

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

ANDRÉ LUIZ ARTMANN JUNIOR

**ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DE UM HIDROFÓLIO EM UMA EMBARCAÇÃO  
DE APOIO *OFFSHORE*: ABORDAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA**

Joinville  
2015

**ANDRÉ LUIZ ARTMANN JUNIOR**

**ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DE UM HIDROFÓLIO EM UMA EMBARCAÇÃO  
DE APOIO *OFFSHORE*: ABORDAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin  
Tancredi

Joinville  
2015

André Luiz Artmann Junior

**ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DE UM HIDROFÓLIO EM UMA EMBARCAÇÃO  
DE APOIO *OFFSHORE*: ABORDAGEM EXPERIMENTAL SIMPLIFICADA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Naval.

Joinville, 03 de Dezembro de 2015

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

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

---

Prof., Dr. Lucas Weihmann  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

A toda minha família pelo apoio e incentivo. Em especial aos meus pais pelo suporte e compreensão.

À minha namorada, Carolina Rodrigues Aniceto, pela motivação, dedicação e compreensão durante esses últimos anos de graduação.

Ao meu orientador, Professor Thiago Pontin Tancredi, pela dedicação, por acreditar na minha ideia e pela confiança durante a elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, e todo seu corpo docente e administrativo, por me proporcionar estudo de alta qualidade. Em especial aos Professores Tiago Vieira da Cunha, Lucas Weihmann e Luis Fernando Peres Calil pelos conselhos e pelas oportunidades a mim oferecidas.

Aos meus colegas do Desafio Universitário de Nautimodelismo e Empresa Junior ESATI pelo crescimento pessoal e profissional.

Ao meu amigo de longa data, João Guilherme Zonta, que me ajudou a iniciar um novo e ambicioso projeto, o DUNA, durante a graduação.

Às minhas amigas, Camila Mori de Oliveira e Andressa Beckert Otto que fizeram parte desta jornada de seis anos de muito estudo e dedicação.

Ao laboratório de desenvolvimento de produtos que me ajudou a tornar o este trabalho ainda mais especial por produzir o hidrofólio projetado por mim.

Aos amigos e amigas de graduação do qual tive o prazer de compartilhar muitas alegrias e poucas tristezas durante todos os anos da graduação. Em especial ao Ricardo Bedin, por ter me ajudado durante os ensaios realizados para este trabalho.

“I like the impossible because there is less competition”

Walt Disney

## RESUMO

Plantas *offshore* necessitam constantemente de suprimentos, tais como água, combustível, comida etc. O transporte desses itens é feito, em geral, por navios de apoio a plataformas, Platform Supply Vessel (PSV). Com o objetivo de reduzir o tempo de viagem e custo de transporte, este trabalho discute os eventuais benefícios de se acrescentar hidrofólios às embarcações de apoio *offshore*. O princípio básico de funcionamento de embarcações com hidrofólio é utilizar a força de sustentação para reduzir o calado da embarcação quando em movimento, reduzindo assim a resistência ao avanço. Para a realização deste trabalho foi feito um levantamento de navios existentes para determinar as dimensões típicas desta classe de embarcações. A seguir foi construído, em escala reduzida, o conjunto casco-fólio para que pudessem ser realizados os testes para determinação da resistência ao avanço para diferentes velocidades de projeto. De posse dos resultados dos testes em escala, os dados foram analisados e extrapolados para a escala real para verificar a viabilidade do projeto. Conclui-se que é impraticável atingir o regime de planeio com a potência usualmente disponível nesta classe de embarcações.

**Palavras-chave:** Hidrofólios. Resistência ao avanço. Escala reduzida.

## **ABSTRACT**

Plants require offshore constantly supplies such as water, fuel, food etc. The transport of these items is made, in general, by Platform Supply Vessels (PSV). In order to reduce the travel time and costs, this paper discusses the potential benefits of adding hydrofoils to offshore support vessels. The basic principle of the hydrofoil craft is use the lifting force to reduce the draft of the vessel when in motion, thus reducing the drag. To carry out this work was made a research of existing ships to determine the typical dimensions of this vessel class. Then it was built a scaled-hull-folio set so they can be carried out on tests to determine the ship resistance to different design speeds. With the tests results, the data was analyzed and extrapolated to the full scale to verify the feasibility of the project. It concludes that it is impossible to reach the planning regime with the power usually available in this boat class.

**Key-words:** Hydrofoils. Ship resistance. Scaled.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Forças de sustentação geradas para reduzir o calado da embarcação	13
Figura 1.2 – Relação de arrasto em função da velocidade típico de embarcações com e sem hidrofólio. ....	14
Figura 2.1 - Rolls-Royce UT 776 CD. ....	17
Figura 2.2 – Far Scout UT 722 L. ....	18
Figura 2.3 - Ramform Titan, com 24 cabos. ....	19
Figura 2.4 - STLS1151 Crewboat. ....	19
Figura 2.5 - Damen Safety Standby Vessel 4711. ....	20
Figura 3.1 – Comprimento Total x Boca de PSVs. ....	21
Figura 3.2 – Boca x Calado de PSVs. ....	22
Figura 3.3 – Comprimento Total x Deslocamento de PSVs. ....	22
Figura 3.4 – $C_B$ das embarcações pesquisadas. ....	23
Figura 4.1 – Componentes básicas da Resistência ao avanço. ....	24
Figura 4.2 – Exemplo Resistência ao Avanço e suas componentes. ....	25
Figura 4.3 – Curvas de resistência ao avanço e diversos calados. ....	26
Figura 4.4 – Variação da resistência ao avanço em função do calado a 15 nós. ....	27
Figura 5.1 – Perfil de asa mostrando o fluxo de ar gerando sustentação. ....	29
Figura 5.2 – Forças atuantes em uma embarcação com hidrofólio. ....	31
Figura 5.3 – Configurações de hidrofólios, secante (esquerda) e completamente submerso (direita). ....	32
Figura 5.4 – Configurações de hidrofólios. ....	33
Figura 5.5 – Parâmetros básicos de um perfil. ....	34
Figura 7.1 – Arranjo Geral PSV EM7501. ....	39
Figura 7.2 – Razões de aspecto do rebocador em estudo plotadas sobre o gráfico de razões típicas de PSV. ....	40
Figura 7.3 – Modelagem do casco do PSV em estudo utilizando o programa Rhinoceros. ....	41

Figura 7.4 – Relação deslocamento x comprimento total e coeficiente de bloco do navio em estudo plotados sobre os gráficos de valores típicos para PSVs.....	42
Figura 7.5 – Gráfico das resistências ao avanço por diferentes métodos. ....	44
Figura 7.6 – Gráfico de potência efetiva por diferentes métodos. ....	45
Figura 7.7 – Planos de alto, linha d'água e balizas impressos para construção do modelo.....	46
Figura 7.8 – Chapas de Poliuretano utilizadas para confecção do modelo.....	47
Figura 7.9 – Seções do casco em papelão espesso. ....	47
Figura 7.10 – Vista frontal do casco em trabalho, seção posicionada para verificação da geometria. ....	48
Figura 7.11 – Casco em fase anterior ao acabamento.....	48
Figura 7.12 – Casco sendo reparado por massa de reparo. ....	49
Figura 7.13– Casco revestido puramente com resina poliéster.....	50
Figura 7.14 – Casco finalizado e flutuando na linha da água. ....	50
Figura 7.15 – Aparelhagem para os ensaios de resistência ao avanço. ....	52
Figura 7.16 – Ensaio de arrasto a $Fr = 0,19$ . ....	54
Figura 7.17 – Simulação computacional utilizando o método do Slender Body. ....	54
Figura 7.18 – Ensaio de arrasto a $Fr = 0,19$ . ....	55
Figura 7.19 - Simulação computacional utilizando o método do Slender Body (vista lateral). ....	55
Figura 7.20 – Gráficos comparativos entre os métodos estudados.....	56
Figura 7.21 – Comparação entre as curvas extrapoladas e a obtida pelo programa Maxsurf Resistance <sup>®</sup> . ....	56
Figura 7.22 – Variação de $C_D$ e $C_L$ com a variação do ângulo de ataque $\alpha$ . ....	58
Figura 7.23 – Perfil NACA 25112 com $\alpha=7,5^\circ$ . ....	58
Figura 7.24 – Resistência ao avanço para determinadas condições de calado. ....	58
Figura 7.25 – À esquerda, gráfico comparativo entre as resistências com e sem hidrofólio (em kN) e, à direita, comparativo entre as potências efetivas (em kW). ....	61
Figura 7.26 – Hidrofólio projetado no programa Rhinoceros <sup>®</sup> . ....	62
Figura 7.27 – Hidrofólios projetados posicionados na embarcação. ....	62
Figura 7.28 – Relação sustentação deslocamento em função da velocidade.....	63
Figura 7.29 – À esquerda, gráfico comparativo entre as resistências com e sem hidrofólio (em kN) e, à direita, comparativo entre as potências efetivas (em kW). ....	64
Figura 7.30 – Medidas hidrofólio projetado em escala 1:75 em milímetros.....	65

Figura 7.31 – Hidrofólios instalados no modelo.....	66
Figura 7.32 – Ensaio de arrasto com hidrofólios. ....	67
Figura 7.33 – Modelo em regime de planeio, sustentação gerada pelos hidrofólios. ....	67
Figura 7.34 – Modelo em regime de planeio com estabilidade em momento crítico durante o <i>take-off</i> . ....	68
Figura 7.35 – Variação da máxima área do hidrofólio em função da velocidade máxima em regime de planeio .....	69

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	METODOLOGIA.....	15
<b>2.</b>	<b>PRINCIPAIS TIPOS DE EMBARCAÇÕES</b> .....	<b>17</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE UM PSV</b> .....	<b>21</b>
<b>4.</b>	<b>RESISTÊNCIA AO AVANÇO</b> .....	<b>24</b>
<b>5.</b>	<b>HIDROFÓLIOS</b> .....	<b>28</b>
5.1	FUNCIONAMENTO DOS FÓLIOS .....	28
5.2	DINÂMICA DE NAVIOS COM HIDROFÓLIOS.....	30
5.3	CONFIGURAÇÕES DE HIDROFÓLIOS .....	32
5.4	PERFIS DE FÓLIOS .....	33
5.4.1	Geometria de um perfil .....	33
5.4.2	Família NACA.....	34
<b>6.</b>	<b>ENSAIOS EM ESCALADA REDUZIDA</b> .....	<b>35</b>
6.1	SIMILARIDADES DE ESCALA.....	36
6.2	EXTRAPOLACAO MODELO-NAVIO .....	36
<b>6.2.1</b>	<b>Método de Hughes: Fator de forma</b> .....	<b>37</b>
<b>7.</b>	<b>PSV EM ESTUDO</b> .....	<b>39</b>
7.1	MODELAGEM 3D DO CASCO.....	41
7.2	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	42
7.3	PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	45
7.4	ENSAIOS COM O MODELO .....	51
7.5	RESULTADO DOS ENSAIOS .....	53
7.6	PROJETO DO HIDROFÓLIO .....	57
7.7	Estudo de Caso .....	61
7.8	APLICAÇÃO DOS HIDROFÓLIOS AO MODELO E ENSAIOS.....	65
7.9	RESULTADO DOS ENSAIOS COM OS HIDROFÓLIOS.....	67
7.10	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	68

<b>8. CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A – PESQUISA DE PSVs PARA CARACTERIZAÇÃO DA EMBARCAÇÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B – CURVAS DE LINHAS DA EMBARCAÇÃO EM ESTUDO .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE C – TABELAS DE COTAS DA EMBARCAÇÃO EM ESTUDO .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS PARA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E POTÊNCIA EFETIVA .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE E – EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente procura por energias renováveis e a grande oferta de petróleo no mercado, o preço do barril vem caindo desde junho de 2014. Com a queda do preço do barril, pode se tornar economicamente inviável a exploração do petróleo existente nas reservas localizadas na região do pré-sal (EXAME, 2014).

Além da desvalorização do petróleo, outro fator complicador para a extração do petróleo na região do pré-sal é a distância entre a costa e os poços, que ficam a mais de 300 quilômetros da costa da região sudeste do Brasil (PETROBRAS, 2015) necessitando, portanto, de alternativas que realizem o transporte rápido e eficiente de pessoas, materiais e equipamentos.

Com o objetivo de reduzir o tempo de viagem e custo de transporte, será estudado neste trabalho os benefícios de se acrescentar hidrofólios às embarcações de apoio *offshore*, Platform Supply Vessel (PSV).

Lamb (2003) define que as embarcações do tipo PSV têm como missão principal a entrega das diversas cargas requisitadas pelas plataformas presentes nas bacias petrolíferas *offshore*, e, normalmente, retornam à base carregadas com resíduos, lixos, equipamentos alugados entre outros itens, de acordo com as necessidades existentes.

Figura 1.1 – Forças de sustentação geradas para reduzir o calado da embarcação.



Fonte: Adaptado de Boat Trader (2013).

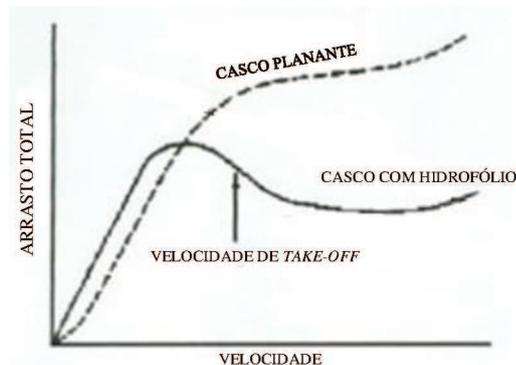
Segundo Meyer (2000), o princípio básico de funcionamento de embarcações com hidrofólios (Figura 1.1) é utilizar a força de sustentação para reduzir o calado da embarcação sustentando-a dinamicamente. Desta forma, procura-se diminuir a resistência ao avanço e o efeito das ondas sobre a embarcação reduzindo a potência requerida para se alcançar altas velocidades, como mostra a Figura 1.2.

Para a realização deste trabalho será feito um levantamento de navios existentes para determinar relações de aspecto e dimensões principais típicas para este tipo de embarcação. A partir dos dados obtidos será modelado em 3D, utilizando o programa Rhinoceros<sup>®</sup>, o casco de um PSV típico. A partir das linhas de casco obtidas na modelagem computacional, será feito um modelo físico, em escala reduzida, da embarcação. Serão então realizados testes de arrasto com o modelo para verificar se o resultado de um teste simplificado é capaz de fornecer respostas coerentes com as obtidas por séries de regressão e empíricas.

Os testes, diferentemente de como normalmente é feito, serão conduzidos à força constante, e esta força será variada para que se obtenha a velocidade requerida. A força constante é obtida através da queda livre de uma massa, sendo esta massa a resistência ao avanço correspondente à velocidade registrada.

Serão então estabelecidos os requisitos para o projeto e construção dos hidrofólios para a construção e teste do conjunto casco-hidrofólio, em escala reduzida. De posse dos resultados dos testes em escala, serão extrapolados os dados para a escala real para verificar a viabilidade do projeto.

Figura 1.2 – Relação de arrasto em função da velocidade típico de embarcações com e sem hidrofólio.



Fonte: Traduzido de International Hydrofoil Society (1998).

O objetivo principal é estudar a viabilidade da utilização de hidrofólios em embarcações do tipo PSV para aumentar a velocidade de serviço sem aumentar a potência instalada.

Na conclusão desse objetivo principal, deve-se cumprir os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Realizar um levantamento de dados das embarcações existentes para caracterização das funções desempenhadas e dimensões deste tipo de navio;
- ✓ Determinar a embarcação base a ser estudada;
- ✓ Modelar a embarcação em CAD para obter os planos de linhas e a curva de resistência ao avanço;
- ✓ Estabelecer os requisitos de projeto para o hidrofólio;
- ✓ Construir um modelo em escala reduzida da embarcação estudada e do hidrofólio projetado;
- ✓ Realizar ensaios simplificados de resistência ao avanço com e sem o hidrofólio;
- ✓ Extrapolar os resultados dos ensaios para a escala real;
- ✓ Verificar a viabilidade do projeto.

## 1.1 METODOLOGIA

A metodologia consiste no conjunto de processo (o que será feito), técnica (como será feito) e ferramenta (com o que será feito). Para a realização deste trabalho será feito um levantamento, através de sites de busca na internet, de navios do tipo PSV existentes para determinar as características típicas de uma embarcação deste tipo. Entre as características estudadas estão:  $C_B$ , Comprimento Total, Boca, Calado, deslocamento; BHP, velocidade de serviço e velocidade máxima; além dos adimensionais usualmente utilizados neste tipo de estudo: L/B, B/H e Fr. Todas as informações serão sintetizadas em uma planilha eletrônica utilizando o programa Excel e, a partir delas, serão construídos gráficos para uma melhor visualização dos limites típicos de cada um dos parâmetros estudados.

Em seguida, será feita uma pesquisa na internet a fim de encontrar uma embarcação que possua informações suficientes para que se possa reproduzi-la em

um programa CAD, e que atenda aos valores típicos de um PSV.

O casco modelado será importado para o programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup> para realizar as simulações de resistência ao avanço utilizando métodos empíricos. Os métodos serão comparados entre si a fim de verificar qual irá melhor representar a embarcação em estudo.

O modelo físico será construído em escala reduzidas para que possam ser realizados ensaios.

Os testes no modelo serão conduzidos a fim de verificar se a resistência ao avanço no modelo construído está coerente com os resultados obtidos através dos métodos empíricos.

Os testes serão feitos com o reboque a força constante para a velocidade pré-determinada. Esta força será obtida através da queda livre de uma massa. Diferente dos ensaios comumente realizados em tanques de prova, onde se ajusta a velocidade para determinar a força de resistência ao avanço, neste ensaio será feito o ajuste da força de reboque até que se obtenha a velocidade desejada.

O hidrofólio terá como requisito principal aumentar a velocidade de serviço da embarcação sem alterar a potência instalada. Para determinar qual perfil será utilizado, será escolhido aquele com a maior relação  $C_L/C_D$ , ou seja, aquele que proporcionará maior sustentação com o menor arrasto.

A modelagem do hidrofólio também será feita no programa Rhinoceros<sup>®</sup>. O comprimento e a largura do mesmo serão definidos com base na informação da área total que ele deverá ter para que a embarcação consiga entrar em regime de planeio.

Assim como a embarcação, o hidrofólio também será construído em escala para que se possam realizar os testes com o modelo.

De posse dos resultados dos testes, os dados serão extrapolados para a escala real e analisados para verificar a viabilidade do projeto e eventuais benefícios do uso de hidrofólios nesta classe de embarcações.

## 2. PRINCIPAIS TIPOS DE EMBARCAÇÕES

A missão geral dos navios de apoio (PSV) é o suporte a exploração e produção de petróleo e gás, podendo ser dividida em um grande número de missões específicas. Uma embarcação desta classe pode ser projetada para cumprir uma única tarefa, no entanto é comum combinar diversas aptidões a um único navio.

Lamb (2004) cita os principais tipos de embarcações de apoio offshore:

**Plataform Supply Vessels:** Plantas *offshore* necessitam constantemente de suprimentos, tais como água, combustível, comida etc. O transporte desses itens são feitos, em geral, por navios do tipo PSV. O projeto desse tipo de embarcação varia de acordo com as condições de mar em que irá operar, distância até a planta, condições de clima, entre outros. O arranjo geral de PSVs seguem uma tendência, com um grande deck aberto a ré da embarcação e a superestrutura a vante, como mostra a Figura 2.1.

Figura 2.1 - Rolls-Royce UT 776 CD.



Fonte: Offshore Energy Today (2012)

**Anchor Handlers Tug Supply Vessels (AHTS):** Formam o segundo maior grupo de navios de apoio, atrás apenas dos PSVs. Combinam várias funções em apenas uma embarcação, entre elas: manuseio de âncoras e cabos de amarração para

equipamentos de perfuração, reboque de equipamentos e plataformas, transporte de suprimentos para plataformas. A necessidade de uma grande força de reboque influencia o projeto, pois requer grande potência de motor, propulsor adequado, formato do casco e calado para que o hélice tenha uma imersão adequada. A boca também deve ser pensada para fornecer a estabilidade transversal necessária quando transportando cabos e âncoras, pois estes podem se mover sobre o deck. O manuseio de âncoras requer grande potência instalada, grande capacidade de guincho, espaço no deck a ré e equipamentos auxiliares de manuseio. Um exemplo deste tipo de embarcação é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Far Scout UT 722 L.



