

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
ENGENHARIA NAVAL

SAMRA AMIR BAHMAD

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM MODELO DE EMBARCAÇÃO  
ITTC COM BASE EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL

Joinville  
2025

SAMRA AMIR BAHMAD

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM MODELO DE EMBARCAÇÃO  
ITTC COM BASE EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL

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

Orientador(a): André Luís Condino Fugarra

Coorientador(a): Fernanda Hille

Joinville

2025

SAMRA AMIR BAHMAD

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM MODELO DE EMBARCAÇÃO  
ITTC COM BASE EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL

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

Joinville (SC), 28 de novembro de 2025.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. André Luis Condino Fugarra  
Orientador

---

Prof. Dr. Lucas Weihmann  
Membro  
UFSC

---

Eng. Naval Hugo Lückmann Vidal  
Membro  
UFSC

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Bahmad, Samra Amir

Avaliação da Resistência ao Avanço de um Modelo de Embarcação ITTC com Base em Ensaios Experimentais e Simulação Computacional / Samra Amir Bahmad ; orientador, André Luis Condino Fugarra, coorientador, Fernanda Hille, 2025.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Resistência ao Avanço. 3. Ensaios Experimentais. 4. CFD. 5. Análise Comparativa. I. Fugarra, André Luis Condino. II. Hille, Fernanda. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. IV. Título.

À quem me ensinou a contar nos dedos, e que gostaria de folhear cada página desse trabalho que me torna Engenheira: meu vovô Ismael (in memoriam).

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem o privilégio de ter sido construído graças às muitas pessoas que me apoiaram ao longo da minha trajetória. Ele é reflexo do amor que vivi com cada um que compartilhou comigo as dores e as alegrias do cotidiano que ditam a vida.

Não poderia deixar de iniciar os agradecimentos pelo meu alicerce: minha família. Vovô, sei que deve estar vibrando por mim com a existência deste trabalho. Tive a sorte de viver o seu amor e de aprender, nas suas mãos, a contar os números que sucedem o dez. Te amarei para sempre. Vovó, meu grande amor, a vida é mesmo um oito invertido, cheio de altos e baixos. Sorte a minha ter você para me guiar em todas as fases dela. Te amo mais do que você deve imaginar.

À minha mãe, que me ensinou que as mulheres podem ocupar qualquer lugar com garra e competência e que me ofereceu todo o amor que conheço: você não imagina o quão difícil é escrever sobre você sem que meus olhos se encham de lágrimas. Papai, tenho a imensa sorte de ter o seu exemplo, sua paixão por tudo o que faz e, acima de tudo, sua confiança em mim. Tenho a sorte, como se não fosse suficiente, de viver a vida sendo filha de vocês.

Aos meus irmãos, Jade, minha melhor amiga e Rayan, meu caçulinha, vocês despertam o melhor de mim, ganhei na loteria da vida quando vocês vieram ao mundo, é um privilégio ter crescido com o amor de vocês. Aos meus primos, Pedro e Duda e minha tia Norma, guardo as minhas melhores memórias da infância ao lado de vocês, obrigada por cuidarem de mim com tanto amor.

Ao meu parceiro de vida, Pedro, sou grata pelo seu amor e sua presença na minha vida. Você mais do que ninguém sabe como foi essa trajetória até aqui, cheia de pedras no caminho. Obrigada por me ajudar a desviar de todas elas. Eliane, Gelson e Sabrina, obrigada por me acolherem no lar de vocês com tanto carinho, sempre.

Dos amigos que a vida me deu, agradeço de coração ao meu melhor amigo, Vitor Trigo. A distância nunca foi capaz de enfraquecer nossa amizade; quando penso em casa, penso em você. Obrigada por ser presença constante.

A UFSC me presenteou com pessoas que transformaram esta caminhada em momentos leves e inesquecíveis. Abigail, Bruno Erzinger, Mateus, Karen, Lídia, Madu, Julinha, João Jawarski, João Flores, Guilherme Müller e Zortéa: cada lembrança ao lado de vocês, guardarei para sempre, vocês fizeram cada desafio parecer mais leve. Aos colegas do LIFE, em especial Gabriel, Eduardo e Rafael, meu sincero agradecimento por todo o suporte, incentivo e companheirismo que tornaram esta jornada ainda mais especial.

Fui ainda agraciada no mercado de trabalho ao ter o privilégio de fazer parte

do Estaleiro NAVSHIP. David Munaretto e Hugo Vidal, muito do que conquistei até aqui só foi possível graças ao apoio e a confiança de vocês em mim, espero que saibam a magnitude da minha gratidão a tudo o que pude viver nesses últimos dois anos de casa. Caio, Francisca, Gabriel e Galdino, obrigada por me permitirem crescer, errar e aprender, vocês foram essenciais nessa jornada.

A todos os colegas de trabalho da Engenharia com quem compartilhei parte da minha trajetória, em especial Ronan, Jana, Marlon, Christian, Cleudiani, Sandro, Jéssica, Aninha, Bombinha e Samuel, que se tornaram amigos que a vida me presenteou, sou grata por nossos caminhos terem se cruzado. Fernanda Hille, minha inspiração, obrigada por aceitar o convite para me coorientar e por ser essa grande amiga. Amo aprender com você.

Aos membros do IPT de São Paulo, em especial, André Kogishi, esse trabalho só tem a magnitude pelos dias de trabalho e o acolhimento que tive nesse Instituto tão importante. Foi a realização de um sonho, obrigada por me auxiliar com toda a competência e dedicação para realizar os ensaios.

Para concluir estes agradecimentos, com a relevância merecida, expresso minha gratidão ao Professor Fajarra que desde a primeira aula me cativou com a paixão pela sala de aula, pela sua empatia e pelo seu conhecimento. A educação transforma, e é com muito orgulho que me formo como sua aluna. Nada disso seria possível sem o seu apoio e sua confiança em mim para a realização deste trabalho. Meu mais profundo agradecimento é a você.

*“ O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. ”*

João Guimarães Rosa, Grande Sertão Veredas

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os ensaios de resistência ao avanço realizados no Canal de Água Circulante (CAC) do Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) e no Tanque de Reboque do IPT, utilizando como modelo o DTMB-LIFE, embarcação sugerida pela International Towing Tank Conference (ITTC) para investigações, aqui fabricado em escala reduzida por impressão 3D. A pesquisa busca verificar a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos no CAC do LIFE em relação a uma instalação de referência (o tanque de reboque do IPT), visando subsidiar futuras calibrações e aprimoramentos metodológicos. A relevância do estudo reside na possibilidade de consolidar o uso do canal como ferramenta experimental para avaliação hidrodinâmica de cascos, reduzindo custos e tempo de ensaio. A metodologia adotada compreendeu a realização de ensaios experimentais em águas calmas, complementados por simulações numéricas em CFD, com o objetivo de avaliar o comportamento do modelo e identificar eventuais fontes de divergência entre os métodos. Os resultados indicaram boa concordância entre os ensaios nas menores velocidades, enquanto nas maiores foram observadas diferenças atribuídas principalmente à geração e reflexão de ondas na superfície livre do canal, efeito esperado pela ausência de sistema de absorção, até o momento. A simulação numérica em CFD foi conduzida como estudo preliminar, permitindo estabelecer uma metodologia inicial de referência para futuras análises de correção do CAC com base em modelagem computacional.

**Palavra-chave:** Resistência ao avanço. Ensaios experimentais. DTMB-LIFE. CFD.

## ABSTRACT

This work presents a comparative analysis between the resistance tests carried out in the Circulating Water Channel (CAC) of the Fluid–Structure Interaction Laboratory (LIFE) and in the Towing Tank of IPT, using as a model the DTMB-LIFE, a hull form suggested by the International Towing Tank Conference (ITTC) for investigations, here manufactured at a reduced scale by 3D printing. The study seeks to verify the consistency and reliability of the results obtained in LIFE's CAC in relation to a reference facility (the IPT towing tank), aiming to support future calibrations and methodological improvements. The relevance of the study lies in the possibility of consolidating the use of the channel as an experimental tool for the hydrodynamic evaluation of hulls, reducing testing costs and time. The adopted methodology comprised the execution of calm-water experimental tests, complemented by numerical CFD simulations, with the objective of evaluating the behavior of the model and identifying possible sources of divergence between the methods. The results indicated good agreement between the tests at the lower velocities, while at the higher ones differences were observed, attributed mainly to the generation and reflection of free-surface waves in the channel, an expected effect due to the absence, so far, of a wave-absorption system. The numerical CFD simulation was conducted as a preliminary study, allowing the establishment of an initial reference methodology for future CAC correction analyses based on computational modeling.

**Keywords:** Resistance. Experimental tests. DTMB-LIFE. CFD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tanque de Provas de Reboque do IPT . . . . .	18
Figura 2 – Decomposição da Resistência ao Avanço . . . . .	21
Figura 3 – Comparação entre regressões para estimativa do coeficiente de fricção . . . . .	23
Figura 4 – Padrão de geração de ondas de uma embarcação . . . . .	25
Figura 5 – Pressão simétrica ao longo do casco em fluido invíscido . . . . .	26
Figura 6 – Método da extrapolação de Froude . . . . .	28
Figura 7 – Arranjo típico de ensaio de reboque . . . . .	30
Figura 8 – Canal de Água Circulante do LIFE . . . . .	32
Figura 9 – Ilustração do tratamento da turbulência em modelos baseados em RANS. . . . .	36
Figura 10 – Etapas da simulação CFD . . . . .	38
Figura 11 – Montagem do modelo DTMB-LIFE no Laboratório LIFE/UFSC . . . . .	41
Figura 12 – Distribuição de lastro e pesos atribuídos . . . . .	43
Figura 13 – Tanque de Reboque - IPT . . . . .	44
Figura 14 – Configuração do Carro de Reboque . . . . .	45
Figura 15 – Configuração dos Braços de Suporte Verticais . . . . .	45
Figura 16 – Braço articulado de ligação entre modelo e carro de reboque . . . . .	46
Figura 17 – Guia regulável do fio de tração . . . . .	47
Figura 18 – Célula de Carga . . . . .	47
Figura 19 – Configuração do monitoramento óptico . . . . .	48
Figura 20 – Alvos posicionados no modelo . . . . .	49
Figura 21 – Exemplo de procedimento realizado no tratamento de dados adquiridos. . . . .	50
Figura 22 – Geometria do modelo DTMB-LIFE e domínio computacional. . . . .	51
Figura 23 – Refinamento da malha na região do casco com <i>Body of Influence</i> . . . . .	52
Figura 24 – Refinamento da malha na região do casco. . . . .	53
Figura 25 – Detalhamento da malha na região de proa com camadas prismáticas. . . . .	54
Figura 26 – Detalhamento da malha na região próxima ao casco, com destaque para as camadas prismáticas ( <i>inflation layers</i> ). . . . .	55
Figura 27 – Comportamento dos resíduos ao longo das iterações da simulação transiente da Malha 1 para velocidade de 1.07m/s . . . . .	57
Figura 28 – Curvas de Resistência ao Avanço em diferentes ensaios . . . . .	60
Figura 29 – Curvas Experimentais e Numéricas de Resistência ao Avanço [gf x m/s]. . . . .	62
Figura 30 – Curvas Experimentais e Numéricas de Resistência ao Avanço [N x Fr] . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões principais do modelo DTMB-LIFE e da embarcação em escala real, fabricada pelo LIFE/UFSC. . . . .	41
Tabela 2 – Pesos Registrados no IPT . . . . .	42
Tabela 3 – Dimensões do tanque de reboque do IPT . . . . .	43
Tabela 4 – Condições da água durante os ensaios experimentais. . . . .	44
Tabela 5 – Velocidades utilizadas nos ensaios experimentais. . . . .	50
Tabela 6 – Configuração do domínio computacional para as simulações CFD. .	52
Tabela 7 – Indicadores de qualidade da malha gerada no <i>ANSYS Meshing</i> . . .	54
Tabela 8 – Resumo das condições de contorno e parâmetros físicos utilizados na simulação CFD. . . . .	56
Tabela 9 – Estudo de independência de malha: elementos e força de resistência total. . . . .	56
Tabela 10 – Resultados numéricos de resistência total para as velocidades simuladas. . . . .	61
Tabela 11 – Resultados dos Ensaios DTMB-LIFE do primeiro dia de ensaio. . .	70
Tabela 12 – Resultados dos Ensaios DTMB-LIFE do segundo dia de ensaio. . .	70
Tabela 13 – Coeficiente de resistência total para os ensaios no IPT e no CAC/LIFE.	71
Tabela 14 – Força de resistência total para os ensaios no IPT e no CAC/LIFE. .	71

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_W$	Área molhada do casco (m <sup>2</sup> )
$B$	Boca do navio (m)
$C_B$	Coeficiente de bloco
$C_F$	Coeficiente de resistência friccional
$C_{F,ITTC}$	Coeficiente friccional segundo a linha ITTC 1957
$C_M$	Coeficiente de área da seção mestra
$C_P$	Coeficiente prismático
$C_R$	Coeficiente de resistência residual
$C_T$	Coeficiente de resistência total
$\Delta$	Deslocamento da embarcação (t ou m <sup>3</sup> )
$Fr$	Número de Froude
$g$	Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$k$	Energia cinética turbulenta (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$k_s$	Rugosidade equivalente da superfície (m)
$L$	Comprimento característico do casco (m)
$\lambda$	Comprimento de onda (m)
$L_{PP}$	Comprimento entre perpendiculares (m)
$\sigma$	Fator de escala entre modelo e navio
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido (Pa·s)
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido (m <sup>2</sup> /s)
$1 + k$	Fator de forma do casco
$p$	Pressão estática (Pa)
$R_F$	Resistência friccional (N)
$R_R$	Resistência residual (N)
$R_T$	Resistência total ao avanço (N)
$R_{T,model}$	Resistência total medida no modelo (N)
$R_{T,ship}$	Resistência total estimada para o navio (N)
$Re$	Número de Reynolds
$\rho$	Massa específica do fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$T$	Calado (m)
$\tau_w$	Tensão de cisalhamento na parede (Pa)
$u_\tau$	Velocidade de atrito (m/s)
$V$	Velocidade do modelo ou embarcação (m/s)
$\mathbf{U}$	Vetor velocidade do escoamento (m/s)
$x$	Coordenada longitudinal (m)
$y$	Coordenada transversal (m)

$y^+$	Coordenada adimensional da primeira célula
$z$	Coordenada vertical (m)
$\omega$	Frequência específica da turbulência (1/s)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>18</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	FUNDAMENTOS DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	20
2.1.1	<b>Resistência de Fricção</b>	<b>21</b>
2.1.2	<b>Resistência de Ondas</b>	<b>23</b>
2.1.3	<b>Resistência Viscosa de Pressão</b>	<b>25</b>
2.2	MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO	26
2.2.1	<b>Ensaio em modelos reduzidos</b>	<b>27</b>
2.2.2	<b>Extrapolção de resultados de modelos para navios em escala real</b>	<b>28</b>
2.3	APLICAÇÃO EXPERIMENTAL	29
2.3.1	<b>Ensaio de Modelo Reduzido em Tanques de Reboque</b>	<b>29</b>
2.3.2	<b>Ensaio de Modelo Reduzido no Canal de Água Circulante do LIFE</b>	<b>30</b>
2.4	CFD APLICADA À RESISTÊNCIA AO AVANÇO	33
2.4.1	<b>Equações Governantes</b>	<b>33</b>
2.4.1.1	Equação da Conservação de Massa	34
2.4.1.2	Equação de Navier-Stokes	34
2.4.2	<b>Predição de Turbulência na Análise CFD</b>	<b>35</b>
2.4.3	<b>Simulação Numérica em CFD: Etapas e Aspectos Fundamentais</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL	40
3.2	ENSAIO EM TANQUE DE REBOQUE	43
3.2.1	<b>Aparelhagem e Instrumentação</b>	<b>44</b>
3.2.2	<b>Procedimento Experimental</b>	<b>49</b>
3.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA (CFD)	51
3.3.1	<b>Geometria</b>	<b>51</b>
3.3.2	<b>Discretização</b>	<b>52</b>
3.3.3	<b>Camadas Prismáticas</b>	<b>54</b>
3.3.4	<b>Condições de contorno e configuração física</b>	<b>55</b>
3.3.5	<b>Verificação e validação</b>	<b>56</b>
3.3.5.1	Convergência de Malha	56
3.3.5.2	Verificação Iterativa: Análise dos Resíduos	57

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>59</b>
4.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS . . . . .	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>64</b>
5.1	PERSPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	65
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO TAN- QUE DO IPT</b> . . . . .	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE B – TABELA DE DADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉ- RICOS DE RESISÊNCIA</b> . . . . .	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS DOS SINAIS DA CÉLULA DE CARGA DO ENSAIO REALIZADO NO IPT</b> . . . . .	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A resistência ao avanço de embarcações é um dos fatores determinantes do desempenho operacional, influenciando diretamente o consumo de combustível, a eficiência do sistema propulsor e a sustentabilidade econômica das operações marítimas. O estudo experimental da resistência em modelos reduzidos permite analisar com precisão o comportamento hidrodinâmico de cascos em mar calmo, fornecendo dados essenciais para o dimensionamento de embarcações, a validação de simulações numéricas e a extrapolação para escala real (Bertram, 2012). Nesse contexto, a utilização de métodos experimentais continua sendo uma das formas mais seguras de predição da resistência ao avanço, e, para tanto, faz-se necessária a realização de ensaios em instalações controladas, como tanques de reboque tradicionais e canais de água circulante, que permitem obter medições precisas do comportamento do modelo e calibrar novas instalações experimentais, garantindo a consistência e confiabilidade dos resultados.

Apesar das vantagens proporcionadas por instalações como o Canal de Água Circulante do Laboratório LIFE (CAC), sua confiabilidade na reprodução de ensaios de resistência ainda carece de avaliação sistemática. Embora o canal permita testes em escala reduzida e ofereça facilidade de operação a custos menores, é necessário verificar se os resultados obtidos são consistentes quando comparados a ensaios realizados em tanques de referência. Essa lacuna constitui o principal problema investigado neste trabalho: estabelecer a correspondência entre os dados obtidos no CAC do LIFE e os ensaios de referência, conduzidos no tanque de reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), garantindo que o canal possa ser utilizado com segurança para estudos futuros de desempenho hidrodinâmico de cascos.

A relevância deste estudo se dá pela possibilidade de subsidiar análises de desempenho de modelos reduzidos, reduzir custos e tempo de experimentos, e fornecer parâmetros consistentes para validação de simulações numéricas. Avaliar o CAC do LIFE a partir de dados de referência do IPT permite, ainda, identificar ajustes necessários e fortalecer a metodologia de ensaios hidrodinâmicos em escala reduzida, essenciais para projetos de casco, para a produção de conhecimento acadêmico e para impulsionar iniciativas de pesquisa e desenvolvimento industrial no setor naval. Complementarmente, este trabalho inclui uma simulação numérica de caráter exploratório, realizada com base nas recomendações do ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024a) e de Araujo (2014), com objetivo de servir como estudo preliminar. Essa etapa busca fornecer uma base metodológica para futuras análises de correção e calibração do CAC, apoiando o desenvolvimento de procedimentos nu-

méricos e experimentais integrados no LIFE.

A fundamentação teórica deste trabalho baseia-se em três eixos principais: os fundamentos hidrodinâmicos da resistência ao avanço, o funcionamento e as instalações experimentais e a teoria associada à modelagem numérica em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). As recomendações do ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC), 2021a) fornecem as diretrizes essenciais para a execução de ensaios experimentais, incluindo calibração de instrumentos, controle de velocidade e critérios de repetibilidade, assegurando a confiabilidade das medições realizadas em tanques de reboque e canais de água circulante. A teoria de funcionamento dessas instalações, aliada às contribuições de Hak (1987), descreve as condições de operação, as vantagens e limitações de cada tipo de ensaio e o papel desses equipamentos na análise experimental da resistência ao avanço.

