



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

**RAFAEL RODRIGUES MEDEIROS**

**ESTUDO DE TENDÊNCIA DE VARIÁVEIS PARA  
INTERCEPTORES UTILIZANDO EXPERIMENTO  
FATORIAL**

**RECIFE**

**2024**

**RAFAEL RODRIGUES MEDEIROS**

**ESTUDO DE TENDÊNCIA DE VARIÁVEIS PARA  
INTERCEPTORES UTILIZANDO EXPERIMENTO  
FATORIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Professor Orientador: Prof. Miguel Angel Celis Carbajal

**RECIFE**

**2024**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Medeiros, Rafael Rodrigues.

Estudo de tendência de variáveis para interceptores utilizando  
experimento fatorial / Rafael Rodrigues Medeiros. - Recife, 2024.  
61 p. : il., tab.

Orientador(a): Miguel Angel Celis Carbajal

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Naval -  
Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Interceptores. 2. Construção em fibra de vidro. 3. Experimento fatorial  
completo. 4. Planeio. 5. Náutica. I. Carbajal, Miguel Angel Celis . (Orientação).  
II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Graduação em Engenharia Naval  
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

No dia 28/03/2024, às 14:00:00, de maneira presencial, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **Estudo de Tendência de Variáveis para Interceptores Utilizando Experimento Fatorial**, elaborado pelo aluno **Rafael Rodrigues Medeiros**, matrícula 20150006230, composta por **Prof. Miguel Angel Celis Carbajal**, (orientador), **Antonio Carlos Fernandes**, (examinador 1) e **Cesar Augusto Salhua Moreno**, (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela aprovação da candidata no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Naval da UFPE, atribuindo à monografia a média 9.0 (Nove). Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: **Prof. Miguel Angel Celis Carbajal** - Eng. Naval/DEMEC/UFPE Nota: **Nove**

Assinatura:  Documento assinado digitalmente  
MIGUEL ANGEL CELIS CARBAJAL  
Data: 30/03/2024 14:40:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 1: **Antonio Carlos Fernandes** – UFRJ. Nota: **Nove**

Assinatura:  Documento assinado digitalmente  
ANTONIO CARLOS FERNANDES  
Data: 30/03/2024 09:46:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 2: **Cesar Augusto Salhua Moreno** - DEMEC Nota: **Nove**

Assinatura:  Documento assinado digitalmente  
CESAR AUGUSTO SALHUA MORENO  
Data: 30/03/2024 11:59:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 28/03/2024

 Documento assinado digitalmente  
ADRIANO DAYVSON MARQUES FERREIRA  
Data: 30/03/2024 17:30:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Adriano Dayvson Marques Ferreira  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Naval

## **AGRADECIMENTOS**

Esse trabalho não é somente uma conquista acadêmica para mim, também é uma conquista para meus pais que, com seus esforços na minha educação, resultaram na conclusão em uma universidade federal. Sem o apoio de meus pais, certamente não teria tido o conhecimento e aptidões necessárias para chegar nesse momento. Por isso, em cada conhecimento aqui depositado tem também a energia de meus pais.

Aos meus professores, que sem sua paciência e dom do ensino não teria as condições de realizar essa trajetória acadêmica. Principalmente ao meu orientador, Miguel que me apoiou, não somente no trabalho aqui apresentado, mas também na minha carreira profissional, me ajudando como pôde para conseguir finalizar o trabalho sem perder oportunidades profissionais.

Aos meus colegas de universidade, que por tantas vezes me apoiaram nos estudos e nos trabalhos difíceis no cotidiano da vida universitária. O caminho compartilhado sempre será mais vantajoso do que o caminho solitário.

Aos meus amigos fora da universidade que me apoiaram para que eu pudesse continuar no curso e concluí-lo.

## RESUMO

O presente trabalho tem como enfoque o estudo do apêndice hidrodinâmico chamado de interceptor, por meio de experimentos empíricos realizados em canal de água circulante. Para isso foi criado um modelo de casco em PRFV — Plástico Reforçado com Fibra de Vidro a apresentando desde a concepção do projeto, do método construtivo do modelo, passando pela construção do molde, até finalmente a construção da peça final em PRFV. Para a análise dos experimentos assume-se dois fatores para o interceptor: sua área aparente e a posição em relação à linha de água. Dessa forma, é realizado um planejamento de experimentos com base no conceito de experimento fatorial completo, em que será estudado a interação entre esses dois fatores com a variável resposta sendo a resistência ao avanço. A finalização do trabalho apresenta como cada fator contribui para a melhoria do consumo de uma embarcação real e quais são os seguintes passos para uma possível continuação para este trabalho.

Palavras-chave: interceptores; construção em fibra de vidro; experimento fatorial completo; planeio; náutica.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the study of the hydrodynamic appendage called an interceptor, through empirical experiments carried out in a circulating water channel. To this end, a FRP - Fiberglass Reinforced Plastic - hull model was created, beginning at the conception of the project, the construction method of the model, through the construction of the mold, to finally the construction of the final FRP hull piece. To analyze the experiments, two factors are assumed for the interceptor: its surface area and its position in relation to the water line. In this way, a design of experiments is carried out based on the concept of a full factorial experiment, in which the interaction between these two factors will be studied, with the response variable being the overall resistance. The end of the paper presents how each factor contributes to improving the consumption of a real boat and what the next steps are for a possible continuation of this work.

Keywords: interceptors; fiberglass construction; design of experiments; planning; yachting.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROSPECÇÃO DE CRESCIMENTO DO MERCADO NÁUTICO MUNDIAL. ....	9
FIGURA 2 - INTERCEPTORES (DEMARCADO EM VERMELHO) EM LANCHA RÁPIDA. ....	14
FIGURA 3 – VISTA LATERAL DO CASCO COM O CAMPO DE PRESSÃO E INTERCEPTOR. ....	15
FIGURA 4 - EXEMPLO DE UM FLAP INSTALADO NUMA EAV. ....	16
FIGURA 5 - FORÇAS FRICCIONAIS E DE PRESSÃO ATUANDO NO CASCO. ....	18
FIGURA 6 - MÉTODO DE CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO (ITTC, 1978). ....	22
FIGURA 7 – FENÔMENO DE SPRAY EM PLACA PLANA. ....	24
FIGURA 8 – LINHA DE SPRAY VERSUS TRIM E ÂNGULO DE V. ....	25
FIGURA 9 – COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO DE PLACA PLANA PARA $B=0^\circ$ . ....	26
FIGURA 10 — COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO DE PLACA PLANA. ....	27
FIGURA 11 -MAGNITUDE DA VELOCIDADE MÉDIA NO FUNDO DE UMA SUPERFÍCIE DE PLANEIO. ....	28
FIGURA 12 — VARIAÇÃO DA FRAÇÃO ARRASTO-SUSTENTAÇÃO PARA SUPERFÍCIES DE PLANEIO PRISMÁTICAS. ....	29
FIGURA 13 — LIMITES DE ESTABILIDADE DE PORPOISING. ....	30
FIGURA 14 – EXPERIMENTO FATORIAL SEM INTERAÇÃO. ....	31
FIGURA 15 – EXPERIMENTO FATORIAL COM INTERAÇÃO. ....	31
FIGURA 16 - MODELO GENÉRICO DE EAV USADO NO TRABALHO. ....	33
FIGURA 17 - SEÇÕES DE MADEIRA DA CNC MONTADAS. ....	35
FIGURA 18 - PREPARAÇÃO PARA ENCHIMENTO DE PU. ....	36
FIGURA 19 – FOTO APÓS EXPANSÃO DO PU. ....	36
FIGURA 20 - RESULTADO DO LIXAMENTO DO PU. ....	36
FIGURA 21 - APLICAÇÃO DE RESINA APÓS LIXAMENTO. ....	36
FIGURA 22 - MASSA POLIÉSTER APLICADO. ....	37
FIGURA 23 - FLUXOGRAMA DA CONSTRUÇÃO DO MODELO. ....	38
FIGURA 24 - PREPARAÇÃO DO MODELO/PROTÓTIPO PARA LAMINAÇÃO. ....	39
FIGURA 25 - MADEIRA ABAIXO DO PROTÓTIPO PARA GERAR ABA. ....	39
FIGURA 26 - LAMINAÇÃO EM CIMA DO MODELO/PROTÓTIPO CONSTRUÍDO. ....	39
FIGURA 27 - MOLDE FINALIZADO. ....	39
FIGURA 28 - ESQUEMA DE EXPERIMENTO PARA OBTENÇÃO DO LCG. ....	40
FIGURA 29 - ESQUEMA DE EXPERIMENTO PARA MEDIÇÃO DO KG. ....	41
FIGURA 30 - CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO PARA MOMENTO DE INÉRCIA EM TORNO DO EIXO Z-Z. ....	43
FIGURA 31 - CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO PARA MOMENTO DE INÉRCIA EM TORNO DO EIXO Y-Y. ....	43
FIGURA 32 – ESQUEMA DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO TESTE. ....	45
FIGURA 33 – IMAGEM DA APARELHAGEM DOS TESTES. ....	45
FIGURA 34 – FIGURA DE IDENTIFICAÇÃO DAS DUAS POSIÇÕES DE ALTURA DO INTERCEPTOR. ....	46
FIGURA 35 – CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DO INTERCEPTORS. ....	47
FIGURA 36 – CONFIGURAÇÃO DE ENSAIOS SEGUINDO EXPERIMENTO FATORIAL. ....	48
FIGURA 37 – GRÁFICO RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO CASCO SEM INTERCEPTORS. ....	49
FIGURA 38 – RESISTÊNCIA AO AVANÇO INTERCEPTORS 28. ....	50
FIGURA 39 – RESISTÊNCIA AO AVANÇO INTERCEPTORS 14. ....	51
FIGURA 40 – GRÁFICOS COMPARATIVOS DO EFEITO DE ÁREA DO INTERCEPTOR. ....	51
FIGURA 41 – SEQUÊNCIA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO CASCO NU. ....	52
FIGURA 42 – GRÁFICO DE TODOS OS ENSAIOS COM AS DIFERENTES POSIÇÕES E ÁREA DE INTERCEPTORS. ....	53
FIGURA 43 – TESTE NORMALIDADE INTERCEPTOR 14 CHINE. ....	54
FIGURA 44 – TESTE NORMALIDADE INTERCEPTOR 14 QUILHA. ....	54
FIGURA 45 – TESTE NORMALIDADE INTERCEPTOR 28 CHINE. ....	54
FIGURA 46 – TESTE NORMALIDADE INTERCEPTOR 28 QUILHA. ....	54
FIGURA 47 – GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS DO EXPERIMENTO FATORIAL. ....	55
FIGURA 48 – GRÁFICO DE CUBO PARA ÁREA RESISTÊNCIA AO AVANÇO NAS CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO. ....	55

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RECEITA DE MASSA DE ACABAMENTO	36
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS MODELO EXPERIMENTO DE (FRIDSMA, 1969).....	40
TABELA 3 – CÁLCULOS DO LCG E KG DO PROTÓTIPO. ....	42
TABELA 4 – DADOS DOS ENSAIOS DE OSCILAÇÕES EM <i>PITCH</i> E <i>YAW</i> DO PROTÓTIPO. ....	44
TABELA 5 – CÁLCULO DE MOMENTO DE INÉRCIA EM <i>PITCH</i> E <i>YAW</i> . ....	44
TABELA 6 – INTERVALO DE VELOCIDADES DOS ENSAIOS. ....	48
TABELA 7 – TABELA RESUMO DE DADOS DO ENSAIO COM INTERCEPTOR ÁREA 14 NO CHINE. ....	49
TABELA 8 – ÁREA DO GRÁFICO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO POR CONDIÇÃO DE ENSAIO.....	54

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{tm}$ : Coeficiente adimensional de resistência total do modelo

$C_{Fo}$ : Coeficiente adimensional de fricção de placa plana

$C_W$ : Coeficiente adimensional de resistência por ondas

$C_V$ : Coeficiente adimensional de resistência viscosa

S: área molhada

$\rho$ : massa específica do fluido

$F_n$ : Número de Froude

$R_n$ : Número de Reynold

V: Velocidade do corpo

$\nu$ : viscosidade cinemática

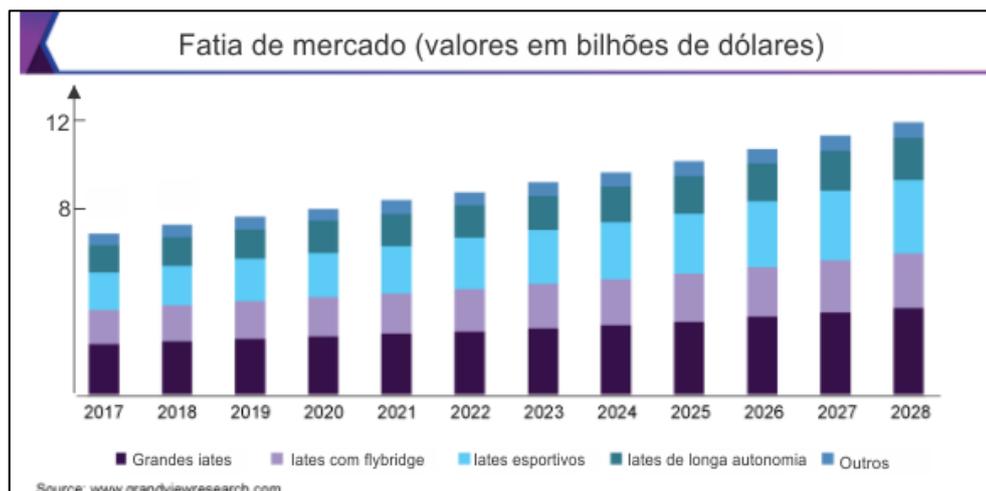
# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1.	OBJETIVO GERAL .....	11
1.1.1.	<i>Objetivos Específicos</i> .....	11
<b>2</b>	<b>PROBLEMÁTICA</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
4.1.	RESISTÊNCIA AO AVANÇO .....	18
4.1.1.	<i>Resistência ao Avanço de EAV</i> .....	23
4.1.2.	<i>Método de Savitsky</i> .....	24
4.2.	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS .....	30
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
5.1.	CRIAÇÃO DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA .....	33
5.2.	DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO MODELO.....	40
5.3.	REALIZAÇÃO DOS TESTES EM TANQUE DE PROVAS .....	44
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
6.1.	ANÁLISE ATRAVÉS DE EXPERIMENTO FATORIAL .....	53
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Esta proposta se insere na área de Hidrodinâmica de Sistemas Flutuantes, com foco em pequenas embarcações de construção por meio de Plástico de Reforçado de Fibra de Vidro (PRFV). Apesar do mercado de atuação da engenharia naval ser restrito, ainda há uma grande gama de especialidades e ramos no que cabe as atribuições e funções do engenheiro naval. Uma área que ainda é pouco estudada no Brasil, mas que está ganhando muita notoriedade é o setor de esporte e recreio. Analisando o cenário global, é visto também uma situação favorável para esse setor que, segundo o estudo de (GRAND VIEW RESEARCH, 2021) foi estimado o valor do mercado de Iates medido em 8,15 bilhões de dólares em 2020. Também é esperado, pelo mesmo estudo, a prospecção do setor numa taxa anual de crescimento de 5,2% de 2021 até 2028, ou seja, em valores corresponde cerca de 8,5 bilhões de dólares para 12,16 bilhões de dólares em 2028 (Figura 1).

Figura 1 - Prospecção de crescimento do mercado náutico mundial.



Adaptado de: (GRAND VIEW RESEARCH, 2021)

No cenário nacional, segundo a Associação Brasileira dos Construtores de Barcos (ACOBAR), o setor teve um crescimento em 20% em 2020, enquanto o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro teve uma queda de quase 5%. Segundo a última pesquisa da entidade, cerca de 84% das mais de 70.000 embarcações que navegam no país são de propulsão e, atualmente, o Brasil possui cerca de 80 fabricantes de barcos de lazer a motor (UNGARETTI, 2021). Para o presidente da ACOBAR Eduardo Columna:

*“[...] temos potencial de expandir ainda mais. Por exemplo, se compararmos um dos mais importantes centros de produção e utilização de embarcações de esporte e recreio do mercado nacional com outros países, temos uma ideia dessa proporção. No Estado*

*de São Paulo, por exemplo, temos 1 barco para 248 pessoas, no Reino Unido 1 barco para 63 pessoas e nos Grandes Lagos dos Estados Unidos temos 1 barco para 19 pessoas.” (UNGARETTI, 2021, p.1).*

Devido à prospecção desse setor no Brasil, foi motivado a realização do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) acerca de um tema que envolvesse alguma problemática da indústria náutica brasileira, visando impactar positivamente no crescimento desse ramo, contribuindo dessa forma na competitividade com outras indústrias navais mais antigas do mundo. Assim, também foi buscado alinhar a proposta com a familiaridade do aluno na área de estudo da hidrodinâmica, o que ocasionou na escolha de trabalhar com o apêndice hidrodinâmico chamado de Interceptor. Hoje seu uso tem pouca notabilidade na indústria náutica nacional, entretanto o Interceptor tem a possibilidade de resolver muitos problemas de planeio de embarcações. Esses problemas existem por diversos fatores, o mais comum é devido aos pequenos estaleiros não terem escritórios de engenharia e, por essa forma, não realizam o projeto do barco da forma mais adequada.

Além disso, os apêndices hidrodinâmicos nas lanchas de planeio, como o Interceptor, ajudam a diminuir o tempo para o regime de planeio criando uma zona de maior pressão na popa o que gera um momento de proa para baixo, fazendo diminuir o ângulo de trimado (trim) da embarcação, e, portanto, aumenta a sustentação do casco. Eles também ajudam na estabilidade dinâmica do planeio, mantendo um trim mais constante, e diminuem a resistência em ondas (PARK et al., 2019). Dessa forma, a proposta do trabalho se baseia na elaboração de um modelo em escala ultra reduzida de uma embarcação real para testes em túnel de água para avaliar os efeitos de um Interceptor de maneira simples, objetiva e alinhada com a prática da indústria. Com isso, foi escolhido uma geometria semelhante das embarcações de recreio produzidas na região do Recife, no estado de Pernambuco, para construção do modelo e testes. Os resultados deste trabalho serão de grande valia para construtores navais para seus projetos de novas embarcações, como também para profissionais da área de reforma de embarcações de recreio que possam estar com problemas de planeio em seus barcos.

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte maneira. Primeiro, é elaborado uma breve revisão da literatura. Segundo, é realizado a construção do modelo em escala em fibra de vidro. Terceiro, é realizado ensaios em canal de água circulante, no laboratório. Quarto, é analisado os dados de maneira gráfica e também através da metodologia estatística. E por fim, discorrido sobre as conclusões acerca dos resultados encontrados.

## **1.1. Objetivo geral**

Na realização dos testes com o modelo em escala reduzida com Interceptors em determinadas condições de área e posição, como também testes com o casco sem nenhum apêndice para comparação. Terá como objetivo geral o entendimento de como esses fatores contribuem para a diminuição da resistência ao avanço.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos no final do trabalho:

1. Projetar e construir um modelo em escala reduzida;
2. Construir um sistema de medição de força e angulação para os testes;
3. Realizar o tratamento dos dados dos testes por meio de estatística;
4. Realizar o planejamento de experimento fatorial completo e sua análise.