Fonte: Farstad Shipping (2015)

**Seismic Vessels:** Navios sísmicos têm como função determinar a estrutura no fundo do mar através de análises de sinais emitidos pela própria embarcação e refletidos no solo marinho. Os sinais emitidos retornam e são captados por hidrofones presos por cabos. Esses sinais podem ser analisados a bordo ou levados a costa para análises. Uma embarcação desse tipo carrega vários hidrofones, e esse número vem aumentando ao longo dos anos, podendo chegar a 24. Para comportar tal número de cabos, a boca na popa deve ser bem dimensionada. Alguns projetos, mais radicais, chegam a ter uma forma quase triangular, como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Ramform Titan, com 24 cabos.



Fonte: World Maritime News (2013).

**Crewboats:** Navios deste tipo podem carregar tanto passageiros como suprimentos leves. Uma embarcação deste tipo de 40m de comprimento, como mostra a Figura 2.4, pode transportar 50 passageiros e 240 toneladas de suprimentos. São navios usualmente construídos em alumínio e equipados com motores diesel de alta rotação podendo chegar a velocidades de 25 nós. Para prover a força de propulsão necessária geralmente é utilizada uma combinação de motores, tipicamente de 4 a 6. Assim como outros tipos de navios de apoio, os *crewboats* possuem a superestrutura, com acomodações e comando, a vante, e um grande *deck* aberto a ré da embarcação para o transporte de cargas. Tanques abaixo do *deck* superior podem ser instalados para o transporte de água e combustível.

Figura 2.4 - STLS1151 Crewboat.



Fonte: Work Boats International (2015).

**Standby Vessels:** É necessário, na maioria dos campos de exploração *offshore*, ter um navio em espera para evacuação da tripulação da plataforma em uma eventual emergência. Essas embarcações são equipadas com kits de primeiros socorros e estrutura hospitalar para atender, em sua maioria, 300 sobreviventes. Para facilitar o resgate, pequenas bordas livres a meia nau são disponibilizadas. Muitos PSVs são equipados para realizar esta função, uma das vantagens dessa prática é a possibilidade do PSV tomar o lugar do navio em espera caso este necessite ir à costa para reparos ou troca de tripulação. A Figura 2.5 mostra um exemplo de navio *standby* produzido pela Damen Maaskant Shipyard Stellendam e possui capacidade para 125 sobreviventes. Nota-se na imagem a borda livre menor próximo a meia nau para facilitar o resgate.

Figura 2.5 - Damen Safety Standby Vessel 4711.



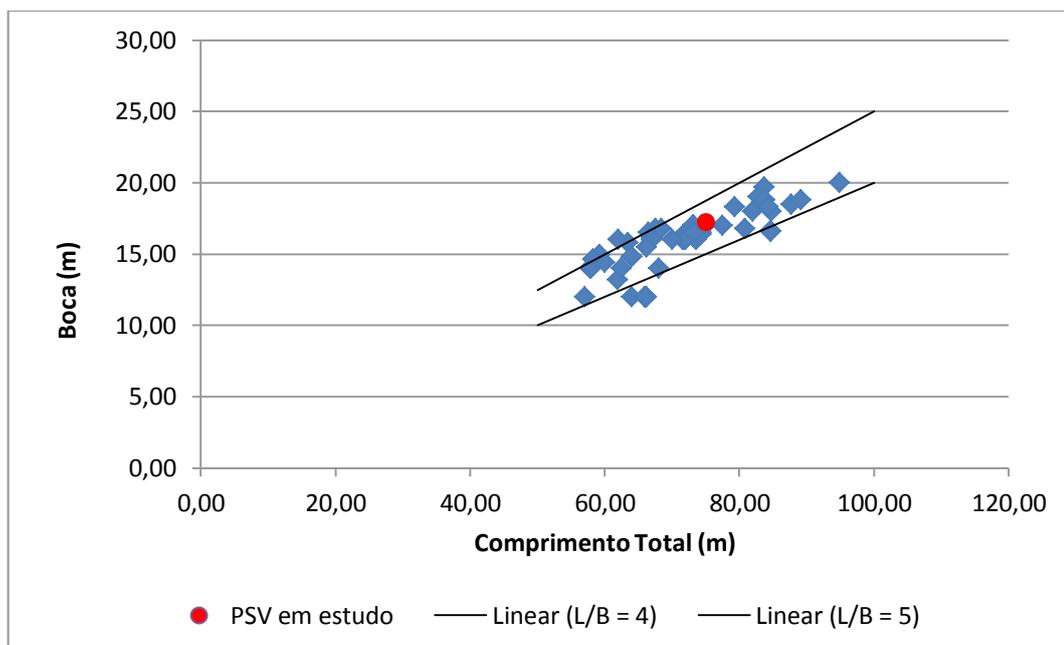
Fonte: DAMEN (2015).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DE UM PSV

Para a caracterização de uma embarcação PSV típica foi realizada uma pesquisa que resultou em uma tabela com informações de comprimento, boca, calado, pontal,  $C_B$ , deslocamento, BHP, velocidades máximas, velocidade de serviço e o ano de construção de cerca de 90 embarcações do tipo PSV. Os dados obtidos foram extraídos de (WEISS et al, 2014), e permitiram a geração de gráficos que permitiram determinar faixas de valores típicos para diversas características de projeto desta classe de navios. A tabela de dados é apresentada de maneira resumida no Apêndice A, e os gráficos analisados são apresentados e discutidos a seguir.

A partir do gráfico apresentado na Figura 3.1 pode-se perceber que a relação Comprimento Total/Boca varia tipicamente entre 4 e 5.

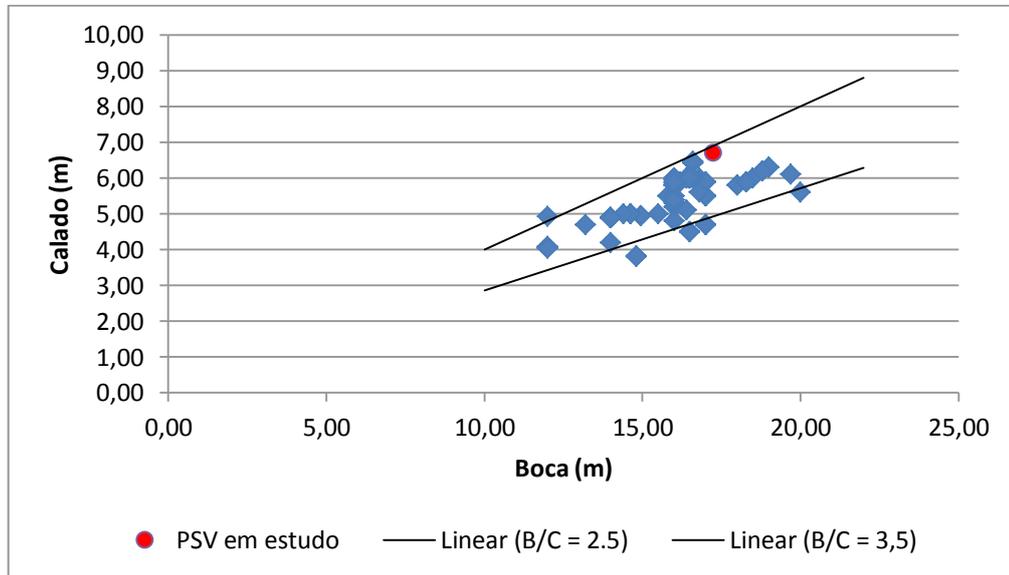
Figura 3.1 – Comprimento Total x Boca de PSVs.



Fonte: O Autor (2015).

A relação de Boca/Calado é mostrada no Gráfico 3.2, no qual é possível observar que uma relação típica de Boca/Calado está entre 2,5 e 3,5.

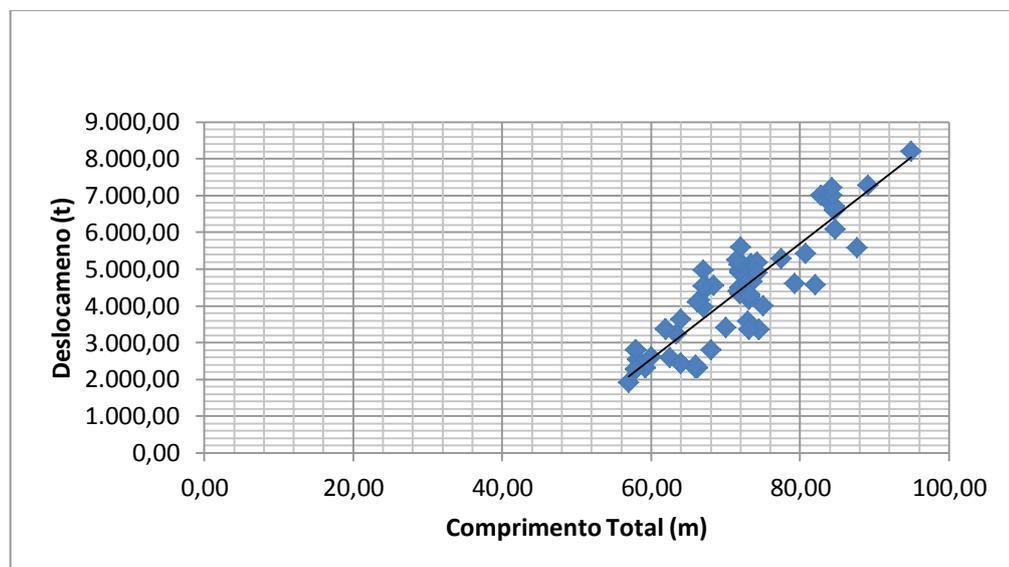
Figura 3.2 – Boca x Calado de PSVs.



Fonte: O Autor (2015).

O gráfico mostrado na Figura 3.3 apresenta a relação entre deslocamento e o comprimento total das embarcações pesquisadas, pode-se notar uma tendência de crescimento linear.

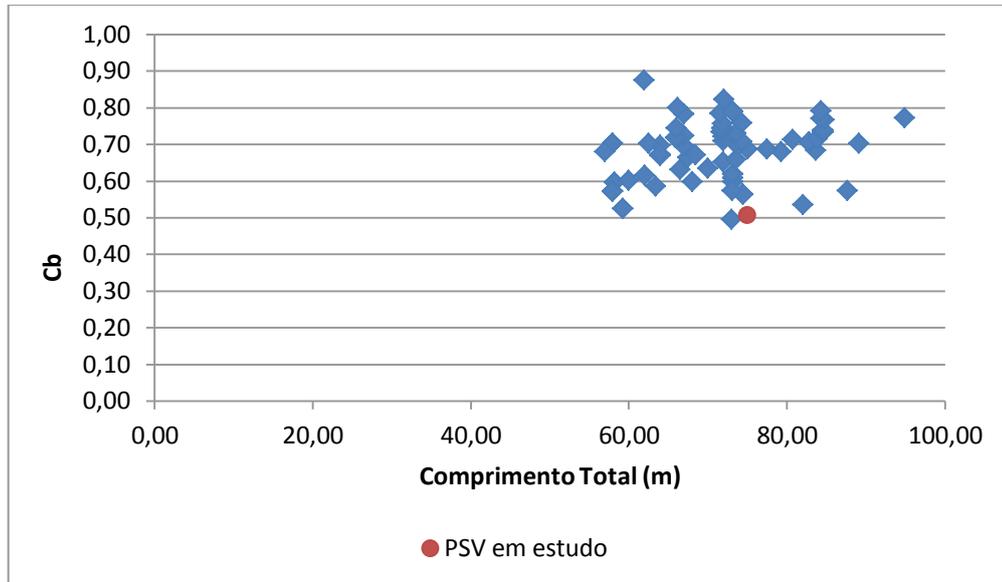
Figura 3.3 – Comprimento Total x Deslocamento de PSVs.



Fonte: O Autor (2015).

O gráfico da Figura 3.4 apresenta os valores de  $C_B$  das embarcações pesquisadas, onde é possível verificar que este varia de 0,5 a 0,8 para a maioria das embarcações.

Figura 3.4 –  $C_B$  das embarcações pesquisadas.



A velocidade de serviço encontrada na grande maioria das embarcações foi 10 nós, enquanto a velocidade máxima variou entre 11 e 14 nós. O Quadro 3.1 apresenta as faixas de valores encontrados pelo levantamento feito.

Quadro 3.1 – Valores Típicos de embarcações do tipo PSV.

L/B	4,0 – 5,0
B/C	2,5 – 3,5
$C_B$	0,5 – 0,8
Velocidade de Serviço (nós)	10,0
Velocidade Máxima (nós)	11,0 – 14,0

Fonte: O Autor (2015).

#### 4. RESISTÊNCIA AO AVANÇO

No atual paradigma competitivo, o projeto de uma embarcação terá sempre a preocupação de minimizar o consumo de energia necessário para a obtenção da velocidade de projeto. O consumo de combustível está diretamente associado com a resistência ao avanço que a embarcação experimenta ao navegar em determinada velocidade. (PICANÇO, 1999).

A resistência ao avanço depende de um conjunto de elementos que se relacionam de uma maneira complexa, tornando o problema, na maior parte das vezes, bastante complicado. Tradicionalmente, o estudo da resistência ao avanço do navio é feito dividindo-se a resistência total nas componentes: resistência de onda, resistência de atrito e resistência de pressão viscosa. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). A Figura 4.1 apresenta a decomposição das componentes básicas que compõem a resistência ao avanço de uma embarcação deslocante.

Figura 4.1 – Componentes básicas da Resistência ao avanço.



Fonte: Adaptado de Molland, Turnock e Hudson (2011).

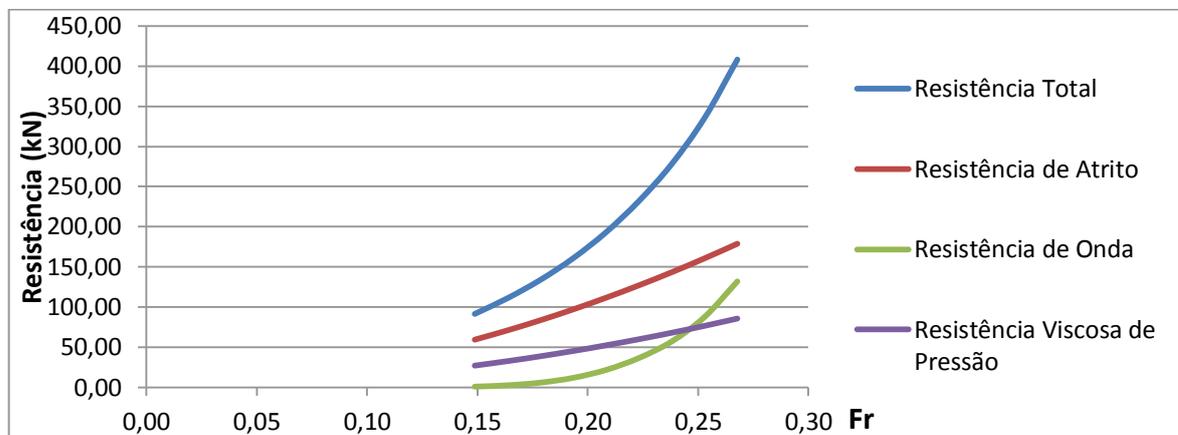
A resistência de atrito é a resistência friccional da água com o casco e corresponde a resistência de uma placa plana com a mesma área molhada do navio arrastada na velocidade considerada na análise.

A resistência de pressão viscosa pode ser entendida como resistência devido a forma do navio, e deve-se a perda de pressão do fluido quando este circunda o casco.

Já a resistência de ondas se divide a geração de ondas na interface casco-superfície do mar.

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), o entendimento dos componentes da resistência ao avanço em navios é importante para a determinação da escala de experimentos e na extrapolação dos resultados do ensaio em escala reduzida para a escala real. O gráfico apresentado na Figura 4.2 mostra um exemplo do comportamento das componentes da resistência ao avanço de um navio mercante típico. Pode-se notar que a parcela de onda ganha importância com o aumento do número de Froude.

Figura 4.2 – Exemplo Resistência ao Avanço e suas componentes.



Fonte: O Autor (2015).

Através de uma análise dimensional aplicada à resistência ao avanço de embarcações pode-se chegar a relação  $\frac{R_T}{\rho \times V^2 \times S}$  que é um número adimensional conhecido como coeficiente de resistência total. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). Portanto a resistência total de uma embarcação pode ser escrita como:

$$R_T = C_T \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \quad [\text{N}] \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade do meio (água),  $V$  a velocidade e  $S$  a área molhada da embarcação.

A potência efetiva de uma embarcação é obtida através da equação 4.2.

$$P_e = R_T \times V \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

Combinando a equação 4.1 com a 4.2 têm-se a equação 4.3.

$$P_e = C_T \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

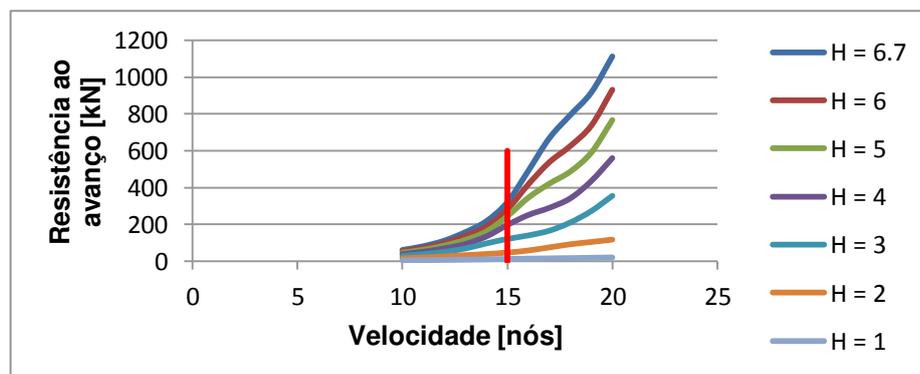
Através da equação 4.3 pode-se notar que a potência efetiva aumenta com o cubo da velocidade.

Mas e se a área molhada diminuísse a partir de determinada velocidade?

Analisando as equações 4.1 e 4.3, pode-se perceber que, a redução desta área provoca a redução da resistência ao avanço, e conseqüentemente da potência necessária. Este é o princípio para o uso de hidrofólios em embarcações, que utiliza a força de sustentação gerada pelos hidrofólios para reduzir o volume imerso da embarcação, reduzindo assim a resistência ao avanço.

Outra maneira de verificar essa influência é analisar curvas de resistência ao avanço de uma embarcação em diferentes calados mostradas na Figura 4.3.

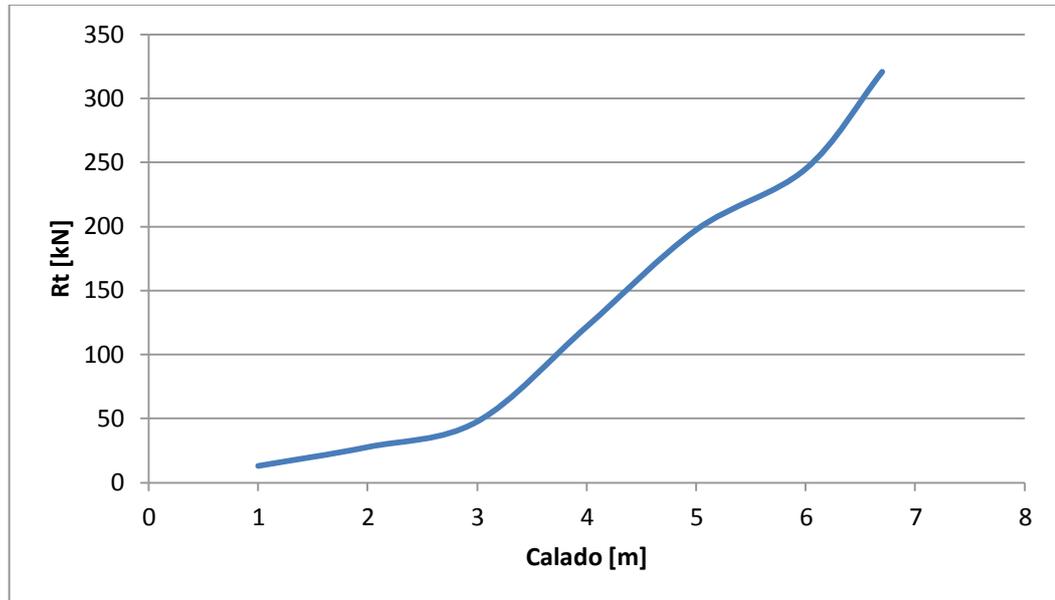
Figura 4.3 – Curvas de resistência ao avanço e diversos calados.



Fonte: O Autor (2015).

