

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

MATEUS ALVES FARAH

METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO VISCOSA DE  
UMA EMBARCAÇÃO DA SÉRIE 60 UTILIZANDO CFD (OPENFOAM)

Joinville  
2021

MATEUS ALVES FARAH

METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO VISCOSA DE  
UMA EMBARCAÇÃO DA SÉRIE 60 UTILIZANDO CFD (OPENFOAM)

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

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville  
2021

## RESUMO

Motivado pela popularização das ferramentas de análise baseadas na mecânica dos fluidos computacional, apresenta-se o desenvolvimento de um modelo numérico especificamente construído para determinar a resistência ao avanço viscosa de uma embarcação mercante que navega a velocidade constante. A metodologia proposta utiliza a ferramenta gratuita e de código aberto, OpenFOAM, e foi concebida para ser executada em computadores de médio porte, disponíveis para a grande maioria dos pesquisadores, arquitetos e projetistas navais. A verificação consistiu em diversas análises paramétricas que buscam quantificar a influência dos diversos parâmetros do modelo numérico na qualidade da resposta e no custo computacional da simulação. Por outro lado, a validação foi realizada comparando-se os resultados obtidos com os dados experimentais da Série 60. A metodologia desenvolvida foi empregada na análise do modelo 4212W da Série 60, o qual foi analisado para velocidades variando entre os números de Froude de 0,15 e 0,36. Os resultados mostraram diferenças inferiores a 3% para todo o espectro de velocidades analisado.

**Palavras-chave:** OpenFOAM. CFD. Resistência ao avanço viscosa. Série 60.

## ABSTRACT

Motivated by the popularization of analysis tools based on the computational fluid mechanics, it presents the development of numerical model built specifically to determinate the viscous drag resistance of a merchant ship that navigates on constant velocity. The proposed methodology utilizes an open code free tool, OpenFOAM, and it was conceived to be executed by average capacity computers, available to most of the naval researchers, architects and designers. The verification was based on diverse parametrical analysis that seek to quantify the influence of the various numerical model parameters regarding the response speed and the simulation computational cost. On the other hand, the validation was realized by comparing the obtained results with the Serie 60 experimental data. The developed methodology was spent on the 4212W model analysis of Serie 60, which was analysed for speeds varying between the Froude numbers of 0,15 and 0,36. The results have shown differences inferior to 3% for the entire specter of analysed speeds.

**Keywords:** OpenFOAM. CFD. Viscous Drag Resistance. Series 60.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus amigos e professores que conheci e convivi ao longo do curso de engenharia naval.

Ao Agustinho José Dalprá, pelos anos que compartilhamos dividindo apartamento, além de apoio na execução dessa monografia.

Ao Lucas Barbosa, Gabriel Claay, Giovanni Toresan, Laís Siqueira e Felipe Leme, que muitas vezes ouviram minhas frustrações e reflexões ao longo do desenvolvimento da monografia, e que muito me ajudaram, seja discutindo sobre o assunto ou me auxiliando na escrita do TCC.

Muito obrigado ao Eduardo de Bittencourt, que me ajudou muito ao longo do processo de aprendizagem, através da troca de informações sobre o OpenFOAM e CFD em geral.

Quero agradecer imensamente ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, pela partilha de conhecimento ao longo da faculdade, pela colaboração intensa na elaboração desse trabalho, com maestria e paciência.

À equipe do OpenFOAM e seus usuários, pela constante atualização e compartilhamento dos códigos cada vez mais sofisticados.

Ao Eng. Ricardo Paris Gasparini, pela troca de conhecimentos associado a CFD e pela incansável troca de mensagens que auxiliaram na calibração do modelo aqui apresentado.

Aos colegas do Fórum CFD Online pelas valiosas contribuições, e a empresa SIMSCALE, que apoiou esse trabalho fornecendo uma licença estudantil de seu sistema, além de me darem suporte nas dúvidas e no manuseio da plataforma.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma genérico do algoritmo SIMPLE . . . . .	20
Figura 2 – Cascata de energia em um escoamento turbulento . . . . .	22
Figura 3 – Comportamento turbulento do campo de velocidades . . . . .	23
Figura 4 – Características dos métodos para captação da turbulência . . . . .	24
Figura 5 – Diferenças na captação dos efeitos turbulentos . . . . .	25
Figura 6 – Velocidade em função da distância da parede . . . . .	28
Figura 7 – Transição de regime laminar para turbulento em placa plana . . . . .	28
Figura 8 – Perfil típico da camada limite turbulenta . . . . .	30
Figura 9 – Camadas adicionais para captação do gradiente de velocidades . . . . .	31
Figura 10 – Tipos de tratamento da camada limite . . . . .	32
Figura 11 – Adequação da função de Spalding . . . . .	33
Figura 12 – Decomposição da força de arrasto . . . . .	35
Figura 13 – Metodologia para a realização do trabalho . . . . .	41
Figura 14 – Etapas de uma simulação no OpenFOAM . . . . .	42
Figura 15 – Estrutura básica de arquivos de uma simulação no OpenFOAM . . . . .	42
Figura 16 – Fluxograma utilizado no desenvolvimento das análises . . . . .	44
Figura 17 – Sistema de coordenadas utilizado nas simulações . . . . .	47
Figura 18 – Nuvem de pontos do modelo 4212W . . . . .	48
Figura 19 – Plano de balizas do modelo 4212W . . . . .	48
Figura 20 – Curvas auxiliares para geração da superfície . . . . .	49
Figura 21 – Superfície fechada do modelo 4212W . . . . .	49
Figura 22 – Comparação entre SACs para o modelo 4212W de 400 pés . . . . .	50
Figura 23 – Dimensões do domínio computacional . . . . .	53
Figura 24 – Domínio computacional discretizado . . . . .	54
Figura 25 – Processo de refino de uma malha base hexaédrica . . . . .	55
Figura 26 – Lógica do parâmetro <i>includedAngle</i> . . . . .	56
Figura 27 – Arestas capturadas pelo recurso <i>FeatureEdges</i> . . . . .	57
Figura 28 – Vista em perspectiva da malha . . . . .	59
Figura 29 – Detalhamento das regiões de refino da malha . . . . .	60
Figura 30 – Refino da malha base na proa do casco . . . . .	60
Figura 31 – Malha conformada na proa da embarcação . . . . .	62
Figura 32 – Distância nodal e altura do primeiro elemento junto a parede . . . . .	63
Figura 33 – Problemas na construção da camada limite na popa . . . . .	65

Figura 34 – Modificação da geometria da popa na linha de base . . . . .	65
Figura 35 – Adição de elementos na popa após o arredondamento . . . . .	66
Figura 36 – Malha na popa obtida com o SIMSCALE . . . . .	67
Figura 37 – Adição de camadas na proa . . . . .	68
Figura 38 – Malha no plano de linha d'água na região da proa . . . . .	69
Figura 39 – Malha no plano de linha d'água na região da popa . . . . .	69
Figura 40 – Fluxograma para geração da malha . . . . .	70
Figura 41 – Resíduos (malha com 6 camadas) . . . . .	83
Figura 42 – Comportamento oscilatório dos resíduos (malha com 6 camadas) .	84
Figura 43 – Convergência do Cd (malha com 6 camadas) . . . . .	84
Figura 44 – Campo de velocidade na direção do avanço . . . . .	85
Figura 45 – Desenvolvimento da camada limite . . . . .	86
Figura 46 – Campo de pressão . . . . .	86
Figura 47 – Distribuição de k . . . . .	87
Figura 48 – Distribuição de $\omega$ . . . . .	87
Figura 49 – Distribuição de $\nu_t$ . . . . .	87
Figura 50 – Forças de pressão (malha com 6 camadas) . . . . .	88
Figura 51 – Forças friccionais (malha com 6 camadas) . . . . .	89
Figura 52 – Valor do $y^+_{medio}$ convergido . . . . .	90
Figura 53 – Convergência do Cd com base no método GCI . . . . .	93
Figura 54 – Influência do refino da malha no tempo de simulação . . . . .	94
Figura 55 – Influência do aumento do número de camadas junto ao casco . . .	95
Figura 56 – Curva de Cd e Cf em função de Fr . . . . .	98
Figura 57 – Fator de forma para Fr entre 0,09 e 0,16 . . . . .	100
Figura 58 – Fator de forma para Fr entre 0,07 e 0,18 . . . . .	100
Figura 59 – $R_f$ e $R_{pv}$ (OpenFOAM) . . . . .	103
Figura 60 – Comparação da resistência ao avanço entre OpenFOAM e Série 60	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de $y^+$ associados às subcamadas da camada limite	31
Tabela 2 – Comparação das características hidrostáticas	51
Tabela 3 – Dimensões do domínio computacional	52
Tabela 5 – Discretização do domínio computacional	54
Tabela 6 – Declaração dos níveis e regiões de refino	58
Tabela 7 – Dimensões da região da esteira	58
Tabela 8 – Parâmetros relacionados à conformação da malha	61
Tabela 9 – Parâmetros relacionados com a qualidade da malha	61
Tabela 10 – Parâmetros de qualidade de malha entre SIMSCALE e OpenFOAM	67
Tabela 11 – Eficiência na adição de camadas entre SIMSCALE e OpenFOAM	68
Tabela 12 – Variáveis associadas ao arrasto viscoso de embarcações	72
Tabela 13 – Condições de contorno e condições iniciais	75
Tabela 14 – Dados de controle da simulação	76
Tabela 15 – Esquemas de discretização	77
Tabela 16 – Valores de relaxação e tolerâncias adotados	78
Tabela 17 – Estudo de sensibilidade do domínio computacional	81
Tabela 18 – Estudo de sensibilidade dos parâmetros turbulentos	81
Tabela 19 – Valores das variáveis do escoamento nos contornos	85
Tabela 20 – Componente Z da força de pressão para velocidades diferentes	89
Tabela 21 – Configurações das malhas utilizadas na análise do GCI	91
Tabela 22 – Informações das malhas para aplicação do GCI	91
Tabela 23 – Resultados relativos ao método GCI	93
Tabela 24 – Características do estudo referente a discretização da camada limite	95
Tabela 25 – Resultados do estudo de sensibilidade da camada limite	96
Tabela 26 – Análise da influência do número de camadas modeladas na $R_f$	97
Tabela 27 – Análise dos coeficientes angulares das retas analisadas	99
Tabela 28 – Dados experimentais do modelo 4212W extrapolados para 4,5 m	102
Tabela 29 – Parâmetros para as simulações de diferentes velocidades	103
Tabela 30 – Resultados das simulações utilizando OpenFOAM	104
Tabela 31 – Erros relativos entre OpenFOAM e Série 60	105
Tabela 32 – Comparação dos resultados referentes a $R_f$	106

## **LISTA DE SIGLAS**

ATTC American Towing Tank Conference

CFD Computacional Fluid Dynamics

DNS Direct Numerical Simulation

GCI Grid-Convergence Index

GPL General Public License

ITTC International Towing Tank Conference

LES Large Eddy Simulation

OBJ Wavefront Object

OpenFOAM Open-source Field Operation And Manipulation

RANS Reynolds-averaged Navier–Stokes

SST Shear Stress Transport

STL Stereolithography

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{u}$	Campo de velocidade do escoamento	$[m/s]$
$\rho$	Massa específica do fluido	$[kg/m^3]$
$x$	Coordenada longitudinal do sistema cartesiano	$[m]$
$y$	Coordenada transversal do sistema cartesiano	$[m]$
$z$	Coordenada vertical do sistema cartesiano	$[m]$
$p$	Campo de pressão	$[Pa]$
$u$	Componente longitudinal do campo de velocidade	$[m/s]$
$v$	Componente transversal do campo de velocidade	$[m/s]$
$w$	Componente vertical do campo de velocidade	$[m/s]$
$S_{Mx}$	Componente long. (geração/destruição) do momento linear	$[N.s]$
$S_{My}$	Componente trans. (geração/destruição) do momento linear	$[N.s]$
$S_{Mz}$	Componente vertical (geração/destruição) do momento linear	$[N.s]$
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido $[Pa.s]$	
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	$[m^2/s]$
$Re$	Número de Reynolds	
$k$	Energia cinética turbulenta	$[m^2/s^2]$
$\omega$	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta	$[s^{-1}]$
$U$	Velocidade do escoamento	$[m/s]$
$\delta$	Espessura da camada limite	$[m]$
$U_\infty$	Velocidade na corrente livre	$[m]$
$y^+$	Distância adimensional normal à superfície	
$y$	Distância do ponto considerado até a superfície	$[m]$

$y_h$	Altura do primeiro elemento inserido próximo a superfície	[m]
$u^+$	Velocidade tangencial a parede adimensionalizada	
$u_\tau$	Velocidade friccional	[m/s]
$\tau_\omega$	Tensão de cisalhamento local	[Pa]
$R_t$	Resistência ao avanço total	[N]
$R_f$	Resistência friccional	[N]
$R_{pv}$	Resistência de pressão viscosa	[N]
$R_w$	Resistência de ondas	[N]
$C_F$	Coeficiente de resistência friccional	
$C_V$	Coeficiente de resistência viscosa	
$C_W$	Coeficiente de resistência de geração de ondas	
$C_{PV}$	Coeficiente de resistência de pressão viscosa	
$C_R$	Coeficiente de resistência residual	
$C_D$	Coeficiente de resistência total	
$k$	Fator de forma	
$\lambda$	Fator de escala geométrico	
$Fr$	Número de Froude	
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$V$	Velocidade de avanço do navio	[m/s]
$LBP$	Comprimento entre perpendiculares	[m]
$B$	Boca	[m]
$T$	Calado	[m]
$\nabla$	Volume Deslocado	[m <sup>3</sup> ]
$S$	Área molhada do casco	[m <sup>2</sup> ]
$C_b$	Coeficiente de bloco	
$C_x$	Coeficiente de secção mestra	

$C_{wp}$	Coeficiente de área do plano de linha d'água	
$C_p$	Coeficiente prismático	
$LCB$	Centro longitudinal de carena	[%]
$I$	Intensidade turbulenta	[%]
$\frac{\mu_t}{\mu}$	Razão de viscosidades	

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	17
<b>2.1.1</b>	<b>Método dos volumes finitos</b>	<b>19</b>
2.2	MÉTODO DE SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES	19
2.3	TURBULÊNCIA	22
<b>2.3.1</b>	<b>Modelos de turbulência</b>	<b>24</b>
2.4	CAMADA LIMITE	27
<b>2.4.1</b>	<b>Funções parede</b>	<b>31</b>
2.5	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	34
<b>2.5.1</b>	<b>Decomposição da força de arrasto</b>	<b>34</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Coefficiente de resistência friccional</b>	<b>35</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>36</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Extrapolação modelo-navio</b>	<b>36</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Séries Sistemáticas</b>	<b>39</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Série 60</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
3.1	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISES CFD	41
<b>3.1.1</b>	<b>OpenFOAM</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2</b>	<b>SIMSCALE</b>	<b>43</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Procedimento</b>	<b>44</b>
3.2	PRÉ-PROCESSAMENTO	46
<b>3.2.1</b>	<b>Modelo matemático</b>	<b>46</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Geração da malha</b>	<b>47</b>
3.2.2.1	Definição do sistema de coordenadas	47
3.2.2.2	Modelagem da geometria	47
3.2.2.3	Domínio computacional	52
3.2.2.4	Geração da malha considerando a superfície do casco	54
3.2.2.5	Refino da malha base	55
3.2.2.6	Conformação da malha à geometria do casco	60
3.2.2.7	Adição de camadas adjacentes à superfície	62
3.2.2.8	Ajustes da geometria para melhorar a qualidade da malha	64
<b>3.2.3</b>	<b>Método de avaliação de independência de malha</b>	<b>70</b>

<b>3.2.4</b>	<b>Condições de contorno e condições iniciais da simulação . . . .</b>	<b>72</b>
3.2.4.1	Entrada . . . . .	72
3.2.4.2	Saída . . . . .	73
3.2.4.3	Superfície do casco . . . . .	74
3.2.4.4	Planos de simetria . . . . .	74
3.2.4.5	Resumo das condições de contorno e condições iniciais do modelo	74
3.3	PROCESSAMENTO . . . . .	75
<b>3.3.1</b>	<b>Controle dos resultados . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Esquemas de discretização das equações diferenciais . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Parâmetros para resolução do sistema de equações lineares . .</b>	<b>78</b>
3.4	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO . . . . .	79
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>4.0.1</b>	<b>Estudo de sensibilidade do domínio computacional . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>4.0.2</b>	<b>Estudo de sensibilidade dos parâmetros turbulentos iniciais . .</b>	<b>81</b>
4.1	PÓS-PROCESSAMENTO . . . . .	82
<b>4.1.1</b>	<b>Verificação . . . . .</b>	<b>82</b>
4.1.1.1	Análise dos resíduos e convergência do Cd . . . . .	83
4.1.1.2	Variáveis do escoamento e das funções definidas em <i>controlDict</i> . .	85
4.1.1.3	Estudo de independência de malha . . . . .	90
4.1.1.4	Estudo de sensibilidade da discretização da camada limite . . . . .	94
<b>4.1.2</b>	<b>Validação . . . . .</b>	<b>96</b>
4.1.2.1	Definição da malha para validação . . . . .	96
4.1.2.2	Parcelas da resistência viscosa para o modelo 4212W de 4,5 m . .	97
4.1.2.3	Obtenção das parcelas da resistência viscosa via CFD . . . . .	102
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXO A . . . . .</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO B . . . . .</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO C . . . . .</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXO D . . . . .</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE A . . . . .</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE B . . . . .</b>	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE C . . . . .</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE D . . . . .</b>	<b>148</b>
	<b>APÊNDICE E . . . . .</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE F . . . . .</b>	<b>158</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário competitivo de mercados globais e centros de produção transcontinentais, observa-se que mais de noventa por cento dos produtos do comércio internacional são transportados por mar (ABRACOMEX, 2017).

Esse contexto motiva estudos que busquem otimizar embarcações oceânicas, visando menores custos e diferenciais competitivos de mercado. Entre os fatores que influenciam tal análise, o arrasto que se contrapõe ao deslocamento das embarcações, é um dos mais impactantes, pois define o consumo de combustível associado ao transporte marítimo.

Segundo Golias et al. (2009) o combustível representa mais de sessenta por cento dos custos de operação de embarcações. Por essa razão, os recentes aumentos nos preços desses insumos, bem como a pressão sobre o comércio internacional para a redução das margens de lucro e das emissões de poluentes, levaram operadores marítimos à reduzirem a velocidade de navegação de suas frotas (MEYER; STAHLBOCK; VOB, 2012).

Além disso, a correta determinação da potência requerida por uma embarcação resulta em um menor risco associado à definição do sistema propulsivo, evitando o superdimensionamento do sistema, além de evitar gastos excessivos no funcionamento e manutenção desses componentes.

Tradicionalmente, existem três abordagens para o projeto de sistemas que envolvem o escoamento de fluidos: experimental, analítica e numérica (simulação). A primeira, em geral, envolve a realização de ensaios em túneis de vento ou tanques de provas. Já a segunda, consiste na solução analítica das equações diferenciais que regem o fenômeno, enquanto na terceira, essas equações são resolvidas numericamente (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

A abordagem numérica guarda as desvantagens associadas ao elevado preço das ferramentas comerciais, aos resultados aproximados como consequência intrínseca dos métodos utilizados, e à necessidade de máquinas com alto poder de processamento. Porém, quando comparada às abordagens analítica e experimental, tem a vantagem de viabilizar análises mais complexas que a primeira e requer, geralmente, um menor custo e tempo que a segunda (BERTRAM, 2012).

O presente trabalho se concentra na abordagem numérica, apresentando uma metodologia para avaliar o arrasto viscoso de um casco, obtendo, além da curva de resistência ao avanço, a estimativa de suas componentes.

A obtenção das componentes da resistência ao avanço é vital para auxiliar nas modificações do projeto, fomentando a inclusão de bulbo (associado à geração de ondas), mudanças nos ângulos do casco (associadas ao fator de forma) e/ou inclusão de sistemas visando a redução da rugosidade das superfícies (associado à resistência friccional).

O desenvolvimento proposto baseia-se na mecânica dos fluidos computacional e visa permitir uma melhor visualização do escoamento e a quantificação das propriedades físicas envolvidas, além das forças decorrentes da interação do casco com o escoamento.

Conforme já mencionado, as ferramentas computacionais disponíveis possuem elevado custo. Embora algumas empresas forneçam versões estudantis destinadas às universidades, tais versões possuem limitações, principalmente quanto à complexidade das geometrias analisadas e dos fenômenos físicos modelados, o que afeta a confiabilidade e a empregabilidade dos resultados obtidos.

Como a aquisição de programas específicos para a resolução de problemas que envolvem a mecânica dos fluidos é, na maioria das vezes, economicamente inviável, em especial para usos acadêmicos, surge a necessidade de se desenvolver a própria ferramenta ou de se utilizar programas de código aberto.

Este trabalho propõe a utilização da ferramenta gratuita conhecida por OpenFOAM<sup>1</sup>. Essa ferramenta tem se tornado tão amplamente aceita que se encontra farto material disponível na internet. É possível encontrar desde explicações sobre a linguagem utilizada, as bibliotecas existentes, os comandos destinados à análise dos resultados, até exemplos e tutoriais abordando tanto simulações simples quanto simulações de extrema complexidade.

As análises e procedimentos apresentados neste texto foram idealizados para serem executados em computadores com certo grau de capacidade computacional, mas ainda acessíveis para a maioria dos pesquisadores e projetistas.

Destaca-se que, conforme será descrito adiante, o foco está na modelagem do problema associado ao deslocamento da parte submersa do casco de um navio mercante, sendo caracterizado por um escoamento monofásico que desconsidera a superfície livre e as obras mortas da embarcação.

## 1.1 OBJETIVOS

Dentro do contexto apresentado, propõe-se os seguintes objetivos:

---

<sup>1</sup> Open-source Field Operation And Manipulation - Operação e Manipulação de Campo em Código Aberto (WELLER; GREENSHIELDS; ROUVRAY, 2021).

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral consiste na definição de uma metodologia robusta e eficiente que permita a engenheiros, pesquisadores e projetistas obter a parcela viscosa da resistência ao avanço de uma embarcação (e suas componentes) utilizando uma abordagem CFD<sup>2</sup> baseada na ferramenta OpenFOAM.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral estabelecido, propõem-se um procedimento que contemple:

1. A modelagem 3D de um casco típico da Série 60;
2. A geração do domínio computacional e da malha ao redor da embarcação visando simular o escoamento no entorno do casco;
3. A determinação das condições de contorno e condições iniciais que descrevam corretamente os fenômenos de interesse;
4. A definição dos parâmetros relacionados ao processo de resolução numérica baseada no método dos volumes finitos;
5. O cálculo das parcelas viscosas da resistência ao avanço;
6. A verificação do comportamento das propriedades físicas envolvidas na análise, considerando os erros associados à modelagem numérica;
7. A validação da metodologia proposta utilizando dados experimentais da Série 60.

---

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics - Dinâmica dos Fluidos Computacional.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta os fundamentos envolvidos no escopo deste trabalho, tratando dos aspectos mais relevantes associados à mecânica dos fluidos computacional voltados ao desenvolvimento realizado, além dos conceitos associados à resistência ao avanço de embarcações.

### 2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

O aumento da complexidade dos projetos de engenharia exige um maior entendimento dos fenômenos físicos envolvidos. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descreverem tais fenômenos, bem como técnicas capazes de resolverem esses modelos com confiabilidade e robustez.

Essa demanda por uma maior compreensão e capacidade de modelagem dos fenômenos, aliada ao aumento do poder de processamento dos computadores, fez com que o interesse pelas técnicas numéricas aumentasse, em especial no que tange à mecânica dos fluidos (FERZIGER; PERIC, 2002).

Além disso, como ressalta Çengel e Cimbala (2012), modelos baseados na mecânica dos fluidos computacional fornecem detalhes a respeito do escoamento e permitem estudos paramétricos bem controlados, aumentando a capacidade de avaliação em diversos cenários, diminuindo a necessidade de ensaios físicos e auxiliando na tomada de decisões.

A abordagem numérica de simulação computacional no âmbito da mecânica dos fluidos ficou largamente conhecida como CFD, podendo ser resumida à resolução das equações diferenciais que regem o comportamento de um escoamento. Nessa abordagem a região de interesse é dividida em volumes de controle infinitesimais, permitindo a utilização da formulação diferencial para a resolução do modelo matemático (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), o escoamento em torno de um casco é regido por três das mais importantes equações da mecânica dos fluidos, as quais dizem respeito a conservação da massa, a conservação do momento linear e a conservação da energia. No entanto, uma vez que a água pode ser considerada incompressível, as equações referentes à conservação da massa e do momento são suficientes, permitindo que a equação da conservação da energia seja descartada.

A equação da continuidade (Equação (1)) estabelece que a mudança de massa dentro de um volume de controle deve ser igual ao fluxo de massa através das superfícies de contorno.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Onde  $\vec{u}$  refere-se ao campo de velocidades do escoamento [ $m/s$ ] e  $\rho$  refere-se a massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ].

Já as Equações (2) a (4) descrevem as Equações de Navier-Stokes escritas em coordenadas cartesianas tridimensionais e representam a conservação do momento linear considerando um fluido Newtoniano. Tais formulações postulam que a taxa de variação do momento linear dentro de um volume de controle é igual à taxa de entrada e saída pelas superfícies de contorno somada às forças externas que atuam no elemento.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \nabla u) + S_{M_x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \nabla v) + S_{M_y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \nabla w) + S_{M_z} \quad (4)$$

Onde:

$x, y, z$  – Coordenadas cartesianas do eixo de referência do sistema [ $m$ ];

$p$  – Campo de pressão [ $Pa$ ];

$u, v, w$  – Componentes do campo de velocidade [ $m/s$ ];

$S_{M_x}, S_{M_y}, S_{M_z}$  – Termos de geração ou destruição do momento linear [ $N.s$ ];

$\mu$  - Viscosidade dinâmica do fluido [ $Pa.s$ ].

Tendo em vista a complexidade matemática dessas equações, são poucos os casos que podem ser resolvidos analiticamente, mesmo considerando as simplificações decorrentes das hipóteses associadas ao comportamento do fenômeno analisado.

No caso do estudo da resistência ao avanço viscosa de embarcações deslocantes que navegam com velocidade constante, as seguintes características podem ser assumidas para o escoamento:

- Escoamento incompressível
- Escoamento turbulento
- Escoamento monofásico (ausência da superfície livre)
- Escoamento em regime permanente
- Escoamento isotérmico

### 2.1.1 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos é conhecido por ser um dos métodos mais utilizados em ferramentas computacionais destinadas à análise de escoamentos. Nesse método, a resolução das equações de Navier-Stokes é feita de forma discreta, ou seja, as equações são escritas para volumes de controle com dimensões finitas, definindo um sistema linear que pode ser resolvido numericamente.

Além disso, um ponto importante dessa abordagem consiste no caráter conservativo do escoamento, tanto global quanto local, significando que os princípios físicos são respeitados para cada porção do escoamento analisada. Assim, partindo-se da formulação integral das equações apresentadas, avalia-se o comportamento dos campos de velocidades e pressão em todo o domínio computacional.

Conforme já mencionado, o domínio é dividido em diversos volumes finitos, também chamados de células ou elementos, cujo conjunto é conhecido como malha. A partir dos valores calculados no centro de cada volume<sup>3</sup>, é possível interpolar os valores para qualquer face do volume.

Devido ao processo de discretização, associado a geração da malha, tem-se um sistema de equações lineares para cada volume de controle, cuja solução depende dos valores pertencentes aos nós vizinhos. Logo, é necessário determinar as condições de contorno nas superfícies do domínio para que o sistema possa ser resolvido (FERZIGER; PERIC, 2002).

É importante lembrar que, como todo modelo, a abordagem CFD possui erros associados às simplificações assumidas e ao processo de resolução numérica. Assim, é necessária atenção e cuidado durante a análise, principalmente na interpretação dos resultados, sendo altamente recomendado que o usuário possua conhecimentos de mecânica dos fluidos.

## 2.2 Método de solução do sistema de equações lineares

As Equações de (1) a (4) apresentam três características que dificultam a solução direta dos campos de velocidade e pressão, exigindo uma estratégia numérica iterativa para a resolução:

- As componentes de velocidades são intrinsicamente acopladas, pois estão presentes nas equações de conservação do momento e da conservação da massa. Portanto, é necessário que as variáveis satisfaçam, a um só tempo, todas as equações;
- A pressão é o parâmetro mais difícil de ser calculado, visto que aparece apenas nas equações do momento, e, portanto, existe a necessidade de uma equação

<sup>3</sup> Versteeg e Malalasekera (2007) denominam o centro de um volume de controle de nó.

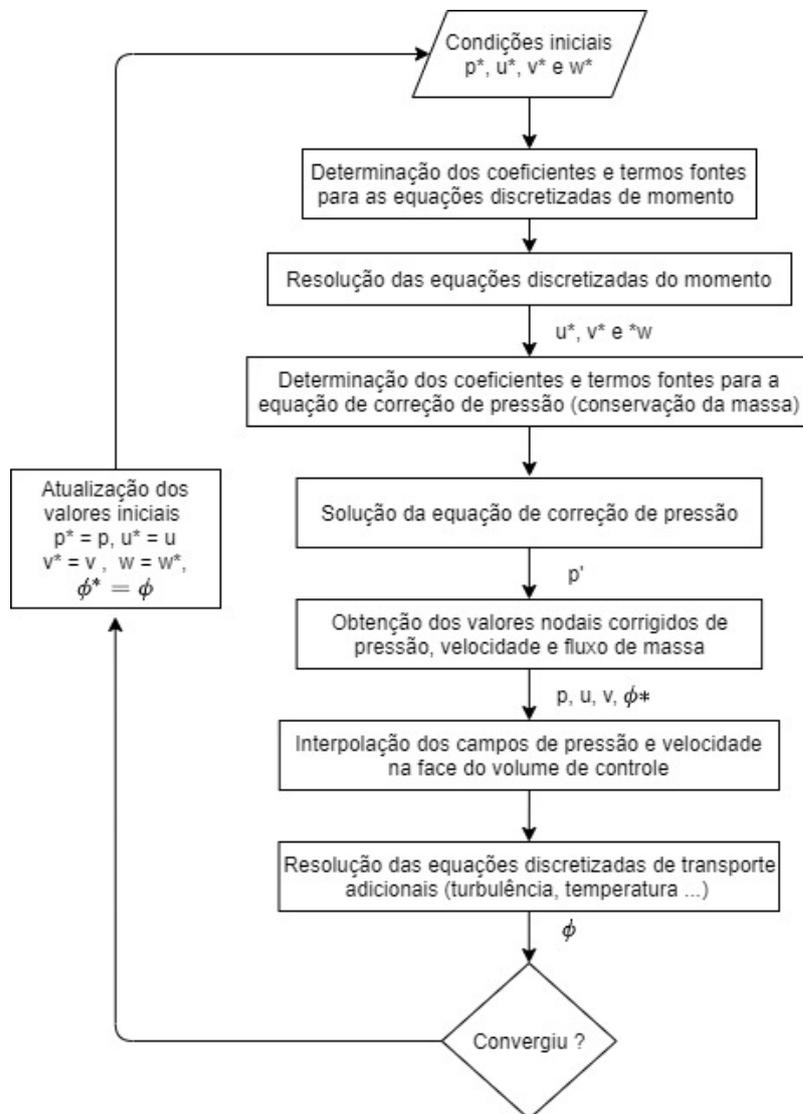
adicional para fechar o sistema de equações, cujos detalhes podem ser vistos em Versteeg e Malalasekera (2007);

- Existe ainda a não-linearidade presente nos termos relacionados ao divergente.

Entre os diversos métodos existentes para a resolução de sistemas lineares no âmbito CFD, tem-se o algoritmo SIMPLE<sup>4</sup>, comumente aplicado na análise de escoamentos em regime permanente.

Trata-se de um método iterativo baseado em uma estimativa inicial do campo de velocidades e pressão fornecida pelo usuário, cujos valores são iterados até que se atinja a convergência dos resultados (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma genérico do algoritmo SIMPLE



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007)

<sup>4</sup> Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations - Método semi implícito para equações com pressão acoplada.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a equação de correção da pressão tende a causar oscilações nos resultados, sendo, portanto, suscetível a divergência. Como alternativa, o fator de relaxação ( $\alpha$ ) é adicionado ao modelo, permitindo que, a cada iteração, o valor de pressão  $p^{novo}$  seja calculado à partir do valor estimado  $p^*$  e do valor corrigido  $p'$  (Equação (5)).

$$p^{novo} = p^* + \alpha_p p' \quad (5)$$

Da mesma forma, fatores de relaxação podem ser aplicados às componentes de velocidade (Equações (6) a (8)). No entanto, nesses casos as correções são executadas ao final de cada iteração.

$$u^{novo} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{(n-1)} \quad (6)$$

$$v^{novo} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{(n-1)} \quad (7)$$

$$w^{novo} = \alpha_w w + (1 - \alpha_w) w^{(n-1)} \quad (8)$$

Os termos das componentes de velocidade elevados a  $(n - 1)$  referem-se aos valores da iteração anterior, sendo  $n$  o número da iteração atual.

Por fim, fatores de relaxação também podem ser utilizados para corrigirem quaisquer variáveis do escoamento, como, por exemplo, a temperatura, os parâmetros turbulentos etc.

Segundo Dynamics (2019), os fatores de relaxação variam de 0 a 1, podendo influenciar diretamente na velocidade de convergência e na estabilidade numérica do processo. Assim, a definição desses fatores depende do tipo de análise realizada e devem ser cuidadosamente testados para cada caso.

Nota-se que em cada iteração realizada, ao se substituir os valores obtidos nas Equações (1) a (4), as igualdades matemáticas não são satisfeitas. A diferença entre "o lado esquerdo e o lado direito" das equações, para cada variável calculada, em cada volume de controle, é chamada de resíduo (JASAK, 1996).

Os códigos CFD normalmente definem como resíduo de um parâmetro a soma absoluta dos valores dos resíduos associados a cada elemento da malha. Usualmente, o monitoramento dos resíduos durante as iterações permite ao usuário avaliar a convergência da simulação.

Idealmente as equações deveriam apresentar resíduo nulo, mas, em se tratando de um processo numérico, existe sempre uma parcela de erro, por menor que ela seja. Logo, é necessário um balanço entre o nível de precisão desejado e o custo computacional para alcançá-lo.

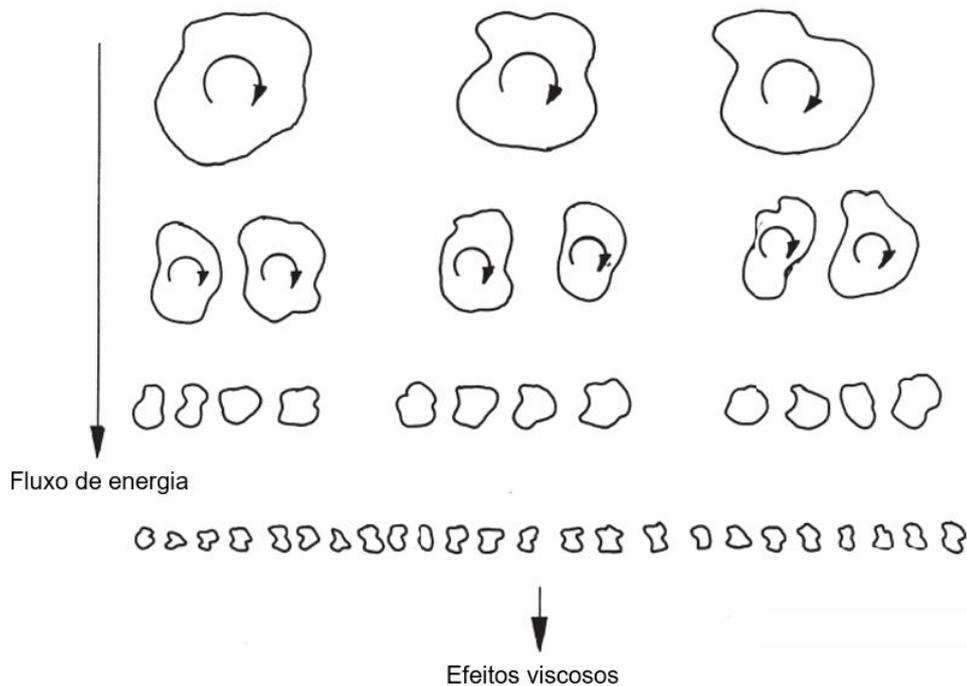
A convergência de uma simulação numérica é alcançada quando a soma dos resíduos está abaixo do limite estabelecido, o qual é chamado de tolerância e deve ser definido pelo usuário com base na acurácia desejada para os resultados (TU; YEOH; CHAOQUNLIU, 2018).

### 2.3 TURBULÊNCIA

A turbulência pode ser definida como um campo de vorticidade espacialmente complexo que se propaga de maneira caótica. Uma vez alcançado o regime turbulento, observa-se um espectro abrangente de escalas turbulentas, os quais produzem a chamada “cascata de energia” (DAVIDSON, 2015).

As maiores escalas, criadas a partir de instabilidades inerciais do escoamento médio, são rapidamente separadas em escalas cada vez menores até que sejam dissipadas pelos efeitos viscosos (Figura 2) (ARAUJO, 2014).

Figura 2 – Cascata de energia em um escoamento turbulento



Fonte: Davidson (2015)

A turbulência ocorre quando os efeitos viscosos são incapazes de dissipar as perturbações do escoamento, sendo caracterizada, principalmente, pelo número de Reynolds<sup>5</sup>, o qual é descrito pela Equação (9).

$$Re = \frac{U \times L}{\nu} \quad (9)$$

<sup>5</sup> Número adimensional que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas de um escoamento.

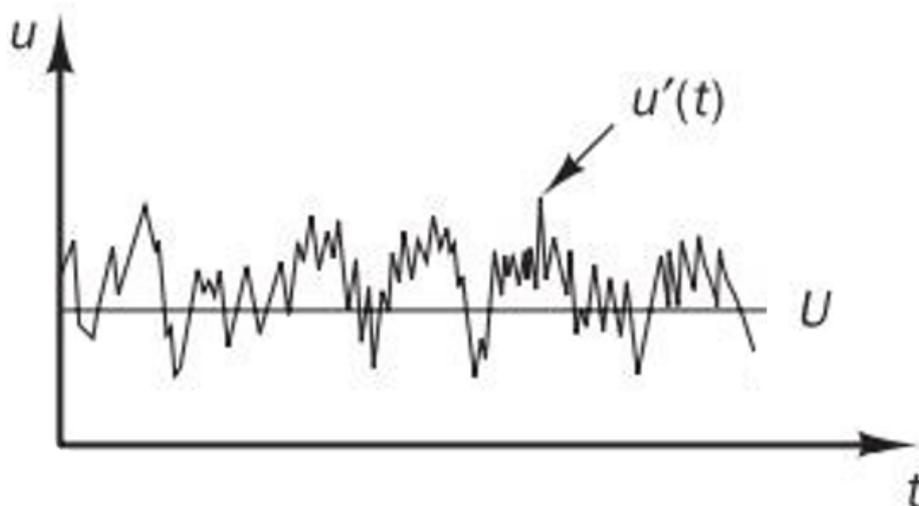
Sendo  $U$  a velocidade característica do escoamento, tipicamente a velocidade de corrente livre [ $m/s$ ],  $L$  a dimensão linear típica do escoamento [ $m$ ] e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido [ $m^2/s$ ].

De acordo com Bertram (2012), no caso do escoamentos ao redor de uma embarcação, a transição do regime laminar para o turbulento ocorre quando o  $Re$  é superior a  $10^6$ , sendo esse valor denominado Reynolds crítico ( $Re_{cr}$ ).

Bertram (2012) afirma ainda que, para embarcações em escala reduzida, tipicamente utilizadas em ensaios em tanques de prova, o  $Re$  é da ordem de  $10^7$ , enquanto para navios em escala real, esse número é da ordem de  $10^9$ . Portanto, em ambos os casos, o escoamento encontra-se no regime turbulento.

Por essa razão, os efeitos da turbulência são de crucial importância, dada sua influência em diversos aspectos do escoamento. Entre esses efeitos, destaca-se que as variações dos campos de pressão e velocidade tornam-se caóticas na região turbulenta, tanto no espaço, quanto no tempo (Figura 3), apresentando flutuações instantâneas que dificultam a compreensão e a modelagem do fenômeno.

Figura 3 – Comportamento turbulento do campo de velocidades



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

O comportamento aleatório mostrado na Figura 3 pode ser decomposto em duas componentes, uma que representa o valor médio do parâmetro ( $\bar{\phi}(x, t)$ ) e outra referente às flutuações ( $\phi'(x, t)$ ) (Equação (10)).

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x, t) + \phi'(x, t) \quad (10)$$

Onde  $\phi$  refere-se a uma variável qualquer do escoamento, sendo tipicamente associada ao campo de pressão (Equação (11)) ou ao campo de velocidades (Equação (12)).

$$p(x, t) = \bar{p}(x, t) + p'(x, t) \quad (11)$$

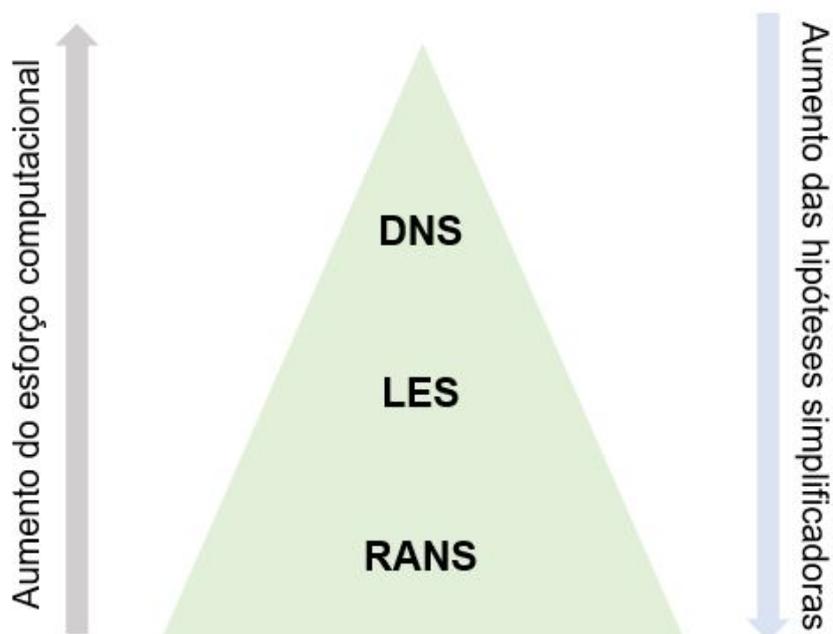
$$\vec{u}(x, t) = \bar{\vec{u}}(x, t) + \vec{u}'(x, t) \quad (12)$$

### 2.3.1 Modelos de turbulência

Tendo em vista a importância da turbulência, diversos modelos numéricos foram desenvolvidos, os quais buscam representar diferentes aspectos desse fenômeno.