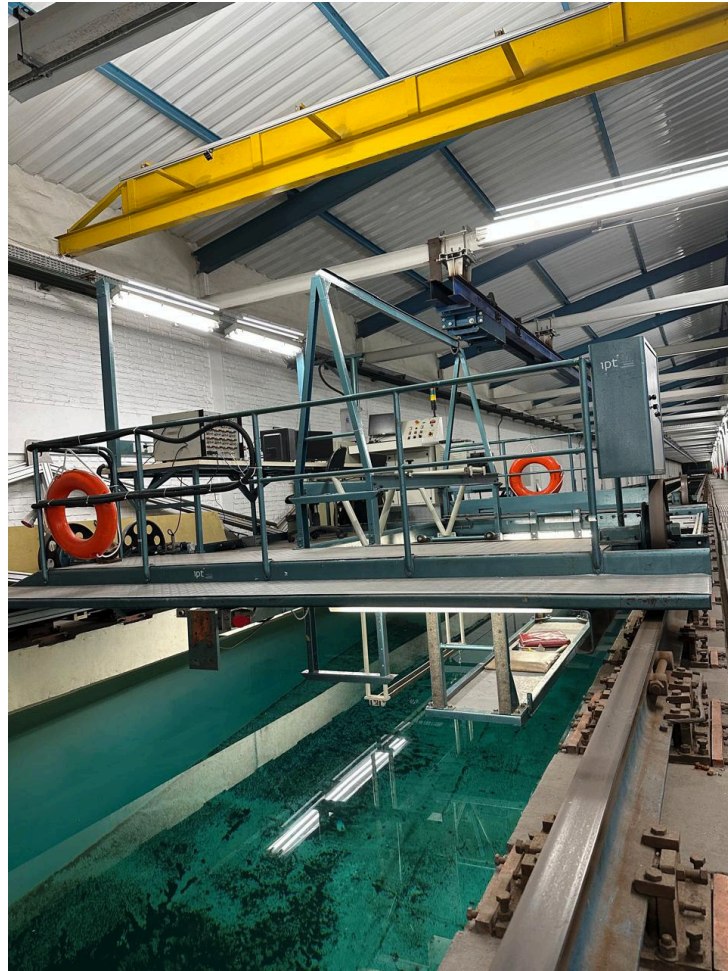
Complementarmente, os fundamentos de hidrodinâmica de cascos e os métodos de extrapolação de resultados experimentais para escala real, discutidos por Molland et al. (2011) e Bertram (2012), sustentam a interpretação dos dados obtidos e a comparação entre diferentes ambientes de teste.

Por fim, os conceitos de modelagem numérica e predição de escoamentos turbulentos abordados por Versteeg e Malalasekera (2007) e Araujo (2014) oferecem o embasamento necessário para a aplicação do CFD como ferramenta complementar na investigação da resistência ao avanço, permitindo integrar as análises experimentais e numéricas de forma coerente e metodologicamente sólida.

A Figura 1 apresenta o Tanque de Provas de Reboque do IPT, instalação utilizada para a realização dos ensaios experimentais de referência deste trabalho. O tanque possui infraestrutura adequada para medições de resistência ao avanço, permitindo a condução de corridas em águas calmas, com controle preciso da velocidade e aquisição de dados conforme as recomendações do ITTC. Os resultados obtidos nesse ambiente servem como base comparativa para avaliar o desempenho do Canal de Água Circulante (CAC) do LIFE.

Além disso, a etapa numérica desenvolvida neste estudo teve um papel fundamental como primeiro contato analítico com a simulação computacional aplicada ao modelo DTMB-LIFE, permitindo identificar em que faixa os resultados numéricos se situam em relação aos ensaios físicos. Embora ainda limitada, essa abordagem forneceu uma compreensão inicial dos efeitos de malha, domínio e condições de contorno sobre a resistência calculada, criando uma base metodológica sólida para trabalhos futuros. Assim, o CFD cumpriu sua função principal neste estudo: apoiar a interpretação das diferenças observadas experimentalmente e indicar caminhos de aprimoramento para análises numéricas mais refinadas e representativas do CAC.

Figura 1 – Tanque de Provas de Reboque do IPT



Fonte: Autora (2025)

## 1.1 OBJETIVOS

Com base na necessidade de avaliar a confiabilidade dos ensaios de resistência realizados no Canal de Água Circulante (CAC) do Laboratório LIFE/UFSC e compará-los com os resultados de referência obtidos no Tanque de Provas de Reboque do IPT, propõem-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a correspondência entre os resultados de resistência ao avanço obtidos no Canal de Água Circulante do LIFE/UFSC e aqueles medidos no Tanque de Reboque do IPT, utilizando o modelo DTMB-LIFE, a fim de verificar a coerência e subsidiar o desenvolvimento de metodologias de calibração e correção baseadas em CFD.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Executar ensaio experimental de resistência ao avanço do modelo DTMB-LIFE no Tanque de Provas de Reboque do IPT;
- Comparar os resultados experimentais do IPT com os obtidos no CAC do LIFE;
- Analisar as diferenças observadas entre os ensaios e discutir possíveis causas hidrodinâmicas e experimentais;
- Realizar simulação numérica de referência para apoiar futuras correções e calibrações do CAC;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 FUNDAMENTOS DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A resistência ao avanço corresponde à força hidrodinâmica que se opõe ao movimento de uma embarcação, resultante da interação entre o casco e o fluido circundante. Em navios de deslocamento, essa resistência é frequentemente representada de forma adimensional pelo coeficiente de resistência total  $C_T$ , o qual relaciona a força resistiva  $R_T$  com a densidade do fluido  $\rho$ , a velocidade de avanço  $V$  e a área de superfície molhada  $S$  do casco, possibilitando a comparação do desempenho entre diferentes projetos e condições operacionais, sendo expresso pela Equação 1 (Birk, 2019).

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (1)$$

Segundo Molland et al. (2011), a partir das análises de Froude, a resistência ao avanço pode ser decomposta em dois componentes principais: resistência de fricção e resistência de pressão. A primeira está associada ao atrito viscoso entre o casco e a água, enquanto a segunda pode ser subdividida em resistência viscosa de pressão, resultante da separação do escoamento, e resistência de ondas, decorrente da geração de ondas superficiais durante o deslocamento. Essas divisões são apresentadas na Figura 2, permitindo analisar cada componente de maneira isolada, embora seja importante reconhecer que, na prática, eles interagem entre si e devem ser considerados de forma integrada no estudo do desempenho hidrodinâmico da embarcação.

A importância relativa de cada parcela de resistência depende diretamente da forma do casco. Geometrias mais cheias tendem a aumentar a resistência de fricção devido à maior área molhada, enquanto regiões de popa mal afiladas favorecem separações de escoamento, elevando a resistência viscosa de pressão. Já a resistência de ondas está fortemente relacionada às proporções longitudinais e ao número de Froude, tornando-se dominante conforme a embarcação se aproxima da transição entre regime deslocante e semi-deslocante. Essa relação entre forma e desempenho hidrodinâmico é discutida no Principles of Naval Architecture (SNAME) por Lewis (1988), que destaca que a eficiência global resulta do equilíbrio entre baixa resistência e boa interação casco-propulsor.

Figura 2 – Decomposição da Resistência ao Avanço



Fonte: Adaptado de Molland et al. (2011))

### 2.1.1 Resistência de Fricção

Segundo Bertram (2012), a resistência de fricção está associada à viscosidade do fluido e ao desenvolvimento da camada limite ao longo do casco. As partículas de água aderem à superfície e acompanham a velocidade do navio, enquanto, a uma curta distância, já se movimentam em um regime quase invíscido. A zona intermediária entre essas duas condições constitui a camada limite, cuja espessura pode atingir aproximadamente 1 metro na região de popa de um porta-contêiner, por exemplo, para números de Reynolds da ordem de  $10^9$ . Esse número adimensional é definido pela Equação 2.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2)$$

Na Equação 2,  $V$  representa a velocidade característica do escoamento,  $L$  o comprimento característico do corpo (no caso de navios, normalmente o comprimento entre perpendiculares), e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido.

O significado físico do número de Reynolds está ligado ao tipo de comportamento que o escoamento apresenta próximo à superfície do casco. Um modo simples de entender esse conceito é por meio do escoamento sobre uma placa plana, um caso

clássico utilizado em engenharia para ilustrar a formação da camada limite. Nesse exemplo, o fluido em contato com a superfície inicia seu movimento de forma ordenada, caracterizando um regime laminar. À medida que percorre distâncias maiores ao longo da placa, pequenas instabilidades surgem até que o escoamento se torne mais desorganizado e caótico, passando ao regime turbulento.

Segundo Fox et al. (2014), essa transição ocorre tipicamente quando o número de Reynolds, calculado com base no comprimento percorrido pelo escoamento, ultrapassa aproximadamente  $5 \times 10^5$ . Abaixo desse valor, o escoamento tende a permanecer laminar; acima dele, tende a tornar-se turbulento. Essa análise por meio da placa plana é útil porque ajuda a compreender, de forma simplificada, como o escoamento se comporta também ao longo do casco de uma embarcação.

Essa transição é relevante porque, embora o regime laminar apresente menores tensões de cisalhamento, o regime turbulento gera maiores tensões, aumentando significativamente a resistência de fricção. A integração dessas tensões ao longo da superfície molhada do casco resulta, portanto, na parcela de resistência friccional ao avanço da embarcação.

De acordo com Jang et al. (2014), a resistência de fricção representa uma das principais parcelas da resistência total de uma embarcação, principalmente para velocidades baixas, correspondendo aproximadamente a 60% a 70% do valor total. Essa predominância justifica os esforços contínuos de pesquisa voltados para sua redução, como os estudos experimentais de aplicação de camadas de ar no fundo do casco, que visam diminuir a interação viscosa entre o casco e a água.

A estimativa da resistência friccional evoluiu consideravelmente desde os ensaios originais de Froude. A Figura 3 ilustra a comparação entre as principais curvas empíricas utilizadas ao longo dessa evolução, a curva de fricção ATTC (1947) e a curva ITTC (1957). Ambas não representam soluções teóricas, mas sim *regressões empíricas*, isto é, ajustes matemáticos obtidos a partir de grandes conjuntos de dados experimentais, construídos para descrever o comportamento médio do coeficiente de fricção  $C_F$  em função do número de Reynolds.

A estimativa da resistência friccional evoluiu a partir dos experimentos de Froude e da análise de Schoenherr, que relacionou o coeficiente de fricção  $C_F$  ao número de Reynolds. A linha de Schoenherr foi posteriormente adotada pelo American Towing Tank Conference (ATTC), com um pequeno fator de correção para superfícies reais, mas apresentou dificuldades na correlação entre modelos de diferentes dimensões (Molland et al., 2011).

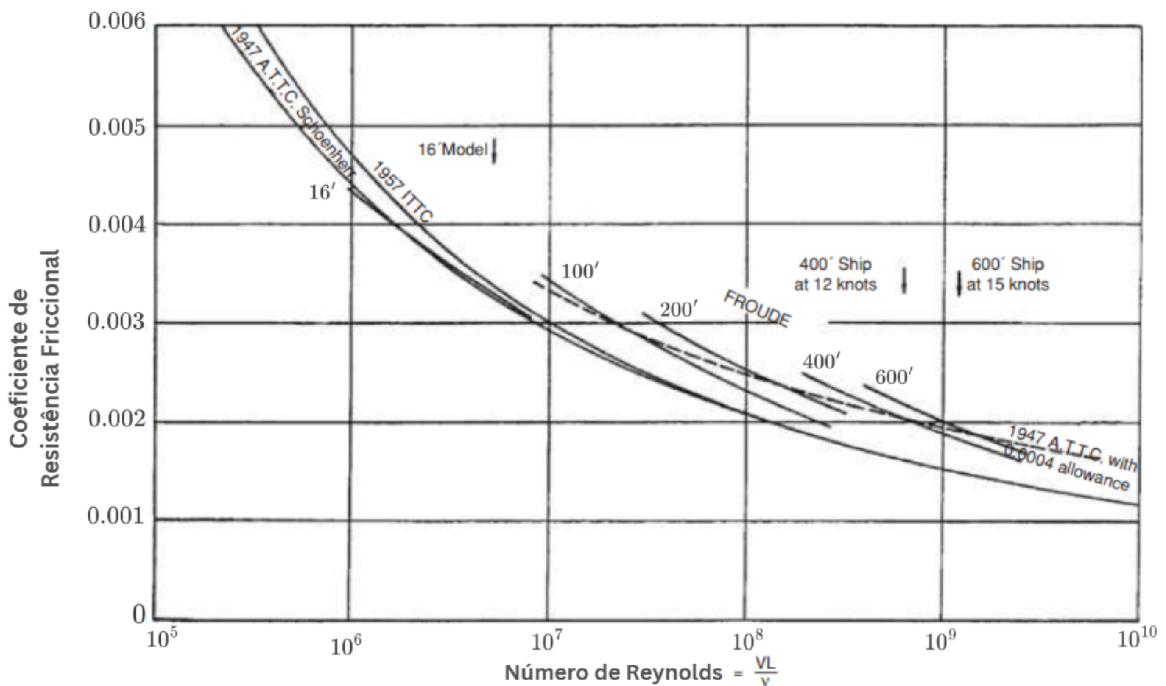
É importante notar que tanto a linha de Schoenherr quanto as curvas ATTC e ITTC são *regressões empíricas*. No contexto da hidrodinâmica experimental, uma regressão corresponde a uma curva ajustada matematicamente a partir de um grande conjunto de dados medidos em laboratório, isto é, trata-se de uma expressão obtida

por ajuste estatístico que representa o comportamento médio observado nos ensaios. Assim, essas curvas não decorrem de uma solução analítica das equações de Navier–Stokes, mas sim de uma modelagem baseada em dados experimentais, como discutido por Lewis (Lewis, 1988).

Para superar as limitações da curva ATTC, a International Towing Tank Conference (ITTC) propôs, em 1957, a linha de regressão ITTC, atualmente empregada na maioria dos tanques de provas, fornecendo valores confiáveis de  $C_F$  em função do número de Reynolds (Molland et al., 2011). Essa formulação considerou as variações observadas em cascos totalmente soldados e ajustou o fator de correlação, garantindo maior consistência entre testes em modelos pequenos e grandes. A expressão correspondente é apresentada na Equação 3. Enquanto isso, a comparação entre os dados ATTC e ITTC é ilustrada na Figura 3.

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (3)$$

Figura 3 – Comparação entre regressões para estimativa do coeficiente de fricção



Fonte: Adaptado de Molland et. al (2011)

### 2.1.2 Resistência de Ondas

A resistência de ondas corresponde à parcela da resistência total que está associada à geração do sistema de ondas na superfície livre provocado pelo movimento da embarcação. Segundo Bertram (2012), quando o casco se desloca, parte

da energia é transferida para a água na forma de ondas, cuja magnitude depende da velocidade, da forma do casco e da interação entre as diferentes ondas geradas ao longo da embarcação. Esse fenômeno se torna mais significativo em velocidades mais altas, especialmente quando o comprimento de onda associado ao movimento da embarcação é da mesma ordem do comprimento do casco.

Os fundamentos experimentais da estimativa da resistência ao avanço foram estabelecidos por William Froude, ao introduzir o conceito em que modelos de navios geometricamente semelhantes geram padrões de ondas similares, mesmo em velocidades diferentes. Dessa forma, demonstrou-se que a resistência de ondas  $R_W$  podia ser separada da resistência por fricção  $R_F$ , permitindo estudar o efeito da geração de ondas independentemente dos efeitos viscosos. Ao estudar modelos e navios reais, Froude observou que a resistência de ondas de modelos menores podia ser extrapolada para o navio em escala real se fosse mantida a similaridade de velocidade definida pelo número de Froude, dado pela Equação 4 (Molland et al., 2011):

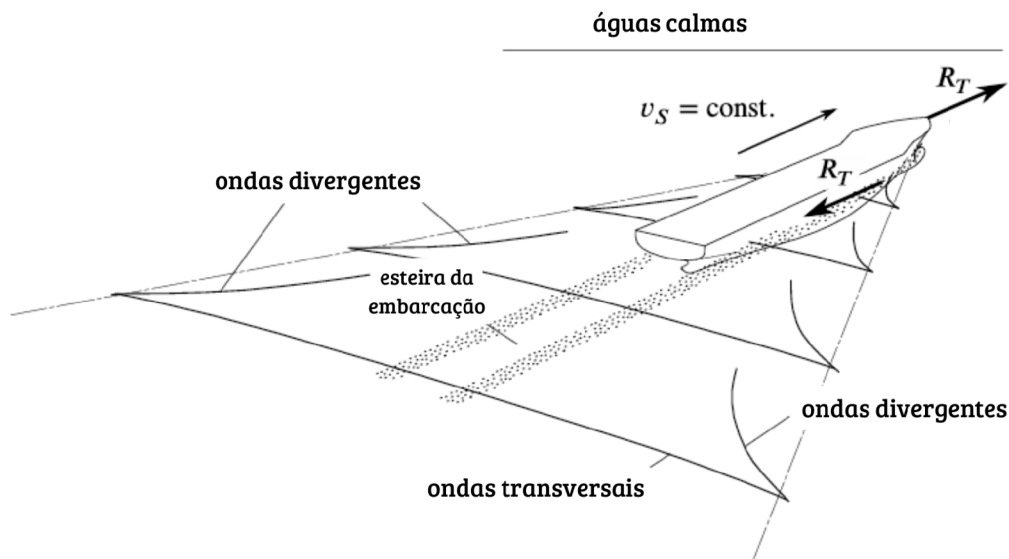
$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

Na Equação 4,  $V$  representa a velocidade característica do escoamento,  $L$  o comprimento da linha d'água e  $g$  a aceleração da gravidade. Esse número adimensional estabelece a relação entre a velocidade da embarcação e o comprimento do casco, sendo essencial para que resultados obtidos em modelos reduzidos possam ser extrapolados para navios em escala real.

De acordo com Molland et al. (2011), o padrão de ondas gerado é formado por sistemas de proa e de popa que interagem, compondo feixes divergentes e transversais. Em águas profundas, esses feixes apresentam uma angulação característica, limitada por aproximadamente  $19,47^\circ$  em relação à direção de avanço, o que define a chamada esteira de Kelvin. A interferência entre os sistemas divergente e transversal confere às ondas sua forma característica, sendo que ambos se propagam à mesma velocidade da embarcação. Dessa forma, o comprimento de onda entre cristas sucessivas, representado por  $\lambda$ , pode ser estimado pela Equação 5. A Figura 4 ilustra o padrão típico de geração de ondas pela embarcação, destacando a formação das ondas divergentes e transversais no campo próximo e distante.

$$\lambda = \frac{2\pi V^2}{g} \quad (5)$$

Figura 4 – Padrão de geração de ondas de uma embarcação



Fonte: Adaptado de Birk (2019)

Molland et al. (2011) explica ainda que as ondas divergentes formadas pela proa e pela popa não apresentam risco significativo de interferência. O mesmo, no entanto, não ocorre com as ondas transversais, que podem exibir um comportamento de interferência intenso.

A ocorrência de interferências está diretamente relacionada ao comprimento de onda  $\lambda$ , conseqüentemente, à velocidade do navio. Por esse motivo, o número de Froude é frequentemente adotado como um parâmetro adimensional para descrever os sistemas de ondas, permitindo comparar com mais facilidade modelos reduzidos e embarcações em escala real. Dependendo do formato do casco, outros padrões de ondas podem se formar, como nos ombros a vante e a ré, mas a distinção entre interferências construtivas e destrutivas continua válida para todos esses casos.

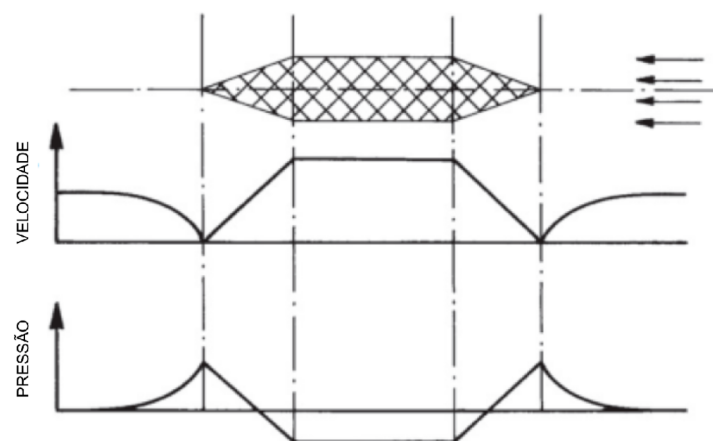
### 2.1.3 Resistência Viscosa de Pressão

A resistência viscosa de pressão é gerada pela influência da camada limite sobre a distribuição de pressão ao redor do casco. Diferentemente do escoamento invíscido, a presença da camada limite provoca uma redução da pressão na região traseira do navio (popa). Essa diferença de pressão entre a proa, onde se observa alta pressão, e a popa, com pressão mais baixa, resulta na resistência viscosa de pressão, conforme discutido por Birk (2019), que destaca o efeito da camada limite na modificação da distribuição de pressão ao longo do casco.

Bertram (2012) explica que, em um fluido ideal sem viscosidade, um corpo totalmente submerso não apresentaria resistência ao movimento. Esse comportamento teórico caracteriza o paradoxo de D'Alembert, no qual a distribuição de pressão ao longo do casco é simétrica e não há mecanismos de dissipação de energia, resultando em resistência nula.

No entanto, em condições reais, a presença de viscosidade modifica completamente esse cenário. Forma-se a camada limite ao longo do casco, ocorrem regiões de separação do escoamento e são gerados vórtices na esteira, impedindo a recuperação completa da pressão na região da popa. Esses fenômenos aumentam a resistência viscosa de pressão. A Figura 5 ilustra o conceito de "corpo primário" apresentado por Bertram (2012), mostrando a distribuição de pressão ao longo do casco e a imagem refletida na superfície livre, utilizada como modelo teórico para compreender a formação do sistema primário de ondas.