Pode-se também comparar as resistências ao avanço para cada calado a uma determinada velocidade para verificar esta influência, o gráfico da Figura 4.4 mostra esta tendência em uma velocidade arbitrária de 15 nós.

Figura 4.4 – Variação da resistência ao avanço em função do calado a 15 nós.



Fonte: O Autor (2015).

## 5. HIDROFÓLIOS

O princípio básico de funcionamento de embarcações com aplicação de hidrofólio é levantar a embarcação para fora d'água, sustentando-a dinamicamente, através da diferença de pressão entre os bordos superior e inferior do hidrofólio.

### 5.1 FUNCIONAMENTO DOS FÓLIOS

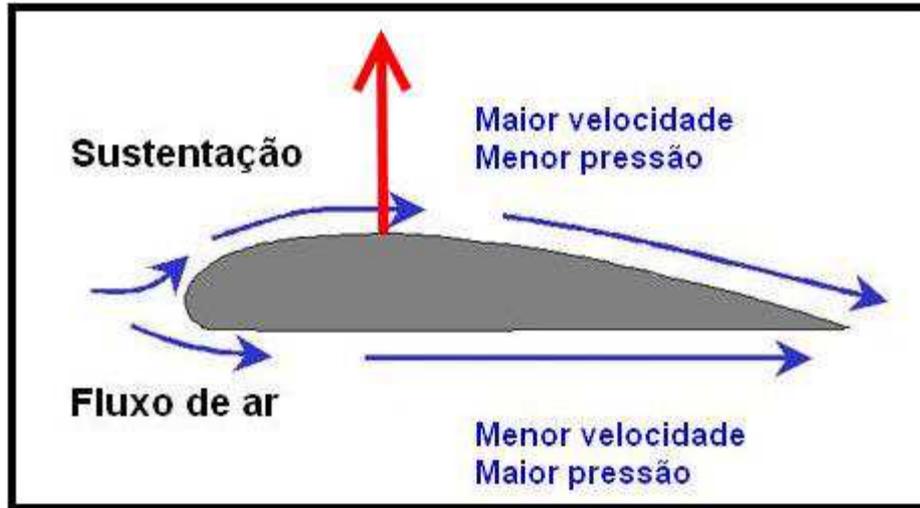
Para que o fluxo se mantenha constante, todo o fluido que chega ao bordo de ataque deve chegar ao bordo de fuga no mesmo instante de tempo e, devido ao formato do perfil, isso só será possível se o fluido do bordo superior desenvolver uma velocidade maior que o fluido do bordo inferior. De acordo com a equação de Bernoulli (5.1), se a velocidade aumentar, a pressão deverá diminuir para que o somatório das duas parcelas se mantenha constante. A queda de pressão no bordo superior cria uma diferença de pressão entre os bordos, gerando assim a sustentação em um perfil de asa, conforme mostra a Figura 5.1.

Equação de Bernoulli: 
$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = Constante \quad (5.1)$$

Além da força de sustentação, há outra componente de força que atua sobre o perfil, a força de arrasto. Trata-se de uma componente tangencial da interação viscosa (atrito) entre o fluido e a superfície do perfil.

Para efeito de modelagem, considera-se que a resultante de ambas as componentes das forças agem no centro de pressão do perfil.

Figura 5.1 – Perfil de asa mostrando o fluxo de ar gerando sustentação.



Fonte: Fapemat Ciência (2014).

A relação entre a sustentação e a pressão dinâmica é dada pelo coeficiente de sustentação,  $C_L$ , que é uma função do formato do perfil e do ângulo de ataque (ângulo do perfil com o fluido), e determina a capacidade de um determinado perfil de gerar sustentação (Hilton). O coeficiente  $C_L$  é dado pela equação 5.2.

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} \times U^2 \times A} \quad (5.2)$$

Onde  $A$  é a área projetada na direção da sustentação (perpendicular ao fluxo).

Como pode ser visto na equação 5.2, a sustentação dos hidrofólios aumenta aproximadamente com o quadrado da velocidade da embarcação, até que ocorra cavitação. Isto fará com que o volume submerso do navio diminua, até que o equilíbrio dinâmico entre o peso da embarcação e a força de sustentação (hidrostática e hidrodinâmica) gerada seja atingido. (MEYER, 2000).

Segundo Faltinsen (2005), a cavitação nos hidrofólios ocorre aproximadamente com uma velocidade de 50 nós.

Outro coeficiente importante a ser definido é o de arrasto. Por ele se pode determinar qual o arrasto gerado pelo hidrofólio, e, portanto, qual a potência necessária para movê-lo a uma determinada velocidade. Assim como o coeficiente de sustentação, o arrasto também depende da forma do perfil e do ângulo de

ataque. O coeficiente  $C_D$  é dado pela equação 5.3.

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} \times U^2 \times A} \quad (5.3)$$

Onde  $A$  é a área projetada na direção do fluxo.

## 5.2 DINÂMICA DE NAVIOS COM HIDROFÓLIOS

Para que a embarcação esteja em equilíbrio, é necessário que as forças atuantes também estejam em equilíbrio, ou seja, o somatório das forças deve ser igual a 0, assim, analisando separadamente as componentes na horizontal,  $x$ , e vertical,  $y$ , é possível verificar o equilíbrio:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= \text{Empuxo} - \text{Resistência ao Avanço} - \text{Arrasto dos Hidrofólios} = 0 \\ \Sigma F_y &= \text{Sustentação Hidrostática} + \text{Sustentação Hidrodinâmica} - \text{Peso} = 0 \end{aligned}$$

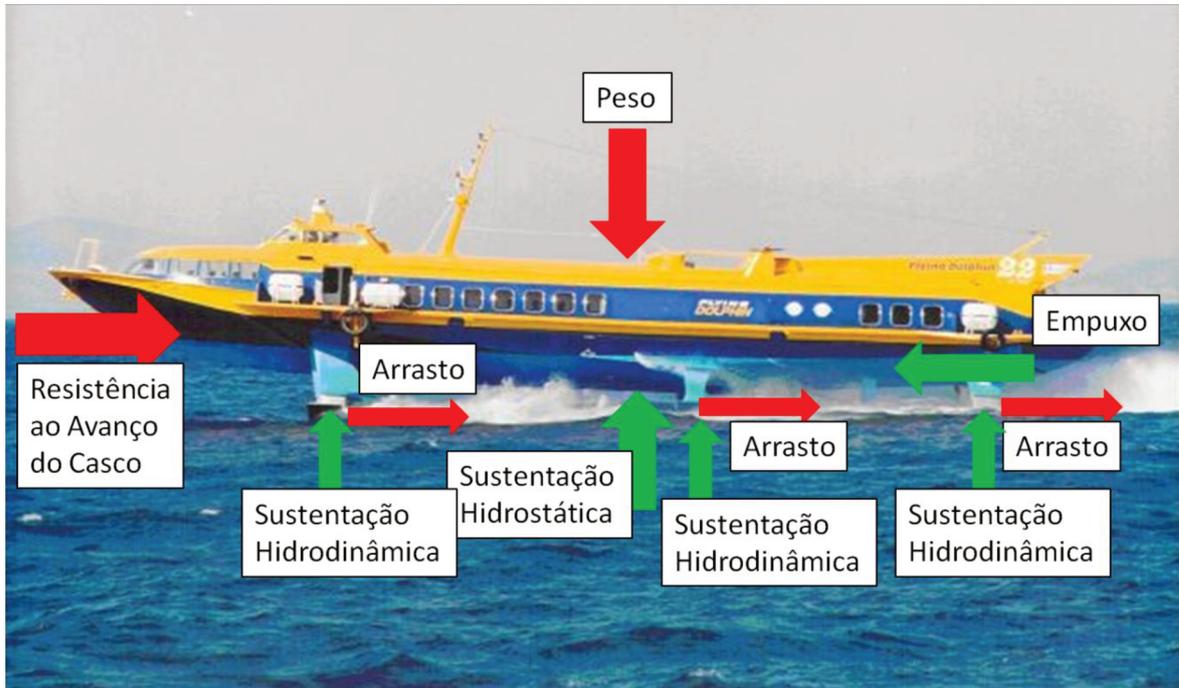
A Figura 5.2 ilustra todas as forças que podem atuar em uma embarcação com hidrofólio.

Para a condição apresentada na Figura 5.2 em particular, as parcelas de Resistência ao Avanço e Sustentação Hidrostática são nulas, pois o casco está totalmente emerso.

Faltinsen (2005) ainda afirma que o hidrofólio e sua estrutura correspondem, tipicamente, a 10% da massa da embarcação.

O alto custo de produção e manutenção dos hidrofólios são as principais razões por não existirem muitas embarcações utilizando este sistema. Existem embarcações com hidrofólios que sustentam apenas parte do volume deslocado. (FALTINSEN, Odd M, 2005).

Figura 5.2 – Forças atuantes em uma embarcação com hidrofólio.



Fonte: Adaptado de Boat Trader (2013).

Pode-se constatar pela Figura 1.2 que, a partir de determinada de velocidade a resistência ao avanço cai abruptamente e atinge seu ponto mínimo. Isso ocorre porque a partir deste instante a embarcação entra em regime de planeio, a velocidade imediatamente antes deste momento é chamada de velocidade de *take off*, ou seja, a velocidade que a embarcação precisa desenvolver para gerar sustentação suficiente para sustentá-la dinamicamente.

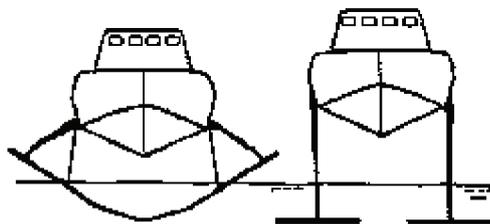
A interseção das curvas de resistência do casco e a de empuxo do propulsor (propeller thrust) fornece o ponto de velocidade máxima da embarcação. Constatase assim, que a velocidade alcançada por embarcações com hidrofólios é muito superior àquela atingida por cascos planantes, isto se deve, exclusivamente, à menor resistência oferecida ao avanço.

Outro ponto importante se deve considerar a estabilidade durante o *take-off*, pois a sustentação tende a se concentrar em uma área menor a cada redução de calado, sendo que estará centralizada na quilha da embarcação. Na condição de planeio, a sustentação será dada pelos hidrofólios, tendo assim uma maior distribuição transversal, reduzindo problemas de estabilidade transversal.

### 5.3 CONFIGURAÇÕES DE HIDROFÓLIOS

Os hidrofólios podem ser divididos em dois grupos: secantes e completamente submersos, conforme ilustrado na Figura 5.3. Os hidrofólios secantes são projetados de forma que fiquem parcialmente fora d'água durante a operação.

Figura 5.3 – Configurações de hidrofólios, secante (esquerda) e completamente submerso (direita).

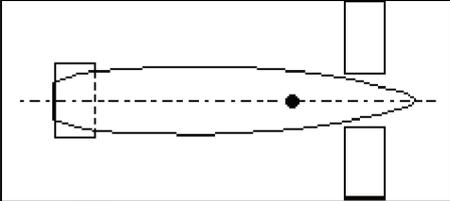
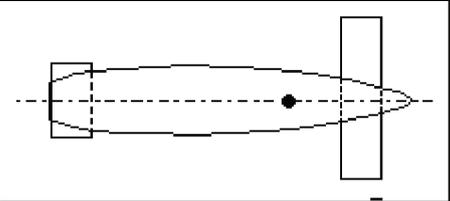
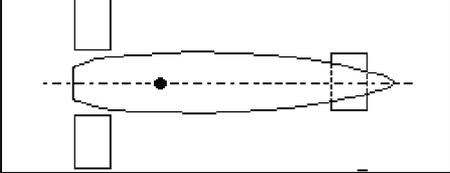
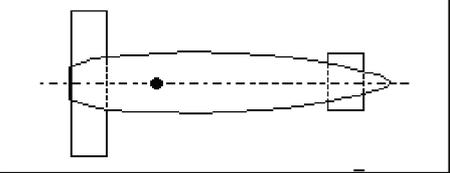
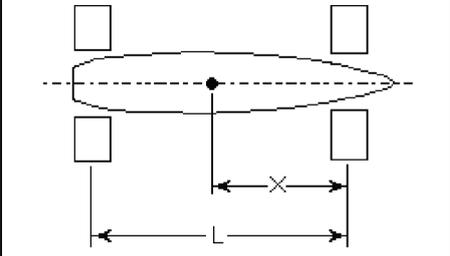
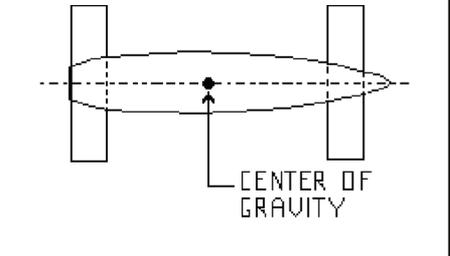


Fonte: International Hydrofoil Society (1998).

Os hidrofólios totalmente submersos necessitam de alguns mecanismos para proporcionar força de sustentação da embarcação, tais como flaps. Assim, segundo Meyer (2000), é necessário que se varie o ângulo de ataque ao longo de todo o hidrofólio ou faça-se uso de flaps para que a sustentação seja obtida de acordo com a velocidade em que se encontra a embarcação, seu peso e estado de mar. Este sistema é semelhante ao verificado nas asas de avião.

Segundo MEYER, (2000), existem três configurações básicas de hidrofólios: Canard, Convencional e Tandem, vistos na Figura 5.4. Se 65% do peso é suportado pelos hidrofólios a vante ou a ré, na velocidade máxima, o sistema é chamado de convencional ou canard, respectivamente. A configuração canard é a mais comum entre as embarcações sustentadas por hidrofólios. A convencional se assemelha muito com aviões comerciais.

Figura 5.4 – Configurações de hidrofólios.

DIVIDIDO	NÃO-DIVIDIDO	ARRANJO
		CONVENCIONAL $0.00 < X/L < 0.35$
		CANARD $0.65 < X/L < 1.00$
		TANDEM $0.35 < X/L < 0.65$

Fonte: International Hydrofoil Society (1998).

## 5.4 PERFIS DE FÓLIOS

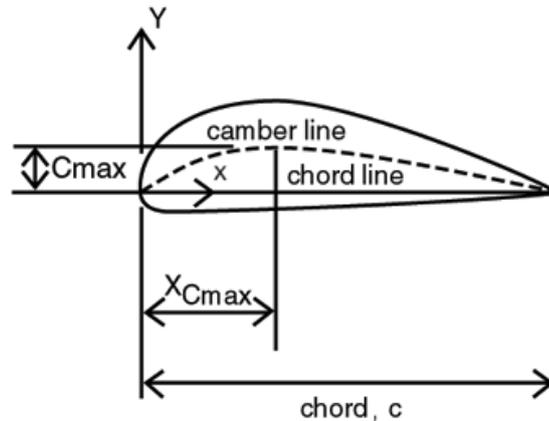
O desenvolvimento dos perfis iniciou no começo do século XX, onde inúmeros túneis de vento foram construídos, em especial na Alemanha e Estados Unidos. Os ensaios feitos em túneis de vento levaram ao desenvolvimento de muitos perfis que são utilizados até hoje.

Perfis NACA são comumente utilizados no projeto de hidrofólios.

### 5.4.1 Geometria de um perfil

A geometria de um perfil é definida por parâmetros básicos, como os mostrados na Figura 5.5, sendo eles: corda, linha média (*camber*), posição da máxima altura do *camber*, distribuição da espessura ao longo da corda.

Figura 5.5 – Parâmetros básicos de um perfil.



Fonte: A Description of the NACA 4-Digit System.

#### 5.4.2 Família NACA

No final da década de 20 a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) iniciou um intenso trabalho de sistematização na definição da geometria dos perfis utilizando uma série de dígitos seguidos da palavra “NACA”, surgindo assim diferentes famílias NACA. (ROSA, 2006). Os dígitos dos códigos NACA podem ser colocados em equações que geram, com precisão, o perfil correspondente.

NACA 4 Dígitos: Foi a primeira família desenvolvida. O primeiro número especifica o *camber* máximo em porcentagem da corda, o segundo indica a posição do *camber* máximo em décimos da corda, os dois últimos números fornecem a máxima espessura do perfil em porcentagem da corda.

NACA 5 Dígitos: Utiliza a mesma forma de espessura que a família de 4 dígitos, porém o *camber* é definido de maneira diferente e a nomeação é mais complexa. O primeiro dígito, quando multiplicado por  $3/2$ , fornece um décimo do coeficiente de sustentação. Os dois números seguintes, quando divididos por 2, fornecem um décimo da posição do *camber* máximo. Os últimos 2 dígitos indicam a máxima espessura do perfil em porcentagem da corda.

Outras famílias de perfil NACA também foram desenvolvidas, como a 4 e 5 dígitos modificada, a série 1, série 6, série 7 e série 8. A partir do momento em que essas séries de perfis foram desenvolvidas, o projeto de asas, pás e hidrofólios passou a ser um processo de seleção entre perfis conhecidos. O que é muito mais simples do que projetar e avaliar o escoamento e a eficiência de um novo perfil.

## 6. ENSAIOS EM ESCALADA REDUZIDA

Modelos físicos ou modelos em escala reduzida são técnicas utilizadas em diversos ramos da engenharia na verificação de protótipos, novos projetos, ou no estudo de fenômenos de difícil modelagem.

O uso de modelos em escala reduzida é uma abordagem especialmente importante no caso de projetos de grande porte com fenômenos de difícil modelagem e construídos em baixa quantidade, nos quais a fabricação de protótipos torna-se uma abordagem inviável do ponto de vista econômico. É importante observar que o projeto de navios e plataformas encontram-se nesta categoria.

Normalmente este tipo de modelagem física é utilizado para complementar os cálculos dos modelos matemáticos durante o projeto. Assim no modelo físico podem ser estudados, em escala reduzida, os fenômenos físicos.

A escala é escolhida como um compromisso entre o custo do projeto e os requisitos técnicos para semelhança. Popularmente é sabido que um modelo grande (em tamanho) resulta em resultados mais precisos, no entanto custam mais e exigem instalações maiores e equipamentos de maior capacidade. Modelos muito pequenos (em tamanho) podem apresentar maiores dificuldades na fabricação e instrumentação. (HARRIS, 1999).

Chakrabarti (1994) determina que uma faixa de escalas para ensaios em tanques de reboque tipicamente utilizada está entre 1:10 e 1:100.

Os ensaios com modelos em escala reduzida tem grande importância no processo de busca de soluções para obtenção de navios mais eficientes – laboratórios com tanques de reboques e túneis de cavitação são sempre utilizados no processo de projeto de linhas de cascos e de propulsores. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Mesmo com os recentes avanços computacionais nas técnicas de modelagem e simulação, a utilização de ensaios em tanque de prova continua sendo uma etapa fundamental no processo de validação dos resultados de um projeto.

## 6.1 SIMILARIDADES DE ESCALA

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), para obter similaridade completa entre o modelo e o navio real, três condições devem ser satisfeitas:

1. Os parâmetros de forma das embarcações devem ser os mesmos, ou seja, similaridade geométrica.
2. Os ensaios devem ser feitos a mesmo número de Reynolds e,
3. Mesmo número de Froude.

$$\text{Número de Reynolds:} \quad Re = \frac{UL}{\nu} \quad (6.1)$$

$$\text{Número de Froude:} \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (6.2)$$

A similaridade completa trata de ensaiar o modelo a Reynolds e Froude constantes para que os fenômenos viscosos e potenciais se conservem. Porém, ao analisar as equações, percebe-se que, para manter o mesmo Re, seria necessário que: o modelo desenvolvesse velocidades  $n$  vezes maiores que o navio real, sendo  $n$  o fator de escala; ou então uma grande variação na gravidade e na viscosidade do fluido. Por isso nos ensaios em geral se mantém o Fr constante, pois a velocidade do modelo seria  $1/\sqrt{n}$  vezes a velocidade do navio, tornando viável o teste em tanques de prova (velocidade máxima de arrasto em tanques de prova  $\approx 6\text{m/s}$ ). Como o número de Reynolds não é o mesmo para o modelo em escala e a embarcação real, os ensaios não podem ser feitos com a similaridade completa.

Para contornar o problema da similaridade incompleta, utiliza-se a similaridade incompleta e, posteriormente, correções são feitas.