Os diferentes modelos de turbulência podem ser agrupados em três abordagens (DNS<sup>6</sup>, LES<sup>7</sup> e RANS<sup>8</sup>), as quais variam em função do esforço computacional empregado para capturar os efeitos turbulentos e ao grau de simplificação adotado na modelagem do fenômeno (Figura 4).

Figura 4 – Características dos métodos para captação da turbulência



Fonte: Adaptado de IdealSimulations (2021)

O método DNS consiste na resolução das Equações de Navier-Stokes em regime transiente e busca resolver todas as escalas de um escoamento turbulento, ou seja, não há modelagem matemática para o efeito da turbulência. Portanto, é necessário

<sup>6</sup> Direct Numerical Simulation - Simulação Numérica Direta.

<sup>7</sup> Large Eddy Simulation - Simulação de Grandes Escalas.

<sup>8</sup> Reynolds-averaged Navier–Stokes - Navier-Stokes com média de Reynolds.

que tanto o intervalo de tempo de cada iteração, quanto o tamanho dos volumes de controle sejam pequenos o suficiente para captar os efeitos das flutuações temporais e espaciais (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

Além disso, segundo Pope (2000), o custo computacional da modelagem DNS é proporcional ao cubo do número de Reynolds do escoamento, tornando essa abordagem inviável para análises de engenharia que envolvem escoamentos turbulentos (WILCOX, 2006).

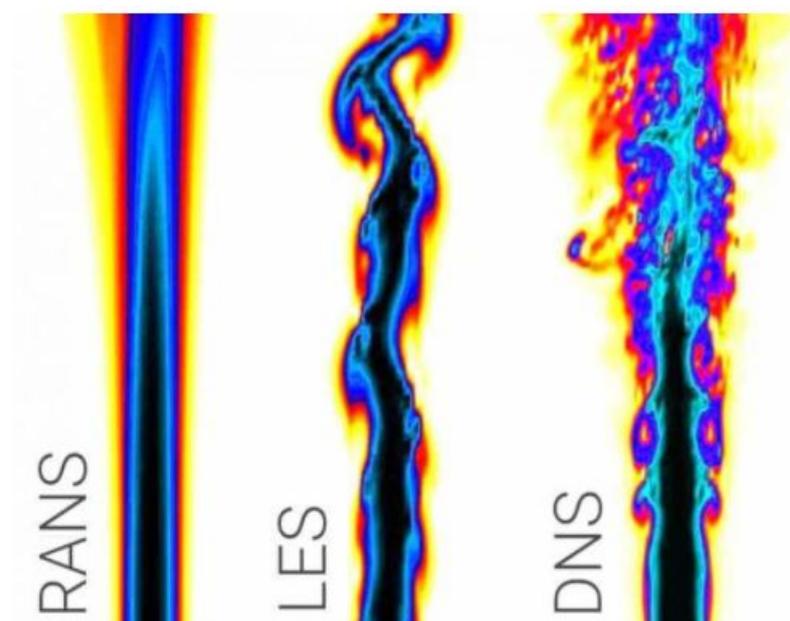
O método LES surge como uma alternativa ao DNS quando não há a necessidade de descrever todas as escalas em cada instante de tempo. Na abordagem LES, as propriedades transientes referentes as maiores escalas são resolvidas, enquanto as menores escalas são modeladas (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

Apesar de simplificar as pequenas escalas, o método LES busca resolver as equações do movimento em regime transiente, o que acarreta um esforço computacional consideravelmente elevado. Porém, simulações de engenharia que utilizam LES são cada vez mais recorrentes devido ao rápido aumento do desempenho dos computadores observado nos últimos anos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Por fim, na abordagem RANS o objetivo é quantificar os efeitos turbulentos nas propriedades médias do escoamento através da modelagem matemática das equações de Navier-Stokes. Logo, não é possível representar nenhuma das escalas, tanto do ponto de vista temporal, quanto espacial.

Na Figura 5 é mostrada, de forma qualitativa, a diferença entre as abordagens apresentadas na representação dos efeitos turbulentos de um escoamento.

Figura 5 – Diferenças na captação dos efeitos turbulentos



Fonte: IdealSimulations (2021)

De forma geral, em virtude do elevado custo computacional associado às abordagens LES e DNS, essas são tipicamente destinadas a simulações com geometrias simples e/ou restritas a pesquisas acadêmicas.

Já a abordagem RANS tem se tornado cada vez mais popular em análises de engenharia, pois, embora ela não seja capaz de descrever as variações temporais do escoamento, segundo Wilcox (2006), é um método que apresenta resultados satisfatórios para a obtenção da resistência viscosa de corpos sujeitos a escoamentos turbulentos.

As equações governantes do método RANS baseiam-se nas Equações de Navier-Stokes reescritas considerando características médias do escoamento, resultando na Equação (13).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j'} \right) \quad (13)$$

O termo  $\overline{u_i u_j'}$  é conhecido como Tensor de Reynolds, o qual representa as tensões oriundas dos efeitos turbulentos no escoamento, descrito pela Equação 14.

$$\overline{u_i u_j'} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

A notação de sufixo usada nas Equações (13) e (14) visa simplificar as equações de Navier-Stokes, onde  $i$  e  $j$  correspondem a direção x, y e z.

Uma vez que o Tensor de Reynolds é simétrico, são introduzidas seis novas incógnitas para a resolução do sistema de equações<sup>9</sup>. Dessa forma, é necessária a adição de novas equações para a resolução do sistema, visto que o número de incógnitas é maior do que o número de equações disponíveis (MARIN, 2016).

Nesse contexto, Boussinesq (1877) introduz o conceito de modelos de turbulência baseados na viscosidade turbulenta, o qual supõe que o Tensor de Reynolds é proporcional ao gradiente da velocidade média do escoamento (Equação (15)).

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

Destaca-se que, diferentemente da viscosidade molecular ( $\mu$ ), a viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) é uma propriedade do escoamento, e não do fluido.

<sup>9</sup> Originalmente, o sistema de equações considera quatro equações, sendo uma para a conservação da massa e três para a conservação do momento linear.

A maioria dos modelos de turbulência baseiam-se na hipótese de Boussinesq e são classificados em função do número de equações incorporadas ao modelo numérico (ARAUJO, 2014). O aprofundamento da discussão sobre esses modelos foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser encontrado em Wilcox (2006).

Conforme o proposto por Tahara et al. (2006) e Inok, Lavrov e Soares (2014), sugere-se o uso do modelo  $k-\omega$  SST<sup>10</sup> para a análise da resistência viscosa de embarcações.

Vale ressaltar que, segundo Ferziger e Peric (2012) e Wilcox (2006), o modelo  $k-\omega$  SST é menos sensível aos valores de  $k$ <sup>11</sup> e  $\omega$ <sup>12</sup> definidos nas condições de contorno que outros modelos de turbulência. Tal fato se dá pela alternância entre o modelo  $k-\omega$  próximo a superfície do corpo (o qual apresenta baixa sensibilidade às condições de contorno e as condições iniciais) e  $k-\epsilon$  na corrente livre (região que tende a apresentar baixa turbulência por estar longe do corpo).

Segundo Çengel e Cimbala (2012), posto que no modelo  $k-\omega$  SST são utilizadas duas equações para o cálculo da viscosidade turbulenta, deve-se definir as condições de contorno tanto para o parâmetro  $k$ , quanto para o parâmetro  $\omega$ .

Tradicionalmente a abordagem empregada pela comunidade CFD para a determinação dos valores de  $k$  e  $\omega$  baseia-se na utilização de modelos empíricos. Esse processo consiste em estimar os valores de  $k$  e  $\omega$  usando equações empíricas que relacionam esses parâmetros com as propriedades de um escoamento turbulento, tal como visto em Wortley (2013) e Marin (2016).

Salienta-se que os detalhes das características e do equacionamento do modelo  $k-\omega$  SST fogem ao escopo desse trabalho, mas podem ser vistos em Menter (1993).

## 2.4 CAMADA LIMITE

A viscosidade de um fluido que escoar ao longo de uma superfície impõe que a velocidade do escoamento junto à parede seja zero. Essa condição é conhecida como condição de não-escorregamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

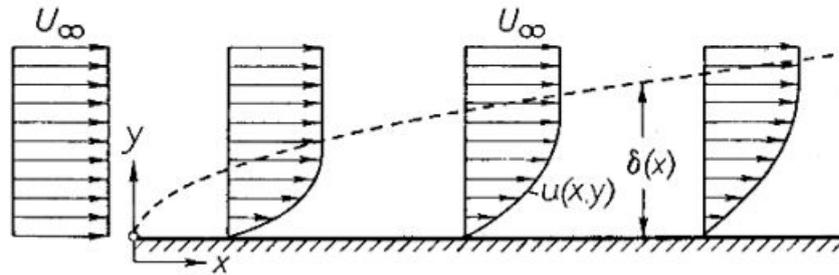
No entanto, em escoamentos externos, a velocidade tangencial do fluido tende a aumentar à medida que o escoamento se distancia da superfície do corpo. Isso ocorre porque, quanto mais distante da superfície do corpo, a influência dos efeitos viscosos é menor (Figura 6).

<sup>10</sup> Shear Stress Transport - Transporte de Tensão de Cisalhamento. O qual é uma variação do modelo  $k-\omega$  que inclui algumas das características do modelo  $k-\epsilon$ .

<sup>11</sup> Energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ].

<sup>12</sup> Taxa de dissipação específica de  $k$  [ $1/s$ ].

Figura 6 – Velocidade em função da distância da parede



Fonte: Schlichting e Gersten (2017)

A função  $U(x,y)$  descreve a velocidade tangencial do fluido em uma dada posição longitudinal ( $X$ ) e em uma dada distância vertical ( $Y$ ) da superfície. Já a velocidade do escoamento nas regiões nas quais não existe a influência do corpo é conhecida como velocidade na corrente livre ( $U_\infty$ ).

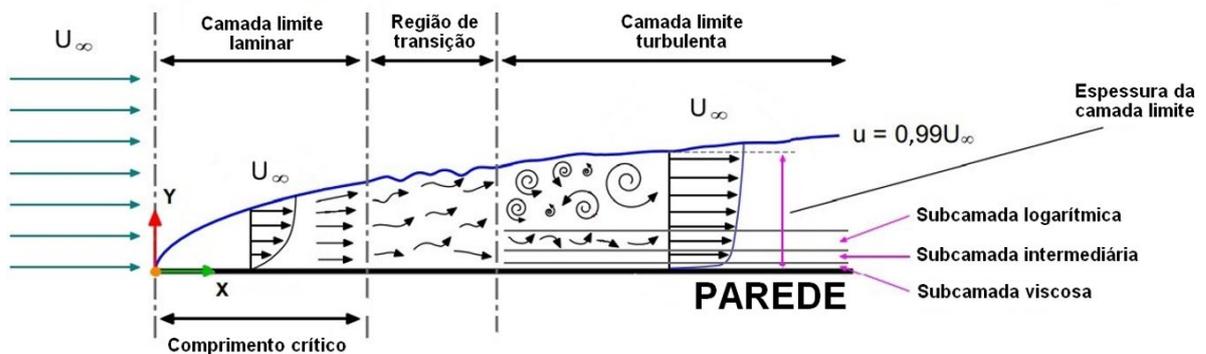
A região do escoamento que apresenta os maiores gradientes de velocidade, resultantes da viscosidade do fluido, é conhecida como camada limite. Usualmente define-se a camada limite como sendo a região entre a superfície do corpo e o ponto no qual a velocidade tangencial atinge uma dada porcentagem em relação a velocidade de corrente livre. De acordo com Çengel e Cimbala (2012), essa porcentagem é tipicamente de 99%.

A espessura da camada limite ( $\delta$ ) varia conforme o tipo de escoamento (laminar ou turbulento). No caso de escoamentos turbulentos, a espessura da camada limite pode ser estimada usando a Equação (16).

$$\frac{\delta}{x} = 0,16 Re_x^{-\frac{1}{7}} \quad (16)$$

Na Figura 7 é mostrada a transição do escoamento laminar para o turbulento e o desenvolvimento da camada limite.

Figura 7 – Transição de regime laminar para turbulento em placa plana



Fonte: Adaptado de Dynamics (2019)

O comprimento crítico ( $X_{cr}$ ) a partir do qual se inicia o regime de transição (Figura 7) pode ser calculado usando a Equação (17), a qual depende do Reynolds crítico ( $Re_{cr}$ ), discutido na Seção 2.3.

$$Re_{cr} = \frac{U_x \times X_{cr}}{\nu} \quad (17)$$

É importante observar que, em um escoamento turbulento, o interior da camada limite pode ser dividido em três subcamadas, as quais, segundo Çengel e Cimbala (2012), são classificadas em:

- **Subcamada viscosa (*viscous sublayer*):** região onde os efeitos viscosos são predominantes e o escoamento possui característica laminar;
- **Subcamada intermediária (*buffer layer*):** região onde os efeitos turbulentos passam a ser representativos mas não o suficiente para sobrepujar os efeitos viscosos;
- **Subcamada inercial/logarítmica (*inertial/logarithmic layer*):** região na qual os efeitos inerciais (turbulentos) passam a ser mais intensos do que os efeitos viscosos.

Devido à complexidade da camada limite presente em escoamentos turbulentos, a identificação das três subcamadas é feita utilizando o conceito de distância adimensional normal à superfície ( $y^+$ ), a qual é descrita pela Equação (18).

$$y^+ = \frac{y \times u_\tau}{\nu} \quad (18)$$

De forma análoga, a velocidade adimensional tangencial a parede é definida pela Equação (19).

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (19)$$

Sendo  $y$  a distância do ponto considerado até a superfície do corpo [ $m$ ],  $u$  a velocidade tangencial a parede [ $m/s$ ],  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido [ $m^2/s$ ] e  $u_\tau$  a velocidade friccional<sup>13</sup> (Equação (20)) [ $m/s$ ].

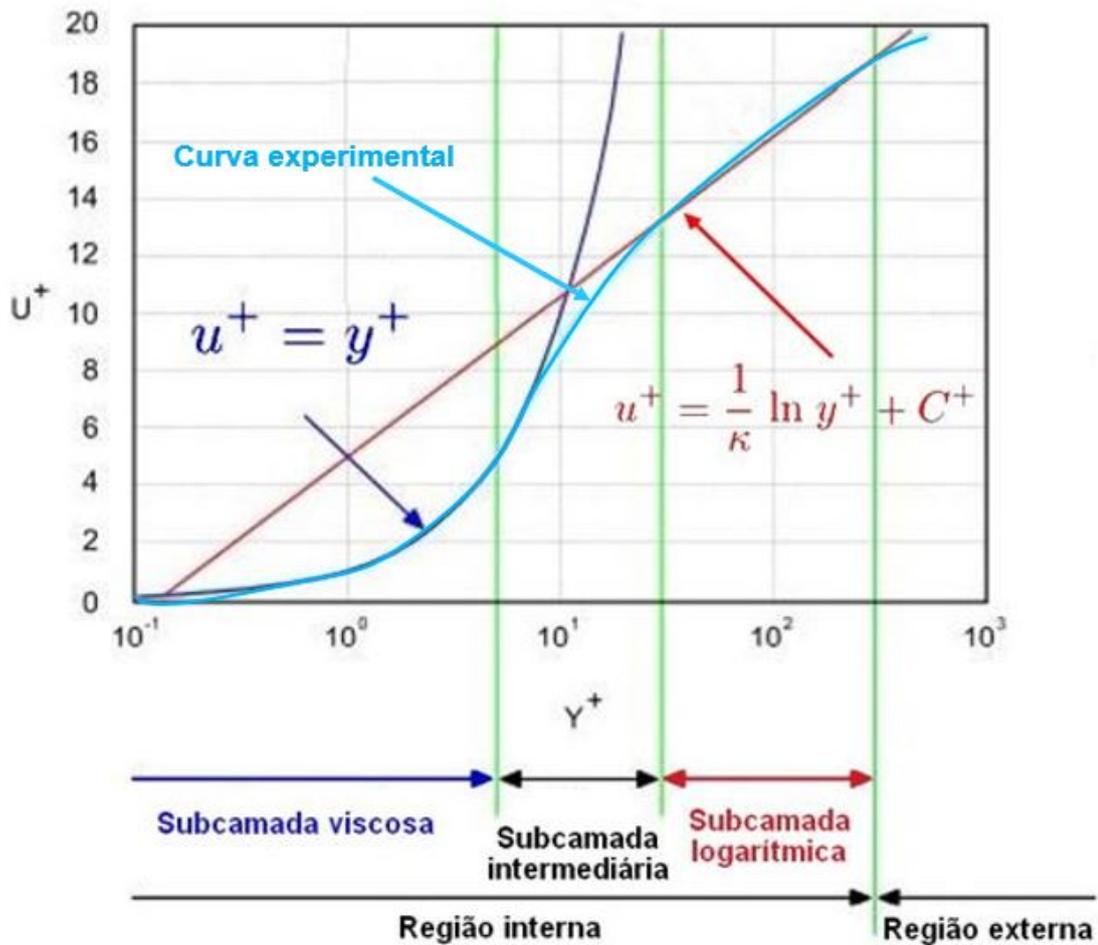
$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (20)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ] e  $\tau_\omega$  é a tensão de cisalhamento local atuante no fluido, a qual decorre do atrito com a parede [ $Pa$ ].

<sup>13</sup> Uma vez que a velocidade na parede é nula (condição de não-escorregamento), a velocidade friccional exerce um papel importante na adimensionalização de  $u$  e  $y$ , embora não possua interpretação física.

Conforme mostrado na Figura 8, o perfil de velocidade tangencial difere em cada uma das subcamadas da camada limite. Sobre isso, Moser, Kim e Mansour (1999), utilizando DNS e experimentos práticos, propuseram uma correlação empírica entre os valores de  $y^+$  e  $u^+$ .

Figura 8 – Perfil típico da camada limite turbulenta



Fonte: Dynamics (2019)

A curva azul ciano representa os dados oriundos de DNS e de experimentos práticos, enquanto as outras curvas representam funções empíricas que se ajustam aos dados experimentais das subcamadas logarítmica (vermelha) e viscosa (azul escuro).

É importante observar que o perfil da camada limite proposto por Dynamics (2019) foi construído com base em variáveis adimensionais e, portanto, pode ser usado nos mais diversos casos.

Conforme visto na Figura 8, as subcamadas viscosa e inercial podem ser descritas pelas Equações (21) e (22), respectivamente.

$$u^+ = y^+ \quad (21)$$

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + C^+ \quad (22)$$

Sendo  $K$  a constante de von Karman a qual vale 0,41 e  $C^+$  uma constante de valor 5,25 (BREDBERG, 2000).

Segundo Wimshurst (2018), a subcamada intermediária não possui uma equação definida pois os fenômenos nessa região não são bem conhecidos, podendo apresentar variações a depender das características do escoamento.

Dessa forma, seguindo os resultados de Versteeg e Malalasekera (2007), os valores de  $y^+$  associados a cada uma das subcamadas são sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações de  $y^+$  associados às subcamadas da camada limite

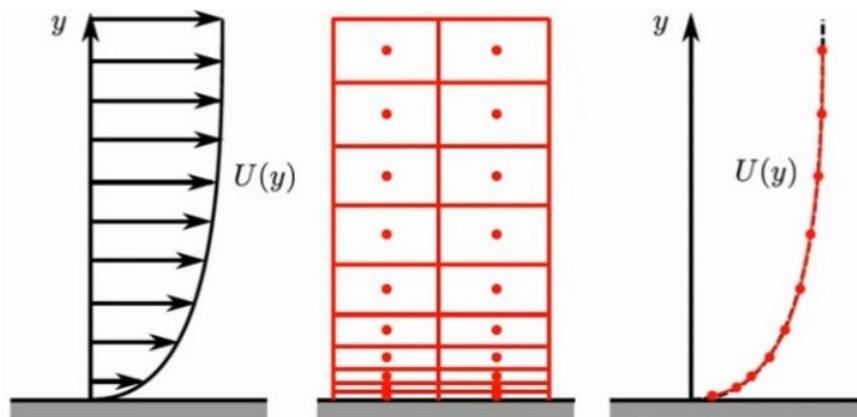
Parâmetro	Valor
<i>Subcamada viscosa</i>	$y^+ < 5$
<i>Subcamada intermediária</i>	$5 < y^+ < 30$
<i>Subcamada inercial</i>	$30 < y^+ < 500$

Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

#### 2.4.1 Funções parede

Na mecânica dos fluidos computacional, o domínio é tratado de forma discretizada. Logo, a fim de representar a elevada variação do campo de velocidades na camada limite, é necessária uma maior densidade de elementos próximo ao corpo (Figura 9).

Figura 9 – Camadas adicionais para captação do gradiente de velocidades



Fonte: Wimshurst (2018)

A correta determinação do gradiente de velocidades faz com que a tensão de cisalhamento junto a parede (Equação (23)) seja calculada com maior precisão.

Esse aspecto é de extrema importância, pois a resistência friccional atuante no corpo é calculada a partir da integração de  $\tau_w$  obtida em cada um dos volumes de controle.

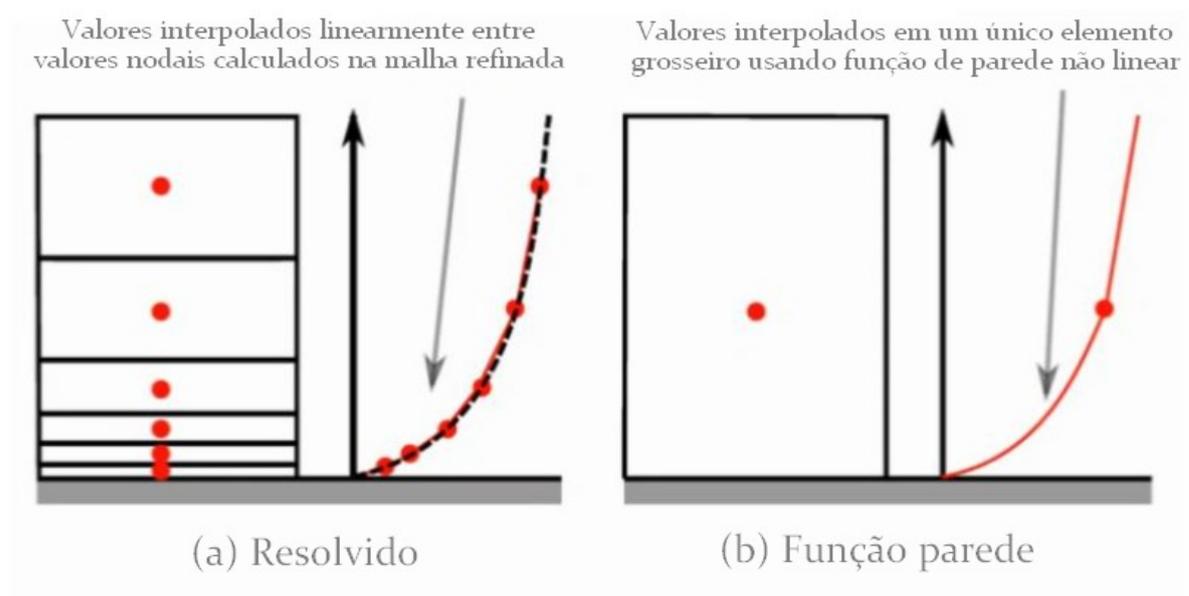
$$\tau_w = \mu \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (23)$$

A modelagem computacional do escoamento próximo a parede de um corpo pode ser realizada seguindo duas abordagens. A primeira, chamada de LRN<sup>14</sup>, utiliza uma malha refinada próxima a superfície do corpo com o objetivo de captar as propriedades físicas dessa região (principalmente na subcamada viscosa). A segunda, chamada de HRN<sup>15</sup>, utiliza as funções parede para modelar essa região (BREDBERG, 2000).

Segundo Liu (2017), as funções parede são equações semi-empíricas utilizadas para descrever o comportamento do escoamento próximo a parede, visando fornecer condições de contorno para as variáveis envolvidas no escoamento ao invés de especificá-las explicitamente.

Na Figura 10, ambas as abordagens são comparadas graficamente, onde fica evidente a diferença do número de volumes de controle exigido para discretizar o campo de velocidades em cada uma das abordagens. Enquanto na abordagem LRN a malha precisa ser mais refinada próxima a parede, na abordagem HRN pode-se usar uma malha menos refinada sem prejuízo significativo na precisão da resposta.

Figura 10 – Tipos de tratamento da camada limite



Fonte: Adaptado de Wimshurst (2018)

<sup>14</sup> Low Reynolds Number - Número de Reynolds Baixo.

<sup>15</sup> High Reynolds Number - Número de Reynolds Elevado.

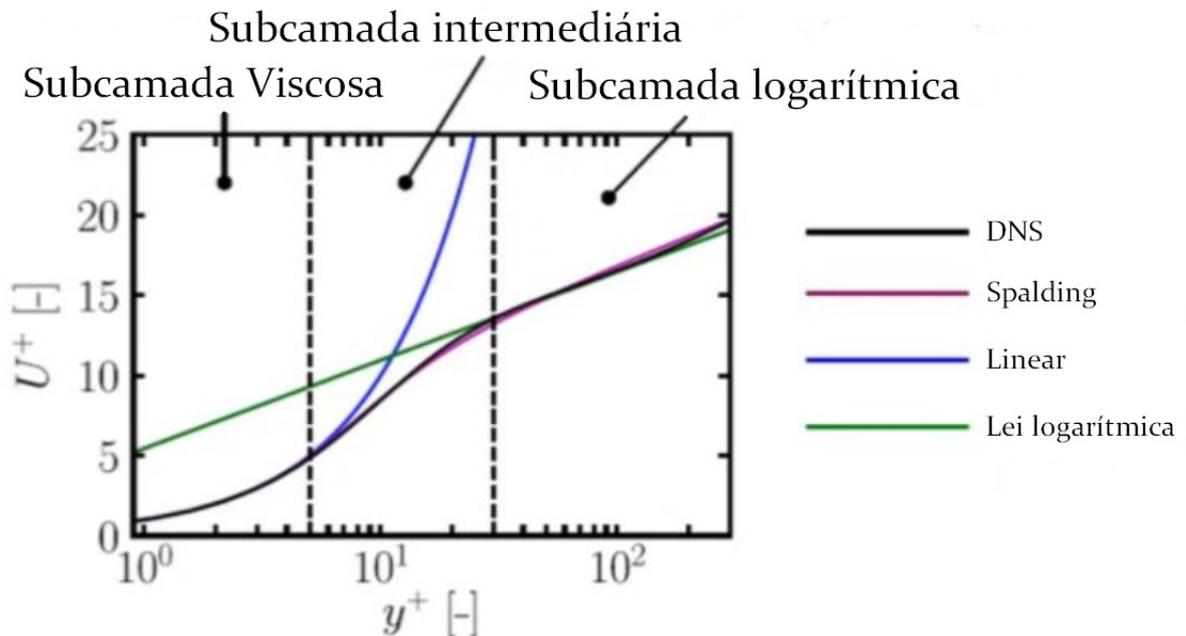
Segundo Bredberg (2000), o uso das funções parede pressupõe que o primeiro elemento esteja localizado na subcamada logarítmica ( $30 < y^+ < 500$ ), para assegurar a precisão da resposta. Já na abordagem LRN, espera-se que o primeiro volume de controle junto a parede esteja situado na subcamada viscosa ( $y^+ < 5$ ).

De acordo com Ansys (2013), deve-se evitar inserir elementos que resultem em um  $y^+$  situado na subcamada intermediária (*buffer layer*) pelos motivos já abordados na Seção 2.4.

A maioria das ferramentas CFD, tanto comerciais, quanto de código aberto, possibilita o uso de funções parede híbridas, como por exemplo, a função de Spalding (Equação (24)). Essa função possui a capacidade de se adaptar a subcamada na qual o primeiro elemento se encontra, pois se adequa aos dados experimentais (DNS) em toda a espessura da camada limite (Figura 11), mitigando a limitação relativa ao posicionamento do volume de controle na subcamada intermediária.

$$y^+ = u^+ + 0,01108[e^{0,4u^+} - 1 - 0,4u^+ - \frac{1}{2}(0,4u^+)^2 - \frac{1}{6}(0,4u^+)^3] \quad (24)$$

Figura 11 – Adequação da função de Spalding



Fonte: Traduzido de Wimshurst (2018)

Em suma, enquanto a modelagem LRN tem um maior potencial de representar o fenômeno físico, a modelagem HRN tem um custo computacional consideravelmente menor.

Em virtude da maior estabilidade numérica e menor custo computacional, o uso das funções parede tem fomentado diversos estudos que propõem a criação de funções mais versáteis, ou seja, com maior nível de acurácia e que considerem os diferentes modelos de turbulência existentes (BREDBERG, 2000).

## 2.5 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Define-se resistência ao avanço como a força que se opõem à embarcação quando essa navega à uma velocidade constante. Essa força é determinante para a análise da viabilidade econômica de um projeto, uma vez que influencia nos requisitos do motor e no consumo de combustível da embarcação (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Tendo em vista a importância desse parâmetro, diversas formas de estimativa da resistência ao avanço foram desenvolvidas, sendo que as principais são descritas no Anexo A. Essas técnicas possuem limitações, as quais resultam em diferentes níveis de erro de acordo com o tipo de aplicação.

Sendo assim, o analista deve avaliar a utilização dos métodos no que se refere ao tempo exigido, ao grau de qualidade desejado e aos recursos disponíveis para a realização da estimativa de resistência ao avanço de um sistema naval (CARLTON, 2007).

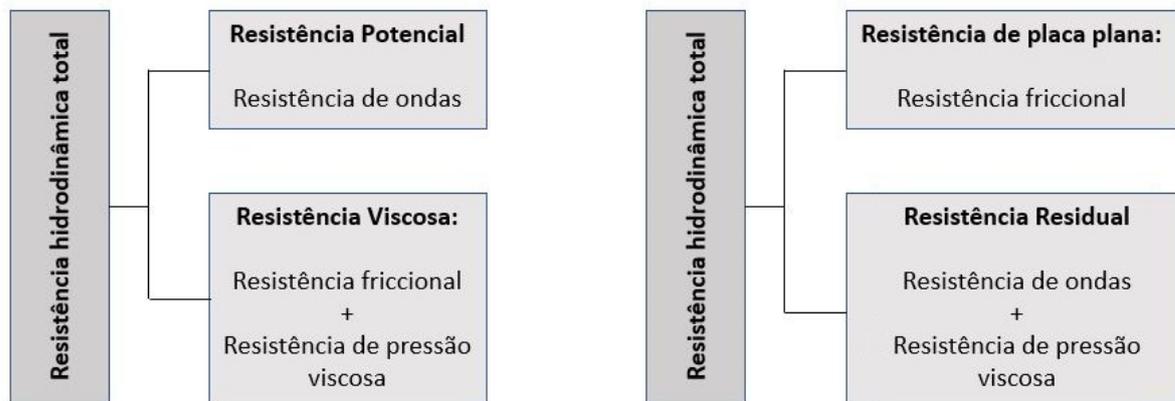
Nesse contexto, a utilização da abordagem CFD apresenta-se como uma alternativa potencialmente econômica, pois é mais rápida e barata que os ensaios em tanques de prova, além de ter maior precisão que os modelos empíricos.

### 2.5.1 Decomposição da força de arrasto

A resistência ao avanço tem origem complexa e, para facilitar a análise, é tradicionalmente separada em componentes. No entanto, os diversos textos encontrados na literatura apresentam diferenças quanto a classificação dessas parcelas (TRINDADE, 2012).

Na Figura 12 são apresentadas duas formas de divisão das parcelas que compõem a resistência ao avanço de embarcações deslocantes, ou seja, nas quais a força de sustentação hidrodinâmica pode ser desconsiderada.

Figura 12 – Decomposição da força de arrasto



Fonte: Adaptado de UmaPitadaDeEngenharia (2021)

Conforme visto na Figura 12, a resistência ao avanço pode ser, essencialmente, decomposta em:

- Resistência friccional<sup>16</sup>: corresponde ao somatório das tensões de cisalhamento ao longo da superfície do casco e de seus apêndices. Tais tensões decorrem dos efeitos viscosos dos fluidos que escoam ao redor do corpo durante a navegação (CARLTON, 2007);
- Resistência de pressão viscosa<sup>17</sup>: trata-se da força oriunda do diferencial existente no campo de pressão entre a proa e a popa do casco. Esse diferencial é resultante da forma do casco e da viscosidade da água (BERTRAM, 2012);
- Resistência de ondas: componente que representa a formação de ondas no entorno da embarcação quando essa se desloca no plano de linha d'água (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Maiores detalhes sobre a modelagem da parcela de onda fogem ao escopo deste trabalho, mas podem ser encontrados em Bertram (2012) e em Carlton (2007), além de serem apresentados resumidamente no Anexo B.

A resistência viscosa, foco desta monografia, é definida como a somatória das componentes friccional e de pressão viscosa (Figura 12).

## 2.5.2 Coeficiente de resistência friccional

Usualmente, a determinação da componente friccional pode ser feita utilizando-se uma das diversas equações desenvolvidas a partir de ensaios com placas planas.

<sup>16</sup> Também conhecida como resistência de atrito.

<sup>17</sup> Também conhecida como resistência de forma.

As equações mais conhecidas são as propostas na ATTC (1947) (Equação (25)) e na ITTC (1957) (Equação (26)).

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_F}} = \log(Re C_F) \quad (25)$$

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (26)$$

### 2.5.3 Fator de forma

Conforme discutido na Seção 2.5.1, a resistência ao avanço de uma embarcação pode ser decomposta de acordo com a Equação (27).

$$R_t = R_f + R_{pv} + R_w \quad (27)$$

No entanto, uma vez que, tanto a parcela friccional ( $R_f$ ), quanto a parcela de pressão viscosa ( $R_{pv}$ ), têm origem na interação viscosa do fluido com o casco, é possível definir o grau de proporcionalidade ( $k$ ) entre essas componentes (Equação (28)).

$$k = \frac{R_{pv}}{R_f} \quad (28)$$

Como o grau de proporcionalidade depende, essencialmente, da forma do casco, o fator  $k$  é usualmente conhecido como Fator de Forma da embarcação. Por essa razão, autores como Holtrop e Mennen (1982) modificam a Equação (27) para incluir o fator de forma do casco, obtendo a Equação (29).

$$\begin{aligned} R_t &= R_f + R_{pv} + R_w = R_f + R_{pv} \left( \frac{R_f}{R_f} \right) + R_w = R_f + kR_f + R_w \\ R_t &= R_f (1 + k) + R_w \end{aligned} \quad (29)$$

Diversos autores propõem modelos empíricos que buscam estimar o fator de forma de uma embarcação em função das dimensões e coeficientes hidrostáticos do casco, tal como visto em Molland, Turnock e Hudson (2011).

Uma vez que a metodologia proposta se concentra na abordagem CFD, os detalhes dos diversos modelos empíricos destinados à estimativa do fator de forma fogem ao escopo deste trabalho, mas podem ser consultados no Apêndice F.

### 2.5.4 Extrapolação modelo-navio

Mesmo existindo diversas opções para determinar a resistência ao avanço, o uso de modelos em escala reduzida ainda mantém grande importância.

Para que seja possível determinar as forças resistivas a partir do ensaio de um modelo em escala reduzida, é necessário respeitar três similaridades em relação ao fenômeno que será observado na embarcação real:

- **Geométrica:** Para que exista similaridade geométrica, o modelo e o navio devem ter o mesmo formato. Ou seja, todas as dimensões do casco devem apresentar o mesmo fator de escala ( $\lambda$ ), definido na Equação (30).

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (30)$$

Sendo  $L_s$  uma dimensão qualquer do navio real e  $L_m$  a mesma dimensão medida no modelo em escala reduzida.

- **Cinemática:** Para que exista similaridade cinemática, as velocidades e acelerações devem obedecer a um mesmo fator de escala entre o navio real e o modelo em escala reduzida.
- **Dinâmica:** Para que exista similaridade dinâmica, as forças atuantes na embarcação devem obedecer a um mesmo fator de escala entre o navio real e o modelo em escala reduzida.

Molland, Turnock e Hudson (2011) demonstram que, no caso do estudo da resistência ao avanço de embarcações, para que a similaridade dinâmica seja satisfeita, é necessário que tanto o número de Reynolds (Equação (9)), quanto o número de Froude<sup>18</sup> (Equação (31)) do navio real sejam iguais aos valores do modelo em escala reduzida.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (31)$$

Sendo  $V$  a velocidade do navio [ $m/s$ ],  $g$  a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ] e  $L$  o comprimento do casco [ $m$ ].

No entanto, como pode ser visto no Apêndice A, é impossível satisfazer a igualdade do número de Froude e do número de Reynold ao mesmo tempo. Logo, a utilização de modelos em escala reduzida exige um cuidadoso procedimento de extrapolação de resultados.

Inicialmente é importante observar que, segundo Carlton (2007), a paridade do número de Froude assegura a similaridade dos efeitos potenciais, ao passo que a paridade do número de Reynolds assegura a similaridade dos efeitos viscosos.

Além disso, quando se utilizam modelos em escala reduzida, a obtenção da similaridade do número de Reynolds exige que o modelo seja rebocado a altas velocidades, o que pode inviabilizar os ensaios em tanques de reboque (Apêndice A).

<sup>18</sup> Número adimensional que relaciona as forças de inércia com as forças gravitacionais de um sistema.

Por fim, uma vez que, como demonstra Froude (1874), a resistência friccional independe da forma do navio, essa pode ser obtida usando resultados empíricos calculados considerando uma placa plana de mesma área molhada do modelo.

Logo, os ensaios com modelos em escala reduzida tendem a apresentar similaridade do número de Froude.

Usualmente, as componentes da força de arrasto são expressas em função de coeficientes adimensionais, representados genericamente pela Equação (32).

$$C_i = \frac{R_i}{0,5\rho V^2 S} \quad (32)$$

Sendo  $R_i$  a magnitude da componente calculada [ $N$ ],  $\rho$  a massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ],  $V$  a velocidade de avanço da embarcação [ $m/s$ ] e  $S$  a área molhada do casco [ $m^2$ ].

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), existem duas abordagens principais para a extrapolação da resistência ao avanço de uma embarcação a partir dos resultados obtidos com modelos em escala reduzida.

A primeira, proposta por Froude (1874), considera a força total como a soma das parcelas friccional ( $C_F$ ) e residual ( $C_R$ )<sup>19</sup> (Equação (33)). Onde  $C_R$  contempla as parcelas de geração de ondas ( $C_W$ ) e de pressão viscosa ( $C_{PV}$ ).

$$C_D = C_F + C_R \quad (33)$$

A segunda, desenvolvida por Hughes (1954), considera o somatório da parcela relacionada aos efeitos viscosos ( $C_V$ ) com a parcela associada a geração de ondas ( $C_W$ ) (Equação (34)). Onde  $C_V$  é dividida em duas componentes: friccional ( $C_F$ ) e de pressão viscosa ( $C_{PV}$ ).

$$C_D = C_V + C_W \quad (34)$$

Ambas as modelagens são aproximações que possuem diferentes limitações, as quais são adequadas para diferentes tipos de problemas. Entretanto, segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), o método de Hughes (1954) é mais aceito por apresentar uma divisão mais realista do fenômeno observado, desacoplando os efeitos potenciais e viscosos.

Seguindo essa abordagem, Bertram (2012) propõe que, respeitada a similaridade de Froude, os coeficientes adimensionais  $C_R$  e  $C_W$ <sup>20</sup> não mudam de valor quando calculados para a embarcação real e para o modelo em escala reduzida.

<sup>19</sup> Froude também denominava essa parcela como "o restante", pois considera as componentes da resistência descontada da componente friccional.

<sup>20</sup> Conforme discutido na Equação (33), a rigor, o  $C_R$  já contém o termo  $C_W$ . Além disso, autores como Holtrop (1988) alertam para o fato de que o fator de forma ( $k$ ) sofre influência dos efeitos viscosos e da velocidade da embarcação, e, por isso, não é independente do número de  $Re$ .

Desta forma, a obtenção da resistência total do navio em escala real, a partir dos dados do modelo em escala reduzida, pode ser obtida usando-se as Equações (35) e (36), segundo Froude (1874) e Hughes (1954) respectivamente.

$$C_{D_s} = C_{D_m} - (C_{F_m} - C_{F_s}) \quad (35)$$

$$C_{D_s} = C_{D_m} - (1 + k)(C_{F_m} - C_{F_s}) \quad (36)$$

Onde os termos com subscrito  $s$  e  $m$  referem-se à embarcação real e ao modelo, respectivamente.

Por fim, a resistência ao avanço da embarcação real pode ser calculada utilizando-se a Equação (32).

### 2.5.5 Séries Sistemáticas

Há diversos trabalhos que apresentam resultados de ensaios sistemáticos de resistência ao avanço realizados para diversos tipos de embarcações. Esses estudos são comumente conhecidos como séries sistemáticas e permitem inferir com alta precisão a resistência ao avanço de um casco cujas características correspondam a interpolação das características dos cascos usados na construção da série.

