



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análises Hidrodinâmica e Geométrica, via CFD, do Escoamento ao Redor de um Veículo Autônomo Submarino

Autor: **João Victor Nunes de Sousa**

Orientador: **Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Campina Grande/PB, agosto de 2019

Análises Hidrodinâmica e Geométrica, via CFD, do Escoamento ao Redor de um Veículo Autônomo Submarino

Autor: **João Victor Nunes de Sousa**

Orientador: **Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Dissertação de Mestrado

Linha de pesquisa: Fenômenos de Transporte e Energia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campina Grande/PB, agosto de 2019

S725a Sousa, João Victor Nunes de.
 Análises hidrodinâmica e geométrica, via CFD, do escoamento ao
 redor de um veículo autônomo submarino / João Victor Nunes de Sousa.
 – Campina Grande, 2019.
 108 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade
 Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.
 "Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
 Referências.

 1. Veículos Autônomos Submarinos (AUVs). 2. Análise
 Hidrodinâmica e Geométrica – (AUVs). 3. Ferramentas CFD.
 4. Coeficiente de Arrasto. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

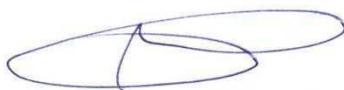
CDU 629.331.5-027.259(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

ANÁLISES HIDRODINÂMICA E GEOMÉTRICA, VIA CFD, DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM
VEÍCULO AUTÔNOMO SUBMARINO.

JOÃO VICTOR NUNES DE SOUSA

Dissertação Aprovada em 16/08/2019 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CPF: 436.676.604-30

(ORIENTADOR)



Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

CPF: 288.490.864-15

(EXAMINADOR INTERNO)



Dr. Francisco José Simões

CPF: 740.518.578-91

(EXAMINADOR EXTERNO)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À minha família, em especial à minha esposa Rayssa e meu filho Antônio, por todo o apoio e dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, por todo conhecimento passado a mim durante a graduação e a pós-graduação.

Ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, ao CNPq, à FINEP e à CAPES, pelo apoio na realização desse trabalho.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado à avaliação dessa dissertação.

Aos autores das referências bibliográficas consultadas, que contribuíram diretamente para a conclusão desse trabalho.

A todos que de alguma forma colaboraram com a elaboração dessa dissertação.

“O Brasil espera que cada um cumpra o seu dever”.

Almirante Barroso, em 11 de junho de 1865, durante a Batalha Naval do Riachuelo

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1 Introdução	20
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1 Classificação dos Veículos Submarinos	23
2.1.1 Submarinos Tripulados	23
2.1.1.1 Militares	23
2.1.1.2 De pesquisa	24
2.1.2 Submarinos Não-Tripulados	24
2.1.2.1 Rebocados	25
2.1.2.2 Operados Remotamente	26
2.1.2.3 Semi-Autônomos	26
2.1.2.4 Autônomos	26
2.2 Projeto de Veículos Submarinos	29
2.3 Características de Projeto dos AUVs	31
2.4 Força de Arrasto Sobre Corpos Imersos e Camada-Limite Hidrodinâmica	32
2.5 A Fluido-Dinâmica Computacional	37
2.5.1 Conceitos Gerais	37
2.5.2 Modelagem Geométrica	40
2.5.3 Malha Computacional	41
2.5.3.1 Malhas Estruturadas	42

2.5.3.2 Malhas Não-Estruturadas	42
2.5.3.3 Malhas Híbridas	43
2.6 Estado da Arte na Pesquisa Envolvendo o Arrasto em AUVs do Tipo Torpedo Utilizando Ferramentas CFD	43
3 Metodologia	47
3.1 Estratégia de Solução	47
3.2 Abordagem do Problema Físico	48
3.2.1 Casco do AUV	49
3.2.2 Superfícies de Controle do AUV	50
3.2.3 Domínio Fluido	51
3.3 Geração das Malhas Computacionais	52
3.4 Modelagem Matemática	58
3.4.1 Equações Governantes	58
3.4.2 Modelagem Próxima à Parede	62
3.4.3 Considerações Adotadas e Condições de Contorno	62
3.5 Propriedades dos Fluidos Utilizados nas Simulações	63
3.6 Processo para Obtenção da Solução Numérica	65
3.7 Comentários Gerais sobre as Simulações	66
4 Resultados e Discussões	71
4.1 AUV sem Superfícies de Controle	71
4.2 AUV com Superfícies de Controle	79
4.3 Análise Comparativo do AUV com e sem Superfícies de Controle	82
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	100
Referências Bibliográficas	104