## 2 PROBLEMÁTICA

Tendo em vista que a maioria dos artigos apresentados na revisão bibliográfica são recentes, é notado que ainda há grande espaço a ser incrementado no estado da arte acerca de interceptores, i.e. há uma limitação acerca de poucos estudos trabalharem com condições de ondas e ventos severos. Também foi encontrada limitação por ter correlações da geometria dos interceptores somente com o comprimento do barco, sem ter com coeficientes adimensionais como: coeficiente prismático e coeficiente de esbeltez.

Atualmente, o mercado náutico nacional de embarcações de lazer é uma indústria que está se desenvolvendo, ou seja, não há grandes escolas navais no Brasil, diferente da Itália que existem diversos estaleiros centenários que foram aprimorando as técnicas de projeto e construção ao longo do tempo. Dessa forma, muitas embarcações produzidas no Brasil não nascem de um projeto bem fundamentado e completo, ocasionando, geralmente, no baixo desempenho de planeio, por exemplo, alto ângulo de trim na navegação, que ocasiona em desconforto abordo devido às altas acelerações provocadas pelo alto ângulo de trim. Devido pela maioria dos pequenos estaleiros não terem setor técnico (na maioria), muitos deles acabam por escolher soluções banais para certos problemas. Por exemplo, é comum encontrarmos no mercado náutico histórias de soluções como: colocar cimento na proa da embarcação, ou até paralelepípedos, para que assim diminua o trim e o barco ter melhor desempenho na navegação (NASSEH, 2011).

Entretanto, já existem soluções mais engenhosas e simples, como os interceptores (PARK et al., 2019), que podem resolver os problemas de planeio sem precisar prejudicar a estrutura do navio, encarecer o processo pela adição de material, ou até prejudicar a imagem da empresa no mercado por aplicação de material impróprio. Em contrapartida, é possível que os interceptores possam ser projetados especificamente para uma embarcação, mediante formulações simples que correlacionem as características da embarcação, com a geometria dos apêndices.

Na literatura, (SAVITSKY, 1964) fez seus estudos em modelos de EAV identificando regiões de planeio que a embarcação tem o fenômeno dinâmico Porpoising, i.e. a embarcação tem movimentos de cabeceio (pitch) repetidamente como consequência de fatores hidrodinâmicos de sustentação e trim. Para casco convencionais o valor do trim deve ser entre 3-4° para não apresentar o fenômeno, que representa também uma característica de conforto para os tripulantes e passageiros.

Em cascos já construídos, ou em estaleiros com produção em série via moldes de fibra de vidro, a implementação dos interceptores é realizada de maneira simples e de baixo custo, devido à baixa altura dos interceptores (SEOK; PARK; RHEE, 2020). Dessa forma, o tema proposto permite suprir a necessidade técnica nacional da indústria náutica de embarcações de recreio.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção faz uma revisão de 13 estudos sobre o comportamento hidrodinâmico de embarcações de planeio, sendo 11 artigos em periódico e 2 artigos em congresso. Será retratado a dinâmica do planeio, suas características gerais, bem como apêndices hidrodinâmicos comuns de um casco de planeio, bem como defletores de spray (MOLCHANOV et al., 2019), step-V (KIM et al., 2013; NAJAFI; NOWRUZI, 2019) e interceptores (PARK et al., 2019). Entretanto, o enfoque do trabalho discorrerá acerca do apêndice denominado interceptor (Figura 2). Um interceptor é uma placa fina que é instalado normalmente na popa de uma embarcação de alta velocidade. Aumenta a pressão no fundo da popa, bloqueando os fluxos através do casco e reduz o ângulo de trim, gerando um momento negativo (i.e., proa para baixo) (SEOK; PARK; RHEE, 2020).

Figura 2 - Interceptores (demarcado em vermelho) em lancha rápida.

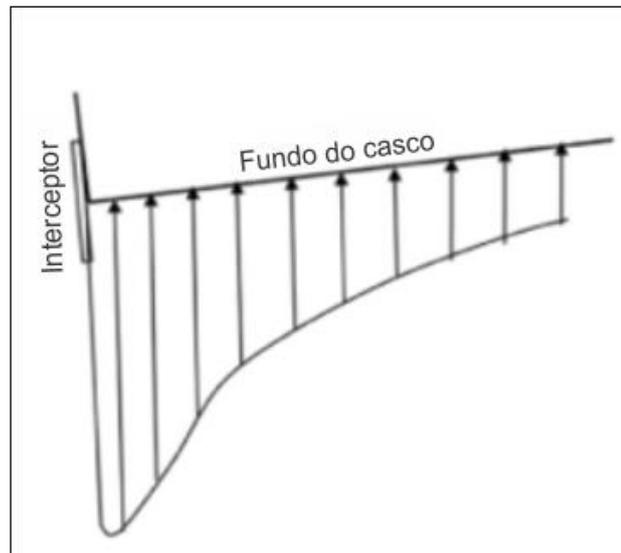


Fonte: (HAUCHARD, 2021).

As embarcações de planeio têm sido utilizadas como barcos de patrulha, embarcações de serviço, barcos de pilotos, embarcações da guarda costeira e pequenas embarcações navais para operação em áreas mais expostas (KARIMI; SEIF; ABBASPOOR, 2015). Como o interesse em pequenas embarcações de alta velocidade está crescendo, há preocupação em esforços para caracterizar de forma experimental e computacional o comportamento destas embarcações em águas calmas e ondas (JUDGE et al., 2020). Alguns apêndices hidrodinâmicos podem ser empregados para melhorar o desempenho para vencer a resistência ao avanço e

comportamento em ondas como, por exemplo: os Steps-V, Interceptors e Flaps. A Figura 3 mostra o campo de pressão que o interceptor provoca na popa da embarcação, interceptando o fluxo da água com a lâmina, que gera um momento de proa para baixo, o que faz reduzir o ângulo de trim (PARK et al., 2019).

Figura 3 – Vista Lateral do Casco com o Campo de Pressão e interceptor.



Adaptado de: (SEOK; PARK; RHEE, 2020)

A seguir serão apresentadas informações primordiais para a compreensão das principais características no projeto de um casco de planeio, bem como o funcionamento e as justificativas dos principais apêndices hidrodinâmicos de embarcações desse tipo. Os pontos que serão abordados, dentre as vantagens e limitações das pesquisas estudadas, contribuirão para o desenvolvimento do estudo deste presente trabalho.

Com a abrangência do uso e utilização em diversas áreas, vem uma maior necessidade de melhorias técnicas voltadas especificamente para Embarcações de Alta Velocidade (EAV). Nos últimos 30 anos houve um aumento nas pesquisas com foco em EAV, mas muitos fenômenos hidrodinâmicos ainda não são totalmente compreendidos e existem relativamente poucas publicações que abordam esta questão. (MOLCHANOV et al., 2019).

O casco de uma EAV atua como superfície de sustentação para levantar a embarcação para fora de seu modo de deslocamento. Isto causa uma redução significativa na área molhada da superfície e, portanto, na resistência viscosa e friccional. Esta redução permite ao barco alcançar altas velocidades sem um aumento exponencial do consumo de energia, ao contrário de um casco de deslocamento (MOLCHANOV et al., 2019).

A hidrodinâmica acerca de EAVs pode ser estudada por métodos experimentais ou teóricos. Os métodos teóricos podem ser agrupados em métodos numéricos como os métodos baseados na teoria potencial de fluidos, métodos de fluido viscoso e técnicas semi-empíricas (Yousefi et al., 2013, p. 71, apud MOLCHANOV et al., 2019, p. 106). O estudo semi-empírico realizado por (SAVITSKY, 1964) é o mais difundido na predição da resistência ao avanço de EAV que ao longo dos anos foi aprimorado por (BLOUNT; FOX, 1976) com adição de fator de correção devido a sub-predição observado ao comparar o método de (SAVITSKY, 1964) com dados experimentais. O estudo recente de (JUDGE et al., 2020) mostrou a comparação do método de fluido viscoso por programas computacionais modernos com dados experimentais. Nele foi visto que se consegue atingir um erro máximo de 4% para valores de resistência ao avanço de EAV.

Os apêndices típicos da popa incluem flaps e interceptores. Os flaps são o mais conhecido dispositivo de controle de ângulo de trim dinâmico (Figura 4) o qual é aplicado para embarcações de alta velocidade por muitos anos (SEOK; PARK; RHEE, 2020). Os estudos de (CUSANELLI; KARAFIATH, 1997) mostraram que os flaps podem reduzir a resistência e a energia propulsiva necessária em cerca de 10% em águas calmas. E o complemento dos estudos de (ANNISA, 2015) esclarecem acerca do mecanismo por trás de como que os interceptores conseguem diminuir a resistência ao avanço da embarcação, sendo por causa do ponto de estagnação que criam uma região de bolha e aumenta a pressão dinâmica na região de popa.

Figura 4 - Exemplo de um flap instalado numa EAV.



Fonte: Autor, (2021).

Os interceptores aplicam-se com sucesso para controlar o trim gerando uma sustentação hidrodinâmica, como as asas de aeronaves, mísseis e barcos, pois os efeitos da altura do

interceptor podem ser claramente identificadas, ao contrário dos flaps (SHTESSEL; SHKOLNIKOV; LEVANT, 2009). Os pesquisadores (TSAI; HWANG, 2004) identificaram o efeito de controladores de trim, tais como interceptores e flaps sobre a redução da resistência para uma embarcação de planeio de alta velocidade. Eles mostraram que os interceptores integrados e os flaps eram eficazes na redução de trim e resistência. E a máxima redução de resistência foi encontrada na faixa de números de Froude entre 2,0 e 2,5.

No estudo de (MANSOORI; FERNANDES, 2016) concluíram que o risco de ocorrência de *porpoising* é aumentado quando o barco possui um alto ângulo de trim e um coeficiente de sustentação menor, simultaneamente. O efeito da implementação de interceptores implica no aumento da pressão na parte traseira do barco, cujo efeito está diretamente relacionado à velocidade. Ao aumentar a pressão, que é originada pelo interceptor, a sustentação dinâmica também aumenta. No entanto, a arraste hidrodinâmico não cresce tão rapidamente, levando a diminuição da resistência ao avanço.

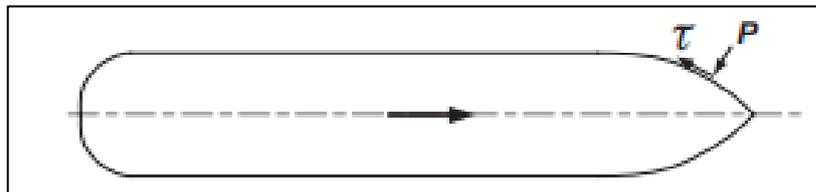
Os estudos de (DAY; COOPER, 2011; SEOK; PARK; RHEE, 2020) com formulações empíricas e também dados computacionais correlacionando as perdas de resistência ao avanço devido ao uso do interceptores, se mostram muito modernos e detalhados. Entretanto, há limitações da correlação da altura do interceptor somente com o comprimento do navio, não levando em considerações outras características como, por exemplo, coeficiente de bloco e coeficiente de esbeltez, os quais são coeficientes importantes para EAV. Dessa forma, a correlação com outros fatores que podem levar para um cálculo mais otimizado da localização, comprimento e altura do interceptor, se faz de grande auxílio para o estado da arte sobre os interceptores.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Resistência ao Avanço

Um entendimento das componentes de resistência ao avanço da embarcação e seu comportamento é importante para entender como é escalado a resistência de um modelo de testes para o navio real (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). A resistência ao avanço de uma embarcação, numa dada velocidade, é dada pelas componentes das forças do fluido sobre o casco na direção paralela e sentido oposto ao seu movimento (Figura 5).

Figura 5 - Forças friccionais e de pressão atuando no casco.



Fonte: (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011)

Essas componentes podem ter diversas causas, as quais são originadas por fontes distintas e com correlação entre si de uma forma bastante complexa. Por isso, se faz necessário considerar a resistência total de uma maneira mais prática, porém inicialmente é necessário conhecer as principais causas dessas forças resistivas:

- Resistência por atrito: é a componente obtida através da integração da tensão tangencial à superfície molhada do casco na direção do movimento;
- Resistência Residual: é a quantidade de resistência obtida quando é subtraído da resistência total a parcela de resistência por atrito, sendo a parcela restante dada ao nome de resistência residual;
- Resistência Viscosa: é a componente de resistência associada a energia perdida devido aos efeitos viscosos;
- Resistência de pressão: é a componente de resistência obtida através da integração da tensão normal à superfície molhada do casco na direção do movimento;
- Resistência de pressão viscosa: é a componente de resistência devido à tensão normal ocasionado pelas forças viscosas e pela turbulência. Não se pode medir diretamente essa quantidade, com exceção em corpos totalmente submersos;
- Resistência de formação de ondas: é a parcela de resistência associada a geração de ondas e gravidade pelo movimento do navio;

- Resistência a ondas: é a parcela de resistência devido às ondas já existentes no oceano, formadas ao longe do navio;
- Resistência do spray de ondas: é a componente da resistência associada a geração de spray pela onda formada pelo navio;

Além de todo esses mecanismos da resistência ao avanço do navio, pode-se adicionar caso necessário:

- Resistência devido a apêndices: componentes da resistência devido à inclusão de sistemas complementares instalados nas obras vivas do navio, como propulsores de proa, metais de sacrifício, etc.
- Resistência por rugosidade: ocasionado pela rugosidade o casco, devido à corrosão e vida marítima alojada nas obras vivas;
- Resistência de manobra: para manter a rota desejada, muitas vezes é preciso usar o leme para contrabalancear a correnteza.

Em hidrodinâmica do navio, na grande maioria das ocasiões, são usados coeficientes adimensionais para expressar valores de força (Resistência) ou velocidade (Froude ou Reynolds). Dessa forma, para facilitar o entendimento do leitor, será utilizado neste documento a forma  $R_A$  para descrever elementos de força e  $C_A$  para coeficientes dimensionais.

A resistência ao avanço de um navio é obtida por meio de método empírico no ensaio de laboratório chamado de Ensaio de Reboque. Sendo uma análise dimensional, as condições de similaridade cinética, dinâmica e geométrica devem ser atendidas entre o modelo e o real para haver total equivalência. A similaridade geométrica refere-se que as dimensões do modelo nas três coordenadas devem ter a mesma razão e escala linear. Já a similaridade cinemática requer que o modelo e protótipo tenham a mesma relação de escala de velocidades. Por fim, a similaridade dinâmica exige que os coeficientes de pressão e de força do modelo e do real sejam idênticos, isso é garantido através dos coeficientes adimensionais (e.g. Reynolds, Froude, Weber) (WHITE, 2011).

Entretanto, não é possível atender simultaneamente todos os adimensionais, mais especificamente, a Reynolds e Froude. Para contornar esse impedimento, foi por meio de experimentos em tanques de prova que constatou a melhor adequação com o fenômeno real quando trabalhado com o número de Froude, pois o padrão de ondas formado no tanque se assemelha com o real (HARVALD, 1983). Dessa maneira, é desmembrado o coeficiente adimensional de resistência total ( $C_T$ ) em parcelas que dependem de Froude e outras que dependem de Reynolds. Ou seja, o coeficiente de resistência total pode ser aproximado para:

$$C_T(F_n, R_n) \cong C_W(F_n) + C_V(R_n) \quad (1)$$

Isso quer dizer que a componente de resistência por geração de ondas pelo navio ( $C_W$ ) será analisada por número e Froude e a componente de resistência viscosa ( $C_V$ ) através de Reynolds. Assim sendo, a obtenção da curva de resistência do modelo é da forma ( $C_T \times F_n$ ), onde os dois adimensionais são obtidos segundo as formulações a seguir:

$$F_n = \frac{V}{\text{raiz}(gL)} \quad (2)$$

$$C_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{\frac{1}{2} \rho S_m V_m^2} \quad (3)$$

Após obter a curva de resistência do modelo, deve-se transformá-la para a curva do navio real. Entretanto, é entendido que a similaridade dinâmica total é impossível de ser satisfeita devido a fatores, como, por exemplo, a rugosidade e temperatura, e somente as similaridades cinemáticas e geométrica podem ser satisfeitas. Essas considerações foram feitas por diferentes cientistas ao longo do tempo, dentre os quais: Froude, Hughes e Prohaska, os quais desenvolveram, cada um, modelos diferentes de relacionar os dados experimentais com os dados da embarcação real. Dessa maneira, a ITTC (*International Towing Test Conference*) surgiu para reunir os pesquisadores da área e concordar em formulações padrão para o método de predição do coeficiente de resistência ao avanço real do navio. Em 1957 ocorreu a primeira conferência em que estabeleceu a formulação padrão para o cálculo do coeficiente de atrito de placa plana (MORRALL, 1970), essa relação (4) a que foi dada o nome de Linha de Correlação Modelo-Navio, por poder ser usada tanto para o modelo como para o navio.

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (4)$$

onde,

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (5)$$

Assim, a parcela de resistência residual do modelo pode ser obtida através a subtração:

$$C_{TSS} = C_{FS} + C_{Rm} \quad (6)$$

onde,  $C_{TSS}$  é o coeficiente de resistência total do navio com casco liso.

Para considerar a aspereza da superfície e também a flutuabilidade devido ao ambiente do experimento (tanque de provas) é adicionado um coeficiente adicional,  $C_A$  definindo assim formulação final proposta pela (ITTC, 1959):

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{Rm} + C_A \quad (7)$$

Para complementar a teoria sobre resistência ao avanço, Hughes (HARVALD, 1983) propôs uma forma de relacionar a parcela de atrito devido à pressão, ou seja, a forma do corpo. Para isso ele considerou que a parte de atrito é acrescentado por uma parcela que é proporcional ao mesmo, onde a constante de proporcionalidade ele nomeou de fator de forma ( $k$ ), ou seja:

$$C_{pv} = (1 + k) \cdot C_{pv} \quad (8)$$

Dessa maneira, a equação (7) com adição da contribuição de Hughes, resulta na equação mais aproximada para o coeficiente e resistência total da embarcação:

$$C_{TS} = (1 + k) \cdot C_{FS} + C_{Rm} + C_A \quad (9)$$

Embora Hughes tenha descoberto e comprovado que o fator e forma é um método mais real de aproximação modelo-navio (HUGHES, 1954), ele não demonstrou como obter o valor de  $k$ . Quem propôs um método experimental para determinar o fator de forma foi Prohaska (PROHASKA, 1977), a partir de:

$$C_T = C_W + (1 + k) \cdot C_{Fo} \quad (10)$$

Onde ele admitiu que o coeficiente de geração de ondas  $C_W$  assume a forma:

$$C_W = y \cdot F_n^4 \quad (11)$$

Sendo  $y$  uma constante de proporcionalidade.