## 6.2 EXTRAPOLACAO MODELO-NAVIO

Para prever a resistência ao avanço de navios a partir de ensaios com modelos, os resultados devem ser extrapolados. Existem dois métodos principais de

extrapolação: O método de Froude, que foi introduzido em meados de 1870; E o método de Hughes, introduzido nos anos 50 e que passou a ser utilizado pela ITTC. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

### 6.2.1 Método de Hughes: Fator de forma

Hughes decompõe a resistência total em uma parcela de atrito ( $C_F$ ), que é multiplicada por um fator de forma do casco ( $1+k$ ), e uma parcela devido à geração de ondas ( $C_W$ ), conforme a equação 6.3. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

$$C_T = (1 + k)C_F + C_W \quad (6.3)$$

A ITTC1957 adota a equação 6.4 para determinar o coeficiente de atrito.

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (6.4)$$

O fator de forma ( $1+k$ ) é derivado de testes a baixos números de Froude, onde a resistência de ondas tende a zero e, portanto,  $(1+k) = C_{Tm}/C_{Fm}$ . Este pode ser estimado através de métodos empíricos, numéricos e experimentais.

A regressão de Holtrop propõe que o fator ( $1+k$ ) pode ser obtido de acordo com a equação 6.5.

$$(1 + k) = 0,93 + 0,487118(1 + 0,011C_{stern}) \times \left(\frac{B}{L}\right)^{1,06806} \times \left(\frac{T}{L}\right)^{0,46106} \\ \times \left(\frac{L_{WL}}{L_R}\right)^{0,121563} \times \left(\frac{L_{WL}^3}{\nabla}\right)^{0,36486} \times (1 - C_P)^{-0,604247} \quad (6.5)$$

Onde  $L_R$  é dado por:

$$L_R = L_{WL} \left[ 1 - C_P + \frac{0,06C_P LCB}{4C_P - 1} \right]$$

Onde LCB é a porcentagem de  $L_{WL}$  a vante de  $0,5L_{WL}$ , e  $C_{stern}$  é obtido

através do Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Parâmetro  $C_{stern}$ .

Forma do casco a ré	$C_{stern}$
Seção em V	-10
Seção Normal	0
Seção em U	10

Fonte: Adaptado de Molland, Turnock e Hudson, 2011.

Para extrapolar a resistência ao avanço do modelo para o navio se deve seguir os seguintes passos:

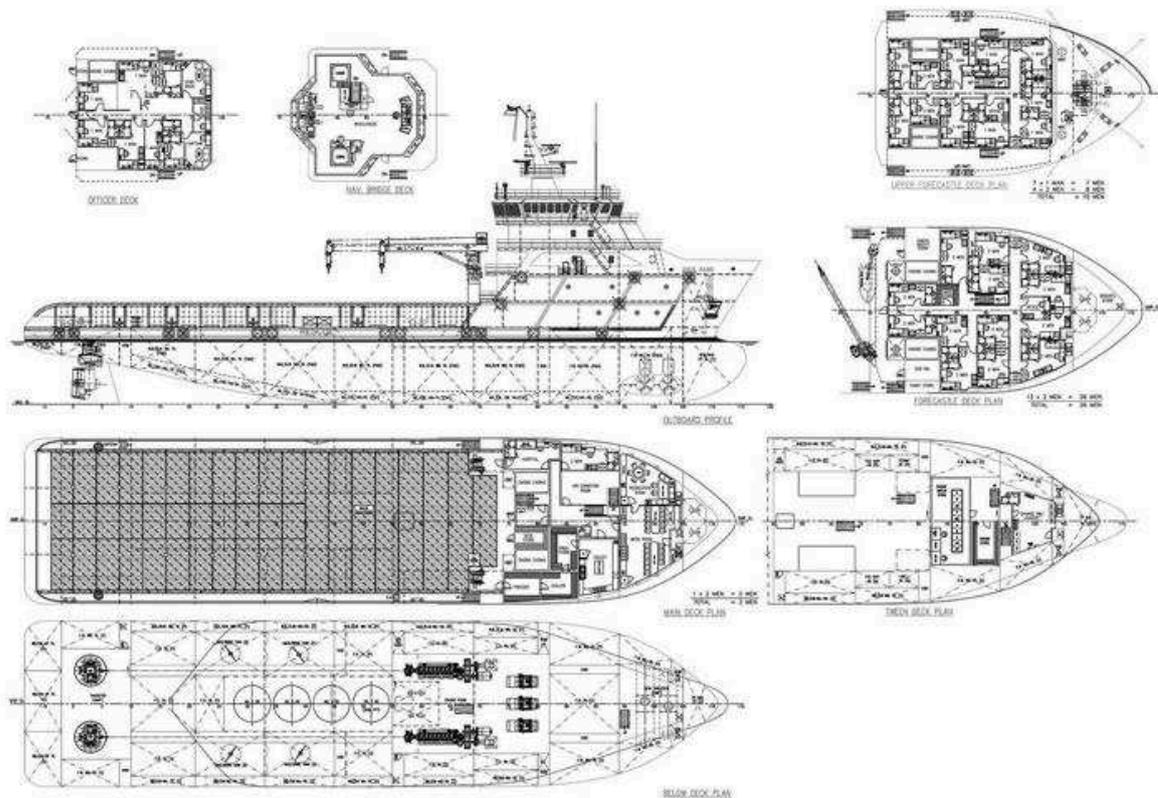
- Utilizar a equação 6.4 para encontrar o coeficiente de atrito para o modelo;
- Através da equação 6.5, encontrar o fator de forma  $(1+k)$ ;
- Utilizar esses valores e o coeficiente de avanço total obtido dos ensaios para determinar o coeficiente de onda;
- Determinar, através da equação 6.4, o coeficiente de atrito para o navio;
- Sabendo que o coeficiente de forma e de onda são iguais para o modelo e navio, pode-se determinar o coeficiente de avanço total do navio.

## 7. PSV EM ESTUDO

Foi realizada uma busca na internet a fim de encontrar uma embarcação que atendesse às dimensões típicas de um PSV (discutidos no capítulo 3 deste trabalho) e que fornecesse informações suficientes para que pudesse ser modelada em 3D.

Assim, foi escolhida a embarcação EM7501 que será utilizada como base para o estudo da aplicação dos hidrofólios, cujo arranjo geral é mostrado na Figura 7.1. As dimensões principais e razões de aspecto são mostradas no Quadro 7.1.

Figura 7.1 – Arranjo Geral PSV EM7501.



Fonte: MEGALODON MARINE SDN BHD

Quadro 7.1 – Dimensões principais e razões de aspecto EM7501.

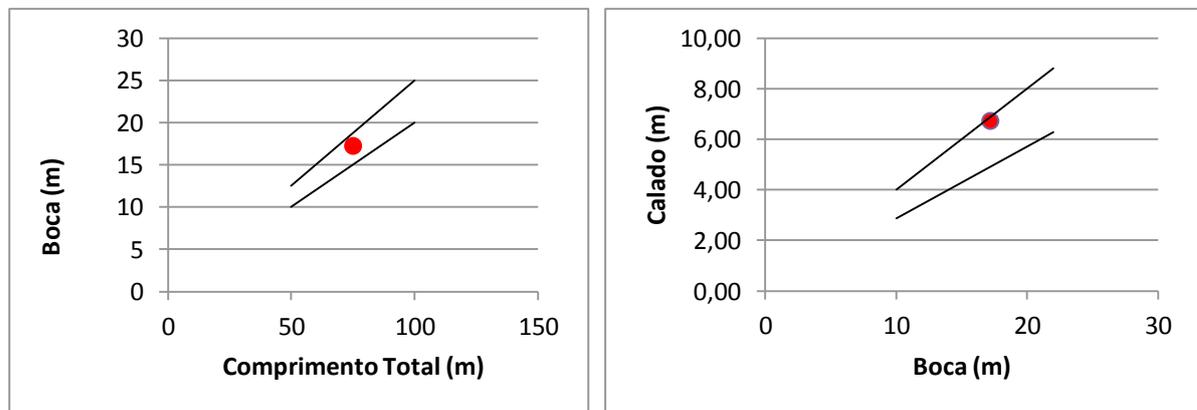
Loa	75 m
B	17,25 m
C	6,7 m
L/B	4,35
B/C	2,65
V	12 nós

Fonte: MEGALODON MARINE SDN BHD

Como pode ser visto no Quadro 7.1, as razões L/B e B/C estão dentro do intervalo de valores típicos para este tipo de embarcação, a Figura 7.2 mostra graficamente que os valores do PSV em estudo (destacado em vermelho) são típicos deste tipo de embarcação.

Valores como  $C_B$ ,  $L_{WL}$  e Deslocamento ( $\Delta$ ) serão determinados ao longo da modelagem do casco utilizando valores padrões de referência.

Figura 7.2 – Razões de aspecto do rebocador em estudo plotadas sobre o gráfico de razões típicas de PSV.



● PSV em estudo

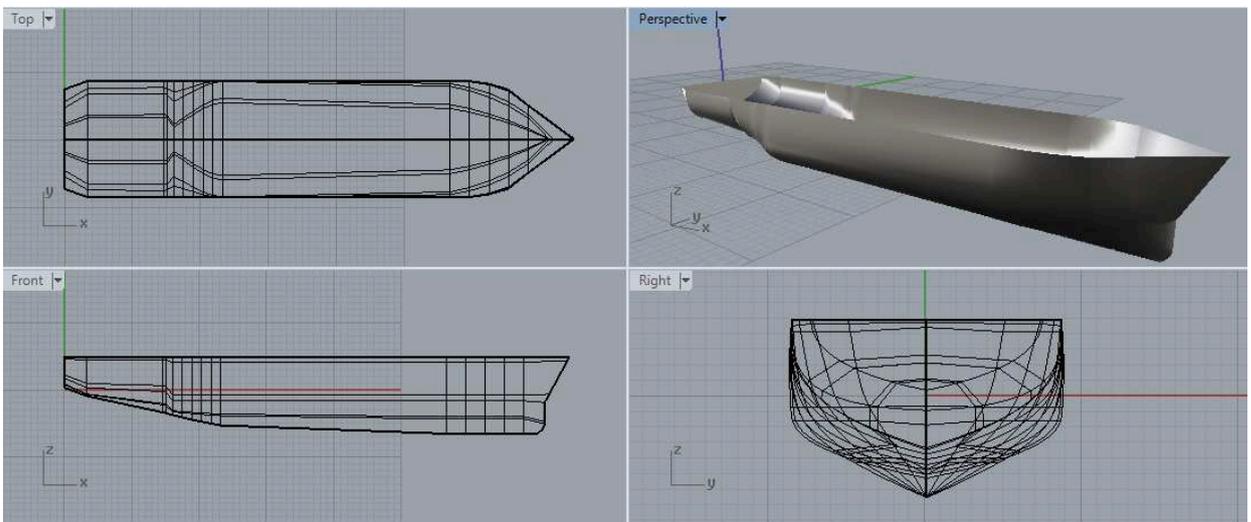
Fonte: O Autor (2015).

A partir da Figura 7.1, será realizada a modelagem 3D no programa Rhinoceros 5.0 com o intuito de, posteriormente, calcular a resistência ao avanço e a potência efetiva. Também serão utilizados os planos de balizas gerado através do programa Orca 3D para a construção do modelo em escala.

## 7.1 MODELAGEM 3D DO CASCO

A modelagem em 3D do casco foi feita no programa Rhinoceros, onde foi utilizado como base o arranjo geral mostrado na Figura 7.1. A figura foi escalada e então foi modelado cada convés da embarcação, a partir do plano de alto foi determinado o perfil da embarcação, bem como a distância entre os conveses. Com as linhas que interligam os conveses, foi gerado o plano de balizas (disponível no Apêndice B) e uma tabela de cotas (disponível no Apêndice C). A Figura 7.3 apresenta o casco modelado.

Figura 7.3 – Modelagem do casco do PSV em estudo utilizando o programa Rhinoceros.



Fonte: O Autor (2015).

Com o casco modelado, é possível conhecer os valores de  $C_B$ ,  $L_{WL}$  e Deslocamento ( $\Delta$ ) da embarcação e compará-los com valores típicos para um PSV para validar o modelo computacional desenvolvido.

A partir do calado de projeto, e com o auxílio do programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup> foi possível encontrar os valores de  $L_{WL}$  e  $\Delta$ , a partir da definição destes parâmetros é possível determinar o valor de  $C_B$ . No Quadro 7.2 são apresentados os valores obtidos através da modelagem computacional e do projeto da embarcação base.

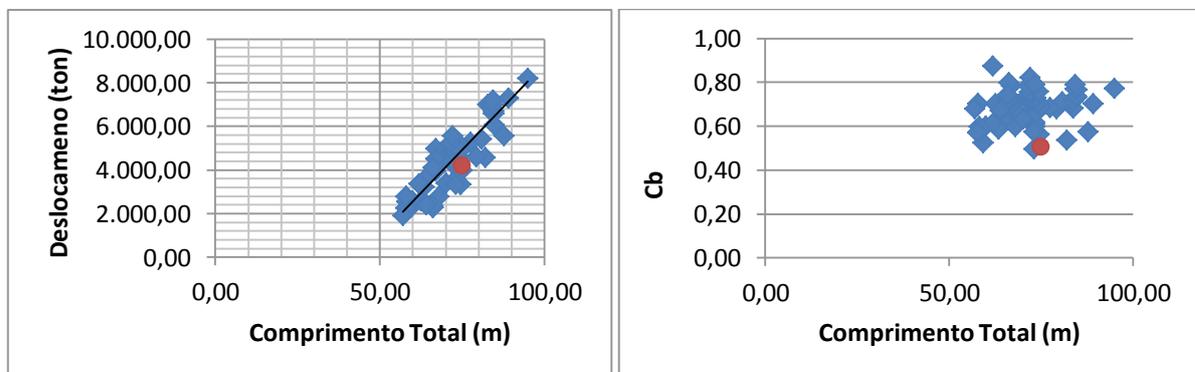
Quadro 7.2 – Quadro comparativo entre os parâmetros de projeto e os resultantes da modelagem em 3D.

	Projeto	Modelagem
Loa	75 m	75 m
LWL	-	72 m
B	17,25 m	17,2 m
C	6,7 m	6,65 m
$C_B$	-	0,5
$\Delta$	-	4220 ton

Fonte: O Autor (2015).

Observa-se através dos gráficos da Figura 7.4 que o valor encontrado para o  $C_B$ , embora não represente a maioria dos PSVs construídos, ainda pode ser considerado um valor típico para este tipo de embarcação.

Figura 7.4 – Relação deslocamento x comprimento total e coeficiente de bloco do navio em estudo plotados sobre os gráficos de valores típicos para PSVs.



Fonte: O Autor (2015).

## 7.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Para determinar a resistência ao avanço foram utilizados os métodos empíricos de Holtrop e van Oortmerssen, bem como o método numérico Slender Body, todos os 3 com implementação própria contida no programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup>.

O método de Holtrop e Mennen é um método estatístico para a determinação da resistência ao avanço da embarcação na fase do projeto preliminar. O método foi desenvolvido por meio de uma análise de regressão de modelos e dados em grande escala (Netherlands Ship Model Basin). Este método abrange um grande número de embarcações e de diferentes tipos.

Van Oortmerssen desenvolveu uma regressão para estimar a resistência ao avanço de pequenas embarcações com comprimento de 15 a 75m. O objetivo era fornecer equações suficientemente precisas para o projeto. As análises foram baseadas em 93 modelos que foram testados em tanque de provas da Holanda.

As restrições dos métodos são dadas pelo Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Restrições dos métodos de van Oortmerssen e Holtrop.

	Van Oortmerssen	Holtrop
L	15 – 75m	-
Fr	0,2 – 0,5	0,0 – 0,8
L/B	3,4 – 6,2	3,9 – 15
LCB	-4,4%L – +1,6%L	-
$\alpha$ (half-angle of entrance)	15° – 35°	-
B/C	1,9 – 3,2	2,1 – 4,0
$C_p$	0,55 – 0,70	0,55 – 0,85
$C_m$	0,76 – 0,94	-

Fonte: Ship resistance and propulsion (2011).

As análises para o método computacional foram feitas no programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup> utilizando o casco importado modelado no Rhinoceros<sup>®</sup>.

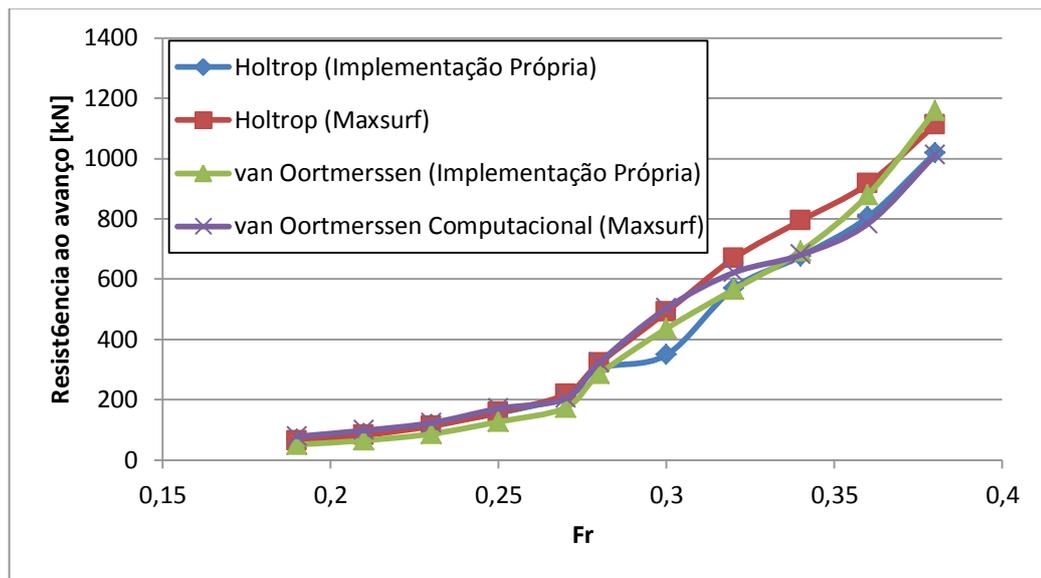
O método de Slender Body é baseado nos trabalhos de Tuck et al (1999) e Couser et al (1996). Este método pode ser aplicado a diferentes formas de cascos, porém os cascos devem ser esbeltos e devem ser simétricos entre bombordo e boreste a partir da linha de centro, forças de planeio são negligenciadas, o que limita a faixa de velocidade. O Slender Body prevê apenas a parcela de onda da resistência total, deve-se então calcular a resistência de atrito através de outros métodos, o programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup>, que será utilizado para implantar o

método, utiliza os dados da ITTC'57 para calcular o coeficiente de atrito e o fator de forma especificado pelo usuário.

A validade do método varia de acordo com a razão L/B, quanto maior a relação, maior a precisão do método e maior a faixa de velocidade cujos resultados são satisfatórios. Tipicamente, bons resultados são encontrados para L/B entre 5 e 6.

Foram feitas análises de resistência ao avanço para velocidades entre 10 e 20 nós através do uso do programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup> e também de planilhas em Excel criadas para a disciplina de Projeto de Navios I, os resultados são mostrados no Apêndice D. A Figura 7.5 apresenta as curvas de resistência ao avanço a partir dos resultados do Apêndice D.

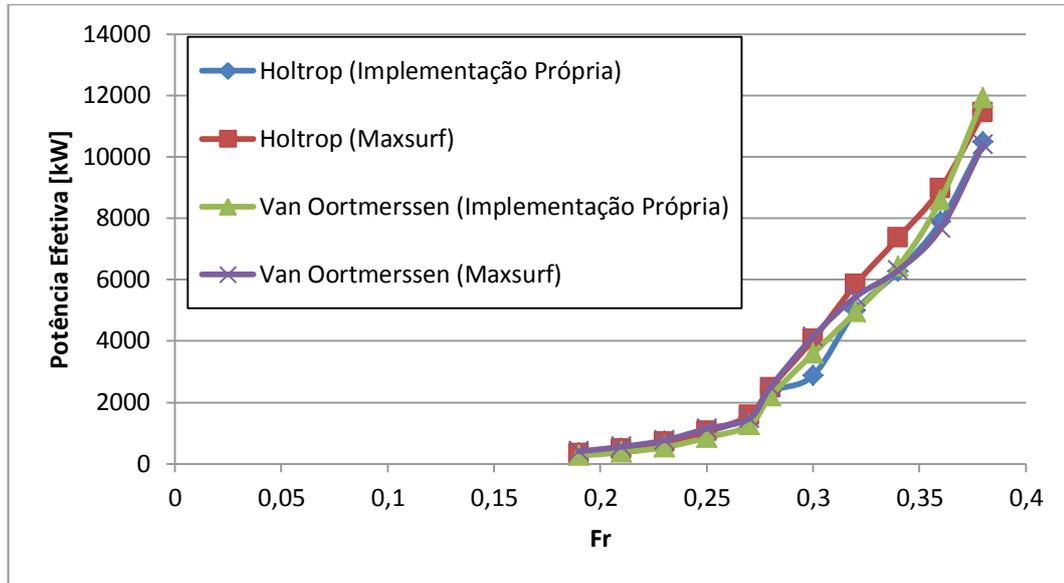
Figura 7.5 – Gráfico das resistências ao avanço por diferentes métodos.