RESUMO

SOUSA, J.V.N. **Análises Hidrodinâmica e Geométrica, via CFD, do Escoamento ao Redor de um Veículo Autônomo Submarino.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

Os Veículos Autônomos Submarinos, ou AUVs, compõem uma classe avançada de veículos, capazes de realizar missões pré-estabelecidas, sem intervenção humana. Durante os últimos anos a pesquisa e o desenvolvimento de AUVs vêm crescendo, devido às suas excelentes características, que os tornam ideais para a aplicação em setores como o militar, o científico e o industrial. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo proceder análises hidrodinâmica e geométrica do escoamento ao redor de um AUV, mediante uso de ferramentas CFD. Por fim, é apresentada e validada uma modelagem numérica-matemática que prediz o escoamento ao redor de um AUV. São analisadas a influência das superfícies de controle, da velocidade e da profundidade de operação na hidrodinâmica do veículo, são obtidas correlações para o coeficiente de arrasto do AUV em função do número de Reynolds do escoamento e da profundidade de operação do veículo, além de serem avaliados os campos de pressão e velocidade do fluido ao redor do veículo, para diferentes profundidades de operação.

Palavras-chave:

AUV, CFD, coeficiente de arrasto.

ABSTRACT

SOUSA, J.V.N. Hydrodynamic and Geometric Analysis, by CFD, of Flow Around an Autonomous Underwater Vehicle. Master thesis in Mechanical Engineering. Federal University of Campina Grande, 2019.

Autonomous Underwater Vehicles, or AUVs, make up an advanced class of vehicles, capable of accomplishing pre-established missions, without human intervention. During the last years, research and development of AUVs have been growing, due to their excellent characteristics, which make them ideal for application in military, scientific and industrial sectors. Therefore, this work aims to perform hydrodynamic and geometric analysis of the flow around an AUV, using CFD tools. Finally, a numerical-mathematical model that predicts the flow around an AUV is presented and validated. Is analyzed the influence of control surfaces, velocity and operation depth on the vehicle hydrodynamics, correlations are obtained for the AUV drag coefficient as a function Reynolds number of the flow and the operating depth of the vehicle, besides being evaluated the fluid pressure and velocity fields around the AUV, for different operation depths.

Key-words:

AUV, CFD, drag coefficient.

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>	
Figura 2.1	Submarino militar Tupi (S-30) operado pela Marinha do Brasil	24
Figura 2.2	Submarino de pesquisa Triton 3300/3	25
Figura 2.3	Submarino não-tripulado rebocado Osil MiniBAT FC60	25
Figura 2.4	Esquema mostrando os principais componentes utilizados na operação de um ROV	26
Figura 2.5	Submarino não-tripulado semi-autônomo produzido pela empresa Marine Autonomous System Engineering	27
Figura 2.6	AUV Teledyne Marine SeaRaptor	27
Figura 2.7	AUV Hydroid REMUS 600 em operação oceanográfica	28
Figura 2.8	AUV Teledyne Marine Gavia em operação nas proximidades de uma plataforma petrolífera	28
Figura 2.9	AUV Hydroid REMUS 600 em operação junto à Marinha dos Estados Unidos	29
Figura 2.10	AUV General Dynamics Bluefin SandShark	32
Figura 2.11	Modelo de casco de navio sendo testado em tanque de água	34
Figura 2.12	Forças atuantes sobre um corpo imerso em fluido, com velocidade relativa não-nula entre estes	34
Figura 2.13	Evolução qualitativa da camada-limite hidrodinâmica	37
Figura 2.14	Regiões da camada-limite turbulenta	38
Figura 2.15	Representação dos volumes de controle em uma malha utilizada na resolução de um problema de escoamento interno em duto	40
Figura 2.16	Representação dos tipos de malhas computacionais	43
Figura 3.1	Etapas seguidas para a solução do problema abordado via CFD	48
Figura 3.2	Representação dos parâmetros geométricos necessários para alimentação das equações de Myring	49
Figura 3.3	Dimensões do perfil NACA0015 em função da sua corda	51
Figura 3.4	Detalhes geométricos dos lemes do AUV estudado	51
Figura 3.5	Dimensões do domínio fluido analisado	52
Figura 3.6	Malha numérica do AUV com lemes analisado	53
Figura 3.7	Detalhe da malha na região da proa do AUV com lemes analisado, com destaque para a espessura estimada da camada-limite hidrodinâmica	54
Figura 3.8	Detalhe da malha na região A, destacada na Figura 3.7	54
Figura 3.9	Detalhe da malha na região ao redor de um dos lemes do AUV analisado	54
Figura 3.10	Detalhe da malha na região B, destacada na Figura 3.9	55
Figura 3.11	Detalhe da malha na região C, destacada na Figura 3.9	55
Figura 3.12	Detalhe da malha na região da popa do AUV com lemes analisado	55