Substituindo a Eq.(11) na Eq.(10), ele chegou na expressão:

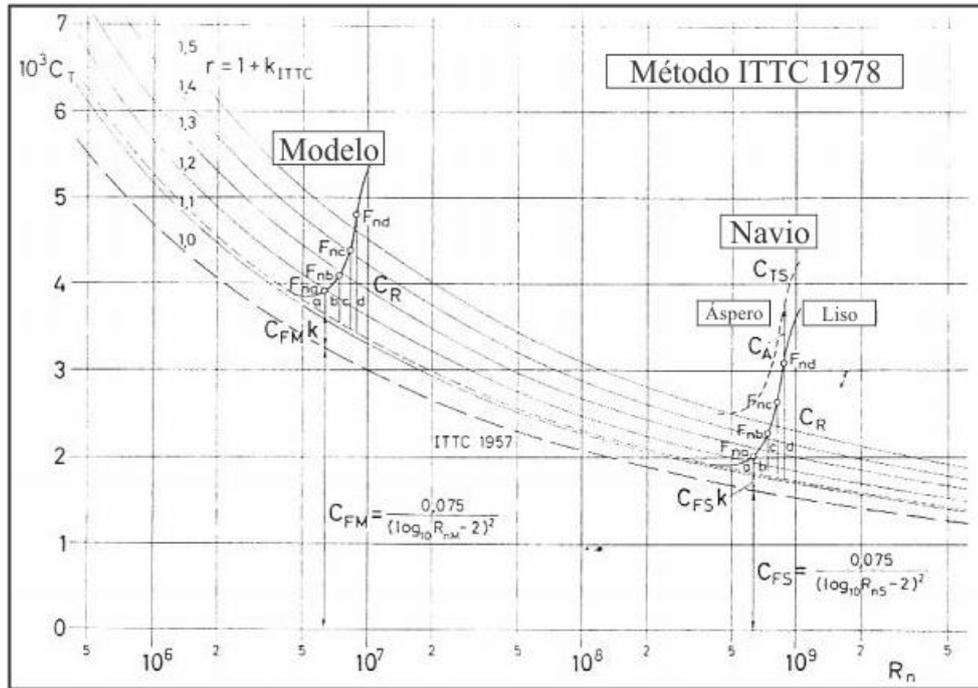
$$\frac{C_T}{C_{Fo}} = \frac{y \cdot F_n^4}{C_{Fo}} + (1 + k) \quad (12)$$

onde,  $C_{Fo}$  é o coeficiente de resistência por atrito em escoamento 2D.

O procedimento de Prohaska se baseia na realização de testes em baixas velocidades ( $0,1 < F_n < 0,22$ ) os quais são plotados os valores no gráfico  $(\frac{C_T}{C_{Fo}} \times \frac{F_n^4}{C_{Fo}})$  para uma dada velocidade e resistência ao avanço total. Fazendo uma analogia da Eq.(12) com a equação de uma reta ( $y = a \cdot x + b$ ), podemos concluir que  $a = y$  e  $b = (1 + k)$ . Dessa maneira, a intersecção da reta plotada como eixo das ordenadas  $(\frac{F_n^4}{C_{Fo}})$  resulta no valor do fator de forma do modelo, este, sendo igual ao do navio, segundo Hughes (HUGHES, 1954).

Em 1978 foi realizada uma nova conferência (ITTC, 1978) como uma tentativa de padronizar o método empírico de obter a resistência ao avanço, chamado de “*ITTC Performance Prediction Method for Single Screw Ships*” (Figura 6).

Figura 6 - Método de correlação da resistência ao avanço (ITTC, 1978).



Adaptado de: (HARVALD, 1983).

Traduzindo o coeficiente de resistência total do navio (Figura 6) de maneira algébrica, podemos definir por:

$$C_T = (1 + k) \cdot C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA} \quad (13)$$

onde:

- $k$  é o fator determinadamente pelo teste de resistência;
- $C_{FS}$  é o coeficiente de atrito do navio conforme a ITTC 1957 (4).
- $C_R$  é calculado através dos coeficientes total e de atrito do modelo no teste de resistência:

$$C_R = C_{Tm} - (1 + k) \cdot C_{Fm} \quad (14)$$

- $C_{Fm}$  é o coeficiente de atrito do modelo conforme a ITTC 1957 (4).
- $C_A$  é o coeficiente de ajuste da diferença de rugosidade:

$$C_A = \left[ \left( \frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{1/3} - 0,64 \right] \times 10^{-3} \quad (15)$$

- $k_s$  é a média da amplitude da superfície rugosa acima de 50 mm. Se o valor de  $k_s$  não é disponível, pode-se usar a amplitude padrão de  $150 \times 10^{-6} m$ .
- $L_{WL}$  é a linha d'água.
- $C_{AA}$  é o coeficiente devido à resistência do ar:

$$C_{AA} = 0,001 \left( \frac{A_{VT}}{S} \right) \quad (16)$$

- $A_{VT}$  é a área transversal do plano frontal da embarcação acima da linha d'água.
- $S$  é a área molhada da embarcação.

Para calcular o fator de forma, o método da (ITTC, 1978) se baseou nos experimentos de (PROHASKA, 1977) mas com alguns ajustes. Ao invés de definir um expoente para o,  $F_n$  como fez Prohaska (Eq. (12)) foi recomendado obter o expoente “ $n$ ” de maneira a obter uma melhor aproximação com base nos dados experimentais (Eq. (17)):

$$\frac{C_T}{C_{Fo}} = \frac{c \cdot F_n^n}{C_{Fo}} + (1 + k) \quad (17)$$

Os parâmetros  $n$ ,  $c$  e  $k$  devem ser determinados pelo método de regressão dos mínimos quadrados.

#### 4.1.1. Resistência ao Avanço de EAV

Diferente de uma embarcação de deslocamento onde a maior contribuição são forças de resistência de pressão viscosa, uma Embarcação de Alta Velocidade (EAV) têm dinâmicas de comportamento hidrodinâmico baseado em forças de sustentação que vence a barreira de pressão ao redor do casco e consegue não aumentar a resistência exponencialmente com a velocidade e sim há uma redução da resistência no momento do planeio.

Os métodos existentes de predição da resistência ao avanço de uma EAV podem ser categorizados da seguinte forma: (ALMETER, 1993)

- Séries de Casco de Planeio
- Equações Prismáticas
- Métodos Numéricos
- Cálculos Empíricos
- Método Teórico

O comum desses métodos é que todos, com exceção do teórico, se baseiam na análise de dados de testes de modelos em laboratórios (ALMETER, 1993) sendo dessa forma meios firmes para predição da resistência real da embarcação.

As variáveis comumente usadas no estudo da resistência ao avanço de EAV incluem velocidade, peso, comprimento, boca, ângulo de deadrise e posição longitudinal do centro de gravidade. Esses parâmetros são relacionados com a resistência do casco, que por sua vez é

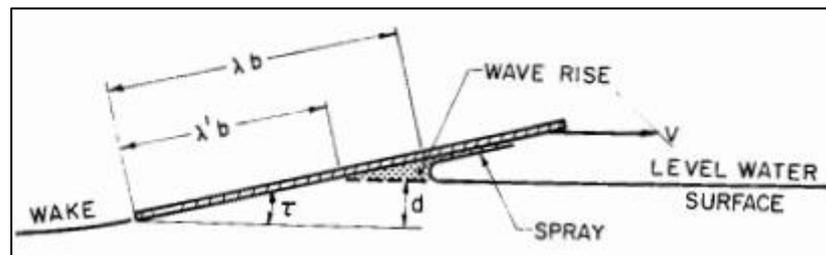
segregada pela pressão de viscosa e arrasto friccional da água. Arrasto devido ao ar e apêndices são normalmente adicionados separadamente.(ALMETER, 1993)

Os estudos mais difundidos nessa área foram conduzidos por (SAVITSKY, 1964) e, posteriormente, aprimorado por (BLOUNT; FOX, 1976), que introduziu um fator de melhoria na formulação de Savitsky e se tornou o método mais empregado para embarcações. Sendo o método de (BLOUNT; FOX, 1976) uma revisão de (SAVITSKY, 1964), será percorrido brevemente como o seu método é trabalhado.

#### 4.1.2. Método de Savitsky

Diferente da análise em águas calmas, na análise da área molhada sob condição de planeio existe o acréscimo de área devido ao spray, i.e. escoamento de água na direção contrária ao fluxo. Nessa condição se atribui a elevação de água acima da linha d'água como contribuição para a área molhada do casco. Na Figura 7 o fenômeno pode ser melhor visualizado na situação de placa plana, em que  $\lambda'b$  demonstra o comprimento de área molhada na condição de águas calma e  $\lambda b$  na condição em velocidade.

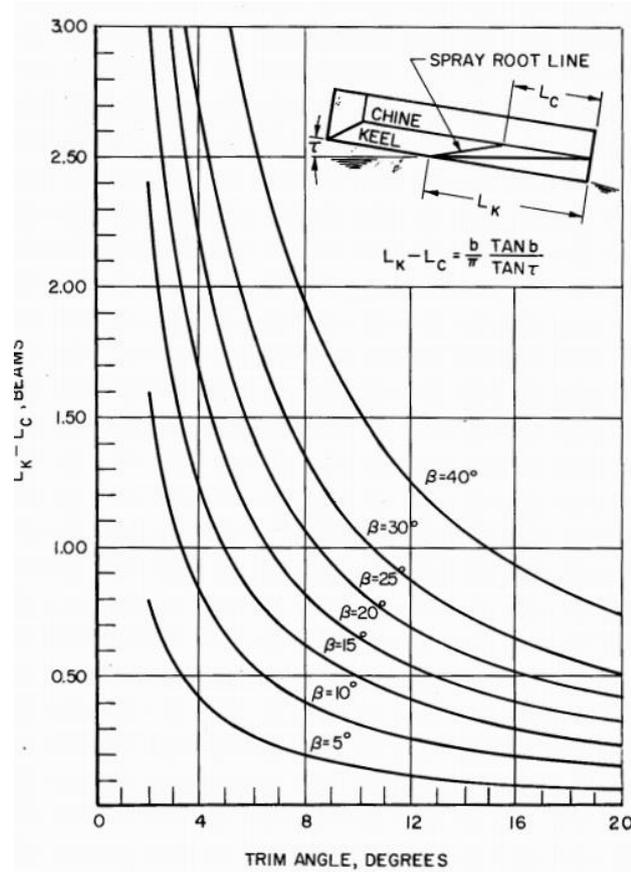
Figura 7 – Fenômeno de spray em placa plana



Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Para pequenos ângulos de trim a diferença é desprezível entre áreas molhadas, entretanto para maiores velocidades há um acréscimo equacionado empiricamente como demonstrado na Figura 8.

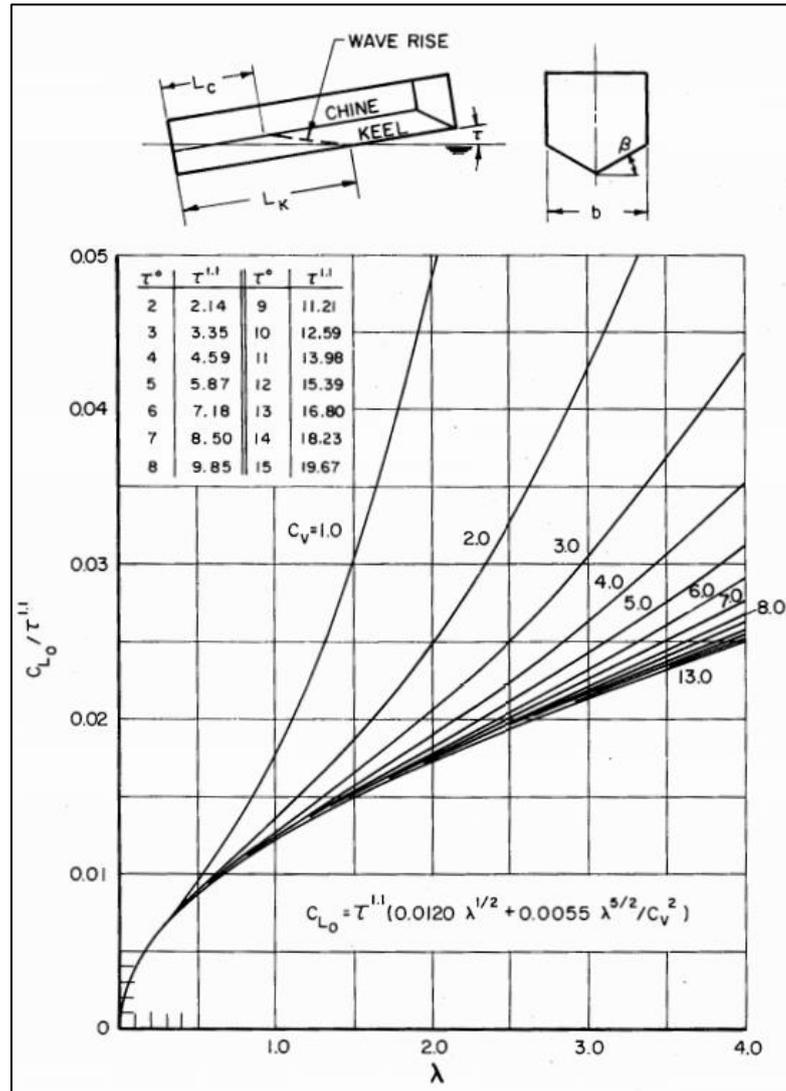
Figura 8 – Linha de spray versus trim e ângulo de V



Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Mediante manipulações empíricas e algébricas, o autor (SAVITSKY, 1964) determina uma formulação para o coeficiente de sustentação do casco (Equação 18) em termos de parâmetros geométricos e dinâmicos. Utilizando de base de dados, ele calcula os coeficientes (c, D e n) resultante na equação e gráfico visto na Figura 9.

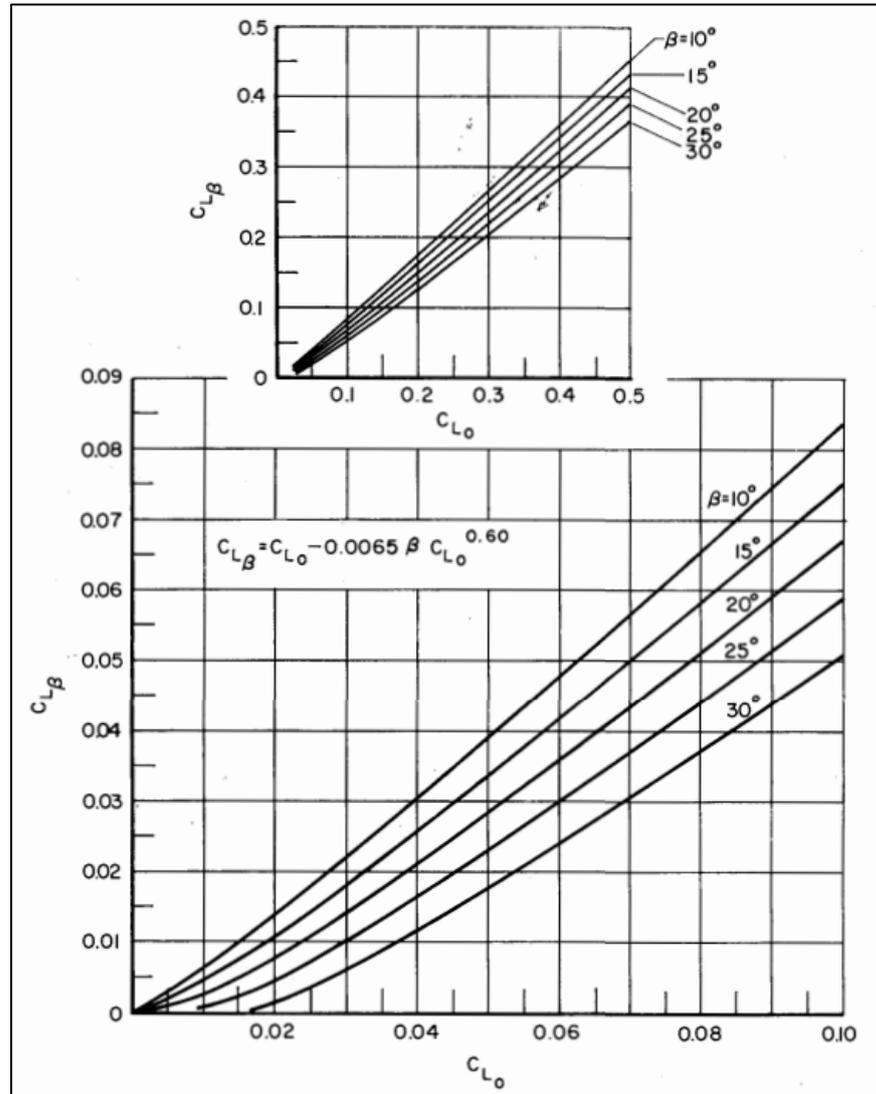
$$C_L = \tau^{1.1} \left( c\lambda^{1/2} + \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \right) \quad (18)$$

Figura 9 – Coeficiente de sustentação de placa plana para  $\beta=0^\circ$ 

Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Quando comparado o coeficiente de pressão dinâmica com o coeficiente de pressão estática (empuxo), é observado que com o aumento do ângulo de V do fundo ( $\beta$ ), a sustentação do casco em movimento é diminuída, ver Figura 10. Isso retrata que quanto mais plana a superfície, mais sustentação irá gerar, em contrapartida, quanto mais inclinada na vista transversal, menos sustentação irá gerar. Esse fenômeno ocorre devido à redução da pressão de estagnação no bordo de ataque da área molhada.