Fonte: O Autor (2015).

A partir da resistência ao avanço é possível determinar a potência efetiva ( $P_e$ ) estimada para cada um dos métodos considerados, a Figura 7.6 apresenta os resultados.

Figura 7.6 – Gráfico de potência efetiva por diferentes métodos.



Fonte: O Autor (2015).

### 7.3 PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO

Por questões de construção, transporte e ensaios, foi determinado que o modelo deveria ter 1 metro de comprimento total, portanto, como o navio em estudo tem 75m, foi definida um fator de escala de 1:75.

Aplicando o fator de escala às outras dimensões geométricas da embarcação, foi determinada a boca e o calado. O peso total do modelo deve ser tal que gere o calado calculado. E como ambos (modelo e real) têm o mesmo  $C_B$ , é possível obter o deslocamento do modelo através da igualdade mostrada na equação 7.1. As dimensões do modelo são mostradas no Quadro 7.4. O peso também pode ser calculado através do fator de escala elevado ao cubo.

$$\left( \frac{\nabla}{L \times B \times C} \right)_{\text{modelo}} = \left( \frac{\nabla}{L \times B \times C} \right)_{\text{modelo}} \quad (7.1)$$

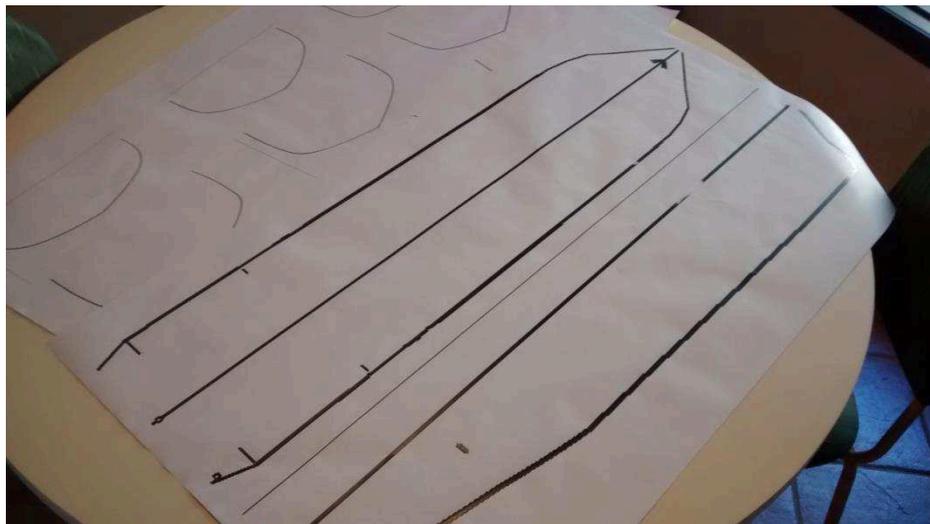
Quadro 7.4 – Dimensões principais e razões de aspecto do modelo EM7501.

Loa	1,00 m
B	0,23 m
C	0,09 m
$C_B$	0,50
$\nabla$	9,95 kg

Fonte: O Autor (2015).

A partir da modelagem em Rhinoceros<sup>®</sup>, foram impressos planos de alto, linha d'água e balizas já na escala 1:75 como mostrado na Figura 7.7, a partir dos quais foi construído o modelo físico.

Figura 7.7 – Planos de alto, linha d'água e balizas impressos para construção do modelo.



Fonte: O Autor (2015).

Para a construção do casco, foram utilizadas chapas de poliuretano, como mostrado na Figura 7.8. As chapas não tinham a espessura equivalente ao pontal do modelo, portanto foram usadas 3 chapas coladas para atingir a espessura necessária.

Figura 7.8 – Chapas de Poliuretano utilizadas para confecção do modelo.



Fonte: O Autor (2015).

A partir do plano de balizas, foram elaboradas seções em papelão espesso para facilitar a obtenção de um casco idêntico ao modelado em CAD. As seções podem ser vistas na Figura 7.9.

Figura 7.9 – Seções do casco em papelão espesso.



Fonte: O Autor (2015).

O bloco de poliuretano foi cortado primeiro a partir do plano de alto e então no plano de linha d'água, formando assim um casco com costados retos.

A etapa seguinte é a que demanda maior tempo de trabalho e cuidados.

Cada seção do casco deve ser cortada e então lixada até que se tenha o perfeito encaixe com a seção em papelão. A Figura 7.10 ilustra o casco em trabalho já avançado, ainda precisando de acabamentos.

Figura 7.10 – Vista frontal do casco em trabalho, seção posicionada para verificação da geometria.



Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.11 – Casco em fase anterior ao acabamento.



Fonte: O Autor (2015).

Conforme pode ser visto na Figura 7.11, devido a união das placas de poliuretano, faz-se necessário um acabamento. Este acabamento foi feito utilizando massa de reparo comum. Foram necessárias várias seções de aplicação e lixamento para se obter um aspecto final aceitável. A Figura 7.12 apresenta o casco durante esta etapa.

Figura 7.12 – Casco sendo reparado por massa de reparo.



Fonte: O Autor (2015).

Após a etapa de acabamento, verificou-se se o modelo estava coerente com o projeto através de um teste de flutuação, onde foi verificada a massa do modelo para que pudesse ser adicionada até que o peso total correspondesse ao peso da embarcação na escala. No primeiro teste, o modelo obteve um calado de 11cm, um valor significativamente diferente do determinado pelo projeto. Fez-se necessário então uma remodelagem do casco, devendo esta ser ainda mais aproximada das seções de papelão. Em um novo teste se verificou um calado de 9cm, indicando que o formato do casco do modelo está próximo ao da embarcação real.

Após serem feitos os acabamentos superficiais no casco, iniciou-se a fase de impermeabilização. Nesta etapa foi utilizada a resina poliéster comum.

A resina foi aplicada sobre o casco com um pincel em três etapas para garantir uma maior espessura. O processo é mostrado na Figura 7.13.

É importante lembrar que a resina foi aplicada exclusivamente para impermeabilização do casco, não tendo qualquer função estrutural. Também não foi feito um estudo para aplicar uma resina com menor absorção de água ou proteção UV, visto que ela terá contato com o ambiente nocivo por curtos períodos.

Figura 7.13– Casco revestido puramente com resina poliéster.



Fonte: O Autor (2015).

A etapa final do processo de obtenção do casco foi a pintura do casco, utilizando tinta a base de óleo, azul e vermelha, demarcou-se a linha d'água. O modelo final ficou com uma massa de 1,4kg. Também foi feito um recorte no convés para a adição de 8,6kg de massa para completar a similaridade na distribuição de massa a bordo. O recorte fez-se necessário para que o centro vertical de massa (VCG) da embarcação diminuísse, pois apenas adicionando os pesos sobre o convés o barco se tornava instável e emborcava. A Figura 7.14 ilustra o casco acabado e flutuando em sua linha da água.

Figura 7.14 – Casco finalizado e flutuando na linha da água.



Fonte: O Autor.

## 7.4 ENSAIOS COM O MODELO

Conforme discutido no capítulo 6, além da semelhança geométrica, é preciso manter a semelhança dinâmica entre o modelo em escala e a embarcação real, assim os testes serão realizados com os mesmos valores de Froude que a embarcação real. O Quadro 7.5 apresenta as velocidades equivalentes considerando um fator de escala igual a 75, sendo  $V_s$  a velocidade da embarcação em tamanho real e  $V_m$  do modelo em escala reduzida.

Quadro 7.5 – Velocidades equivalentes para o mesmo valor de Froude na escala 1:75.

<b>Vs [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Vm [m/s]</b>
10	0,19	0,59
11	0,21	0,65
12	0,23	0,71
13	0,25	0,77
14	0,27	0,83
15	0,28	0,89
16	0,30	0,95
17	0,32	1,01
18	0,34	1,07
19	0,36	1,13
20	0,38	1,19

Fonte: O Autor (2015).

Os ensaios com o modelo não serão conduzidos em um tanque de provas e sim em uma piscina. Por isso algumas adaptações precisam ser feitas quanto ao sistema de reboque e alguns erros podem influenciar o resultado, alguns deles são citados abaixo:

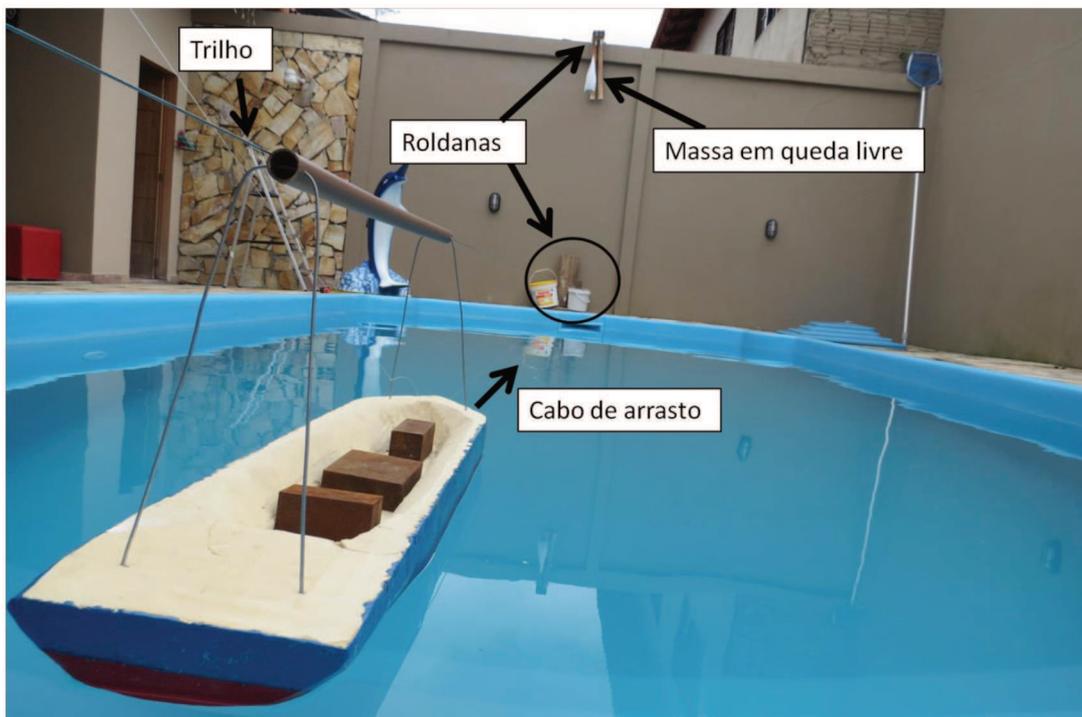
- Imprecisão na tomada de tempo atribuída ao erro humano ao iniciar e parar o cronômetro;
- Atrito em roldanas;
- Atrito entre o fio do trilho percorrido e as argolas do modelo;
- Assimetria do casco devido ao método manual de construção;
- Ponto de reboque (pode afetar a resistência ao avanço);
- Profundidade em que os testes serão conduzidos. Por ser da mesma

ordem de grandeza do navio, pode representar águas rasas.

Diferentemente dos testes em tanques de prova, onde se varia a velocidade para determinar a resistência ao avanço, nos testes realizados neste trabalho a resistência ao avanço será obtida através do método de tentativa e erro, onde, através da queda livre de uma massa, será imposta a resistência ao avanço e então a velocidade do modelo será calculada através do tempo necessário para percorrer uma distância pré-determinada. Esse procedimento é repetido com diferentes valores de massa até que o modelo tenha adquirido a velocidade desejada.

A massa terá uma queda livre de 4,0 metros, portanto o modelo será rebocado por essa distância. Estima-se que serão necessários 2 metros para que o modelo atinja a velocidade final, restando até 2 metros para a aquisição dos dados. Para confirmar se o modelo estará em regime permanente após a distância estipulada, serão feitas variações na distância de aceleração, sendo que, se a velocidade no trecho final se mantiver constante, confirma-se que o modelo já está em regime permanente. A Figura 7.15 mostra como serão conduzidos os testes.

Figura 7.15 – Aparelhagem para os ensaios de resistência ao avanço.



Fonte: O Autor (2015).

Para garantir que o modelo mantenha uma trajetória reta, será adicionado

um sistema de trilho, onde argolas presas à embarcação deslizem através de um fio fixo em ambas as margens da piscina.

O objetivo deste ensaio é determinar a curva de resistência ao avanço e compará-la com as curvas obtidas por métodos teóricos.

## 7.5 RESULTADO DOS ENSAIOS

Foram realizados 10 ensaios, sendo que a massa em queda livre, ou, neste casco, a resistência ao avanço, foi variada 4 vezes, fornecendo assim 4 pontos para determinar a curva de resistência ao avanço do modelo. Para cada massa foi tomado o tempo 2 ou 3 vezes, sendo que, caso as duas primeiras medições fossem consideradas satisfatória a terceira se fazia desnecessária. Uma média entre as velocidades para cada condição foi feita a fim de diminuir erros na tomada de tempo. Os resultados são apresentados nos Quadros 7.6 e 7.7.

Quadro 7.6 – Resultados ensaios de arrasto.

Teste	Massa [g]	Distância [m]	Tempo [s]	Velocidade [m/s]	Rt [N]
1	455	2	1,92	1,04	4,46
2	455	2	2,04	0,98	4,46
3	220	2	2,7	0,74	2,16
4	220	2	2,72	0,74	2,16
5	130	2	3,93	0,51	1,28
6	130	2	4,1	0,49	1,28
7	130	2	3,99	0,50	1,28
8	160	2	3,29	0,61	1,57
9	160	2	3,45	0,58	1,57
10	160	2	3,4	0,59	1,57

Fonte: O Autor (2015).

Quadro 7.7 – Resultados das médias dos valores obtidos nos ensaios.

Fr	Tempo [s]	Velocidade [m/s]	Rt [N]
0,32	1,98	1,01	4,46
0,24	2,71	0,74	2,16
0,16	4,01	0,50	1,28
0,19	3,38	0,59	1,57

Fonte: O Autor (2015).

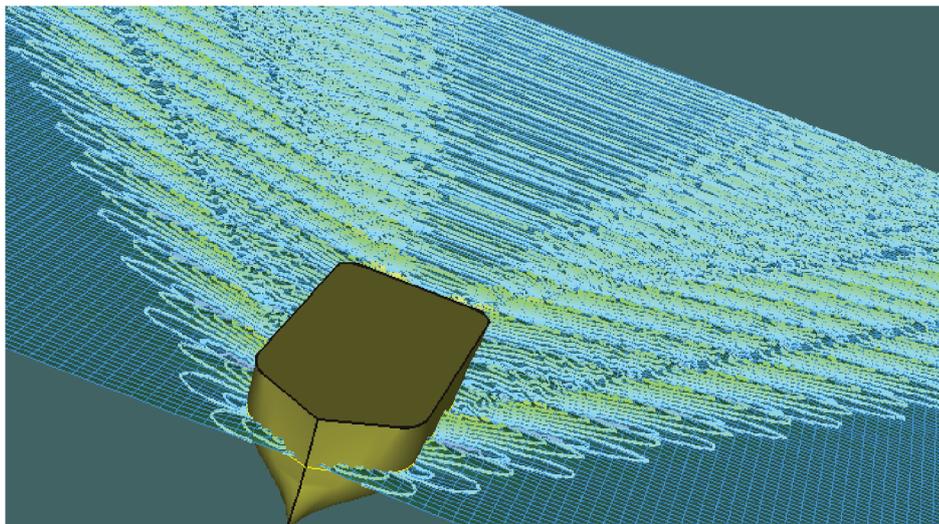
As Figuras 7.16 e 7.17 apresentam o modelo sendo arrastado a uma velocidade de 0,60 m/s, equivalente à velocidade de serviço da embarcação em tamanho real.

Figura 7.16 – Ensaio de arrasto a  $Fr = 0,19$ .



Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.17 – Simulação computacional utilizando o método do Slender Body.



Fonte: O Autor (2015).

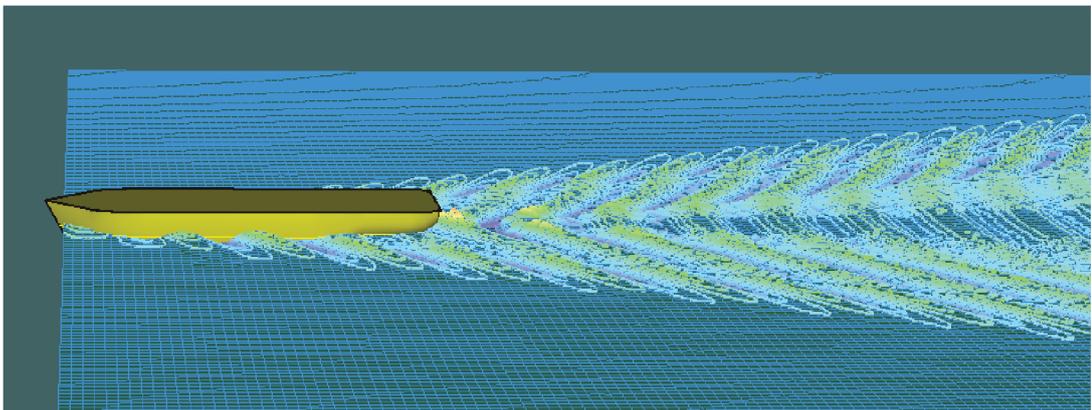
As Figuras 7.18 e 7.19 apresentam o resultado da simulação computacional feita com o casco gerado no programa Rhinoceros<sup>®</sup> na velocidade de serviço utilizando o método do Slender Body no programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup>.

Figura 7.18 – Ensaio de arrasto a  $Fr = 0,19$ .



Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.19 - Simulação computacional utilizando o método do Slender Body (vista lateral).



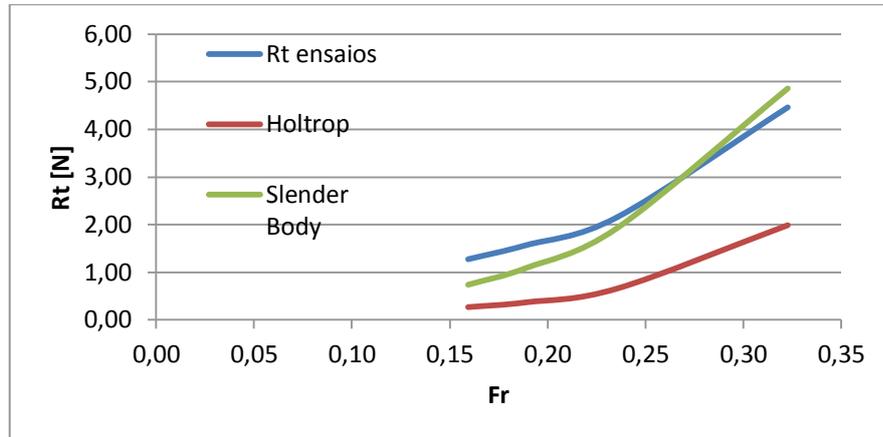
Fonte: O Autor (2015).

Se comparadas as Figuras 7.16 com a Figura 7.17 e as Figuras 7.18 e 7.19, pode-se perceber que o padrão de ondas nas imagens é muito semelhante, mostrando que a simulação está coerente com o ensaio.

A Figura 7.20 mostra os gráficos comparando os valores obtidos através dos ensaios, com aqueles obtidos através do método numérico Slender Body, e o método empírico de Holtrop e Mennen.