Figura 3.13	Detalhe da malha na região D, destacada na Figura 3.12	56
Figura 3.14	Detalhe da malha na região ao redor dos lemes do AUV analisado	56
Figura 3.15	Detalhe da malha na região E, destacada na Figura 3.14	56
Figura 3.16	Condições de contorno do domínio	63
Figura 3.17	Perfil típico da temperatura da água do mar em função da profundidade	64
Figura 3.18	Fluxograma representando o processo simplificado de solução utilizado pelo <i>CFX-Solver</i> para o problema do escoamento ao redor do AUV estudado	66
Figura 4.1	Coefficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 1 em função do número de Reynolds volumétrico	72
Figura 4.2	Coefficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 2 em função do número de Reynolds volumétrico	73
Figura 4.3	Coefficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 3 em função do número de Reynolds volumétrico	74
Figura 4.4	Desvios máximos e médios obtidos entre os casos numéricos e experimentais, para as três malhas analisadas	75
Figura 4.5	Curva de convergência do coeficiente de arrasto volumétrico para o caso 19	78
Figura 4.6	Coefficientes de arrasto obtidos numericamente e mediante modelagem simplificada, para a malha 4, em função do número de Reynolds volumétrico	80
Figura 4.7	Curva de convergência do coeficiente de arrasto volumétrico para o caso 40	82
Figura 4.8	Comparação dos coeficientes de arrasto volumétricos obtido para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico	83
Figura 4.9	Comparação dos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico	85
Figura 4.10	Comparação dos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico	86
Figura 4.11	Comparação dos coeficientes de arrasto volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação	88
Figura 4.12	Comparação dos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação	89
Figura 4.13	Comparação dos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação	90
Figura 4.14	Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem lemes, para profundidade de operação de 750 m	91
Figura 4.15	Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	91
Figura 4.16	Detalhe do campo de pressão absoluta ao redor de um dos lemes, obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV, para profundidade de operação de 750 m	92
Figura 4.17	Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	93

Figura 4.18	Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	93
Figura 4.19	Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem lemes, para profundidade de operação de 750 m	94
Figura 4.20	Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	95
Figura 4.21	Detalhe do Campo de velocidade na proa, obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	95
Figura 4.22	Campo de velocidade obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	96
Figura 4.23	Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	97
Figura 4.24	Linhas de corrente obtidas em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	97
Figura 4.25	Linhas de corrente obtidas em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	98
Figura 4.26	Campo vetorial obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m	98

LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
Tabela 2.1	Características de projeto de AUVs comerciais do tipo torpedo 33
Tabela 3.1	Parâmetros geométricos do casco do AUV estudado 50
Tabela 3.2	Detalhes geométricos dos lemes (perfil NACA0015) do AUV estudado 51
Tabela 3.3	Parâmetros geométricos que definem as dimensões do domínio fluido analisado 52
Tabela 3.4	Propriedades da água do mar utilizadas nas simulações 65
Tabela 3.5	Propriedades da água pura utilizadas nas simulações 65
Tabela 3.6	Critérios de parada adotados para as simulações 66
Tabela 3.7	Resumo das simulações analisadas 67
Tabela 4.1	Dados das Malhas Avaliadas 71
Tabela 4.2	Resultados obtidos para a malha 1 72
Tabela 4.3	Resultados obtidos para a malha 2 73
Tabela 4.4	Resultados obtidos para a malha 3 74
Tabela 4.5	Desvios entre os coeficientes de arrasto volumétricos obtidos experimentalmente e numericamente 75
Tabela 4.6	Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 1 77
Tabela 4.7	Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 2 77
Tabela 4.8	Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 3 77
Tabela 4.9	Tempo de simulação para os casos com velocidade de escoamento entre 0,2 e 1,2 m/s 78
Tabela 4.10	Resultados obtidos para a malha 4 79
Tabela 4.11	Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 4 81
Tabela 4.12	Resultados obtidos para o AUV sem superfícies de controle (lemes) 83
Tabela 4.13	Resultados obtidos para o AUV com superfícies de controle (lemes) 83
Tabela 4.14	Coefficientes de arrasto em função da profundidade de operação, obtidos para o AUV sem superfícies de controle (lemes) 87
Tabela 4.15	Coefficientes de arrasto em função da profundidade de operação, obtidos para o AUV com superfícies de controle (lemes) 87