O uso das séries se torna vantajoso principalmente nas etapas iniciais de novos projetos, uma vez que fornece uma estimativa confiável da resistência ao avanço sem a necessidade de execução de ensaios em tanque de prova ou simulações CFD (TODD, 1963). Além disso, os resultados de séries sistemáticas podem ser utilizados para a validação de modelos numéricos.

### 2.5.6 Série 60

Entre as séries sistemáticas, a Série 60 destaca-se como uma das mais conhecidas, sendo uma das mais amplas e confiáveis séries disponíveis para o desenho de cascos de embarcações mercantes.

Essa série é fruto de ensaios realizados no David Taylor Model Basin, um dos maiores e mais respeitados tanques de provas do mundo, e surgiu da necessidade de informações sistemáticas que viabilizassem o projeto rápido e eficiente de embarcações mercantes convencionais, sem bulbo e dotadas de um único propulsor (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Com esse objetivo, foram definidos 5 cascos base para a construção da série, denominados cascos-mãe e cujas características hidrostáticas podem ser vistas no Anexo C. Além disso, no Anexo C estão presentes o plano de linhas de uma embarcação típica e os limites de validade da série.

Em relação aos testes de resistência ao avanço, os modelos em escala reduzida tinham 20 pés de LBP<sup>21</sup>, sendo que a extrapolação da resistência ao avanço utilizou a Equação da ATTC (1947).

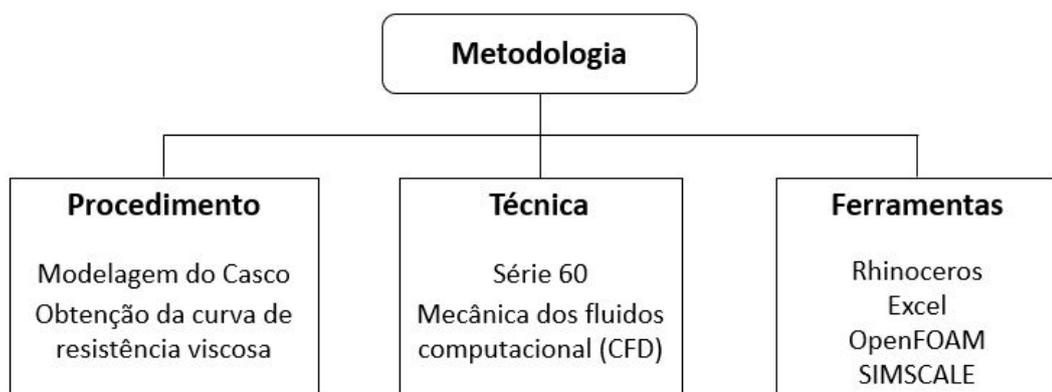
---

<sup>21</sup> Length Between Perpendiculars - Comprimento entre perpendiculares.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, sendo o processo, as técnicas e as ferramentas sintetizados na Figura 13.

Figura 13 – Metodologia para a realização do trabalho



Fonte: O autor (2021)

#### 3.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISES CFD

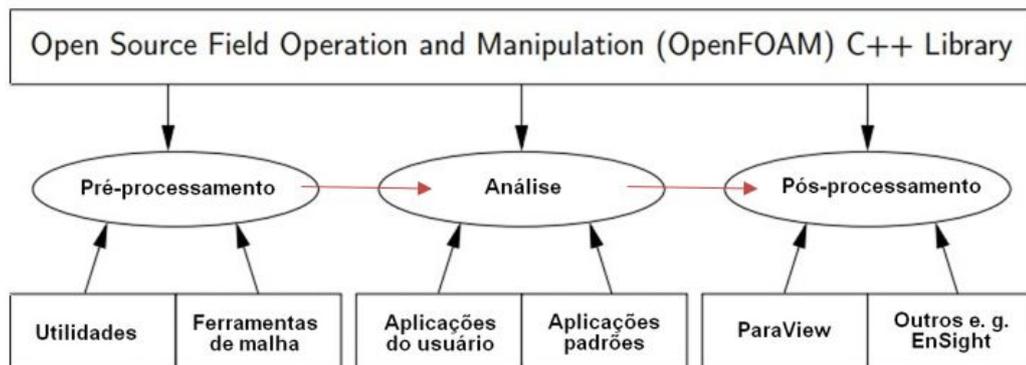
##### 3.1.1 OpenFOAM

O OpenFOAM, amplamente utilizado neste trabalho, é um programa de código aberto e livre, regido pela versão 3 da GPL<sup>22</sup>. Sendo essa uma das razões pelas quais a popularidade do OpenFOAM vem aumentando, pois oferece liberdade aos usuários para modificarem e redistribuírem os códigos de acordo com cada tipo de aplicação (GREENSHIELDS, 2017).

Essencialmente, o OpenFOAM é um código escrito em C++ destinado a resolução de análises numéricas, especialmente focado na abordagem CFD. Portanto, a estrutura do programa foi idealizada considerando os passos típicos desse tipo de abordagem (Figura 14).

<sup>22</sup> General Public License - Licença Pública Geral

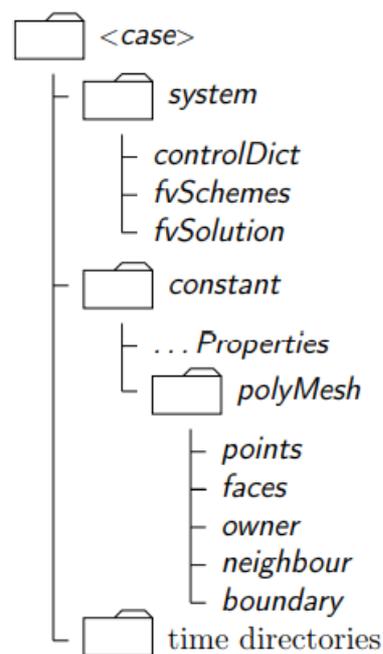
Figura 14 – Etapas de uma simulação no OpenFOAM



Fonte: Adaptado de Greenshields (2019)

Na Figura 15 é mostrada a distribuição básica dos arquivos necessários para a realização de uma análise.

Figura 15 – Estrutura básica de arquivos de uma simulação no OpenFOAM



Fonte: Greenshields (2019)

Observando a Figura 15, percebe-se a existência de três pastas básicas:

- **Constant:** Pasta que contém as informações sobre a malha na subpasta *polyMesh* e propriedades físicas agrupadas em arquivos com sufixo *Properties*<sup>23</sup>
- **System:** Pasta que contém a configuração dos parâmetros relacionados com o

<sup>23</sup> Existem diversos arquivos que compõem esse grupo, os quais dependem das características do escoamento. Dadas as características deste trabalho, são utilizados os arquivos *RASProperties* e *transportProperties*.

processo de solução do sistema de equações lineares, possuindo, pelo menos, os seguintes arquivos:

- *controlDict*: Contém a definição do tempo de simulação (ou número de iterações) e do intervalo temporal, além dos parâmetros relacionados ao pós-processamento (funções para obtenção de forças, coeficientes, valores mínimos e máximos, entre outros);
  - *fvSchemes*: Contém a declaração dos métodos numéricos de discretização dos termos relacionados às equações diferenciais (gradiente, divergente, laplaciano);
  - *fvSolution*: Contém as configurações do algoritmo de solução do acoplamento pressão-velocidade, além de outros parâmetros que podem existir em função do tipo de simulação.
- **Times**: Pasta que contém os arquivos referentes às características de cada variável do escoamento. A subpasta "0" apresenta as condições iniciais, as quais são necessárias em qualquer simulação, uma vez que os algoritmos numéricos são iterativos, mesmo no caso de escoamentos em regime permanente. Já os valores calculados a cada iteração são armazenados nas subpastas com numeração maior do que 0.

Ressalta-se que a estrutura de arquivos mostrada na Figura 15 é a mais simples exigida para a execução de uma simulação. No entanto, as particularidades de cada tipo de análise podem exigir o uso de mais arquivos.

### 3.1.2 SIMSCALE

O SIMSCALE é uma plataforma que utiliza como base a arquitetura e lógica de programação do OpenFOAM, possuindo poucas diferenças nos nomes das pastas e nos comandos utilizados. Além disso, por ser uma plataforma que apresenta uma interface intuitiva, torna-se atrativa para iniciantes em análises CFD que tem o objetivo de se aprofundarem no uso do OpenFOAM.

Ainda que o OpenFOAM permita utilizar os núcleos do processador para paralelizar o processo (usando o arquivo *system/decomposeParDict*), apenas uma simulação pode ser executada por vez.

Visando realizar diversas simulações em paralelo, optou-se por utilizar o SIMSCALE, cujo fórum conta com o suporte de diversos usuários, auxiliando no esclarecimento de dúvidas e possíveis sugestões de melhorias.

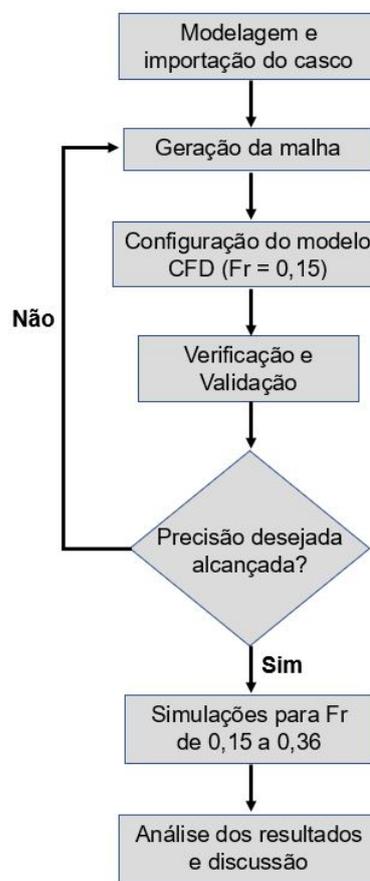
Entre as diversas possibilidades existentes, optou-se por utilizar o plano gratuito, que permite a realização das simulações em computadores virtuais (nuvem) com 16 núcleos, os quais são mais rápidos do que os computadores pessoais comumente utilizados pela comunidade acadêmica. Salienta-se que as características do plano gratuito não impuseram limitações quanto ao tamanho do modelo e/ou qualidade da malha utilizada.

No período de desenvolvimento desta monografia a versão utilizada no SIMSCALE para a geração da malha foi a *OFv1606+*, enquanto para as demais etapas foi utilizada a versão *OF2.3.1*.

### 3.1.3 Procedimento

O desenvolvimento deste trabalho seguiu a sequência tipicamente observada em qualquer simulação CFD, a qual pode possuir pequenas variações devido à natureza do fenômeno analisado. Na Figura 16 são mostradas as etapas para a realização das simulações, buscando sempre um compromisso entre os erros obtidos e o custo computacional necessário para realizar a simulação.

Figura 16 – Fluxograma utilizado no desenvolvimento das análises



Fonte: O autor (2021)

As simulações foram realizadas tendo como base a versão 2.3.1 do OpenFOAM, sendo executadas majoritariamente através do fórum SIMSCALE. Essa versão foi escolhida para assegurar a justa comparação entre os resultados obtidos com o uso de ambas as ferramentas, uma vez que o SIMSCALE utiliza essa versão do OpenFOAM para as análises.

O OpenFOAM possui alguns modeladores geométricos e geradores de malha, como o *blockmesh* e *snappyHexMesh*<sup>24</sup>. A geometria do casco da Série 60 foi modelada no Rhinoceros, para então ser importada tanto no SIMSCALE, quanto no *snappyHexMesh*.

O modelo da Série 60 adotado foi o 4212W, o qual também foi utilizado por Hille (2017). Desta forma, os resultados obtidos puderam ser comparados com aqueles encontrados pela autora<sup>25</sup>. As características hidrostáticas do casco analisado, bem como o plano de linhas do modelo 4212W, podem ser vistos no Anexo C.

É importante destacar que a resistência ao avanço da embarcação será avaliada nas mesmas velocidades estudadas por Hille (2017). Para complementar a análise, serão geradas simulações em velocidades intermediárias, obedecendo os limites descritos no Anexo D.

Conforme já mencionado, para validar o desenvolvimento realizado, os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais disponíveis na Série 60. Com o intuito de facilitar a comparação direta com os dados experimentais da Série 60 será utilizada a equação da ATTC (1947).

Ainda assim, salienta-se que o arquétipo elaborado estabelece recomendações referentes aos diversos elementos da modelagem CFD, as quais podem ser aplicadas à um grande número de geometrias convencionais de cascos<sup>26</sup>.

Por se tratar de um escoamento incompressível, em regime permanente, turbulento, isotérmico e monofásico, o *solver* utilizado será o *simpleFoam*, que se baseia no algoritmo SIMPLE para realizar o acoplamento dos campos de pressão e velocidades (GREENSHIELDS, 2019).

Além do algoritmo SIMPLE, o *solver* o *potentialFoam*, que se baseia no algoritmo *potentialFlow*, foi utilizado para inicializar o campo de velocidade longe do casco, favorecendo a estabilidade numérica e acelerando a convergência do processo iterativo intrínseco ao SIMPLE.

---

<sup>24</sup> O *blockMesh* será utilizado para criação do domínio computacional e o *snappyHexMesh* para a geração da malha em si, considerando a presença do casco e os refinamentos necessários.

<sup>25</sup> Destaca-se que, embora semelhantes, as análises realizadas por Hille (2017) consideram o escoamento em regime transiente e a presença de superfície livre.

<sup>26</sup> Admite-se a premissa de que a forma dos cascos de embarcações mercantes é, de certa maneira, semelhante, do ponto de vista da modelagem CFD.

O algoritmo *potentialFlow* utiliza-se do conceito de velocidade potencial para calcular o fluxo volumétrico na face de cada volume de controle, a partir do qual, o campo de velocidade é calculado. Para um maior entendimento sobre esse procedimento recomenda-se a leitura de Greenshields (2019).

Uma vez que se objetiva simulações ágeis e leves, disponíveis a grande maioria dos pesquisadores e engenheiros, optou-se pela abordagem RANS com o uso das funções de parede para a modelagem da camada limite. Essa abordagem reduz o custo computacional, permitindo focar na análise das propriedades médias do escoamento.

Por fim, é importante observar que as simulações realizadas se dividem em:

- **Fase de Calibração:** Nessa fase apresentam-se as simulações que buscam estabelecer a combinação de parâmetros mais adequada ao tipo de análise proposta. Nesse caso, todas as simulações são realizadas considerando um número de Fr igual a 0,15;
- **Fase de Validação:** Nessa fase são realizadas as simulações finais do projeto, as quais usam os parâmetros definidos na fase de calibração para gerar a curva de resistência ao avanço para o intervalo de Fr de 0,15 a 0,36 (Anexo D).

Para a visualização dos resultados será utilizado o próprio visualizador do SIMSCALE. No entanto, destaca-se que o Paraview, programa amplamente utilizado junto ao OpenFOAM, também poderia ser utilizado para a mesma finalidade.

## 3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Dentro do procedimento estabelecido, a fase de pré-processamento consiste na preparação da simulação, definindo-se a geometria, a malha, as condições de contorno, as condições iniciais e o modelo matemático adotado.

### 3.2.1 Modelo matemático

Nesta etapa são definidas as características do modelo matemático empregado:

- **Água salgada:** Engloba o fato de ser um escoamento incompressível, newtoniano e monofásico. As propriedades do fluido são definidas no arquivo *transportProperties*, localizado na pasta *constant*.
- **Modelo de turbulência do tipo RANS:** É definido no arquivo *RASProperties*, também localizado na pasta *constant*.

### 3.2.2 Geração da malha

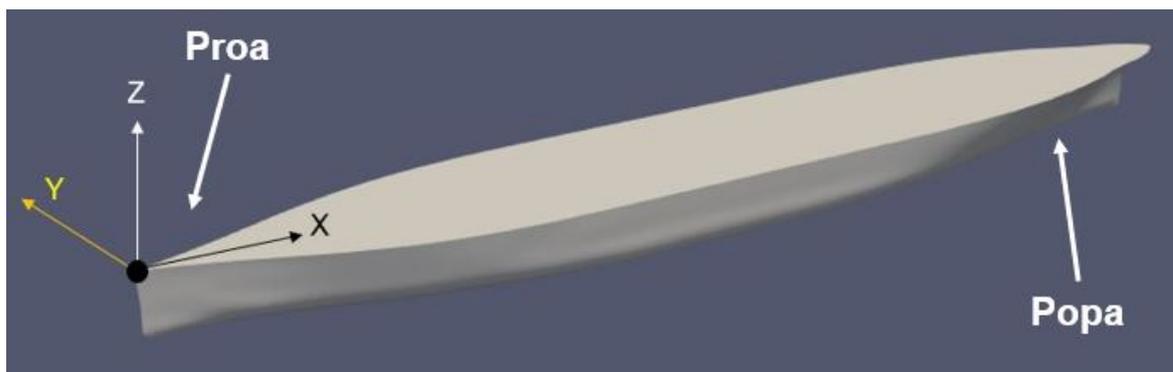
Nesta seção são descritas as etapas necessárias para a geração da malha utilizada nas simulações.

#### 3.2.2.1 Definição do sistema de coordenadas

Uma análise numérica exige que um sistema de coordenadas seja especificado, pois as propriedades vetoriais são declaradas em função da orientação espacial determinada. Além disso, na etapa de pós-processamento, as forças e momentos são definidos considerando o referencial estabelecido.

As simulações realizadas nesta monografia utilizam o sistema de coordenadas mostrado na Figura 17. Partindo dessa origem, o eixo X positivo se alinha com o avanço do escoamento, o eixo Y tem sentido positivo quando aponta para o boreste da embarcação e o eixo Z tem sentido positivo contrário ao da aceleração da gravidade.

Figura 17 – Sistema de coordenadas utilizado nas simulações

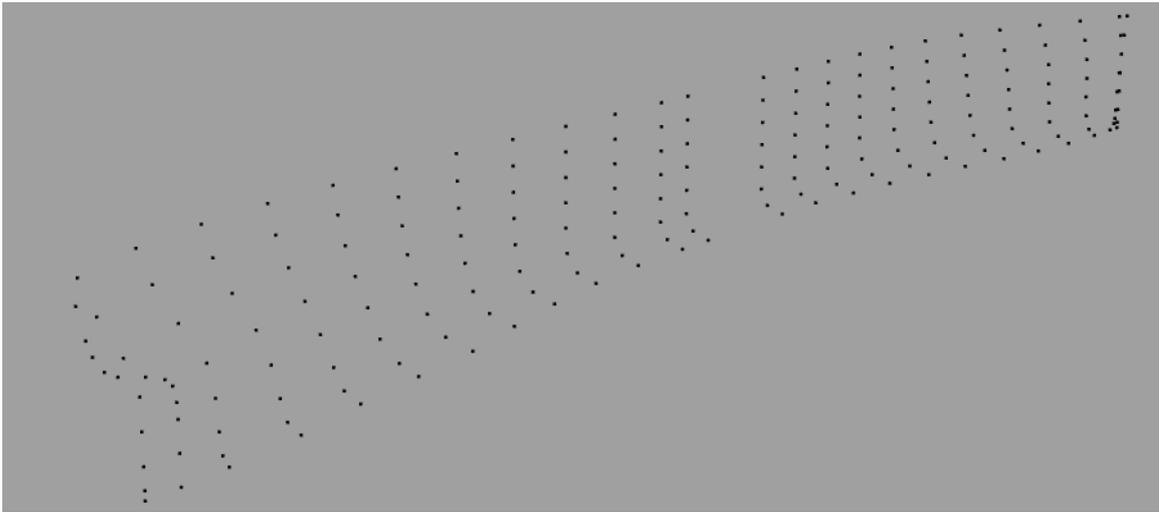


Fonte: O autor (2021)

#### 3.2.2.2 Modelagem da geometria

Para a modelagem do casco, foi utilizada a planilha desenvolvida por Spada (2019), a qual fornece uma nuvem de pontos que descreve cada uma das balizas de um casco da Série 60 (Figura 18) e cujas coordenadas podem ser encontradas no Apêndice D. Em seguida, esses pontos foram exportados para o programa Rhinoceros.

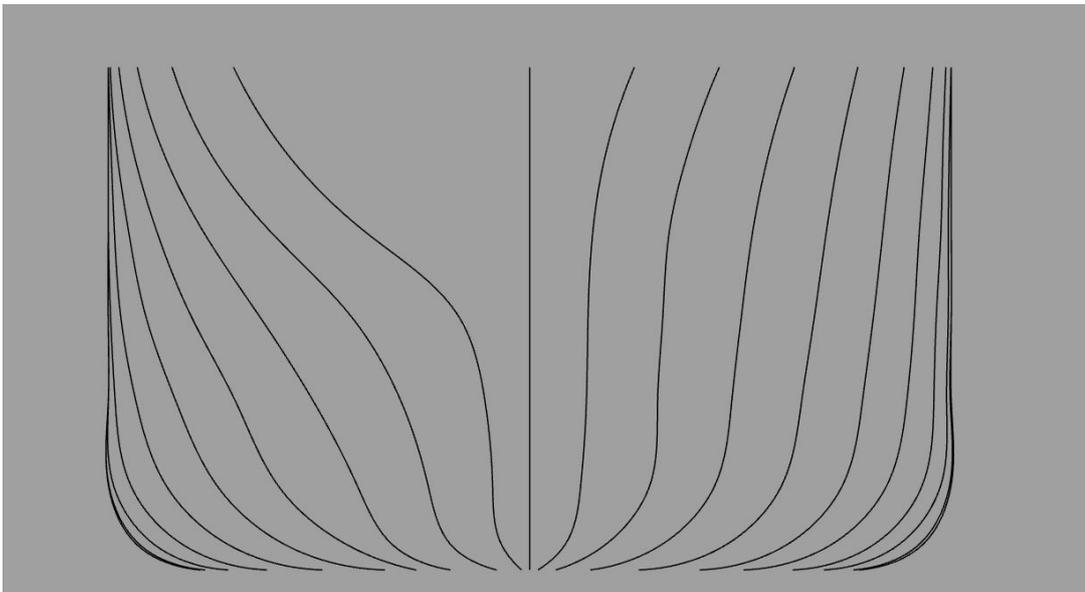
Figura 18 – Nuvem de pontos do modelo 4212W



Fonte: O autor (2021)

Uma vez importada a nuvem de pontos, foram criadas as curvas interpoladoras referentes a cada uma das balizas do casco (Figura 19).

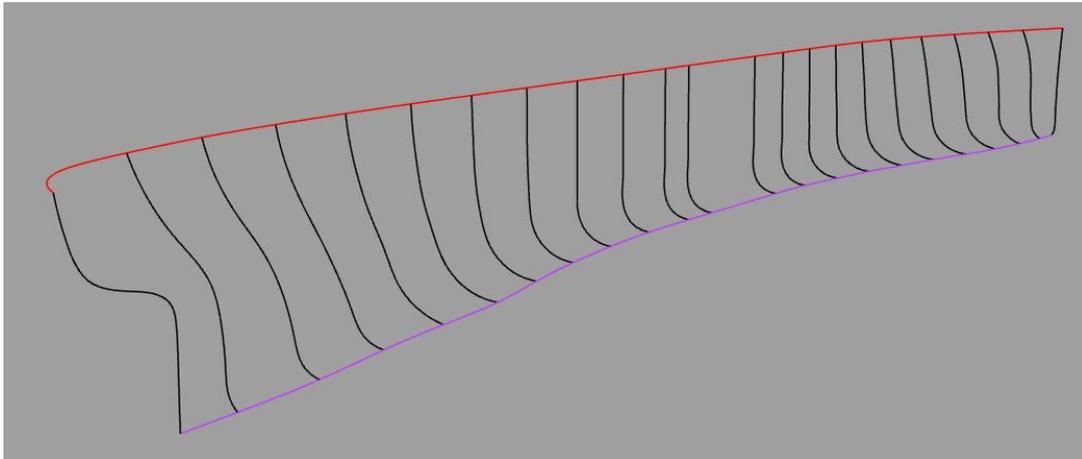
Figura 19 – Plano de balizas do modelo 4212W



Fonte: O autor (2021)

Visando conectar as balizas criadas, foram adicionadas curvas auxiliares, conforme pode ser visto na Figura 20. A primeira curva une os pontos inferiores de cada uma das balizas e representa o fundo do casco (curva roxa). Já a segunda une os pontos superiores de cada uma das balizas, e representa o convés da embarcação (curva vermelha).

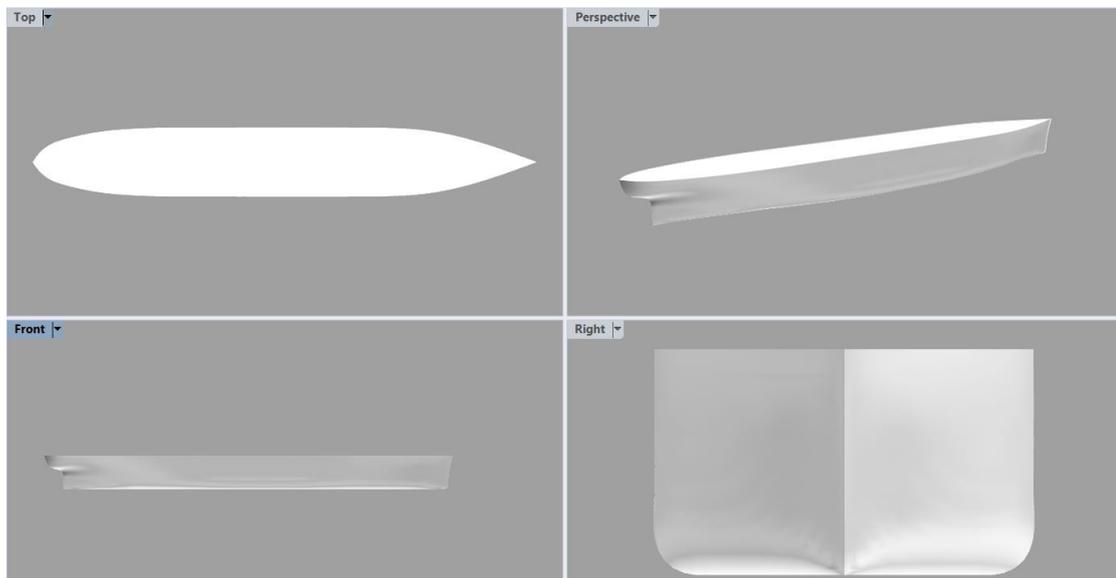
Figura 20 – Curvas auxiliares para geração da superfície



Fonte: O autor (2021)

Essas curvas complementares são necessárias para a utilização do recurso *networksurf* pertencente ao Rhinoceros, o qual exige que todas as curvas em uma direção (roxa e vermelha) cruzem todas as curvas na outra direção (pretas) mas não podem se cruzar (MCNEEL; ASSOCIATES, 2016). O resultado da modelagem, usando o comando *networksurf*, é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Superfície fechada do modelo 4212W

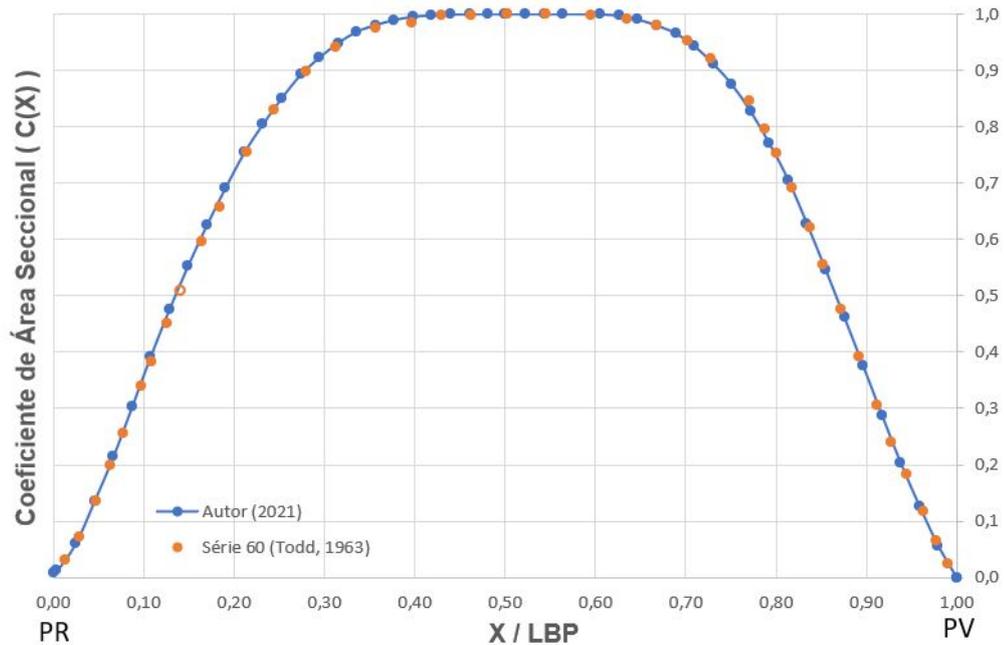


Fonte: O autor (2021)

Apesar de o casco-mãe 4212W possuir as dimensões apresentadas no Anexo C, o modelo utilizado por Hille (2017) possui um fator de escala geométrico ( $\lambda$ ) de 1:27,1, resultando em um LBP de 4,5 m. Logo, para permitir uma comparação assertiva entre os resultados, optou-se por utilizar o mesmo fator de escala geométrico usado por Hille (2017).

Foram empregadas duas abordagens para verificar a qualidade da modelagem realizada. A primeira consiste na comparação gráfica da SAC do casco modelado com aquela descrita em Todd (1963) (Figura 22). Já a segunda, consiste na comparação dos dados hidrostáticos obtidos por Hille (2017)<sup>27</sup> com aqueles calculados para o casco modelado (Tabela 2).

Figura 22 – Comparação entre SACs para o modelo 4212W de 400 pés



Fonte: O autor (2021)

O coeficiente de área seccional ( $C(X)$ ), visto na Figura (22), é calculado segundo a Equação 37.

$$C(X) = \frac{SAC(X)}{Am} \quad (37)$$

Sendo  $SAC(x)$  a área da baliza em  $X$  [ $m^2$ ] e  $Am$  a área da seção mestra [ $m^2$ ]. Além disso, PR e PV representam a perpendicular de ré e de vante da embarcação, respectivamente.

Observando a Tabela 2, destaca-se que o LCB<sup>28</sup> é dado como uma porcentagem do LBP medido a partir da meia-nau, sendo negativo na direção da popa e positivo na direção da proa.

Como as diferenças entre as características hidrostáticas do casco proposto por Hille (2017) e do casco modelado neste trabalho são inferiores a 1% (Tabela 2), a geometria foi considerada adequada para a realização das simulações.

<sup>27</sup> Destaca-se que a compatibilidade dos dados geométricos e hidrostáticos de Hille (2017) em relação àqueles presentes em Todd (1963) já foi confirmada.

<sup>28</sup> Longitudinal Center of Buoyancy - Centro longitudinal de carena

Tabela 2 – Comparação das características hidrostáticas

Propriedade	Hille (2017)	Autor (2021)	Erro relativo [%]
LBP [m]	4,512	4,500	-0,266
B [m]	0,643	0,643	0,000
T [m]	0,257	0,257	0,000
$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	0,522	0,520	0,385
S [m <sup>2</sup> ]	4,059	4,052	0,173
Cb	0,699	0,700	0,143
Cm	0,986	0,987	0,101
Cw	0,784	0,788	0,510
Cp	0,709	0,710	0,141
LCB [%]	0,504	0,508	0,198
L/B	7,017	7,000	-0,242
B/T	2,502	2,502	0,000

Fonte: O autor (2021)

Finalizada a modelagem do casco, a geometria obtida é importada no OpenFOAM, sendo salva na pasta *triSurface*. É importante destacar que, para permitir a utilização do *snappyHexMesh*, a superfície do casco deve ser uma malha triangular, em outras palavras, o casco deve ser exportado como *.stl* ou *.obj*.

O Rhinoceros permite escolher o refino da malha exportada, o qual define o grau de aproximação entre a malha gerada e a geometria modelada. As configurações de exportação do arquivo *.stl* utilizadas podem ser vistas no Apêndice B.

Para facilitar a adequação da geometria às dimensões do domínio, recomenda-se que a modelagem do casco seja feita com uma superfície única<sup>29</sup>. Nesse caso, as próprias dimensões do domínio computacional fazem com que a geometria seja cortada no plano diametral e no plano de linha d'água, evitando a necessidade de cortes na geometria modelada.

Essa recomendação decorre do fato de que, ao se realizar a importação da geometria já cortada, podem surgir irregularidades na malha em função da descontinuidade da geometria.

<sup>29</sup> Assim como no Rhinoceros, em alguns programas CAD, a definição de uma única superfície para a modelagem do casco pode implicar na utilização de um único sólido para a representação do modelo.

### 3.2.2.3 Domínio computacional

A determinação das dimensões do domínio deve considerar um balanço entre o tempo de processamento e a influência das condições de contorno no escoamento. Isso ocorre porque as condições de contorno são imposições físicas que visam aproximar o comportamento da modelagem CFD ao do escoamento real. Esse comportamento se propaga entre os volumes de controle, afetando as variáveis locais (velocidade, pressão etc.) e influenciando as variáveis globais (forças, momentos etc.).

Por maior que seja o grau de convergência de uma simulação, os limites do domínio computacional tendem a introduzir diferenças em relação ao comportamento do escoamento real, e, portanto, devem estar o mais longe possível do casco para não exercerem influência significativa no resultado. Por outro lado, quanto maior o domínio computacional, maior é o custo computacional exigido.

Nesse contexto, foram tomadas dimensões similares as adotadas por Hille (2017), exceto pela profundidade e pelo comprimento à ré do casco, cujas dimensões foram definidas com base em TAHARA et al (2006) e Wortley (2013). Na Tabela 3 são sintetizadas as dimensões utilizadas para o domínio computacional<sup>30</sup> deste trabalho (Figura 23) em comparação com as dimensões usadas por Hille (2017).

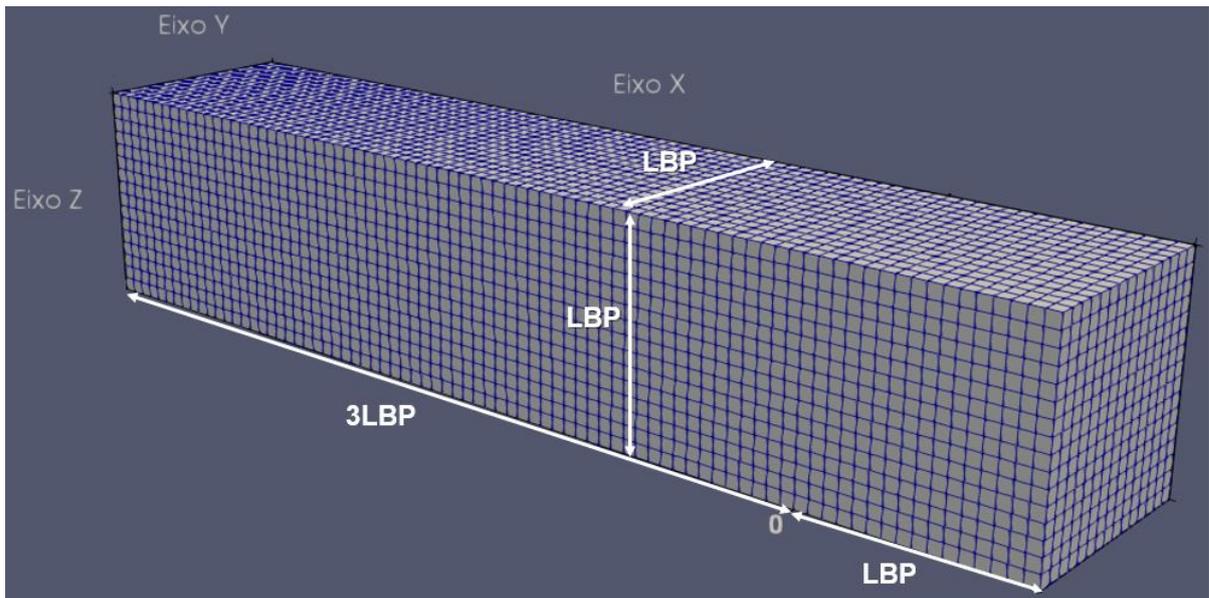
Tabela 3 – Dimensões do domínio computacional

Coordenadas	Autor (2021)		Hille (2017)	
	Mínimo [m]	Máximo [m]	Mínimo [m]	Máximo [m]
X	-LBP	3LBP	-LBP	2LBP
Y	-LBP	0	-LBP	1LBP
Z	-LBP	0	-1,5LBP	0,5LBP

Fonte: O autor (2021)

<sup>30</sup> As dimensões máximas e mínimas são dadas em relação a origem do sistema (Figura 17).

Figura 23 – Dimensões do domínio computacional



Fonte: O autor (2021)

Com o uso do comando *blockMesh*, cujas diretrizes encontram-se em *constant/polyMesh/blockMeshDict*, criou-se uma malha hexaédrica discretizando o domínio computacional. Os dados relacionados à malha do domínio computacional são salvos na pasta *constant/polyMesh*.

Para realização da discretização, é necessário informar ao programa o tamanho dos volumes em cada direção, bastando dividir a dimensão pelo número de volumes desejado.

Embora o foco desta monografia seja o uso do *snappyHexMeshDict*, o leitor mais interessado pode consultar o manual do OpenFOAM para uma melhor compreensão sobre a criação dos blocos e declaração dos contornos dentro do *blockMeshDict*.

Em relação a malha do domínio computacional, é desejável que, para facilitar o uso do *snappyHexMeshDict*, os volumes de controle tenham uma razão de aspecto próxima de 1, ou seja, sejam hexaedros perfeitos (GREENSHIELDS, 2019).

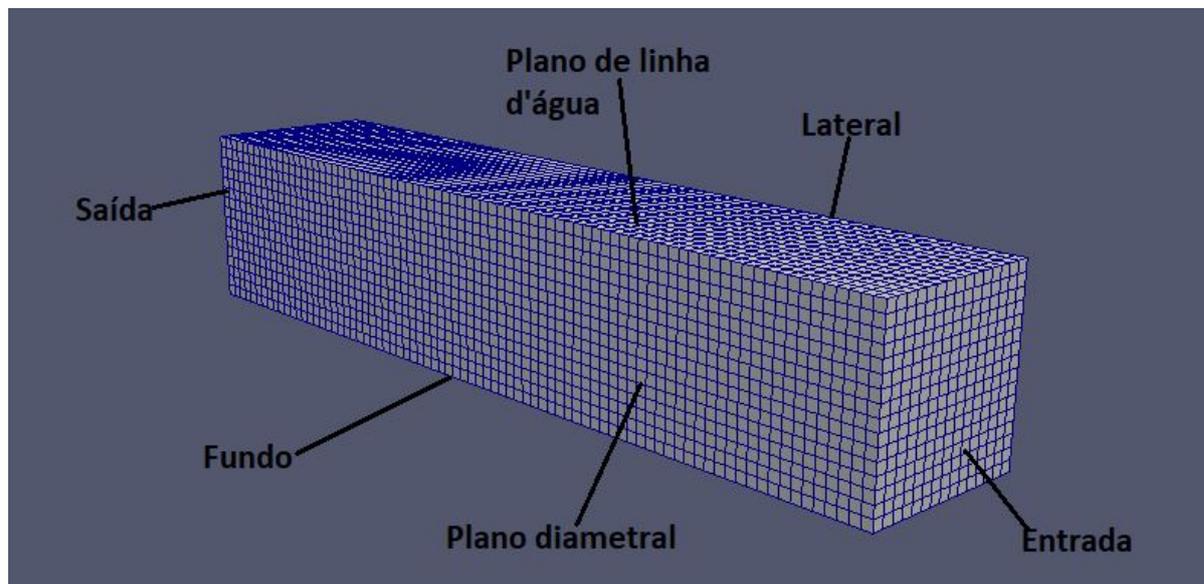
A malha gerada possui as características mostradas na Tabela 5 e pode ser vista na Figura 24, na qual também é mostrada a nomenclatura adotada para as faces do domínio computacional.

Tabela 5 – Discretização do domínio computacional

Direção	Tamanho dos VCs [m]	Número de VCs
X	0,2813	80
Y	0,3000	15
Z	0,2813	16

Fonte: O autor (2021). Sendo VCs = Volumes de controle

Figura 24 – Domínio computacional discretizado



Fonte: O autor (2021)

#### 3.2.2.4 Geração da malha considerando a superfície do casco

Uma vez que o domínio computacional está definido, a próxima etapa consiste na geração da malha em torno do casco. A geração da malha com o *snappyHexMeshDict* considera os parâmetros definidos nas seguintes divisões dentro do arquivo:

- **geometry**: Contém a declaração das regiões definidas para refinamentos posteriores;
- **meshQualityControls**: Contém a definição de parâmetros destinados ao controle de qualidade da malha;
- **castellatedMesh**: Contém as instruções para a realização do refino da malha base junto à superfície do casco e nas regiões de interesse definidas em *geometry*;
- **snap**: Contém as informações necessárias para a acomodação da malha na superfície do casco;

- ***addLayers***: Contém os parâmetros associados à inserção das camadas adicionais junto a superfície do casco, as quais têm o objetivo de captar o escoamento na camada limite.

Um recurso interessante do programa consiste em desabilitar cada um dos procedimentos de geração da malha, o que proporciona ao usuário um maior entendimento sobre o comportamento de cada etapa, além de permitir encontrar eventuais erros de modelagem.

Vale ressaltar que a verificação das características da malha é feita analisando-se a saída exibida no terminal após a execução do comando *snappyHexMesh*. Além disso, com o comando *paraFoam* é possível visualizar o estado da malha em cada etapa do processo.

O diretório *snappyHexMeshDict* apresenta uma quantidade elevada de dados de entrada. Neste texto são discutidos apenas os principais parâmetros, enquanto os demais podem ser vistos no Apêndice C.