Através da Figura 7.20 se percebe que a curva de resistência ao avanço obtida através do método de Holtrop e Mennen está bem abaixo das demais curvas, eventualmente isso deve-se ao fato de que este método pode não ser o mais indicado para este tipo de embarcação, pois considera dados em sua maioria de grandes embarcações mercantes

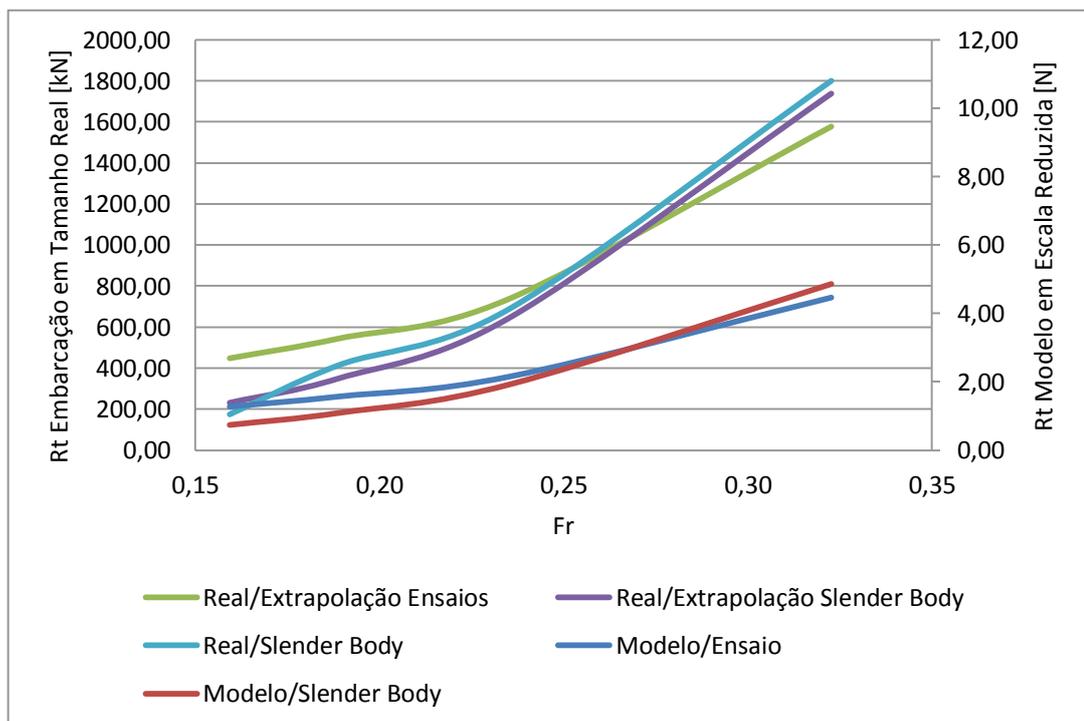
Figura 7.20 – Gráficos comparativos entre os métodos estudados.



Fonte: O Autor (2015).

Os valores de resistência ao avanço obtidos para o modelo foram extrapolados para o navio em tamanho real e comparados com valores obtidos pelo método do Slender Body calculado diretamente a partir da simulação de um modelo computacional em tamanho real. A Figura 7.21 apresenta os resultados de forma gráfica, os valores são apresentados no Apêndice E.

Figura 7.21 – Comparação entre as curvas extrapoladas e a obtida pelo programa Maxsurf Resistance®.



Fonte: O Autor (2015).

## 7.6 PROJETO DO HIDROFÓLIO

Este estudo será feito para que o hidrofólio atenda a alguns requisitos de projeto, os requisitos estabelecidos para este trabalho são:

- Manter a potência efetiva (760 kW a 12 nós) da embarcação sem a presença dos hidrofólios;
- Obter uma nova velocidade de serviço de, pelo menos, 20 nós.

Para projetar o hidrofólio, é necessário determinar primeiramente o perfil que ele irá ter. Foi pesquisado na família NACA de 4 e 5 dígitos, um perfil que fornecesse a maior razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto,  $C_L/C_D$ . Como discutido no capítulo 5, além do formato do perfil, outro fator que determina os coeficientes é o ângulo de ataque, ou seja, o ângulo em que este perfil está recebendo o fluxo.

Com o auxílio da ferramenta Airfoil Tools, foi possível determinar o perfil NACA com o respectivo ângulo de ataque que forneceu a maior razão  $C_L/C_D$ , o Quadro 7.8 apresenta os parâmetros do perfil encontrado.

Quadro 7.8 – Parâmetros perfil NACA escolhido.

<b>NACA 25112</b>	
Ângulo de ataque ( $\alpha$ )	7,5°
$C_L/C_D$	109,42
$C_L$	1,0439
$C_D$	0,00954

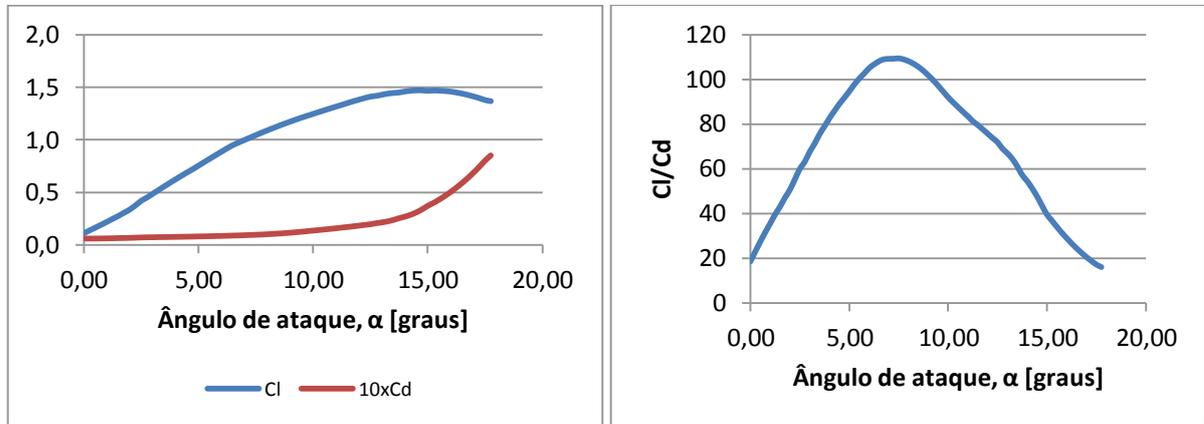
Fonte: Airfoil Tools.

Uma análise da variação dos coeficientes  $C_L$  e  $C_D$  com a variação do ângulo de ataque  $\alpha$  foi feita a fim de verificar se o ângulo encontrado está próximo ao limite de trabalho do perfil, sem que ocorra o fenômeno de *stalling*, onde há grande perda de sustentação e aumento significativo de arrasto. Foi verificado então que o ângulo limite no qual começa a ocorrer o *stall* é de 14,5°, portanto ainda há uma boa margem de segurança em relação ao ângulo de ataque estabelecido. A Figura 7.22 apresenta graficamente os resultados discutidos.

A plataforma do Airfoil Tools também conta com uma ferramenta gráfica que

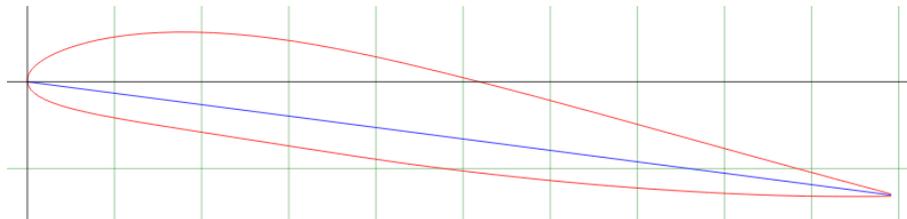
fornece o perfil estudado com o ângulo de ataque escolhido. A Figura 7.23 apresenta o perfil NACA25112 com um ângulo de ataque de 7,5 graus.

Figura 7.22 – Variação de  $C_D$  e  $C_L$  com a variação do ângulo de ataque  $\alpha$ .



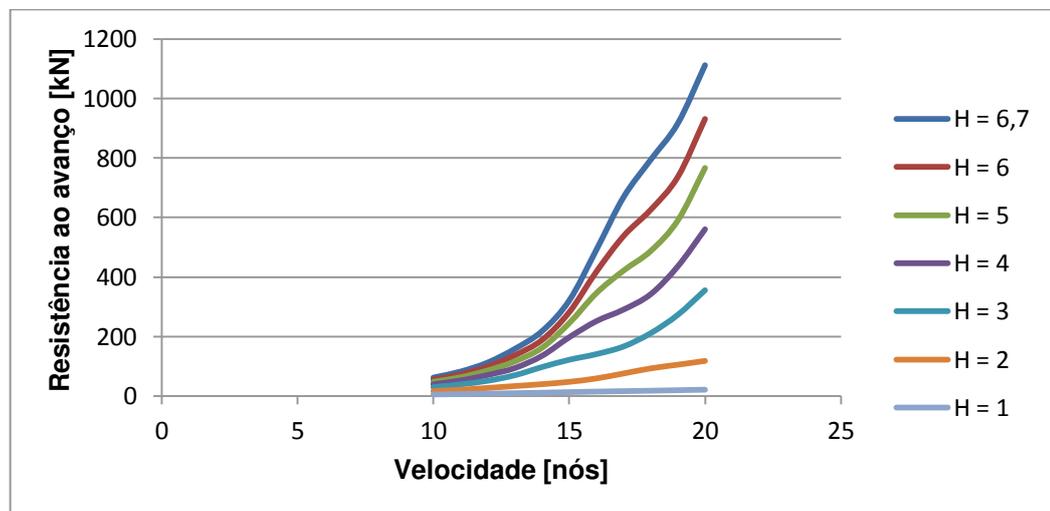
Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.23 – Perfil NACA 25112 com  $\alpha=7,5^\circ$ .



Fonte: Airfoil Plotter.

Figura 7.24 – Resistência ao avanço para determinadas condições de calado.



Fonte: O Autor (2015).

Como o princípio de utilização de um hidrofólio é sustentar dinamicamente parte ou todo o peso da embarcação, foi feito um estudo sobre a variação sistemática do calado da embarcação, mostrando a redução de resistência ao avanço em função da redução do calado da embarcação. Este estudo pode ser visto no gráfico da Figura 7.24.

Para tentar encontrar uma configuração de hidrofólios que atenda aos requisitos de projeto foi determinado qual deveria ser a máxima resistência ao avanço a 20 nós (com os fólios) que fosse equivalente à potência efetiva da embarcação sem a presença dos hidrofólios na velocidade de serviço, ou seja, a potência efetiva da embarcação será considerada igual a 760 kW. Portanto, a resistência ao avanço máxima é de:

$$20 \text{ nós} \times R_t \text{ kN} = 760 \text{ kW}$$

$$R_t = 74 \text{ kN}$$

Conhecido o coeficiente de arrasto (visto no Quadro 7.8) é possível determinar qual a máxima área da seção transversal que o hidrofólio deve ter para produzir tal arrasto, assim:

$$A_{transversal} = \frac{R_t}{0,5 \times \rho \times V^2 \times C_D}$$

$$A_{transversal} = \frac{74}{0,5 \times 1,025 \times (20 \times 0,5144)^2 \times 0,00954}$$

$$A_{transversal} = 143 \text{ m}^2$$

Considerando o ângulo de ataque de  $7,5^\circ$ , se pode, por trigonometria, determinar a área projetada no sentido do fluido. Esta área será utilizada para o cálculo da sustentação.

$$A = \frac{A_{transversal}}{\text{tg}7,5^\circ} = 1085 \text{ m}^2$$

Esta área se aproxima muito da área projetada do casco da embarcação,

pois se for considerada uma largura igual à boca da embarcação, o comprimento total do hidrofólio seria de, aproximadamente, 63 metros.

Portanto o ideal seria que esta área fosse muito menor que este valor, mas para verificar se nesta configuração a embarcação consegue entrar em regime de planeio, foi realizado um estudo para verificar o quanto de sustentação o hidrofólio gera de acordo com a velocidade.

Utilizando a equação 5.2, mostrada no capítulo 5 deste trabalho, foi possível calcular a sustentação gerada para cada condição de velocidade de avanço. E, enquanto a força gerada não for capaz de sustentar dinamicamente todo o peso da embarcação é possível determinar o volume que ela está deslocando através do somatório de forças na direção vertical, que deve ser igual a zero (discutido no capítulo 5).

Portanto, para cada novo valor de sustentação, foi subtraído o deslocamento total da embarcação e o resultado utilizado para calcular o novo valor de calado e, para cada nova configuração, a resistência ao avanço foi obtida através do programa Maxsurf Resistance<sup>®</sup>, o Quadro 7.9 apresenta os resultados das iterações.

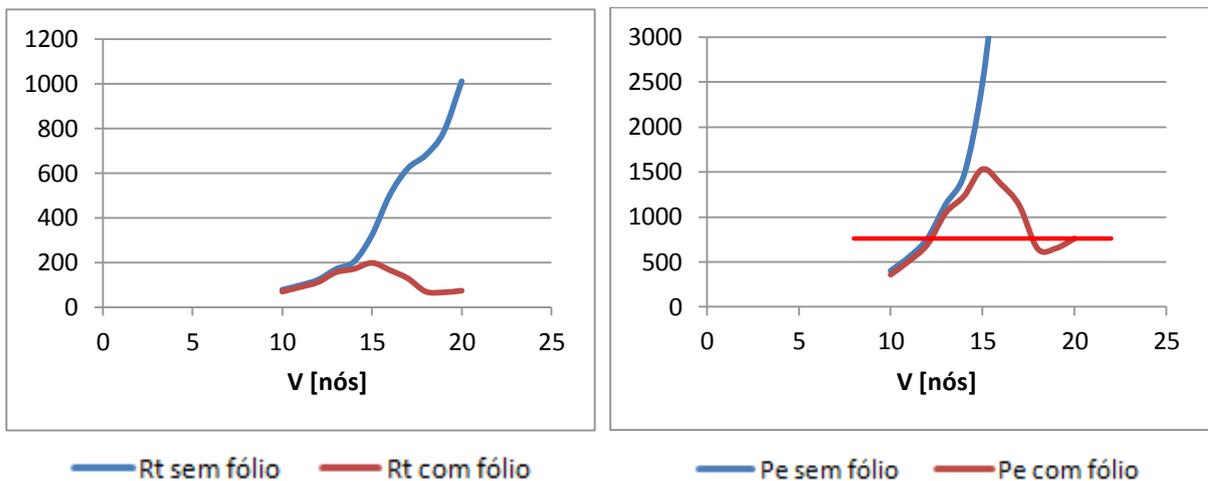
A partir do Quadro 12.2 se pode verificar que a potência efetiva requerida para o planeio da embarcação supera o valor preestabelecido. Os gráficos da Figura 7.25 ilustram os resultados.

Quadro 7.9 – Variação de sustentação, calado e resistência ao avanço em função da velocidade.

V [nós]	∇ lifting [m3]	∇ [m3]	Calado [m]	Rt s/ hidrofólio [kN]	Rt hidrofólio [kN]	Rt c/ hidrofólio[kN]	Pe [kW]
10	1528	3026	5,75	51,37	18,48	69,85	359,3
11	1848	2705	5,40	67,76	22,36	90,12	509,9
12	2200	2354	5,00	85,90	26,61	112,51	694,5
13	2582	1972	5,56	125,37	31,23	156,60	1047,2
14	2994	1559	4,06	135,09	36,22	171,31	1233,7
15	3437	1116	3,49	156,88	41,58	198,46	1531,3
16	3910	643	2,83	118,62	47,31	165,93	1365,7
17	4415	139	2,05	75,68	53,41	129,09	1128,8
18	4949	0	0,00	10,00	59,88	69,88	647,0
19	5514	0	0,00	0,00	66,71	66,71	652,0
20	6110	0	0,00	0,00	73,92	73,92	760,5

Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.25 – À esquerda, gráfico comparativo entre as resistências com e sem hidrofólio (em kN) e, à direita, comparativo entre as potências efetivas (em kW).



Fonte: O Autor (2015).

Através dos gráficos da Figura 7.25 se pode perceber que a velocidade de *take off* ocorre após a velocidade alcançada com a potência disponível, a linha em vermelho nos gráficos estabelece o limite de potência disponível.

## 7.7 Estudo de Caso

Para fins de estudo, serão feitas análises e ensaios para uma configuração de hidrofólios que seria viável, do ponto de vista físico, ser adicionado a uma embarcação deste porte. Serão desconsiderados os requisitos de projeto.

Determinou-se que a área dos hidrofólios fosse aproximadamente 1/10 de LxB da embarcação, portanto uma área de 155 m<sup>2</sup>. Esta área foi dividida em 3 hidrofólios idênticos distribuídos ao longo do comprimento para que a navegação ocorresse sem trim. Foi utilizado o mesmo perfil estudado anteriormente com o mesmo ângulo de ataque.

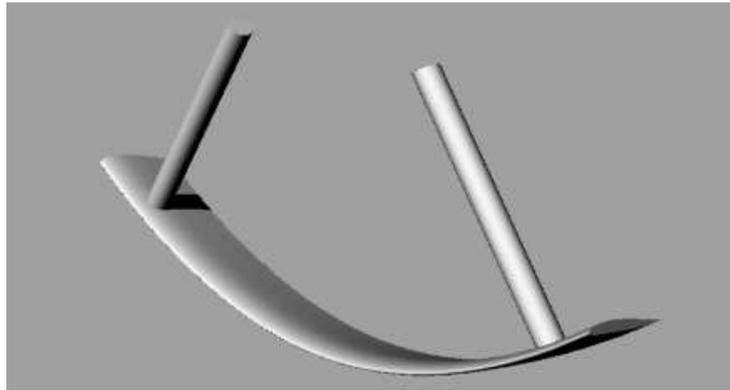
Determinou-se que a largura de cada hidrofólio não superasse em mais de 20% a boca da embarcação, por isso cada um terá uma largura de 20 metros e, conseqüentemente, comprimento igual a 2,6 metros.

Os hidrofólios foram modelados no programa Rhinoceros® e então aplicados

à embarcação, conforme mostram as Figuras 7.26 e 7.27, respectivamente. A forma em arco é usualmente aplicada em embarcações com este tipo de hidrofólio.

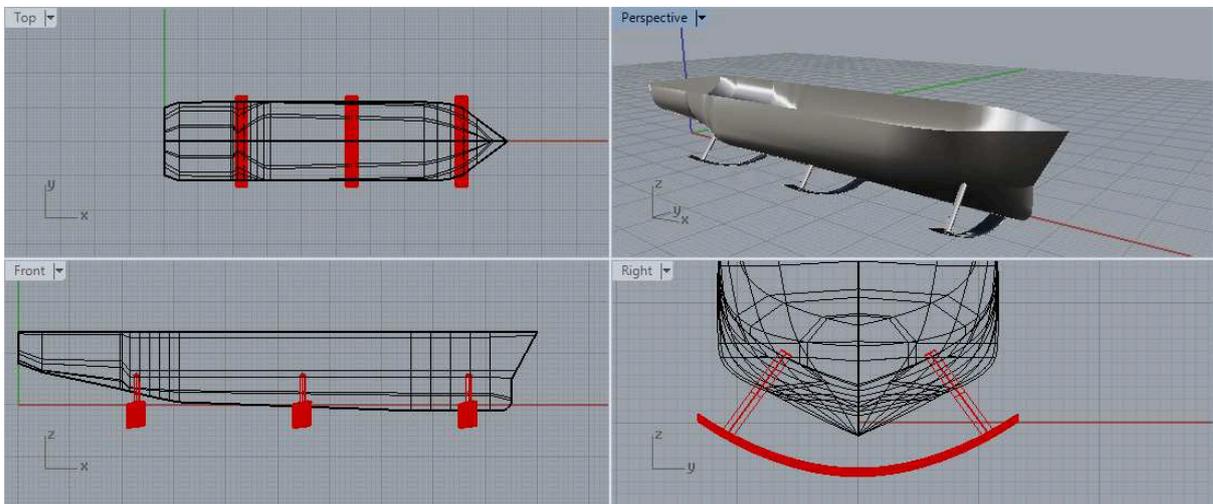
Foram analisadas as variações de resistência ao avanço e potência efetiva com o aumento da velocidade da embarcação, e então comparados os valores com e sem a presença dos hidrofólios.

Figura 7.26 – Hidrofólio projetado no programa Rhinoceros®.



Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.27 – Hidrofólios projetados posicionados na embarcação.