LISTA DE QUADROS

	<i>Página</i>
Quadro 2.1	Etapa Preliminar da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção 30
Quadro 2.2	Etapa Experimental e Prática da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção 30
Quadro 2.3	Etapa de Integração da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção 31

LISTA DE SIGLAS

AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
CAGD	<i>Computer Aided Geometric Definition</i>
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
LCTF	Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

Unidades de medida

a	Parâmetro geométrico do casco do AUV	[m]
A	Parâmetro geométrico do domínio	[m]
A_f	Área frontal	[m ²]
A_s	Área superficial do AUV	[m ²]
\bar{A}	Coefficiente da equação de ajuste	[-]
b	Parâmetro geométrico do casco do AUV	[m]
B	Parâmetro geométrico do domínio	[m]
\bar{B}	Coefficiente da equação de ajuste	[-]
c	Parâmetro geométrico do casco do AUV	[m]
C_d	Coefficiente de arrasto	[-]
C_{dv}	Coefficiente de arrasto volumétrico	[-]
C_{df}	Coefficiente de arrasto de atrito	[-]
C_{dfv}	Coefficiente de arrasto de atrito volumétrico	[-]
C_{dp}	Coefficiente de arrasto de pressão	[-]
C_{dpv}	Coefficiente de arrasto de pressão volumétrico	[-]
C_{k1}	Constante do modelo SST	[-]
C_{k2}	Constante do modelo SST	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo k- ε	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo k- ε	[-]
C_{μ}	Constante do modelo k- ε	[-]
$C_{\omega 1}$	Constante do modelo SST	[-]
$C_{\omega 2}$	Constante do modelo SST	[-]

C_{ω_3}	Constante do modelo SST	[-]
\bar{C}	Coefficiente da equação de ajuste	[-]
D	Diâmetro do casco do AUV	[m]
f	Fator de refinamento da malha	[-]
\vec{F}	Vetor força	[N]
\vec{F}_d	Vetor força de arrasto	[N]
\vec{F}_l	Vetor força de sustentação	[N]
\vec{g}	Vetor aceleração da gravidade	[m.s ⁻²]
\vec{i}	Vetor unitário paralelo à direção do escoamento	[-]
k	Energia cinética turbulenta	[m ² .s ⁻²]
L	Comprimento de referência	[m]
L_t	Comprimento total do AUV	[m]
n	Parâmetro potencial	[-]
P_k	Produção de turbulência	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
p	Pressão	[Pa]
p^*	Profundidade	[m]
p'	Pressão corrigida	[Pa]
Q	Quantidade de volumes de controle da malha	[-]
Q^-	Quantidade de volumes de controle da malha menos refinada	[-]
r_1	Raio da proa	[m]
r_2	Raio da popa	[m]
ra	Razão de aspecto	[-]
r_e	Raio da menor esfera hipotética que circunscreve o elemento	[m]
r_i	Raio da menor esfera hipotética que circunscreve o elemento ideal	[m]
R	Raio do domínio	[m]
R^2	Coefficiente de correlação	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re_v	Número de Reynolds volumétrico	[-]
t	Tempo	[s]
U	Velocidade	[m.s ⁻¹]
\vec{U}	Vetor velocidade	[m.s ⁻¹]

v_e	Volume do elemento	[m ³]
v_i	Volume do elemento ideal	[m ³]
V	Volume	[m ³]
x_1	Posição axial para proa	[m]
x_2	Posição axial para popa	[m]
X	Variável independente da equação de ajuste	[-]
y^+	Distância adimensional	[-]
Y	Variável dependente da equação de ajuste	[-]