Figura 10 — Coeficiente de sustentação de placa plana



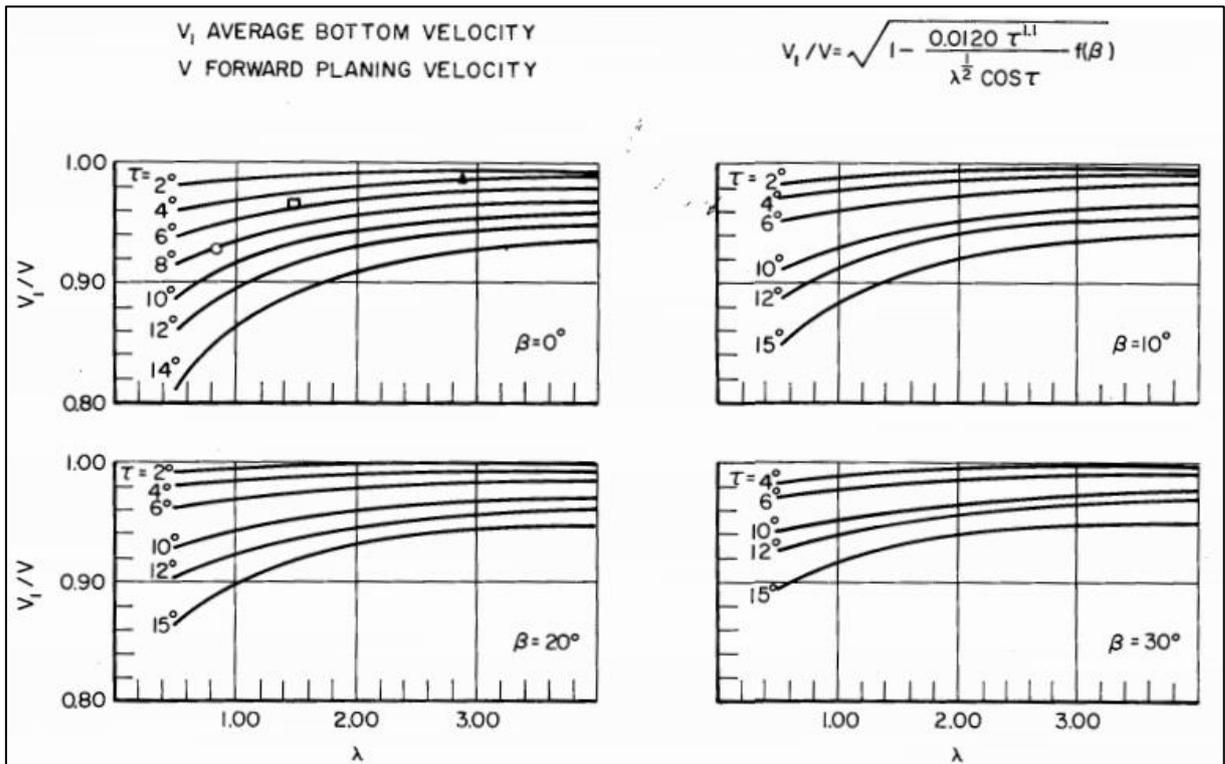
Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Usando da mesma estratégia de formulações semi-empíricas, encontra-se a formulação para o arrasto hidrodinâmico de superfícies de planeio, (22).

$$D = \Delta \tan(\tau) + \frac{\rho V_1^2 C_f \lambda b^2}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (19)$$

Para o devido cálculo é necessário, que seja calculado anteriormente a velocidade média do escoamento na região de pressão no fundo do casco. Esse cálculo pode ser visto na Figura 11, bem como os gráficos para diferentes valores de ângulo de V.

Figura 11 - Magnitude da velocidade média no fundo de uma superfície de planeio

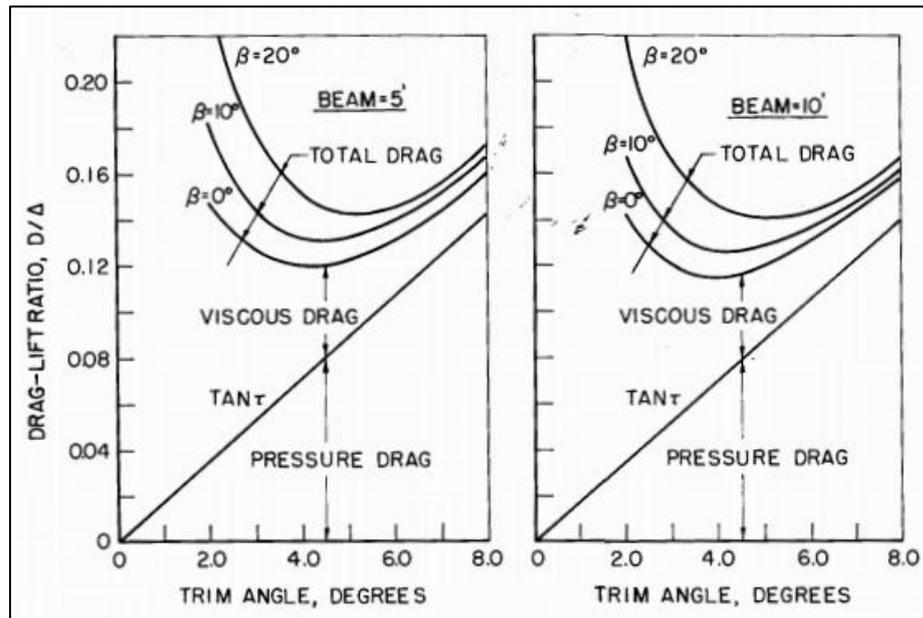


Fonte: (SAVITSKY, 1964)

O gráfico mais rico em informações em (SAVITSKY, 1964) é a curva que apresenta a variação de arrasto-sustentação por ângulo de trim em vários ângulos de *deadrise* e dois comprimentos de boca, Figura 12. Na figura fica claro que para cada ângulo de  $V$  ( $\beta$ ) há um ângulo de trim ótimo com menor arrasto, que ao aumentar o trim se tem um aumento pequeno do arrasto, em contrapartida, ao diminuir o trim, se tem um maior aumento do arrasto.

Outra importante informação é que dobrando a boca da embarcação, a redução do arrasto é de cerca de 4%. Analisando as componentes de resistência, é possível identificar que para baixos ângulos de trim, a resistência é predominantemente por efeitos viscosos, já para altos ângulos de trim, é predominantemente por efeitos de pressão viscosa.

Figura 12 — Variação da fração arrasto-sustentação para superfícies de planeio prismáticas

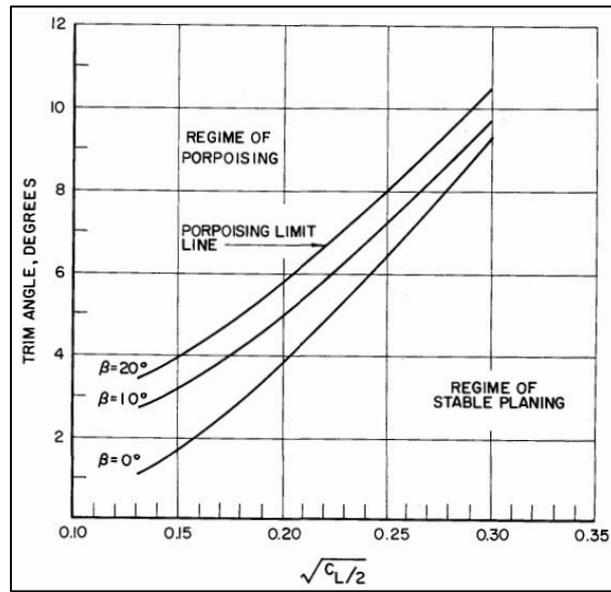


Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Na abordagem do artigo (SAVITSKY, 1964), também faz uma caracterização do problema de *Porpoising* (Cabeceio), i.e. movimentos de *Pitch* e *Heave* em altas velocidades em mar calmo gerado por forças hidrodinâmicas. Ele menciona o estudo de (DAY; HAAG, 1952) e apresenta o mesmo em forma gráfica para três valores de  $\beta$ , Figura 13. Nesse gráfico identifica regiões de estabilidade e instabilidade dinâmica em função do ângulo de trim e coeficiente de sustentação. Estando abaixo da curva, o efeito de *porpoising* não é detectado, caso contrário na região acima da curva.

Como pode ser visto na Figura 13, a consequência de aumentar demasiadamente o ângulo de  $V$  ( $\beta$ ) e o trim é insurgência de *porpoising*. Caso esse fenômeno ocorra em alguma embarcação, a regra geral é de diminuir o ângulo de trim. Para isso, existem diversas maneiras, uma delas é de deslocar o centro de gravidade mais avante, se isso não for possível, um apêndice poderá ser criado na popa como um ressalto transversal fixo para gerar um momento que irá diminuir o trim. Outras opções são mais comuns no que é visto no mercado náutico atual, sendo o uso de *flaps* ou *interceptors*, i.e. apêndices na popa da embarcação que geram o momento a proa de maneira variável.

Figura 13 — Limites de estabilidade de porpoising



Fonte: (SAVITSKY, 1964)

Avaliando o intervalo de trim que entrega a menor resistência ao avanço, ver Figura 8, observa-se que ângulos entre 4° e 5° são o que tem menores valores. Se comparado ao limite de porpoising, Figura 13, os limites são na ordem de 1° e 2°, por isso que, na prática da operação do barco, ele navega em regime de maior resistência ao avanço para evitar que o fenômeno ocorra.

#### 4.2. Planejamento de Experimentos Fatoriais

Um experimento ou ensaio é um procedimento planejado para obter novos fatos, negar ou confirmar hipóteses ou resultados obtidos anteriormente (ANJOS, 2005). Segundo (CARPINETTI, R, 2009) em um experimento, variações propositalis são feitas nas variáveis de entrada ou de controle (chamados de níveis dos fatores de controle ou tratamentos) de um processo ou sistema, visando observar e identificar as razões de variação de resposta ou variável de saída.

Os procedimentos multivariados de otimização experimental são essenciais para explorar dados e informações gerados pela pesquisa científica. O planejamento fatorial destaca-se por permitir avaliar o efeito de múltiplas variáveis a partir de um número reduzido de experimentos. Isso é especialmente útil quando há muitos fatores envolvidos (CUNICO et al., 2008). Além disso, o planejamento de experimentos é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas em projetos de melhoria e desenvolvimento de produtos e processos, sendo amplamente difundido (ANJOS, 2005).

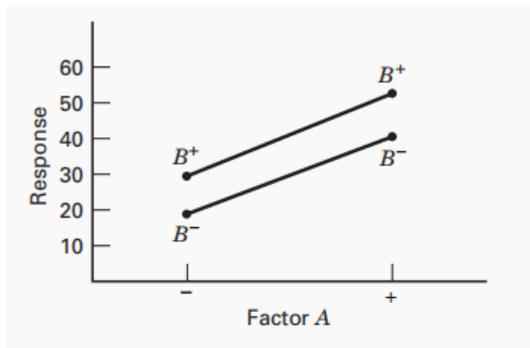
Acrescenta (MONTGOMERY, 2013) que os experimentos envolvem no estudo dos efeitos de dois ou mais fatores. Sobretudo, experimentos fatoriais são os mais eficientes para esse tipo de experimento. Por experimento fatorial, compreende-se que em cada ensaio completo ou réplica da experiência, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados.

Em experimentos fatoriais, o experimentador seleciona um número fixo de níveis para cada um dos  $k$  fatores e executa experimentos com todas as combinações de níveis (OPRIME; PUREZA; DE OLIVEIRA, 2017). O efeito de um fator é definido a mudança na resposta produzida por uma mudança no nível do fator. Isso é frequentemente chamado de efeito principal porque se refere aos fatores primários de interesse no experimento (MONTGOMERY, 2013).

Como exemplo, (MONTGOMERY, 2013) toma como comparação um experimento fatorial de dois fatores com ambos os fatores de planejamento em dois níveis. É chamado esses níveis de "baixo" e "alto" e os denota-se de "-" e "+", respectivamente. O principal efeito do fator A neste projeto de dois níveis pode ser pensado como a diferença entre a resposta média no nível baixo de A e a resposta média no nível alto nível de A.

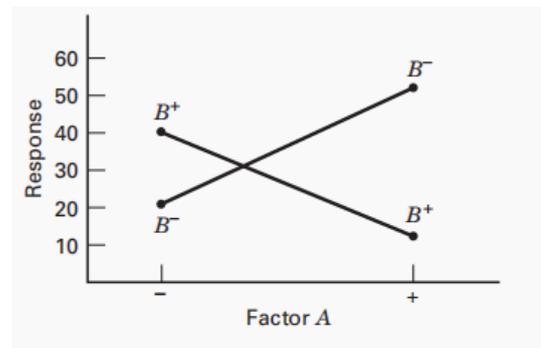
Essas ideias podem ser ilustradas graficamente. A Figura 14 plota os dados de resposta na contra o fator A para ambos os níveis do fator B. Observe que as linhas B+ e B- são aproximadamente paralelas, indicando uma falta de interação entre os fatores A e B. Dessa forma, para maximizar a função objetivo ou a variável resposta é tomado a opção de seu maior valor. Na Figura 15 já se observa uma interação entre os fatores com linhas cruzadas entre si, demonstrando a combinação de fatores influenciam na resposta final, (MONTGOMERY, 2013).

Figura 14 – Experimento Fatorial sem Interação.



Fonte: (MONTGOMERY, 2013).

Figura 15 – Experimento fatorial com Interação.



Fonte: (MONTGOMERY, 2013).

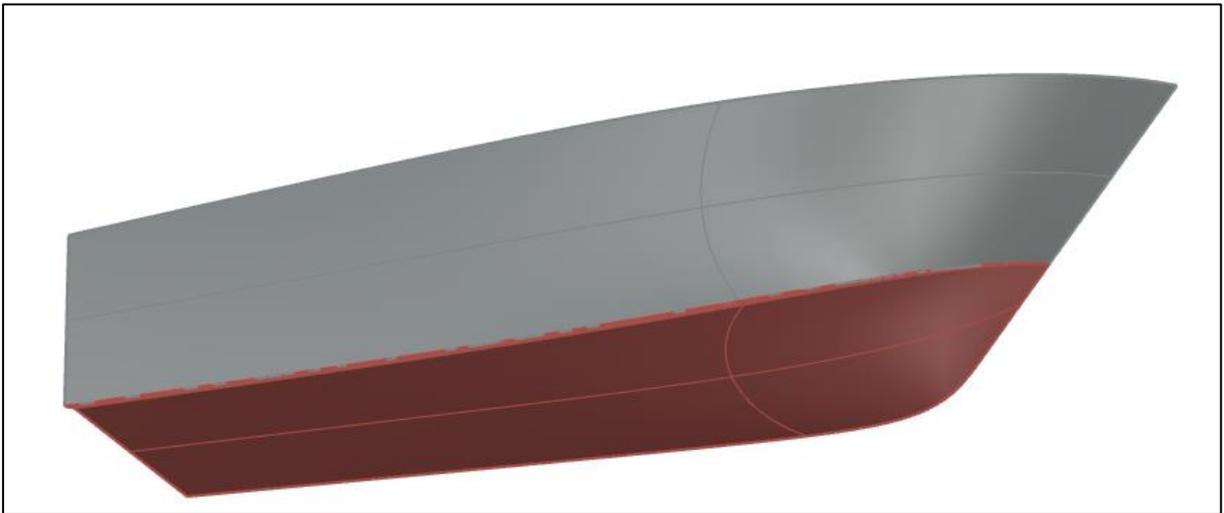
Com experimento fatorial é possível conhecer as interações de determinados fatores para uma dada resposta. Levando a compreensão de como os fatores influenciam a resposta e o que deve ser feito para maximizar a equação resposta para um determinado problema. Por isso é um método bastante utilizado em trabalhos de melhoria contínua em empresas e indústrias, (ANJOS, 2005).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1. Criação do Modelo em Escala Reduzida

Como o intuito deste trabalho é avaliar o efeito do interceptor em embarcações de alta velocidade da realidade da indústria na região do Recife, é escolhido um modelo genérico de embarcação de quinas vivas, i.e. hard chine, Figura 16. O tamanho da embarcação foi assumido ser de 12 metros por se tratar de um tamanho de embarcação mais comum produzido mundialmente, (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

Figura 16 - Modelo genérico de EAV usado no trabalho.



Fonte: Autor (2024).

Para o fator de escala a ser empregado foi verificado as máximas dimensões que o tanque de provas do Laboratório de Ensaios com um Canal de Águas Circulantes (LAB3C) da UFPE permite.  $NL < 250 \text{ mm} B = 100 \text{ mm}$  esse tamanho o casco não irá sofrer efeito de blocagem, i.e. alteração do campo de pressão ao redor do casco devido o aumento da velocidade do fluido entre o casco e os limites do canal, garantindo maior veracidade dos resultados dos testes em escala, comparado com os efeitos reais. Dessa forma, foi assumido um fator de escala ( $\gamma$ ) de 0,02, ou seja:

$$\gamma = \frac{L_m}{L_r} = 0,02 \rightarrow L_m = 240 \text{ mm} \quad (20)$$

$L_m$ : Comprimento total do modelo

$L_r$ : Comprimento total da embarcação real

Assim, fazendo os cálculos para esse fator de escala e comprimento real da embarcação de 12 metros, o comprimento do modelo a ser construído é de 240 mm e boca igual a 76 mm, obedecendo aos limites do tanque de provas LAB3C.

Para a reprodução da geometria do casco é optado por seguir a metodologia de construção de barcos nomeada *strip plaking* (NASSEH, 2011), a qual consiste no seccionamento do casco em diversas balizas e longitudinais de madeira que copiam a superfície do casco. Nesse processo, os espaços entre as madeiras são preenchidos por espuma de poliuretano (PU) ou então são fixadas varas de madeiras interligando as balizas para que se tenha o formato mais grosseiro do casco. Após essa etapa é necessário o acabamento da superfície através da aplicação de resina, fibra de vidro, massa poliéster e lixamento para deixar a superfície bem acabada e lisa.

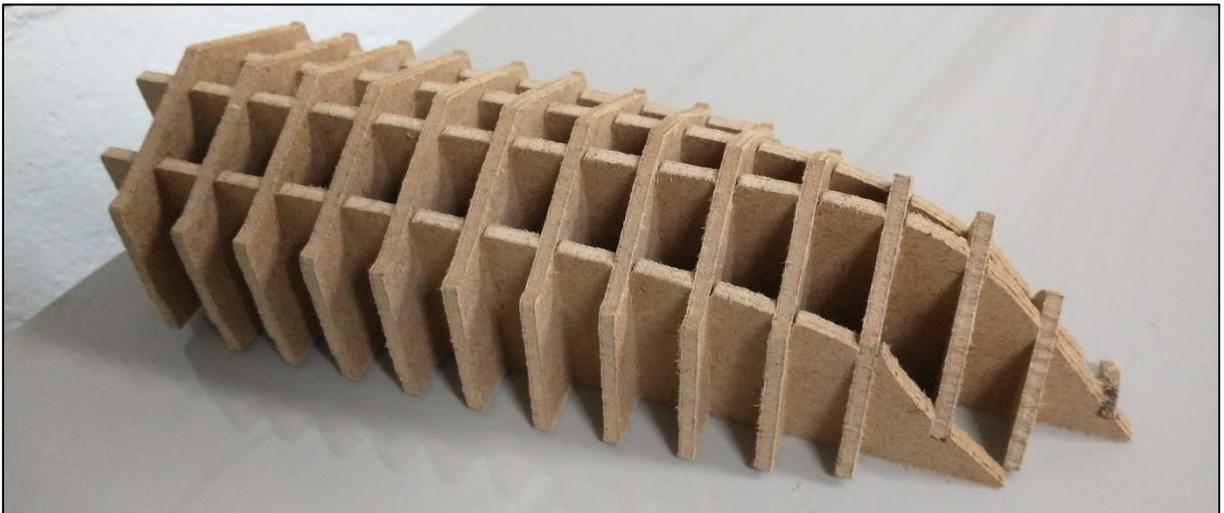
Na primeira etapa do processo de strip planking, é necessário decalcar a geometria do casco em um determinado número de balizas e longitudinais de madeira, para isso recorreu a uma extensão pertencente ao software *Rhinoceros 3D*, esta extensão se denomina *Grasshoper*. Esse é um programa que funciona paralelamente ao *Rhinoceros* e faz com que o *Rhinoceros* se torne paramétrico, i.e. tendo dimensões e funções com relações que podem ser facilmente alterados.

