5,88	8,06	4,29	5,57	7,08	8,85	10,88	13,21	15,84	18,81	22,12	25,80
Di N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dws N	0,00	0,09	0,36	0,82	1,45	2,27	3,27	4,45	5,81	7,36	9,08	10,99	13,08	15,35	17,80	20,44	23,25	26,25	29,43	32,79	36,33
Dts N	0,00	0,10	0,47	1,17	2,28	3,88	5,01	7,22	9,94	13,23	17,14	15,28	18,65	22,43	26,65	31,32	36,46	42,09	48,24	54,91	62,13
JUNÇÃO																					
Dj N	0,00	0,19	0,76	1,71	3,03	4,74	6,82	9,29	12,13	15,35	18,95	22,93	27,29	32,03	37,15	42,64	48,52	54,77	61,41	68,42	75,81
Di N	0,00	0,30	1,30	3,19	6,21	10,66	16,87	25,57	37,20	52,39	71,87	101,37	134,67	175,83	226,06	286,68	359,09	444,78	545,34	662,45	797,90
ARRASTO SAMBAQUI (ESTIMADO) - COM HIDROFÓLIO																					
Drag N	0,00	71,58	143,86	217,03	291,33	367,06	333,47	280,17	37,20	52,39	71,87	101,37	134,67	175,83	226,06	286,68	359,09	444,78	545,34	662,45	797,90
PE KW	0,00	0,04	0,15	0,33	0,60	0,94	1,03	1,01	0,15	0,24	0,37	0,57	0,83	1,18	1,63	2,21	2,96	3,89	5,05	6,47	8,21

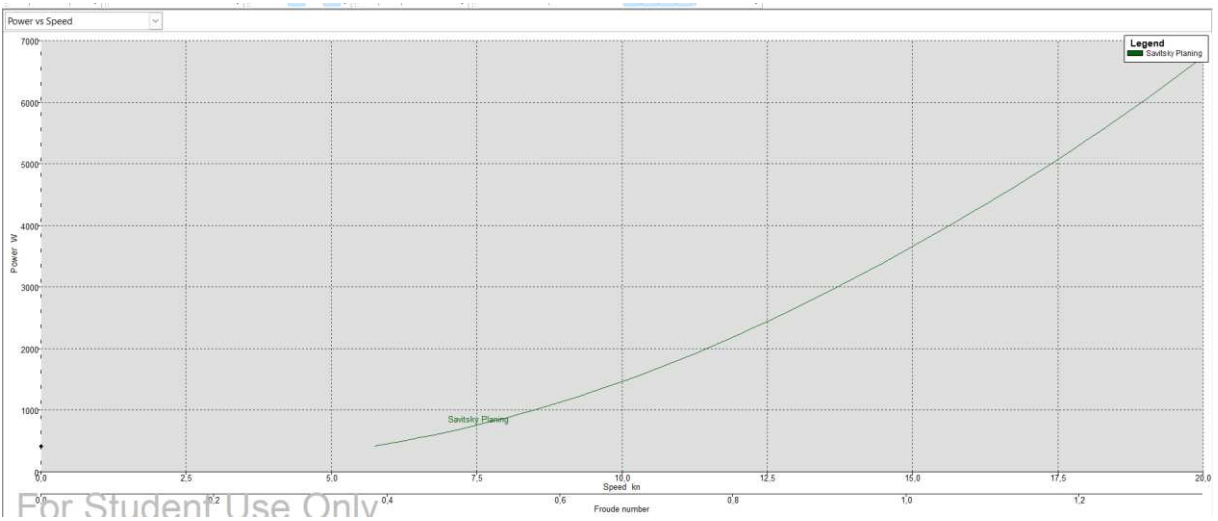
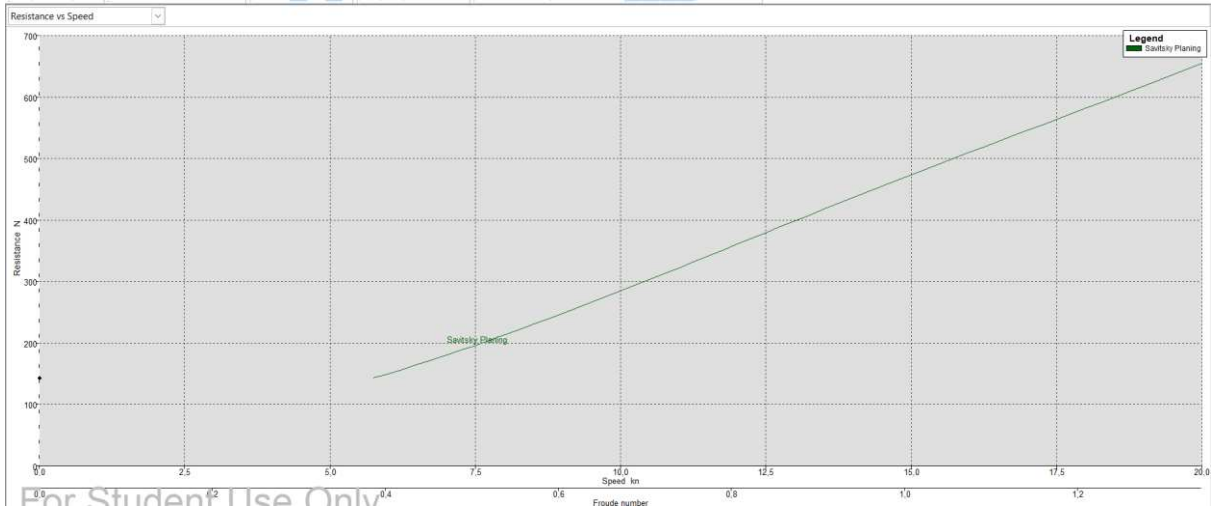
Fonte: Autor (2024).