Fonte: O Autor (2015)

A partir do Quadro 7.10 é possível verificar que, nesta configuração, a embarcação passa a ser totalmente sustentada pelos hidrofólios após 43 nós, a partir disso a única fonte de resistência ao avanço são os hidrofólios, ou seja, a velocidade limite para a embarcação passa a depender do ponto de cavitação, e não mais da resistência ao avanço. O gráfico da Figura 7.28 apresenta a relação entre

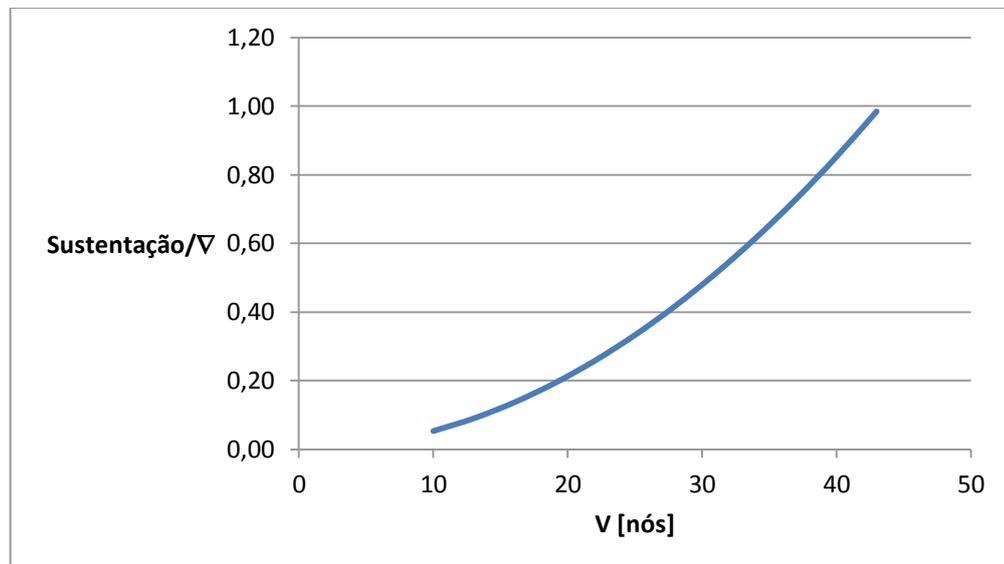
sustentação e deslocamento com o aumento da velocidade.

Quadro 7.10 – Variação da sustentação, deslocamento e calado em função da velocidade.

V [nós]	V [m/s]	$\nabla$ lifting [m <sup>3</sup> ]	lifting/ $\nabla$	Deslocamento [m <sup>3</sup> ]	Calado [m]
10	5,14	218,22	0,05	4335,11	7,00
13	6,69	368,79	0,09	4184,54	6,83
16	8,23	558,64	0,14	3994,69	6,62
19	9,77	787,77	0,19	3765,56	6,36
22	11,32	1056,18	0,26	3497,15	6,05
25	12,86	1363,87	0,33	3189,46	5,70
28	14,40	1710,84	0,42	2842,49	5,29
31	15,95	2097,09	0,51	2456,24	4,82
34	17,49	2522,62	0,62	2030,72	4,28
37	19,03	2987,42	0,73	1565,91	3,65
40	20,58	3491,51	0,85	1061,82	2,92
43	22,12	4034,88	0,98	518,46	2,02
46	23,66	4617,52	1,13	0,00	0,00
49	25,21	5239,45	1,28	0,00	0,00

Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.28 – Relação sustentação deslocamento em função da velocidade.



Fonte: O Autor (2015).

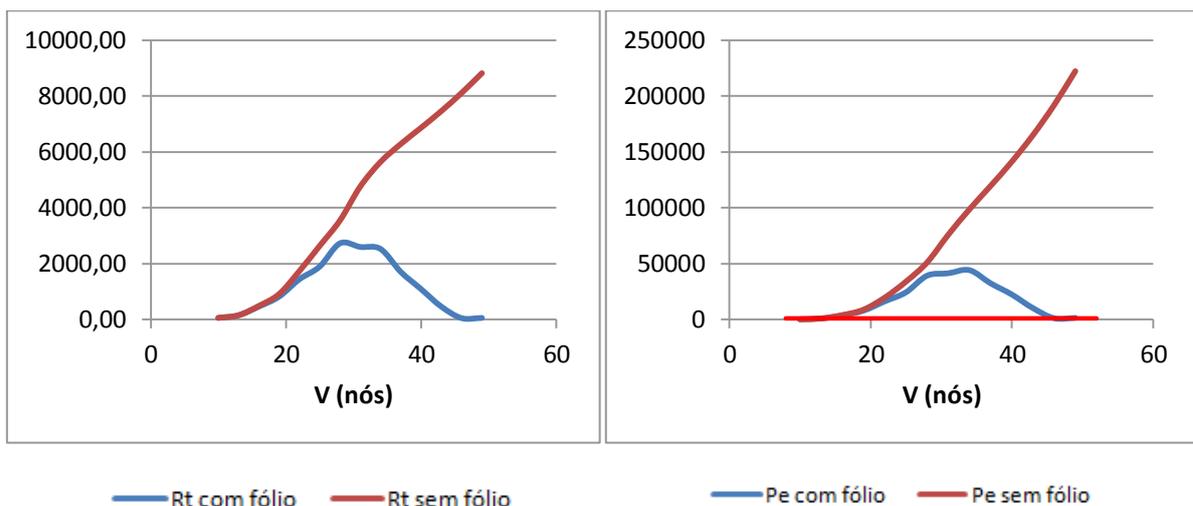
O Quadro 7.11 apresenta os valores de resistência ao avanço e potência efetiva com e sem a presença dos hidrofólios, os valores são graficamente representados através da Figura 7.29.

Quadro 7.11 – Variação da resistência ao avanço e potência efetiva em função da velocidade com e sem hidrofólios.

V [nós]	Com Hidrofólios		Sem Hidrofólios	
	Rt [kN]	Pe [kW]	Rt [kN]	Pe [kW]
10	64,58	332	61,99	318,90
13	157,35	1052	158,45	1059,60
16	467,64	3849	491,42	4044,62
19	826,04	8073	916,63	8958,81
22	1445,58	16359	1739,09	19680,96
25	1898,86	24419	2641,12	33964,81
28	2731,26	39339	3551,10	51147,15
31	2602,65	41503	4761,81	75933,80
34	2531,13	44269	5642,41	98683,46
37	1710,08	32548	6286,80	119655,43
40	1094,13	22513	6866,15	141277,97
43	466,97	10329	7464,65	165112,15
46	54,50	1290	8113,65	191988,52
49	61,84	1559	8820,34	222321,87

Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.29 – À esquerda, gráfico comparativo entre as resistências com e sem hidrofólio (em kN) e, à direita, comparativo entre as potências efetivas (em kW).



Fonte: O Autor (2015).

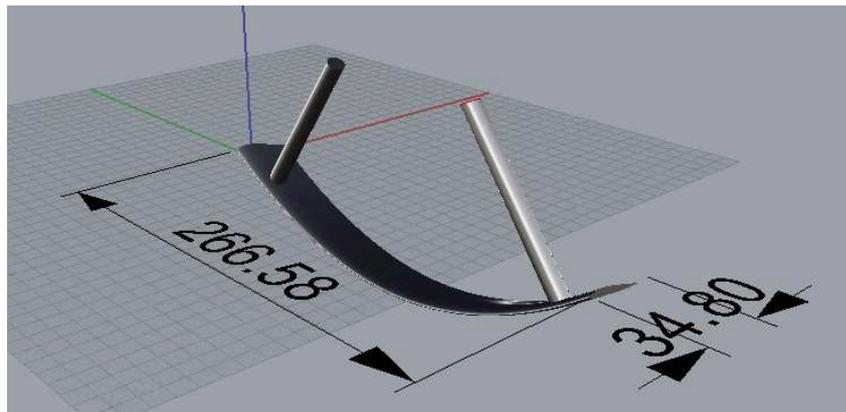
A partir dos gráficos da Figura 7.29 se pode perceber que a potência

disponível (limitada pela linha em vermelho) é muito inferior a potência necessária para atingir a velocidade de *take off*. Como os valores de potência para altas velocidades são muito elevados, a linha vermelha no gráfico da Figura 7.29, que equivale a potência efetiva da embarcação, cujo valor é de 760 kW, aparenta estar em zero devido à esta diferença de ordens de grandeza.

## 7.8 APLICAÇÃO DOS HIDROFÓLIOS AO MODELO E ENSAIOS

Aplicando a escala do modelo aos hidrofólios, foram obtidas as medidas (em milímetros) mostradas na Figura 7.30.

Figura 7.30 – Medidas hidrofólio projetado em escala 1:75 em milímetros.



Fonte: O Autor (2015).

Para determinar a massa que os hidrofólios sustentariam na escala, foi feita uma análise a partir da definição de  $C_L$ , onde se variou a velocidade de 0,5 a 3 m/s, o que corresponderia a uma variação de 8 a 50 nós em escala real. O Quadro 7.12 apresenta os valores de sustentação em função da velocidade.

Os hidrofólios, em escala, foram instalados no modelo da embarcação e, nas mesmas condições em que foram realizados os ensaios do modelo, foram feitos os testes a fim de verificar experimentalmente a conclusão teórica de que a embarcação não conseguiria alcançar o regime de planeio com a potência disponível.

Devido à dificuldade de se construir com precisão os três hidrofólios iguais ao projetado e até mesmo iguais entre si, decidiu-se fabricá-los através da

impressão em 3D. Foi então utilizada a máquina 3D Cloner, disponibilizada pela UFSC e que utiliza como material de impressão o ácido polilático, ou PLA.

Os hidrofólios instalados no modelo podem ser vistos na Figura 7.31.

Quadro 7.12 – Sustentação gerada pelos hidrofólios em função da velocidade de avanço do modelo.

<b>Vm [m/s]</b>	<b><math>\nabla m</math> lifting [kg]</b>
0,50	0,367
0,75	0,825
1,00	1,466
1,25	2,291
1,50	3,299
1,75	4,490
2,00	5,864
2,25	7,422
2,50	9,163
2,75	11,088
3,00	13,195

Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.31 – Hidrofólios instalados no modelo.

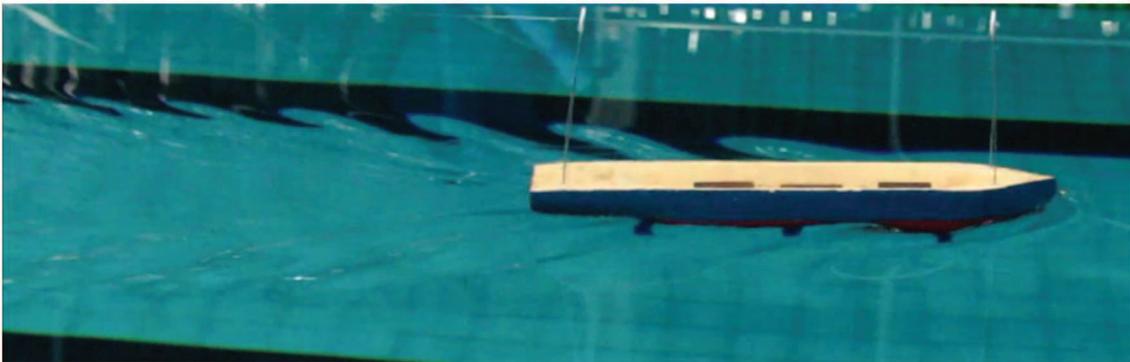


Fonte: O Autor (2015).

## 7.9 RESULTADO DOS ENSAIOS COM OS HIDROFÓLIOS

Os ensaios mostraram que a embarcação não apresentou nenhuma variação de calado quando rebocada pela mesma força determinada nos ensaios sem os hidrofólios, como mostra a Figura 7.32. Foi necessário aplicar uma força de arrasto muito superior para que o modelo apresentasse sinais de planeio.

Figura 7.32 – Ensaio de arrasto com hidrofólios.



Fonte: O Autor (2015).

Com os ensaios também ficou comprovado que, apenas com uma alta velocidade os hidrofólios conseguiram gerar sustentação significativa, a Figura 7.33 mostra o modelo em regime de planeio.

Também se pôde observar durante os ensaios que a estabilidade durante o *take off* é um ponto crítico do projeto, pois a Figura 7.34 ilustra o problema de estabilidade ocorrido durante os ensaios.

Figura 7.33 – Modelo em regime de planeio, sustentação gerada pelos hidrofólios.



Fonte: O Autor (2015).

Figura 7.34 – Modelo em regime de planeio com estabilidade em momento crítico durante o *take-off*.



Fonte: O Autor (2015).

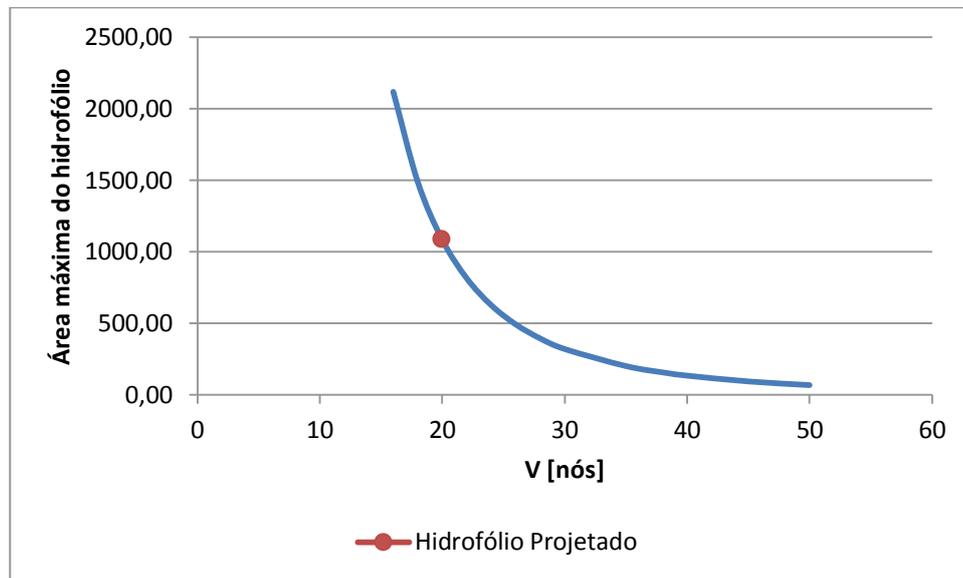
## 7.10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios com o modelo mostraram que é possível se ter uma aproximação inicial da resistência ao avanço da embarcação através de um ensaio de arrasto simplificado. Mas também mostraram que alguns fatores, como construção adequada do modelo e condições de atrito não desejadas, afetam significativamente o resultado dos experimentos, e que devem ser consideradas todas as fontes de erro para que se obtenha um resultado confiável.

O projeto do hidrofólio se mostrou inviável para os requisitos estabelecidos, pois, se aumentada a área, o arrasto gerado pelos hidrofólios superaria a potência efetiva da embarcação, que acabaria reduzindo a velocidade de serviço. E, caso a área fosse reduzida, a embarcação precisaria de uma maior velocidade para o *take-off*, o que acarretaria em uma maior potência instalada. A Figura 7.35 apresenta, de forma gráfica, a discussão anterior.

O projeto poderia se tornar viável do ponto da sustentação se a potência efetiva da embarcação fosse dobrada. Porém, ainda assim se teria um hidrofólio com uma área da ordem da embarcação, o que poderia torná-lo inviável a cerca da construção, fabricação e também poderia ser inviável por conta da estrutura necessária para instalá-lo. Todavia, pôde-se constatar neste trabalho que os hidrofólios reduzem significativamente a resistência ao avanço e a potência efetiva da embarcação para altas velocidades.

Figura 7.35 – Variação da máxima área do hidrofólio em função da velocidade máxima em regime de planeio



Fonte: O Autor (2015).

O estudo de caso mostrou que seria possível o planeio de embarcação se ela atingisse altas velocidades, pois teria seu peso sustentado apenas a partir de 43 nós. Porém a potência instalada seria significativamente maior do que a potência típica instalada em PSVs, neste caso de 1MW, enquanto a potência necessária seria de 44MW, um aumento de 44 vezes a potência instalada atual, o que torna a aplicação impraticável.

## 8. CONCLUSÃO

Com este trabalho concluiu-se que não é possível sustentar dinamicamente o peso de uma embarcação do tipo PSV mantendo a mesma potência instalada da configuração original, sendo necessário desenvolver grandes velocidades e uma potência muito superior às tipicamente encontradas em embarcações semelhantes.

Mostrou-se também que os resultados dos ensaios tiveram resultados coerentes com os da simulação computacional, mostrando que ensaios de arrasto simplificados podem ser utilizados para um estudo inicial.

Os ensaios ainda provaram que os hidrofólios projetados não geraram sustentação a baixas velocidades e foi preciso desenvolver velocidades muito altas para que o modelo demonstrasse sinais de planeio.

O método do Slender Body apresentou resultados mais coerentes com o ensaio do que o método de Holtrop e Mennen, isso pode advir do fato de que o segundo é mais indicado para embarcações mercantes de grande porte.

Ainda demonstrou-se a importância dos ensaios experimentais na área da engenharia naval para uma melhor compreensão dos fenômenos associados a sistemas navais.

Como recomendações para trabalhos futuros, pode-se utilizar os estudos deste trabalho e aplicá-los a embarcações que tipicamente desenvolvam grandes velocidades a fim de diminuir a potência necessária para a velocidade de cruzeiro, e utilizar os métodos experimentais para verificar o fenômeno na prática. Também é importante destacar a necessidade de se realizar estudos a cerca da estabilidade transversal e do sistema de propulsão da embarcação durante o *take-off*.

## REFERÊNCIAS

**A Description of the NACA 4-Digit System.** Disponível em: <[www.akiti.ca/NACA4Bkgrnd.html](http://www.akiti.ca/NACA4Bkgrnd.html)>. Acesso em: 10 de Outubro de 2015.

**Airfoil Tools.** Disponível em: <[airfoiltools.com/](http://airfoiltools.com/)>. Acesso em: 13 de Outubro de 2015.

BOAT TRADER. **1980 Hydrofoils Flying Dolphin P/V.** Disponível em: <<http://theboatrader.net/pre-owned-boats/1980-hydrofoils-flying-dolphin-pv.html%C2%81>>. Acesso em: 23 de Novembro de 2015.

CHAKRABARTI, S.K. **Offshore Structure Modeling, Advanced series on Ocean Engineering** – Volume 9, Chicago Bridge & Iron Technical Service Co., World Scientific, Plainfield, Illinois, USA. 1994.

DAMEN. **Safety Standby Vessel 7411.** Disponível em: <[products.damen.com/en/ranges/safety-standby-vessel/ssv-4711](http://products.damen.com/en/ranges/safety-standby-vessel/ssv-4711)>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

EXAME. **Pré-sal só se inviabiliza com barril a US\$ 45, diz Governo.** Disponível em: <[exame.abril.com.br/economia/noticias/governo-pre-sal-so-se-inviabiliza-com-barril-a-us-45](http://exame.abril.com.br/economia/noticias/governo-pre-sal-so-se-inviabiliza-com-barril-a-us-45)>. Acesso em: 15 de Junho de 2015.

FALTINSEN, Odd M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles.** Cambridge university press, 2005.

FARSTAD. **Far Scout.** Disponível em: <[www.farstad.com/fleet/ahts-vessels/ahts-fleet-list/far-scout](http://www.farstad.com/fleet/ahts-vessels/ahts-fleet-list/far-scout)>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

HARRIS G., HARRY, S M., GAJANAM, **Structural Modeling and Experimental Techniques**, Second Edition, CRC Press LLC, USA. 1999.

HILTON, Eduardo. **Aerofólios para aeronaves leves**. Disponível em: <[www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/perfis/perfisavileve1.html](http://www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/perfis/perfisavileve1.html)>. Acesso em: 9 de Outubro de 2015.

INTERNATIONAL HYDROFOIL SOCIETY. **Hydrofoil Basics** – Configurations. 12.may.1998. Disponível em: <[www.foils.org/basics.htm](http://www.foils.org/basics.htm)>. Acesso em: 15 de Junho de 2015.

LAMB, Thomas. **Ship Design and Construction**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 1-2, 2003 – 2004.

LUIZ, Thiago. **Solte o cinto! A turbulência sumiu**. Fapemat Ciência, 2014. Disponível em: <<http://www.revistafapematciencia.org/noticias/noticia.asp?id=572>>. Acesso em: 9 de Outubro de 2015.

MEGALODON MARINE. Disponível em: <<http://www.megalodonmarine.com/2-units-of-75-m-6000HP-FiFi-1-DP2-Platform-Supply-Vessel/q?pid=53&doit=order>>. Acesso em: 9 de Outubro de 2015.

MOLLAND, Anthony F; TURNOCK, Stephen R; HUDSON, Dominic A. **Ship Resistance and Propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. Nova Iorque, NY: Cambridge University Press, 2011.

PETROBRAS. **Pré-Sal**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

OFFSHORE ENERGY TODAY. **Rolls-Royce to design and equip PSV vessels for Korean shipbuilder**. Mar.15.2012. Disponível em: <<http://www.offshoreenergytoday.com/rolls-royce-to-design-and-equip-psv-vessels->

for-korean-shipbuilder/>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

PICANÇO, Hamilton Pessoa. **Resistência ao avanço: Uma Aplicação de Dinâmica de Fluidos Computacional**. 1999. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro.