Figura 5 – Pressão simétrica ao longo do casco em fluido invíscido



Fonte: Bertram (2012)

## 2.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Após a caracterização das diferentes parcelas que compõem a resistência ao avanço (fricção, viscosa de pressão e ondas) torna-se necessário definir os métodos empregados para sua quantificação. A estimativa correta dessas parcelas é essencial no projeto naval, uma vez que influencia diretamente a previsão da potência propulsora, o consumo de combustível e, conseqüentemente, a eficiência energética da embarcação (Molland et al., 2011).

Ao longo da evolução da Engenharia Naval, diversos métodos foram desenvolvidos para esse fim, desde os primeiros modelos empíricos, baseados em correlações experimentais, até abordagens numéricas avançadas por Dinâmica dos Fluidos Com-

putacional (CFD), além dos ensaios em modelos reduzidos em tanques de provas (Bertram, 2012). Cada um desses métodos apresenta vantagens e limitações quanto à precisão, custo e aplicabilidade, sendo muitas vezes utilizados de forma complementar.

Para fins de fundamentação teórica, o presente estudo concentra-se nas abordagens numéricas e nos ensaios em modelos relacionados à resistência ao avanço, que constituem a base metodológica deste trabalho.

### 2.2.1 Ensaios em modelos reduzidos

O estudo da resistência ao avanço por meio de modelos em escala remonta ao século XVII, quando pesquisadores começaram a rebocar pequenos modelos em lagos e tanques para analisar o comportamento hidrodinâmico das embarcações. Contudo, os resultados iniciais eram inconclusivos, principalmente devido à dificuldade de determinar a velocidade correspondente do modelo em relação à embarcação em escala real e à transformação das medições de resistência do modelo  $R_{TM}$  para a resistência da embarcação real  $R_{TS}$  (Molland et al., 2011).

Posteriormente, Froude, apresentou soluções para essas questões, estabelecendo princípios que ainda fundamentam os ensaios em escala atualmente. A construção de modelos de navios segue uma escala geométrica definida como o quociente entre uma dimensão característica da embarcação em escala real e a correspondente no modelo, determinado pela Equação 6 (Bertram, 2012):

$$\sigma = \frac{L_S}{L_M} \quad (6)$$

Dessa forma, todas as dimensões lineares do modelo são proporcionais às da embarcação real. As áreas de superfície  $S$  e os volumes  $V$  seguem relações de escala:

$$\lambda^2 = \frac{S_S}{S_M}, \quad \lambda^3 = \frac{V_S}{V_M} \quad (7)$$

Para relacionar as velocidades entre modelo e embarcação real, é necessário considerar também um fator de escala de tempo  $\tau$ , definido como a razão entre a duração de um processo na embarcação em escala real e no modelo:

$$\tau = \frac{T_S}{T_M} \quad (8)$$

A velocidade média pode, então, ser expressa pela Equação 9:

$$V_S = \frac{\lambda}{\tau} V_M \quad (9)$$

Essa relação evidencia que a velocidade em escala real depende não apenas do fator geométrico, mas também da escolha adequada do tempo característico, garantindo que os fenômenos hidrodinâmicos observados no modelo sejam representativos da embarcação real.

## 2.2.2 Extrapolação de resultados de modelos para navios em escala real

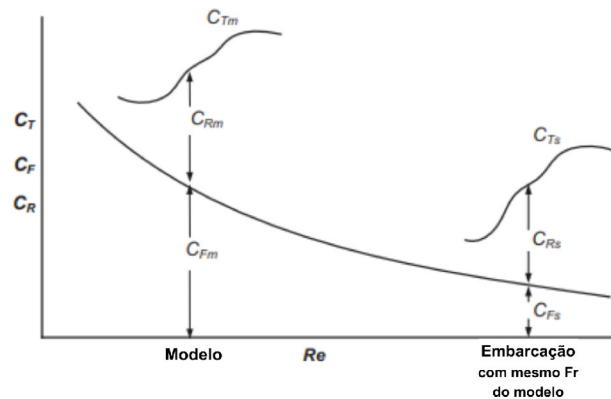
A extrapolação é o processo que permite transformar os resultados obtidos em modelos reduzidos para previsões aplicáveis à embarcação real. Ela é necessária porque o modelo apresenta diferenças físicas importantes, como menor número de Reynolds e diferentes proporções de forças viscosas e de ondas. Sem essa etapa, os ensaios em modelo seriam apenas qualitativos e não poderiam ser usados para projetar a potência propulsora ou estimar o consumo de combustível (Molland et al., 2011).

Historicamente, dois métodos principais de extrapolação são utilizados. O primeiro, proposto por Froude, baseia-se na hipótese de que o coeficiente de resistência total depende do número de Froude ( $Fn$ ) e do número de Reynolds ( $Rn$ ), podendo ser expresso como a soma do coeficiente de resistência friccional de uma placa plana equivalente em comprimento ao modelo ( $C_F(Rn)$ ) e do coeficiente de resistência residual ( $C_R(Fn)$ ). Essa relação é representada pela Equação 10, que constitui a base do *Método de Extrapolação Clássico de Froude*. (Krezelewski; Welnicki, 1982).

$$C_T(Fn, Rn) = C_R(Fn) + C_F(Rn) \quad (10)$$

Nos ensaios, determina-se  $C_{R_m} = C_{T_m} - C_{F_m}$  e, assumindo-se a igualdade do número de Froude entre modelo e navio, considera-se que  $C_{R_s} = C_{R_m}$ . Dessa forma, a resistência total na escala real é dada por  $C_{T_s} = C_{F_s} + (C_{T_m} - C_{F_m})$ . A principal implicação desse método é a correção pela diferença de fricção entre modelo e navio, já que o número de Reynolds do modelo é menor e, portanto,  $C_{F_m}$  tende a ser superior a  $C_{F_s}$ . Embora ainda utilizado, esse procedimento pode superestimar a potência em embarcações de grande porte, pois não trata de forma completa os efeitos viscosos (Molland et al., 2011).

Figura 6 – Método da extrapolação de Froude



Fonte: Molland (2011)

Posteriormente, em 1954, Hughes propôs o chamado *Método Tridimensional de Extrapolação*, no qual o coeficiente de resistência total  $C_T(Fn, Rn)$  é expresso como a soma do coeficiente de resistência de ondas  $C_W(Fn)$  e da resistência viscosa  $C_V(Rn)$ . Esta última é definida pela Equação 11, onde  $k$  é o *fator de forma*, que representa a influência da pressão na resistência viscosa. Esse método, posteriormente adotado pela ITTC, permite uma separação mais detalhada entre as parcelas viscosa e de ondas, tornando as previsões mais representativas para embarcações de diferentes geometrias e regimes de escoamento (Krezelewski; Welnicki, 1982)

$$C_T(Fn, Rn) = C_W(Fn) + C_F(Rn)(1 + k) \quad (11)$$

## 2.3 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

A aplicação experimental constitui uma etapa essencial na validação de estudos numéricos e teóricos em engenharia naval, permitindo a observação direta dos fenômenos hidrodinâmicos e a obtenção de dados confiáveis para comparação e calibração de modelos computacionais. No contexto deste trabalho, a investigação experimental foi conduzida em duas instalações distintas: o tanque de reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e o Canal de Água Circulante (CAC) do Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE/UFSC). A utilização combinada desses ensaios possibilita avaliar, sob diferentes condições e metodologias, o comportamento hidrodinâmico do casco e a coerência entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente.

### 2.3.1 Ensaio de Modelo Reduzido em Tanques de Reboque

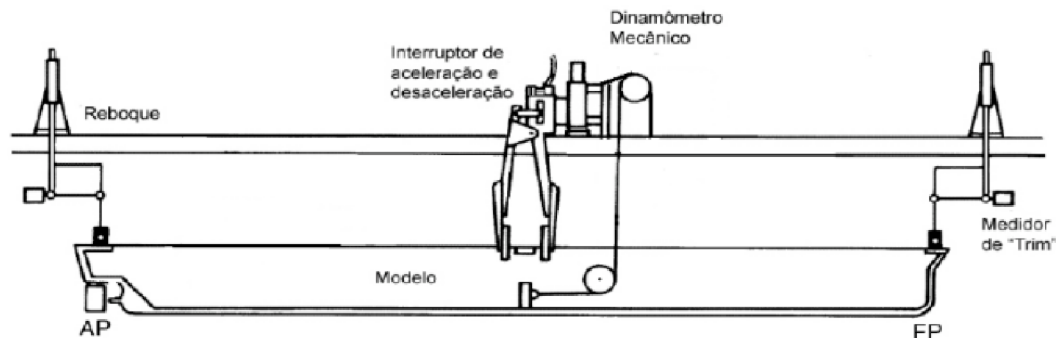
O tanque de reboque é uma das instalações experimentais mais tradicionais da Engenharia Naval, utilizada para investigar o comportamento hidrodinâmico de cascos em condições controladas. Nele, um modelo é rebocado a velocidades definidas em um corpo d'água essencialmente estacionário, permitindo medir com precisão a resistência, o trim e o afundamento dinâmico.

Segundo Hak (1987), entre as principais vantagens desse método estão o baixo consumo de potência para movimentar o modelo, a possibilidade de criar perfis estratificados de densidade da água (por meio de variações controladas de salinidade ou temperatura) e o uso de técnicas especializadas de visualização do escoamento. Além disso, o ambiente de teste tende a apresentar baixo nível de interferências externas, favorecendo medições estáveis e repetitivas. Suas limitações incluem o tempo restrito de ensaio, imposto pelo comprimento do canal, e as vibrações do sistema de reboque, que devem ser minimizadas por meio de um projeto adequado.

A Figura 7 ilustra um arranjo típico de ensaio de reboque, mostrando os principais componentes do sistema experimental, incluindo o dinamômetro, o mecanismo

de aceleração/desaceleração, e os medidores de trim e afundamento, conforme apresentado.

Figura 7 – Arranjo típico de ensaio de reboque



Fonte: (Araujo (2014) apud Bertram (2012))

Os ensaios de resistência seguem procedimentos padronizados pela *International Towing Tank Conference* (ITTC), conforme a recomendação 7.5-02-02-01 — Resistance Test (International Towing Tank Conference (ITTC), 2021b). Antes de cada corrida, são realizadas as leituras de calibração do sistema (zero readings). Em seguida, o modelo é acelerado de forma controlada até atingir o patamar de velocidade definido para o ensaio, correspondente ao número de Froude desejado. Uma vez atingida a velocidade-alvo, mantém-se o modelo nesse regime até que o escoamento alcance condição estacionária, momento a partir do qual a aquisição dos dados é iniciada.

A coleta pode ocorrer continuamente ao longo do trecho útil do tanque ou após a confirmação visual e instrumental de regime permanente, garantindo que os valores registrados representem o comportamento médio do modelo. Entre cada patamar de velocidade, aguarda-se o completo restabelecimento do escoamento no tanque, evitando influência da esteira residual da corrida anterior e assegurando repetibilidade.

O cumprimento dessas etapas padronizadas é essencial para que os resultados obtidos possam ser utilizados com confiabilidade tanto na comparação com outras instalações experimentais quanto na validação de simulações numéricas e na extrapolação para a escala real.

### 2.3.2 Ensaio de Modelo Reduzido no Canal de Água Circulante do LIFE

O Canal de Água Circulante (CAC, ou em inglês *Circulating Water Channel*) é um equipamento experimental amplamente empregado na Engenharia Naval e Oceânica para a investigação de fenômenos hidrodinâmicos em escala controlada. Seu uso é justificado pela estrutura compacta, alta eficiência econômica e capacidade de fornecer resultados experimentais consistentes, o que o torna uma alternativa viável ao

tanque de reboque tradicional (Yang et al. (2024)). Diferentemente deste, o CAC permite o monitoramento contínuo do campo de escoamento e a realização de ensaios de desempenho de longa duração, sem a necessidade de deslocamento do modelo.

O sistema é constituído por uma seção de testes, onde são posicionados os modelos experimentais, além de seções de retificação, contração, difusão, curvas e potência, que em conjunto asseguram a recirculação da água e a estabilidade do escoamento. A uniformidade do campo de velocidades na seção de testes é considerada o principal indicador de desempenho hidrodinâmico do canal, sendo fortemente influenciada pela geometria e disposição de cada componente.

Tradicionalmente, o dimensionamento e a otimização desses canais são realizados a partir de uma combinação entre métodos teóricos e empíricos, sendo posteriormente ajustados após a construção, com base na experiência dos engenheiros envolvidos. Contudo, o avanço das técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem permitido a análise e o aperfeiçoamento do projeto antes da fabricação, promovendo melhorias significativas na distribuição do escoamento e no desempenho global do sistema (Yang et al., 2024).

Rinaldi (2025) realizou ensaios experimentais no Canal de Água Circulante (CAC) do Laboratório de Interação Fluido–Estrutura (LIFE), pertencente ao Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ilustrado na Figura 8. O estudo teve como finalidade construir o modelo a partir de impressão 3D e investigar o comportamento hidrodinâmico de modelos em escala reduzida, com ênfase na determinação da resistência ao avanço, empregando uma instalação laboratorial capaz de reproduzir condições de escoamento controladas e estáveis.

O CAC do LIFE, é um circuito fechado de água que permite gerar um fluxo contínuo e uniforme na seção de testes, garantindo a repetibilidade dos resultados experimentais. De acordo com Rinaldi (2025), a seção de ensaio apresenta dimensões 6,0 m de comprimento, 1,4 m de largura e 1,45 m de altura, sendo a lâmina d'água mantida em aproximadamente 1,2 m durante os testes. O escoamento é promovido por um impelidor, cuja rotação é ajustável, possibilitando o controle preciso da velocidade da corrente.

Figura 8 – Canal de Água Circulante do LIFE



Fonte: (Rinaldi, 2025 apud Dittrich, 2024)

Para a medição da resistência ao avanço, foi empregado um sistema composto por eixos e juntas universais que permitem o movimento livre em pitch, conectado a uma célula de carga tipo “S”, devidamente calibrada conforme as recomendações da ITTC (2017). O sistema de aquisição de dados utilizado foi o ADS2500, da empresa LYNX, configurado para registrar os sinais de força a uma frequência de 25 Hz. Os dados coletados foram, posteriormente processados em ambiente Python, após a estabilização do escoamento, garantindo que as leituras correspondessem ao regime permanente.

Os ensaios realizados por Rinaldi (2025) abrangeram uma faixa de velocidades entre 0,56 m/s e 1,16 m/s, correspondendo a números de Froude entre 0,15 e 0,31, o que engloba a faixa operacional da embarcação em escala real. Os resultados obtidos demonstraram boa estabilidade nas medições e coerência com os métodos teóricos de estimativa de resistência viscosa, reforçando a confiabilidade do CAC e do sistema de medição do LIFE.

A presente pesquisa toma como referência o procedimento experimental descrito por Rinaldi (2025), empregando metodologia semelhante para a caracterização da resistência hidrodinâmica de modelos reduzidos no tanque de reboque do IPT. Dessa forma, o estudo amplia a base de dados existente e contribui para a validação dos métodos experimentais aplicados no CAC do LIFE e para comparações em análises CFD.

## 2.4 CFD APLICADA À RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Nos últimos anos, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) consolidou-se como uma ferramenta essencial na engenharia naval, sobretudo na estimativa da resistência ao avanço de embarcações. Embora os ensaios em tanque de reboque permaneçam como referência, seu elevado custo, a demanda de tempo e as limitações associadas aos efeitos de escala restringem seu uso, especialmente nas fases iniciais do projeto. Nesse contexto, o CFD surge como alternativa prática e financeiramente viável, permitindo a análise de diferentes geometrias de casco e a condução de estudos de otimização de forma mais ágil e acessível.

A literatura recente evidencia a confiabilidade desse método. Nair e Mathew (2022), por exemplo, destacam que o uso de CFD possibilita estimativas consistentes da resistência ao avanço, com potencial para reduzir significativamente a dependência de ensaios físicos em tanques de reboque, sem comprometer a precisão dos resultados. Ainda assim, a acurácia das simulações depende de um preparo rigoroso, envolvendo a definição de malhas adequadas, a correta resolução da camada limite e a escolha apropriada de parâmetros numéricos. Dessa forma, as etapas de verificação e validação são indispensáveis para assegurar confiabilidade. Nas próximas subseções, são apresentados os fundamentos do uso do CFD na análise da resistência ao avanço

### 2.4.1 Equações Governantes

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007) a Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma ferramenta fundamental para a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, por meio de simulações computacionais. Embora o uso de softwares comerciais permita obter resultados numéricos de forma relativamente rápida, a interpretação correta desses resultados depende do entendimento da base matemática que sustenta o método.

Essa base fundamenta-se nos princípios fundamentais de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, que levam às equações governantes do escoamento (Tey et al., 2017). Compreender essas equações e as condições auxiliares necessárias, incluindo condições iniciais e de contorno, é essencial para garantir que as simulações sejam consistentes, precisas e aplicáveis a problemas reais, como a análise da resistência ao avanço de embarcações. Nas subseções seguintes, serão apresentados os fundamentos dessas equações, estabelecendo a base teórica para a aplicação prática da CFD neste trabalho.

O passo-chave do método dos volumes finitos (FVM) é a integração das equações governantes sobre um volume de controle, transformando-as em equações dis-

cretizadas que podem ser resolvidas numericamente. Essas equações discretizadas devem ser formuladas em cada ponto nodal do domínio. Para volumes de controle próximos às fronteiras do domínio, a equação discretizada é modificada para incorporar as condições de contorno, garantindo consistência física. O sistema resultante de equações algébricas lineares é, então, resolvido por técnicas de solução matricial adequadas, permitindo obter a distribuição da propriedade em todos os pontos nodais do domínio (Versteeg; Malalasekera, 2007).

#### 2.4.1.1 Equação da Conservação de Massa

A derivação da equação de conservação de massa parte do balanço de massa para o elemento fluido, na qual a taxa de aumento da massa no fluido deve ser igual a taxa líquida de fluxo de massa para dentro do elemento fluido. Dito isso, é necessário contabilizar a taxa de fluxo de massa através de uma face do elemento. Ao aplicar essa análise nas três direções coordenadas e dividir pelo volume do elemento, obtém-se a forma diferencial da equação da continuidade para um fluido compressível, expressa na Equação 12 (Fox et al., 2014).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Para fluidos incompressíveis, nos quais a densidade  $\rho$  é constante, a equação se simplifica para Equação 13 na forma expandida.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

#### 2.4.1.2 Equação de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes constituem a formulação fundamental para a descrição do movimento de fluidos viscosos. Elas derivam das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, nas quais aparecem como incógnitas as tensões viscosas  $\tau_{ij}$ . Estas podem ser modeladas em função da taxa local de deformação do fluido. Em escoamentos tridimensionais de fluidos isotrópicos, como gases e a maioria dos líquidos, apenas seis componentes independentes da deformação linear são relevantes, enquanto efeitos anisotrópicos, presentes em fluidos com moléculas poliméricas, não são considerados neste modelo clássico da formulação (Versteeg; Malalasekera, 2007).

A incorporação das tensões viscosas nas equações de conservação de quantidade de movimento resulta nas equações de Navier-Stokes, essenciais para a modelagem de escoamentos reais. Quando aplicadas a escoamentos incompressíveis com viscosidade constante, essas equações assumem a forma simplificada apresentada

na Equação 14 (Fox et al., 2014).

$$\begin{aligned}
 \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\
 \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\
 \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z
 \end{aligned} \tag{14}$$

#### 2.4.2 Predição de Turbulência na Análise CFD

A turbulência é um fenômeno caracterizado pela presença de estruturas rotacionais, ou vórtices, que ocorrem em múltiplas escalas de tempo e de comprimento, interagindo entre si de maneira altamente complexa. A correta predição desse comportamento é essencial em simulações numéricas, pois a turbulência influencia diretamente propriedades como a resistência ao avanço de embarcações, o arrasto e a transferência de calor (Versteeg; Malalasekera, 2007).

Na mecânica dos fluidos computacional (CFD), os modelos de turbulência podem ser agrupados em duas categorias, de acordo com a forma como as quantidades turbulentas são calculadas: simulações numéricas diretas (DNS) e modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). A simulação numérica direta (DNS) consiste em resolver as equações de Navier–Stokes não estacionárias em todas as escalas do escoamento. Embora forneça resultados extremamente detalhados e precisos, essa técnica exige grades muito refinadas e passos de tempo extremamente pequenos, tornando seu custo computacional proibitivo para aplicações industriais. Por esse motivo, a DNS é utilizada principalmente em estudos acadêmicos voltados à investigação fundamental da turbulência (Hami, 2021).