Letras Gregas

Unidades de medida

δ	Espessura da camada-limite hidrodinâmica	[m]
Δn	Altura da primeira camada de volumes de controle	[m]
ε	Dissipação de turbulência	[m ² .s ⁻³]
θ	Ângulo plano	[rad]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_{eff}	Viscosidade efetiva	[Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta	[Pa.s]
ρ	Densidade	[kg.m ⁻³]
σ_k	Constante do modelo k- ε	[-]
σ_ε	Constante do modelo k- ε	[-]
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede	[N.m ⁻²]
ω	Frequência turbulenta	[s ⁻¹]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Define-se como Veículo Autônomo Submarino, ou AUV (sigla em inglês para *Autonomous Underwater Vehicle*), um veículo que viaja submerso, sem comunicação física com a terra e sem a necessidade de operador humano. Os AUVs estão inseridos no grupo dos Veículos Submarinos Não-Tripulados, mais conhecidos como UUVs (sigla em inglês para *Unmanned Underwater Vehicles*).

Durante as últimas décadas, vários AUVs têm sido desenvolvidos e pesquisas na área são cada vez mais frequentes, tendo em vista as características extremamente favoráveis que esses veículos possuem, tais como a possibilidade de operar de forma autônoma em ambientes hostis, como áreas inexploradas, águas de território inimigo, áreas contaminadas ou águas profundas. Todas essas características tornam o uso dos AUVs muito interessante para os segmentos militar, científico e industrial.

A aplicação de AUVs vem sendo impulsionada em virtude dos constantes avanços na eletrônica e na robótica, permitindo a execução de missões de alta precisão, a diminuição do custo de fabricação e o aumento do nível de processamento dos computadores embarcados, bem como devido às novas tecnologias de baterias e gerenciamento de energia, possibilitando

o aumento da autonomia, manutenção e segurança na operação desses veículos (DANTAS, 2014).

Visando manter os AUVs como ferramentas de alto desempenho, seus projetos devem passar por constantes evoluções, refletindo necessidades presentes e futuras. Para tanto, se faz necessário o desenvolvimento teórico e tecnológico nas mais diversas áreas de projeto desses veículos, tais como na mecânica, hidrodinâmica, navegação e controle.

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas de engenharia é hoje uma realidade graças ao desenvolvimento de computadores de alta capacidade de processamento. Essas técnicas apresentam inúmeras vantagens, podendo resolver problemas complexos, sem soluções analíticas exatas, e que muitas vezes não podem ser reproduzidos em experimentos, em pouco tempo e com baixo custo quando comparadas às técnicas experimentais.

Atualmente as ferramentas de Fluidodinâmica Computacional, ou CFD (sigla em inglês para *Computational Fluid Dynamics*) são integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de projeto completo, onde os experimentos são feitos apenas para ajustes finais e testes.

Nesse contexto, essa dissertação tem como objetivo geral proceder análises hidrodinâmica e geométrica do escoamento ao redor de um AUV mediante uso de ferramentas CFD. Como objetivos específicos têm-se:

- a) Apresentar e validar uma modelagem numérica-matemática que prediga o escoamento ao redor de um AUV;
- b) Analisar a influência das superfícies de controle do AUV no coeficiente de arrasto do veículo;
- c) Avaliar a influência da velocidade e da profundidade de operação na hidrodinâmica do veículo, com e sem superfícies de controle;

- d) Obter correlações para o coeficiente de arrasto do AUV, com e sem superfícies de controle, em função do número de Reynolds do escoamento e da profundidade de operação do veículo; e
- e) Avaliar os campos de pressão e velocidade do fluido ao redor do AUV, com e sem superfícies de controle, para diferentes profundidades de operação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação dos Veículos Submarinos

Michaelis (2018) define submarino como: “Embarcação especialmente concebida para navegar submersa, surgida inicialmente com objetivos bélicos, usualmente equipada com torpedos, mísseis e periscópio; mais recentemente, tem sido também usada em pesquisas oceanográficas e para outros fins científicos; submersível”.

Jimenez (2004) classifica os veículos submarinos existentes em: Tripulados e não-tripulados.

2.1.1 Submarinos Tripulados

São submarinos onde seus operadores (chamados comumente de “tripulação”) viajam em seu interior, sendo classificados em: Militares e de pesquisa.

2.1.1.1 Militares

Hecht (2007) define submarino militar como um navio de guerra projetado para operações abaixo da superfície, cuja principal vantagem em relação aos demais meios navais é a capacidade de, uma vez mergulhado, adquirir a ocultação, tornando-se apto a assumir a iniciativa das ações. Nessa perspectiva, os seus adversários se tornam extremamente vulneráveis ao seu ataque.