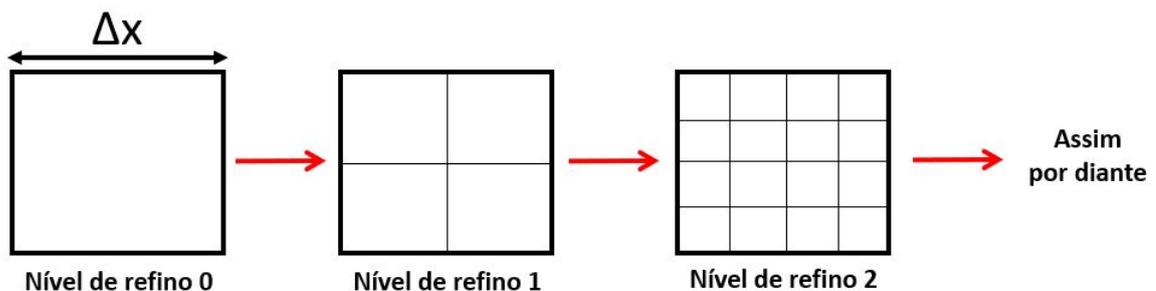
### 3.2.2.5 Refino da malha base

Na primeira etapa do *snappyHexMesh* são realizados três procedimentos:

1. Divisão dos volumes de controle que interceptam a superfície do casco;
2. Refino da malha conforme as diretrizes contidas em *castellatedMesh*;
3. Remoção dos elementos que não serão considerados na análise em função do tipo de escoamento (externo ou interno).

O método do *snappyHexMesh* para refinar a malha baseia-se em operações de bisseção nas três direções espaciais do volume de controle da malha base (Figura 25), sendo o número de operações designado pela palavra-chave *level* (nível).

Figura 25 – Processo de refino de uma malha base hexaédrica



Fonte: O autor (2021)

Dessa forma, um elemento da malha apresentará as dimensões conforme a Equação (38).

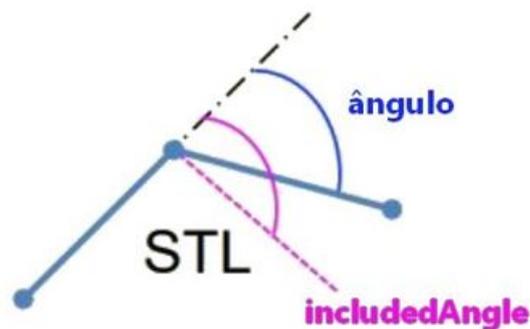
$$\Delta_X^{novo} = \frac{\Delta_X}{2^{nível}} \quad (38)$$

A vantagem do uso dos níveis de refino consiste na possibilidade de se testar facilmente diversas configurações de malha, bastando modificar o tamanho dos volumes de controle da malha base para que todo refino desejado seja escalonado de maneira proporcional ao escalonamento da malha base.

O refino da malha começa com a identificação dos contornos da geometria, o qual é realizado com o recurso de bordas (*Feature Edges*). Para que o *snappyHexMesh* reconheça as arestas, é necessário o uso do arquivo *system/surfaceFeaturesDict*, cujas diretrizes são mostradas no Apêndice C.

O principal parâmetro desse arquivo é o *includedAngle*, o qual define o ângulo utilizado no mapeamento das superfícies visando extrair as arestas a serem consideradas na discretização da geometria modelada. Dadas duas superfícies adjacentes, se o ângulo formado entre seus vetores normais for menor do que o *includedAngle* (Figura 26), a aresta comum às duas superfícies será utilizada.

Figura 26 – Lógica do parâmetro *includedAngle*



Fonte: Adaptado de Dynamics (2019)

Observa-se que o *includedAngle* pode variar de  $0^\circ$  (significando que nenhuma aresta será selecionada) a  $180^\circ$  (significando que todas as arestas serão incluídas na geração da malha). Logo, é necessário utilizar um valor que capte o suficiente da geometria modelada sem aumentar excessivamente o custo computacional da modelagem.

A ideia é declarar o menor número de curvas que permita uma descrição suficientemente precisa da geometria modelada, em especial das regiões com grandes mudanças de curvatura, tais como a popa e a proa de embarcações.

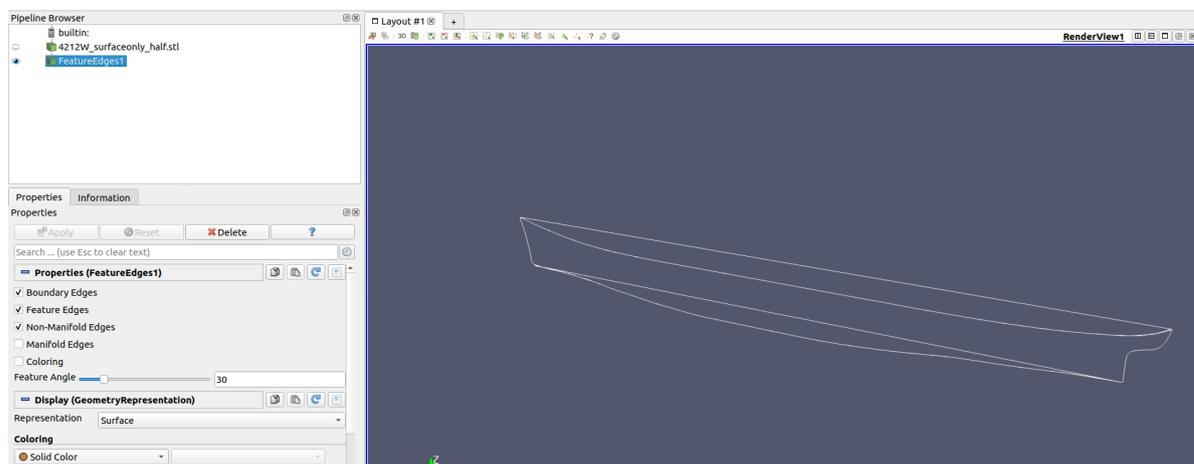
Uma maneira eficiente de compreender e visualizar esse processo consiste na determinação do *Feature Angle*, o qual captura as arestas usando um raciocínio inverso ao do *includedAngle*.

Nesse caso deve-se:

1. Utilizar o comando *paraview* para abrir a interface do programa de visualização;
2. Na aba *Alphabetical*, deve-se procurar por *Feature Edges* optando pela representação de linhas externas (*outlines*);
3. Manipular o *Feature Angle* até que se capture a quantidade desejada de curvas.

No caso deste trabalho, foi definido o ângulo de 30°, para o qual as arestas capturadas são mostradas na Figura 27. Dessa forma, o *includedAngle* utilizado será de 150°.

Figura 27 – Arestas capturadas pelo recurso *FeatureEdges*



Fonte: O autor (2021)

Uma vez especificadas as arestas, o comando *surfaceFeature* executará o processo, tendo como saída um arquivo de extensão *.eMesh*, localizado na pasta *constant*, o qual é utilizado para especificar o nível de refino das arestas.

A seguir são definidos os graus de refino por região, por aresta e por superfície, os quais são declarados em *refinementRegions*, *features* e *refinementSurfaces* respectivamente. Na Tabela 6 são mostrados os níveis de refino utilizados neste trabalho, obtidos após testes sucessivos de geração de malha.

As geometrias destinadas ao refino por região são especificadas em *geometry*, sendo que nesse caso foram definidas apenas duas: *serie60.stl*<sup>31</sup> (referente ao casco) e *wake* (referente a esteira a ré do casco).

<sup>31</sup> É importante que o nome do arquivo *.stl* declarado no *snappyHexMesh* seja o mesmo presente na pasta *constant/triSurface*. Recomenda-se que o usuário verifique o nome ao lado de *OBJECT* na primeira e na última linha do arquivo, pois ambos devem ser iguais.

Tabela 6 – Declaração dos níveis e regiões de refino

<b>Recurso</b>	<b>Região</b>	<b>Nível de refino</b>
<i>features</i>	Arestas	6
<i>refinementSurfaces</i>	Superfície	(5;5)
<i>refinementRegions</i>	Próxima ao casco	(0,05;6)
	Esteira	3

Fonte: O autor (2021)

A esteira foi definida por um paralelepípedo a ré do casco, cujas dimensões são exibidas na Tabela 7 <sup>32</sup>, e tem como objetivo capturar os efeitos do escoamento nessa região com maior fidelidade e precisão<sup>33</sup>.

Tabela 7 – Dimensões da região da esteira

<b>Coordenada</b>	<b>Mínimo [m]</b>	<b>Máximo [m]</b>
X	4,55	18,00
Y	-0,35	0,00
Z	-0,30	0,00

Fonte: O autor (2021)

A definição da região próxima ao casco visa preparar a malha para a etapa de conformação, além de colaborar com a inserção das camadas adjacentes ao casco. Em relação às especificações dessa região, ressalta-se que o primeiro número define a distância em relação ao casco na qual o refino será aplicado, enquanto o segundo número define o nível de refino a ser aplicado.

Para a definição do refino da superfície do casco, dois parâmetros merecem atenção:

- *resolveFeatureAngle*: esse ângulo controla o refino local de arestas com mudança abrupta de curvatura. Portanto, deve-se buscar um equilíbrio entre a qualidade da malha e o custo computacional do processo. Os estudos realizados para este trabalho mostraram que uma boa estimativa consiste em usar o mesmo valor adotado para o *Feature Angle* (Figura 27);

<sup>32</sup> Dimensões considerando o sistema de coordenadas mostrado na Figura 17.

<sup>33</sup> Destaca-se que essa região seria ainda mais importante no caso de uma análise na qual um propulsor estivesse acoplado ao casco, pois os efeitos dos campos de velocidades e pressão têm grande influência no desempenho de um propulsor.

- Níveis de refino da superfície: são utilizados dois números na especificação do nível de refino da superfície. O primeiro controla o refino global, enquanto o segundo especifica o grau de refino das regiões captadas pelo *resolveFeatureAngle*.

A última etapa consiste na definição do tipo de análise que será realizada (externa ou interna). Essa configuração é realizada através da declaração das coordenadas de um ponto, as quais são definidas no parâmetro *locationInMesh*. Nessa etapa, Greenshields (2019) recomenda os seguintes cuidados:

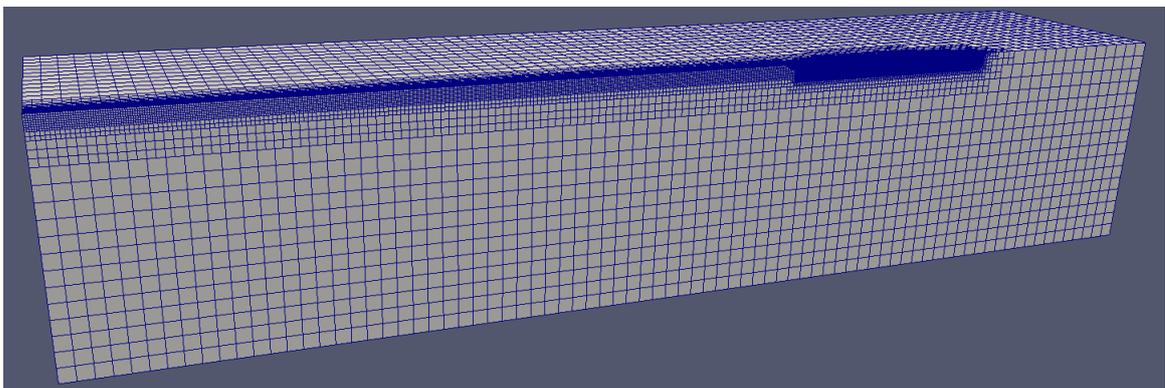
- Para que se tenha uma malha destinada à um escoamento externo, o ponto escolhido deve possuir coordenadas externas à superfície de interesse. Já no caso de um escoamento interno, o raciocínio inverso é aplicado;
- O ponto escolhido deve estar localizado em uma região de refino de malha uniforme e não pode coincidir com a face de um volume de controle.

Nas análises realizadas neste trabalho, definiu-se o ponto de referência (*locationInMesh*) como (-4,445 -4,445 -4,445). No entanto, é possível utilizar quaisquer outras coordenadas que respeitem as premissas acima.

Definidas as coordenadas do parâmetro *locationInMesh*, o algoritmo realiza a extração dos elementos da malha que possuem mais de 50% do volume fora da região definida para a permanência no domínio computacional, ou seja, a região externa ao casco.

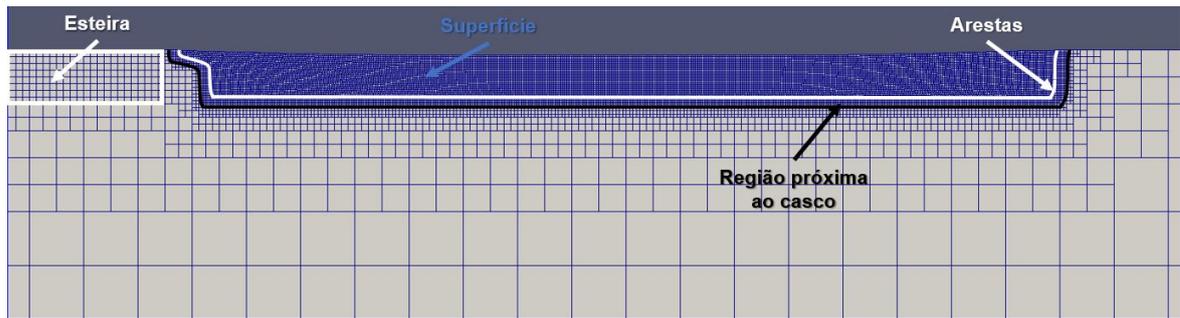
Nas Figuras 28 a 30 é mostrado o resultado da geração da malha após a execução do comando *snappyHexMesh* considerando apenas a etapa *castellated*. As regiões de refino definidas na Tabela 6 são destacadas na Figura 29.

Figura 28 – Vista em perspectiva da malha



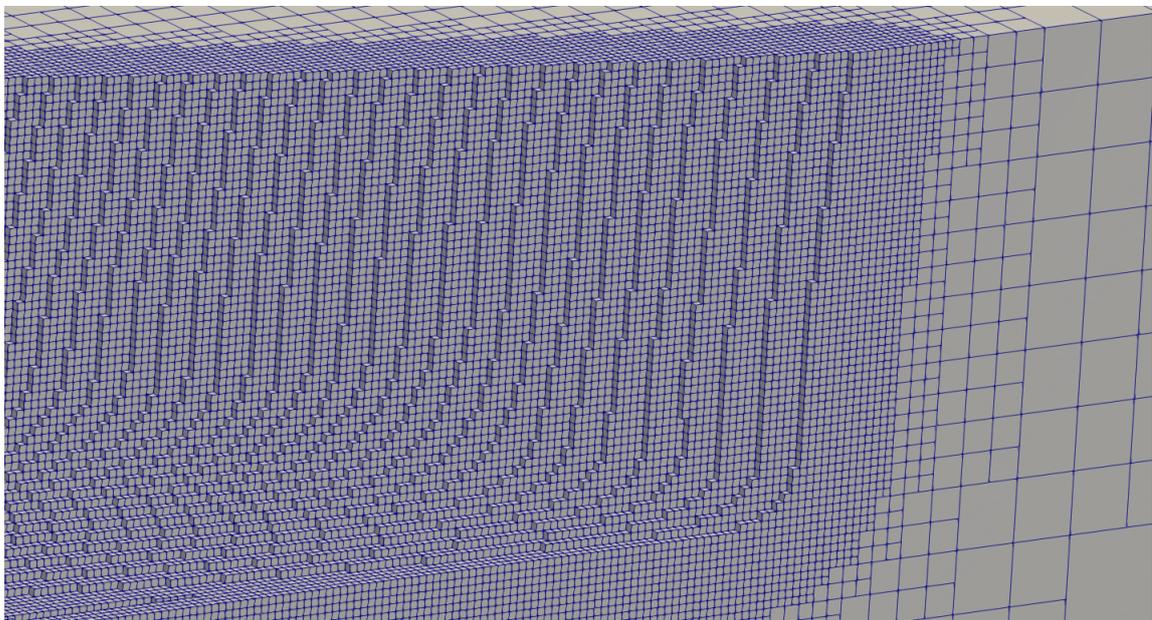
Fonte: O autor (2021)

Figura 29 – Detalhamento das regiões de refino da malha



Fonte: O autor (2021)

Figura 30 – Refino da malha base na proa do casco



Fonte: O autor (2021)

### 3.2.2.6 Conformação da malha à geometria do casco

Nessa fase, os principais cuidados a serem considerados estão relacionados ao número de iterações executadas no processo de conformação, os quais são definidos pelos parâmetros apresentados na Tabela 8. Uma breve explicação sobre os parâmetros de conformação pode ser vista no Apêndice C, porém, maiores detalhes podem ser vistos em Dynamics (2019) e Greenshields (2019).

O processo de conformação iterativa será executado de forma a respeitar os parâmetros de qualidade da malha definidos em *system/meshQualityDict*, além de ser limitado pelo número máximo de iterações estabelecido.

Tabela 8 – Parâmetros relacionados à conformação da malha

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<i>nSmoothPatch</i>	5
<i>nRelaxIter</i>	8
<i>nSolveIter</i>	200
<i>nFeatureSnapIter</i>	10

Fonte: O autor (2021)

Uma forma racional de definir os parâmetros de conformação da malha consiste em atribuir valores elevados para os testes e monitorar a saída do *meshQualityDict*. Caso o número de iterações cresça em uma taxa maior do que a qualidade da malha, deve-se rever os dados de entrada do *snappyHexMeshDict*.

Repete-se então o procedimento, controlando a qualidade da malha e diminuindo o número de iterações, agilizando o processo de adequação à superfície.

Por fim, destaca-se que a malha utilizada neste trabalho respeitou os requisitos de qualidade, sendo os mais importantes sintetizados na Tabela 9. As particularidades envolvidas em cada um dos parâmetros associados a qualidade da malha não são foco deste trabalho, porém recomenda-se a leitura de Jasak (1996) para um maior entendimento do assunto.

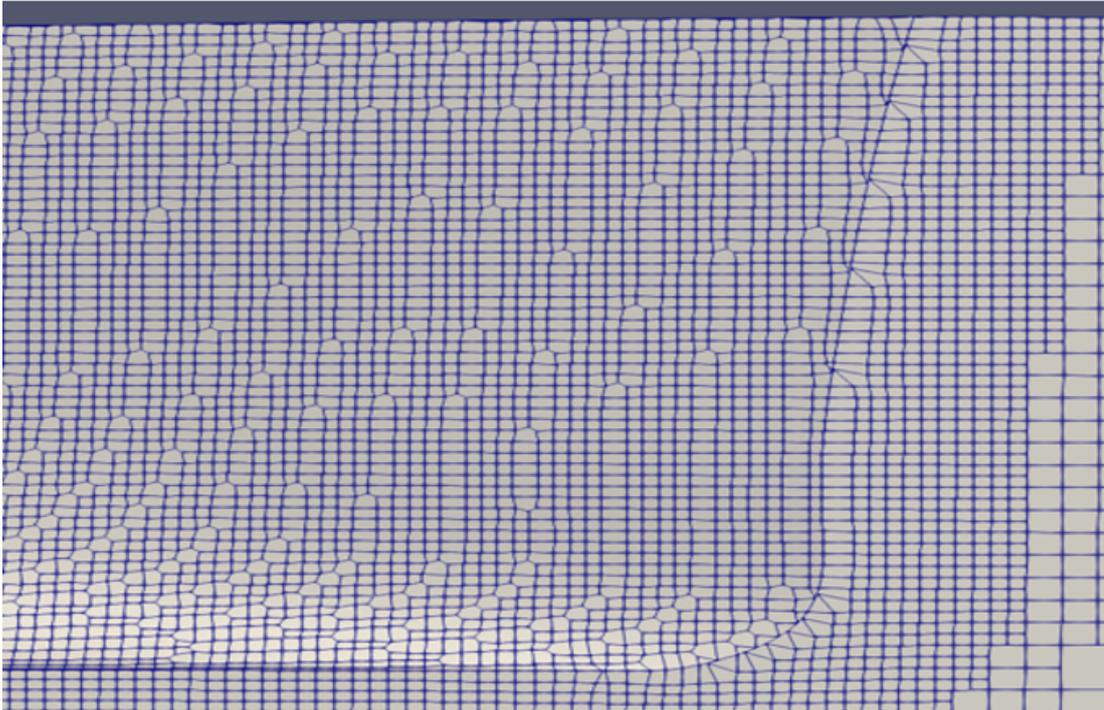
Tabela 9 – Parâmetros relacionados com a qualidade da malha

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
<i>maxNonOrtho</i>	Máx. não-ortogonalidade permitida	70
<i>maxBoundarySkewness</i>	Máx. distorção permitida nos contornos	20
<i>maxInternalSkewness</i>	Máx. distorção permitida internamente	4
<i>maxAspectRatio</i>	Máx. razão de aspecto permitida	100

Fonte: O autor (2021)

A malha obtida (região da proa) após a execução do comando *snappyHexMesh*, considerando a etapa *snap*, é exibida na Figura 31.

Figura 31 – Malha conformada na proa da embarcação



Fonte: O autor (2021)

Percebe-se que nem todos os volumes possuem formato hexaédrico perfeito, pois algumas células foram distorcidas ao serem moldadas à superfície. É justamente por conta disso que os parâmetros de qualidade de malha devem ser monitorados, buscando-se preservar tanto a precisão da resposta quanto a estabilidade numérica do processo.

### 3.2.2.7 Adição de camadas adjacentes à superfície

A última etapa do processo de geração de malha consiste na adição dos volumes de controle que serão responsáveis por captar os importantes efeitos da camada limite do escoamento.

Inicialmente define-se a altura do primeiro elemento (*firstLayerThickness*) próximo a superfície, cujo cálculo segue os seguintes passos:

- Estimativa do coeficiente friccional (Equação (39)) considerando um escoamento turbulento em uma placa plana (SCHLICHTING; GERSTEN, 2017).

$$C_{f,est} = 0,370 (\log R_{e_x})^{-2,584} \quad (39)$$

- Estimativa da tensão de cisalhamento junto a parede (Equação (40)).

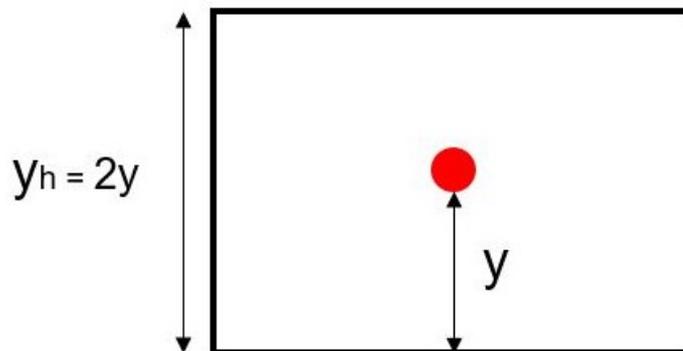
$$\tau_{\omega,est} = C_f \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \quad (40)$$

- Cálculo da distância nodal do volume de controle mais próximo a parede (Equação (41)) através da combinação das Equações (18) e (20).

$$y = \frac{y^+ \nu}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}} \quad (41)$$

Destaca-se que o valor de  $y$  refere-se a distância nodal do volume de controle em relação à parede. Logo, a altura do primeiro elemento ( $y_h$ ) deve ser duas vezes o valor de  $y$  (Figura 32).

Figura 32 – Distância nodal e altura do primeiro elemento junto a parede



Fonte: O autor (2021)

Visando utilizar as funções parede, discutidas na Seção 2.4, o  $y^+$  deve estar na subcamada logarítmica e, portanto, deve ser maior do que 30. Buscando atender a esse critério, sem aumentar significativamente o custo computacional, o valor definido para o  $y^+$  foi de 50.

Uma vez que as camadas são inseridas a partir da malha gerada após a etapa *snap*, percebe-se que nem todos os elementos vão respeitar a altura desejada, pois a malha utilizada não é estruturada. Nesse caso, o importante é que o valor médio (global) esteja próximo de 50, o qual é calculado considerando toda a superfície do casco (ANSYS, 2013).

Sobre os principais parâmetros usados na geração dos volumes de controle na região da camada limite é importante destacar que:

- O uso do parâmetro *relativeSizes* foi definido como "false", para que haja um maior controle do tamanho dos volumes de controle nessa região, em especial o do primeiro elemento;
- A razão de expansão<sup>34</sup> (*expansionRatio*) foi definida em 1,1 buscando um balanço entre a representação suave da camada limite (a qual influencia na precisão

<sup>34</sup> Representa o tamanho relativo entre camadas sucessivas.

dos resultados) e o número de camadas utilizadas (o qual influencia no custo computacional da simulação);

- A máxima espessura da última camada (*finalLayerThickness*) foi definida de forma que a altura na direção normal à superfície do casco representasse no máximo 95% da altura média dos volumes de controle adjacentes à superfície, oriundos da etapa *snap*;
- A porcentagem de 95% é considerada alta de acordo com fóruns de discussões de CFD e "boas práticas", mas foi adotada justamente para avaliar a influência da camada limite no valor do  $C_d$  com o maior número de camadas (*nSurfaceLayers*) possível, tal como descrito na Seção 4.1.1.4.

Normalmente, pode-se calcular a espessura da camada limite para um determinado número de Reynolds usando-se da Equação 16. No entanto, essa abordagem tende a requisitar um grande número de elementos próximos ao corpo, que nem sempre são necessários, além de ocasionarem um aumento do tempo de processamento (DYNAMICS, 2019).

Dependendo do grau de refino próximo a superfície, anterior a inserção das camadas, os volumes de controle nessa região podem ser suficientes para captar o comportamento do escoamento, sendo possível utilizar um menor número de camadas na etapa *addLayers*, a qual pode ser computacionalmente custosa.

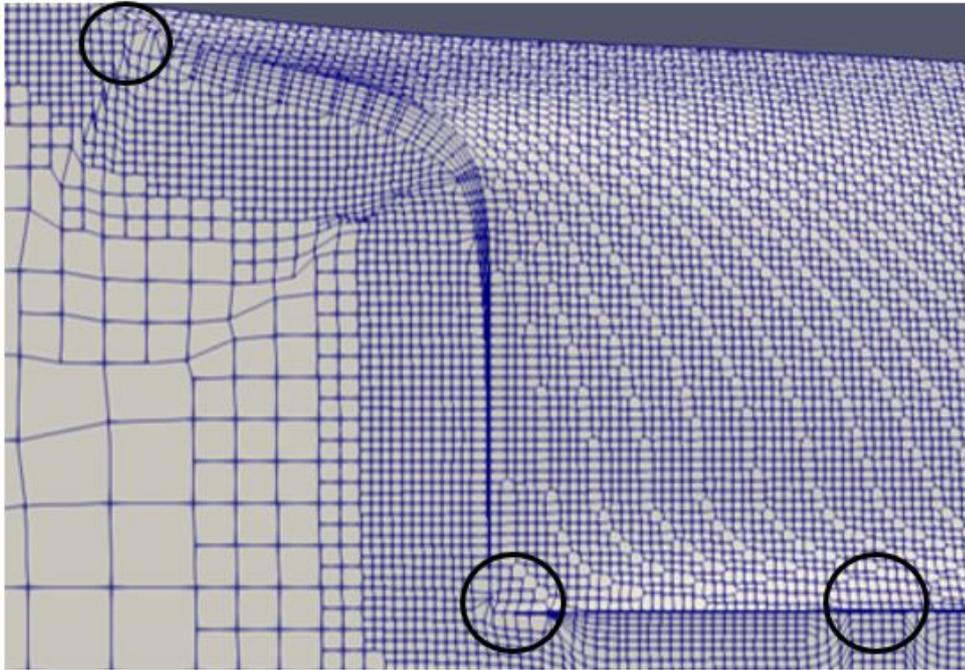
Logo, cabe ao analista observar qual seria o número mínimo de camadas suficiente para captar os efeitos da camada limite sem que haja um aumento desnecessário do custo computacional.

#### 3.2.2.8 Ajustes da geometria para melhorar a qualidade da malha

Após a adição dos elementos na região da camada limite, observando o comportamento da malha na região da popa (Figura 33), percebe-se que em alguns locais as camadas não foram corretamente inseridas.

Em geral, esse problema está associado a existências de quinas agudas na geometria, havendo assim a necessidade de ajustes na própria geometria do casco para mitigar esse problema.

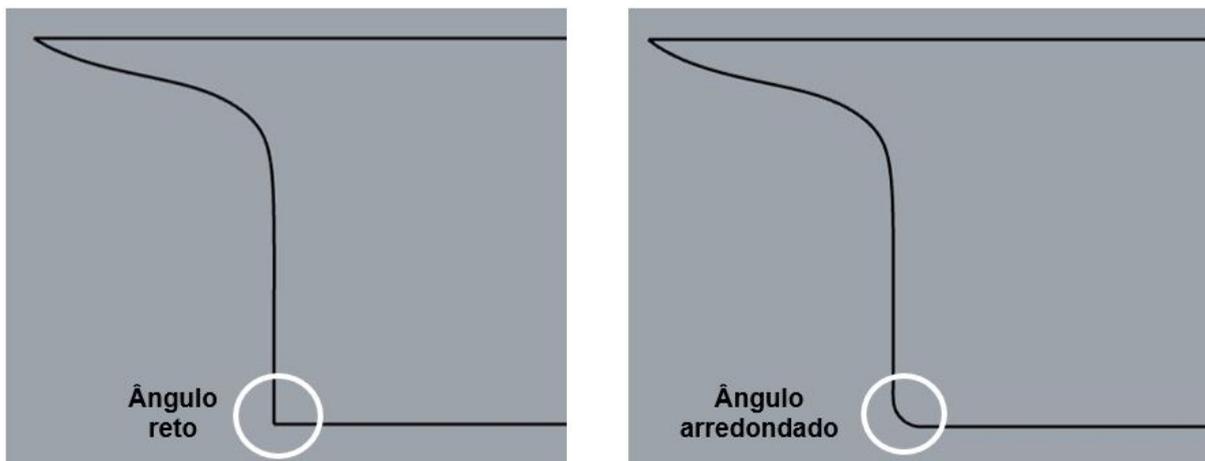
Figura 33 – Problemas na construção da camada limite na popa



Fonte: O autor (2021)

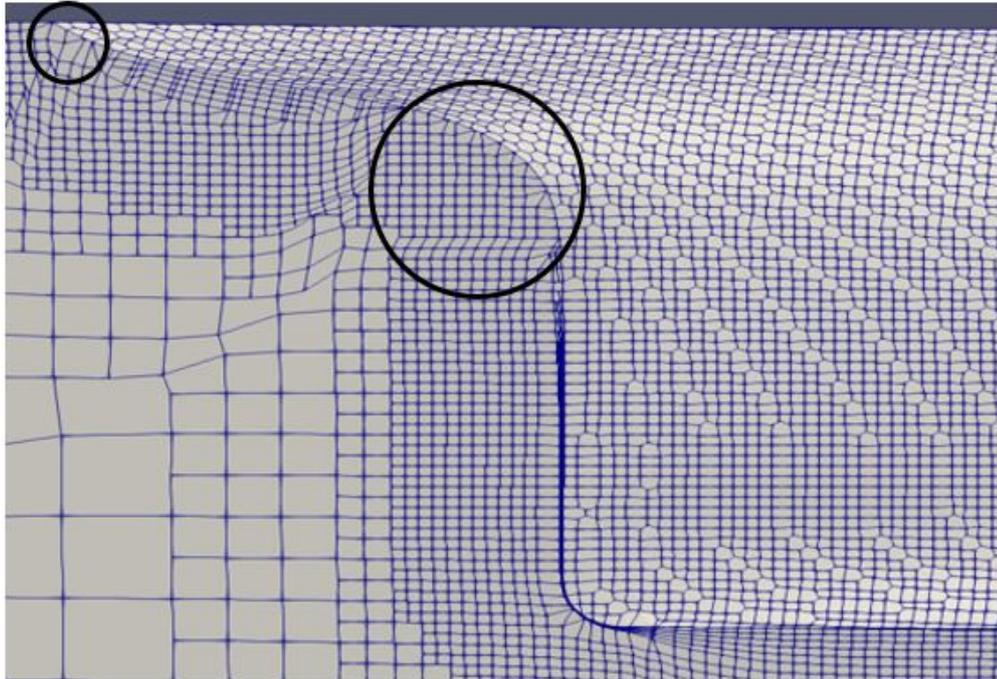
Dessa forma, usando o programa Rhinoceros foi aplicado um arredondamento sutil no ângulo reto presente na popa (Figura 34), visando suavizar a curvatura e colaborar com o processo de geração da malha junto ao corpo (Figura 35).

Figura 34 – Modificação da geometria da popa na linha de base



Fonte: O autor (2021)

Figura 35 – Adição de elementos na popa após o arredondamento



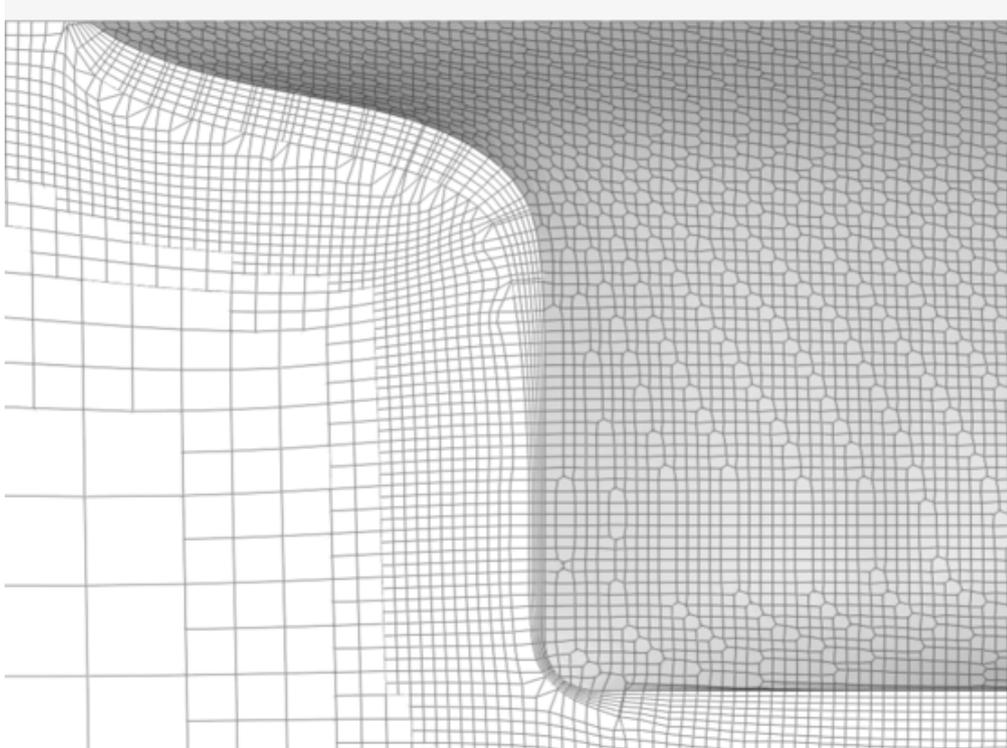
Fonte: O autor (2021)

Como pode ser visto (Figura 35), apesar de ter sido realizado o arredondamento, a malha gerada ainda apresenta regiões de descontinuidade nas camadas próximas ao casco.

Ressalta-se que poderia ter sido realizada uma maior modificação nesta região, porém, segundo Hille (2017), essa mudança na geometria tende a afetar a parcela de pressão viscosa. Assim, optou-se por manter a geometria a mais fiel possível à original, descrita em Todd (1963).

Como alternativa, utilizou-se o gerador de malhas do SIMSCALE, sendo obtida uma malha que apresentou continuidade das camadas ao longo de toda a região da popa (Figura 36).

Figura 36 – Malha na popa obtida com o SIMSCALE



Fonte: O autor (2021)

Além da análise qualitativa (Figuras 35 e 36), é importante verificar os parâmetros de qualidade da malha gerada. Essa verificação é feita através do comando *checkMesh*, o qual faz a avaliação da malha com base nas diretrizes presentes em *system/meshQualityDict*.

Apesar de, em ambas as malhas, a violação da máxima distorção (Tabela 9) permanecer, segundo Dynamics (2019), é possível executar simulações que não respeitem os parâmetros de qualidade. Porém, recomenda-se a execução de análises rigorosas, uma vez que a acurácia da solução pode ser afetada ou pode ocorrer a divergência do processo.

Tabela 10 – Parâmetros de qualidade de malha entre SIMSCALE e OpenFOAM

Ferramenta	Razão de aspecto	Não ortogonalidade	Distorção
SIMSCALE	8,70	54,31	6,96
OpenFOAM	11,28	69,91	6,61

Fonte: O autor (2021)

A fim de confirmar a eficiência do processo de adição das camadas, após o uso do comando *snappyHexMesh*, é possível observar no terminal a porcentagem de inserção das camadas junto ao casco. Na Tabela 11 são sintetizadas as informações

referentes a inserção de camadas, tanto para a malha do OpenFOAM, quanto para a malha do SIMSCALE.

Tabela 11 – Eficiência na adição de camadas entre SIMSCALE e OpenFOAM

Ferramenta	Número de camadas	Porcentagem de inserção [%]
SIMSCALE	5,00	100,0
OpenFOAM	4,99	99,7

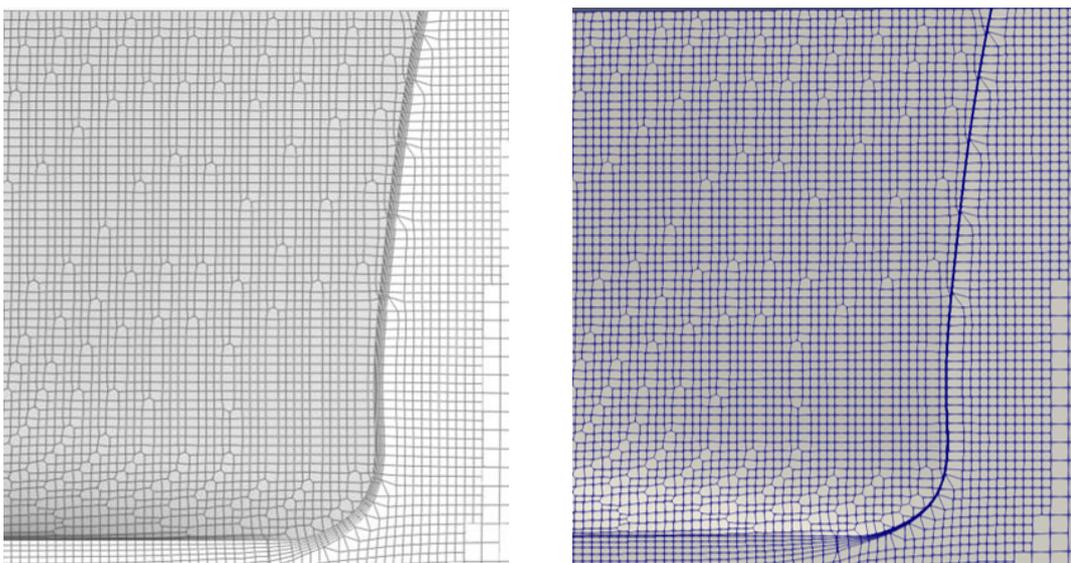
Fonte: O autor (2021)

Percebe-se que as porcentagens de inserção são muito próximas, mas tendo em vista a vantagem de utilização do SIMSCALE vista na Seção 3.1 e a comparação dos parâmetros de qualidade de malha mostrados na Tabela 10, optou-se pela utilização da malha oriunda do SIMSCALE.

Nesse sentido, destaca-se que o SIMSCALE possui pequenas modificações no algoritmo de adição de camadas em superfícies com mudanças repentinas de curvatura e/ou quinas. Esse é o único ponto desta dissertação em que há a presença do fator "caixa preta", pois não é possível acessar o código fonte usado no SIMSCALE.

Na Figura 37 é mostrada a comparação da malha gerada na região da proa, tanto no SIMSCALE (37a), quanto no OpenFOAM (37b).

Figura 37 – Adição de camadas na proa



(a) Malha na proa pelo SIMSCALE

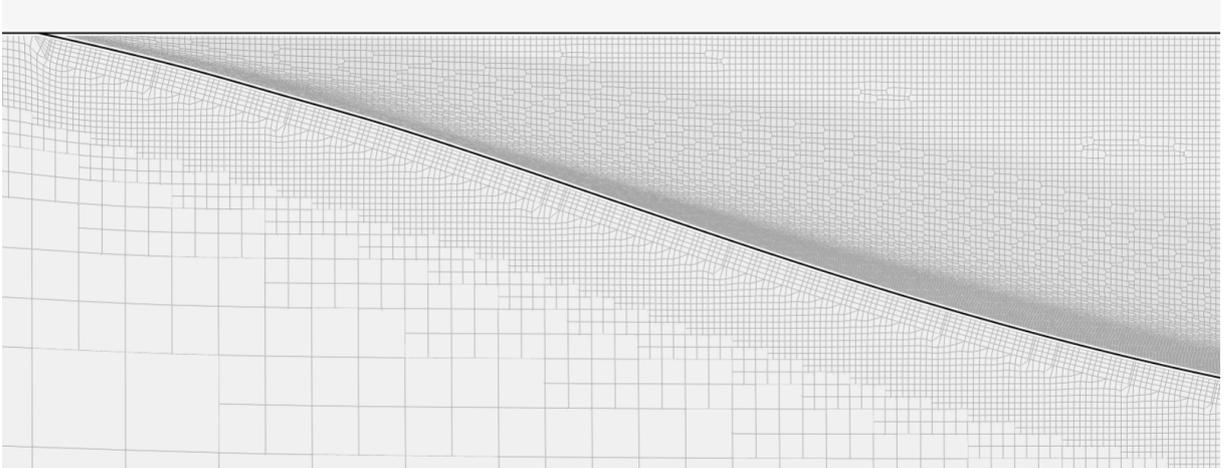
(b) Malha na proa pelo OpenFOAM

Fonte: O autor (2021)

A seguir são exibidos detalhes da malha gerada pelo SIMSCALE no plano de linha d'água, tanto na região de proa (Figura 38), quanto na região de popa (Figura 39).