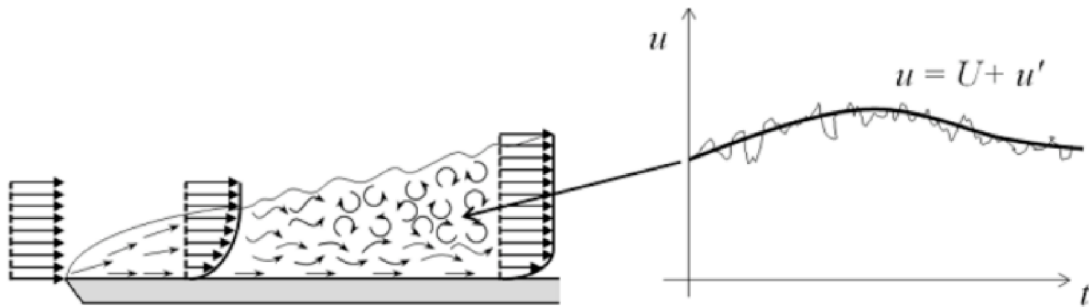
A Simulação de Grandes Escalas, ou *Large Eddy Simulation* (LES), representa uma abordagem intermediária entre a DNS e os modelos RANS. Nessa metodologia, as maiores estruturas turbulentas do escoamento são resolvidas diretamente, enquanto as menores são modeladas por um modelo de subgrade (*sub-grid scale*). Embora forneça resultados mais detalhados e fisicamente representativos, a LES exige alto custo computacional, especialmente em escoamentos próximos a paredes, onde as escalas turbulentas se tornam muito pequenas e requerem elevado refinamento de malha e pequenos passos de tempo. Por essa razão, sua aplicação em engenharia ainda é restrita, sendo frequentemente substituída ou combinada com abordagens híbridas que utilizam RANS nas regiões de parede e LES nas demais zonas do escoamento (Menter et al., 2021).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a abordagem mais consolidada em aplicações práticas de engenharia é a baseada nas equações de Navier–Stokes médias de Reynolds (RANS). Nesse método, as equações de Navier–Stokes

são médias no tempo, de forma que o foco passa a ser o escoamento médio, enquanto os efeitos das flutuações turbulentas são representados por termos adicionais. Esses termos precisam ser modelados, e para isso são empregados modelos clássicos de turbulência. Apesar de não fornecer o mesmo nível de detalhamento da LES ou da DNS, o RANS apresenta a vantagem de exigir recursos computacionais relativamente modestos e, ao mesmo tempo, produzir resultados suficientemente confiáveis para aplicações industriais.

A Figura 9 apresenta, de forma esquemática, a representação do campo de velocidades na camada limite turbulenta segundo o formalismo RANS. Nessa região, o movimento das partículas do fluido é marcado por fortes flutuações e comportamento caótico, e o esquema ilustra como o método separa a velocidade instantânea em uma componente média e outra flutuante, permitindo descrever matematicamente um escoamento que, na realidade, é altamente irregular.

Figura 9 – Ilustração do tratamento da turbulência em modelos baseados em RANS.



Fonte: Bastezini (2021) apud Frei (2017)

Ao aplicar a decomposição de Reynolds, cada variável instantânea de escoamento, como a velocidade  $u_i$ , é expressa como a soma de uma componente média e de uma flutuação turbulenta ( $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ). A substituição dessa forma nas equações de Navier–Stokes e a posterior média temporal resultam nas equações RANS, que descrevem o comportamento do campo médio. Nesse processo, surgem termos adicionais provenientes das correlações entre as flutuações de velocidade, denominados *tensores de Reynolds*, representados por  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  (Wilcox, 2006).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (16)$$

A partir das equações médias de Reynolds, torna-se necessário empregar modelos de fechamento que representem os efeitos da turbulência sobre o escoamento médio. Entre os modelos mais utilizados em aplicações de engenharia estão os de duas equações, que resolvem o transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e

uma variável associada à sua dissipação, permitindo determinar a viscosidade turbulenta efetiva  $\mu_t$ . Esses modelos apresentam um bom equilíbrio entre precisão e custo computacional, sendo amplamente recomendados para simulações de resistência ao avanço de embarcações (Versteeg; Malalasekera, 2007; Yusof et al., 2020).

O modelo  $k-\varepsilon$ , tornou-se um dos mais aplicados em escoamentos totalmente turbulentos. Ele baseia-se na solução de duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ), apresentando resultados estáveis e boa reprodutibilidade em escoamentos afastados de superfícies sólidas. Contudo, sua formulação clássica apresenta limitações na previsão de separações de fluxo e no tratamento da região próxima às paredes, onde os gradientes de velocidade são elevados. Versões modificadas, conhecidas como de baixo número de Reynolds (*Low-Re*), foram desenvolvidas para contornar essas limitações e melhorar a resolução da camada limite (Bredberg, 2001).

Por sua vez, o modelo  $k-\omega$ , utiliza a frequência específica da turbulência ( $\omega$ ) em substituição à taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ). Essa reformulação melhora significativamente a capacidade de predição na região próxima à parede, eliminando a necessidade de funções de parede e permitindo uma melhor representação da camada limite. Por outro lado, o modelo pode apresentar sensibilidade às condições de contorno no escoamento livre, o que limita sua aplicabilidade isolada em domínios extensos (Wilcox, 2006).

Com o objetivo de combinar as vantagens das duas formulações, foi desenvolvido o modelo  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*), amplamente utilizado em aplicações navais e recomendado pela ITTC (2024). Essa abordagem utiliza o modelo  $k-\omega$  nas regiões próximas à parede e gradualmente faz a transição para o modelo  $k-\varepsilon$  nas regiões afastadas do casco, garantindo maior estabilidade e precisão na previsão da separação de escoamento e das forças resistivas (Yusof et al., 2020; International Towing Tank Conference (ITTC), 2024b). De modo geral, o modelo SST é reconhecido como a escolha mais robusta para estudos de resistência ao avanço em regime turbulento, por equilibrar custo computacional, estabilidade numérica e coerência física dos resultados.

### 2.4.3 Simulação Numérica em CFD: Etapas e Aspectos Fundamentais

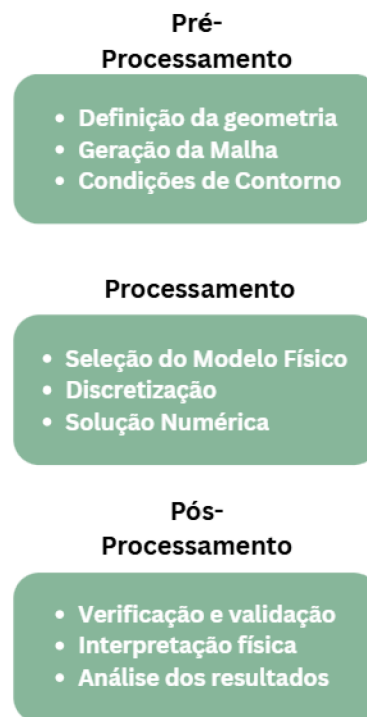
A realização de uma análise numérica em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) envolve um conjunto de etapas interdependentes que garantem a coerência física e a estabilidade numérica da solução. O processo pode ser compreendido de forma contínua, abrangendo a preparação do problema, a solução das equações governantes e a análise dos resultados obtidos (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024b).

Na etapa inicial, ocorre a definição do domínio computacional, da malha e

das condições de contorno. O domínio representa o volume de fluido ao redor do casco no qual as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são resolvidas. De acordo com as diretrizes da ITTC (2024), ele deve ser suficientemente extenso para evitar interferências das fronteiras artificiais sobre o campo de escoamento. Em aplicações de resistência, recomenda-se posicionar as fronteiras a montante e a jusante a distâncias de um a vários comprimentos entre perpendiculares ( $L_{pp}$ ), enquanto as fronteiras laterais e inferiores devem estar afastadas cerca de um comprimento do casco. Em escoamentos simétricos, pode-se aplicar condição de simetria no plano diametral, reduzindo o custo computacional sem prejudicar a representatividade física (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024a).

A Figura 10 ilustra, de forma esquemática, as principais fases envolvidas em uma simulação CFD, desde a etapa de pré-processamento até o pós-processamento dos resultados. Essa estrutura é amplamente adotada em aplicações de engenharia.

Figura 10 – Etapas da simulação CFD



Fonte: Autora (2025)

A discretização do domínio em volumes finitos, denominada malha, é uma das etapas mais determinantes da qualidade da simulação, pois influencia diretamente a precisão e a estabilidade numérica. O refinamento deve ser dessa forma, concentrado nas regiões com maiores gradientes de velocidade e pressão, especialmente na camada limite e na esteira de popa.

A ITTC (2024) recomenda o uso de elementos prismáticos nas proximidades do casco e hexaédricos nas demais regiões, mantendo uma razão de expansão inferior a 1,2 entre camadas adjacentes. A posição do primeiro ponto da malha em relação à parede deve atender ao modelo de turbulência empregado: valores de  $y^+$  próximos de 1 permitem resolver diretamente a subcamada viscosa, enquanto valores entre 30 e 100 são adequados ao uso de funções de parede (Ahmed et al., 2015; International Towing Tank Conference (ITTC), 2024b).

As condições de contorno complementam a formulação do problema, definindo o comportamento do escoamento nas fronteiras do domínio. O contorno de entrada é, geralmente, especificado por uma condição de velocidade uniforme, enquanto a saída adota pressão estática nula ou gradiente zero, permitindo o escoamento livre.

As superfícies do casco satisfazem a condição de não deslizamento (*no-slip*), impondo velocidade nula na interface fluido–estrutura, e as fronteiras laterais e inferiores podem empregar condições de deslizamento livre (*free-slip*), ou de simetria. Em casos que envolvem a superfície livre, a interface entre as fases ar e água é resolvida pelo método do Volume de Fluido (VOF), que rastreia a posição da interface e reproduz a formação das ondas geradas pelo casco (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024a; Ahmed et al., 2015).

Na fase de solução numérica, as equações de Navier–Stokes são resolvidas iterativamente pelo método dos volumes finitos, e o comportamento turbulento é modelado por meio das equações médias de Reynolds (RANS). A escolha do modelo de turbulência influencia diretamente a precisão e a estabilidade da simulação.

A estabilidade numérica do processo é assegurada pela escolha adequada do passo de tempo, de modo que o número de Courant (Equação 17) permaneça inferior a 1 em todo o domínio, evitando a propagação não física de informações entre os volumes de controle. A convergência é avaliada pela redução dos resíduos das equações governantes e pela estabilização das forças hidrodinâmicas calculadas, como o coeficiente de resistência total ( $C_T$ ).

$$Co = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (17)$$

Por fim, a análise dos resultados envolve a interpretação dos campos de pressão e velocidade, a observação da elevação da superfície livre e o cálculo dos coeficientes adimensionais de resistência. Segundo Araujo (2014), essa etapa é essencial para verificar a coerência física da solução numérica e sua correspondência com dados experimentais, assegurando a validade do modelo e a confiabilidade dos resultados obtidos. Assim, o processo de simulação em CFD integra a formulação teórica das equações governantes e dos modelos de turbulência com a implementação numérica adequada, constituindo uma ferramenta robusta para a investigação detalhada da resistência ao avanço de embarcações.

### 3 METODOLOGIA

Com o propósito de comparar os resultados experimentais de resistência ao avanço obtidos em duas diferentes instalações, este capítulo descreve a metodologia adotada para a realização dos ensaios no tanque de provas do IPT, conduzidos a partir do modelo DTMB-LIFE previamente ensaiado no canal de água circulante (CAC) do LIFE/UFSC. São apresentadas as etapas envolvidas na preparação do modelo. Além disso, são detalhados os procedimentos experimentais e o método utilizado para o processamento e análise comparativa dos resultados, de forma a garantir a equivalência entre os testes e avaliar a influência das condições de cada ambiente experimental nos parâmetros hidrodinâmicos obtidos.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

O modelo empregado nesta série de ensaios corresponde ao DTMB-LIFE, desenvolvido no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) da Universidade Federal de Santa Catarina. O DTMB-LIFE foi baseado na geometria do DTMB 5415, amplamente reconhecida em estudos hidrodinâmicos internacionais e disponibilizada pela SIMMAN (2014) em formato digital, o que facilita sua reprodução para fins experimentais e numéricos e indicado pela ITTC para efeito de comparações.

Conforme descrito por Rinaldi (2025), o modelo DTMB-LIFE foi projetado em escala de 1:100, cujas dimensões foram definidas na Tabela 1 e fabricado por meio de impressão 3D utilizando filamento PLA, material que apresentou maior estabilidade dimensional e precisão geométrica em comparação ao ABS. O modelo foi dividido em sete blocos, solução necessária para viabilizar a fabricação dentro do volume útil da impressora e garantir a integridade estrutural do conjunto.

Cabe destacar que a região superior ao pontal não foi modelada, uma vez que o estudo concentrou-se na análise do comportamento hidrodinâmico do casco na linha d'água e abaixo dela. Assim, a simplificação geométrica visou otimizar a fabricação e a montagem do modelo, mantendo a fidelidade das regiões hidrodinamicamente relevantes para a avaliação da resistência ao avanço.

A montagem foi concebida para garantir o alinhamento geométrico e a rigidez do casco. As junções entre os blocos contaram com cavidades internas e elementos de fixação por parafusos e porcas, além de um sistema de barras roscadas longitudinais no interior do modelo, conferindo rigidez e estabilidade ao conjunto.

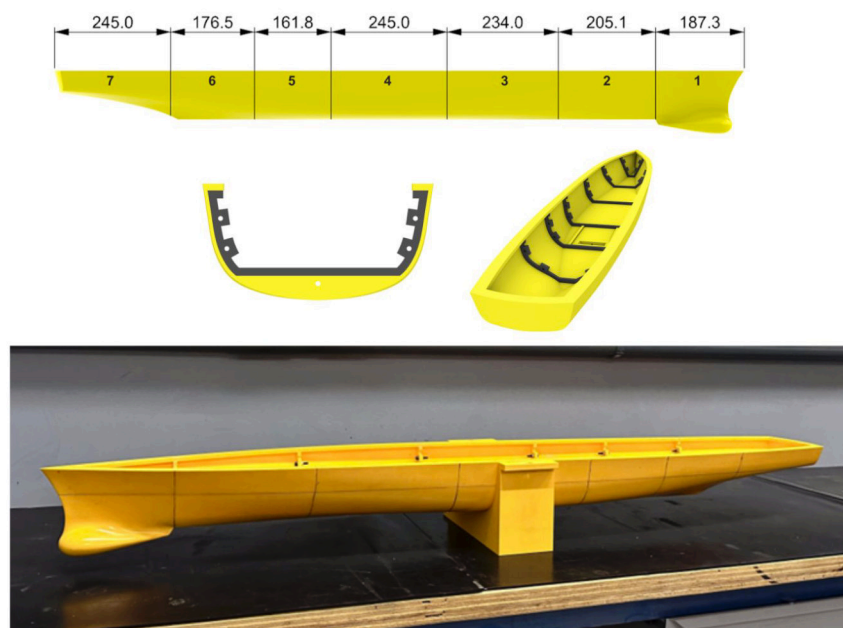
Tabela 1 – Dimensões principais do modelo DTMB-LIFE e da embarcação em escala real, fabricado pelo LIFE/UFSC.

Dimensão	Unidades	Escala Real	Modelo DTMB-LIFE
Comprimento total	m, mm	153,03	1454,7
Comprimento na linha d'água	m, mm	142,00	1420,0
Boca na linha d'água	m, mm	18,90	189,0
Pontal	m, mm	12,47	101,65
Calado	m, mm	6,16	61,6
Área molhada	m <sup>2</sup> , mm <sup>2</sup>	2949	294900
Deslocamento	t, g	8636	8428
$C_b$ (coeficiente de bloco)	–	0,506	–

Fonte: Rinaldi (2025)

As extremidades do casco foram fixadas por rosqueamento direto, gerando compressão entre os blocos. Para vedação e aderência, utilizou-se cola PU40 (Tekbond) nas interfaces de contato, e a montagem foi realizada sobre a mesa de desempenho do Laboratório de Metrologia da UFSC, garantindo o correto nivelamento do modelo. O acabamento final incluiu lixamento úmido, marcação da linha de calado e aplicação de verniz impermeabilizante, resultando em uma superfície adequada aos ensaios hidrodinâmicos; Figura 11 e maiores detalhes em Rinaldi (2025).

Figura 11 – Montagem do modelo DTMB-LIFE no Laboratório LIFE/UFSC



Fonte: Adaptado de Rinaldi (2025)

A caracterização física do modelo, que inclui a determinação do centro de gravidade (CG) e da linha de flutuação, já havia sido conduzida previamente no LIFE/UFSC

durante o processo de padronização do DTMB-LIFE. Assim, no presente trabalho, essa linha de calado foi utilizada como referência para o ajuste do modelo no tanque de reboque do IPT. Foi realizada apenas a redistribuição dos lastros internos, de modo a restabelecer o calado e o trim equivalentes à condição original. Cabe ressaltar que o lastro 3 foi substituído pelos lastros 10 a 14 e pela placa contendo os alvos, alteração necessária para adequar o modelo à nova instrumentação e à configuração adotada nos ensaios do IPT. Os dados referentes aos pesos, tanto dos lastros quanto da embarcação, utilizados nos ensaios realizados no IPT, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pesos Registrados no IPT

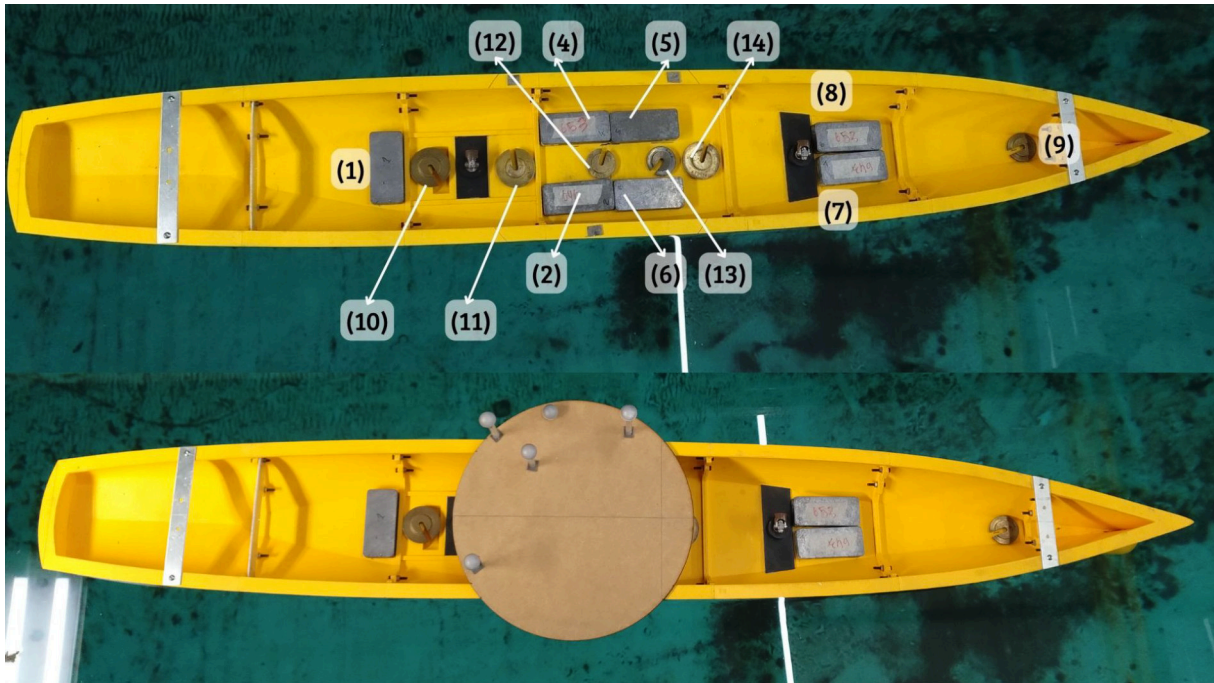
Nº do Lastro	Massa do Lastro (g)	Modelo e Suportes (g)	Placa com Alvos (g)
1	654	2503	-
2	647	2503	207
3	-	-	-
4	654	-	-
5	651	-	-
6	649	-	-
7	644	-	-
8	653	-	-
9	50	-	-
10	100	-	-
11	100	-	-
12	50	-	-
13	50	-	-
14	100	-	-

Fonte: Autora (2025)

Para o presente trabalho, o mesmo modelo de Rinaldi (2025) foi reutilizado sem modificações geométricas, preservando suas características hidrodinâmicas. As adaptações implementadas restringiram-se ao sistema de fixação, projetado para acoplar o modelo ao carro dinamométrico do tanque de reboque do IPT, viabilizando a correta transmissão das forças de tração durante o reboque.