ANEXO A – Análise de resistência ao avanço e potência efetiva do monocasco

Nesta seção, se encontra o resultado do ensaio de resistência ao avanço e potência efetiva do monocasco sem os hidrofólios, fornecidos pela equipe Babitonga, Figura 35.

Figura 35 – Ensaio de resistência ao avanço e potência efetiva

Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Savitsky Planing Resist. (N)	Savitsky Planing Power (W)
0,000	0,000	0,000	--	--
0,500	0,034	0,100	--	--
1,000	0,067	0,200	--	--
1,500	0,101	0,300	--	--
2,000	0,134	0,400	--	--
2,500	0,168	0,499	--	--
3,000	0,202	0,599	--	--
3,500	0,235	0,699	--	--
4,000	0,269	0,799	--	--
4,500	0,302	0,899	--	--
5,000	0,336	0,999	--	--
5,500	0,370	1,099	--	--
6,000	0,403	1,199	150,08	463,26
6,500	0,437	1,299	164,72	550,82
7,000	0,470	1,398	180,11	648,60
7,500	0,504	1,498	196,19	756,96
8,000	0,537	1,598	212,89	876,16
8,500	0,571	1,698	230,15	1006,39
9,000	0,605	1,798	247,90	1147,76
9,500	0,638	1,898	266,06	1300,29
10,000	0,672	1,998	284,56	1463,92
10,500	0,705	2,098	303,34	1638,53
11,000	0,739	2,197	322,31	1823,89
11,500	0,773	2,297	341,40	2019,74
12,000	0,806	2,397	360,54	2225,74
12,500	0,840	2,497	379,67	2441,52
13,000	0,873	2,597	398,74	2666,70
13,500	0,907	2,697	417,70	2900,89
14,000	0,941	2,797	436,50	3143,77
14,500	0,974	2,897	455,13	3395,04
15,000	1,008	2,997	473,59	3654,52
15,500	1,041	3,096	491,87	3922,13
16,000	1,075	3,196	510,00	4197,88
16,500	1,109	3,296	528,01	4481,93
17,000	1,142	3,396	545,94	4774,54
17,500	1,176	3,496	563,83	5076,07
18,000	1,209	3,596	581,75	5386,96
18,500	1,243	3,696	599,72	5707,71
19,000	1,277	3,796	617,82	6038,87
19,500	1,310	3,896	636,09	6381,00
20,000	1,344	3,995	654,56	6734,71



Fonte: Equipe Babitonga (2024).