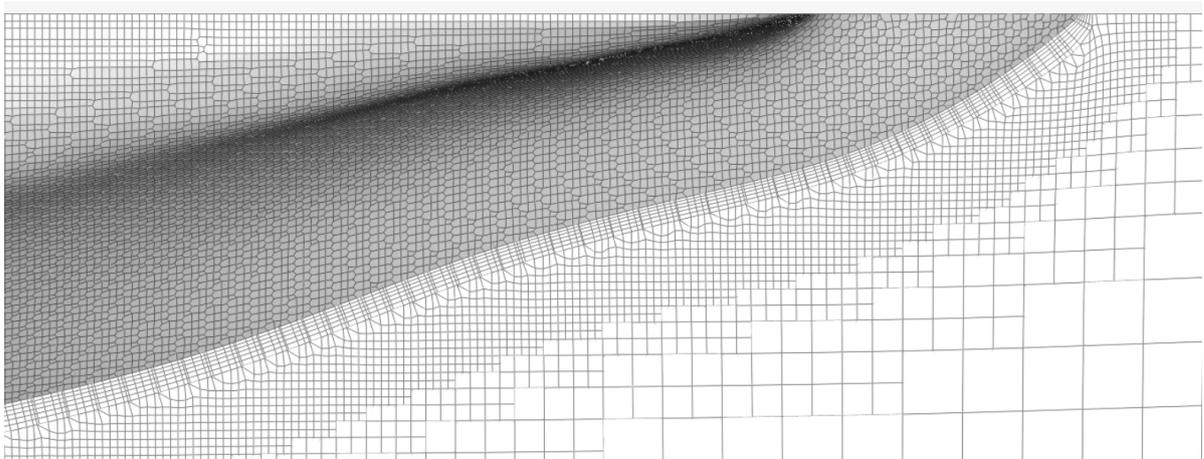
Destaca-se que nessas regiões a malha apresenta maior homogeneidade e suavidade pois a geometria apresentar menores variações de curvatura.

Figura 38 – Malha no plano de linha d'água na região da proa



Fonte: O autor (2021)

Figura 39 – Malha no plano de linha d'água na região da popa



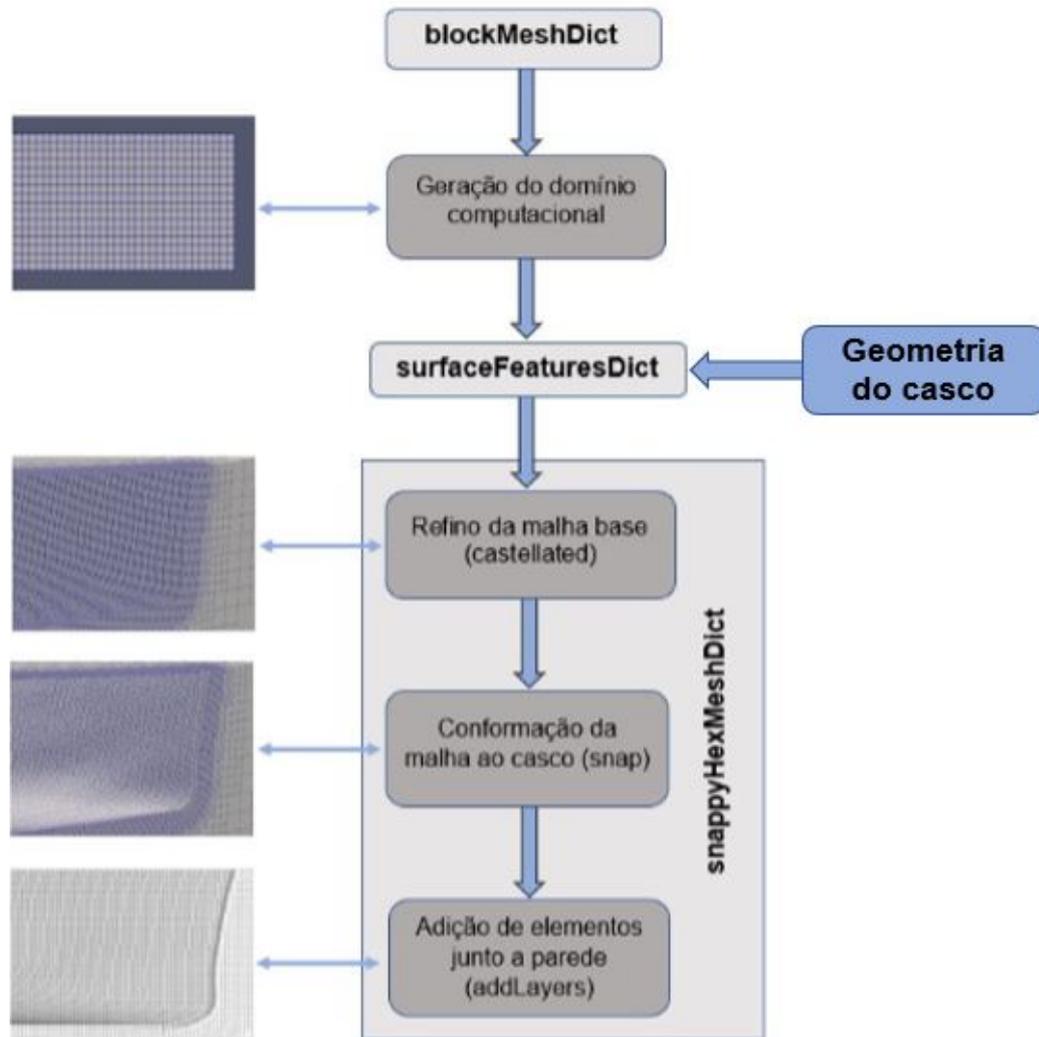
Fonte: O autor (2021)

Para utilizar a malha gerada no SIMSCALE em simulações realizadas no OpenFOAM, deve-se copiar a pasta *polyMesh*, exportada do SIMSCALE, para dentro da pasta *constant*, no OpenFOAM.

Neste caso, não é necessário que existam os arquivos relacionados à discretização do domínio computacional no OpenFOAM (*blockMeshDict* e *snappyHexMeshDict*), pois as características da malha já estão incluídas na pasta *polyMesh* extraída do SIMSCALE.

Na Figura 40 é sintetizado o procedimento para a geração da malha, mostrando o resultado de cada etapa do processo.

Figura 40 – Fluxograma para geração da malha



Fonte: O autor (2021)

### 3.2.3 Método de avaliação de independência de malha

O estudo de independência de malha (também conhecido como estudo de convergência) é realizado para determinar o grau de influência da malha nos resultados. O objetivo é determinar a malha que apresente um erro de discretização aceitável mediante ao custo computacional dispendido.

O método utilizado para avaliar a independência da malha é conhecido por GCI<sup>35</sup> e baseia-se no trabalho de Roache et al. (2008), o qual utiliza-se dos estudos realizados por Richardson (1910). Trata-se de um procedimento matemático, sistemático e largamente testado em diversas áreas da engenharia. Exemplos do seu uso podem ser encontrados no próprio trabalho de Roache et al. (2008) e em Slater (2021).

<sup>35</sup> Grid Convergence Index - Índice de Convergência de Malha

Usualmente, os estudos de convergência de malha baseiam-se no conceito de razão de refino de malha ( $r$ ), a qual é definida pela Equação (42).

$$r = \frac{h_2}{h_1} \quad (42)$$

Sendo  $h_2$  a dimensão dos volumes de controle da malha mais grossa e  $h_1$ , a da mais refinada.

A vantagem da abordagem de Roache et al. (2008) consiste na possibilidade de se utilizar um valor de  $r$  que não seja um número inteiro, ao contrário do que é visto em Richardson (1910).

O GCI é, basicamente, a medida da porcentagem do quanto o resultado da simulação está longe daquele que seria encontrado caso a equação diferencial que rege o fenômeno físico fosse completamente solucionada.

Em teoria, espera-se um comportamento assintótico, ou seja, à medida que a malha é refinada, a resposta numérica convergida passa a sofrer menor variação (Figura 43).

Sobre a aplicação do GCI, Roache et al. (2008) alerta para os seguintes cuidados e recomendações:

- O valor de  $r$  deve ser aproximadamente constante, para garantir que o erro de truncamento seja relevante em comparação aos demais;
- Segundo Slater (2021), o valor de  $r$  deve ser maior do que 1,1. Já Roache et al. (2008), por sua vez, recomenda que  $r$  seja maior que 1,3.
- Idealmente devem ser utilizados métodos numéricos de discretização/interpolação de mesma ordem, preferencialmente métodos de segunda ordem;
- O comportamento dos resultados obtidos com cada malha analisada deve ser monotônico. Caso tal fato não seja respeitado, pode-se explorar o procedimento desenvolvido por Roy (2001).

Neste trabalho, foram analisadas três malhas (grossa, moderada e fina). Os níveis de refino são definidos a partir da malha base (domínio computacional discretizado), uma vez que os níveis estabelecidos em *snappyHexMeshDict* devem ser mantidos constantes.

Para definir os níveis de refino, considerou-se que uma malha mais refinada deveria ter aproximadamente o dobro de volumes de controle do que a malha menos refinada. Por essa razão, estabeleceu-se o valor de  $r$  de 1,26, calculado conforme a Equação (43), a qual é aplicável a problemas tridimensionais.

$$r = \sqrt[3]{\frac{N_{Malha1}}{N_{Malha2}}} \quad (43)$$

Onde  $N_{Malha1}$  representa o número de volumes de controle da malha mais refinada e  $N_{Malha2}$ , o número de volumes de controle da malha menos refinada.

### 3.2.4 Condições de contorno e condições iniciais da simulação

Posto que a malha está definida e sua qualidade avaliada, deve-se definir as condições de contorno e as condições iniciais <sup>36</sup>, as quais devem ser atribuídas para cada variável analisada durante a simulação. No caso da análise do arrasto viscoso em uma embarcação utilizando o modelo de turbulência k- $\omega$  SST, as variáveis de interesse associadas ao escoamento são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Variáveis associadas ao arrasto viscoso de embarcações

Descrição	Símbolo	Tipo
Velocidade (x, y, z)	U	Vetorial
Pressão	p	Escalar
Energia cinética turbulenta	k	Escalar
Taxa de dissipação específica de k	$\omega$	Escalar
Viscosidade cinemática turbulenta	$\nu_t$	Escalar

Fonte: O autor (2021)

Uma vez que o domínio computacional é representado por um hexaedro, existem seis faces para às quais devem ser atribuídas as condições de contorno (Figura 24), além da superfície do casco.

Existem diversas condições de contorno disponíveis no OpenFOAM, e cada problema físico analisado deve utilizar aquelas que melhor descrevem os fenômenos modelados.

#### 3.2.4.1 Entrada

Como o objetivo é estimar a resistência ao avanço de uma embarcação que se desloca a uma dada velocidade constante (v), sabe-se que o fluxo de água deve correr

<sup>36</sup> As condições iniciais referem-se aos valores iniciais de cada propriedade em cada um dos volumes de controle pertencentes ao domínio computacional e são necessárias para inicializar o processo iterativo intrínseco ao algoritmo SIMPLE.

de proa para popa, simulando a movimentação da embarcação. Logo, deve-se definir como condição de contorno para a velocidade um vetor na direção X de módulo  $v$ .

Já a pressão deve ser definida como *zeroGradient*. Essa condição determina que os valores nos contornos sejam interpolações diretas dos valores nodais (centrais) vizinhos.

Como o modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\omega$  SST, é necessário fornecer uma estimativa dos valores de  $k$  e  $\omega$ , os quais foram definidos com base no procedimento de Ansys (2013). Destaca-se que existem diversos fóruns da comunidade CFD que fornecem calculadoras que aceleram e facilitam a obtenção dos parâmetros turbulentos, como pode ser visto em Online (2020).

Nesse caso, uma vez que a velocidade do escoamento ( $U$ ) está definida, os valores de  $k$  e  $\omega$  podem ser calculados a partir da estimativa de  $I$  (intensidade turbulenta) e de  $\frac{\mu_t}{\mu}$  (razão de viscosidades) utilizando-se as Equações (44) e (45).

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (44)$$

$$\omega = \frac{\rho k}{\mu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (45)$$

Uma vez definidos os valores  $k$  e  $\omega$ , é possível estimar a viscosidade cinemática turbulenta ( $\nu_t$ ), usando a Equação (46). Assim, a condição de contorno na entrada do domínio definida para  $\nu_t$  foi a opção *calculated*.

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (46)$$

#### 3.2.4.2 Saída

A região de saída do domínio computacional consiste na exaustão do fluxo e, portanto, deve-se atribuir uma pressão igual a 0 Pa. A condição de contorno para as demais variáveis será *zeroGradient*, seguindo o proposto por Wortley (2013).

A viscosidade cinemática turbulenta ( $\nu_t$ ) será calculada em função dos parâmetros turbulentos, assim como na entrada do domínio computacional, recebendo a condição *calculated*.

O SIMSCALE, por padrão, impõe a condição *inletOutlet* para os parâmetros restantes, a qual considera duas situações. Se o escoamento estiver saindo do domínio, aplica-se a condição *zeroGradiente*. No entanto, caso exista um refluxo (retorno do fluido para o domínio) deve-se especificar um valor de entrada. Por fim, os valores de  $k$  e  $\omega$  foram definidos com os mesmos valores utilizados nas condições de contorno referentes à entrada do domínio.

### 3.2.4.3 Superfície do casco

Conforme mencionado na Seção 2.4, o vetor velocidade do fluido em contato com a superfície do casco é constante e igual a zero, sendo definido pela condição *noslip* (condição de não escorregamento).

O campo de pressão recebeu a condição de *zeroGradient*, similar a face de entrada, visto que velocidade na superfície do casco também está definida.

Com o objetivo de reduzir o custo computacional das simulações, optou-se por utilizar as funções parede para os parâmetros turbulentos (Seção 2.4.1). Assim, as funções utilizadas para  $k$ ,  $\omega$  e  $\nu_t$  foram, respectivamente, *kqRWallFunction*, *omegaWallFunction* e *nutkWallFunction*. Maiores detalhes sobre a implementação e as implicações dessas funções podem ser vistos em Liu (2017) e Kalitzin et al. (2004).

### 3.2.4.4 Planos de simetria

Finalmente, as superfícies restantes foram definidas como *symmetry* no *blockMeshDict*, recebendo a condição de contorno que leva o mesmo nome. Essa condição funciona de forma semelhante a *slip*, sendo que ambas são equivalentes a *zeroGradiente*.

A vantagem de se utilizar planos de simetria reside na economia de esforço computacional, posto que o espelhamento do domínio computacional reduz consideravelmente o número de cálculos a serem realizados.

No caso do plano de linha d'água, não é intuitivo pensar que a condição de simetria pode ser aplicada, visto que não há o espelhamento do domínio. Entretanto, Molland, Turnock e Hudson (2011) defendem que, uma vez desconsiderada a superfície livre, a condição de contorno associada ao plano de linha d'água deve ser a *symmetry*, a qual garante que o escoamento não seja perturbado pela presença do convés.

### 3.2.4.5 Resumo das condições de contorno e condições iniciais do modelo

Na Tabela 13 são sintetizadas as condições de contorno e as condições iniciais adotadas neste trabalho.

Em relação aos valores iniciais<sup>37</sup>, Versteeg e Malalasekera (2007) sugerem que esses sejam idênticos aos definidos nos contornos, com o intuito de facilitar e acelerar o processo de convergência. Nota-se que não é impeditivo o uso de valores iniciais diferentes daqueles usados nas condições de contornos, mas tal prática pode trazer instabilidade, atraso ou até divergência na simulação.

<sup>37</sup> As condições iniciais são identificadas por *internalFields* nos arquivos referentes a cada uma das variáveis do escoamento.

Tabela 13 – Condições de contorno e condições iniciais

Cond. de Contorno	$\mathbf{U}$	$\mathbf{p}$	$\mathbf{k}$	$\omega$	$\nu_t$
Entrada	fixedValue (v 0 0)	zeroGradient	fixedValue $k$	fixedValue $\omega$	calculated
Saída	zeroGradient	fixedValue 0	zeroGradient	zeroGradient	calculated
Planos de simetria	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Superfície do casco	noslip	zeroGradient	kqRWF	omegaWF	nutkWF
<b>Cond. iniciais</b>	(v 0 0)	0	$k$	$\omega$	$\nu_t$

Fonte: O autor (2021)

### 3.3 PROCESSAMENTO

Nesta seção são discutidos os principais parâmetros associados à resolução do sistema linear de equações. São explorados aspectos sobre a configuração do registro dos resultados, as funções para realizar o pós-processamento e as particularidades relacionadas ao algoritmo SIMPLE. Além disso, também são abordados os métodos numéricos utilizados na discretização dos termos referentes às equações diferenciais.

#### 3.3.1 Controle dos resultados

O arquivo *system/controlDict* estabelece a configuração relacionada aos dados de saída do programa, sendo dividido em:

- *application*: Define o controle dos resultados referentes as variáveis do escoamento (velocidade, pressão e parâmetros turbulentos) a cada iteração (regime permanente) ou intervalo de tempo (regime transiente);
- *functions*: Declara as funções que serão utilizadas no pós-processamento.

As quatro funções utilizadas para auxiliar na avaliação dos resultados durante o pós-processamento foram:

- *minmaxdomain*: Computa os valores máximos e mínimos das variáveis e os locais onde ocorrem. Serve como indicador da qualidade dos cálculos, uma vez que

permite observar se os valores respeitam as condições de contorno, além de auxiliar na verificação da convergência da simulação;

- *forces\_object*: Calcula as forças atuantes na geometria através da integração das parcelas referentes a resistência friccional e a resistência de pressão viscosa;
- *forcesCoe\_object*: É a função responsável pela adimensionalização das forças e dos momentos envolvidos na simulação. Dados como a massa específica do fluido, a velocidade do escoamento, o comprimento e a área de referência (área molhada do casco) são utilizados nos cálculos dos coeficientes adimensionais;
- *yplusRAS*: Realiza o mapeamento do  $y_{medio}^+$  a cada iteração, contribuindo para a verificação desse parâmetro ao longo da simulação.

Após a execução da simulação, os resultados são armazenados na pasta *postProcessing*, sendo criadas subpastas com o nome de cada uma das funções declaradas em *controlDict*.

O próprio SIMSCALE fornece uma aba de visualização síncrona, no formato de gráficos, a qual permite acompanhar os parâmetros monitorados durante a simulação, sejam os resíduos ou os resultados advindos das funções mencionadas.

Já para o OpenFOAM é possível apenas o monitoramento dos valores no terminal. No entanto, pode-se utilizar os recursos *pyFoamPlotWatcher* e *pyFoamPlotRunner* para obter um resultado semelhante de plotagem.

Ressalta-se que, ao longo do processo iterativo, espera-se que os valores dos resíduos diminuam até que a simulação possa ser considerada convergida. Além disso, torna-se importante acompanhar a convergência dos parâmetros globais do escoamento, como as forças de arrasto e o Cd.

Na Tabela 14 são apresentados os principais parâmetros utilizados para o controle das variáveis associadas ao escoamento.

Tabela 14 – Dados de controle da simulação

Parâmetro	Especificação
<i>startTime</i>	0
<i>endTime</i>	1500
<i>deltaT</i>	1
<i>writeInterval</i>	1500
<i>writeControl</i>	timeStep

Fonte: O autor (2021)

O *startTime* especifica o começo da contabilização dos dados monitorados, enquanto o *writeInterval* define o intervalo para os quais os resultados são armazenados

em arquivos de texto. Já o *writeControl* determina o parâmetro usado na tabulação dos resultados. Por sua vez, o *timeStep* define o intervalo de iteração do algoritmo SIMPLE.

Para a definição do *endTime* deve-se considerar a convergência do coeficiente de arrasto total ( $C_d$ ), a qual será discutida na Seção 4.1.1.1. Posto que o número de iterações é calculado conforme a Equação (47), o tempo de simulação será inversamente proporcional ao intervalo de tempo (*deltaT* ou *timeStep*).

$$N = \frac{endTime}{deltaT} \quad (47)$$

Considerando-se que este trabalho se refere a uma análise em regime permanente, na qual o principal critério de parada será a convergência da simulação, adotou-se um *deltaT* igual a 1.

Além disso, os resultados intermediários são de pouco interesse<sup>38</sup> e, por essa razão, visando reduzir o custo computacional associado a escrita dos resultados, o *writeInterval* foi definido com o mesmo valor adotado para o *endTime*.

### 3.3.2 Esquemas de discretização das equações diferenciais

Conforme mencionado na Seção 2.1.1, as equações diferenciais são transformadas em um sistema de equações lineares. Dessa forma, a discretização de cada um dos termos deve ser explicitada em *system/fvSchemes*, sendo dividida de acordo com os termos presentes nas equações governantes.

Seguindo as recomendações vistas em ITTC (2014), na Tabela 15 são enumerados os métodos de discretização definidos para a realização das simulações deste trabalho.

Tabela 15 – Esquemas de discretização

Esquema	Declaração
<i>ddtSchemes</i>	steadyState
<i>gradSchemes</i>	cellLimited Gauss linear 1
<i>divSchemes</i>	Gauss linear upwind
<i>laplacianSchemes</i>	Gauss linear corrected

Fonte: O autor (2021)

<sup>38</sup> No entanto, é importante mencionar que, nos casos em que ocorre divergência da simulação, pode ser interessante gravar os dados considerando um intervalo de tempo menor (ou seja, definir o *writeInterval* diferente do *endTime*), de modo a, eventualmente, identificar a causa do problema de convergência.

Por se tratar de um escoamento em regime permanente (*steady-state*), a especificação da discretização do termo transiente ( $\frac{\partial}{\partial t}$ ) não existe, pois esse é desconsiderado nos cálculos.

Para a discretização do gradiente ( $\nabla$ ) foi adotado o esquema padrão *Gauss linear*, o qual realiza uma interpolação linear do valor nodal para as faces do volume de controle. Adicionalmente foi utilizado o prefixo *cellLimited*, o qual limita o gradiente de forma a fazer com que o valor obtido na face do volume de controle não fique fora dos limites dos valores das células vizinhas (GREENSHIELDS, 2019).

O termo convectivo, representado pelo operador divergente ( $\nabla \cdot$ ), necessitou de um método de interpolação que contribuísse tanto na convergência quanto na precisão da resposta, sendo definido o esquema *Gauss linear upwind*. Segundo ITTC (2014), tal fato se justifica uma vez que os efeitos convectivos são maiores do que os difusivos, pois o escoamento analisado apresenta elevado número de Reynolds.

O termo difusivo, simbolizado pelo operador laplaciano ( $\nabla^2$ ), tende a não causar instabilidade justamente por não ser dominante para o tipo de análise considerada (ITTC, 2014). Dessa forma, o uso de um esquema linear, também de segunda ordem, mostrou-se suficiente quando associado a baixa não-ortogonalidade global da malha, sendo atribuído o sufixo *corrected*.

Para um maior aprofundamento a respeito das particularidades intrínsecas aos métodos numéricos de discretização, recomenda-se a leitura de Jasak (1996) e Ferziger e Peric (2002).

### 3.3.3 Parâmetros para resolução do sistema de equações lineares

Os parâmetros relativos à resolução do sistema de equações lineares, tolerâncias e algoritmos devem ser definidos em *system/fvSolution*. Na Tabela 16 são mostrados os valores dos coeficientes de relaxação e das tolerâncias absolutas adotados neste trabalho.

Tabela 16 – Valores de relaxação e tolerâncias adotados

Variável	Fatores de relaxação	Tolerância absoluta
U	0,7	1e-7
p	0,3	1e-6
k	0,5	1e-7
$\omega$	0,5	1e-7

Fonte: O autor (2021)

A determinação dos fatores de relaxação foi fruto de diversos testes, buscando um equilíbrio entre a estabilidade numérica e a velocidade de convergência. Já a definição das tolerâncias foi visou o menor erro de iteração (Seção 4.1.1.1) associado ao coeficiente de arrasto total (Cd).

Destaca-se que é também em *system/fvSolution* que se declara o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade utilizado na simulação. Conforme justificado na Seção 3, neste trabalho utilizou-se os algoritmos SIMPLE e *potentialFlow*.

### 3.4 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

A utilização de métodos computacionais possui limitações devido às hipóteses e simplificações associadas aos modelos matemáticos empregados; além de erros inerentes aos métodos numéricos envolvidos. Em vista disso, devem ser realizadas análises que busquem confirmar se a metodologia aplicada está adequada ao propósito para a qual foi concebida.

Os procedimentos de verificação e de validação estão entre as técnicas mais utilizadas para a análise da robustez e da confiabilidade de simulações numéricas.

Em CFD, o processo de verificação está relacionado com os erros numéricos inerentes à qualquer simulação, os quais podem ser associados à erros de programação<sup>39</sup>, referentes ao próprio processamento do computador, além dos erros de discretização (malha) e de iteração (FERZIGER; PERIC, 2002).

Como o OpenFOAM é um programa extremamente utilizado, cuja capacidade de realizar análises é considerada robusta e confiável, os erros relacionados à programação e ao processamento serão descartados. Já os erros devido à discretização e ao processo iterativo são discutidos na Seção 4.1.1.

Por sua vez, o processo de validação está associado com as incertezas relacionadas ao modelo matemático adotado para representar um dado fenômeno físico (Ferziger e Peric (2002)).

Entre as características da modelagem matemática que podem influenciar a qualidade da resposta, destacam-se: as hipóteses e simplificações adotadas (associadas ao modelo de turbulência e as equações de conservação da massa e do momento linear), as condições de contorno e as condições iniciais. Assim, para se avaliar a modelagem empregada, deve-se realizar diversas análises, modificando-se cada um dos parâmetros isoladamente de forma a quantificar a influência que cada um exerce na resposta obtida, tal como visto em Farah e Tancredi (2021).

Por fim, Roache (1998) sintetiza essa discussão dizendo que a verificação consiste em se resolver as “equações corretamente”, enquanto a validação consiste em se resolver as “equações corretas”.

---

<sup>39</sup> Esses erros são normalmente conhecidos como *round-off*.

## 4 DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES

Considerando os fundamentos teóricos apresentados no Capítulo 2 e a metodologia descrita no Capítulo 3, este capítulo apresenta o desenvolvimento realizado, assim como os resultados obtidos e as discussões associadas.

Os arquivos utilizados para a execução da simulação realizada para a validação (Fr igual a 0,15) podem ser vistos no Apêndice C. Nesse apêndice, a malha descrita é aquela definida após os processos de verificação e validação descritos neste capítulo.

Embora as simulações tenham sido realizadas na plataforma SIMSCALE, os mesmos dados de entrada podem ser utilizados no OpenFOAM<sup>40</sup>.

### 4.0.1 Estudo de sensibilidade do domínio computacional

Para verificar se os parâmetros foram adequadamente definidos, realizou-se um estudo de sensibilidade do domínio computacional.

O que se procura observar nesse tipo de estudo é a influência que o tamanho do domínio computacional exerce no coeficiente de arrasto total (Cd), mantido os demais parâmetros de simulação. Nesse caso não existe a preocupação com o valor em si, mas sim com o comportamento do Cd à medida que as dimensões do domínio variam.

O tamanho dos volumes de controle não foi modificado para não haver interferência do refino da malha nos resultados, pois o foco está na avaliação do tamanho do domínio computacional.

Para esse estudo foram analisados 6 domínios cujas dimensões foram obtidas por meio do escalonamento uniforme do domínio mostrado na Tabela 3. Na Tabela 17 são sintetizadas as características e os resultados referentes ao estudo de sensibilidade do domínio computacional.

---

<sup>40</sup> O leitor mais atento irá perceber que nem todos os comandos do OpenFOAM estão disponíveis no SIMSCALE, uma vez que a programação da plataforma do fórum foi apenas baseada no OpenFOAM. No entanto, essa discussão foge ao escopo deste trabalho.

Tabela 17 – Estudo de sensibilidade do domínio computacional

Identificação do domínio	1	2	3	4	5	6
Fator de escala	0,30	0,50	0,80	1,00	1,20	1,70
X[m]	6,75	11,25	18,00	22,50	27,00	38,25
Y[m]	1,35	2,25	3,60	4,50	5,40	7,65
Z[m]	1,35	2,25	3,60	4,50	5,40	7,65
Valores de Cd	4,39	4,13	4,05	4,03	4,02	4,02
Erro relativo [%]	6,12	2,00	0,45	0,25	0,32	-
Tempo de simulação [min]	60	67	71	75	79	88

Fonte: O autor (2021)

Observando-se os resultados mostrados na Tabela 17, percebe-se que existe uma tendência de convergência do Cd à medida que se aumenta o tamanho do domínio computacional. Tal comportamento é esperado uma vez que os contornos passam a ter cada vez menos influência no escoamento, conforme explicado na Seção 3.2.2.3.

Buscando-se um compromisso entre o custo computacional e o erro obtivo, optou-se pelo uso do domínio 4.

#### 4.0.2 Estudo de sensibilidade dos parâmetros turbulentos iniciais

Nessa seção é apresentada uma análise dos parâmetros turbulentos ( $k$  e  $\omega$ ) advindos das Equações (44) e (45). O intuito desse estudo é verificar a influência que as estimativas de  $I$  (intensidade turbulenta) e  $\frac{\mu_t}{\mu}$  (razão de viscosidades) exercem no valor do Cd. Dessa forma, algumas combinações de  $I$  e  $\frac{\mu_t}{\mu}$  foram testadas, as quais são apresentadas na Tabela 18, juntamente com os respectivos valores de Cd para cada variação analisada.

Tabela 18 – Estudo de sensibilidade dos parâmetros turbulentos

Intensidade turbulenta (I) em %	Razão de viscosidades ( $\mu_t/\mu$ )	k [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$\omega$ [1/s]	Cd (x10 <sup>3</sup> )
1,0	1	1,470E-04	150,169	3,735
	3		60,070	3,736
	5		29,320	3,739
	10		15,000	3,742
	20		7,501	3,748
	35		4,286	3,754
	50		3,000	3,759
	75		2,000	3,766
	100		1,502	3,771
0,5	1	3,675E-05	37,542	3,735
	3		15,020	3,736
	5		7,501	3,738
	10		3,750	3,741
	20		1,875	3,744
	35		1,072	3,746
	50		0,750	3,747
	75		0,500	3,749
	100		0,375	3,750

Fonte: O autor (2021)

Conforme discutido em Ansys (2013), o valor de  $\frac{\mu_t}{\mu}$  está relacionado com a intensidade turbulenta  $I$ , sendo normalmente assumido igual a 1 para escoamentos de baixa turbulência, podendo chegar a valores acima de 10 para os casos de escoamentos com elevada turbulência.

É interessante observar que os valores de  $k$  e  $\omega$  resultantes acabam por se balancear, uma vez que o  $k$  pode ser entendido como um “gerador” e o  $\omega$  como um “dissipador” de energia turbulenta. Em vista disso, os valores elevados de  $\frac{\mu_t}{\mu}$  utilizados neste estudo servem de referência para entender como os valores de  $k$  e  $\omega$  podem afetar o Cd.

Observando os resultados da Tabela 18 é possível concluir que, fixado um valor de  $I$ , a medida que se eleva  $\frac{\mu_t}{\mu}$ , a tendência é que o Cd aumente. Isso ocorre porque os níveis de turbulência e a dinâmica do escoamento são modificados de forma intensa, principalmente para combinações de  $I$  e  $\frac{\mu_t}{\mu}$  elevadas.

No entanto, tal como discutido na Seção 2.3.1, observa-se que os valores de Cd não variam consideravelmente entre as combinações de parâmetros analisadas, uma vez que o modelo k- $\omega$  SST apresenta baixa sensibilidade às condições iniciais de turbulência.

A determinação da intensidade turbulenta seguiu as recomendações para escoamentos ao redor de corpos propostas por Ansys (2013) e Dynamics (2019). Considerando que o escoamento ao redor de um casco em movimento apresenta baixa intensidade turbulenta, adotou-se o valor de 1% para esse parâmetro.

Já para a definição da razão de viscosidades foi adotado o valor de 5, visto que Wortley (2013) e Marin (2016) propõem que, no caso de escoamentos com número de Reynolds elevados, a razão de viscosidades deve ter magnitude entre 1 e 10.

Com base nos valores de  $I$  e  $\frac{\mu_t}{\mu}$  adotados, utilizando-se as Equações (44) e (45), conclui-se que os valores de  $k$  e  $\omega$  valem, respectivamente,  $1,47 \cdot 10^{-4} [m^2/s^2]$  e  $29,32 [1/s]$ . Além disso, a viscosidade cinemática turbulenta ( $\nu_t$ ) é igual a  $5,01 \cdot 10^{-6} [m^2/s]$  (Equação (46)).

#### 4.1 Pós-processamento

Nesta seção são abordados os procedimentos adotados para a verificação e validação do desenvolvimento realizado, além de avaliações visuais qualitativas.

##### 4.1.1 Verificação

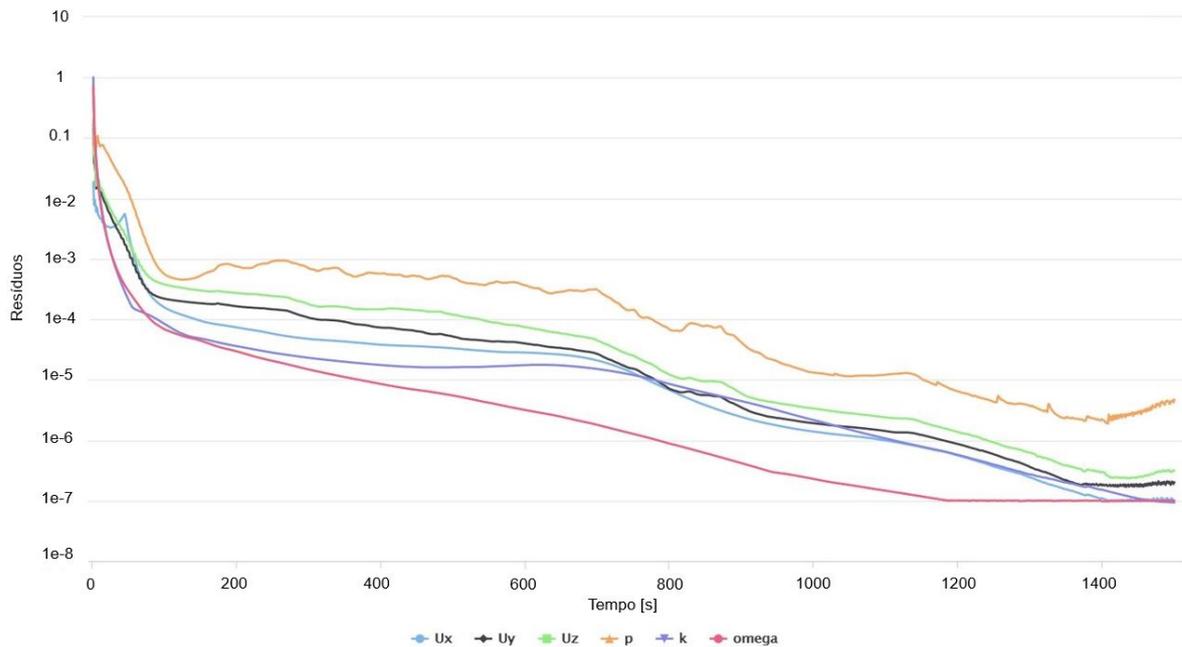
Essa etapa visa determinar a influência dos parâmetros utilizados nos resultados obtidos. Os principais aspectos analisados referem-se ao erro de iteração (associados à convergência dos resultados) e ao erro de discretização (relativos à malha).

#### 4.1.1.1 Análise dos resíduos e convergência do Cd

Para que a análise seja numericamente estável é necessário garantir a convergência da variável de interesse, ou seja, do coeficiente de arrasto total (Cd). Considerando as configurações apresentadas nas seções anteriores, monitorou-se o comportamento dos resíduos e do próprio Cd ao longo da simulação.

Na Figura 41 são mostrados os resíduos obtidos considerando uma malha com 6 camadas adicionadas próximas a superfície do casco.

Figura 41 – Resíduos (malha com 6 camadas)



Fonte O autor (2021)

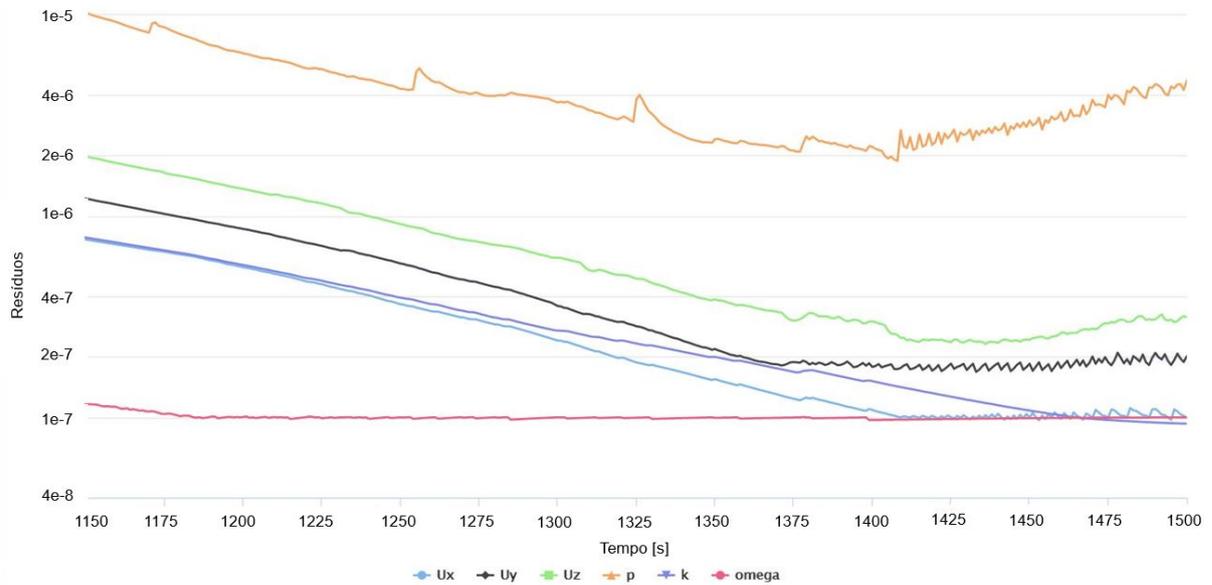
De acordo com Ferziger e Peric (2002), uma queda de 1000 vezes nos resíduos dos parâmetros, entre os valores iniciais e finais da simulação, vai gerar um erro de iteração de aproximadamente 1%. Como pode ser observado, os resíduos caíram mais de 1000 vezes, sendo suficiente para considerar que o erro de iteração é inferior a 1%.

O leitor mais interessado em análises de erro de iteração associado a simulações numéricas, encontrará uma discussão mais aprofundada em Eça e Hoekstra (2006).

Suspeita-se que o comportamento oscilatório observado nas últimas iterações (Figura 42), ocorra porque a tolerância definida para o campo de velocidades foi atingida antes da simulação ter sido finalizada.

Em função do acoplamento velocidade-pressão, os resíduos da pressão também desenvolvem um comportamento oscilante. Para minimizar esse problema, recomenda-se diminuir a tolerância do campo de velocidades (U).

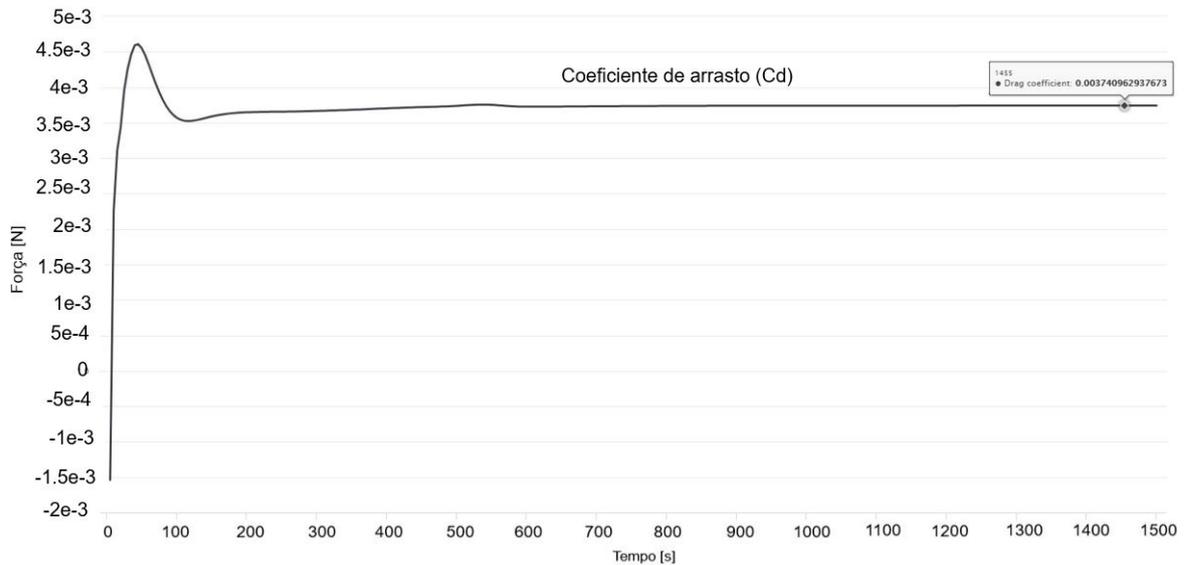
Figura 42 – Comportamento oscilatório dos resíduos (malha com 6 camadas)



Fonte O autor (2021)

Como o fenômeno observado começou a ocorrer apenas no final do processo iterativo, sendo que o  $C_d$  já poderia ser considerado convergido próximo da iteração 1300 (Figura 43), optou-se por manter os valores de tolerâncias estabelecidos para a simulação.

Figura 43 – Convergência do  $C_d$  (malha com 6 camadas)



Fonte O autor (2021)

Conforme defendido por Ferziger e Peric (2002), a simulação discutida nesta seção pode ser considerada convergida e possui um erro de convergência numérica na estimativa do  $C_d$  inferior à 1%, sendo, portanto, desprezível para qualquer aplicação associada à Engenharia Naval.