A condição de flutuação foi ajustada mediante a redistribuição dos lastros internos, ilustrada na Figura 12, assegurando ausência de trim e o calado correspondente à condição de ensaio no CAC do LIFE. Essa calibração possibilitou a obtenção de resultados consistentes e comparáveis aos experimentos realizados anteriormente.

Figura 12 – Distribuição de lastro e pesos atribuídos



Fonte: Autora (2025)

### 3.2 ENSAIO EM TANQUE DE REBOQUE

Os ensaios de resistência ao avanço em águas calmas foram realizados no Tanque de Reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), conforme ilustrado na Figura 13. Essa instalação, apresentada com suas dimensões na Tabela 3, é uma das principais referências nacionais para estudos hidrodinâmicos em escala reduzida, permitindo controlar de forma rigorosa a velocidade de reboque, o ambiente de escoamento e a qualidade das medições efetuadas.

O modelo utilizado nos experimentos foi o DTMB-LIFE, previamente descrito na seção anterior quanto às suas características geométricas e construtivas. Sua menção nesta seção serve apenas para contextualizar sua aplicação nos ensaios, uma vez que sua geometria, condições de fabricação e instrumentação influenciam diretamente a qualidade das medições de resistência. A execução dos ensaios no IPT possibilitou a obtenção de dados experimentais confiáveis, que serviram como referência para a comparação com os resultados obtidos no Canal de Águas Circulantes do LIFE.

Tabela 3 – Dimensões do tanque de reboque do IPT

Parâmetro	Dimensão (m)
Profundidade	4.0
Largura	6.6
Comprimento	280.0

Figura 13 – Tanque de Reboque - IPT



Fonte: Autora (2025)

As provas ocorreram em duas datas distintas, 09/09/2025 e 10/09/2025, durante as quais foram monitoradas as condições da água do tanque. As temperaturas médias, medidas e corrigidas, bem como a densidade correspondente, estão apresentadas na Tabela 4. Esses parâmetros foram utilizados para assegurar a consistência dos resultados e a correta correção dos dados experimentais.

Tabela 4 – Condições da água durante os ensaios experimentais.

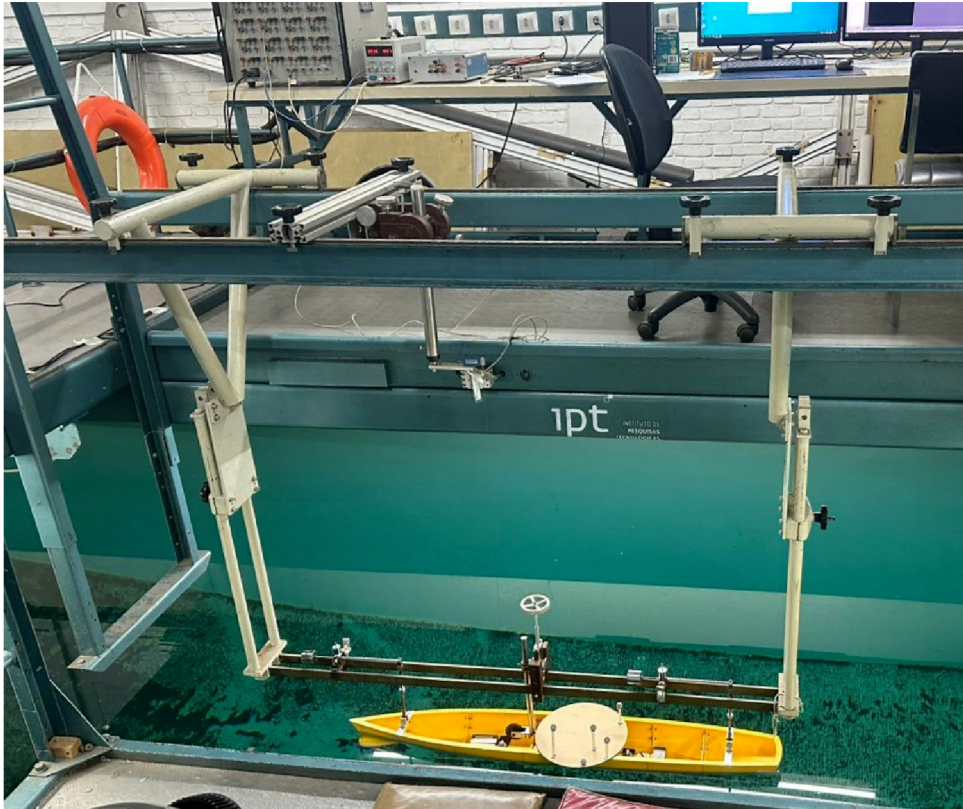
<b>Data</b>	<b>T. média (°C)</b>	<b>T. medida (°C)</b>	<b>T. corrigida (°C)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
09/09/2025	20	19,91	19,53	996,19
10/09/2025	20	19,79	19,41	996,21

Fonte: Autora (2025)

### 3.2.1 Aparelhagem e Instrumentação

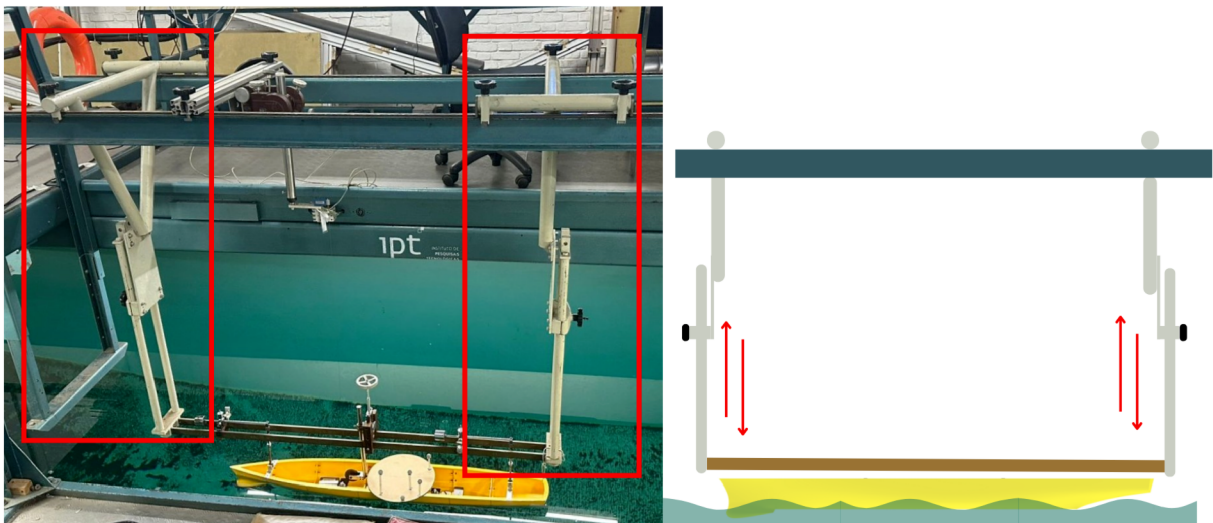
Para a realização dos ensaios foi utilizado um conjunto de equipamentos integrados ao carro de reboque do tanque, conforme ilustrado na Figura 14. O modelo foi essencialmente conectado ao braço de suportes vertical responsável por regular a altura conforme os diferentes modelos que são ensaiados no tanque, indicado na Figura 15.

Figura 14 – Configuração do Carro de Reboque



Fonte: Autora (2025)

Figura 15 – Configuração dos Braços de Suporte Verticais

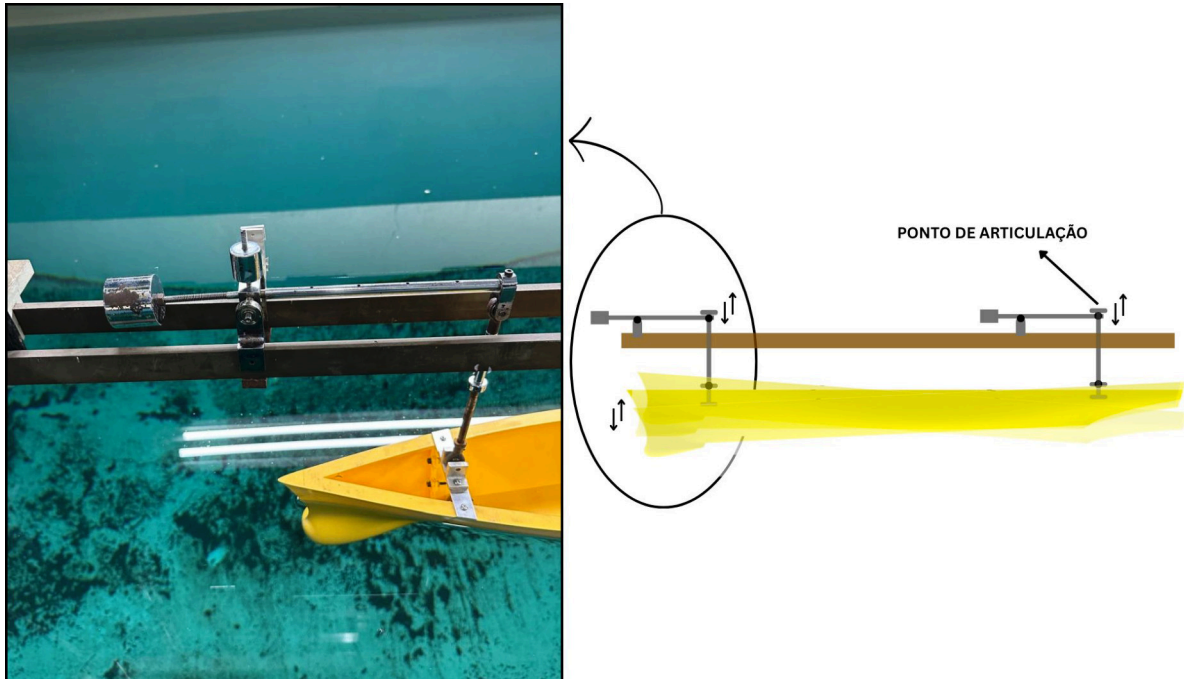


Fonte: Autora (2025)

Na parte inferior o modelo foi fixado por meio de braços articulados (Figura 16), que funcionam como elemento de ligação mecânica entre o casco e o carro dinâmico, transmitindo ao sistema de medição a força correspondente à resistência ao avanço. A configuração articulada desse braço permite deslocamentos de trim e afun-

damento, de modo que o modelo reproduza um comportamento mais próximo das condições reais de navegação, sem comprometer a precisão das medições.

Figura 16 – Braço articulado de ligação entre modelo e carro de reboque

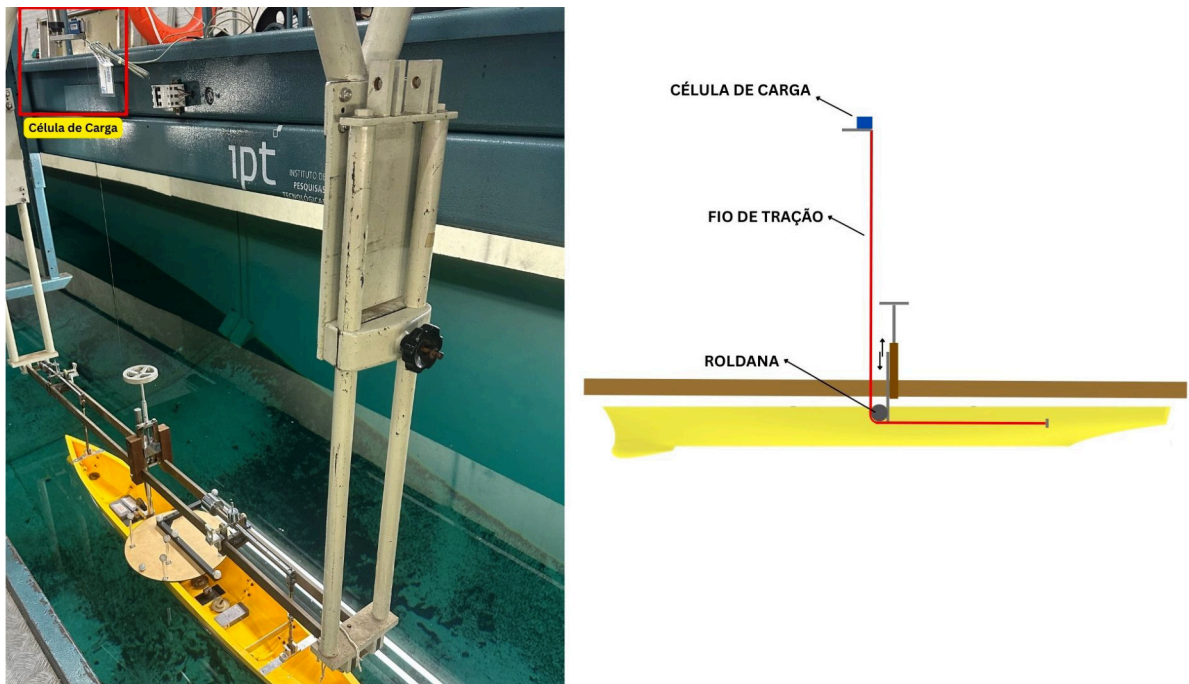


Fonte: Autora (2025)

Na extremidade superior, cada braço conecta-se a um contrapeso, cuja função é manter o equilíbrio do conjunto e minimizar esforços indesejados que poderiam interferir na medição pela célula de carga. Já na extremidade inferior, o braço é fixado ao modelo, assegurando a transmissão das forças hidrodinâmicas. Essa configuração garante que a embarcação não permaneça totalmente restrita, mas possa responder de forma limitada às solicitações do escoamento, tornando o ensaio mais representativo.

A aparelhagem localizada na região central do modelo consiste em uma haste vertical equipada com uma roldana na extremidade inferior, responsável por guiar o fio que conecta a embarcação à célula de carga posicionada na parte superior do carro de reboque. Esse fio é fixado próximo à popa do modelo e, ao passar pela polia, transmite o esforço de resistência ao avanço para a célula de carga. A altura da haste pode ser regulada por meio de uma roda de comando, garantindo o alinhamento adequado do fio e minimizando esforços laterais ou perdas por atrito que poderiam comprometer a precisão da medição, como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Guia regulável do fio de tração



Fonte: Autora (2025)

A medição da força de resistência ao avanço foi realizada por meio de uma célula de carga modelo MB-5, com capacidade de 5 lbf, instalada na parte superior do carro de reboque. Esse transdutor converte a força transmitida pelo cabo de tração em sinal elétrico, permitindo a aquisição de dados pelo sistema de instrumentação. A escolha desse modelo deve-se à sua sensibilidade e faixa de operação adequadas à escala do ensaio, garantindo medições confiáveis e compatíveis com as cargas esperadas. Como indicado na Figura 18, a célula de carga encontra-se posicionada de forma a registrar exclusivamente os esforços longitudinais transmitidos pelo modelo, minimizando interferências de componentes transversais ou verticais.

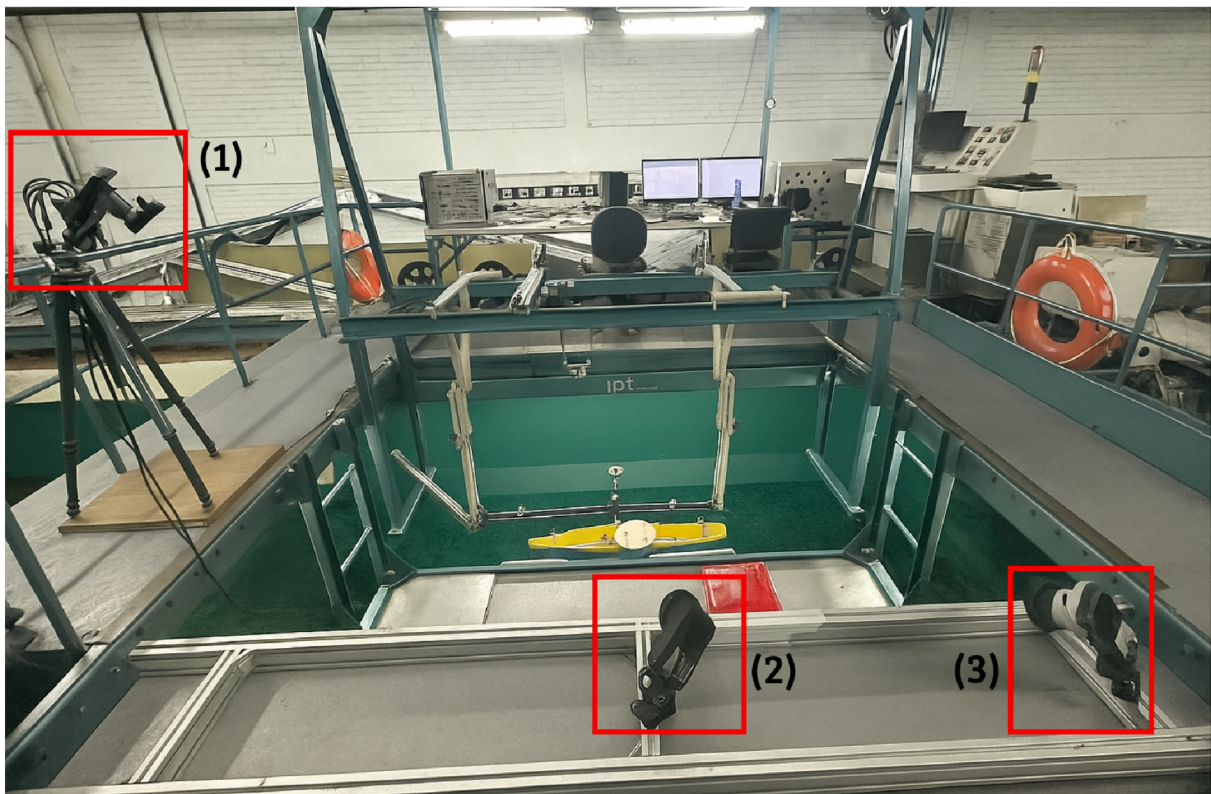
Figura 18 – Célula de Carga



Fonte: Autora (2025)

O movimento da embarcação durante os ensaios foi monitorado por meio de um sistema de aquisição óptica Qualisys, composto por três câmeras de alta precisão, indicado na Figura 19. Essas câmeras foram estrategicamente posicionadas no carro dinamométrico de modo a garantir a captura adequada dos alvos refletivos fixados no modelo. A configuração adotada possibilitou o rastreamento tridimensional do movimento do casco, permitindo a determinação das variações de posição e atitude da embarcação ao longo dos ensaios.

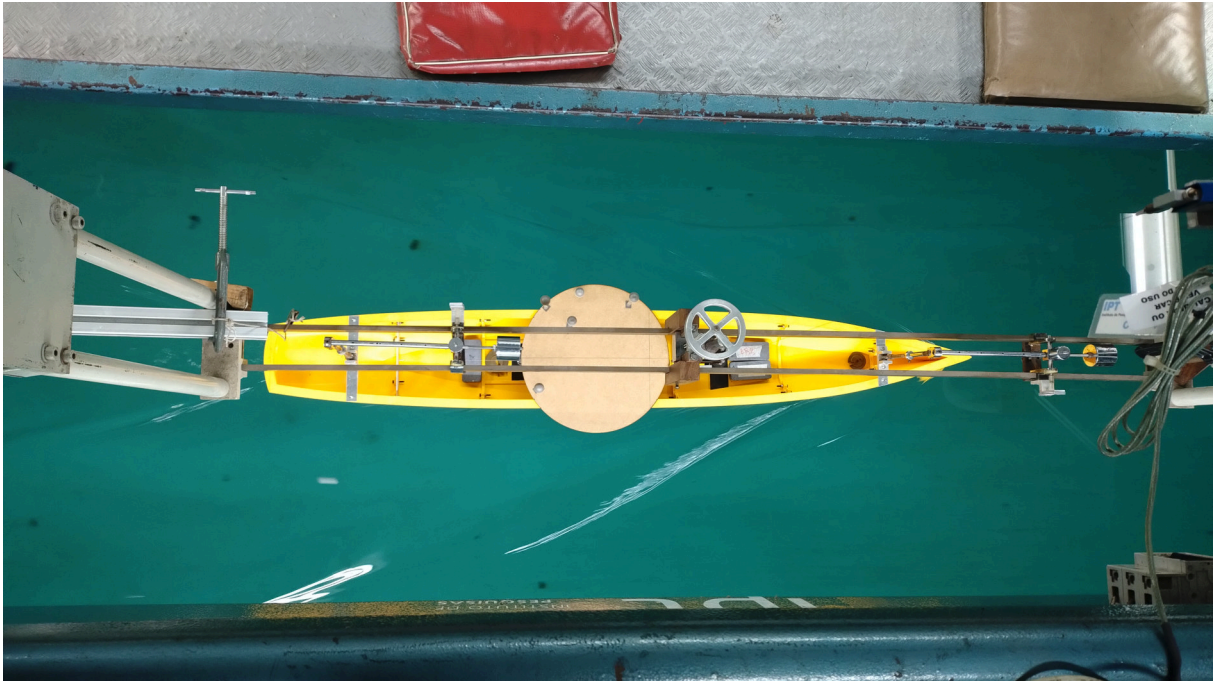
Figura 19 – Configuração do monitoramento óptico



Fonte: Autora (2025)

Os alvos esféricos foram fixados em pontos não colineares do casco, formando um sistema de referência sólido vinculado à embarcação, conforme ilustrado na Figura 20. Esses alvos funcionam apenas como marcadores, permitindo que o software rastreie o conjunto como um corpo rígido e obtenha as componentes de movimento (surge, sway e heave) e de atitude (roll, pitch e yaw) do modelo. Vale destacar que, embora esses parâmetros possam ser extraídos, eles não foram analisados neste trabalho, sendo registrados apenas para referência do movimento do casco durante os ensaios de reboque.