Global Firepower (2018) informa que em 2017 havia mais de quinhentos submarinos militares no mundo, sendo operados por quarenta países (Figura 2.1), denotando sua importância estratégica no cenário geopolítico atual.



Figura 2.1 – Submarino militar Tupi (S-30) operado pela Marinha do Brasil. Fonte: Poder Naval (2018).

2.1.1.2 De Pesquisa

São submarinos projetados, construídos e operados com fins primordialmente científicos e aplicações em diversas áreas de conhecimento, tais como arqueologia e biologia (Figura 2.2). Podem ser equipados com câmeras, dispositivos de coleta de materiais ou de captura de organismos vivos presentes na água, dentre outros equipamentos.

2.1.2 Submarinos Não-Tripulados

Os méritos pelo desenvolvimento dos primeiros veículos submarinos não-tripulados (UUVs) são creditados à empresa austríaca *Luppis-Whitehead Automobile*, que, em 1864,

desenvolveu um veículo submarino programado que tinha a forma de um torpedo (ICOLARI, 2018). Desde então, diversos UUVs foram construídos para as mais diversas finalidades, com uma constante ampliação da gama de aplicações para esses veículos, que são classificados em: Rebocados, operados remotamente, semi-autônomos e autônomos.



Figura 2.2 – Submarino de pesquisa Triton 3300/3. Fonte: Triton (2018).

2.1.2.1 Rebocados

Dentre os submarinos não-tripulados, os veículos rebocados são os mais simples. Esses veículos possuem uma série de sensores capazes de coletar dados que são enviados a uma central. Os veículos rebocados não possuem propulsão própria, sendo deslocados pelo movimento de uma embarcação que se conecta ao submarino por meio de um cabo (Figura 2.3). Esses submarinos normalmente são utilizados apenas em operações de mapeamento.



Figura 2.3 – Submarino não-tripulado rebocado Osil MiniBAT FC60. Fonte: Osil (2018).

2.1.2.2 Operados Remotamente

Os veículos operados remotamente, mais conhecidos como ROVs (sigla em inglês para *Remotely Operated Vehicles*), são controlados a partir de uma estação central. Esses veículos possuem propulsores para deslocamento e sensores capazes de coletar dados diversos. Os ROVs são conectados à estação por meio de um cabo (denominado comumente de “cabo umbilical”) que serve como meio de troca de informações entre a estação central e o veículo (Figura 2.4). Esses veículos são utilizados principalmente em missões de inspeção, observação e manutenção (JIMENEZ, 2004).

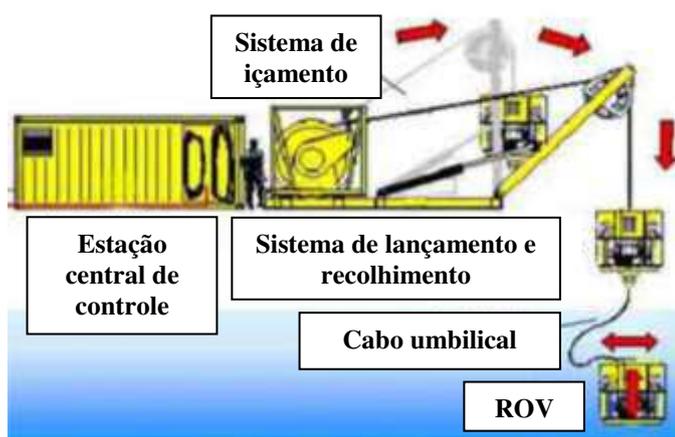


Figura 2.4 – Esquema mostrando os principais componentes utilizados na operação de um ROV. Fonte: Adaptado de Icolari (2018).

2.1.2.3 Semi-Autônomos

Os veículos submarinos semi-autônomos são capazes de realizar missões pré-estabelecidas, porém dependem de operadores externos para execução completa das mesmas. Esses veículos não utilizam cabos e se comunicam com uma central em terra por meio de sinais que são captados pelas antenas desta (Figura 2.5).