O Grasshoper vem se desenvolvendo bastante devido à grande popularidade do Rhinoceros nos profissionais de Designer e também na Engenharia Naval. Ele traz uma interface bastante simples e agradável para usuários, que pode dizer que é um programa pensado para facilitar o uso da programação, pois por atrás do Grasshoper existe, na verdade, um código em Python que se comunica com o código base do Rhinoceros.

Dessa maneira construiu-se um script no Grasshoper, para efetuar o seccionamento e planificação dos cortes de maneira paramétrica, tornando o seccionamento das balizas e longitudinais e suas planificações mais simples e rápida.

Para os cortes utilizou uma fresadora CNC de 3 eixos (i.e. percorre os eixos ordenados x, y e z) para garantir os encaixes das madeiras (MDF 3mm) (Figura 17) e também a forma original do projeto. Foi escolhido fazer o enchimento com poliuretano líquido expansível por ser mais leve e, assim, permitir o posterior ajuste do centro de gravidade e calado do modelo.

Figura 17 - Seções de madeira da CNC montadas.



Fonte: Autor (2024).

O poliuretano líquido utilizado consiste em reagente A e reagente B, os quais, ao se misturarem, começam uma reação química de expansão, que preenche o espaço em que é colocado. Foi optado trabalhar com esse tipo de PU por ser mais denso do que as convencionais espumas expansivas encontradas em materiais de construção, que tem densidade menor e não recebe bem o lixamento.

Depois da cura do PU foi feito o processo de lixamento da superfície para chegar no formato que as seções de madeira permite a lixa chegar, Figura 20. Após satisfazer a forma, é aplicado resina poliéster ortoftálica com 1% de catalisador para endurecer a superfície e tampar orifícios do PU e preparar a superfície para camadas de acabamento com massa poliéster. Abaixo pode ser visto as etapas do processo de fabricação do modelo:

Figura 18 - Preparação para enchimento de PU.



Figura 19 – Foto após expansão do PU.



Figura 20 - Resultado do lixamento do PU.



Figura 21 - Aplicação de resina após lixamento.



Fonte: Autor (2024).

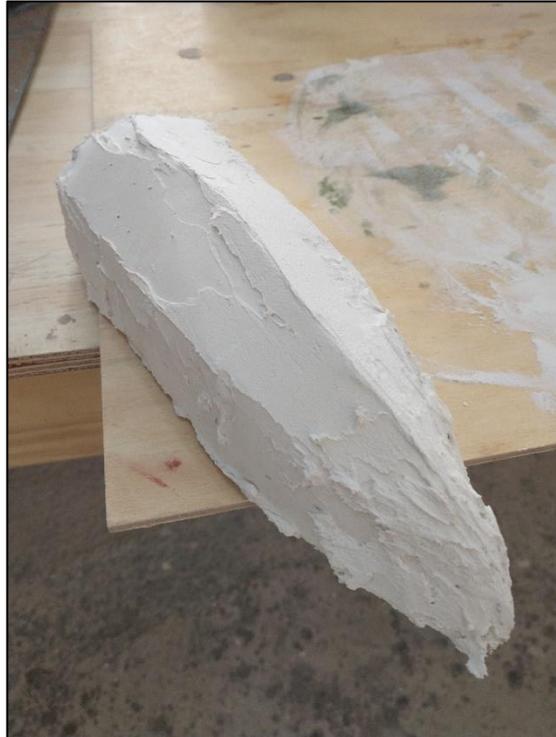
Para o acabamento da superfície é aplicada a massa poliéster na superfície (Figura 22) já resinada para tampar grandes deformações e buracos que ficaram devido à inconsistência da expansão do PU. A massa feita obedece a seguinte receita:

Tabela 1 – Receita de Massa de Acabamento

Material	Proporção
Resina poliéster	3 kg
Gel Coat	4 kg
Microesfera	1 kg
Aerosil	2 kg
Parafina líquida	2 kg
Catalisador	1%
Cobalto	0,5%

Fonte: Autor (2024).

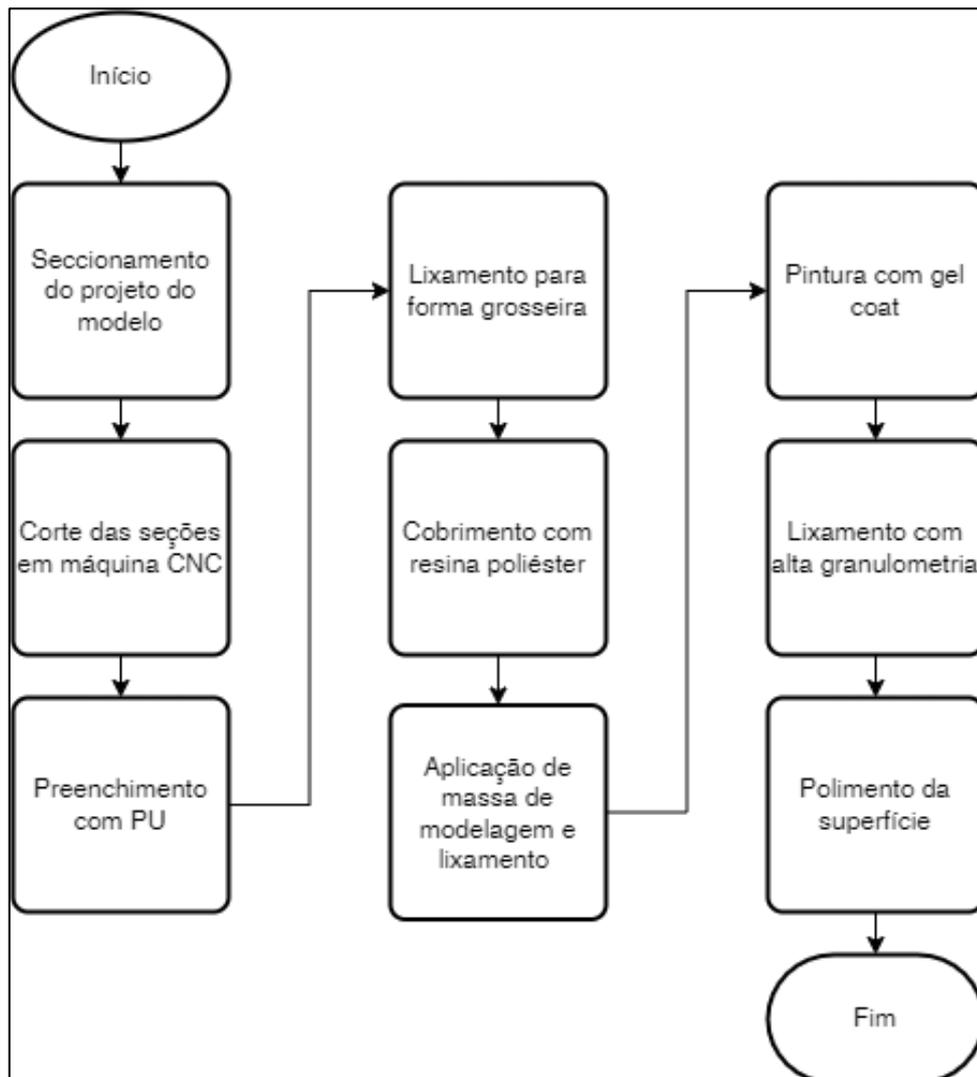
Figura 22 - Massa poliéster aplicado.



Fonte: Autor (2024).

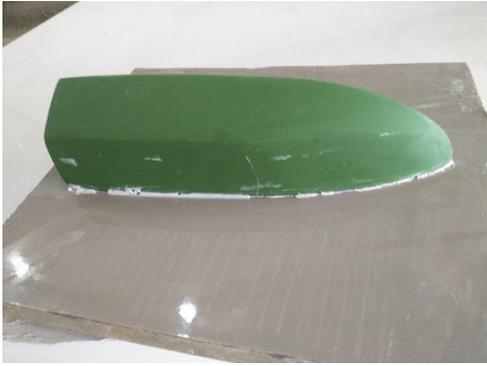
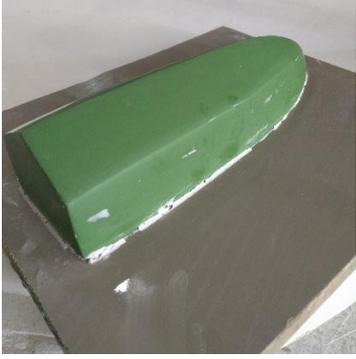
Após o acabamento da superfície é pintado o casco para conferir uma superfície lisa e bom deslizamento da água sobre o casco, requisito necessário para o teste da resistência ao avanço. Assim, todo o processo de fabricação do modelo (ou protótipo) seguiu o seguinte fluxograma, Figura 23:

Figura 23 - Fluxograma da construção do modelo.



Fonte: Autor (2024).

Tendo o modelo/protótipo finalizado, agora é laminado em cima dele para a criação do molde negativo (ou fêmea) para então laminar a peça através do molde. Esse é o processo usual de confecção de peças em materiais compósitos, e como forma educativa foi seguido esse processo para experienciar na prática nesse trabalho de conclusão do curso, como forma de aprendizado e também para contribuir para o incremento do estado da arte no curso de Engenharia Naval na UFPE. O processo pode ser visto através das seguintes imagens:

<p>Figura 24 - Preparação do modelo/protótipo para laminação.</p> 	<p>Figura 25 - Madeira abaixo do protótipo para gerar aba.</p> 
<p>Figura 26 - Laminação em cima do modelo/protótipo construído.</p> 	<p>Figura 27 - Molde finalizado.</p> 

Fonte: Autor (2024).

Para a construção do molde uma das primeiras análises a se ter sobre o modelo são sobre os ângulos de desmolde da peça. Caso a peça tenha mais de um sentido de desmolde, será necessário repartir o molde em uma ou mais partes, para que o desmolde possa ser viável. No caso do casco, é possível desmoldar em um único sentido, dessa forma foi feita a construção da aba de maneira perpendicular ao sentido de extração da peça (sentido do eixo z).

Na Figura 24 é mostrada a primeira etapa para preparação para laminação do molde, a aplicação de agente desmoldante. Após a sequência correta de desmoldante no modelo, é seguido com a laminação sobre o modelo que se quer copiar para que se tenha o molde da peça, Figura 26. Após a laminação é feito o desmolde e lixamento para acabamento da aba do molde, Figura 27. Após essas etapas, o molde estará pronto para ser utilizado na produção de peças sempre iguais em PRFV – Plástico Reforçado por Fibra de Vidro.

## 5.2. Determinação de Características Dinâmicas do Modelo

Para que os resultados dos testes experimentais tenham uma boa análise, é necessário em que seja medido corretamente os parâmetros dinâmicos do modelo, bem como: dimensões principais reais, posição do CG, inércias de massa nos três eixos e raio de giro nos 3 eixos. Assim, como o experimento não está se baseando em uma embarcação real, a posição do CG, calado e as inércias não precisam ter valores específicos. Entretanto, para o experimento ter uma boa semelhança com o real, é feito uma pesquisa na literatura para posição do CG.

(FRIDSMA, 1969) fez uma bateria de testes em uma família de cascos de alta velocidade para regime de planeio. Os seus modelos tinham a seguinte configuração:

Tabela 2 – Características modelo experimento de (FRIDSMA, 1969).

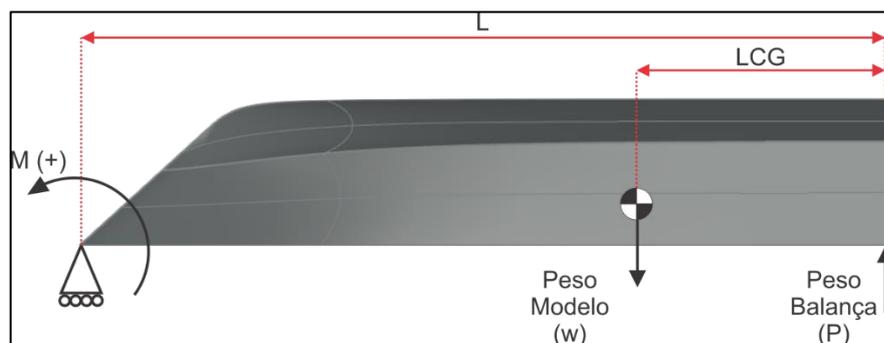
$LCG/LOA$	36%
$VCG/LOA$	81%

Fonte: Autor (2024).

(ALMETER, 1993) também desenvolveu estudos de séries de forma de barcos, onde para a série de embarcações de planeio (Série 62) o intervalo da posição do LCG é entre 36% a 48%. No caso de exceder esse limite, a embarcação fica com a proa muito afundada, fazendo aumentar a resistência ao avanço, no caso contrário, o CG mais a ré aumenta a distância do centro de pressão (CP) mais a vante, fazendo um ângulo de trim grande e perdendo assim sustentação para o planeio.

Visto essas considerações, objetivará alcançar a mesma posição do CG do modelo em estudo comparado aos dados de (FRIDSMA, 1969) para a posição do CG no ajuste de pesos do modelo. Primeiro, é elaborado o esquema do experimento para obtenção do LCG, como pode ser visto na Figura 28 a seguir:

Figura 28 - Esquema de experimento para obtenção do LCG.



Fonte: Autor (2024).

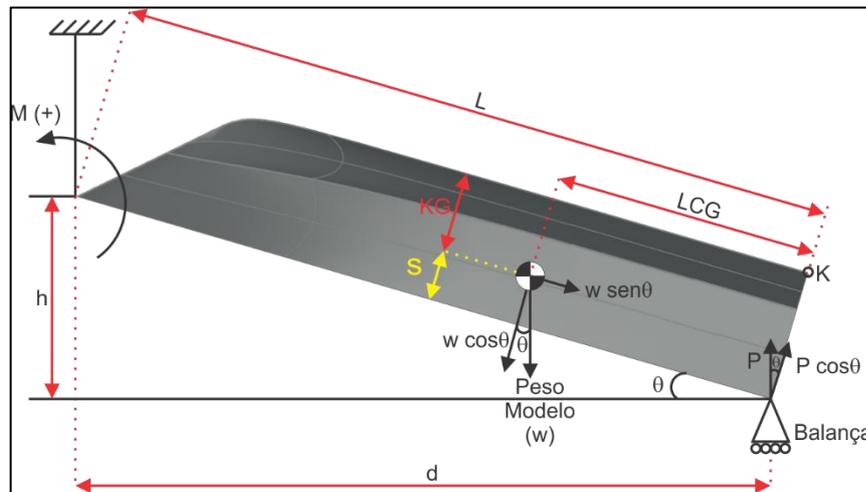
Por meio de (CELIS, 2020), é realizado o somatório de momentos em torno do apoio na proa da embarcação, se tem o seguinte:

$$P \cdot L - w \cdot (L - LCG) = 0 \quad (21)$$

$$LCG = \left| \frac{(P - w) \cdot L}{w} \right| \quad (22)$$

Dessa forma obtemos os valores de LCG, que usamos para determinar o valor de KG, como está demonstrado na Figura 29, a seguir:

Figura 29 - Esquema de experimento para medição do KG.



Fonte: Autor (2024).

Com a inclinação do modelo surge as componentes dos vetores peso ( $w$ ) e reação da balança ( $P$ ), que, fazendo o somatório de momentos no eixo que passa pelo apoio na proa da embarcação e vai pela linha do convés até o ponto de relação a balança, é encontrado:

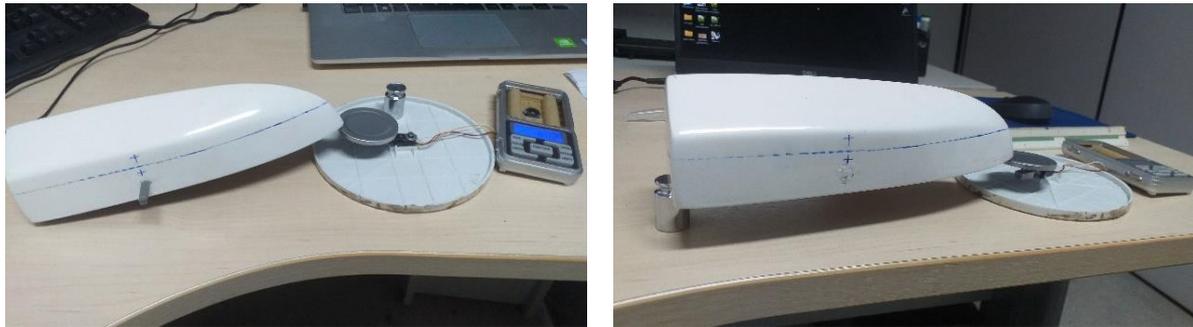
$$P \cdot L \cdot \cos \theta - (L - LCG) \cdot w \cdot \cos \theta - s \cdot w \cdot \sin \theta = 0 \quad (23)$$

$$s = \frac{P \cdot L \cdot \cos \theta - (L - LCG) \cdot w \cdot \cos \theta}{w \cdot \sin \theta} \quad (24)$$

$$KG = D - s \quad (25)$$

Com a equação (24) e (25) calculamos o valor vertical do centro de gravidade CG, entretanto, para termos uma boa validação dos futuros dados experimentais é preciso de uma nuvem de dados para ter conhecido também a incerteza das medidas. Para isso será realizado nesse estudo 6 ciclos de medições para averiguar a incerteza dos valores medidos.

Figura 30 – Ensaio para medição do LCG e KG.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 – Cálculos do LCG e KG do protótipo.

Medição do LCG	Med. 01	Med. 02	Med. 03	Med. 04	Med. 05	Med. 06	Média
LOA (mm)	243,24	243,58	243,08	243,3	243,64	243,26	<b>243,28</b>
Massa Modelo g	288,7	288,5	288,4	288,1	288,3	288,1	<b>288,35</b>
Balança (peso) g	187,1	186,9	185,8	186,2	186,9	186,7	<b>186,8</b>
<b>LCG (mm)</b>	<b>85,60</b>	<b>85,78</b>	<b>86,48</b>	<b>86,05</b>	<b>85,69</b>	<b>85,62</b>	<b>85,74</b>
LCG/LOA %=	35,19	35,22	35,58	35,37	35,17	35,20	<b>35,21</b>
Medição do KG	Med. 01	Med. 02	Med. 03	Med. 04	Med. 05	Med. 06	
D (mm)	59	59	59	59	59	59	
h (mm)	34,62	33,78	33,62	34,66	33,76	34,62	
ângulo incli. (°)	<b>8,2</b>	<b>8,0</b>	<b>7,9</b>	<b>8,2</b>	<b>8,0</b>	<b>8,2</b>	
ângulo incli. (rad)	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	
Balança (peso) g	190,2	191,2	191,3	190,9	190,7	190,1	
s (mm)	<b>18,16</b>	<b>25,93</b>	<b>33,20</b>	<b>27,58</b>	<b>22,95</b>	<b>19,97</b>	<b>24,44</b>
<b>KG (mm)</b>	<b>40,84</b>	<b>33,07</b>	<b>25,80</b>	<b>31,42</b>	<b>36,05</b>	<b>39,03</b>	<b>34,56</b>
KG/D %=	69,2	56,1	43,7	53,3	61,1	66,2	<b>58,58</b>

Fonte: Autor (2024).