Figura 20 – Alvos posicionados no modelo



Fonte: Autora (2025)

### 3.2.2 Procedimento Experimental

Os ensaios de resistência ao avanço foram conduzidos, seguindo o mesmo conjunto de velocidades utilizado previamente nos testes realizados no CAC do LIFE. Inicialmente, o carro dinamométrico foi deslocado até a extremidade do tanque, de onde se iniciava cada corrida. O percurso de reboque era dividido em duas etapas de velocidade, demonstradas na Tabela 5: durante o primeiro minuto, o modelo era rebocado a uma velocidade constante predefinida; em seguida, a velocidade era elevada para o valor subsequente, sendo mantida por mais um minuto.

Após a conclusão de cada corrida, o carro retornava ao ponto de partida para a execução das próximas velocidades, repetindo-se o procedimento até que todas as condições de ensaio fossem avaliadas. Entre as corridas, foi adotado um intervalo de tempo destinado à estabilização da superfície livre, permitindo a dissipação das ondas geradas pelo movimento do modelo. Esse intervalo mostrou-se particularmente importante para as maiores velocidades, nas quais as perturbações provocadas na superfície do tanque eram mais significativas, podendo afetar a qualidade das medições subsequentes.

Os ensaios foram conduzidos em dois dias, totalizando catorze execuções (sete em cada dia), cada uma realizada em duas velocidades, como esquematizado na Tabela 5. Durante as corridas, eventuais anomalias, como vibrações excessivas ou soltura do suporte, foram registradas e resultaram na necessidade de repetição do ensaio correspondente.

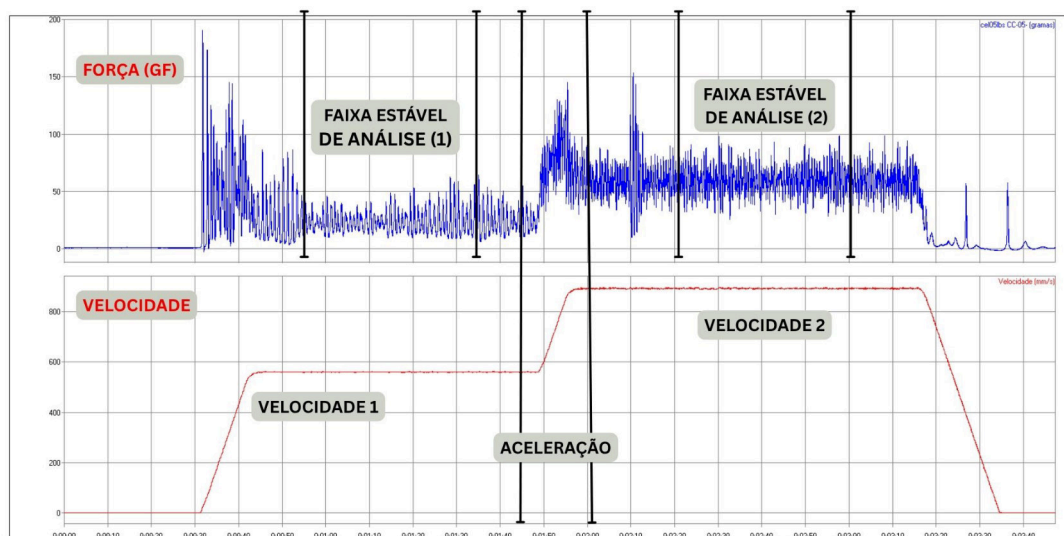
Tabela 5 – Velocidades utilizadas nos ensaios experimentais.

Corridas	V (m/s)
Corrida (1)	0,56
	0,89
Corrida (2)	0,61
	0,93
Corrida (3)	0,65
	0,98
Corrida (4)	0,70
	1,02
Corrida (5)	0,75
	1,07
Corrida (6)	0,79
	1,12
Corrida (7)	0,84
	1,16

Fonte: Autora (2025)

A aquisição e o processamento dos sinais de força e velocidade foram realizados utilizando o software AqDados e AqDAnalysis 7.5. Durante cada corrida experimental, o modelo permaneceu aproximadamente 1 minuto em regime permanente para cada velocidade, permitindo a estabilização do escoamento. No programa, foram extraídas as faixas de sinal mais estáveis. A média da força foi, então, calculada exclusivamente sobre essas janelas estáveis, conforme ilustrado na Figura 21, garantindo representatividade e reduzindo a influência de ruídos inerentes ao início e término de cada corrida.

Figura 21 – Exemplo de procedimento realizado no tratamento de dados adquiridos.



Fonte: Autora (2025)

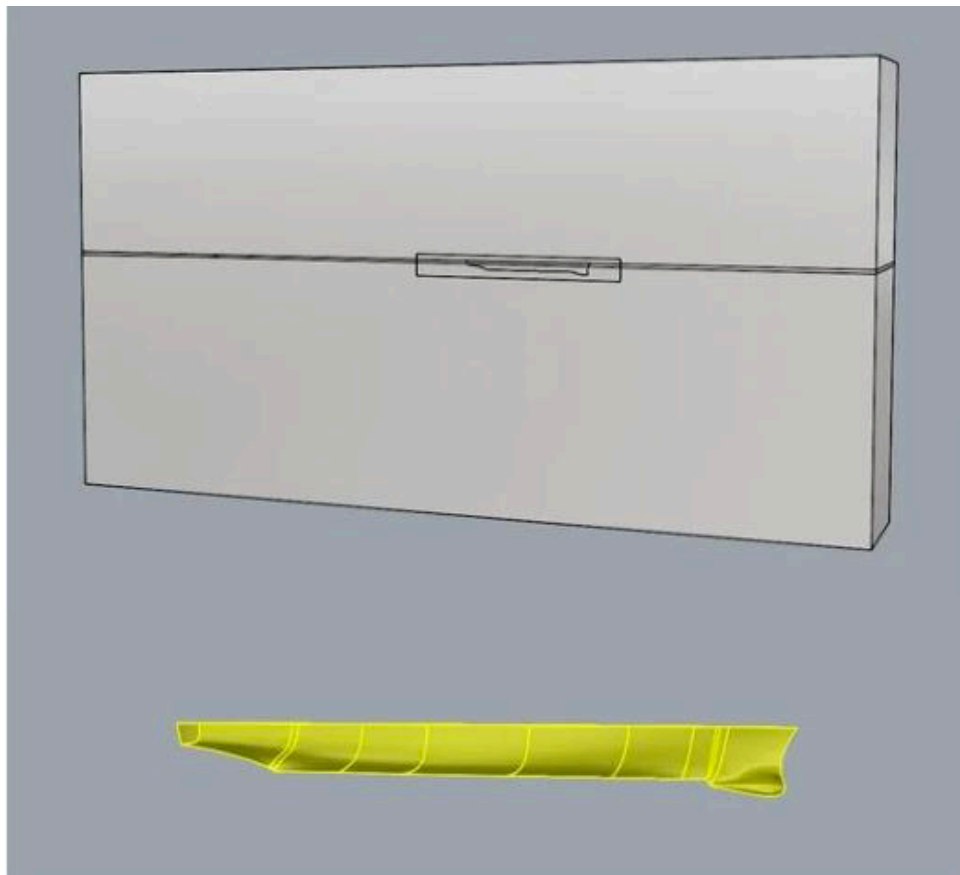
### 3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA (CFD)

#### 3.3.1 Geometria

A geometria utilizada na simulação numérica corresponde ao modelo DTMB-LIFE, importado para o programa Rhinoceros®, onde foi realizado o tratamento geométrico necessário para garantir o fechamento das superfícies, uma condição essencial para a correta geração da malha. Foram removidas pequenas descontinuidades e sobreposições, assegurando que o modelo estivesse completamente estanque (*watertight*) e apto para exportação ao ANSYS Fluent®.

Ainda no Rhinoceros®, foram definidos os domínios computacionais representativos do volume fluido ao redor do casco, conforme ilustrado na Figura 22. O domínio foi construído de forma simétrica em relação ao plano diametral, permitindo a simulação de apenas metade do casco e reduzindo o custo computacional. As dimensões seguiram as recomendações da ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024a) e de Araujo (2014), de modo a evitar interferência das fronteiras artificiais no campo de escoamento e seguem definidas na Tabela 6.

Figura 22 – Geometria do modelo DTMB-LIFE e domínio computacional.



Fonte: Autora (2025)

### 3.3.2 Discretização

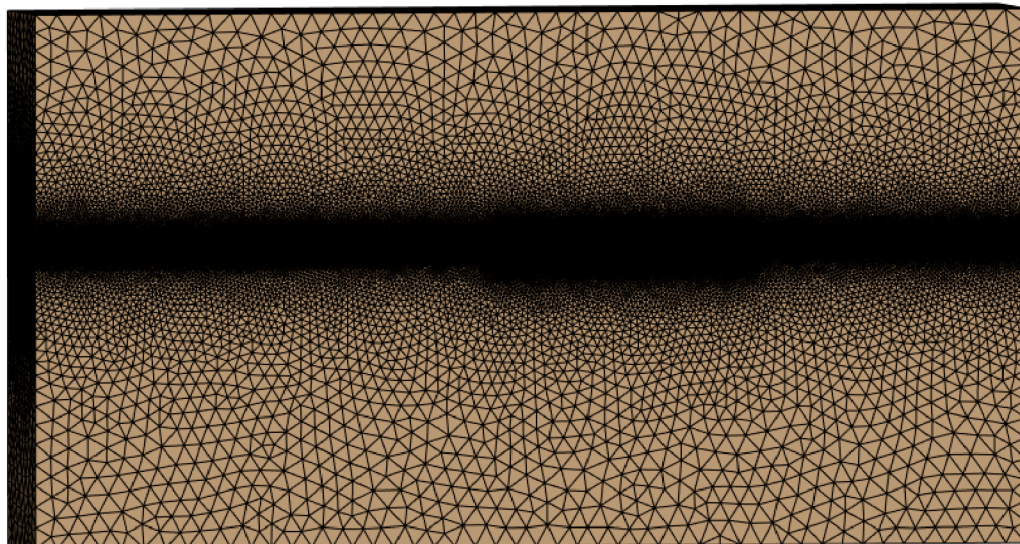
Tabela 6 – Configuração do domínio computacional para as simulações CFD.

Boundary	Posição	Condição de Contorno
Inlet	$2,1 L_{pp}$ à frente do modelo	Velocity Inlet
Outlet	$3,5 L_{pp}$ atrás do modelo	Pressure Outlet
Lateral	$1 L_{pp}$ a partir do plano de simetria	Slip Wall
Topo	$1,5 L_{pp}$ acima da superfície livre	Slip Wall
Fundo	$2 L_{pp}$ abaixo da superfície livre	No-Slip Wall
Simetria	Plano de simetria do casco	Symmetry

Fonte: Autora (2025)

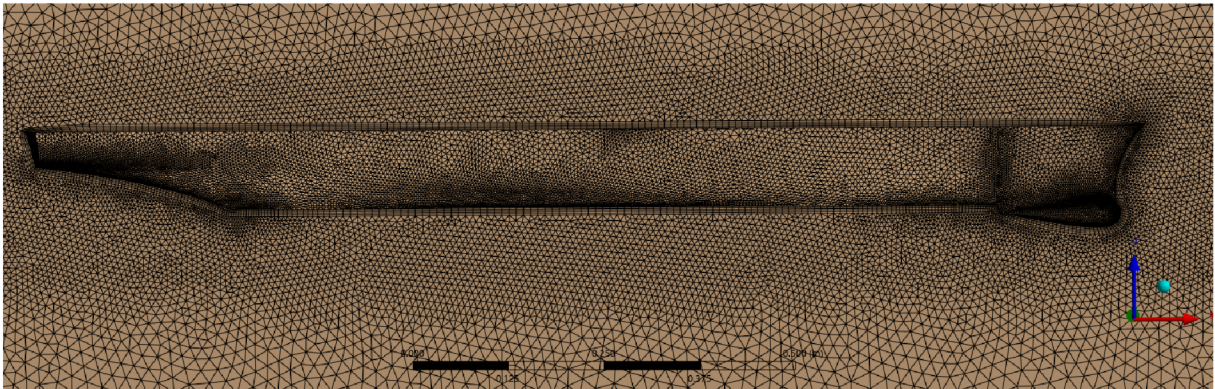
A discretização do domínio foi realizada no módulo *ANSYS Meshing* utilizando o método adequado à complexidade geométrica do casco. O refinamento foi conduzido, com a criação de regiões de influência (*Body of Influence*) nas áreas próximas ao casco, popa e esteira, garantindo maior resolução nas zonas de elevado gradiente de pressão e velocidade. A Figura 23 e Figura 24 mostram o refinamento obtido ao redor do casco, evidenciando a transição suave entre as regiões de maior e menor densidade de elementos.

Figura 23 – Refinamento da malha na região do casco com *Body of Influence*.



Fonte: Autora (2025)

Figura 24 – Refinamento da malha na região do casco.



Fonte: Autora (2025)

A qualidade da malha foi avaliada pelos critérios padrão do *ANSYS Meshing*, conforme a Tabela 7. Todos os indicadores permaneceram dentro dos limites recomendados para escoamentos externos, sem ocorrência de elementos inválidos. Os valores médios de *Element Quality* e *Orthogonal Quality* indicam boa regularidade dos elementos, enquanto o *Skewness* máximo (0,909) situa-se dentro da faixa aceitável para malhas tetraédricas refinadas. De modo geral, a malha apresenta qualidade adequada para simulações hidrodinâmicas com o modelo  $k-\omega$  SST.

A avaliação dos parâmetros seguiu as definições fornecidas pelo *ANSYS Meshing User's Guide* (ANSYS INC., 2024). O *Aspect Ratio* expressa a razão entre as dimensões características do elemento, indicando o grau de alongamento; valores reduzidos correspondem a elementos mais isotrópicos e menos propensos a gerar erros numéricos. O *Element Quality* sintetiza a regularidade geométrica do elemento, variando de 0 (elemento altamente distorcido) a 1 (forma ideal).

O *Orthogonal Quality* mede a ortogonalidade entre faces e vetores normais utilizados no cálculo de gradientes, sendo diretamente relacionado à difusão numérica e à estabilidade da solução, valores altos, perto de 1 são desejáveis. Por fim, o *Skewness* quantifica o desvio da forma do elemento em relação à forma ideal; valores baixos indicam menor distorção e maior confiabilidade numérica. Os resultados obtidos mostram que todos os índices se mantiveram dentro das faixas recomendadas pela literatura e pelo próprio software, confirmando que a malha gerada é adequada para as simulações RANS com o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST.

Tabela 7 – Indicadores de qualidade da malha gerada no *ANSYS Meshing*.

<b>Critério de Qualidade</b>	<b>Valor Médio</b>	<b>Valor Crítico</b>	<b>Limite Aceitável</b>
<i>Aspect Ratio</i>	1,783	27,847	< 35
<i>Element Quality</i>	0,854	0,027	> 0,05
<i>Orthogonal Quality</i>	0,797	0,091	> 0,05
<i>Skewness</i>	0,202	0,909	< 0,95

Fonte: Autora (2025)

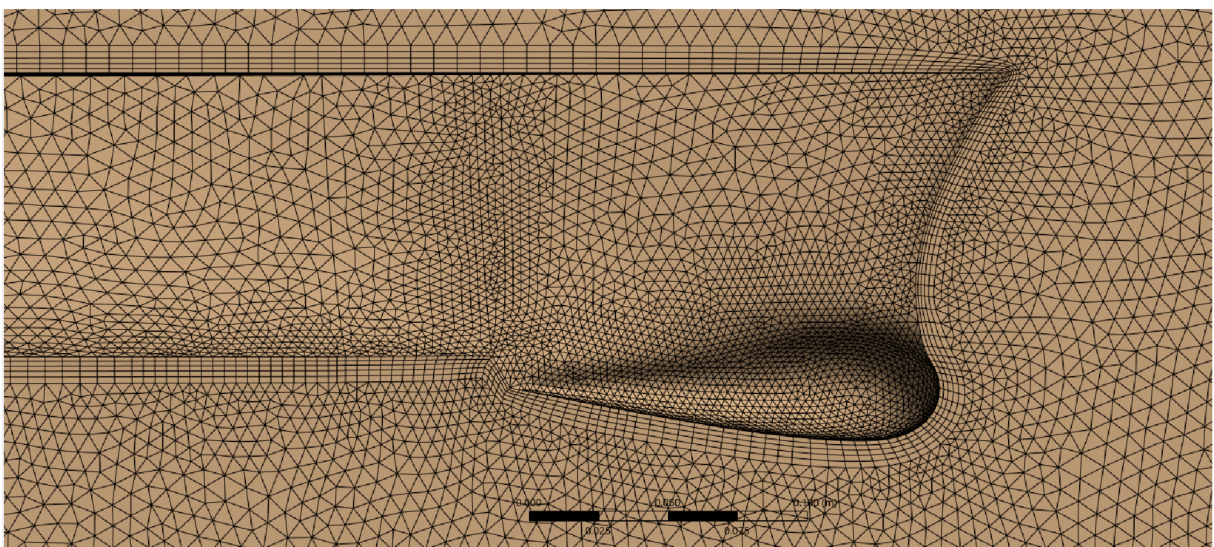
Dessa forma, a malha foi considerada adequada para prosseguir às análises de convergência e à simulação no ANSYS Fluent®, assegurando que os resultados numéricos não fossem comprometidos por distorções geométricas.

### 3.3.3 Camadas Prismáticas

Para correta resolução da camada limite, aplicaram-se cinco camadas prismáticas (*inflation layers*) sobre a superfície do casco, com razão de crescimento de 1,1 e espessura total de  $1 \times 10^{-2}$  m. Utilizou-se o algoritmo *Pre Inflation*, com ativação do modo *Layer Compression* para preservar a ortogonalidade das camadas em regiões de alta curvatura.

Essas camadas visam garantir a adequada transição entre os elementos prismáticos e tetraédricos, evitando distorções e assegurando a estabilidade numérica. A Figura 25 mostra o detalhamento do refinamento na proa, destacando a homogeneidade das camadas.

Figura 25 – Detalhamento da malha na região de proa com camadas prismáticas.

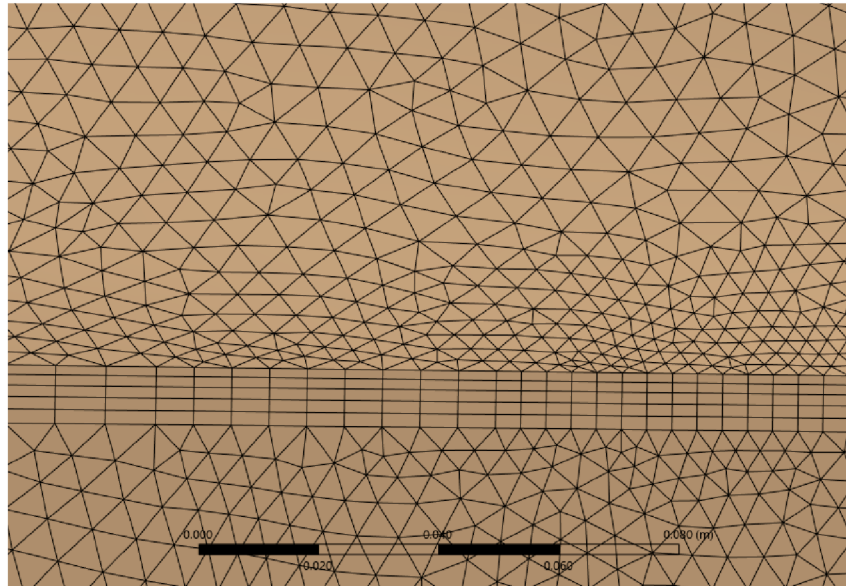


Fonte: Autora (2025)

A Figura 26 ilustra o detalhamento da região próxima à superfície do casco, evidenciando a formação das cinco camadas prismáticas aplicadas. Observa-se a

transição gradual entre as camadas prismáticas e os elementos tetraédricos do volume fluido, o que garante a captura adequada do gradiente de velocidade na subcamada viscosa e contribui para a estabilidade numérica da solução.