#### 4.1.1.2 Variáveis do escoamento e das funções definidas em *controlDict*

Uma prática recomendada consiste em verificar se as condições de contorno impostas foram de fato respeitadas. Para isso deve-se realizar diferentes plotagens do escoamento, de tal forma a monitorar o comportamento de cada uma das variáveis de interesse.

Na Tabela 19 são apresentados os valores calculados para cada variável do escoamento para o caso de  $Fr$  igual a 0,15.

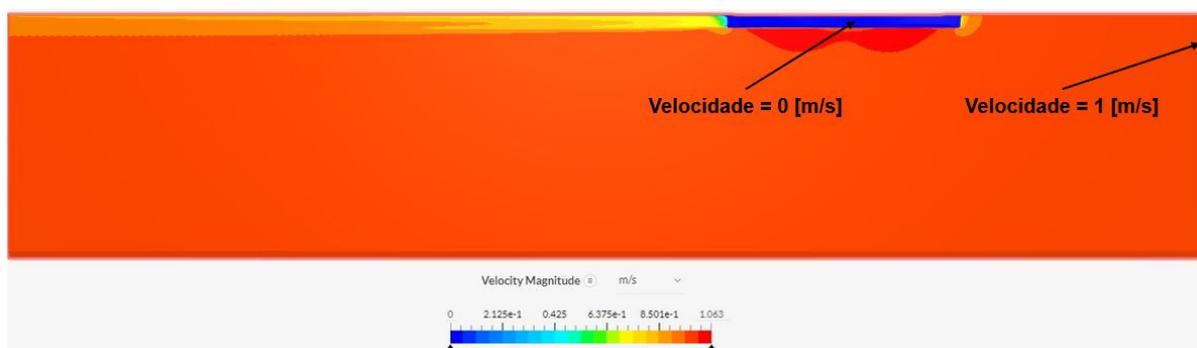
Tabela 19 – Valores das variáveis do escoamento nos contornos

Variável	Valor	Contorno
$U$ [ $m/s$ ]	1,00	Entrada
$U$ [ $m/s$ ]	0,00	Superfície
$p$ [ $Pa$ ]	0,00	Saída
$k$ [ $m^2/s^2$ ]	$1,47 \cdot 10^{-4}$	Entrada
$\omega$ [ $1/s$ ]	29,32	Entrada
$\nu_t$ [ $m^2/s$ ]	$5,01 \cdot 10^{-6}$	Entrada

Fonte: O autor (2021)

De acordo com o apresentado na Figura 44, o comportamento do campo de velocidades na direção do avanço respeitou as condições de contorno impostas, além de representar o perfil de velocidades em regiões de interesse como a popa, a proa e a esteira do casco.

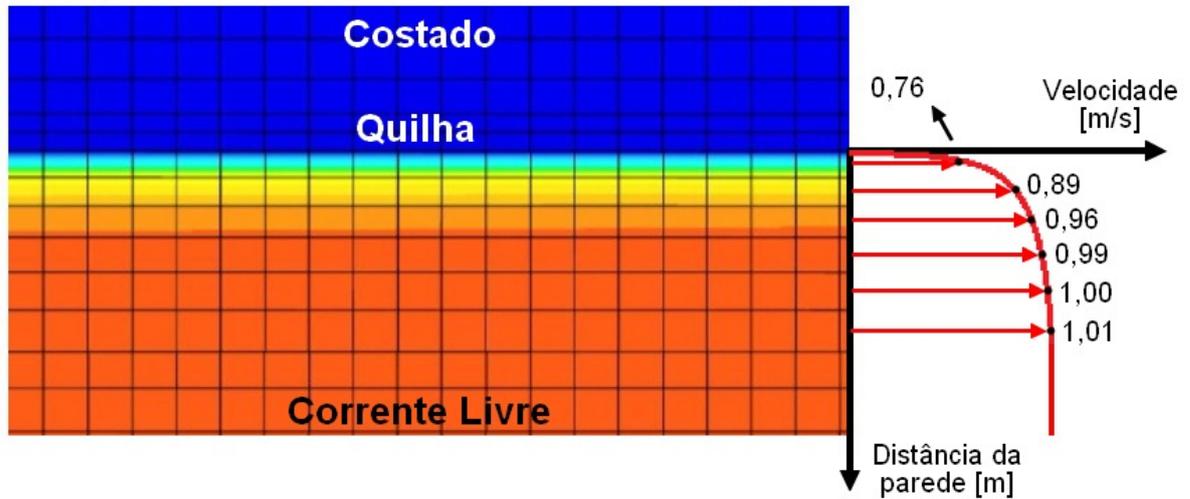
Figura 44 – Campo de velocidade na direção do avanço



Fonte O autor (2021)

Além disso, é interessante observar que a distribuição de velocidades na camada limite (Figura 45) apresentou o comportamento previsto pela revisão bibliográfica (Figura 7).

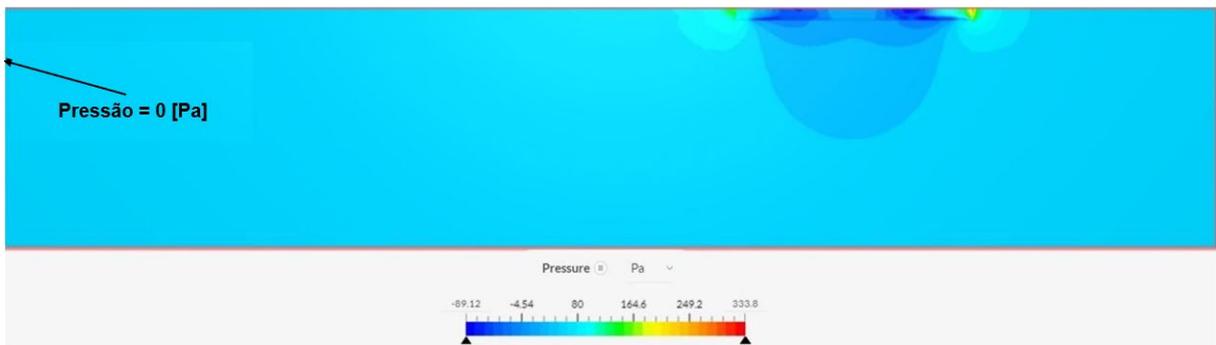
Figura 45 – Desenvolvimento da camada limite



Fonte O autor (2021)

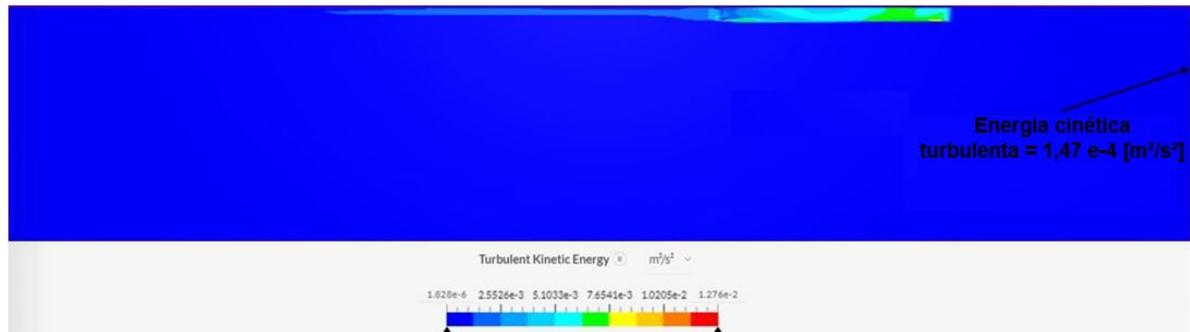
Observando a Figura 46, nota-se que o campo de pressão é majoritariamente nulo, exceto no entorno do casco, tendo maiores valores na popa e proa da embarcação. Essas características confirmam a correspondência dos resultados obtidos com as condições de contorno impostas para o modelo.

Figura 46 – Campo de pressão

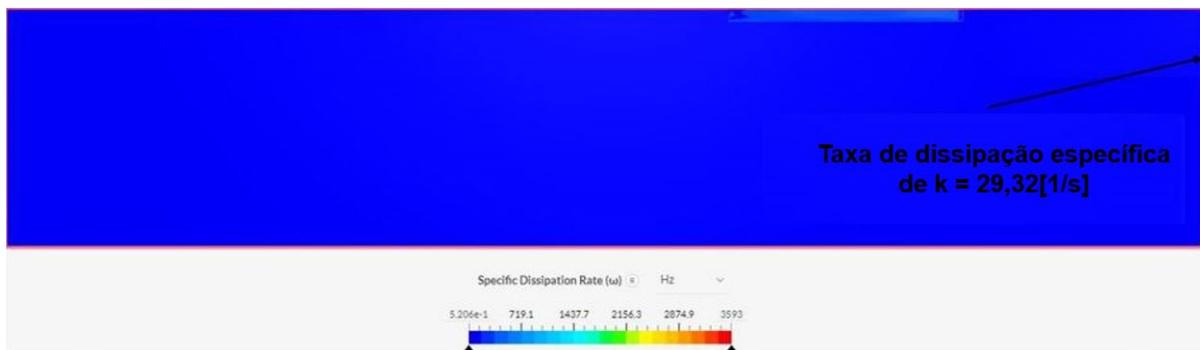


Fonte O autor (2021)

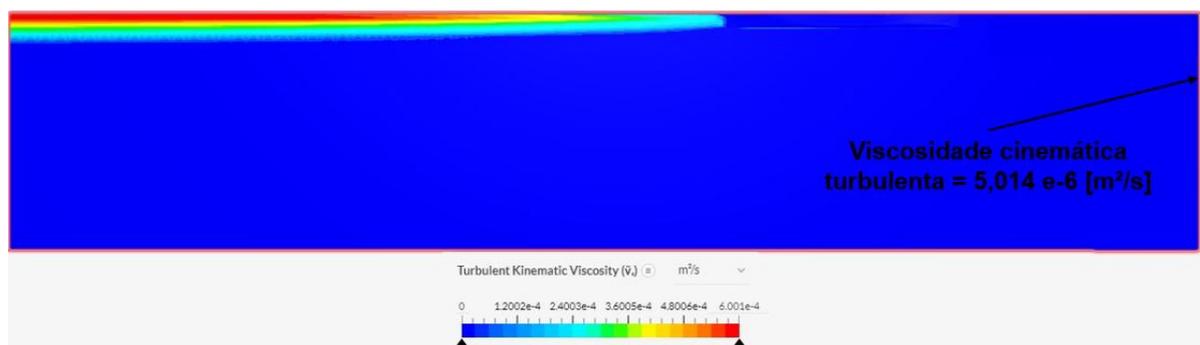
Da mesma forma, verificou-se que as condições de contorno associadas aos parâmetros turbulentos também foram respeitadas (Figuras 47 a 49).

Figura 47 – Distribuição de  $k$ 

Fonte O autor (2021)

Figura 48 – Distribuição de  $\omega$ 

Fonte O autor (2021)

Figura 49 – Distribuição de  $\nu_t$ 

Fonte O autor (2021)

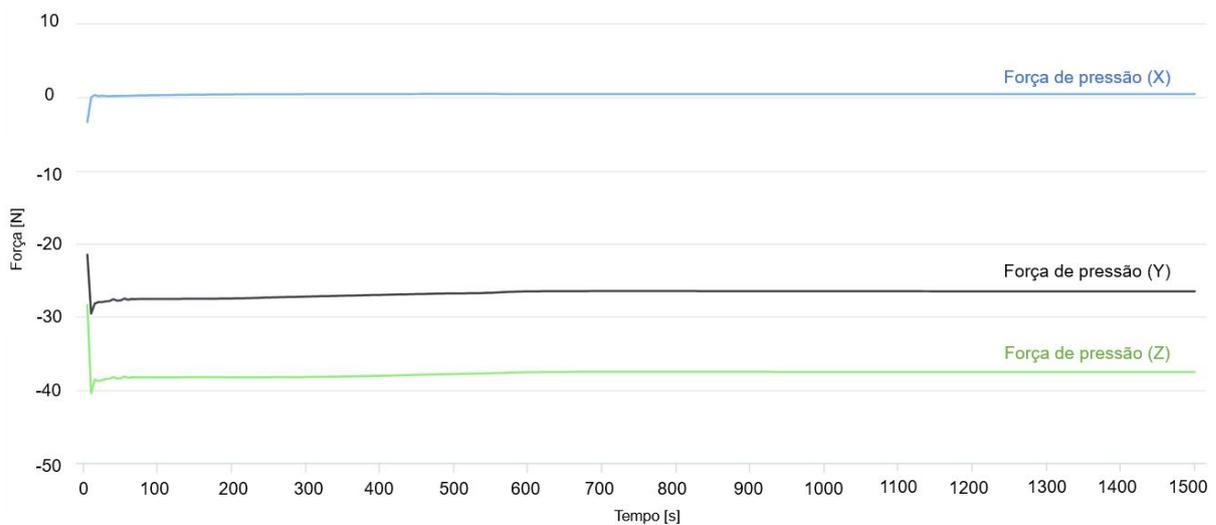
A respeito das magnitudes das forças, aquelas que são de interesse para a validação dos resultados são as forças de pressão (Figura 50) e friccionais (Figura 51).

Em relação as forças de pressão, é esperado que as maiores parcelas estejam na direção do arrasto e sustentação, X e Z respectivamente. A componente Y tende a se anular, pois as forças da parte não modelada, devido ao plano de simetria, possuiriam o mesmo módulo, porém sentido contrário, resultando em uma soma vetorial nula.

Para efeitos de comparação com dados experimentais, será contabilizada apenas a força de pressão na direção X, visto que a sustentação (direção Z), apesar de crucial em análises aerodinâmicas e em embarcações planantes, fogem ao escopo deste trabalho.

Posto que não há a presença da superfície livre, a parcela de resistência de onda ( $R_w$ ) não está sendo contabilizada no cálculo da força de pressão em X. Assim, a força de pressão em X corresponderá a força de pressão viscosa ( $R_{pv}$ ), conforme visto na Seção 2.5.4.

Figura 50 – Forças de pressão (malha com 6 camadas)



Fonte O autor (2021)

Ressalta-se que, a respeito da componente Z da força de pressão, embora a pressão em um ponto do escoamento tenha uma componente hidrostática e uma componente dinâmica (Equação (48)), a parcela hidrostática não é contabilizada pois o OpenFOAM não tem a referência da gravidade para calculá-la.

$$p = 0,5 \rho U^2 + \rho g H \quad (48)$$

Sendo  $\rho$  a massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ],  $U$  a velocidade de avanço [ $m/s$ ],  $g$  a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ] e  $H$  a profundidade do ponto analisado [ $m$ ].

Portanto, o valor da componente Z vista na Figura 50 corresponde apenas aos efeitos dinâmicos do escoamento. Para avaliar essa hipótese, na Tabela 20 é apresentado o resultado da componente Z da força de pressão tanto para uma velocidade igual a 0,01 m/s quanto para uma velocidade de 1 m/s.

Tabela 20 – Componente Z da força de pressão para velocidades diferentes

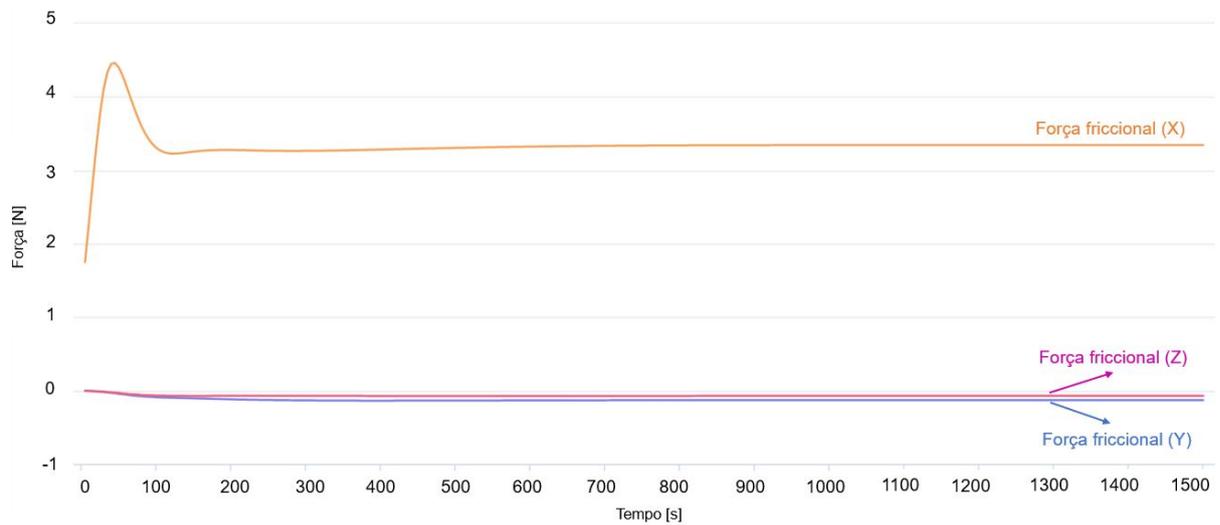
U [m/s]	Força de pressão (Z) [N]
0,0100	0,0038
1,0000	38,0000

Fonte: O autor (2021)

Percebe-se que a magnitude da componente Z da força de pressão quando a velocidade é de 0,01 m/s é 10000 vezes menor do que aquela obtida para uma velocidade de 1 m/s. Uma vez que a pressão dinâmica é proporcional ao quadrado da velocidade (primeiro termo da Equação (48)), fica evidente que apenas essa componente da força de pressão é calculada.

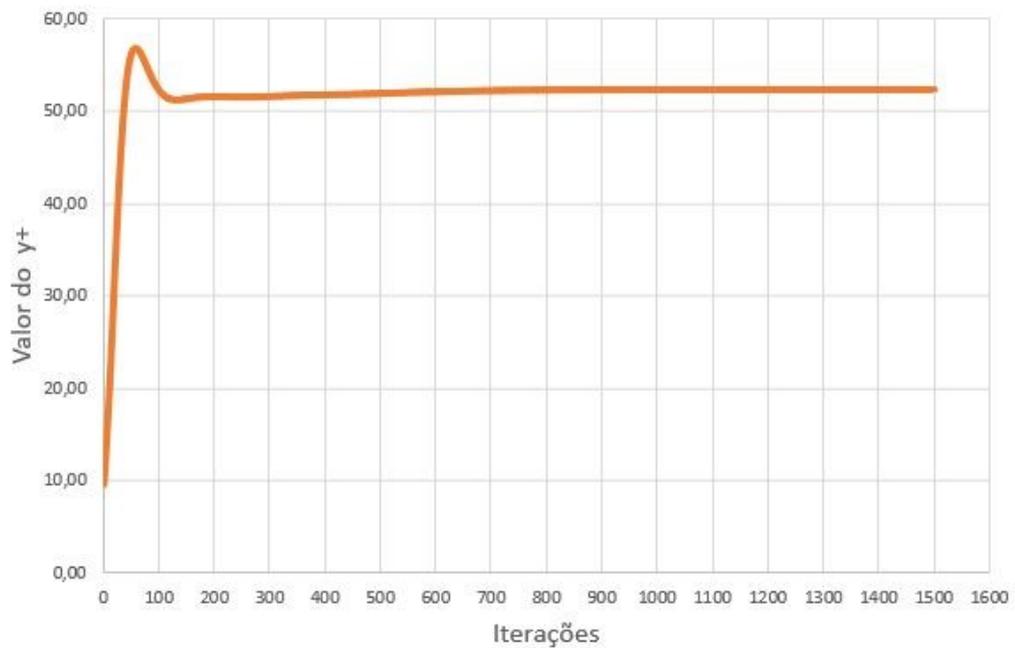
A respeito das forças friccionais (Figura 51), observa-se que as componentes na direção Y e Z apresentam magnitudes uma ordem de grandeza menor que a componente na direção X (avanço). Além disso, a mesma observação feita para a componente da força de pressão na direção Y é válida para a componente na direção Y da força friccional.

Figura 51 – Forças friccionais (malha com 6 camadas)



Fonte O autor (2021)

Visando confirmar se o valor de  $y_+$  se aproximou de 50, verificou-se a variação deste parâmetro a cada intervalo de tempo. Desta forma, pode-se observar (Figura 52) a convergência para um valor de aproximadamente 52,3 do  $y_+$ , o qual pode ser considerado aceitável em relação ao que foi discutido na Seção 3.2.2.7.

Figura 52 – Valor do  $y^+_{medio}$  convergido

Fonte O autor (2021)

#### 4.1.1.3 Estudo de independência de malha

Considerando o método para avaliar a influência da discretização da malha na resposta de uma simulação numérica descrito na Seção 3.2.3, nesta seção são apresentados os resultados referentes ao estudo considerando três graus de refino: malha fina, malha moderada e malha grossa.

Na Tabela 21 são mostrados os comprimentos<sup>41</sup> adotados em cada coordenada espacial e o respectivo número de volumes de controle em cada uma das malhas analisadas.

<sup>41</sup> Os comprimentos foram levemente ajustados de forma a se obter números inteiros de elementos em cada direção do domínio computacional.

Tabela 21 – Configurações das malhas utilizadas na análise do GCI

Malha	Direção	Comprimento do VC [m]	Número de VCs
Grossa	X	0,3750	60
	Y	0,3750	12
	Z	0,3462	13
Moderada	X	0,2813	80
	Y	0,3000	15
	Z	0,2813	16
Fina	X	0,2296	98
	Y	0,2250	20
	Z	0,2250	20

Fonte: O autor (2021)

Para realização desses testes considerou-se uma malha com apenas uma camada adjacente ao casco, cujos elementos devem também respeitar o valor de  $r$  definido entre malhas.

Na Tabela 22 são mostradas a taxa de variação no número de volumes de controle em cada grau de refino, evidenciando que a razão entre as malhas se manteve próxima de 2, viabilizando o uso do GCI. Além disso é importante observar que o  $y^+$  se manteve situado na subcamada logarítmica, a fim de respeitar a condição para a utilização das funções parede (Seção 2.4.1).

Tabela 22 – Informações das malhas para aplicação do GCI

Malha	Número de VCs	Razão de números de VCs	Altura do primeiro elemento [m]	$y^+$
Grossa	747582	2,04	0,003276	40
Moderada	1523329	1,96	0,002600	50
Fina	2987361	-	0,002063	60

Fonte: O autor (2021)

Para avaliar a convergência de malha, realizou-se o cálculo do GCI entre a malha grossa e moderada ( $GCI_{23}$ ) (Equação (49)), além do cálculo entre a malha moderada e fina ( $GCI_{12}$ ) (Equação (50)).

$$GCI_{23} = \frac{Fs|\epsilon_{23}|r^p}{r^p - 1} \quad (49)$$

$$GCI_{12} = \frac{Fs|\epsilon_{12}|}{r^p - 1} \quad (50)$$

Onde o  $F_s$  corresponde ao fator de segurança, que para análises considerando 3 malhas vale 1,25. Já  $\epsilon_{12}$  e  $\epsilon_{23}$  referem-se ao erro relativo calculado, respectivamente, para o  $GCI_{12}$  (Equação (51)) e para o  $GCI_{23}$  (Equação (52)).

$$\epsilon_{12} = \frac{f_{moderada} - f_{fina}}{f_{fina}} \quad (51)$$

$$\epsilon_{23} = \frac{f_{grossa} - f_{moderada}}{f_{moderada}} \quad (52)$$

Onde  $f$  refere-se aos valores de Cd calculados usando cada uma das malhas consideradas.

Já o parâmetro  $p$  corresponde a ordem de convergência teórica, sendo calculada conforme a Equação (53), cujo valor tende a ser próximo da ordem dos esquemas de discretização utilizados nas análises (Seção 3.3.2).

$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_{grossa} - f_{moderada}}{f_{moderada} - f_{fina}}\right)}{\ln r} \quad (53)$$

Por fim, o valor de Cd no limite assintótico é obtido a partir da Equação (54).

$$f_{assin.} = f_{fina} + \frac{f_{fina} - f_{moderada}}{r^p - 1} \quad (54)$$

Segundo Roache (1997), uma forma de verificar a proximidade das malhas utilizadas com a região assintótica da convergência de malha, consiste em avaliar se a relação da Equação (55) se aproxima de 1.

$$A_s = \frac{GCI_{23}}{GCI_{12}r^p} \quad (55)$$

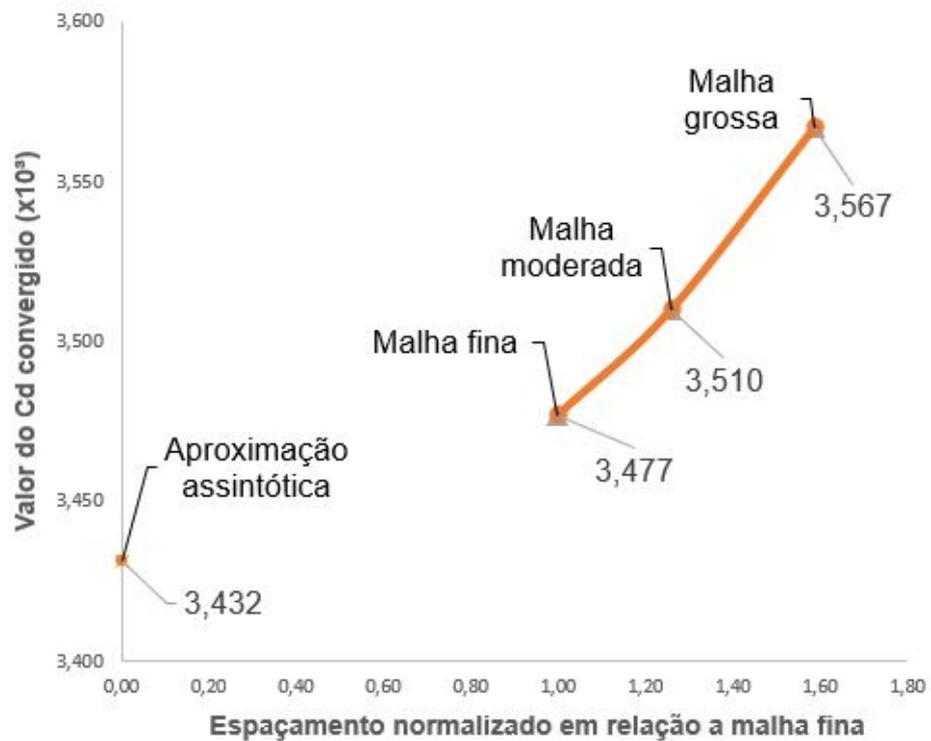
Na Tabela 23 são sintetizadas as informações referentes a análise de convergência de malha usando o método GCI. Já na Figura 53 pode ser vista a tendência monotônica do Cd e a aproximação do comportamento assintótico, a qual pode ser confirmada analisando-se o valor de  $A_s$  mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados relativos ao método GCI

Parâmetro	Valor
$f_{grossa} (x10^3)$	$3,567.10^{-3}$
$f_{moderada} (x10^3)$	$3,510.10^{-3}$
$f_{fina}(x10^3)$	$3,477.10^{-3}$
$r$	1,26
$F_s$	1,25
$p$	2,36
$\epsilon_{23}$	2,23%
$\epsilon_{12}$	1,31%
$GCI_{23}$	2,79%
$GCI_{12}$	1,63%
$A_s$	0,991
$f_{assin.} (x10^3)$	$3,432.10^{-3}$

Fonte: O autor (2021)

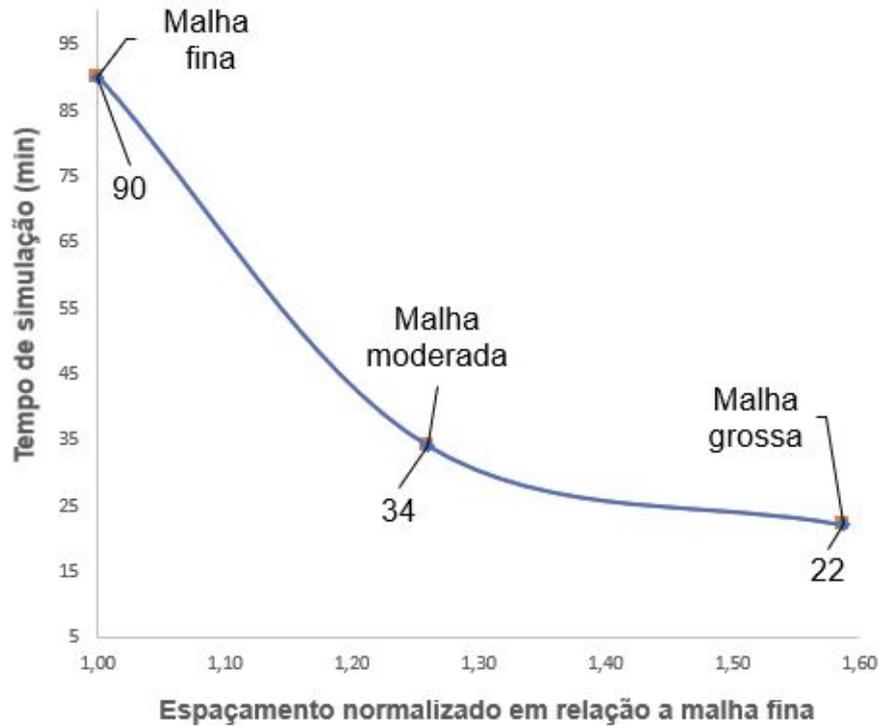
Figura 53 – Convergência do Cd com base no método GCI



Fonte: O autor (2021)

Para decidir a malha a ser utilizada, uma estratégia comum é comparar o custo de processamento e a qualidade da resposta fornecida. Observando a Figura 54, é evidente que a mudança da malha grossa para a malha moderada representa um aumento de tempo significativamente menor do que a mudança da malha moderada para a fina.

Figura 54 – Influência do refino da malha no tempo de simulação



Fonte: O autor (2021)

Levando em consideração que a diferença entre as bandas de erro  $GCI_{12}$  e  $GCI_{23}$  é pequena (Tabela 23), e que o esforço computacional da malha fina em relação a moderada é muito maior (Figura 54), optou-se pela escolha da malha moderada para realização das análises deste trabalho.

Baseado nos resultados apresentados, interpreta-se que o valor de  $C_d$ , para o  $Fr$  de 0,15, pode ser estimado em  $3,432 \cdot 10^{-3}$  com uma banda de erro de 2,79%, considerando o uso da malha moderada.

#### 4.1.1.4 Estudo de sensibilidade da discretização da camada limite

Uma vez definido o grau de refino da malha, realizou-se testes com o intuito de avaliar a influência que o número de camadas utilizadas na modelagem da camada limite exerce no  $C_d$ .

É importante observar que a altura do primeiro elemento deve ser mantida constante, visando posicionar o valor de  $y^+$  na subcamada logarítmica. Por fim, a altura

de cada camada adicionada foi calculada considerando uma razão de expansão de 1,1, tal como visto na Seção 3.2.2.7.

Dessa forma, foram analisadas seis configurações, adicionando uma nova camada em cada uma das malhas estudadas (Tabela 24).

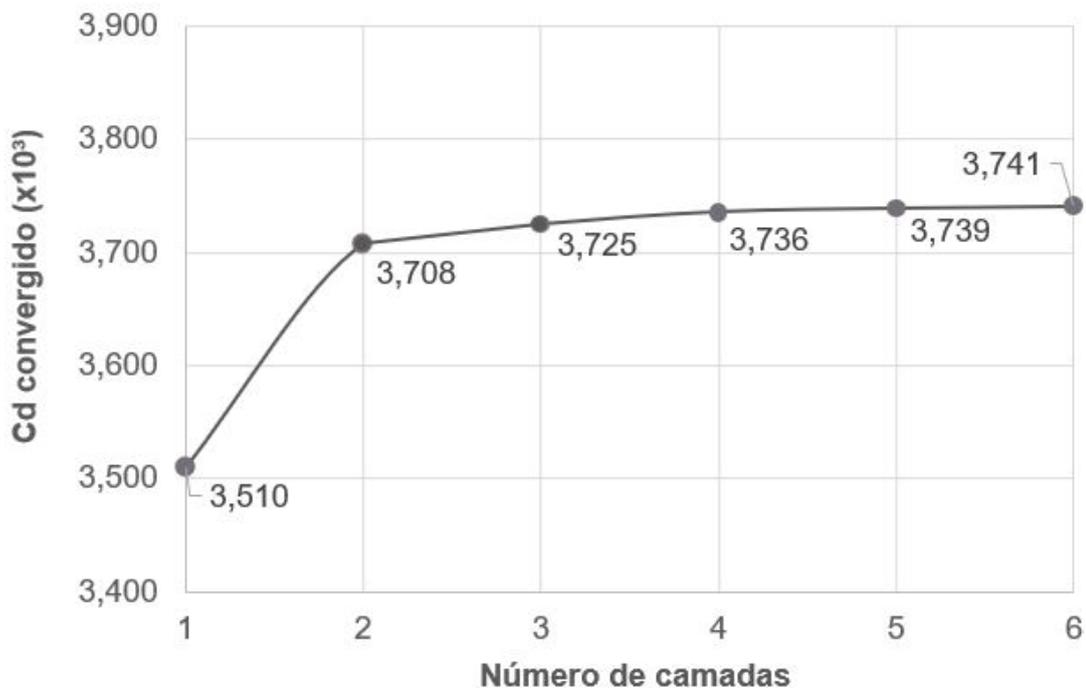
Tabela 24 – Características do estudo referente a discretização da camada limite

Número de camadas	Alt. da primeira camada [m]	Alt. da última camada [m]	$y^+$
1	0,002600	0,002600	52,3
2	0,002600	0,002860	52,3
3	0,002600	0,003146	52,3
4	0,002600	0,003461	52,3
5	0,002600	0,003807	52,3
6	0,002600	0,004187	52,3

Fonte: O autor (2021)

Na Figura 55 é mostrado o comportamento do  $C_d$  para cada uma das malhas consideradas no estudo de sensibilidade.

Figura 55 – Influência do aumento do número de camadas junto ao casco



Fonte O autor (2021)

Observando a Figura 55 é notória a convergência do Cd com o aumento do número de camadas inseridas, a qual pode ser verificada analisando-se a diminuição da variação do Cd entre uma malha e outra (Tabela 25).

Tabela 25 – Resultados do estudo de sensibilidade da camada limite

Número de camadas	Cd ( $\times 10^3$ )	Variação [%]	Tempo de simulação [min]
1	3,510	5,340	34
2	3,708	0,456	40
3	3,725	0,294	42
4	3,736	0,080	43
5	3,739	0,053	45
6	3,742	-	49

Fonte: O autor (2021)

Os resultados indicam que no mínimo duas camadas são necessárias para aproximar o Cd do comportamento assintótico. A decisão do número de camadas depende do grau de precisão desejado e da capacidade de processamento disponível.

Devido à ausência de critérios quantitativos, a escolha do número de camadas na modelagem da camada limite foi realizada na etapa de validação, a qual será apresentada a seguir.

#### 4.1.2 Validação

Nesta etapa busca-se analisar as incertezas relacionadas ao modelo matemático empregado nas simulações, comparando-se os resultados obtidos com os dados experimentais da Série 60.

##### 4.1.2.1 Definição da malha para validação

Para definir o número de camadas usadas na modelagem da camada limite, foi realizada uma comparação entre as resistências friccionais, obtidas na simulação com aquela calculada utilizando a Equação (25), considerando um modelo com 4,5 metros de LBP, referente ao casco 4212W da Série 60.

Na Tabela 26 são apresentados os valores da resistência friccional tanto para os dados experimentais extrapolados quanto para os resultados obtidos via CFD, além dos erros referentes a cada uma das discretizações analisadas.

Vale lembrar que a comparação realizada considera apenas a simulação referente ao Fr igual a 0,15, ou seja, referente a uma velocidade de 1 m/s.

Tabela 26 – Análise da influência do número de camadas modeladas na  $R_f$ 

<b>Número de camadas</b>	$R_f$ (CFD) [N]	$R_f$ (Serie 60) [N]	<b>Erro rel. [%]</b>
2	6,661	6,871	3,145
3	6,688	6,871	2,743
4	6,694	6,871	2,651
5	6,690	6,871	2,682
6	6,684	6,871	2,805

Fonte: O autor (2021)

Considerando que os erros apresentados são baixos (Tabela 26) e que a variação do tempo de simulação é pequena (Tabela 25), optou-se pela malha com 5 camadas para as análises deste trabalho, visando um equilíbrio entre precisão e esforço computacional.

Apenas a título de curiosidade, a comparação entre os resultados encontrados utilizando o SIMSCALE e o OpenFOAM para a condição de  $Fr$  igual a 0,15 para a malha com 5 camadas pode ser vista no Apêndice E. Observa-se que ambas as ferramentas apresentam resultados próximos, diferindo, em média, em 0,025%.

#### 4.1.2.2 Parcelas da resistência viscosa para o modelo 4212W de 4,5 m

Nessa etapa, analisou-se a resistência viscosa considerando tanto a faixa de valores de  $Fr$  utilizada por Todd (1963) quanto aqueles analisados por Hille (2017).

Para que o processo de validação seja possível, deve-se obter a resistência viscosa experimental considerando um modelo de 4,5 m à partir da extrapolação do modelo 4212W pertencente a Série 60, utilizando um dos métodos apresentados na Seção 2.5.4.

Posto que a análise é do tipo monofásica, restam as componentes friccional e de pressão viscosa para serem calculadas. Por esse motivo, foi utilizada a abordagem proposta por Hughes (1954).

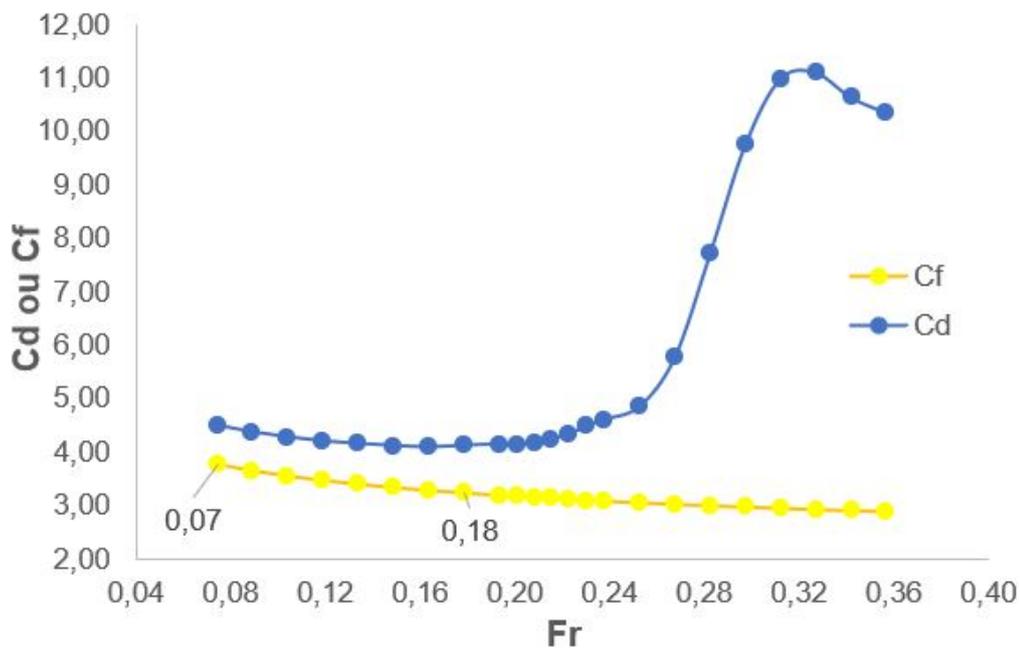
Usando a Equação (25) é possível determinar a resistência friccional, bastando definir um fator de forma para a obtenção da resistência de pressão viscosa.

Objetivando determinar o fator de forma referente aos resultados obtidos nos ensaios da Série 60, foi utilizado o procedimento simplificado, proposto por Hughes (1954), e que passou a ser adotado pela ITTC (1957).

O processo para obtenção do fator de forma de modelos ensaiados em tanque de prova considera, segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), que o modelo deve ser testado em  $Fr$  baixos<sup>42</sup>, ou seja, enquanto a curva do coeficiente de arrasto total ( $C_d$ ) for paralela a curva do coeficiente de resistência friccional ( $C_f$ ).

Na Figura 56 é mostrado o comportamento de  $C_d$  e  $C_f$  considerando os dados da Série 60 para o modelo 4212W de 4,5m.

Figura 56 – Curva de  $C_d$  e  $C_f$  em função de  $Fr$



Fonte O autor (2021)

Segundo Flemming e Gonçalves (2006), duas retas são consideradas paralelas quando seus respectivos coeficientes angulares (Equação 56) são iguais.

$$y = ax + b \quad (56)$$

Sendo  $a$  e  $b$  o coeficiente angular e linear da reta, respectivamente.

Por se tratar de dados que não apresentam um comportamento perfeitamente linear, é esperado que os coeficientes angulares não sejam estritamente idênticos. Portanto, o intervalo de  $Fr$  escolhido para a definição do fator de forma deve apresentar a menor diferença entre os coeficientes angulares e o maior número de dados possível.

Dessa forma, foram avaliados quatro intervalos de  $Fr$ , para os quais as equações das retas interpoladoras (que mais se aproximavam dos pontos considerados na análise) foram obtidas e seus coeficientes angulares, comparados (Tabela 27).

<sup>42</sup> Tal fato torna-se necessário pois, em teoria, nesse intervalo de  $Fr$ , a parcela da resistência referente as ondas ( $C_w$ ) é nula.

Tabela 27 – Análise dos coeficientes angulares das retas analisadas

<b>Intervalo de Fr</b>	<b>Coef. ang. (Cf)</b>	<b>Coef. ang. (Cd)</b>	<b>Diferenças [%]</b>
0,07 a 0,20	-4,540	-2,516	80,445
0,07 a 0,18	-5,040	-3,632	38,767
0,09 a 0,16	-4,893	-3,700	32,243
0,10 a 0,15	-4,84	-3,553	36,223

Fonte: O autor (2021)

Observa-se (Tabela 27) que o intervalo de Fr igual a 0,09 a 0,16 apresentou as menores diferenças entre os coeficientes angulares, sendo, portanto, o intervalo escolhido para a análise.