Será utilizado como valor central a média dos valores com a flutuação das incertezas, como pode ser visto na equação (26), a seguir:

$$Xp' = Xp \pm \sigma \quad (26)$$

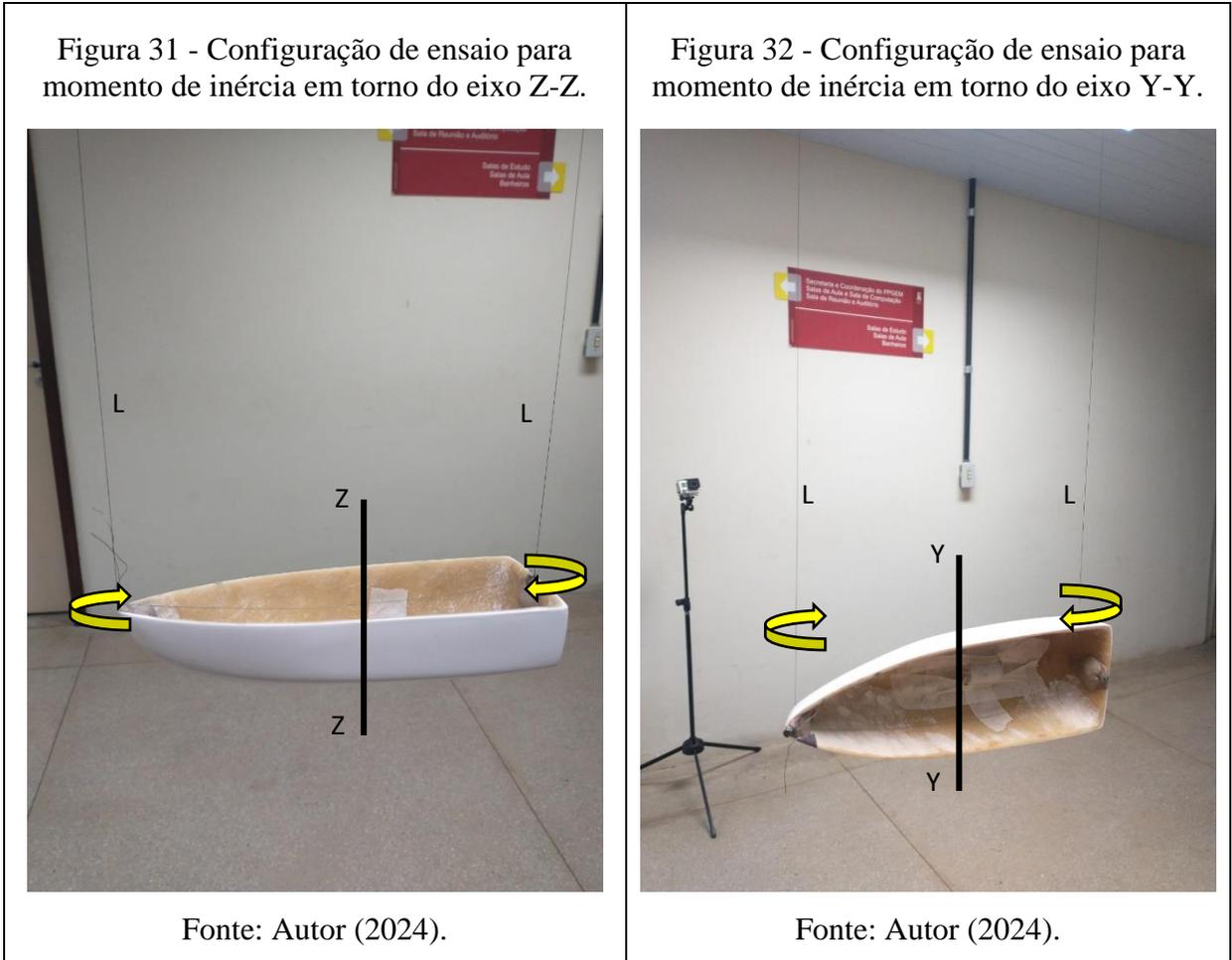
Onde:

$Xp'$  é a variável resposta

$Xp$  é a média das medições

$\sigma$  é a incerteza da medida

Com os valores da posição do centro de gravidade obtidos, agora é feito o ensaio para obtenção dos momentos de inércia do modelo através do movimento pendular bifilar, como pode ser mostrado na Figura 31 e Figura 32, a seguir:



Na Figura 31 e Figura 32 está demonstrado o esquema do ensaio de movimento pendular bifilar, onde o comprimento  $L$  do cabo é medido sendo realizada uma pequena perturbação angular  $\alpha$  e a partir dessa angulação são contados 10 oscilações e marcado o tempo total dessas oscilações. Dividindo esse tempo pelo número de oscilações (10), é encontrado o período médio de cada oscilação. E através da equação (27) e (28) pode ser calculado o valor experimental do momento de inércia do modelo nos eixos em questão, Z (yaw ou guinada) e Y (pitch ou cabeceio) (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

$$I_{zz} = \frac{m \cdot g \cdot T_{zz}^2 \cdot a}{4\pi^2 \cdot L} \quad (27)$$

$$I_{yy} = \frac{m \cdot g \cdot T_{yy}^2 \cdot b}{4\pi^2 \cdot L} \quad (28)$$

Para ter o controle sobre as incertezas dos valores do ensaio de movimento pendular bifilar foi necessário efetuar 6 diferentes medições. Os valores dos ensaios podem ser encontrados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Dados dos ensaios de oscilações em *Pitch* e *Yaw* do protótipo.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Média
10 oscilações <i>yaw</i> (s)	17,82	17,9	17,92	17,95	17,82	18,22	
Período <i>yaw</i> (s)	1,782	1,79	1,792	1,795	1,782	1,822	1,791
10 oscilações <i>pitch</i> (s)	17,51	17,31	17,72	16,5	16,52	16,42	
Período <i>pitch</i> (s)	1,751	1,731	1,772	1,65	1,652	1,642	1,6915

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 – Cálculo de Momento de inércia em *Pitch* e *Yaw*.

$a=L/2=$	0,12164	m
$l=$	1,95	m
$I_{zz}=$	1,78E-04	kg.m <sup>2</sup>
$I_{yy}=$	1,59E-04	kg.m <sup>2</sup>

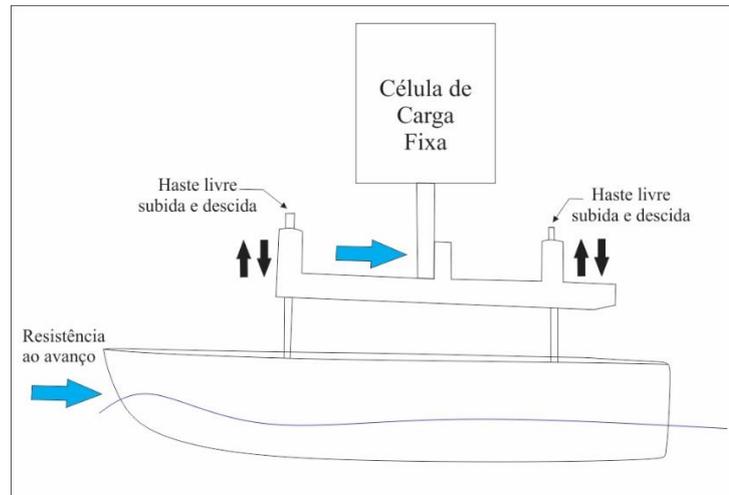
Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 5 é encontrado então o momento de inércia do modelo em escala que poderá contribuir para uma possível continuação do estudo deste modelo no âmbito de comportamento em ondas e uma predição do movimento dinâmico por meio de da equação de corpo livre de uma EAV, (SAVITSKY, 1964).

### 5.3. Realização dos Testes em Tanque de Provas

Para os testes no tanque de provas do LAB3C da UFPE foi elaborado um sistema de medição que permitisse o movimento livre de pitch. Esse sistema pode ser visto no esquema a seguir Figura 33:

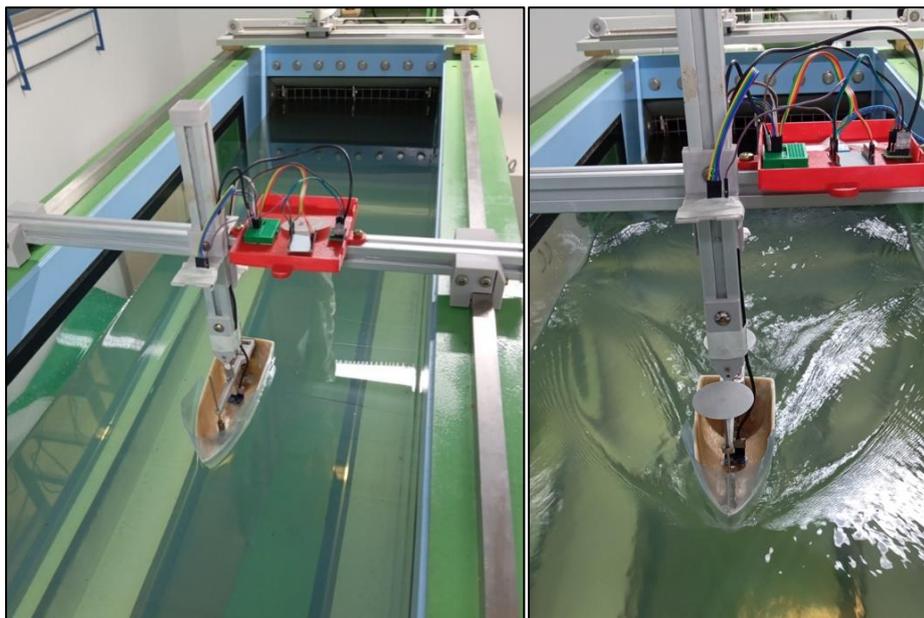
Figura 33 – Esquema de medição da resistência ao avanço do teste.



Fonte: Autor (2024).

Para a célula de carga, foi escolhida uma com precisão de 0,01g devido à pequena escala do modelo, conseqüentemente pequenos valores para a resistência ao avanço. Para a medição do movimento de cabeceio, foi montado um acelerômetro ou giroscópio no centro de gravidade do modelo para medir angulação de pitch e roll. Como esses movimentos são importantes na dinâmica do ensaio, também foi montado um sistema com dois sensores a laser na vertical fixos para medir a distância ao aparato acima da haste deslizante, na proa e na popa. Conforme a haste livre realiza o movimento de subida e descida o resultado altera sendo calculado o ângulo de pitch do modelo por meio de trigonometria.

Figura 34 – Imagem da aparelhagem dos testes.

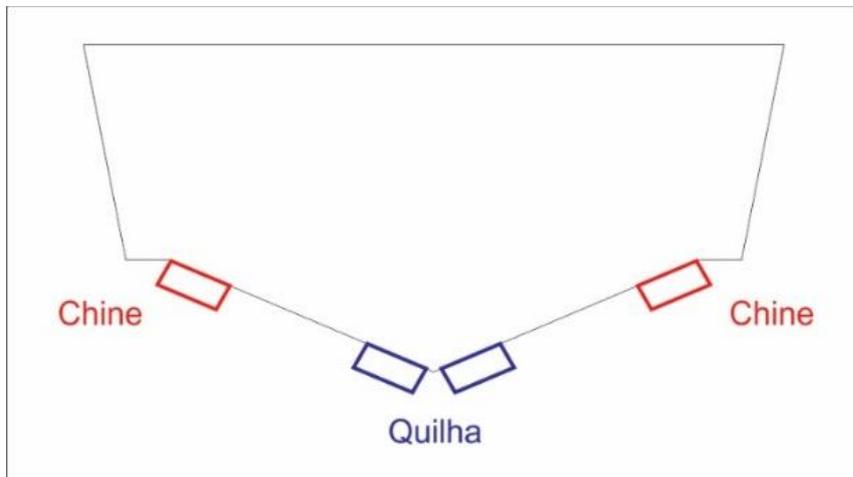


Fonte: Autor (2024).

Foi utilizado os equipamentos já existentes no laboratório como ponto de partida e incrementou-se com mais equipamentos eletrônicos e codificação em Python para armazenar os dados simultâneos de força e angulação, Figura 34. Os testes foram realizados na faixa de 0,5 à 1,2 m/s em intervalos de 0,1 m/s. Em cada velocidade foi montado uma base de dados do início até a estabilização da velocidade, o qual foram utilizados os dados no regime estável para calcular os dados estatísticos, como média, variância e desvio padrão. Montado o cenário dos testes, foi realizado os testes da seguinte maneira;

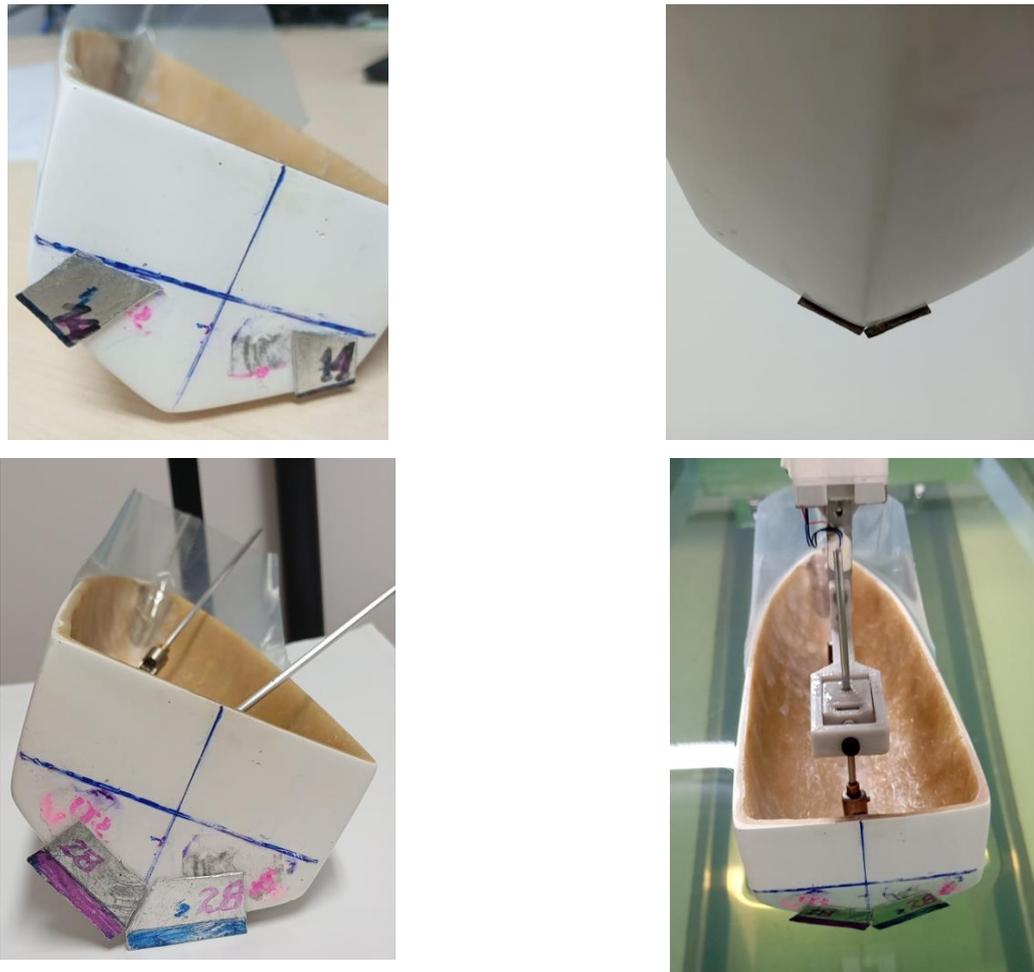
Com intuito de entender sobre os principais parâmetros que influenciam na geometria do interceptor, foram atribuídos duas variáveis para ser analisados os resultados dos testes. As variáveis definidas foram a área frontal ao escoamento ( $A_f$ ) e a posição em relação à linha d'água ( $h$ ). Para a área foi escolhido um design de interceptor com largura de 14mm e 28mm os dois com profundidade ( $p$ ) de 1mm, Figura 36. A em relação à linha d'água foi escolhida ao lado do chine e na quilha, conforme imagens abaixo:

Figura 35 – Figura de identificação das duas posições de altura do interceptor.



Fonte: Autor (2024).

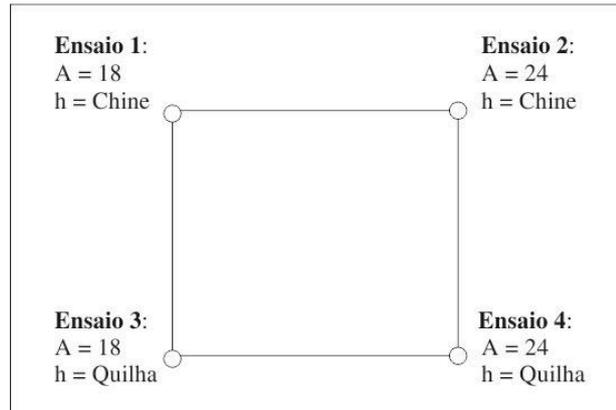
Figura 36 – Configurações de montagem do interceptors.



Fonte: Autor (2024).

Assim, temos 2 variáveis, Área ( $A$ ) e Posição ( $h$ ), cada uma com dois fatores, que, utilizando do conceito de experimento fatorial completo, foi realizado o planejamento dos testes a serem utilizados de maneira a ter o entrelaçamento de todos os fatores definidos. Assim foi definido:

Figura 37 – Configuração de ensaios seguindo experimento fatorial



Fonte: Autor (2024).

Tendo sido feito o planejamento do experimento, foram realizados os ensaios conforme as configurações acima. No ensaio, foram armazenados os dados de força e ângulo de Pitch numa série temporal para uma faixa de velocidade de 0,5 até 1,2 m/s, com incremento de 0,1 m/s em cada ensaio, como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Intervalo de velocidades dos ensaios.

Ensaio	Velocidade (m/s)	Fr
1	0,5	0,3
2	0,6	0,4
3	0,7	0,5
4	0,8	0,5
5	0,9	0,6
6	1,0	0,6
7	1,1	0,7
8	1,2	0,8

Fonte: Autor (2024).

Na execução dos testes ocorreu a entrada de água pela proa para as velocidades baixas, onde a crista da onda solidária se encontra na proa. Como resolução foi estendido o casco na proa com superfície plástica e o problema foi resolvido. Entretanto com as maiores velocidades do escoamento o problema voltou a ocorrer na região do costado, e a mesma solução foi aplicada para prevenir a entrada de água. Porém, com velocidades acima de 1,2 m/s o spray d'água decorrente do planeio adentrava para dentro do modelo, restringindo a velocidade máxima para 1,2 m/s.

## 6 RESULTADOS

Para cada velocidade do escoamento do canal de água foi realizado armazenamento de dados em série temporal, para esse conjunto de dados foi assumido somente os dados quando o regime ficou estável, sem grandes variações. A partir desse filtro, foi retirado a média e o desvio padrão desse conjunto de dados para cada ensaio em cada faixa de velocidade antes relatado.