Figura 26 – Detalhamento da malha na região próxima ao casco, com destaque para as camadas prismáticas (*inflation layers*).



Fonte: Autora (2025)

### 3.3.4 Condições de contorno e configuração física

As condições de contorno e a configuração física da simulação foram definidas conforme as recomendações da ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC), 2024a), de modo a reproduzir o ambiente experimental e assegurar estabilidade numérica. O fluido adotado foi água doce a 25 °C, com densidade  $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade dinâmica  $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

A condição de entrada (*velocity inlet*) foi prescrita com velocidade uniforme de  $1.07 \text{ m s}^{-1}$ , valor correspondente ao ponto de divergência entre os resultados do CAC e do IPT, permitindo avaliar o comportamento do modelo numérico nessa faixa crítica. A condição de saída (*pressure outlet*) foi definida com pressão estática nula, garantindo escoamento livre e evitando reflexões artificiais.

As fronteiras laterais e superiores foram tratadas como paredes de deslizamento (*slip wall*), enquanto o fundo do domínio e o casco foram definidos como superfícies de não deslizamento (*no-slip*). O modelo de turbulência empregado foi o  $k-\omega$  SST, amplamente recomendado em aplicações navais por sua precisão na subcamada viscosa e robustez em regiões afastadas da parede.

A simulação foi conduzida em regime transiente, permitindo capturar a evolução temporal das forças e estabilizar as médias antes do pós-processamento. O passo de tempo foi ajustado para manter o número de Courant ( $Co$ ) inferior a 1 em

todo o domínio, garantindo estabilidade numérica conforme Versteeg e Malalasekera (2007).

Tabela 8 – Resumo das condições de contorno e parâmetros físicos utilizados na simulação CFD.

Parâmetro	Descrição / Valor adotado
Fluido	Água doce a 25 °C
Densidade ( $\rho$ )	997 kg m <sup>-3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	0.001 003 Pa s
Modelo de turbulência	$k-\omega$ SST
Regime de escoamento	Transiente
Velocidade de entrada ( <i>velocity inlet</i> )	1.07 m s <sup>-1</sup>
Condição de saída ( <i>pressure outlet</i> )	Pressão estática nula
Paredes laterais e superiores	<i>Slip wall</i>
Fundo do domínio e casco	<i>No-slip wall</i>
Critério de estabilidade	$Co < 1$ em todo o domínio
Tipo de solver	Baseado em pressão, implícito transiente

Fonte: Autora (2025)

### 3.3.5 Verificação e validação

#### 3.3.5.1 Convergência de Malha

O estudo de independência de malha foi conduzido por meio de duas simulações com diferentes densidades de discretização, denominadas Malha 2 (medium) e Malha 1 (fine). As configurações adotadas e os valores obtidos de resistência total ( $R_T$ ) estão apresentados na Tabela 9. A passagem de 29 milhões para 34 milhões de elementos resultou em uma variação de aproximadamente 6,7% na força total, enquanto a solução da Malha 2 apresentou comportamento estável e convergido, sendo utilizada como referência para as demais análises numéricas.

Tabela 9 – Estudo de independência de malha: elementos e força de resistência total.

Nível de malha	Elementos	$R_T$ (N)
Malha 2 (medium)	29 M	-0,751
Malha 1 (fine)	34 M	-0,805

Fonte: Autora (2025)

Embora o método formal recomendado pelo ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC) (2021c)) empregue três níveis de malha para a determinação da razão de convergência  $R$  e do erro numérico estimado, nesta pesquisa a terceira malha (*fine*) não pôde ser gerada devido a limitações de custo computacional e tempo de processamento. Ainda assim, a diferença observada entre as duas discretizações

utilizadas foi suficientemente pequena para indicar tendência de estabilização do valor de  $R_T$ . Assim, considera-se que a Malha 2 apresenta refinamento adequado para representar o fenômeno com confiabilidade dentro do escopo do presente trabalho.

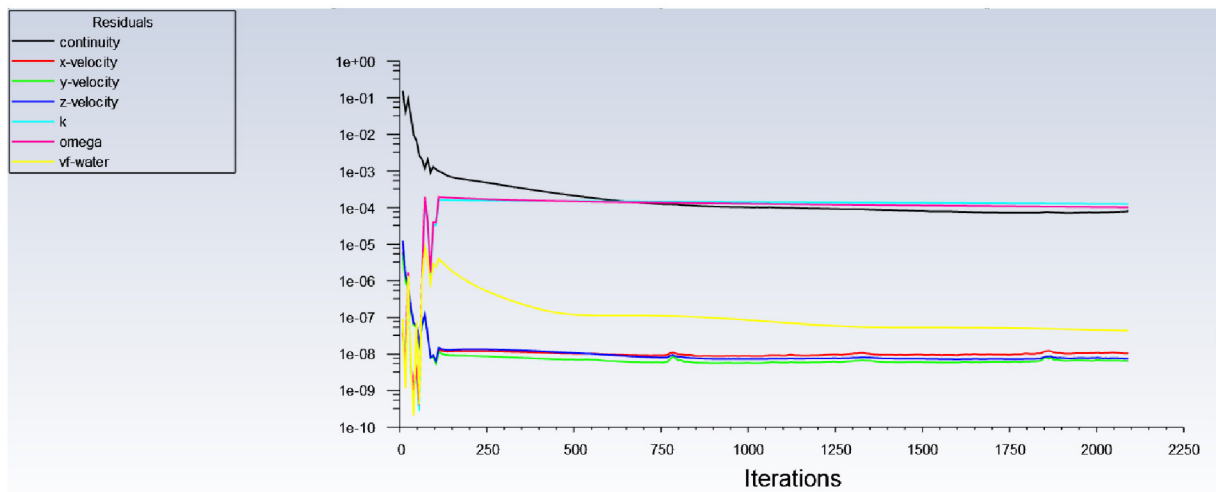
*Nota:* o sinal negativo de  $R_T$  decorre apenas da orientação adotada para o eixo de forças no setup numérico. As comparações foram realizadas em termos de magnitude. Como a simulação foi realizada com metade do casco, os valores de  $R_T$  apresentados já incluem o fator de multiplicação por 2, representando a resistência correspondente ao modelo completo.

### 3.3.5.2 Verificação Iterativa: Análise dos Resíduos

A verificação iterativa tem como objetivo avaliar se a solução numérica atingiu um estado suficientemente convergido, de modo que os erros iterativos sejam pequenos diante das demais fontes de erro numérico. Segundo as recomendações da ITTC (International Towing Tank Conference (ITTC), 2021c), uma simulação transiente ou estacionária somente pode ser considerada convergida quando: (i) os resíduos apresentam tendência decrescente e estabilizada; (ii) as forças hidrodinâmicas tornam-se praticamente constantes ao longo das iterações; e (iii) o número de Courant permanece inferior a 1 em todo o domínio, assegurando estabilidade temporal.

A Figura 27 apresenta o comportamento dos resíduos normalizados das equações de momento, continuidade e variáveis do modelo de turbulência ao longo das iterações para a Malha 1, cujo valor de resistência total estabilizou-se em aproximadamente 0,40 N (em termos de magnitude). Observa-se que todos os resíduos apresentam tendência decrescente e estabilizada, atingindo valores entre  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  após o período inicial de transientes numéricos.

Figura 27 – Comportamento dos resíduos ao longo das iterações da simulação transiente da Malha 1 para velocidade de 1.07m/s



Além da redução dos resíduos, foi verificada a estabilização da força de arrasto ao longo do tempo de simulação, condição indispensável para garantir que a média temporal represente o comportamento físico do escoamento. A força oscilou dentro de uma faixa inferior a 1% nas últimas janelas de tempo, o que, conforme a ITTC (2021), caracteriza regime estatisticamente estável.

Além da velocidade de referência (1,07 m/s), a mesma configuração numérica validada, incluindo domínio computacional, discretização espacial, modelo de turbulência, condições de contorno e critérios de convergência, foi aplicada às demais velocidades analisadas (0,84 m/s e 1,12 m/s). Todas as simulações foram conduzidas utilizando a Malha 2, considerada suficientemente refinada para representar o fenômeno com confiabilidade.

A única alteração realizada entre os casos foi o ajuste do *time step size* para a velocidade de 0,84 m/s, de forma a manter o número de Courant abaixo de 1 em todo o domínio e garantir estabilidade numérica. Assim, assegura-se que as diferenças observadas entre os resultados sejam atribuídas exclusivamente ao regime de escoamento de cada velocidade, e não a variações nos parâmetros numéricos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados no tanque de reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Mais do que caracterizar o desempenho hidrodinâmico do modelo, o objetivo principal foi coletar dados adicionais que permitissem uma comparação com os resultados do canal de água circulante do LIFE. Dessa forma, o ensaio no IPT serviu como uma segunda referência experimental, proporcionando subsídios para validar a coerência e consistência das medições realizadas.

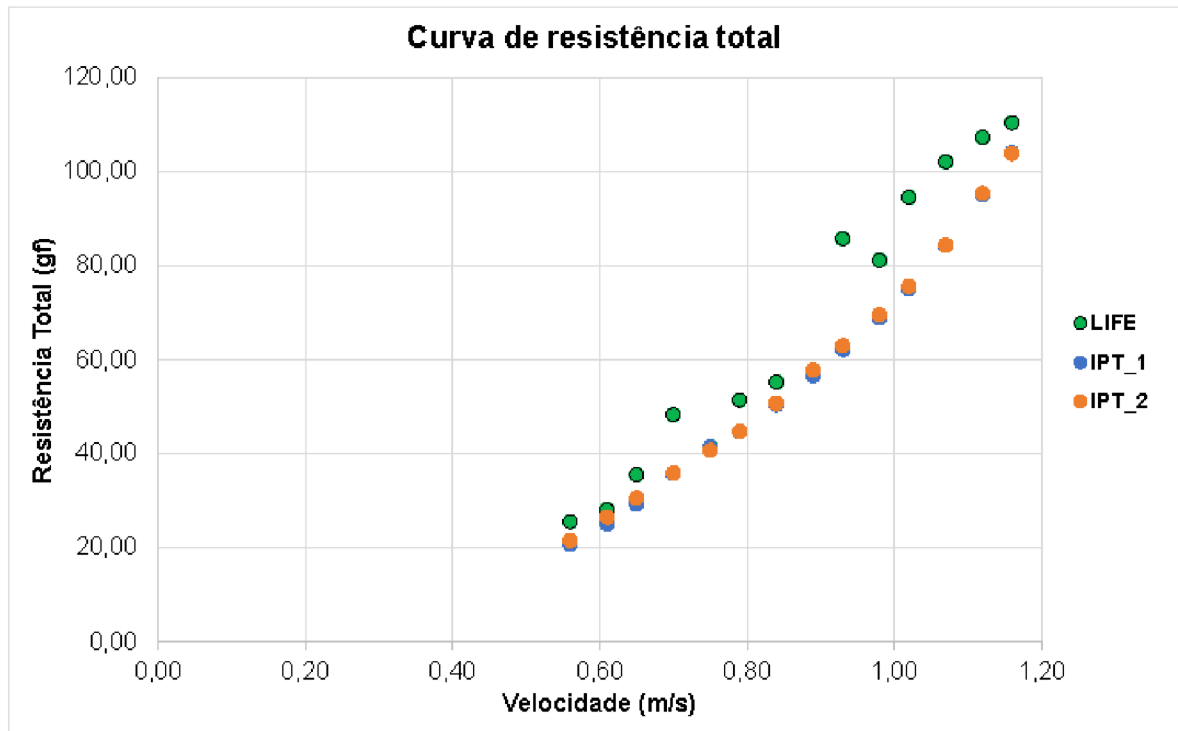
Os dados obtidos foram tratados e organizados de forma a evidenciar as tendências de desempenho em diferentes condições de operação. Sempre que pertinente, é realizada a comparação entre os resultados obtidos no IPT e aqueles provenientes dos testes conduzidos no Canal de Água Circulante do LIFE, permitindo avaliar a consistência dos dados e identificar eventuais variações entre as duas campanhas experimentais.

Conforme descrito na metodologia, algumas execuções foram repetidas devido a instabilidades detectadas no suporte dos braços, observadas nas corridas 1, 2 e 4. Essas instabilidades foram corrigidas nos ensaios subsequentes, com atenção especial nas repetições realizadas no segundo dia, garantindo a estabilidade do sistema de fixação e, conseqüentemente, a confiabilidade das medições.

Dessa forma, os dados coletados foram organizados em duas tabelas de ensaio, sendo a Tabela 11 referente ao primeiro dia e a Tabela 12 referente ao segundo dia. Ambas contêm o registro completo das execuções, incluindo os ensaios que precisaram ser repetidos, permitindo a análise detalhada da consistência dos resultados e o acompanhamento das correções implementadas durante os testes. Os dados se encontram no Anexo A deste trabalho.

A comparação entre as curvas de resistência ao avanço obtidas em diferentes condições experimentais permite observar diferenças relevantes no comportamento hidrodinâmico do modelo (Figura 28). O que se evidencia, é uma boa concordância entre os resultados obtidos, especialmente nas menores velocidades. Nas velocidades mais elevadas, observa-se uma diferença, com valores de resistência ligeiramente superiores no canal. Essa diferença, de pequena magnitude, não representa uma inconsistência, mas sim uma resposta natural às condições específicas de cada instalação experimental.

Figura 28 – Curvas de Resistência ao Avanço em diferentes ensaios



Fonte: Autora (2025)

Um fator possível a diferença de valores pode estar associado à geração e à reflexão de ondas superficiais, que aumenta conforme maiores velocidades. O CAC utilizado ainda não possui sistema de atenuação de ondas na superfície livre, o que pode levar à superposição parcial entre as ondas incidentes e refletidas. Esse fenômeno tende a provocar pequenas variações na distribuição de pressão ao longo do casco, resultando em valores ligeiramente mais altos de resistência aparente. Ainda assim, trata-se de um efeito inerente às condições físicas do ensaio, que não compromete a confiabilidade dos resultados, mas deve ser considerado na sua interpretação.

É importante destacar que o estudo de Andrade (2024) demonstrou que a intensidade turbulenta média do escoamento no canal permanece baixa e tende a diminuir com o aumento da velocidade, caracterizando um regime estável e uniforme. Dessa forma, a turbulência de fundo não exerce influência significativa sobre os resultados obtidos, reforçando a confiabilidade das medições.

As diferenças observadas entre o canal e o tanque de reboque podem, portanto, ser interpretadas como variações naturais decorrentes das condições de contorno na superfície livre de cada instalação. O desempenho do CAC mostra-se consistente para estudos de resistência ao avanço, demonstrando potencial para uso como ferramenta de ensaios tradicionais em tanque de reboque. Essa constatação reforça a importância de aprimorar metodologias e instrumentação específicas para o canal, consolidando seu papel na experimentação hidrodinâmica.

Além desses aspectos, algumas discrepâncias pontuais observadas na curva do CAC podem estar associadas a fatores inerentes à operação do canal, ainda não plenamente caracterizados. Entre eles, destaca-se a possível não uniformidade do perfil de velocidade na seção de testes, típica de canais de circulação, que altera sutilmente a distribuição de pressões ao longo do casco. Também é relevante considerar a sensibilidade da célula de carga em faixas de força reduzida, em que pequenas oscilações estruturais do suporte podem introduzir variação adicional nos valores medidos. Outro ponto é a dependência do ensaio ao tempo de estabilização após atingir cada patamar de velocidade, o que pode gerar pequenas diferenças entre repetições.

Essas fontes de variação não invalidam os resultados experimentais, mas indicam a importância de repetir sistematicamente os ensaios no CAC, ampliando o número de execuções por velocidade para melhor quantificar a variabilidade e aprimorar a consistência dos dados obtidos.

#### 4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Após a verificação numérica por meio dos estudos de convergência de malha e análise dos resíduos, a Malha 2 foi adotada como base para a realização das simulações principais. Três velocidades foram analisadas numericamente: 0,84 m/s, 1,07 m/s e 1,12 m/s, correspondentes às condições experimentais avaliadas no LIFE e no IPT.

A Tabela 10 apresenta os valores de resistência total obtidos numericamente para cada velocidade analisada.

Tabela 10 – Resultados numéricos de resistência total para as velocidades simuladas.

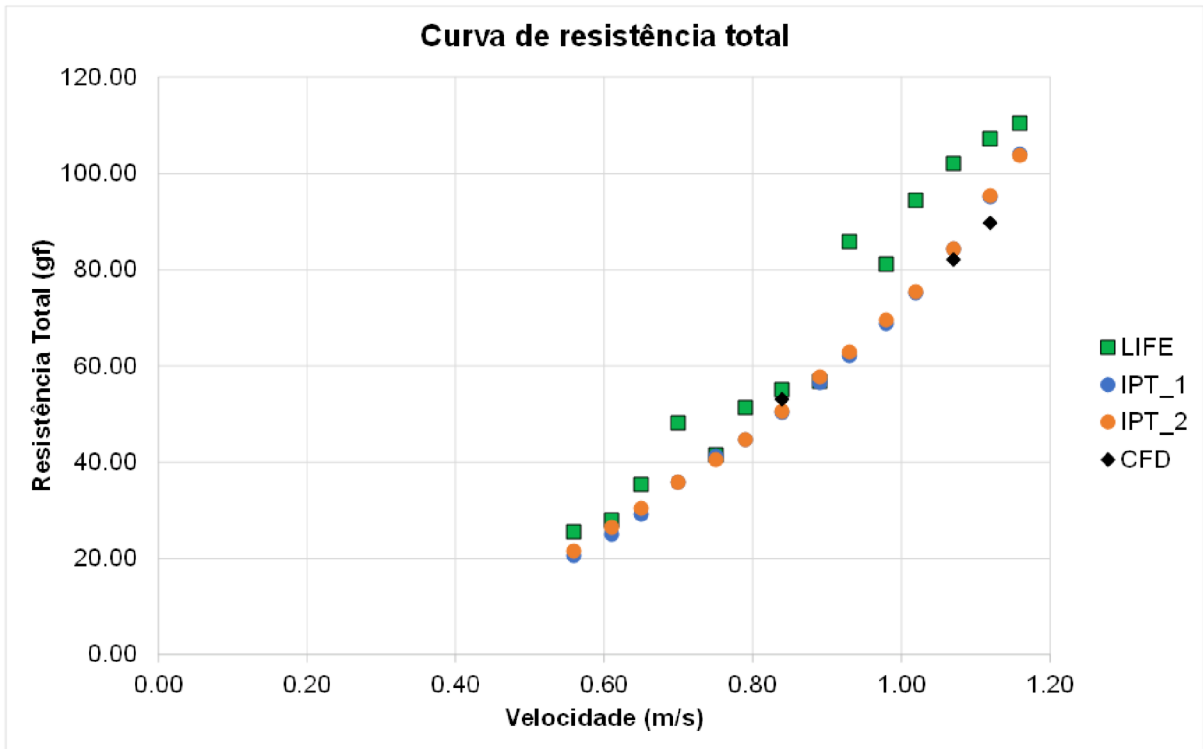
<b>Velocidade (m/s)</b>	<b><math>R_T</math> Numérico (gf)</b>	<b>Iterações</b>	<b>Tempo de Execução (h)</b>
0,84	53.97	5327	56
1,07	82.15	2000	30
1,12	88.73	2000	26

Fonte: Autora (2025)

Os resultados indicam que a resistência numérica apresenta tendência monotônica crescente com o aumento da velocidade, conforme esperado para um casco esbelto operando em regime não ventilado. Além disso, a ordem de grandeza das forças obtidas encontra-se compatível com aquelas medidas em ensaio físico, reforçando a consistência do modelo numérico.