ROSA, Edison da. **Introdução ao Projeto Aeronáutico: uma contribuição à Competição SAE Aerodesign**. Florianópolis: UFSC/GRANTE, 288p, 2006.

WORLD MARITIME NEWS. **PGS Holds Naming Ceremony for Its First Ramform Titan-Class Vessel (Japan)**. Disponível em:  
<[worldmaritimeweb.com/archives/82553/pgs-holds-naming-ceremony-for-its-first-ramform-titan-class-vessel-japan/](http://worldmaritimeweb.com/archives/82553/pgs-holds-naming-ceremony-for-its-first-ramform-titan-class-vessel-japan/)>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

WORK BOATS INTERNATIONAL. **Vessel Type: 3 Units 40 Meter Fast Crew Boats**. Disponível em: <[www.workboatsinternational.com/3-units-40-meter-fast-crew-boats-stls1151.html](http://www.workboatsinternational.com/3-units-40-meter-fast-crew-boats-stls1151.html)>. Acesso em: 16 de Junho de 2015.

WEISS, James M. G. et al. **Projeto de Platform Supply Boats baseado em otimização multiobjetivo**. 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. 2014.

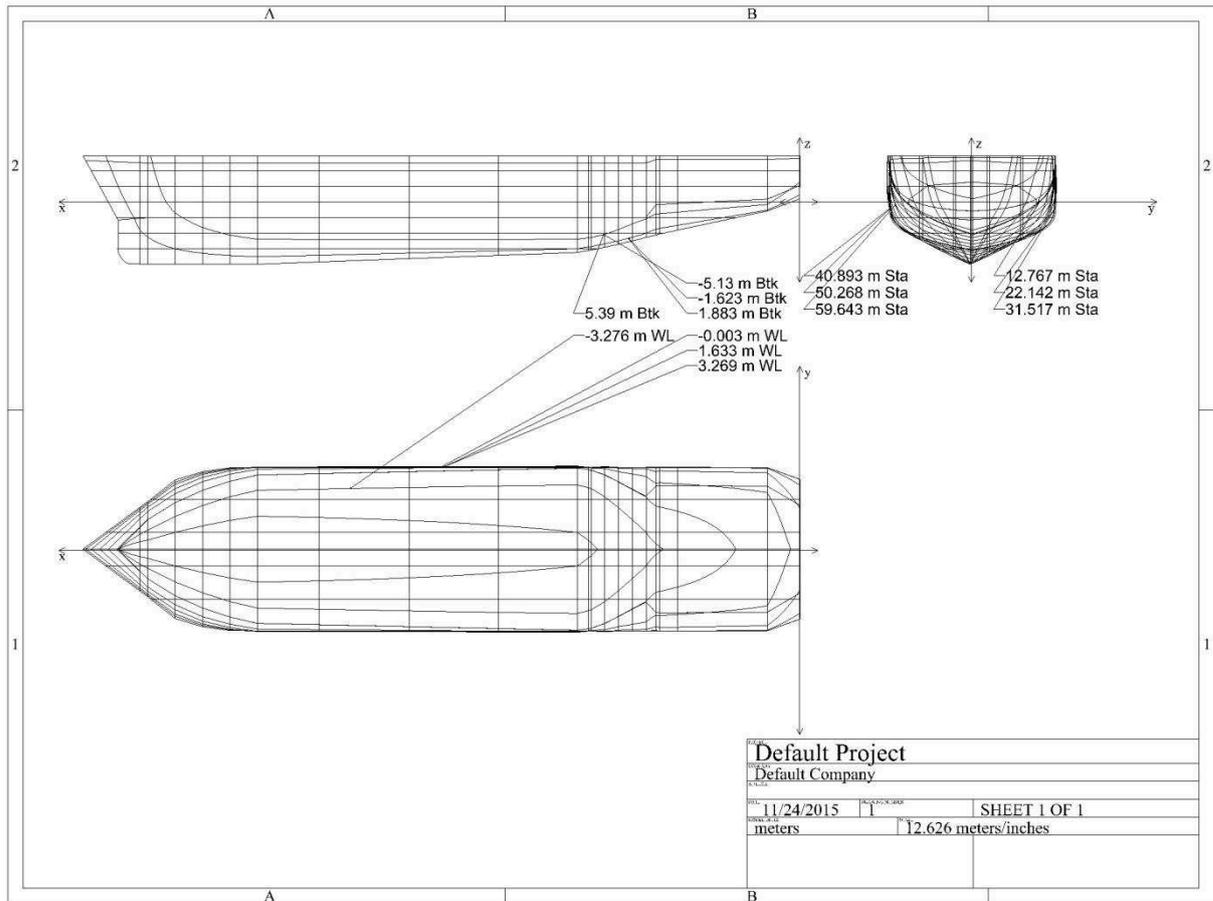
**APÊNCIDE A – PESQUISA DE PSVs PARA CARACTERIZAÇÃO DA  
EMBARCAÇÃO**

<b>EMBARCAÇÃO</b>	<b>Comprimento Total (m)</b>	<b>Boca (m)</b>	<b>Calado Máximo (m)</b>	<b>Deslocamento (t)</b>	<b>Cb</b>	<b>Velocidade de Serviço (Kn)</b>
<b>KIMBERLY CANDIES</b>	73,00	16,50	6,00	3.579,20	0,50	10,00
<b>C-SPIRIT</b>	59,25	14,95	4,95	2.300,00	0,52	10,00
<b>C-STAR</b>	59,25	14,95	4,95	2.300,00	0,52	10,00
<b>WARRIOR</b>	82	18,00	5,80	4.569,70	0,54	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 110</b>	57,9	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>SKANDI HAV</b>	87,69	18,50	6,00	5.581,00	0,57	10,00
<b>IEVOLI CORAL</b>	63,40	15,80	5,50	3.225,00	0,59	10,00
<b>SEACOR CABRAL</b>	58,22	14,63	5,00	2.540,00	0,60	10,00
<b>SEACOR COLUMBUS</b>	58,22	14,63	5,00	2.540,00	0,60	10,00
<b>ANNE CANDIES</b>	73,20	16,40	6,00	4.305,20	0,60	10,00
<b>OIL ONYX</b>	60,00	14,40	5,00	2.595,00	0,60	10,00
<b>C-PROVIDER</b>	73,15	17,00	5,50	4.161,80	0,61	10,00
<b>SAVEIROS GAIVOTA</b>	62,00	16,00	5,50	3.354,00	0,61	10,00
<b>C-EMPRESS</b>	73,20	17,00	5,50	4.234,43	0,62	10,00
<b>C-RANGER</b>	73,20	17,00	5,50	4.234,43	0,62	10,00
<b>ED KYLE</b>	66,50	16,50	6,00	4.150,00	0,63	10,00
<b>SEA PIKE</b>	71,90	16,00	6,00	4.500,00	0,65	10,00
<b>ER BERGEN</b>	73,60	16,00	6,00	4.657,00	0,66	10,00
<b>ISKATEL</b>	67,50	16,80	6,00	4.494,00	0,66	10,00
<b>CAMPOS CLIPPER</b>	68,40	16,80	5,90	4.550,00	0,67	10,00
<b>NAVEGANTES PRIDE</b>	79,25	18,30	5,90	4.600,00	0,68	10,00
<b>SIEM SUPPLIER</b>	83,70	19,70	6,10	6.862,60	0,68	12,00
<b>CBO GUANABARA</b>	77,50	17,00	5,90	5.280,00	0,69	10,00
<b>CBO BIANCA</b>	75,00	17,00	5,90	3.991,00	0,69	10,00
<b>COLLINS TIDE</b>	67,00	16,00	5,20	3.966,00	0,70	10,00
<b>POSH HONESTO</b>	64,00	12,00	4,93	3.630,00	0,70	10,00
<b>MAERSK VEGA</b>	89,10	18,80	6,20	7.284,00	0,70	10,00
<b>HAVILA PRINCESS</b>	73,40	16,60	6,00	5.146,00	0,70	10,00
<b>HOS NAVEGANTE</b>	74,10	16,50	6,00	5.164,00	0,70	10,00
<b>HAVILA FAVOUR</b>	82,85	19,00	6,30	6.997,00	0,71	10,00
<b>HAVILA FAITH</b>	82,80	19,00	6,30	6.997,00	0,71	10,00

<b>NORMAND TRYM</b>	73,60	16,00	5,80	4.897,00	0,71	10,00
<b>SKANDI CAPTAIN</b>	74,30	16,40	6,00	5.174,00	0,71	10,00
<b>ALFANA VE CABO FRIO</b>	71,90	16,00	5,30	4.322,00	0,71	10,00
<b>ODYSSEA KNIGHT</b>	80,77	16,80	5,60	5.414,00	0,71	10,00
<b>FAR SUPPORTER</b>	83,80	18,80	6,20	6.980,00	0,71	10,00
<b>SAVEIROS ALBATROZ</b>	71,90	16,00	5,94	4.933,00	0,72	10,50
<b>LUANDA TIDE</b>	67,00	16,20	5,90	4.971,00	0,72	10,00
<b>DAVIDSON TIDE</b>	73,60	16,00	5,80	4.982,00	0,73	10,00
<b>UP TOPÁZIO</b>	84,60	16,60	6,42	6.591,00	0,73	10,50
<b>UP AGUA MARINHA</b>	84,60	16,60	6,42	6.606,00	0,73	10,50
<b>UP DIAMANTE</b>	84,60	16,60	6,42	6.606,00	0,73	10,50
<b>ASTRO BARRACUDA</b>	71,70	16,40	5,10	4.398,00	0,73	10,00
<b>SKANDI FLAMENGO</b>	71,90	16,00	5,80	4.900,00	0,73	10,00
<b>UP ESMERALDA</b>	84,60	16,60	6,47	6.681,00	0,74	10,50
<b>UP SAFIRA</b>	84,60	16,60	6,47	6.711,00	0,74	10,50
<b>SEABULK BRASIL</b>	71,90	16,00	5,80	4.930,00	0,74	10,00
<b>SAVEIROS ATOBÁ</b>	71,85	16,00	6,00	5.124,00	0,74	10,50
<b>SAVEIROS PELICANO</b>	71,85	16,00	6,00	5.124,00	0,74	10,50
<b>SEA BASS</b>	71,90	16,00	5,80	4.957,69	0,74	10,00
<b>SEA HALIBUT</b>	71,90	16,00	5,80	4.957,69	0,74	10,00
<b>SKUA</b>	71,80	16,00	6,00	5.124,00	0,74	10,50
<b>BIGUÁ</b>	71,85	16,00	6,00	5.211,00	0,76	10,50
<b>CBO VALENTINA</b>	74,3	16,50	6,00	4.900,00	0,76	10,00
<b>SANTOS SUPPORTER</b>	84,70	18,00	5,80	6.075,00	0,77	10,00
<b>CAMPOS CHALLENGER</b>	84,30	18,30	5,90	6.999,00	0,77	10,00
<b>KL BREVIKFJORD</b>	94,90	20,00	5,60	8.200,00	0,77	10,00
<b>HIGHLAND PIPER</b>	67,00	16,00	5,40	4.529,30	0,78	10,00
<b>SAVEIROS FRAGATA</b>	71,50	16,00	5,85	5.242,00	0,78	10,00
<b>CAMPOS COMMANDER</b>	84,30	18,30	5,90	7.199,00	0,79	10,00
<b>HIGHLAND SCOUT</b>	66,20	15,50	5,00	4.098,00	0,80	10,00
<b>KL ARENDALFJORD</b>	72,00	16,00	5,90	5.583,00	0,82	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 106</b>	57,90	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 107</b>	57,90	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 109</b>	57,90	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 119</b>	57,90	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>BOURBON LIBERTY 120</b>	57,90	14,00	4,90	2.270,00	0,57	10,00
<b>DOUBLE EAGLE</b>	57,90	14,00	4,90	2.790,40	0,70	10,00
<b>FIRST AND TEN</b>	68	14,00	4,90	2.790,40	0,60	10,00
<b>HAT TRICK</b>	57,90	14,00	4,90	2.790,40	0,70	10,00
<b>TRIPLE PLAY</b>	57,90	14,00	4,90	2.790,40	0,70	10,00

<b>CABINESS TIDE</b>	70,00	16,00	4,80	3.408,00	0,63	10,00
<b>OLIVIA CANDIES</b>	61,90	13,20	4,70	3.360,00	0,87	10,00
<b>HOS CAYENNE</b>	74,40	17,00	4,70	3.350,30	0,56	10,00
<b>HOS COQUILLE</b>	74,50	17,00	4,70	3.350,30	0,56	10,00
<b>HOS CHICORY</b>	73,10	17,00	4,70	3.350,30	0,57	10,00
<b>HOS BLUEWATER</b>	73,20	16,50	4,50	4.287,00	0,79	10,00
<b>HOS GEMSTONE</b>	73,20	16,50	4,50	4.287,00	0,79	10,00
<b>HOS GREYSTONE</b>	73,20	16,50	4,50	4.287,00	0,79	10,00
<b>ADAM TIDE</b>	62,50	14,00	4,20	2.578,00	0,70	10,00
<b>TOISA TIGER</b>	57,00	12,00	4,10	1.906,00	0,68	10,00
<b>ASTRO BADEJO</b>	65,96	12,00	4,05	2.300,00	0,72	10,00
<b>ASTRO GAROUPA</b>	66,20	12,00	4,05	2.300,00	0,71	10,00
<b>ASTRO PARATI</b>	66,20	12,00	4,05	2.300,00	0,71	10,00
<b>ASTRO VERMELHO</b>	65,95	12,00	4,05	2.300,00	0,72	10,00
<b>ASTRO PARGO</b>	65,96	12,00	4,04	2.380,00	0,74	10,00
<b>LAB 151</b>	63,95	14,80	3,83	2.425,00	0,67	10,00
<b>LAB 152</b>	63,95	14,80	3,83	2.425,00	0,67	10,00
<b>MAGE</b>	63,95	14,80	3,80	2.421,00	0,67	10,00

## APÊNDICE B – CURVAS DE LINHAS DA EMBARCAÇÃO EM ESTUDO



## APÊNDICE C – TABELAS DE COTAS DA EMBARCAÇÃO EM ESTUDO

TABLE OF OFFSETS						
BUTTOCK HEIGHTS						
Station	Buttock -5,130	Buttock -1,623	Buttock 0,130	Buttock 1,883	Buttock 5,390	Station
<b>3,392</b>	-0,246	-0,834		-0,834	-0,246	<b>3,392</b>
<b>12,767</b>	-1,057	-2,446		-2,446	-1,057	<b>12,767</b>
<b>22,142</b>	-3,771	-4,737		-4,737	-3,771	<b>22,142</b>
<b>31,517</b>	-3,947	-5,136		-5,136	-3,947	<b>31,517</b>
<b>40,893</b>	-3,962	-5,377		-5,377	-3,962	<b>40,893</b>
<b>50,268</b>	-3,945	-5,607		-5,607	-3,945	<b>50,268</b>
<b>59,643</b>	-3,473	-5,631	-6,549	-5,631	-3,473	<b>59,643</b>
<b>69,019</b>		-2,936		-2,936		<b>69,019</b>

TABLE OF OFFSETS							
WATERLINE HALF-BREADTHS							
Station	Waterline -4,912	Waterline -3,276	Waterline -1,640	Waterline -0,003	Waterline 1,633	Waterline 3,269	Station
<b>3,392</b>				-5,835	-7,931	-8,422	<b>3,392</b>
				6,095	8,190	8,682	
<b>12,767</b>			-3,871	-6,768	-8,099	-8,511	<b>12,767</b>
			4,131	7,028	8,359	8,771	
<b>22,142</b>	-0,823	-6,363	-8,262	-8,475	-8,522	-8,520	<b>22,142</b>
	1,083	6,623	8,522	8,735	8,782	8,780	
<b>31,517</b>	-2,373	-6,540	-8,244	-8,515	-8,610	-8,589	<b>31,517</b>
	2,633	6,800	8,504	8,775	8,870	8,849	
<b>40,893</b>	-2,897	-6,385	-8,042	-8,435	-8,581	-8,577	<b>40,893</b>
	3,157	6,645	8,302	8,695	8,841	8,837	
<b>50,268</b>	-3,212	-6,212	-7,839	-8,355	-8,551	-8,565	<b>50,268</b>
	3,472	6,472	8,099	8,615	8,811	8,825	
<b>59,643</b>	-2,901	-5,391	-7,021	-7,776	-8,130	-8,312	<b>59,643</b>
	3,161	5,651	7,281	8,036	8,390	8,572	
<b>69,019</b>	-0,662	-1,460	-2,227	-3,088	-3,620	-3,979	<b>69,019</b>
	0,922	1,719	2,487	3,348	3,880	4,238	

## APÊNDICE D – RESULTADOS PARA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E POTÊNCIA EFETIVA

Quadro B.1 – Tabela de resistência ao avanço obtida por diferentes métodos.

<b>Resistência ao Avanço</b>					
<b>V [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Holtrop [kN]</b>		<b>van Oortmerssen [kN]</b>	
		Analítico	Computacional	Analítico	Computacional
10	0,19	67	62	51,1	78,3
11	0,21	87	82,2	65,2	98,2
12	0,23	116	112,6	86,8	123,2
13	0,25	156	158,5	127	170,9
14	0,27	211	218	174	204,3
15	0,28	304	320,8	285,1	323
16	0,3	349	491,4	436,1	503,3
17	0,32	569	668,5	565,3	621,3
18	0,34	676	794,2	692,6	680,5
19	0,36	806	916,6	879,4	784,2
20	0,38	1018	1111,8	1157,2	1011,1

Fonte: O Autor (2015).

Quadro B.2 – Quadro de potência efetiva obtida através do Quadro A.

<b>Potência Efetiva (Pe)</b>					
<b>V [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Holtrop [kW]</b>		<b>van Oortmerssen [kW]</b>	
		Analítico	Computacional	Analítico	Computacional
10	0,19	345	319	263	403
11	0,21	492	465	369	556
12	0,23	716	695	536	760
13	0,25	1043	1060	849	1143
14	0,27	1520	1570	1253	1471
15	0,28	2346	2475	2200	2492
16	0,3	2872	4044	3589	4142
17	0,32	4976	5846	4943	5433
18	0,34	6259	7354	6413	6301
19	0,36	7878	8958	8595	7664
20	0,38	10473	11438	11905	10402

Fonte: O Autor (2015).

## APÊNCIDE E – EXTRAPOLAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Extrapolação feita a partir dos resultados dos ensaios						
Fr	Modelo em escala reduzida					Cw
	Vm [m/s]	Rtm [N]	Ctm	Rem	Cfm	
0,32	1,01	4,46	0,03362364	9,71E+05	0,004718035	0,0270756
0,24	0,74	2,16	0,030510572	7,08E+05	0,005058987	0,02348933
0,19	0,59	1,57	0,034491473	5,68E+05	0,005320398	0,02710743
0,16	0,50	1,28	0,039386202	4,79E+05	0,005536202	0,03170265

Extrapolação feita a partir dos resultados dos ensaios				
Tamanho real				
Vs [m/s]	Res	Cfs	Cts	Rts [kN]
8,58	6,18E+08	0,001626388	0,029332822	1577,05
6,26	4,51E+08	0,001693898	0,025840251	740,27
5,02	3,62E+08	0,001743737	0,029527516	544,20
4,24	3,05E+08	0,001783711	0,034178216	448,20

Extrapolação feita a partir dos resultados do slender body no maxsurf						
Fr	Modelo em escala reduzida					Cw
	Vm [m/s]	Rtm [N]	Ctm	Rem	Cfm	
0,32	1,01	4,86	0,036610073	9,71E+05	0,004718035	0,03006203
0,24	0,74	1,93	0,027284498	7,08E+05	0,005058987	0,02026326
0,19	0,59	1,09	0,023952411	5,68E+05	0,005320398	0,01656837
0,16	0,50	0,74	0,022854065	4,79E+05	0,005536202	0,01517051

Extrapolação feita a partir dos resultados do slender body no maxsurf				
Tamanho real				
Vs [m/s]	Res	Cfs	Cts	Rts [kN]
8,58	6,18E+08	0,001626388	0,032319255	1737,61
6,26	4,51E+08	0,001693898	0,022614177	647,85
5,02	3,62E+08	0,001743737	0,018988455	349,96
4,24	3,05E+08	0,001783711	0,017646079	231,40