A partir da média em cada velocidade foi criado uma tabela contendo todos os conjuntos de dados para cada configuração de ensaio, um exemplo está demonstrado na Tabela 7 abaixo. A tabela completa de todos os ensaios pode ser vista no APÊNDICE .

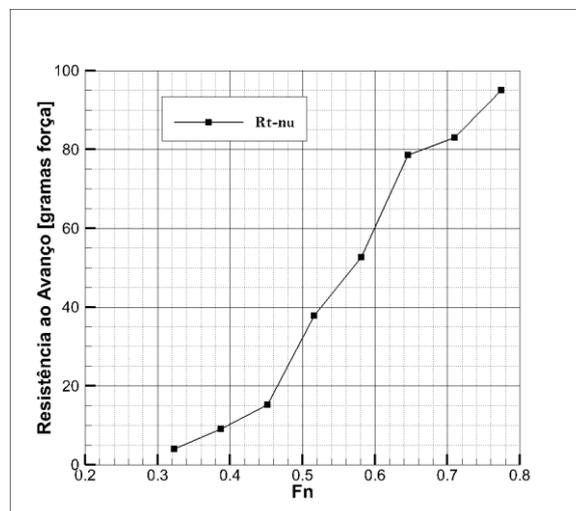
Tabela 7 – Tabela resumo de dados do ensaio com interceptor área 14 no chine.

Velocidade (M/S)	Posição Do Interceptor	Fn	Rv (g)	Dvp Massa	Roll	Dvp Roll	Pitch	Dvp Pitch
0,5	Chine	0,32	4,54	0,23	-4,58	0,22	1,99	0,42
0,6	Chine	0,39	8,65	0,35	-4,27	0,21	2,43	0,29
0,7	Chine	0,45	12,875	0,40	-3,445	0,25	3,17	0,24
0,8	Chine	0,52	25,59	0,92	-1,54	0,23	5,79	0,34
0,9	Chine	0,58	52,48	0,43	-2,1	0,26	4,81	0,26
1,0	Chine	0,65	63,905	1,59	2	0,51	6,47	0,29
1,1	Chine	0,71	72,81	2,06	1,4	0,40	6,72	0,38
1,2	Chine	0,77	72,55	4,08	0,14	0,42	4,97	0,51

Fonte: Autor (2024).

O comportamento da curva de resistência para o casco nu, Figura 38, é possível verificar que não foi alcançado o planeio totalmente desenvolvido, pois não é possível verificar uma diminuição do aumento da resistência, ponto este que evidencia a sustentação vencendo a barreira viscosa do escoamento.

Figura 38 – Gráfico resistência ao avanço do casco sem interceptors.

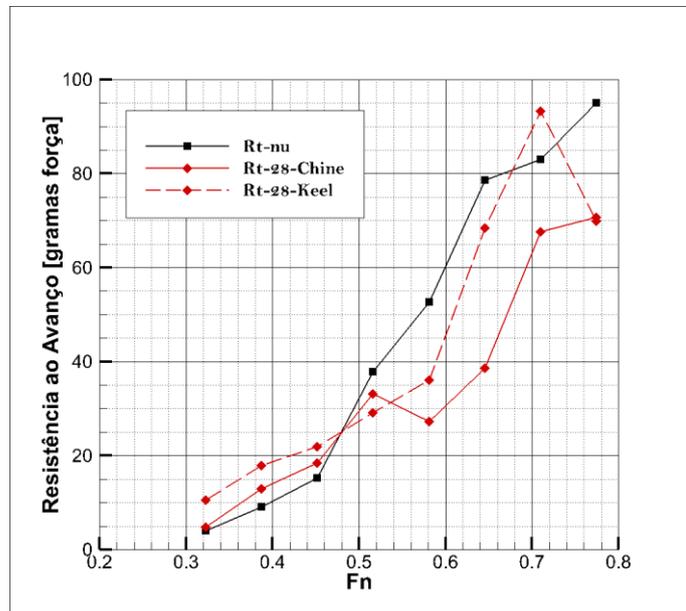


Fonte: Autor (2024).

Na Figura 39 é mostrado o gráfico da Resistência ao Avanço versus Número de Froude os resultados com os interceptors de área 28 na posição do chine e quilha, comparando com o casco sem interceptors. Além disso é verificado uma diminuição da resistência ao avanço com o uso do interceptors a partir de Froude igual a 0,52, quando o casco entra no regime de semi-planeio.

Nessa condição, a maior redução da resistência ao avanço é evidenciada para a posição do interceptor no chine, entre Froude 0,58 e 0,71. Nesse intervalo a redução alcança a máxima de 50% em  $Fr=0,65$  e diminui para 32% em  $Fr=0,72$ .

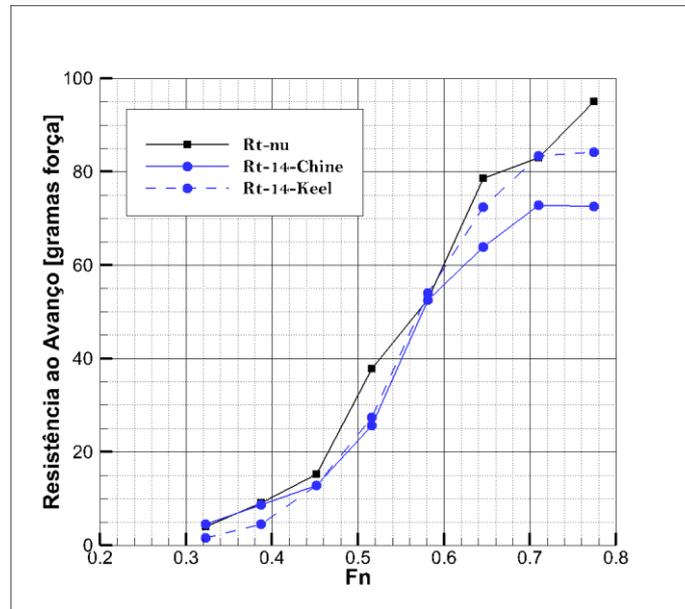
Figura 39 – Resistência ao avanço interceptors 28.



Fonte: Autor (2024).

Avaliando agora para interceptors de menor área, Figura 40, é possível verificar que o comportamento com os interceptors foi diferente, pois não ocorre uma diminuição substancial da resistência ao avanço se comparada ao casco nu nessa faixa de velocidades. Com o comportamento dos últimos dois valores percebe-se um início de uma caída na resistência ao avanço, o que induz que para essa configuração de interceptors e posição o ponto ótimo de diminuição da resistência ao avanço está em faixa de velocidades superiores ao ensaiado no trabalho, ou seja, Froude maior do que 0,77.

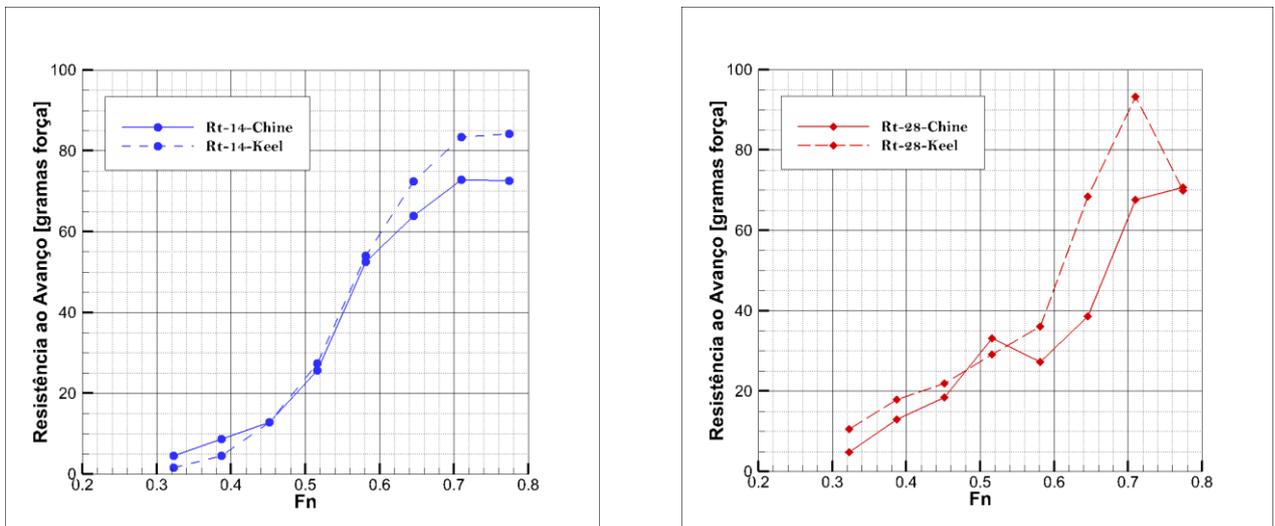
Figura 40 – Resistência ao avanço interceptors 14.



Fonte: Autor (2024).

Para a faixa de velocidades na condição de teste com os interceptors de área 14, o melhor resultado alcançou uma redução de 26% em 0,77 Fr. Dessa forma, sendo menos eficiente que a posição dos interceptors no chine, que obteve redução de 50% em 0,65 Fr.

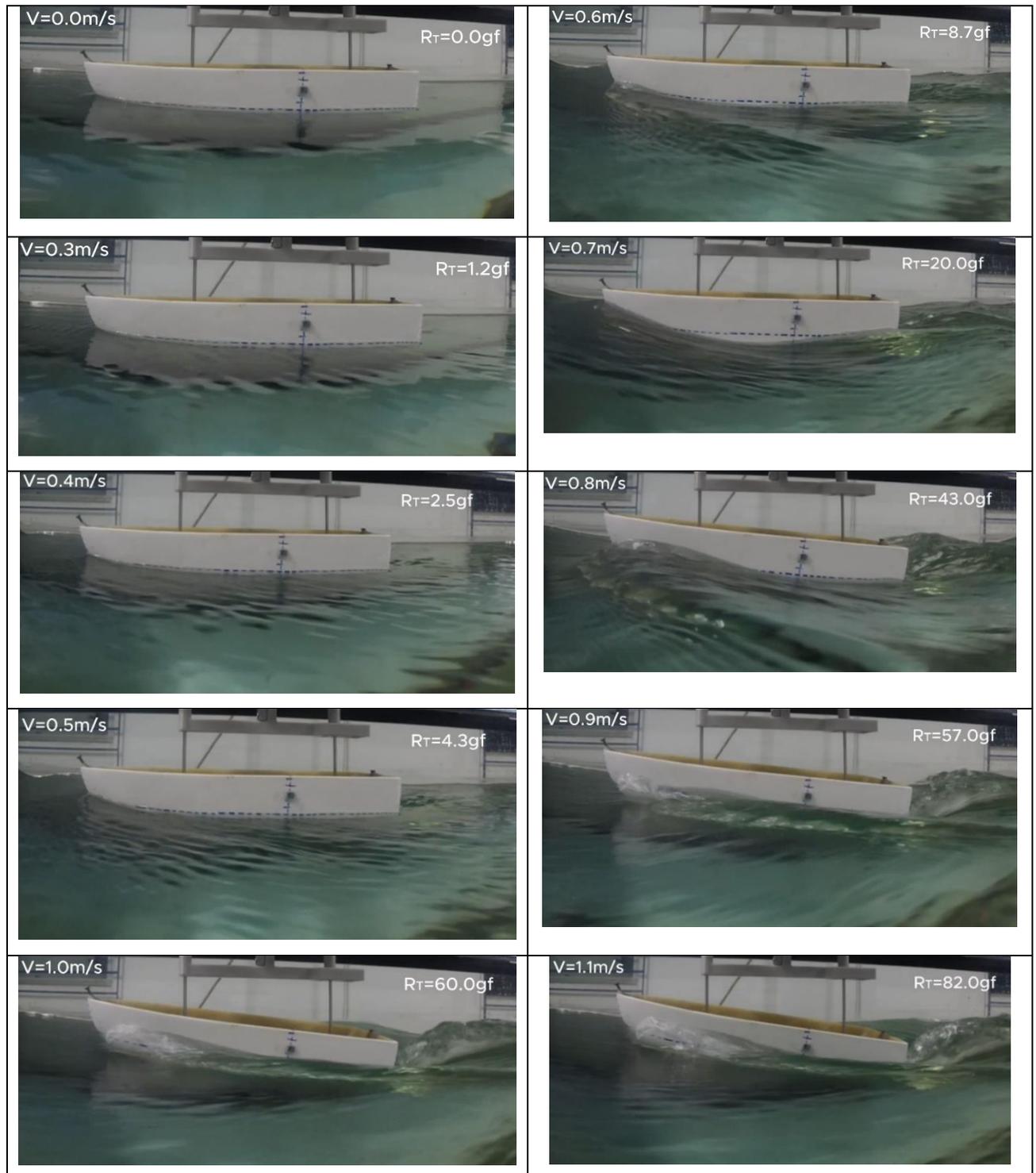
Figura 41 – Gráficos comparativos do efeito de área do interceptor.



Fonte: Autor (2024).

Nos gráficos da Figura 41, é visualizado que o efeito de aumento da pressão hidrostática pelo aumento da coluna d'água no interceptor não resulta na redução da resistência ao avanço. Isso comprova que no interceptor os efeitos dinâmicos contribuem mais do que o efeito hidrostático.

Figura 42 – Sequência do Ensaio de Resistência ao Avanço Casco Nu



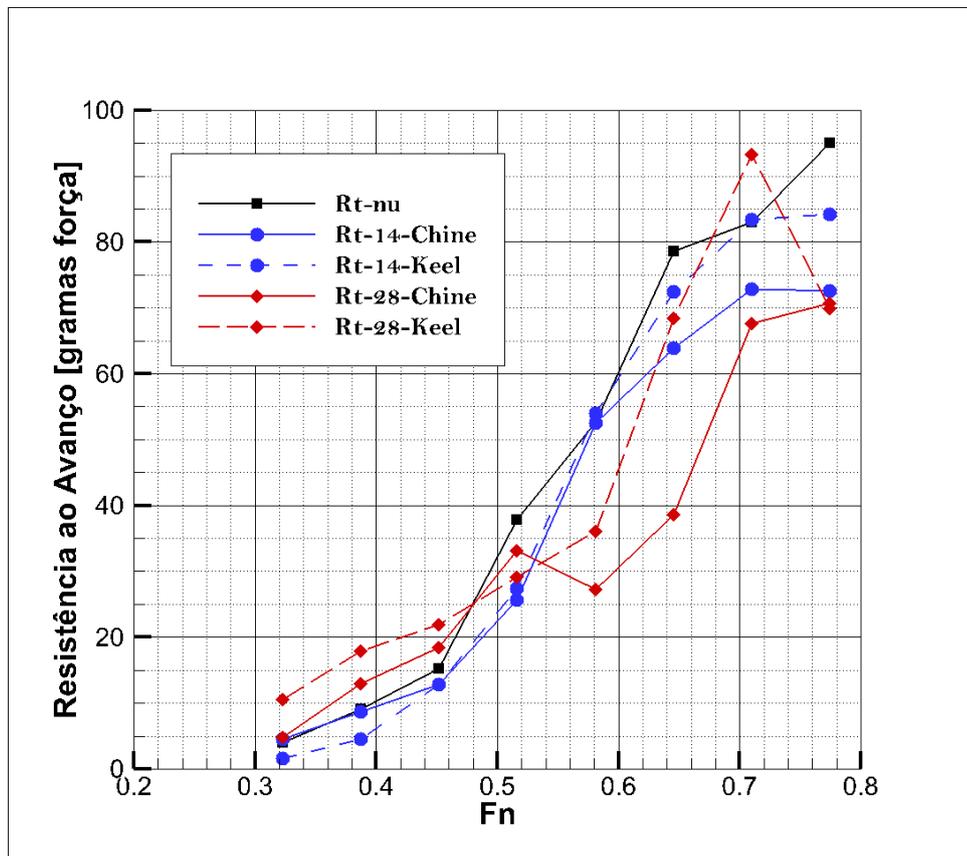
Fonte: Autor (2024).

Na sequência de imagens da Figura 42, é possível verificar que a partir de  $Fr=0,8$  o casco sem os interceptors continua sofrendo os efeitos de pressão viscosa do deslocamento e da onda de estagnação formada pelo casco. A partir de  $Fr=0,9$  já é possível perceber o levantamento do casco devido à fase inicial de planeio. Além disso, foi possível verificar a

existência de um remanso a montante do interceptor, como já identificado no estudo de (MANSOORI; FERNANDES, 2016).

Avaliando todas as condições em um único gráfico é possível realizar uma análise gráfica que a condição mais eficiente para o casco em estudo na faixa de velocidades estudada é a condição de Interceptor 28 na posição do Chine. Assim como é possível verificar que até Froude 0,5 os ensaios com interceptors 28 apresentam uma maior resistência ao avanço enquanto com interceptors 14 existe uma ligeira diminuição.

Figura 43 – Gráfico de todos os ensaios com as diferentes posições e área de interceptors.



Fonte: Autor (2024).

### 6.1. Análise Através de Experimento Fatorial

Para validarmos essa conclusão empírica, é realizado uma análise estatística descritiva dos dados. A primeira análise realizada é o teste de normalidade dos dados para evidenciar que os dados se ajustam a uma distribuição normal, assim sendo possível realizar as análises de experimento fatorial completo. O método para análise de normalidade é o método de Anderson-Darling e a verificação é através do valor de seus resíduos, expressados pelo P-Valor. Caso o P-Valor seja maior que 0,05 então os dados seguem uma distribuição normal.