Molland, Turnock e Hudson (2011) afirmam ainda que o principal problema no cálculo do fator de forma é justamente o fato de serem utilizados pequenos valores de Fr, pois, nesses casos, dada a ordem de grandeza dos valores medidos, é difícil obter a resistência ao avanço com precisão.

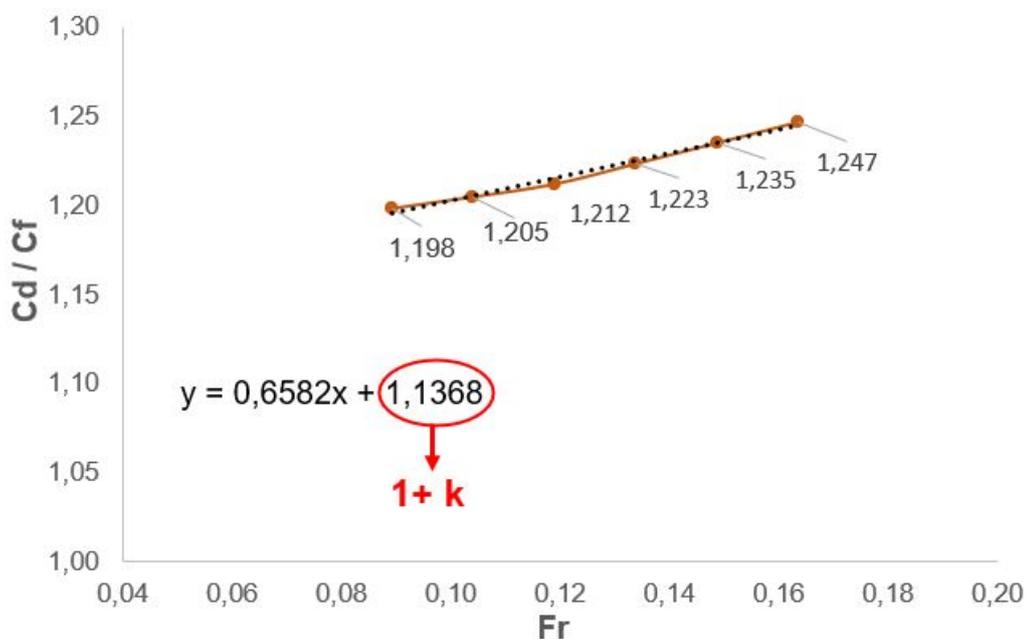
Destaca-se que seria possível utilizar o intervalo de Fr igual a 0,07 a 0,18, uma vez que exibe pequenas diferenças entre os coeficientes angulares das retas e fornece um número maior de dados para a análise (Tabela 27).

Porém, em virtude da baixa precisão na medida experimental, o valor de Fr igual a 0,07 (limite inferior) foi excluído. Além disso, o valor referente ao Fr de 0,18 também foi excluído, pois nesse ponto a curva Cd começa a se afastar da curva Cf.

Por fim, o fator de forma é calculado utilizando-se a Equação 57, com Fr variando de 0,09 a 0,16 (Figura 57).

$$1 + k = \lim_{Fr \rightarrow 0} \frac{C_d}{C_f} \quad (57)$$

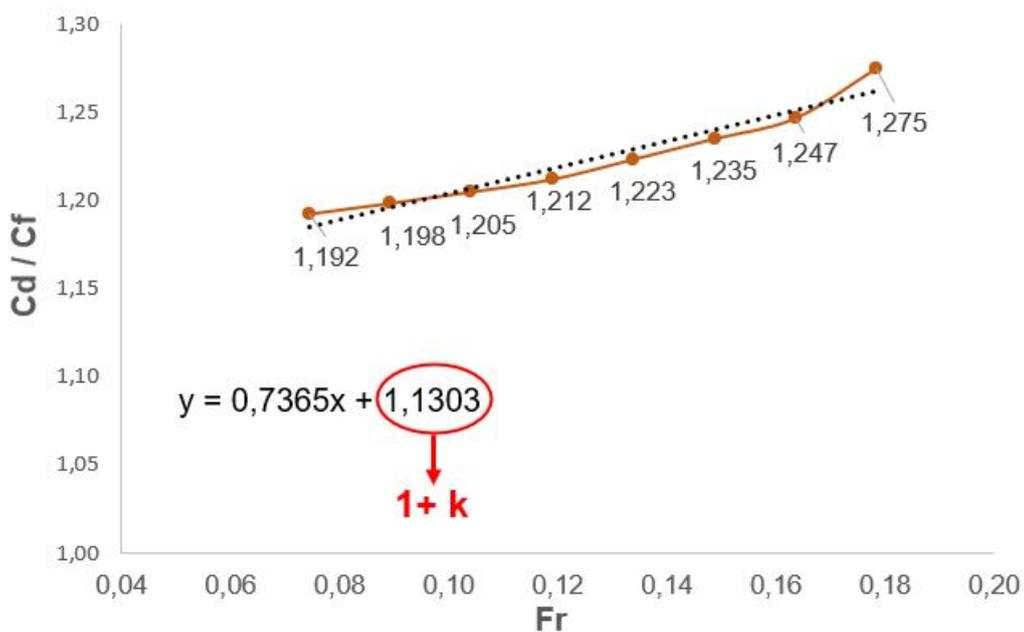
Figura 57 – Fator de forma para Fr entre 0,09 e 0,16



Fonte O autor (2021)

A fim de verificar a influência da exclusão dos limites superior e inferior do intervalo experimental de baixo  $Fr$ , na Figura 58 é mostrado o valor de  $(1 + k)$  para o intervalo de  $Fr$  de 0,07 a 0,18. Além disso, observa-se que os dados não apresentam a mesma tendência linear observada na Figura 57.

Figura 58 – Fator de forma para Fr entre 0,07 e 0,18



Fonte O autor (2021)

Os resultados apresentados (Figuras 57 e 58) mostram que a determinação do fator de forma é dependente do intervalo de velocidades analisado, assim como da precisão dos valores de resistência medidos nos ensaios de reboque. Diversas técnicas que objetivam a definição desse parâmetro foram desenvolvidas ao longo dos anos, as quais podem ser vistas em ITTC (2014), sendo ainda hoje um desafio para projetistas e pesquisadores da área.

Com base no procedimento apresentado, o fator de forma foi considerado constante e igual a 0,137 para todo o intervalo de Fr.

Considerar o fator de forma como independente da velocidade é uma aproximação classicamente empregada em diversos modelos empíricos para a estimativa da resistência ao avanço de embarcações. Sobre isso Carlton (2007) escreve:

Embora tradicionalmente o fator de forma seja tratado como uma constante com número de Froude variável, a questão principal é saber se é válido supor que  $k$ , determinado quando Fr se aproxima de zero, se mantém em altas velocidades.

Isso é particularmente preocupante em velocidades onde a configuração do fluxo em torno do casco tende a ser muito diferente daquele quando Fr é igual a zero e, portanto, uma dependência do número de Froude pode ser esperada para  $k$ .

Além disso, uma dependência de Reynolds também é provável, uma vez que os efeitos viscosos são a base da formulação do fator de forma. Os efeitos de Froude e Reynolds são, no entanto, susceptíveis de afetar mais intensamente o desempenho de embarcações de alta velocidade e têm uma influência menor nas embarcações em geral.

Finalmente, utilizando-se a abordagem de Hughes vista na Seção 2.5.4, os resultados experimentais da Série 60 foram extrapolados para o modelo de 4,5 m. Na Tabela 28 são sintetizados os valores de resistência ao avanço para as diferentes velocidades analisadas.

Outra abordagem comumente utilizada para a determinação do fator de forma consiste na utilização de modelos empíricos. Conforme pode ser visto no Apêndice F, existem diversos modelos empíricos disponíveis na literatura para a estimativa do fator de forma  $k$ .

Porém, aplicando-se esses modelos, observa-se uma alta variabilidade dos resultados, indicando a elevada sensibilidade desses modelos em relação as características das embarcações a que se destinam. Portanto, optou-se por descartar o uso dessas equações neste trabalho.

Tabela 28 – Dados experimentais do modelo 4212W extrapolados para 4,5 m

<b>Fr</b>	<b>Vm [m/s]</b>	$R_f$ [N]	$R_{pv}$ [N]	$R_v$ [N]	<b>k</b>
0,15	1,00	6,871	0,948	7,820	0,137
0,18	1,20	9,597	1,324	10,922	0,137
0,20	1,35	11,909	1,644	13,553	0,137
0,22	1,49	14,444	1,993	16,437	0,137
0,25	1,69	18,171	2,508	20,678	0,137
0,28	1,89	22,285	3,075	25,360	0,137
0,30	1,99	24,484	3,379	27,863	0,137
0,33	2,19	29,170	4,025	33,196	0,137
0,36	2,39	34,228	4,723	38,951	0,137

Fonte: O autor (2021)

#### 4.1.2.3 Obtenção das parcelas da resistência viscosa via CFD

A respeito da obtenção das componentes da resistência viscosa a partir do OpenFOAM, as análises de outras velocidades (além da velocidade referente ao Fr de 0,15) requerem o ajuste dos parâmetros associados ao comportamento turbulento do escoamento.

Observando as Equações (44) e (45) nota-se que os valores de  $k$  e  $\omega$  são dependentes da velocidade do escoamento (U). Além disso, a velocidade do escoamento (U) também afeta a determinação da altura do primeiro elemento ( $y_h$ ) (Equação (41)). As configurações dos parâmetros referentes a cada uma das velocidades simuladas são mostradas na Tabela 29.

Baseado nos dados mostrados na Tabela 29, percebe-se que, à medida que a velocidade aumenta, os valores de  $k$  e  $\omega$  acompanham a mesma tendência. Isso ocorre pois eles são proporcionais ao nível de turbulência na simulação, o qual está vinculado ao número de Reynolds, cuja magnitude se eleva com o aumento da velocidade do escoamento.

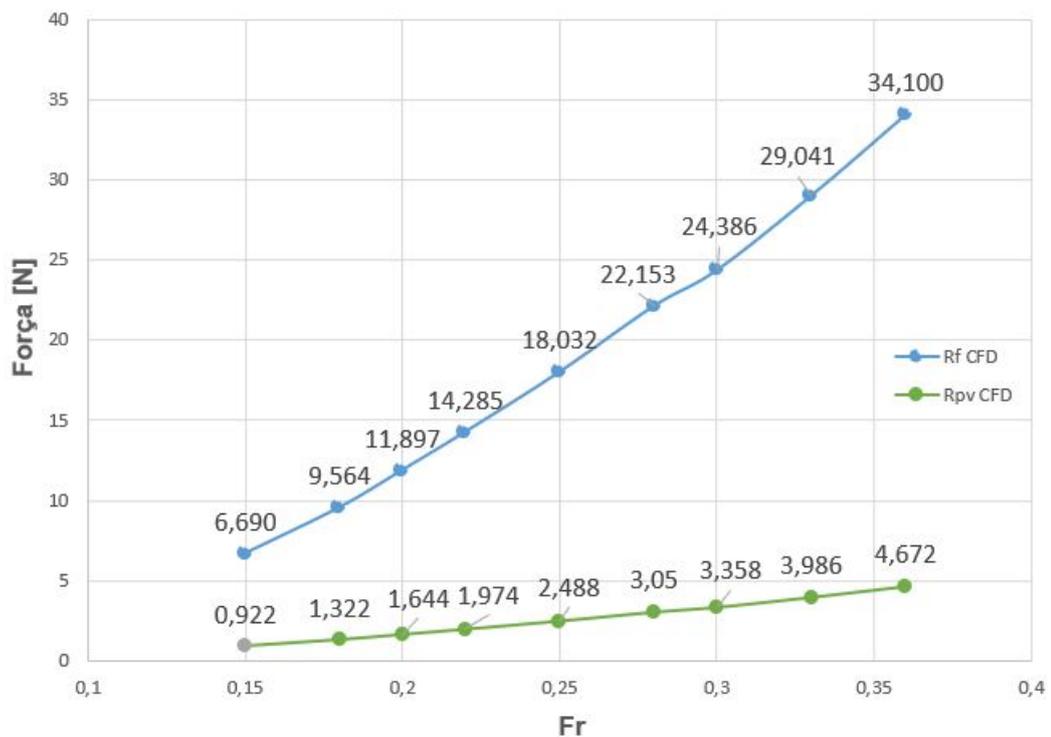
A redução da altura das camadas adjacentes observada na Tabela 29 é esperada já que o gradiente do campo de velocidades passa a ser mais intenso próximo a parede e, portanto, são necessários volumes de controle cada vez menores para captar essa variação. Por consequência, a camada limite tende a ser mais fina com o aumento do número de Reynolds (Equação (16)).

Tabela 29 – Parâmetros para as simulações de diferentes velocidades

Fr	U [m/s]	$y_h$ [m]	$k$ [ $m^2/s^2$ ]	$\omega$ [ $s^{-1}$ ]
0,15	1,00	0,0026	1,47E-04	29,32
0,18	1,20	0,0022	2,16E-04	44,13
0,20	1,35	0,0019	2,73E-04	55,85
0,22	1,49	0,0018	3,33E-04	68,03
0,25	1,69	0,0016	4,28E-04	87,52
0,28	1,89	0,0014	5,36E-04	109,35
0,30	1,99	0,0014	5,94E-04	121,35
0,33	2,19	0,0012	7,19E-04	146,82
0,36	2,39	0,0011	8,57E-04	175,04

Fonte: O autor (2021)

Realizando os devidos ajustes, os resultados obtidos usando o OpenFOAM e considerando diferentes velocidades de avanço podem ser vistos na Figura 59.

Figura 59 –  $R_f$  e  $R_{pv}$  (OpenFOAM)

Fonte: O autor (2021)

Para complementar os dados mostrados na Figura 59, na Tabela 30 são sintetizados os resultados adquiridos considerando Fr variando de 0,15 até 0,36.

Para a determinação do fator de forma utilizou-se a própria definição dada por Hughes (1954), regida matematicamente pela Equação (58).

$$k = \frac{R_{pv}}{R_f} \quad (58)$$

Tabela 30 – Resultados das simulações utilizando OpenFOAM

<b>Fr</b>	<b>U [m/s]</b>	<b><math>R_f</math> [N]</b>	<b><math>R_{pv}</math> [N]</b>	<b><math>R_v</math> [N]</b>	<b>k</b>
0,15	1,00	6,690	0,922	7,612	0,138
0,18	1,20	9,564	1,322	10,886	0,138
0,20	1,35	11,897	1,644	13,541	0,138
0,22	1,49	14,285	1,974	16,259	0,138
0,25	1,69	18,032	2,488	20,520	0,138
0,28	1,89	22,153	3,050	25,203	0,138
0,30	1,99	24,386	3,358	27,744	0,138
0,33	2,19	29,041	3,986	33,027	0,137
0,36	2,39	34,100	4,672	38,772	0,137

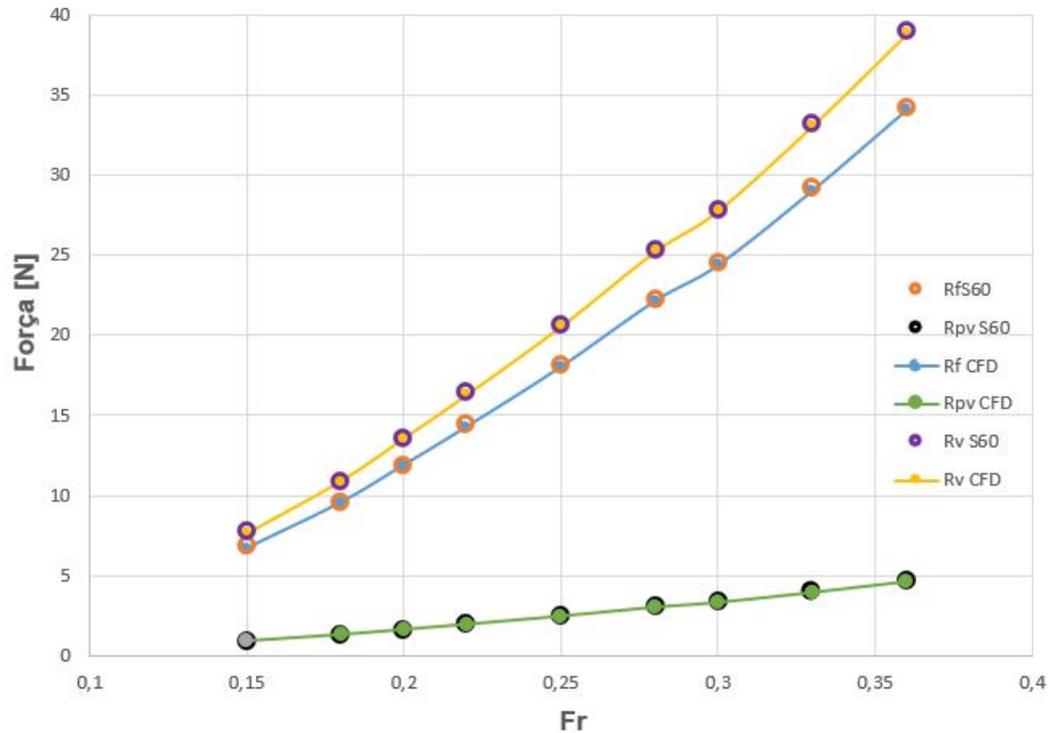
Fonte: O autor (2021)

Os valores do fator de forma (k) obtidos numericamente reforçam a tese de que, na faixa de velocidades estudada, esse valor se mantém aproximadamente constante.

Por fim, realizou-se a comparação entre as resistências advindas do OpenFOAM e da extrapolação da Série 60 (Figura 60), sendo que para quantificar o erro das simulações (Tabela 31) utilizou-se a Equação (59), onde  $R_{CFD}$  e  $R_{S60}$  referem-se aos valores obtidos em cada um dos métodos considerados.

$$Erro_{rel.} = \frac{R_{S60} - R_{CFD}}{R_{CFD}} * 100 \quad (59)$$

Figura 60 – Comparação da resistência ao avanço entre OpenFOAM e Série 60



Fonte: O autor (2021)

Tabela 31 – Erros relativos entre OpenFOAM e Série 60

Fr	U [m/s]	% $R_f$	% $R_{pv}$	% $R_v$
0,15	1,00	2,717	2,846	2,732
0,18	1,20	0,344	0,182	0,324
0,20	1,35	0,106	-0,030	0,089
0,22	1,49	1,110	0,976	1,094
0,25	1,69	0,767	0,786	0,770
0,28	1,89	0,594	0,830	0,622
0,30	1,99	0,404	0,620	0,430
0,33	2,19	0,444	0,991	0,510
0,36	2,39	0,374	1,101	0,462

Fonte: O autor (2021)

Finalmente, resta comparar a efetividade da ferramenta gratuita utilizada neste trabalho (OpenFOAM) com a do programa comercial (STARCCM+), usado por Hille (2017). Nesse caso, a única parcela da resistência passível de comparação é a resistência friccional. Isso ocorre pela própria diferença entre as metodologias adotadas,

visto que Hille (2017) não apresenta os resultados de resistência de pressão viscosa isoladamente.

Assim, na Tabela 32 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos por Hille (2017), os deste trabalho e, finalmente, os resultados experimentais da Série 60 para o modelo 4212W extrapolados para o comprimento de 4,5 m. É importante ressaltar que os dados de Hille (2017) foram ajustados considerando o uso de água salgada, para assegurar a correta comparação dos resultados.

Tabela 32 – Comparação dos resultados referentes a  $R_f$

<b>Fr</b>	<b>Rf [N]</b>	<b>Rf [N]</b>	<b>Rf [N]</b>	<b>Erro [%]</b>	<b>Erro [%]</b>
	<b>Série 60</b>	<b>Hille (2017)</b>	<b>Autor (2021)</b>	<b>Hille (2017)</b>	<b>Autor (2021)</b>
0,15	6,871	6,680	6,690	2,817	2,717
0,20	11,909	11,580	11,900	2,823	0,106
0,25	18,171	17,360	18,030	4,649	0,767

Fonte: O autor (2021)

Os resultados mostram uma proximidade dos dados numéricos com os experimentais em ambas as ferramentas. É provável que a diferenças observadas se devam as mais diversas causas, mas aponta-se como preponderantes as seguintes:

- As geometrias das embarcações. Embora fossem próximas em um primeiro momento (Tabela 2), a forma como a popa e a proa foram modificadas em ambos os trabalhos, pode ter introduzido pequenas variações ao modelo;
- A diferença entre as malhas geradas, sobretudo no que se refere a discretização da camada limite;
- As condições de contorno utilizadas não são rigorosamente as mesmas, principalmente devido à presença da superfície livre (associada a geração de ondas) modelada por Hille (2017);
- Os algoritmos utilizados para a resolução das equações diferenciais são diferentes, devido a própria natureza dos fenômenos físicos modelados.

Dessa forma, pode-se afirmar que ambas as ferramentas possuem potencial para representar o escoamento no entorno de um casco que se desloca a uma velocidade constante, dada as particularidades intrínsecas a cada programa.

## 5 CONCLUSÃO

Apresentou-se um procedimento para a obtenção da componente viscosa da resistência ao avanço de uma embarcação pertencente a Série 60, utilizando a abordagem CFD implementada nas ferramentas OpenFOAM e SIMSCALE.

Através da planilha desenvolvida por Spada (2019) e com uso do programa Rhinoceros, modelou-se a geometria da embarcação 4212W da Série 60, a qual foi escalonada para possuir LBP igual a 4,5 metros. A geometria modelada alcançou diferenças menores do que 1% em relação aos dados geométricos e hidrostáticos descritos em Hille (2017).

A geração da malha foi realizada com auxílio do SIMSCALE, o qual se baseia nos algoritmos implementados no ambiente do OpenFOAM. A partir de estudos paramétricos associados ao refino da malha e a discretização da camada limite, estabeleceu-se a configuração de malha que apresentou o melhor equilíbrio entre a qualidade da resposta e o custo computacional da simulação.

A utilização do modelo de turbulência  $k-\omega$  SST e das funções parede contribuiu para a redução do custo computacional, permitindo, ainda assim, obter um elevado nível de precisão nas análises.

Como parte da verificação da metodologia, o erro de iteração foi avaliado em menos de 1%. Os resíduos, tolerâncias e fatores de relaxação foram determinados visando manter um equilíbrio entre a velocidade de convergência e a acurácia desejada da resposta.

O uso de métodos numéricos de discretização de segunda ordem, associados a uma malha de qualidade (os níveis obtidos de não-ortogonalidade, distorção e razão de aspecto respeitaram os valores estipulados), serviram para a avaliação do erro de discretização através do estudo de convergência de malha realizado com base no método GCI. Essa análise serviu para quantificar a banda de erro da malha utilizada em relação ao valor do  $C_d$  em 2,79%.

Na fase de validação, os valores da resistência viscosa, assim como os valores das suas componentes, foram comparados com os dados da Série 60. Os resultados mostraram diferenças inferiores a 3% para todo o intervalo analisado.

Por fim, foi realizada uma comparação com os dados obtidos por Hille (2017), evidenciando o potencial de ambas as ferramentas para a modelagem do escoamento ao redor do casco de uma embarcação que se desloca a uma velocidade constante.

O uso do SIMSCALE possibilitou a realização de múltiplas simulações simultâneas, além de viabilizar a contribuição técnica e prática dos usuários do fórum para a calibração dos parâmetros utilizados nas análises. Destaca-se que ambas as ferramentas (OpenFOAM e SIMSCALE) obtiveram resultados próximos (diferindo em menos de 0,1%) para o caso de  $Fr$  igual a 0,15, o que colaborou para a utilização do SIMSCALE nas análises dos demais  $Fr$  considerados.

Apesar dos resultados obtidos serem altamente encorajadores, reforça-se o alerta de que o uso de técnicas CFD exigem elevado grau de cuidado quando na execução das etapas discutidas ao longo deste trabalho, principalmente em relação à complexidade do fenômeno analisado, ao tempo em que se deseja obter as respostas e ao grau de precisão desejado.

Considerando as limitações que o procedimento apresentado possui, sugerem-se alguns trabalhos futuros com o intuito de explorar outros aspectos relacionados com o escoamento ao redor de uma embarcação:

- Buscar a generalização da modelagem considerando diferentes tipos de cascos (semi-deslocantes e planantes);
- Parametrizar a modelagem geométrica para permitir a modificação do casco buscando minimizar a resistência ao avanço da embarcação;
- Utilizar algoritmos CFD que envolvam a presença da superfície livre para que seja possível contabilizar a resistência devido a geração de ondas ( $R_w$ );
- Explorar um maior intervalo de velocidades, analisando números de Froude acima de 0,4;
- Acoplar o sistema propulsivo ao modelo CFD, possibilitando análises integradas, permitindo o mapeamento de diversos efeitos ainda pouco documentados no âmbito da Engenharia Naval.

## REFERÊNCIAS

- ABRACOMEX. **ESSENCIAL PARA O COMÉRCIO EXTERIOR, TRANSPORTE MARÍTIMO AVANÇA NO BRASIL**. 2017. Disponível em: <'https://www.abracomex.org/essencial-para-o-comercio-exterior-transporte-maritimo-avanca-no-brasil'>. Acesso em: 27 abr.2019.
- ANSYS, I. **ANSYS Fluent User's Guide**. USA: SAS IP, Inc, 2013.
- ARAUJO, M. F. B. P. de. **Estimativa do fator de forma e da resistência ao avanço de embarcações através da dinâmica dos fluidos computacional**. São Paulo: [s.n.], 2014.
- ATTC. **7th American Towing Tank Conference**. Newport News, VA: Specialist Committee on CFD in Marine Hydrodynamics of the 8th ITTC, 1947.
- BERTRAM, V. **Practical Ships Hydrodynamics**. 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012.
- BOUSSINESQ, J. **Essai sur la théorie des eaux courantes**. 2. ed. [S.l.]: Imprimerie nationale, 1877.
- BREDBERG, J. **On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models**. Goteborg, Sweden: Elsevier, 2000.
- CARLTON, J. **Marine propellers and propulsion**. 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2007.
- CHAKRABARTI, S. K. **Offshore Structure Modeling**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1994.
- DAVIDSON, P. A. **TURBULENCE: An Introduction for Scientists and Engineers**. 2. ed. University of Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2015.
- DYNAMICS, W. **Introductory OpenFOAM® Course From 8th to 12th July, 2019**. University of Genoa, DICCA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2019.
- EÇA, L.; HOEKSTRA, M. On the influence of the iterative error in the numerical uncertainty of ship viscous flow calculations. **26th Symposium on Naval Hydrodynamics**, Rome, Italy, 2006.
- FARAH, M. A.; TANCREDI, T. P. Recomendações para a estimativa de resistência ao avanço viscosa de navios usando openfoam. **II CoBICET - Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**, 2021.
- FERZIGER, J.; PERIC, M. **Computational Methods For Fluid Dynamics**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2002.

FLEMMING, D. M.; GOLÇALVES, M. B. **Cálculo A: Funções, limite, derivação e integração**. 6. ed. [S.l.]: Pearson, 2006.

FROUDE, W. **Report to the Lords Commissioners of the Admiralty on experiments for the determination of the frictional resistance of water on a surface, under various conditions, performed at Chelston Cross, under the Authority of their Lordships**. Belfast: [s.n.], 1874.

GOLIAS, M. M. et al. **The berth allocation problem: Optimizing vessel arrival time**. [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2009.

GREENSHIELDS, C. **Enforcing the GPL**. 2017. Disponível em: <<https://openfoam.org/licence/enforcing-gpl/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

J. GREENSHIELDS, C. **OpenFOAM User Guide: Version 7**. [S.l.]: The OpenFOAM Foundation, 2019.

HILLE, F. **INFLUÊNCIA DO BULBO NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM CASCO DA SÉRIE 60**. [S.l.: s.n.], 2017.

HOLTROP, J. A statistical resistance prediction method with a speed dependent form factor. Wageningen, Netherlands, 1988.

HOLTROP, J.; MENNEN, G. An approximate power prediction method. **International Shipbuilding Progress**, Wageningen, Netherlands, v. 29, n. 335, 1982.

HUGHES, G. Friction and form resistance in turbulent flow and a proposed formulation for use in model and ship correlation. **Transactions of the Royal Institution of Naval Architects**, v. 96, p. 314–376, 1954.

IDEALSIMULATIONS. **Turbulence Models In CFD**. 2021. Disponível em: <<https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

INOK, F.; LAVROV, A.; SOARES, C. G. Analysis of the free surface turbulent flow around a forward moving wigley hull with openfoam. **Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources**, London, 2014.

ITTC. **Proceedings of the 8th International Towing Tank Conference, ITTC'57**. Madrid, Spain: Specialist Committee on CFD in Marine Hydrodynamics of the 8th ITTC, 1957.

ITTC. **ITTC – Recommended Procedures and Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications**. [S.l.]: Specialist Committee on CFD in Marine Hydrodynamics of the 27th ITTC, 2014.

JASAK, H. **Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows**. London, England: Department of Mechanical Engineering: Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1996.

KALITZIN, G. et al. Near-wall behavior of rans turbulence models and implications for wall functions. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, Stanford University, Stanford, CA 94305-3030, USA, v. 204, p. 265–291, 2004.

LIU, F. **A Thorough Description Of How Wall Functions Are Implemented In OpenFOAM**. Chalmers university of technology: [s.n.], 2017.

MARIN. **THE INFLUENCE OF  $y^+$  IN WALL FUNCTIONS APPLIED IN SHIP VISCOUS FLOWS, Trim and Resistance**. Wageningen, The Netherlands: [s.n.], 2016.

MCNEEL, R.; ASSOCIATES. **Rhinoceros 5 - User's Guide**. [S.l.: s.n.], 2016.

MENTER, F. R. Zonal two equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. **AIAA**, Elort Institute, Sunnyvale, CA, 1993.

MEYER, J.; STAHLBOCK, R.; VOB, S. Slow steaming in container shipping. **45th Hawaii International Conference on System Sciences**, v. 11, p. 943–945, 2012.

MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. 1. ed. [S.l.]: USA: Cambridge University Press, 2011.

ONLINE, F. C. **Turbulence Properties, Conversions and Boundary Estimations**. 2020. Disponível em: <<https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

POPE, S. B. **Turbulent flows**. Cornell University: Cambridge university press, 2000.

RICHARDSON, L. **The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses In a Masonry Dam**. [S.l.]: Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1910.

ROACHE, P. **Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations**. Albuquerque, New Mexico: Hermosa, 1998.

ROACHE, P. J. **QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**. Albuquerque, New Mexico: Ecodynamics Research Associates, 1997.

ROACHE, P. J. et al. **Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications**. [S.l.]: ASME Journal of Fluids Engineering Editorial Policy, 2008.

ROY, C. J. **GRID CONVERGENCE ERROR ANALYSIS FOR MIXED-ORDER NUMERICAL SCHEMES**. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2001.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary Layer Theory**. 9. ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2017.

SLATER, J. W. **Bibliography of CFD Verification and Validation**. 2021. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/bibliog.html#Roachebook>>. Acesso em: 15 mai. 2021.

TAHARA, Y. et al. Rans simulation of a container ship using a single-phase level-set method with overset grids and the prognosis for extension to a self-propulsion simulator. **Original Article**, 2006.

TODD, F. H. **Series 60 methodical experiments with models of single-screw merchant ships.** [S.l.: s.n.], 1963.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: engenharia de máquinas marítimas.** 1. ed. [S.l.]: ENIDH, 2012.

TU, J.; YEOH, G.-H.; CHAOQUNLIU. **Computational Fluid Dynamics.** 3. ed. Albuquerque, New Mexico: Butterworth Heinemann, 2018.

UMAPITADADEENGENHARIA. **As componentes da resistência ao avanço de um navio.** 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=uJl1WgG6uHk&t=1075s>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method.** 2. ed. [S.l.]: Pearson, 2007.

WELLER, H.; GREENSHIELDS, C.; ROUVRAY, C. de. **The OpenFOAM Foundation.** 2021. Disponível em: <<https://openfoam.org/>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD.** [S.l.]: DCW Industries, 2006.

WIMSHURST, A. **What are Wall Functions and How do they work?** 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fJDYtEGMgzs&t=537s>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

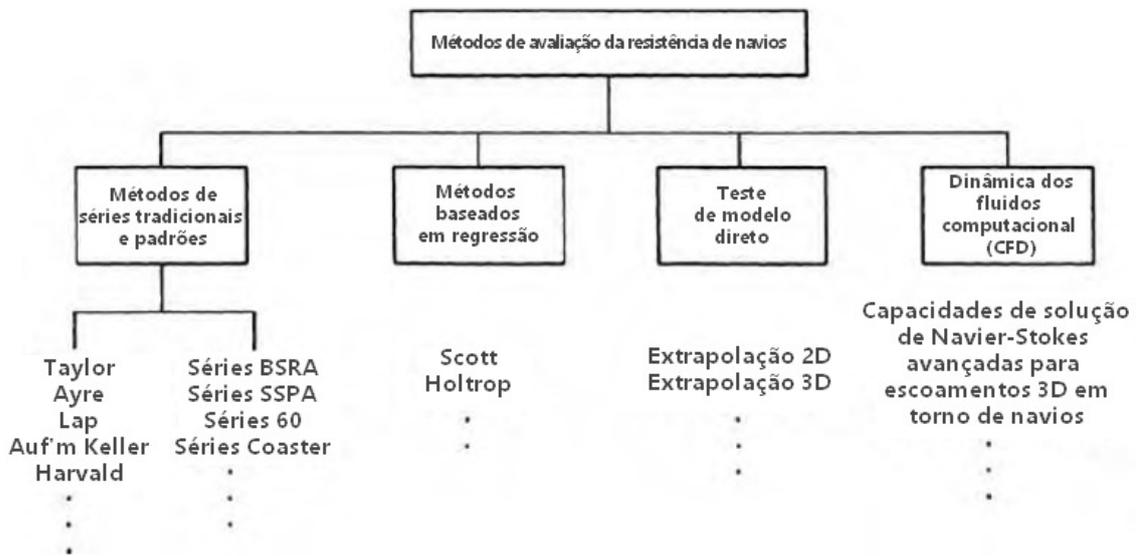
WORTLEY, S. **CFD Analysis of Container Ship Sinkage, Trim and Resistance.** Curtin University, Australia: SAS IP, Inc, 2013.

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos – fundamentos e aplicações.** 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012.

**ANEXO A - TÉCNICAS PARA ESTIMATIVA DA FORÇA DE ARRASTO**

Diversas formas de estimativa da resistência ao avanço foram desenvolvidas ao longo dos anos, as quais são apresentadas na Figura A1.

Figura A1 - Formas de estimar a força de arrasto



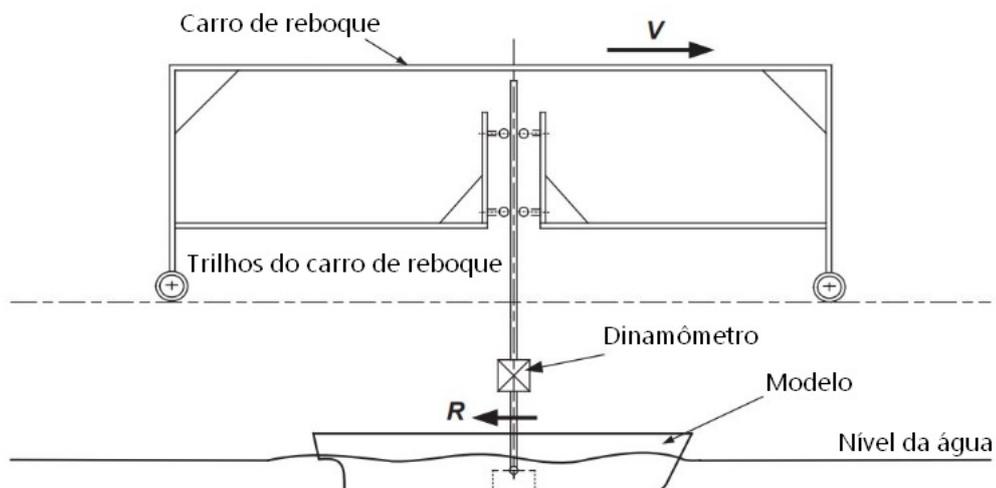
Fonte: Adaptado de Molland, Turnock e Hudson (2011)

Os dois métodos listados mais à esquerda da figura baseiam-se em testes realizados em tanque de provas à partir de embarcações menores, chamadas de modelo, que guardam semelhanças com os navios reais. Nessas abordagens são realizadas variações sistemáticas de parâmetros associados a geometria do casco, os quais variam dependendo da metodologia experimental adotada pelos executadores do teste.

A partir da obtenção dos resultados experimentais, realiza-se uma extrapolação de dados, visando a realização de análises de sistemas que possuem semelhanças geométricas em relação àqueles testados no passado, levando em consideração a classe da embarcação ensaiada.

O ensaio utilizando modelos em escala reduzida requer uma elevada quantidade de tempo, mão de obra especializada, além da necessidade de se ter um tanque de provas que exige um alto custo de construção e manutenção (CHAKRABARTI, 1994). A Figura A2 exemplifica esquematicamente a preparação do modelo para a realização de um teste de reboque.

Figura A2 - Esquematização de um ensaio de reboque



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

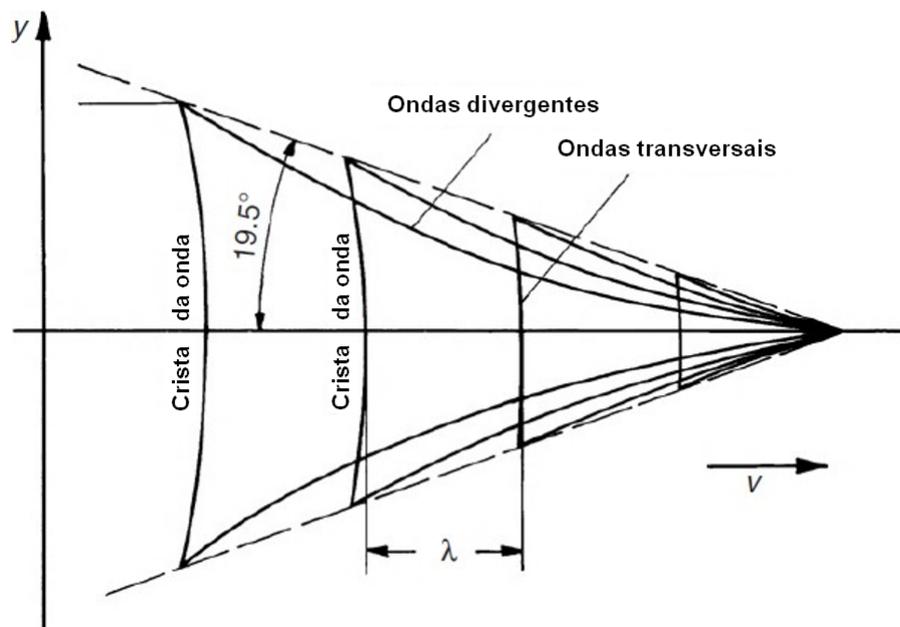
É utilizado um carro de reboque responsável por movimentar o modelo no tanque de prova, sendo possível que o mesmo tenha alguns graus de liberdade ou não. O teste pode ser realizado considerando águas calmas ou com incidência de onda, dependendo do objetivo da análise. Os ensaios são realizados considerando o casco nudo, sem a presença de apêndices como leme, hélices e afins.

## ANEXO B - ASPECTOS DA RESISTÊNCIA DE ONDA

Entre os trabalhos destinados a estimativa da resistência de ondas de uma embarcação, destaca-se o trabalho de Lord Kelvin, que estudou o deslocamento de um ponto de pressão em uma superfície fluídica e chegou a conclusão de que esse deslocamento provoca o surgimento de ondas divergentes e transversais, conforme Figura B1.

Segundo (CARLTON, 2007), as ondas transversais são aquelas que de fato influenciam de forma expressiva na resistência ao avanço de um corpo, pois estão relacionadas com a interferência das energias armazenadas pelos padrões de ondas na parte frontal e traseira do corpo.

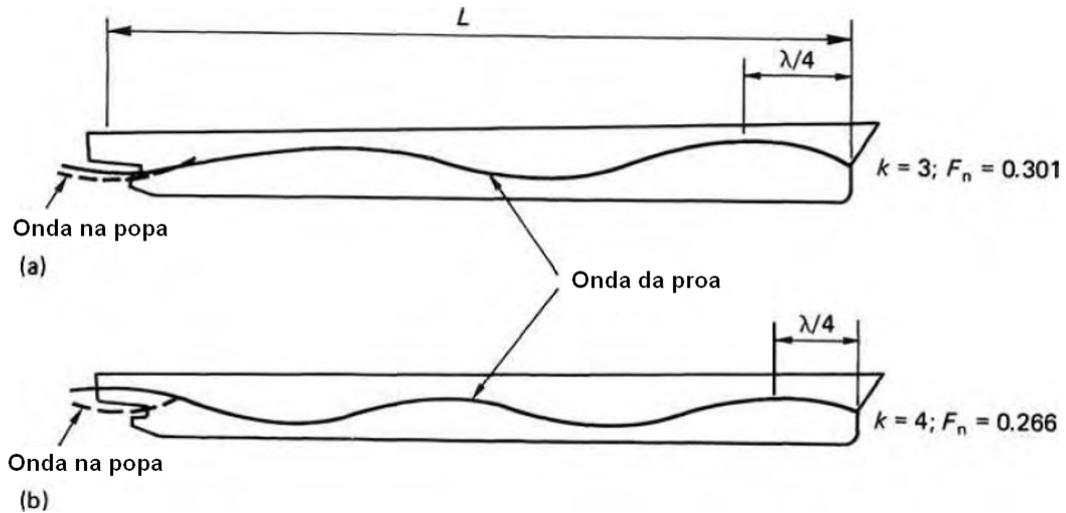
Figura B1 - Comportamento de onda em um ponto de pressão



Fonte: Adaptado de Bertram (2012)

Uma análise mais cuidadosa voltado para o âmbito naval, presente na Figura B2, mostra a importância de se considerar a geração de onda. Onde  $L$  é o comprimento de linha d'água,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $F_n$  é o número de Froude e  $k$  é o número de onda.