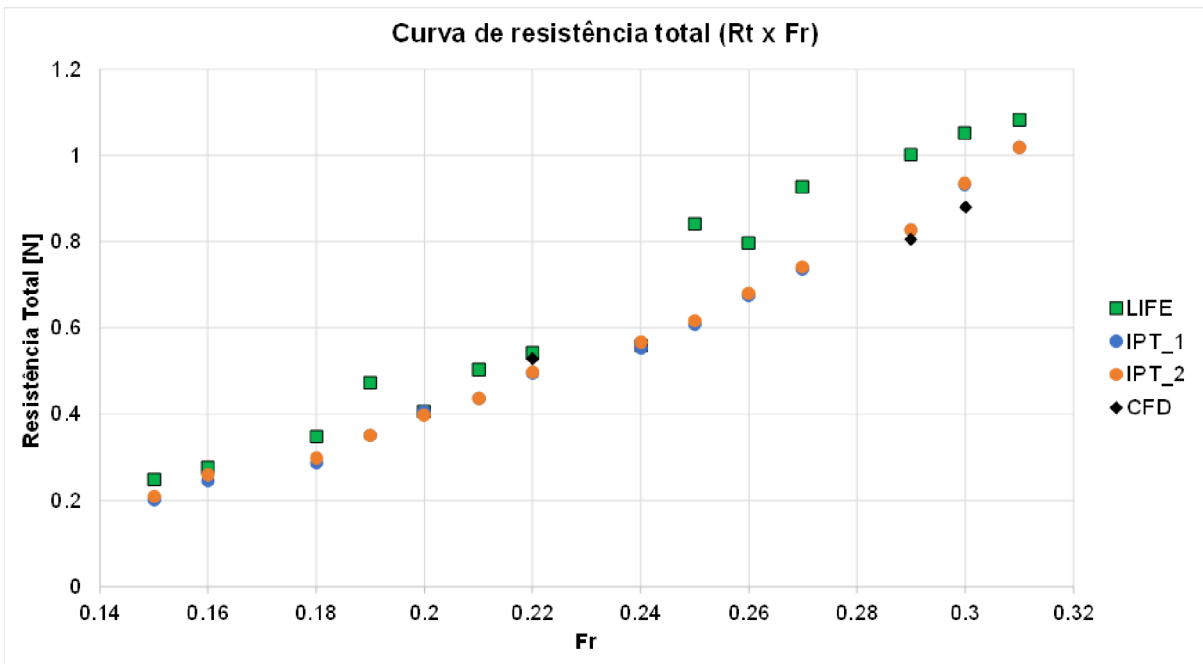
A Figura 29 ilustra a curva de resistência numérica em função da velocidade, permitindo uma comparação direta com os resultados experimentais, enquanto a Figura 30 representa as curvas em função do número de Froude e a força de resistência em Newtons [N]

Figura 29 – Curvas Experimentais e Numéricas de Resistência ao Avanço [gf x m/s].



Fonte: Autora (2025)

Figura 30 – Curvas Experimentais e Numéricas de Resistência ao Avanço [N x Fr]



Fonte: Autora (2025)

Ao comparar as simulações com os ensaios experimentais, observa-se que

os valores numéricos tendem a subestimar levemente a resistência obtida no canal e no tanque de reboque, especialmente nas maiores velocidades. Esse comportamento é comumente relatado na literatura e está associado, principalmente, a diferenças inerentes entre o ambiente experimental, que está sujeito a reflexões de ondas, pequenas imperfeições do modelo físico e efeitos de suporte, enquanto que o ambiente numérico, é idealizado com condições de contorno controladas.

Para a velocidade de 0,84 m/s, o escoamento apresentou um tempo de estabilização mais longo, em função da redução do time step size, o que demandou um número maior de iterações (5 327) até que a força resistiva atingisse comportamento estatisticamente estável. Embora a solução numérica tenha convergido, é possível que a dissipação completa dos transientes iniciais exigisse uma janela temporal ainda maior, o que pode ter contribuído para a leve superestimativa de resistência observada nessa velocidade.

Em velocidades mais baixas, o desenvolvimento da camada limite e a estabilização do campo de pressão ocorrem de forma mais lenta, exigindo janelas de simulação mais longas. Assim, é possível que a resistência obtida para 0,84 m/s permaneça ligeiramente acima do valor esperado devido ao tempo físico simulado relativamente curto, indicando que uma extensão adicional da simulação, com maior número de iterações, o que tenderia a produzir uma média temporal mais estabilizada.

Apesar dessas diferenças, a proximidade geral entre as curvas indica que o modelo baseado nas equações RANS com o modelo de turbulência SST conseguiu representar adequadamente o escoamento ao redor do casco, fornecendo previsões coerentes com as tendências experimentais.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência ao avanço do modelo DTMB-LIFE por meio da comparação entre os ensaios realizados no Canal de Água Circulante (CAC) do Laboratório LIFE e no Tanque de Reboque do IPT, consolidando uma etapa essencial do processo de calibração e validação da instalação experimental do CAC. A realização do ensaio no IPT, objetivo específico inicial, forneceu o conjunto de dados de referência necessário para essa análise comparativa. A partir desses resultados, o estudo buscou verificar se o CAC é capaz de reproduzir de forma consistente as tendências hidrodinâmicas observadas em uma instalação de referência, sobretudo nas faixas de baixas e médias velocidades, oferecendo evidências quantitativas sobre a coerência dos ensaios conduzidos no canal.

Os resultados experimentais do IPT foram comparados com aqueles previamente obtidos no CAC. A comparação direta das curvas revelou boa concordância nas menores velocidades e diferenças em velocidades mais elevadas, comportamento coerente com fenômenos esperados em canais de água circulante sem atenuação de ondas. Assim, o segundo objetivo específico, de comparar e examinar a coerência entre IPT e CAC, foi atendido, evidenciando que o canal do LIFE reproduz adequadamente a tendência hidrodinâmica principal, apesar das limitações estruturais inerentes ao seu projeto.

No que diz respeito à análise das diferenças observadas, verificou-se que as disparidades notadas entre CAC e IPT podem estar associadas à reflexão de ondas na superfície livre, a pequenas variações na uniformidade do escoamento e a limitações instrumentais, especialmente na faixa de medição da célula de carga. O estudo identificou essas possíveis causas de maneira fundamentada, cumprindo assim o terceiro objetivo específico, ainda que a determinação exata do peso relativo de cada efeito demande novos ensaios no canal.

No que se refere à simulação numérica, foi conduzido um estudo de verificação composto pela análise de resíduos e pelo estudo de independência de malha, realizado com duas discretizações devido a limitações de custo computacional. A Malha 1 demonstrou comportamento convergido e foi utilizada para simular três velocidades: 0,84 m/s, 1,07 m/s e 1,12 m/s. Os resultados obtidos apresentaram coerência interna e estabilidade numérica, possibilitando sua utilização como ferramenta complementar para interpretação dos fenômenos observados experimentalmente. Dessa forma, o CFD deixou de ter caráter apenas preliminar e passou a atuar como um apoio efetivo na análise física do problema, confirmando seu potencial na modelagem dos efeitos de confinamento e na investigação de variações de resistência entre CAC e IPT.

Em relação ao objetivo geral, que consiste em avaliar a correspondência entre

os resultados do CAC e do IPT e verificar a coerência do canal como ferramenta experimental, os resultados obtidos permitem concluir que o CAC apresenta bom desempenho nas faixas de baixas e médias velocidades. A concordância das tendências, associada à reprodutibilidade dos dados e ao alinhamento geral das curvas de resistência, indica que o canal é capaz de fornecer medições hidrodinâmicas consistentes dentro de seu escopo operacional atual.

Por outro lado, as discrepâncias identificadas nas maiores velocidades apontam para efeitos que ainda precisam ser investigados com maior profundidade, exigindo ensaios adicionais e modelagem numérica específica contemplando a geometria real do canal. Assim, embora a coerência entre CAC e IPT tenha sido demonstrada, o estudo também evidencia oportunidades concretas de aprimoramento, fundamentais para elevar a aplicabilidade do CAC em ensaios hidrodinâmicos.

## 5.1 PERSPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem estabelecer uma base sólida para a continuidade da caracterização hidrodinâmica do Canal de Água Circulante (CAC) do LIFE. Entretanto, diversos aspectos identificados ao longo da análise apontam para a necessidade de estudos complementares, capazes de ampliar a robustez metodológica e a aplicabilidade do canal em estudos de resistência ao avanço. As perspectivas apresentadas a seguir delineiam caminhos para o desenvolvimento futuro da instalação e para o aprofundamento científico na área.

Em primeiro lugar, recomenda-se a repetição dos ensaios experimentais no CAC, principalmente nas maiores velocidades, onde foram observadas diferenças mais sensíveis entre CAC e IPT. Essa nova campanha de ensaios deve contemplar monitoramento mais detalhado da superfície livre, registro de campos de onda e análise da uniformidade do escoamento ao longo da seção de testes. Além disso, recomenda-se a substituição da célula de carga atualmente utilizada por um transdutor com maior sensibilidade para forças de baixa magnitude. Estudos anteriores já haviam identificado esse componente como um ponto crítico da instrumentação, uma vez que o sinal apresentou elevada quantidade de ruído, comprometendo a precisão das medições especialmente na faixa inferior de resistência. A adoção de uma célula de carga mais sensível permitiria reduzir significativamente essas discrepâncias e melhorar a confiabilidade dos resultados experimentais.

Outro avanço importante consiste em aprofundar a caracterização hidrodinâmica do CAC na presença do casco, uma vez que os estudos de Andrade (2024) já forneceram uma avaliação detalhada da turbulência de fundo do canal em escoamento desobstruído. A presença do modelo modifica o campo de velocidades, a distribuição de pressões e a estrutura de turbulência, de modo que novos ensaios poderiam incluir medições específicas com o casco instalado para identificar quaisquer alterações.

Além disso, a implementação de um sistema de atenuação de ondas, ainda que em caráter experimental, constitui etapa essencial para compreender e mitigar os efeitos de reflexão na superfície livre. A avaliação comparativa do canal com e sem atenuador permitiria quantificar de forma objetiva o impacto desse componente sobre a resistência medida, especialmente nas maiores velocidades, onde tais efeitos se tornam mais pronunciados. Esses desenvolvimentos forneceriam subsídios técnicos fundamentais para futuras correções empíricas ou modelos semi-analíticos aplicáveis a campanhas experimentais no CAC.

Do ponto de vista numérico, um desenvolvimento natural deste estudo é a expansão das simulações CFD para incluir a geometria real do domínio do CAC, representando paredes laterais, superfície livre com ondas refletidas e profundidade do canal. Simulações desse tipo possibilitariam quantificar com precisão a magnitude dos efeitos de reflexão de ondas sobre o escoamento ao redor do casco. Além disso, estudos paramétricos envolvendo diferentes condições de contorno, tamanhos de domínio e modelos de turbulência ajudariam a estabelecer uma metodologia numérica padronizada para análises futuras. Recomenda-se também a realização de um estudo formal de independência de malha com três níveis, permitindo quantificar o erro numérico conforme as diretrizes da ITTC.

Outro desdobramento relevante refere-se à formulação de equações empíricas de correção e ajustes de confinamento baseadas nos resultados de CFD e nos ensaios que deverão ser futuramente repetidos no CAC. Ao estabelecer relações entre velocidade, regime de ondas, profundidade, largura do canal e parâmetros dimensionais do casco, seria possível desenvolver modelos capazes de ajustar os valores de resistência medidos no canal para aproximá-los daqueles obtidos em tanques de reboque convencionais. Para que tais equações tenham validade geral, torna-se fundamental estender os ensaios a diferentes geometrias de casco, contemplando variações de coeficientes volumétricos, formas de proa e popa e relações de esbeltez. A repetição sistemática desses testes permitiria verificar a robustez das correções propostas e identificar eventuais efeitos específicos do modelo DTMB-LIFE, garantindo que a metodologia desenvolvida seja aplicável a uma gama mais ampla de embarcações.

Por fim, a continuidade deste trabalho abre espaço para a formação de uma linha de pesquisa permanente em caracterização experimental e numérica de canais de água circulante, envolvendo estudantes de graduação e pós-graduação e promovendo avanços científicos de impacto direto na indústria naval e na comunidade acadêmica. Ao integrar medições experimentais, simulações numéricas de alta fidelidade e desenvolvimento metodológico.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Y. M.; YAAKOB, O. B.; RASHID, M. F. A.; ELBATRAN, A. H. Determining ship resistance using computational fluid dynamics (cfD). **Journal of Transport System Engineering**, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia, v. 2, n. 1, p. 20–25, 2015.

ANDRADE, E. de. **Caracterização da Velocidade e Intensidade Turbulenta do Canal de Água Circulante da UFSC Campus Joinville**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Naval) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

ANSYS INC. **ANSYS Meshing User's Guide**. Canonsburg, PA, 2024. Disponível em: software Ansys Help Desktop.

ARAUJO, M. F. B. P. **Estimativa do fator de forma e da resistência ao avanço de embarcações através da dinâmica dos fluidos computacional**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BASTEZINI, E. M. **Uma análise de perfis traseiros de pranchas de surf pelo método da fluidodinâmica computacional**. 2021. 81 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. Orientador: André Luís Condino Fugarra.

BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics (Second Edition)**. Oxford, UK.: Butterworth-Heinemann, 2012.

BIRK, L. **Fundamentals of Ship Hydrodynamics: Fluid Mechanics, Ship Resistance and Propulsion**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2019. ISBN 9781118855485.

BREDBERG, J. On two-equation eddy-viscosity models. **Chalmers University of Technology Publications**, 2001. Technical report, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Göteborg, Sweden.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

HAK, M. G. el. The water towing tank as an experimental facility: An overview. **Experiments in Fluids**, Springer-Verlag, v. 5, p. 289–297, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00281476>.

HAMI, K. Turbulence modeling a review for different used methods. **International Journal of Heat & Technology**, v. 39, n. 1, 2021.

International Towing Tank Conference (ITTC). **Example for Uncertainty Analysis of Resistance Tests in Towing Tank**. Switzerland, 2021. Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-02-02.1, 29th ITTC Specialist Committee on Validation of Water Resistance and Propulsion Test Results.

International Towing Tank Conference (ITTC). **ITTC – Recommended Procedures and Guidelines: 7.5-02-02-01 – Resistance Test**. Revision 05. [S.l.], 2021. Effective Date: 2021. Disponível em: <https://ittc.info/media/8118/75-02-02-01.pdf>.

International Towing Tank Conference (ITTC). **Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation**. Switzerland, 2021. Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-03-01-01, Revision 04.

International Towing Tank Conference (ITTC). **Practical Guidelines for Ship CFD Applications**. Switzerland, 2024. Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-03-02-03, Revision 02.

International Towing Tank Conference (ITTC). **Practical Guidelines for Ship Resistance CFD**. Switzerland, 2024. Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-03-02-04, Revision 02.

JANG, J.; CHOI, S. H.; AHN, S.-M.; KIM, B.; SEO, J. S. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 6, n. 2, p. 363–379, 2014. ISSN 2092-6782.

KREZELEWSKI, M.; WELNICKI, W. Extrapolation methods of resistance tests results of shipmodels. **International Shipbuilding Progress**, v. 29, n. 329, p. 8–12, 1982.

LEWIS, E. V. (Ed.). **Principles of Naval Architecture: Volume 2 – Resistance, Propulsion, and Vibration**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1988. Disponível em: <file:///mnt/data/principles-of-naval-architecture-vol-2-sname.pdf>.

MENTER, F.; HÜPPE, A.; MATYUSHENKO, A.; KOLMOGOROV, D. An overview of hybrid rans–les models developed for industrial cfd. **Applied Sciences**, MDPI, Basel, Switzerland, v. 11, n. 6, p. 2459, 2021.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.

NAIR, A. S.; MATHEW, M. P. Resistance estimation of ships using geko turbulence model in ansys fluent. *In*: **OCEANS 2022 - Chennai**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–9.

RINALDI, M. C. **Desenvolvimento de Modelo Por Meio de Impressão 3d para ensaios de resistência ao avanço em canal de água circulante**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2025.

TEY, W. Y.; ASAKO, Y.; CHE SIDIK, N. A.; GOH, R. Z. Governing equations in computational fluid dynamics: Derivations and a recent review. **Progress in Energy and Environment**, v. 1, p. 1–19, 2017.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Pearson Education Limited, 2007. ISBN 9780131274983. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RvBZ-UMpGzIC>.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3rd. ed. La Cañada, California: DCW Industries, 2006. ISBN 978-1928729082.

YANG, C.; LU, Z.; HAO, Z. et al. Numerical simulation and design optimization of a circulating water channel on hydrodynamic flow performance. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 29, p. 493–507, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00773-024-01003-5>.

YUSOF, M. F. M.; NASIR, A. N. K.; ISMAIL, R.; TAHIR, M. M.; SAAD, M. R. A short review on rans turbulence models. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 12, n. 9, p. 179–189, 2020.

## APÊNDICE A – DADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO TANQUE DO IPT

Tabela 11 – Resultados dos Ensaios DTMB-LIFE do primeiro dia de ensaio.

<b>Ensaio</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Rt Zero (gf)</b>	<b>Rt Medido (gf)</b>	<b>Rt Corrig. (gf)</b>
DTMB-LIFE-1	0,56	1,27	22,65	21,38
	0,89	1,27	58,51	57,24
DTMB-LIFE-1a	0,56	-0,37	20,24	20,61
	0,89	-0,37	56,16	56,53
DTMB-LIFE-2	0,61	1,38	27,77	26,39
	0,93	1,38	66,26	64,88
DTMB-LIFE-2a	0,61	-0,03	24,95	24,98
	0,93	-0,03	62,09	62,12
DTMB-LIFE-3	0,65	-0,28	28,87	29,15
	0,98	-0,28	68,58	68,86
DTMB-LIFE-4	0,70	-0,30	34,62	34,92
	1,02	-0,30	75,65	75,95
DTMB-LIFE-4a	0,70	-0,30	35,40	35,70
	1,02	-0,30	74,78	75,08
DTMB-LIFE-5	0,75	-0,35	40,96	41,31
	1,07	-0,35	83,86	84,21
DTMB-LIFE-6	0,79	-0,47	44,10	44,57
	1,12	-0,47	94,56	95,03
DTMB-LIFE-7	0,84	-0,61	49,76	50,37
	1,16	-0,61	103,33	103,94

Tabela 12 – Resultados dos Ensaios DTMB-LIFE do segundo dia de ensaio.

<b>Ensaio</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Rt Zero (gf)</b>	<b>Rt Medido (gf)</b>	<b>Rt Corrig. (gf)</b>
DTMB-LIFE-1b	0,56	0,35	21,45	21,10
	0,89	0,35	57,71	57,36
DTMB-LIFE-2b	0,61	0,42	26,41	25,99
	0,93	0,42	62,91	62,49
DTMB-LIFE-3b	0,65	0,40	30,48	30,08
	0,98	0,40	69,51	69,11
DTMB-LIFE-4b	0,70	0,26	35,80	35,54
	1,02	0,26	75,55	75,29
DTMB-LIFE-5b	0,75	0,14	40,61	40,47
	1,07	0,14	84,29	84,15
DTMB-LIFE-6b	0,79	-0,05	44,62	44,67
	1,12	-0,05	95,34	95,39
DTMB-LIFE-7b	0,84	-0,06	50,66	50,72
	1,16	-0,06	103,83	103,89

## APÊNDICE B – TABELA DE DADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE RESISÊNCIA

Tabela 13 – Coeficiente de resistência total para os ensaios no IPT e no CAC/LIFE.

<b>Fn</b>	<b>V (m/s)</b>	<b><math>C_T</math> IPT[1]</b>	<b><math>C_T</math> IPT[2]</b>	<b><math>C_T</math> LIFE</b>
0,15	0,56	0,00439	0,00457	0,00536
0,16	0,61	0,00448	0,00474	0,00504
0,18	0,65	0,00461	0,00482	0,00550
0,19	0,70	0,00486	0,00488	0,00652
0,20	0,75	0,00490	0,00482	0,00492
0,21	0,79	0,00477	0,00477	0,00541
0,22	0,84	0,00477	0,00479	0,00520
0,24	0,89	0,00476	0,00486	0,00480
0,25	0,93	0,00480	0,00486	0,00654
0,26	0,98	0,00479	0,00483	0,00561
0,27	1,02	0,00482	0,00485	0,00596
0,29	1,07	0,00491	0,00492	0,00590
0,30	1,12	0,00506	0,00507	0,00569
0,31	1,16	0,00516	0,00515	0,00540

Fonte: Autora (2025).

Tabela 14 – Força de resistência total para os ensaios no IPT e no CAC/LIFE.

<b>Fn</b>	<b>V (m/s)</b>	<b><math>R_{T1}</math> (N)</b>	<b><math>R_{T2}</math> (N)</b>	<b><math>R_T</math> LIFE (N)</b>
0,15	0,56	0,2021	0,2104	0,2493
0,16	0,61	0,2450	0,2590	0,2747
0,18	0,65	0,2859	0,2989	0,3477
0,19	0,70	0,3501	0,3511	0,4728
0,20	0,75	0,4051	0,3982	0,4060
0,21	0,79	0,4371	0,4376	0,5037
0,22	0,84	0,4940	0,4968	0,5419
0,24	0,89	0,5544	0,5659	0,5572
0,25	0,93	0,6092	0,6169	0,8406
0,26	0,98	0,6753	0,6817	0,7954
0,27	1,02	0,7363	0,7409	0,9265
0,29	1,07	0,8258	0,8266	1,0017
0,30	1,12	0,9319	0,9350	1,0523
0,31	1,16	1,0193	1,0182	1,0827

Fonte: Autora (2025).

## APÊNDICE C – DADOS DOS SINAIS DA CÉLULA DE CARGA DO ENSAIO REALIZADO NO IPT