Figura 44 – Teste normalidade Interceptor 14 Chine

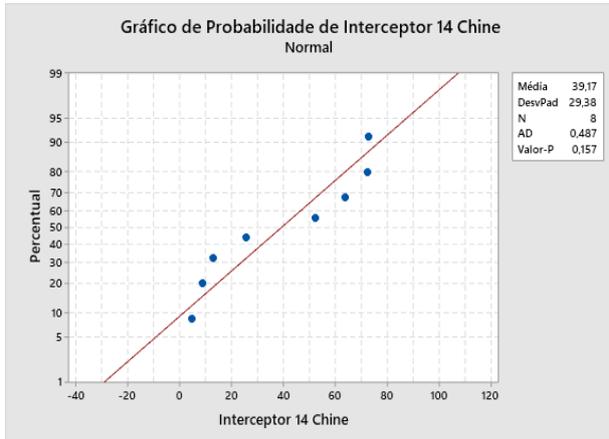


Figura 45 – Teste normalidade Interceptor 14 Quilha

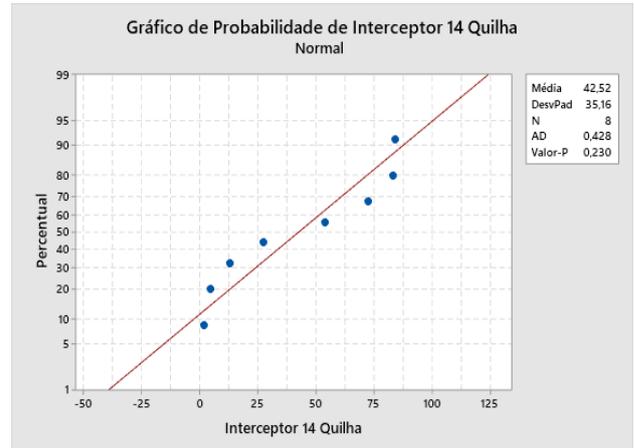


Figura 46 – Teste normalidade Interceptor 28 Chine

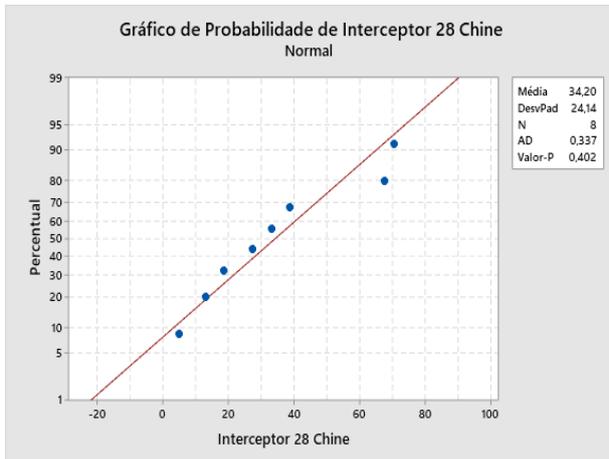
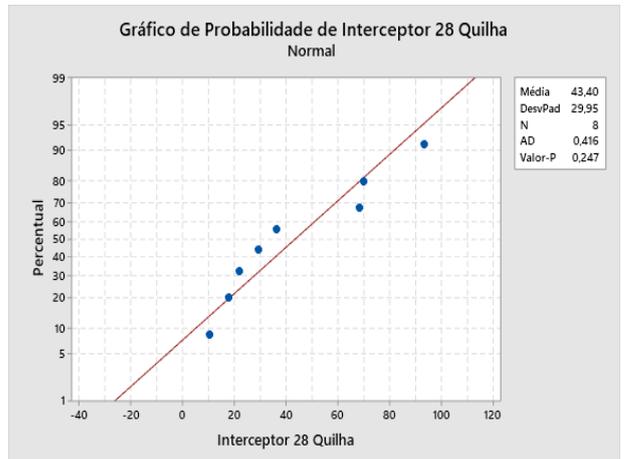


Figura 47 – Teste normalidade Interceptor 28 Quilha



Fonte: Autor (2024).

Como verificado nos gráficos acima, todos os dados se ajustam a uma distribuição normal por conta de seus P-Valores serem maior do que 0,05. Dessa forma, para realizar uma análise completa dos resultados nas avaliações dos fatores, é calculado a área do gráfico de resistência ao avanço para cada. Assim, os dados se resumem na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Área do Gráfico de Resistência ao Avanço por Condição de Ensaio

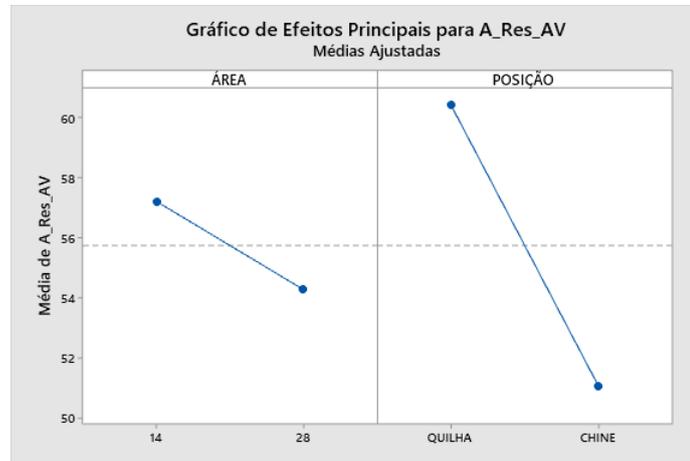
ÁREA INTERCEPTOR	POSIÇÃO	ÁREA RES. AV.
28	CHINE	47,2
28	QUILHA	61,4
14	CHINE	55,0
14	QUILHA	59,5

Fonte: Autor (2024).

Como na análise do experimento fatorial é necessário apenas um único valor para a interação, foi calculado a potência ou energia média de cada condição. Dessa forma, realizando a interação dos efeitos principais para a resposta, a Figura 48 demonstra que: quanto maior a

área e posição mais próxima da linha d'água mais será eficiente o interceptor no efeito de diminuição da resistência ao avanço.

Figura 48 – Gráfico de Efeitos Principais do Experimento Fatorial



Fonte: Autor (2024).

Ou seja, com a abordagem do método de experimento fatorial completo, também é constatado que o melhor consumo energético é para a condição com interceptor 28 na posição do chine, como retratado na Figura 49 abaixo:

Figura 49 – Gráfico de Cubo para Área Resistência ao Avanço nas Condições do Experimento



Fonte: Autor (2024).

## 7 CONCLUSÕES

O estudo do comportamento de uma EAV abrange vários efeitos dinâmicos e hidrostáticos com os quais ainda são difíceis de realizar a predição em softwares de cálculos numéricos. Por isso, o teste em tanques de provas com modelos em escala reduzidas ainda é o método mais eficaz de entender a hidrodinâmica de embarcações.

Neste presente trabalho foi possível estabelecer um vasto estudo acerca da dinâmica de uma embarcação de alta velocidade e os apêndices hidrodinâmicos, com foco nos interceptors. Isso permitiu a compreensão do uso do interceptor como solução de problemas de cabeceios e sua influência no aumento da sustentação e diminuição da resistência ao avanço de uma EAV.

Os resultados surpreenderam ao constatar que a maior eficiência de interceptors está na posição mais próxima da linha d'água, chegando a máxima redução em relação ao casco nu em Froude igual a 0,65, com uma redução de 50%. Nessa mesma velocidade foi percebido a redução do ângulo de trim do modelo, o que evidencia a atuação do interceptor como causador do aumento da pressão dinâmica no fundo do casco sem grande aumento do arrasto, como também verificado em (MANSOORI; FERNANDES, 2016).

A metodologia estatística utilizada baseada em experimentos fatoriais completos também contribuiu para a compreensão de como os fatores de posição em relação a linha d'água e a área do interceptors influenciam para a redução da resistência ao avanço, se mostrando uma ferramenta consistente para experimentos hidrodinâmicos em tanques de testes.

O desenvolvimento no trabalho acerca da metodologia de construção em fibra de vidro empregada contribuiu com detalhes construtivos práticos para ser repassado os pormenores da fabricação de moldes e peças em fibra de vidro. Foi escolhido o método de *strip planking* por ser o mais difundido em estaleiros de lanchas no Brasil, auxiliando no conhecimento na área de compósitos náutico ainda pouca difundida na literatura acadêmica.

A limitação encontrada foi o limite de velocidade do escoamento no canal de água devido ao ingresso de água no protótipo, sendo assim mantido como limite a velocidade de 1,2 m/s mesmo que o limite da máquina seja de 1,5 m/s. Dessa forma, a faixa de velocidades no modelo em escala não ultrapassou Froude maior que 0,8, portanto, não foi possível averiguar o regime de pleno planeio, ficando o estudo baseado no regime de pré-planeio até o semi-planeio. A condição inicial de teste com ângulo de *roll* de 4° pode ter interferido nos resultados obtidos por se tratar de um modelo de escala reduzida.

Para futuros trabalhos que continuem o estudo do modelo em questão, os testes em um tanque de provas de maior capacidade de velocidade de escoamento permitiria abranger o

estudo para o regime de planeio totalmente desenvolvido, até estudar o limite de tamanhos para áreas e posição do interceptor. Além disso, mais um fator pode ser estudado na eficiência do interceptor, a inclinação da chapa do interceptor em relação ao espelho de popa.

Embora as limitações encontradas no estudo, o resultado inesperado do interceptor ser mais eficiente mais próximo da linha d'água permite um novo incremento do estado da arte acerca do tema e abre novas oportunidades de estudos nesse caminho para melhor entendimento acerca desse apêndice hidrodinâmico ainda pouco utilizado em projetos navais.

## REFERÊNCIAS

- ALMETER, J. M. Resistance prediction of planing hulls: state of the art. **Marine Technology and SNAME News**, v. 30, n. 4, p. 297–307, 1993.
- ANJOS, A. DOS. Curso Planejamento de Experimentos I. **Universidade Federal Do Paraná**, p. 1–98, 2005.
- ANNISA, S. **HYDRODYNAMICS OF INTERCEPTOR ON PLANING BOATS**. [s.l.] UFRJ, 2015.
- BLOUNT, D. L.; FOX, D. L. Small-Craft Power Prediction. **Marine technology**, v. 13, n. 1, p. 14–45, 1976.
- CARPINETTI, R, L. C. Planejamento E Análise De Experimentos. **Apostila EESC-USP**, 2009.
- CELIS, M. **Notas de aula Hidrodinâmica 3**. 2020
- CUNICO, M. W. M. M. et al. Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Visão**, v. 1, 2008.
- CUSANELLI, D.; KARAFIATH, G. **Integrated wedge-flap for enhanced powering performance**. Proceedings of 4th International Conference on Fast Sea Transportation, Sydney, Australia. **Anais...**1997
- DAY, A. H.; COOPER, C. An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts. **Ocean Engineering**, v. 38, n. 8–9, p. 983–994, 2011.
- FRIDSMA, G. **A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats**. New Jersey: [s.n.].
- GRAND VIEW RESEARCH, G. **Yacht Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2021-2028**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/yacht-market>>. Acesso em: 11 dez. 2021.
- HARVALD, S. A. **harvald-resistance-and-propulsion-of-ships.pdf**New YorkJohn Wiley & Sons, , 1983.
- HAUCHARD, S. **Peinture de la carène, et pose de l'arbre d'hélice sur la MT9 pour le LAMANAGE de ROUEN ( plan Archi-delion )**. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/company/sas-hauchard/posts/?feedView=all>>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- HUGHES, G. 1954. Friction and form resistance in turbulent flow, and a proposed formulation for use in model and ship correlation. **Transactions of the Intitution of Naval Architects**, v. 96, p. 314, 1954.
- ITTC. **Eighth International Towing Tank Conference**. El Pardo, Madrid: Canal de Experiencias Hidrodinamicas, 1959
- ITTC. **15th International Towing Tank Conference**. Hague: 1978
- JUDGE, C. et al. Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull—Part I: Calm water. **Applied Ocean Research**, v. 96, p. 102060, 2020.
- KARIMI, M. H.; SEIF, M. S.; ABBASPOOR, M. A study on vertical motions of high-speed

planing boats with automatically controlled stern interceptors in calm water and head waves. **Ships and Offshore Structures**, v. 10, n. 3, p. 335–348, 2015.

KIM, D. J. et al. Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 5, n. 1, p. 161–177, 2013.

MANSOORI, M.; FERNANDES, A. C. The interceptor hydrodynamic analysis for controlling the porpoising instability in high speed crafts. **Applied Ocean Research**, v. 57, p. 40–51, 2016.

MOLCHANOV, B. et al. Experimental validation of spray deflectors for high speed craft. **Ocean Engineering**, v. 191, p. 106–482, 2019.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments Eighth Edition**. [s.l.: s.n.].

MORRALL, A. **1957 ITTC Model-ship Correlation Line Values of Frictional Resistance Coefficient**. [s.l.] National Physical Laboratory, Ship Division, 1970.

NASSEH, J. **Manual de Construção de Barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced, 2011.

OPRIME, P. C.; PUREZA, V. M. M.; DE OLIVEIRA, S. C. Systematic sequencing of factorial experiments as an alternative to the random order. **Gestao e Producao**, v. 24, n. 1, p. 108–122, 2017.

PARK, J. Y. et al. An experimental study on vertical motion control of a high-speed planing vessel using a controllable interceptor in waves. **Ocean Engineering**, v. 173, n. 1, p. 841–850, 2019.

PROHASKA, C. W. A Contribution to the Design of Service Adapted Propellers. **Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland**, v. 1410, p. 121, 1977.

SAVITSKY, D. Hydrodynamic Design of Planing Hulls. **Marine Technology and SNAME News**, v. 1, n. 04, p. 71–95, 1964.

SEOK, W.; PARK, S. Y.; RHEE, S. H. An experimental study on the stern bottom pressure distribution of a high-speed planing vessel with and without interceptors. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 12, p. 691–698, 2020.

SHTESSEL, Y. B.; SHKOLNIKOV, I. A.; LEVANT, A. Guidance and Control of Missile Interceptor using Second-Order Sliding Modes. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 45, n. 1, p. 110–124, 2009.

TSAI, J. F.; HWANG, J. L. **Study on the compound effects of interceptor with stern flap for two fast monohulls**. Ocean '04 - MTS/IEEE Techno-Ocean '04: Bridges across the Oceans. **Anais...Basin**: 2004

UNGARETTI, G. **Um papo náutico com o presidente da Acobar, Eduardo Columna**. Disponível em: <<https://www.nautica.com.br/presidente-da-acobar-eduardo-columna/>>. Acesso em: 19 dez. 2021.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. New York: The McGraw-Hill Companies,

2011.

## APÊNDICE A

CONFIG. INTERCEP.	VELOCIDADE (m/s)	Posição do Interceptor	FrN	RV (g)	DVP Massa	Roll	DVP Roll	Pitch	DVP Pitch	Distancia 1	DiVP Dist 1	Distancia 2	DVP Dist 2
INTERCEPTOR 14	0,5	Chine	0,32	4,54	0,23	-4,58	0,22	1,99	0,42	207	2,61	132	2,22
INTERCEPTOR 14	0,6	Chine	0,39	8,65	0,35	-4,27	0,21	2,43	0,29	208	2,13	134	4,60
INTERCEPTOR 14	0,7	Chine	0,45	12,875	0,40	-3,445	0,25	3,17	0,24	209	2,19	131	1,93
INTERCEPTOR 14	0,8	Chine	0,52	25,59	0,92	-1,54	0,23	5,79	0,34	212	2,23	136	1,64
INTERCEPTOR 14	0,9	Chine	0,58	52,48	0,43	-2,1	0,26	4,81	0,26	209	2,34	138	1,90
INTERCEPTOR 14	1,0	Chine	0,65	63,905	1,59	2	0,51	6,47	0,29	210	2,40	139	1,73
INTERCEPTOR 14	1,1	Chine	0,71	72,81	2,06	1,4	0,40	6,72	0,38	206	2,51	137	1,89
INTERCEPTOR 14	1,2	Chine	0,77	72,55	4,08	0,14	0,42	4,97	0,51	205	2,44	132	2,15
INTERCEPTOR 28	0,5	Chine	0,32	4,83	0,27	2,88	0,20	5,255	0,31	200	2,26	104,5	1,70
INTERCEPTOR 28	0,6	Chine	0,39	13	0,30	2,56	0,20	5,04	0,32	198	2,28	106	1,72
INTERCEPTOR 28	0,7	Chine	0,45	18,44	0,35	2,74	0,22	6,16	0,40	199	2,23	109	1,74
INTERCEPTOR 28	0,8	Chine	0,52	33,1	2,52	2,99	0,41	7,43	0,55	200	2,07	117	3,49
INTERCEPTOR 28	0,9	Chine	0,58	27,24	0,82	2,32	0,27	1,25	0,44	197	2,11	114	1,94
INTERCEPTOR 28	1,0	Chine	0,65	38,635	2,68	2,68	0,42	12,235	0,86	208	2,58	128	2,05
INTERCEPTOR 28	1,1	Chine	0,71	67,665	1,44	2,91	0,38	10,995	0,44	209	2,33	135	1,74
INTERCEPTOR 28	1,2	Chine	0,77	70,66	3,32	3,56	0,44	8,32	0,51	209	2,36	126	1,75
Casco Nu	0,5	-	0,32	3,94	0,17	-4,4	0,46	-0,07	0,30	65	2,31	92	1,73
Casco Nu	0,6		0,39	9,04	0,24	-3,88	0,18	0,35	0,22	67	2,09	97	1,78
Casco Nu	0,7		0,45	15,24	0,85	-3,31	0,21	1,435	0,23	62	2,62	99	1,70
Casco Nu	0,8		0,52	37,87	1,56	-2,55	0,22	2,185	0,25	66	2,16	102	1,74
Casco Nu	0,9		0,58	52,63	0,79	-2,26	0,26	2,84	0,26	69	1,95	96	2,12
Casco Nu	1,0		0,65	78,52	1,35	-0,75	0,32	4,47	0,28	70	1,84	100	1,95
Casco Nu	1,1		0,71	82,935	0,76	-0,54	0,36	5,92	0,29	58	2,12	93	1,93
Casco Nu	1,2		0,77	95,07	1,23	-0,46	0,33	2,4	0,33	60	2,11	89	3,03
INTERCEPTOR 14	0,5	Quilha	0,32	1,6	0,32	-1,71	0,25	2,55	0,41	209	2,36	126	1,75
INTERCEPTOR 14	0,6	Quilha	0,39	4,55	0,47	-2,14	0,39	0,7	1,12	213	2,36	142	2,83
INTERCEPTOR 14	0,7	Quilha	0,45	12,79	0,31	-2,66	0,23	6,59	0,25	203	2,06	135	2,32
INTERCEPTOR 14	0,8	Quilha	0,52	27,38	0,70	-2,7	0,25	6,58	0,27	204	2,35	133	1,65
INTERCEPTOR 14	0,9	Quilha	0,58	53,96	1,05	-2,79	0,78	6,48	1,74	203	2,33	137	1,66
INTERCEPTOR 14	1,0	Quilha	0,65	72,38	1,45	-2,89	8,76	6,66	2,79	203	1,97	139	1,59
INTERCEPTOR 14	1,1	Quilha	0,71	83,37	0,91	-3,11	0,41	7,33	0,73	203	2,14	141	2,11
INTERCEPTOR 14	1,2	Quilha	0,77	84,14	1,59	-3,04	7,21	7,26	2,33	203	2,18	142	1,90
INTERCEPTOR 28	0,5	Quilha	0,32	10,54	0,23	1,99	0,20	3,59	0,26	202	2,42	124	1,77
INTERCEPTOR 28	0,6	Quilha	0,39	17,85	0,28	2	0,21	4,82	0,32	203	2,25	124	1,52
INTERCEPTOR 28	0,7	Quilha	0,45	21,87	0,39	1,9	0,24	4,73	0,39	203	2,40	126	1,91
INTERCEPTOR 28	0,8	Quilha	0,52	29,15	1,81	2,19	0,29	3,46	0,48	205	1,93	123	1,88
INTERCEPTOR 28	0,9	Quilha	0,58	36,1	0,51	2,29	0,29	2,34	0,42	205	2,55	123	1,65
INTERCEPTOR 28	1,0	Quilha	0,65	68,42	0,86	3,42	0,29	1,705	0,45	204	2,27	133	2,02
INTERCEPTOR 28	1,1	Quilha	0,71	93,35	2,10	4,715	0,44	2,85	0,53	209	2,34	132	1,74
INTERCEPTOR 28	1,2	Quilha	0,77	69,95	1,28	2,82	0,39	3,42	0,67	204	1,98	130	1,93