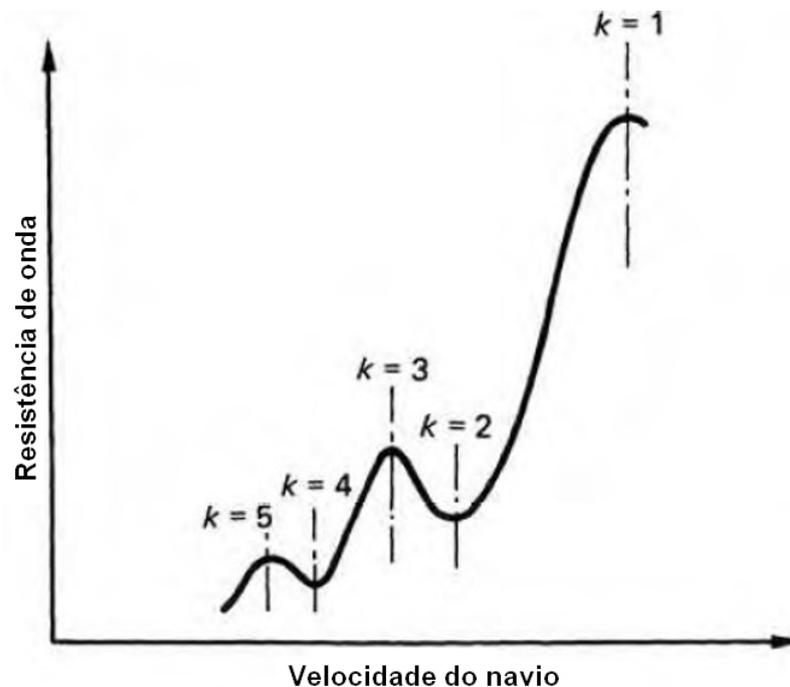
Figura B2 - Interferência destrutiva e construtiva de onda



Fonte: Adaptado de Carlton (2007)

Destaca-se que, quando  $k$  for par, as ondas de proa e de popa apresentam interferência destrutiva, diminuindo a amplitude da onda transversal gerada pelo casco. Já para os casos onde  $k$  for ímpar (figura superior), ocorre uma interferência construtiva, resultando em um aumento na amplitude de onda transversal gerada. Tal comportamento é refletido no valor da resistência, conforme mostrado na Figura B3.

Figura B3 - Influência do número de onda na resistência de onda



Fonte: Adaptado de Carlton (2007)

## ANEXO C - INFORMAÇÕES SOBRE A SÉRIE 60

Figura C1 - Cascos-mãe

Model Number .....	4210W	4211W	4212W	4213W	4214W-B4
$L_{BP}$ , ft.....	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
$B$ , ft.....	53.33	55.17	57.14	59.26	61.54
$H$ , ft.....	21.33	22.09	22.86	23.70	24.59
$\Delta$ , Tons .....	7,807	9,051	10,456	12,048	13,859
$L_E/L_{BP}$ .....	0.5	0.472	0.410	0.350	0.290
$L_X/L_{BP}$ .....	0	0.035	0.119	0.210	0.300
$L_R/L_{BP}$ .....	0.5	0.493	0.471	0.440	0.410
$C_B$ .....	0.60	0.650	0.700	0.750	0.800
$C_X$ .....	0.977	0.982	0.986	0.990	0.994
$C_F$ .....	0.614	0.661	0.710	0.758	0.805
$C_{PF}$ .....	0.581	0.651	0.721	0.792	0.861
$C_{PA}$ .....	0.646	0.672	0.698	0.724	0.750
$C_{PB}$ .....	0.581	0.630	0.660	0.704	0.761
$C_{PR}$ .....	0.646	0.667	0.680	0.686	0.695
$C_{PV}$ .....	0.850	0.871	0.891	0.907	0.920
$C_{PVF}$ .....	0.910	0.927	0.944	0.961	0.971
$C_{PVA}$ .....	0.802	0.823	0.842	0.856	0.867
$C_W$ .....	0.706	0.746	0.785	0.827	0.871
$C_{WF}$ .....	0.624	0.690	0.753	0.817	0.881
$\epsilon_{WA}$ .....	0.788	0.802	0.818	0.838	0.860
$C_{IT}$ .....	0.543	0.597	0.653	0.711	0.776
$\frac{1}{2}\alpha_E$ , deg .....	7.0	9.1	14.5	22.5	43.0
LWL.....	406.7	406.7	406.7	406.7	406.7
LCB % LBP from $\nabla$ .....	1.5A	0.5A	0.5F	1.5F	2.5F
$L/B$ .....	7.50	7.25	7.00	6.75	6.50
$B/H$ .....	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
$L/\nabla^{1/3}$ .....	6.165	5.869	5.593	5.335	5.092
$S/\nabla^{1/3}$ .....	6.481	6.332	6.200	6.091	6.028
W.S., sq ft.....	27,280	29,410	31,705	34,232	37,200
$K_R = R/\sqrt{BH}$ .....	0.229	0.205	0.181	0.153	0.118

Fonte: Todd (1963)

Figura C2 - Plano de linhas do modelo 4212W

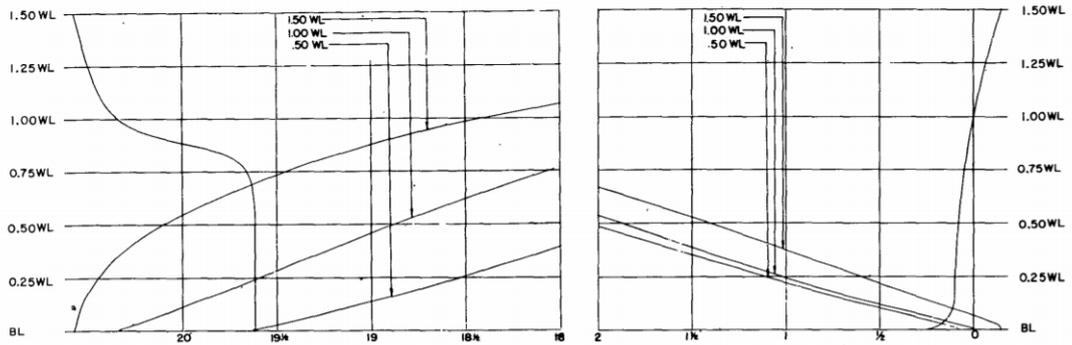
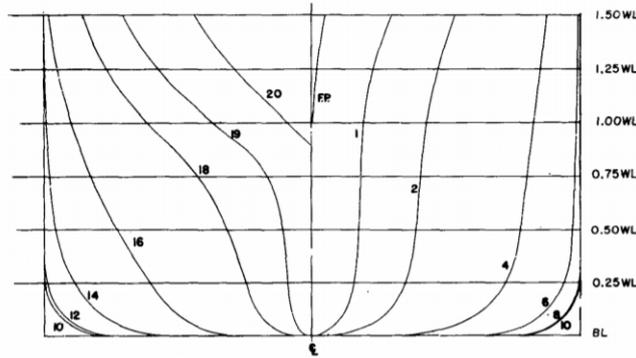


Figure 14a - Stem

Figure 14b - Flow



Fonte: Todd (1963)

Figura C3 - Validade das características da Série 60

$C_B$	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
$\frac{L}{B}$	7.50	7.25	7.00	6.75	6.50
$\frac{E}{H}$	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
$\frac{\Delta}{(L/100)^3}$	122.0	141.4	163.4	188.2	216.5
$L/\nabla^{1/3}$	6.165	5.869	5.593	5.335	5.092
LCB as percent of $L_{BP}$ from $\square BP$	1.5 aft	0.5 aft	0.5 fwd	1.5 fwd	2.5 fwd

Fonte: Todd (1963)

## ANEXO D - COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA TOTAL DO MODELO 4212W

### LCB Series 0.70 Block Coefficient Models

(Ship dimensions—400.0 ft × 57.14 ft × 22.86 ft × 10456 tons. Turbulence stimulated by studs)

Model No. LCB as % $V/\sqrt{L_{WL}}$	$L_{BP}$ from $\bar{Q}$ ⊗	4230 2.05A	4221 0.55A	4212 0.50F	4222 1.54F	4223 2.55F
$C_t \times 10^3$ for 400-ft $L_{BP}$						
0.25	0.629	2.960	2.829	2.894	2.824	2.752
0.30	0.755	2.932	2.786	2.851	2.776	2.713
0.35	0.881	2.915	2.750	2.815	2.738	2.688
0.40	1.006	2.903	2.729	2.794	2.716	2.681
0.45	1.132	2.900	2.738	2.793	2.742	2.695
0.50	1.258	2.904	2.762	2.796	2.754	2.719
0.55	1.384	2.937	2.793	2.803	2.758	2.760
0.60	1.510	2.971	2.811	2.866	2.836	2.826
0.65	1.636	3.001	2.867	2.915	2.908	2.945
0.675	1.698	3.033	2.896	2.923	2.943	3.041
0.70	1.761	3.054	2.931	2.956	3.003	3.151
0.725	1.824	3.083	2.976	3.039	3.092	3.274
0.75	1.887	3.117	3.050	3.155	3.238	3.448
0.775	1.950	3.171	3.148	3.311	3.451	3.706
0.80	2.013	3.235	3.255	3.445	3.650	4.005
0.85	2.139	3.436	3.495	3.711	4.023	4.675
0.90	2.264	4.220	4.457	4.652	5.152	5.650
0.95	2.390	5.882	6.172	6.602	6.965	7.502
1.00	2.516	7.647	8.002	8.662	8.887	9.627
1.05	2.642	8.693	9.180	9.918	10.330	11.143
1.10	2.768	8.884	9.312	10.049	10.554	11.409
1.15	2.894	8.516	9.126	9.596	10.151	11.006
1.20	3.019			9.323		

Fonte: Todd (1963)

## APÊNDICE A - SIMILARIDADE DE REYNOLDS E FROUDE

As Equações (.1) e (.2) mostram a igualdade de  $Re$ , na qual percebe-se que a velocidade do carro de reboque é proporcional ao fator de escala  $\lambda$  em relação ao avanço do navio.

$$Re_m = Re_s \quad (.1)$$

$$V_m = V_s \frac{L_s}{L_m} = V_s \lambda \quad (.2)$$

Uma vez que o valor de  $\lambda$  normalmente utilizado está entre 15 e 45, conforme (BERTRAM, 2012), através da relação acima, a velocidade com que o modelo supostamente deveria assumir seria no mínimo 15 vezes maior do que a da embarcação real, o que torna inviável sua aplicação em testes de reboque.

Já as Equações (.3) e (.4) representam a igualdade de Froude, que relaciona as velocidades entre o modelo e o navio como a raiz do inverso de  $\lambda$ , resultando em velocidades aceitáveis para realização de ensaios em tanque de prova. Por este motivo, a similaridade de Froude é aplicada na determinação de velocidade do modelo a partir dos dados de uma embarcação real.

$$Fr_m = Fr_s \quad (.3)$$

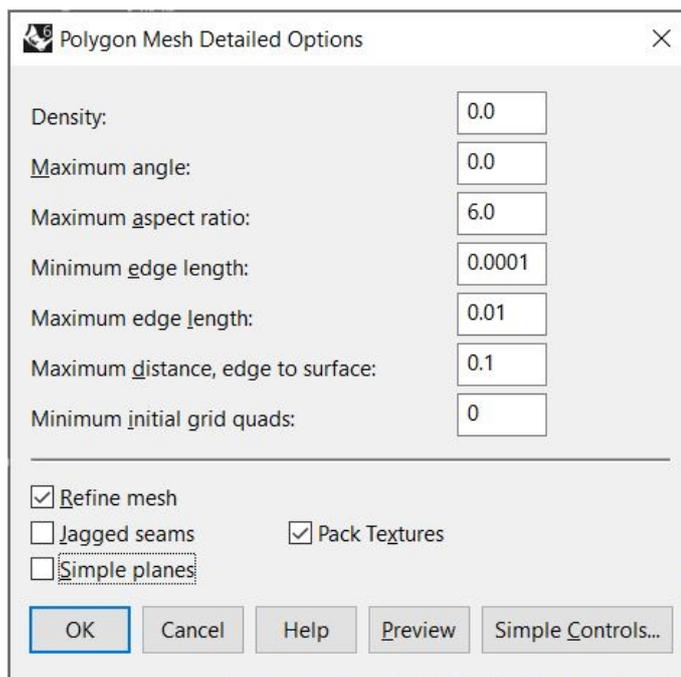
$$V_m = V_s \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = V_s \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (.4)$$

Por exemplo, caso fosse necessário realizar a extrapolação da resistência ao avanço para um casco de 250 metros de comprimento à partir de um modelo de 1 metro, a velocidade do carro de reboque, considerando que o navio navega a 25 nós, deveria ser:

- Para Froude: 1.6 nós.
- Para Reynolds : 6250 nós.

## APÊNDICE B - PARÂMETROS DE REFINO DA MALHA .STL NO RHINOCEROS

Figura B1 - Parâmetros de refino da malha .stl



Fonte: O autor (2021)

## APÊNDICE C - ARQUIVOS DO OPENFOAM V2.3.1 PARA O CASO FR = 0,15

Apêndice que contém os diretórios utilizados no desenvolvimento da simulação com  $Fr = 0,15$  no OpenFOAM v2.3.1.

Os diretórios *blockMeshDict*, *snappyHexMeshDict* e *meshQualityDict* podem ser utilizados caso o usuário deseje criar a malha dentro do ambiente do OpenFOAM. Para a realização deste trabalho foi utilizada a malha exportada do SIMSCALE, com os mesmos parâmetros de geração contidos nos arquivos mencionados, presente na pasta *polyMesh* apresentada neste apêndice.

Vale reforçar que os resultados não serão explicitamente idênticos devido a diferença entre as malhas, na etapa de inserção das camadas próximas ao casco. Esta análise comparativa de resultados não foi realizada nesta monografia e, portanto, cuidados devem ser tomados quando na execução da simulação e interpretação dos resultados.

### Comandos para rodar as simulações no OpenFOAM

```

1
2 //Geração da malha pelo OpenFOAM
3 blockMesh
4
5 surfaceFeatures
6
7 decomposePar
8
9 //"4" representa o número de núcleos do processador
10
11 mpirun -np 4 snappyHexMesh -overwrite -parallel
12
13 mpirun -np 4 renumberMesh -overwrite -parallel
14
15 reconstrucPar
16
17 checkMesh
18
19 //ALTERNATIVA: Caso a malha seja exportada do SIMSCALE

```

```
20 //Colocar a pasta "polyMesh" dentro da pasta "constant"
21 //checkMesh
22
23 //Setando os diretórios das condições de contorno e iniciais
24 rm -rf 0
25
26 cp -r 0_org/0
27
28 //ALTERNATIVA: Rodar em série
29
30 //renumbermesh -overwrite
31
32 //potentialFoam -initialiseUBCs | tee log.potentialFoam
33
34 //simpleFoam | tee log.simpleFoam
35
36 //Rodar em paralelo
37 decomposePar
38
39 mpirun -np 4 renumberMesh -overwrite -parallel
40
41 mpirun -np 4 potentialFoam -initialiseUBCs -parallel | tee log.
    potentialFoam
42
43 mpirun -np 4 simpleFoam -parallel | tee log.simpleFoam
44
45 reconstructPar
46
47 //Para o pós-processamento
48 foamToVTK
49
50 paraview
51
52 //Dentro do paraview
53 //Clicar em "Open", entrar na pasta VTK dentro da simulação e abrir
    o arquivo "*.vtk".
54 //Clicar em "Apply" e será possível realizar a visualização dos
    resultados.
55
56 //ALTERNATIVA para o pós-processamento
57 //paraFoam
```

## decomposeParDict

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       decomposeParDict;
7 }
8
9 numberOfSubdomains 4;
10
11 method           scotch;
```

## blockMeshDict

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       blockMeshDict;
7 }
8
9 convertToMeters 1; // Colocando as dimensões em metros.
10
11 xmin -4.5;
12 xmax 18;
13 ymin -4.5;
14 ymax 0;
15 zmin -4.5;
16 zmax 0;
17
18 // Definição dos tamanhos dos volumes de controle em cada direção.
19 deltax 0,2813;
20 deltay 0,3000;
21 deltaz 0,2813;
22
23 lx #calc "($xmax) - ($xmin)";
24 ly #calc "($ymax) - ($ymin)";
```

```

25 lz #calc "($zmax) - ($zmin)";
26
27 xcells #calc "round($lx/$deltax)";
28 ycells #calc "round($ly/$deltay)";
29 zcells #calc "round($lz/$deltaz)";
30
31 vertices // Declaração dos vértices do bloco que resultará no domí
        nio computacional.
32 (
33     ($xmin $ymin $zmin)
34     ($xmax $ymin $zmin)
35     ($xmax $ymax $zmin)
36     ($xmin $ymax $zmin)
37     ($xmin $ymin $zmax)
38     ($xmax $ymin $zmax)
39     ($xmax $ymax $zmax)
40     ($xmin $ymax $zmax)
41 );
42
43 blocks // Declaração do bloco formado pelos vértices definidos
        acima.
44 (
45     hex (0 1 2 3 4 5 6 7) ($xcells $ycells $zcells) simpleGrading
        (1 1 1)
46 );
47
48 edges // Declaração do tipo de aresta, podendo ser arco, spline ou
        retas. Como o padrão é reta, não há necessidade de explicitar.
49 (
50 );
51
52 boundary // Declaração das faces do domínio computacional que
        servirão para declaração das condições de contorno presentes na
        pasta "0".
53 (
54     plano_diametral
55     {
56         type symmetry;
57         faces
58         (
59             (3 7 6 2)

```

```
60     );
61 }
62 entrada
63 {
64     type patch;
65     faces
66     (
67         (0 4 7 3)
68     );
69 }
70 saida
71 {
72     type patch;
73     faces
74     (
75         (2 6 5 1)
76     );
77 }
78 lateral_tanque
79 {
80     type symmetry;
81     faces
82     (
83         (0 1 5 4)
84     );
85 }
86 plano_de_linha_dagua
87 {
88     type symmetry;
89     faces
90     (
91         (4 5 6 7)
92     );
93 }
94 fundo_tanque
95 {
96     type symmetry;
97     faces
98     (
99         (0 3 2 1)
100    );
```

```
101     }
102 );
103
104 mergePatchPairs
105 (
106 );
```

## surfaceFeaturesDict

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       surfaceFeaturesDict;
7 }
8
9 surfaces ("serie60.stl");
10
11 includedAngle  150;
12
13 subsetFeatures
14 {
15     nonManifoldEdges    yes;
16
17     openEdges           yes;
18 }
19
20 writeObj        yes;
21 }
```

## meshQualityDict

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       meshQualityDict;
```

```
7 }
8
9 maxNnOrtho 70;
10
11 maxBoundarySkewness 20;
12
13 maxInternalSkewness 4;
14
15 maxConcave 80;
16
17 minVol 1e-13;
18
19 minTetQuality -1e30;
20
21 minArea -1;
22
23 minTwist 0.02;
24
25 minDeterminant 0.001;
26
27 minFaceWeight 0.02;
28
29 minVolRatio 0.01;
30
31 minTriangleTwist -1;
32
33 minVolCollapseRatio 0.5;
34
35 errorReduction;
36
37 nSmoothScale 4;
38
39 errorReduction 0.75;
```

### **snappyHexMeshDict**

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
```

```

5     class      dictionary;
6     object     snappyHexMeshDict;
7 }
8
9 castellatedMesh true;
10 snap          true;
11 addLayers     true;
12
13 geometry
14 {
15     serie60.stl // Superfície do casco
16     {
17         type triSurfaceMesh;
18         name serie60;
19     }
20
21     wake // Esteira
22     {
23         type searchableBox;
24         min (4.55 -0.35 -0.3);
25         max (18 0 0);
26     }
27
28
29 };
30
31 // Etapa de refino da malha base
32
33 castellatedMeshControls
34 {
35
36     maxLocalCells 2000000;
37
38     maxGlobalCells 10000000;
39
40     minRefinementCells 1;
41
42     maxLoadUnbalance 0.1;
43
44     nCellsBetweenLevels 2;
45

```

```
46 // Refino de aresta
47
48     features
49     (
50         {
51             file "serie60.eMesh";
52             level 6;
53         }
54     );
55
56 // Refino de superfícies
57
58     refinementSurfaces
59     {
60         serie60
61         {
62             level (5 5);
63         }
64     }
65
66     resolveFeatureAngle 30;
67
68
69 // Refino por região
70
71     refinementRegions
72     {
73
74         wake
75         {
76             mode inside;
77             levels ((1E15 3));
78         }
79
80         serie60
81         {
82             mode distance;
83             levels ((0.05 6));
84         }
85     }
86
```

```
87     locationInMesh (-4.445 -4.445 -4.445);
88
89     allowFreeStandingZoneFaces true;
90 }
91
92 // Etapa de conformação da malha à geometria do casco
93 snapControls
94 {
95     nSmoothPatch 5;
96
97     tolerance 2;
98
99     nSolveIter 200;
100
101     nRelaxIter 8;
102
103     nFeatureSnapIter 10;
104
105     implicitFeatureSnap false;
106
107     explicitFeatureSnap true;
108
109     multiRegionFeatureSnap false;
110 }
111
112 // Etapa de adição de camadas adjacentes à superfície
113
114 addLayersControls
115 {
116     relativeSizes false;
117
118     expansionRatio 1.1;
119
120     firstLayerThickness 0.0026;
121
122     minThickness 0.000001;
123
124     layers
125     {
126         serie60 // Superfície junto a qual as camadas serão
                  adicionadas (defina em "geometry")
```

```
127
128     {
129         nSurfaceLayers 5;
130     }
131
132 }
133
134 featureAngle 270;
135
136 maxFaceThicknessRatio 0.5;
137
138 nSmoothSurfaceNormals 2;
139
140 nSmoothThickness 10;
141
142 minMedianAxisAngle 90;
143
144 maxThicknessToMedialRatio 0.3;
145
146 nSmoothNormals 2;
147
148     slipFeatureAngle 30;
149     nRelaxIter 8;
150
151 nBufferCellsNoExtrude 0;
152
153 nLayerIter 50;
154
155 nRelaxedIter 20;
156
157 additionalReporting true;
158 }
159
160 meshQualityControls
161 {
162     #include "meshQualityDict"
163
164     relaxed
165     {
166         maxNonOrtho 70;
167     }
```

```
168
169 }
170
171 writeFlags
172 (
173     scalarLevels
174
175     layerSets
176
177     layerFields
178 );
179
180 mergeTolerance 1e-6;
```

### **controlDict**

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       controlDict;
7 }
8
9 application     simpleFoam;
10
11 startFrom       startTime;
12
13 startTime       0;
14
15 stopAt          endTime;
16
17 endTime         1500;
18
19 deltaT          1;
20
21 writeControl    timeStep;
22
23 writeInterval   1500;
24
25 purgeWrite      0;
26
```

```
27 writeFormat      ascii;
28
29 writePrecision   12;
30
31 writeCompression on;
32
33 timeFormat       general;
34
35 timePrecision    12;
36
37 runTimeModifiable yes;
38
39
40 functions
41 {
42   minmaxdomain
43   {
44       type fieldMinMax;
45
46       functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");
47
48       enabled true;
49
50       mode component;
51
52       writeControl timeStep;
53       writeInterval 5;
54
55       log true;
56
57       fields (p U k omega nut);
58   }
59
60
61 forces_object
62 {
63     enabled on;
64     outputControl timeStep;
65     outputInterval 5;
66     log on;
67     type forces;
```

```

68     functionObjectLibs ("libforces.so");
69     patches (serie60);
70     CofR (0.0 0.0 0.0); // Centro de rotação colocado como 0
        pois os momentos não importam para essa análise
71     rhoName rhoInf;
72     rhoInf 1025.0; // Densidade da água salgada em kg/m^3
73     pName p; // Declaração do nome do campo de pressão
74     UName U; // Declaração do nome do campo de velocidade
75 }
76
77
78 forcesCoe_object
79 {
80     enabled on;
81     outputControl timeStep;
82     outputInterval 5;
83     log on;
84     type forceCoeffs;
85     functionObjectLibs ("libforces.so");
86     patches (serie60);
87     CofR (0.0 0.0 0.0);
88     rhoName rhoInf;
89     rhoInf 1025.0;
90     pName p;
91     UName U;
92     liftDir (0.0 0.0 1.0); // Direção das forças de sustentação
        (sendo orientadas na direção z)
93     dragDir (1.0 0.0 0.0); // Direção das forças de arrasto (
        sendo orientadas na direção z)
94     pitchAxis (0.0 1.0 0.0);
95     magUInf 0.99; // Módulo da velocidade na corrente livre (Fr
        = 0,15)
96     lRef 4.5; // Comprimento de referência para realização do c
        álcu lo dos coeficientes (LBP)
97     Aref 2.026; // Área de referência para realização do cá
        lculo dos coeficientes (área molhada considerando metade
        da embarcação apenas)
98 }
99
100 yplusRAS
101 {

```

```
102     type                yPlusRAS;
103     functionObjectLibs  ("libutilityFunctionObjects.so");
104
105     enabled true;
106
107     writeControl outputTime;
108
109     log true;
110 }
111
112 };
```

## fvSolution

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       fvSolution;
7 }
8
9 solvers {
10     U
11     {
12         solver smoothSolver;
13         tolerance 1e-07;
14         relTol 0.01;
15         smoother GaussSeidel;
16     }
17
18     p
19     {
20         solver GAMG;
21         tolerance 1e-06;
22         relTol 0.01;
23         smoother GaussSeidel;
24         nPreSweeps 2;
25         nPostSweeps 1;
26         cacheAgglomeration on;
```

```
27     agglomerator faceAreaPair;
28     nCellsInCoarsestLevel 10;
29     mergeLevels 1;
30 }
31
32 k
33 {
34     solver smoothSolver;
35     tolerance 1e-07;
36     relTol 0.01;
37     smoother GaussSeidel;
38 }
39
40 omega
41 {
42     solver smoothSolver;
43     tolerance 1e-07;
44     relTol 0.01;
45     smoother GaussSeidel;
46 }
47
48 }
49
50 relaxationFactors
51 {
52     fields
53     {
54         p 0.3;
55     }
56
57     equations
58     {
59         U 0.7;
60
61         k 0.5;
62
63         omega 0.5;
64     }
65
66 }
67
```

```

68 SIMPLE {
69     nNonOrthogonalCorrectors 0;
70     pRefCell 0;
71     pRefValue 0.0;
72     residualControl
73     {
74         U 1e-07;
75         "p.*" 1e-06;
76         k 1e-07;
77         omega 1e-07;
78     }
79 }
80
81 potentialFlow {
82     nNonOrthogonalCorrectors 0;
83     pRefCell 0;
84     pRefValue 0.0;
85 }

```

## fvSchemes

```

1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        dictionary;
6     object       fvSchemes;
7 }
8
9 ddtSchemes
10 {
11     default      steadyState;
12 }
13
14 gradSchemes
15 {
16     default      cellLimited Gauss linear 1;
17     grad(p)      cellLimited Gauss linear 1;
18     grad(U)      cellLimited Gauss linear 1;
19 }

```

```

20
21 divSchemes
22 {
23     default Gauss linear;
24     div(phi,U) Gauss linearUpwindV grad(U);
25     div(phi,k) Gauss linearUpwind limitedGrad;
26     div((nuEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
27     div(phi,omega) Gauss linearUpwind limitedGrad;
28 }
29
30 laplacianSchemes
31 {
32     default Gauss linear corrected;
33     laplacian(nuEff,U) Gauss linear corrected;
34     laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
35     laplacian(nu,U) Gauss linear corrected;
36     laplacian(1,p) Gauss linear corrected;
37 }
38
39
40 interpolationSchemes
41 {
42     default linear;
43     interpolate(HbyA) linear;
44     interpolate(U) linear;
45 }
46
47 snGradSchemes
48 {
49     default corrected;
50
51 }
52
53 fluxRequired
54 {
55     default no;
56     p ;
57 }

```

## RASProperties

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format        ascii;
5     class         dictionary;
6     object        RASProperties;
7 }
8
9 simulationType  RAS;
10
11 RAS
12 {
13     RASModel      kOmegaSST;
14
15     turbulence    on;
16
17     printCoeffs   on;
18 }
```

## transportProperties

```
1
2 FoamFile
3 {
4     version      2.0;
5     format        ascii;
6     class         dictionary;
7     object        transportProperties;
8 }
9
10 transportModel  Newtonian;
11
12 nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 9.8e-07;
13
14 rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1025;
```

## U

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format        ascii;
5     class         volVectorField;
6     object        U;
7 }
8
9 Umean 0.99;
10
11 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
12
13 internalField    uniform ($Umean 0 0);
14
15 boundaryField
16 {
17     entrada
18     {
19         type          fixedValue;
20         value          $internalField;
21     }
22
23     saida
24     {
25         type          zeroGradient;
26     }
27
28     fundo_tanque
29     {
30         type          symmetry;
31     }
32
33     plano_diametral
34     {
35         type          symmetry;
36     }
37
38     lateral_tanque
39     {
```

```

40         type          symmetry;
41     }
42
43     plano_de_linha_dagua
44     {
45         type          symmetry;
46     }
47
48     serie60
49     {
50         type          noslip;
51     }
52 }

```

## **p**

```

1 FoamFile
2 {
3     version          2.0;
4     format           ascii;
5     class            volScalarField;
6     location         "0";
7     object           p;
8 }
9
10 dimensions          [0 2 -2 0 0 0 0];
11
12 internalField       uniform 0;
13
14 boundaryField
15 {
16     entrada
17     {
18         type          zeroGradient;
19     }
20
21     saida
22     {
23         type          fixedValue;
24         value         uniform 0;

```

```

25     }
26
27     fundo_tanque
28     {
29         type            symmetry;
30     }
31
32     plano_diametral
33     {
34         type            symmetry;
35     }
36
37     lateral_tanque
38     {
39         type            symmetry;
40     }
41
42     plano_de_linha_dagua
43     {
44         type            symmetry;
45     }
46
47     serie60
48     {
49         type            zeroGradient;
50     }
51 }

```

## **k**

```

1 FoamFile
2 {
3     version            2.0;
4     format             ascii;
5     class              volScalarField;
6     location           "0";
7     object             k;
8 }
9
10 dimensions           [0 2 -2 0 0 0 0];

```

```
11
12 internalField    uniform 0.000147;
13
14 boundaryField
15 {
16     entrada
17     {
18         type        fixedValue;
19         value        $internalField;
20     }
21
22     saida
23     {
24         type        zeroGradient;
25
26     }
27
28     fundo_tanque
29     {
30         type        symmetry;
31     }
32
33     plano_diametral
34     {
35         type        symmetry;
36     }
37
38     lateral_tanque
39     {
40         type        symmetry;
41     }
42
43     plano_de_linha_dagua
44     {
45         type        symmetry;
46     }
47
48     serie60
49     {
50         type        kqRWallFunction;
51         value        $internalField;
```

```
52     }
53 }
```

## **omega**

```
1 FoamFile
2 {
3     version      2.0;
4     format       ascii;
5     class        volScalarField;
6     location     "0";
7     object       omega;
8 }
9
10 dimensions      [0 0 -1 0 0 0 0];
11
12 internalField   uniform 29.315;
13
14 boundaryField
15 {
16     entrada
17     {
18         type          fixedValue;
19         value         $internalField;
20     }
21
22     saida
23     {
24         type          zeroGradient;
25     }
26
27     fundo_tanque
28     {
29         type          symmetry;
30     }
31
32     plano_diametral
33     {
34         type          symmetry;
35     }
```

```

36
37     lateral_tanque
38     {
39         type            symmetry;
40     }
41
42     plano_de_linha_dagua
43     {
44         type            symmetry;
45     }
46
47     serie60
48     {
49         type            omegaWallFunction;
50         value           $internalField;
51     }
52 }

```

## nut

```

1 FoamFile
2 {
3     version            2.0;
4     format             ascii;
5     class              volScalarField;
6     location           "0";
7     object             nut;
8 }
9
10 dimensions           [0 2 -1 0 0 0 0];
11
12 internalField         uniform 5e-07;
13
14 boundaryField
15 {
16     entrada
17     {
18
19         type           calculated;
20         value          $internalField;

```

```
21     }
22
23     saida
24     {
25
26         type          calculated;
27         value         $internalField;
28     }
29
30     fundo_tanque
31     {
32         type          symmetry;
33     }
34
35     plano_diametral
36     {
37         type          symmetry;
38     }
39
40     lateral_tanque
41     {
42         type          symmetry;
43     }
44
45     plano_de_linha_dagua
46     {
47
48         type          symmetry;
49     }
50
51     serie60
52     {
53         type          nutkWallFunction;
54         value         $internalField;
55     }
56 }
```

**APÊNDICE D - NUVEM DE PONTOS MODELO 4212W EM PÉS**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
-11,500	0,000	34,290
-10,000	0,000	28,575
-8,880	0,000	25,718
-6,750	0,000	22,860
-4,141	0,000	21,420
1,401	0,000	20,003
5,339	0,000	18,574
6,849	0,000	17,145
7,570	0,000	14,288
7,667	0,000	11,430
7,667	0,000	5,715
7,667	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	1,715
0,000	0,000	5,715
0,000	0,000	11,430
0,000	0,000	17,145
0,000	3,245	22,860
0,000	8,871	28,575
0,000	12,793	34,290
18,880	0,553	0,000

18,880	1,910	1,715
18,880	2,515	5,715
18,880	3,020	11,430
18,880	4,727	17,145
18,880	10,901	22,860
18,880	16,594	28,575
18,880	20,083	34,290
37,760	2,247	0,000
37,760	5,348	1,715
37,760	6,881	5,715
37,760	8,694	11,430
37,760	11,988	17,145
37,760	17,368	22,860
37,760	21,737	28,575
37,760	24,238	34,290
56,640	5,371	0,000
56,640	9,296	1,715
56,640	11,674	5,715
56,640	14,620	11,430
56,640	18,213	17,145
56,640	21,996	22,860
56,640	24,875	28,575
56,640	26,599	34,290
75,520	7,698	0,000
75,520	12,375	1,715
75,520	17,029	5,715

75,520	19,908	11,430
75,520	22,869	17,145
75,520	25,198	22,860
75,520	26,874	28,575
75,520	27,850	34,290
94,400	9,818	0,000
94,400	16,566	1,715
94,400	21,172	5,715
94,400	23,953	11,430
94,400	25,977	17,145
94,400	27,151	22,860
94,400	27,992	28,575
94,400	28,436	34,290
113,280	14,057	0,000
113,280	20,407	1,715
113,280	24,618	5,715
113,280	26,673	11,430
113,280	27,702	17,145
113,280	28,138	22,860
113,280	28,373	28,575
113,280	28,570	34,290
132,160	17,802	0,000
132,160	23,489	1,715
132,160	27,019	5,715
132,160	28,093	11,430
132,160	28,403	17,145

132,160	28,555	22,860
132,160	28,570	28,575
132,160	28,570	34,290
151,040	20,429	0,000
151,040	25,423	1,715
151,040	28,192	5,715
151,040	28,559	11,430
151,040	28,570	17,145
151,040	28,570	22,860
151,040	28,570	28,575
151,040	28,570	34,290
169,920	21,996	0,000
169,920	26,423	1,715
169,920	28,514	5,715
169,920	28,570	11,430
169,920	28,570	17,145
169,920	28,570	22,860
169,920	28,570	28,575
169,920	28,570	34,290
188,800	22,314	0,000
188,800	26,617	1,715
188,800	28,547	5,715
188,800	28,570	11,430
188,800	28,570	17,145
188,800	28,570	22,860
188,800	28,570	28,575

188,800	28,570	34,290
200,000	22,314	0,000
200,000	26,617	1,715
200,000	28,547	5,715
200,000	28,570	11,430
200,000	28,570	17,145
200,000	28,570	22,860
200,000	28,570	28,575
200,000	28,570	34,290
234,800	22,314	0,000
234,800	26,617	1,715
234,800	28,547	5,715
234,800	28,570	11,430
234,800	28,570	17,145
234,800	28,570	22,860
234,800	28,570	28,575
234,800	28,570	34,290
251,320	21,932	0,000
251,320	26,358	1,715
251,320	28,446	5,715
251,320	28,502	11,430
251,320	28,564	17,145
251,320	28,563	22,860
251,320	28,560	28,575
251,320	28,563	34,290
267,840	19,933	0,000

267,840	24,993	1,715
267,840	27,837	5,715
267,840	28,256	11,430
267,840	28,362	17,145
267,840	28,366	22,860
267,840	28,434	28,575
267,840	28,558	34,290
284,360	17,824	0,000
284,360	23,287	1,715
284,360	26,576	5,715
284,360	27,383	11,430
284,360	27,547	17,145
284,360	27,857	22,860
284,360	27,995	28,575
284,360	28,203	34,290
300,880	14,498	0,000
300,880	20,410	1,715
300,880	24,174	5,715
300,880	25,546	11,430
300,880	26,050	17,145
300,880	26,388	22,860
300,880	26,851	28,575
300,880	27,315	34,290
317,400	11,504	0,000
317,400	17,410	1,715
317,400	21,170	5,715

317,400	22,536	11,430
317,400	23,277	17,145
317,400	23,911	22,860
317,400	24,546	28,575
317,400	25,372	34,290
333,920	7,396	0,000
333,920	13,299	1,715
333,920	17,054	5,715
333,920	18,414	11,430
333,920	19,274	17,145
333,920	20,073	22,860
333,920	21,009	28,575
333,920	22,235	34,290
350,440	4,104	0,000
350,440	8,918	1,715
350,440	12,521	5,715
350,440	13,683	11,430
350,440	14,328	17,145
350,440	15,075	22,860
350,440	16,236	28,575
350,440	17,942	34,290
366,960	1,764	0,000
366,960	5,114	1,715
366,960	8,118	5,715
366,960	8,660	11,430
366,960	9,012	17,145

366,960	9,427	22,860
366,960	10,758	28,575
366,960	12,846	34,290
383,480	0,557	0,000
383,480	2,388	1,715
383,480	3,452	5,715
383,480	3,838	11,430
383,480	3,951	17,145
383,480	4,253	22,860
383,480	5,190	28,575
383,480	7,090	34,290
400,000	0,000	0,000
400,000	0,000	1,715
400,000	0,000	5,715
400,000	0,000	11,430
400,000	0,000	17,145
400,000	0,000	22,860
400,000	0,598	28,575
400,000	1,406	34,290
394,703	0,000	0,000
397,464	0,000	1,594
397,891	0,000	3,188
398,021	0,000	5,715
398,349	0,000	11,430
399,021	0,000	17,145
400,000	0,000	22,860

401,318	0,000	28,575
402,901	0,000	34,290

## APÊNDICE E - COMPARAÇÃO SIMSCALE E OPENFOAM PARA $Fr = 0,15$

Apêndice que contém as simulações realizadas no SIMSCALE e no OpenFOAM considerando os mesmos dados em ambas as plataformas, incluindo malha, condições de contorno, métodos numéricos e parâmetros de pós-processamento para o caso de  $Fr$  igual a 0,15.

Para a comparação dos resultados foram realizados os seguintes passos:

1. Exportação dos arquivos do SIMSCALE após realizada a simulação (o fórum permite o download no formato da versão do OF utilizada).
2. Exclusão dos arquivos que não são necessários no OpenFOAM assim como funções que o SIMSCALE usa para pós-processamento deles principalmente (nenhuma delas tem associação com aspectos de resolução do sistema linear, relacionados ao algoritmo SIMPLE).
3. Transferência da pasta *constant/polyMesh* do SIMSCALE para a pasta *constant* do OpenFOAM (ressaltando que a versão é a 2.3.1). A malha exportada considera todas as etapas do SHM realizadas com a justificativa do uso do SIMSCALE mencionada na Seção 4.1.3.3.
4. Modificação de todas as configurações relacionadas aos demais diretórios do OpenFOAM de tal forma a serem idênticas às utilizadas no ambiente do SIMSCALE.
5. Execução da simulação utilizando o *simpleFoam* com o recurso de paralelismo entre os núcleos do computador através do comando *decomposePar*, o qual exige a existência do diretório *system/decomposeParDict*.
6. Utilização dos dados de saída na pasta *postProcessing* para realização da plotagem das forças e coeficientes advindos do uso do OpenFOAM.

Na Tabela E1 são sintetizados os resultados obtidos em ambos os programas.

Tabela E1 - Comparação entre OpenFOAM e SIMSCALE para  $Fr$  igual a 0,15

Parâmetro	OF 2.3.1	SIMSCALE	Erro [%]
$C_d(10^3)$	3,7388	3,7394	0,02
$R_F$	6,6900	6,6920	0,03
$R_{VP}$	0,9220	0,9220	0,00

Fonte: O autor (2021)

## APÊNDICE F - MÉTODOS EMPÍRICOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE FORMA

Apêndice que contém as equações empíricas resultantes de testes com modelos em escala reduzida para obtenção do fator de forma  $k$ , presentes em (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

### Watanabe

$$k = -0,095 + 25,6 \frac{C_B}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \sqrt{\frac{B}{T}}}$$

### Couser

$$1 + k = 2,76 \left(\frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}}\right)^{-0,4}$$

### Conn e Ferguson

$$k = 18,7 \left(C_B \frac{B}{L}\right)^2$$

### Grigson

$$k = 0,028 + 3,30 \left(\frac{S}{L^2} \sqrt{C_B * \frac{B}{L}}\right)$$

### Wright

$$1 + k = 2,48 C_B^{0,1526} \left(\frac{B}{T}\right)^{0,0533} \left(\frac{B}{L_{BP}}\right)^{0,3856}$$

## Holtrop

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

Sendo  $C_{stern} = 0$  e  $L_r$  conforme equação abaixo.

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

A Tabela F1 sintetiza os valores dos fatores de forma obtidos à partir dos métodos empíricos apresentados.

Tabela F1 - Estimativas empíricas do fator de forma

<b>Método</b>	<b>k</b>
Watanabe	0,136
Conn e Ferguson	0,187
Grigson	0,028
Holtrop e Mannen	0,197
Wright	0,165
Couser	0,386

Fonte: O autor (2021)