2.1.2.4 Autônomos

Os veículos autônomos submarinos (AUVs) são os mais avançados de toda classe de submarinos não-tripulados. Não são limitados por cabos (Figura 2.6) e possuem uma semi-

inteligência criada usando da integração da arquitetura de *hardware* e *software*, que permite até um replanejamento da atividade a ser executada, mediante mudança das variáveis do ambiente. São utilizados em missões complexas, sem necessidade de intervenção humana. A principal desvantagem dos AUVs, perante os demais veículos submarinos não-tripulados, reside em sua autonomia. Os AUVs são restritos à energia armazenada na bateria que os mesmos levam consigo nas missões. É por isso que os engenheiros tentam minimizar ao máximo o consumo dessa energia, por meio, por exemplo, do uso de um casco com geometria que gere baixo arrasto ou da implementação de sistemas de movimentação e controle mais eficientes.



Figura 2.5 – Submarino não-tripulado semi-autônomo produzido pela empresa Marine Autonomous System Engineering. Fonte: AUVAC (2018).



Figura 2.6 – AUV Teledyne Marine SeaRaptor. Fonte: Teledyne Marine (2018).

Os AUVs são amplamente utilizados em aplicações científicas, comerciais e militares (Figuras 2.7 a 2.9). Dentre suas aplicações científicas, pode-se citar (OLIVEIRA, 2018):

- a) Estudos oceanográficos;
- b) Estudos arqueológicos;
- c) Inspeção visual de estruturas;
- d) Intervenções;
- e) Competições; e
- f) Assistência a mergulhadores.



Figura 2.7 – AUV Hydroid REMUS 600 em operação oceanográfica. Fonte: Hydroid (2018).



Figura 2.8 – AUV Teledyne Marine Gavia em operação nas proximidades de uma plataforma petrolífera. Fonte: Teledyne Marine (2018).



Figura 2.9 – AUV Hydroid REMUS 600 em operação junto à Marinha dos Estados Unidos.

Fonte: Hydroid (2018).

2.2 Projeto de Veículos Submarinos

Salgado e Miranda (2002) apresentam uma matriz metodológica para o desenvolvimento de um ROV de inspeção, dividindo o projeto desse veículo em três etapas básicas: Preliminar; experimental e prática; e de integração. Cada etapa pode ainda ser subdividida nas seguintes subetapas: Estrutural; dinâmica; e de automação e controle (Quadros 2.1 a 2.3). Vale ressaltar que não há uma sequência de execução das subetapas, sendo estas realizadas de forma paralela e integrada, dentro de cada etapa. Abordando-as de forma mais detalhada, tem-se:

- a) *Etapa preliminar*: Engloba as definições básicas do projeto, tais como a determinação da forma do casco e a definição da eletrônica básica, e a aquisição de parâmetros preliminares, como o arrasto teórico e a localização do centro de empuxo do veículo;
- b) *Etapa experimental e prática*: Engloba os diversos testes necessários após a finalização da etapa preliminar, como, por exemplo, o teste do sistema de sensores e a aquisição do arrasto real do submarino; e
- c) *Etapa de integração*: Acopla todos os sistemas pré-estabelecidos, testa esses sistemas integrados, analisa os resultados e replaneja ações, visando otimizar o projeto, finalizando assim o mesmo.

Quadro 2.1 – Etapa Preliminar da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção.

Etapa	Preliminar		
Subetapa	Estrutural	Dinâmica	Automação e Controle
1	Projeto do submersível	Mecânica dos fluidos	Eletrônica básica
2	Resistência dos materiais	Definição do número de Reynolds	Sistema de controle automático
3	Dimensionamento de placas e cascas	Classificação fluidodinâmica	Princípio de funcionamento dos sensores
4	Dimensionamento de ligações parafusadas e soldadas	Determinação dos coeficientes de arrasto teóricos	Sistema de potência
5	Determinação do centro de gravidade	Determinação do centro de empuxo	Sistema de tempo real (programação)
6	Dimensionamento do sistema de emersão e submersão	Cinemática	Robótica móvel
7	Dimensionamento da carga de transporte e da sobrecarga	Análise metroológica	Robótica industrial
8	Dimensionamento do sistema de vaso de pressão	Determinação dos propulsores	Sistema de iluminação
9	Dimensionamento dos sistemas de conduites		Sistema de visão

Fonte: Adaptado de Salgado e Miranda (2002).

Quadro 2.2 – Etapa Experimental e Prática da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção.

Etapa	Experimental e Prática		
Subetapa	Estrutural	Dinâmica	Automação e Controle
1	Construção do protótipo	Desenvolvimento de bancada para teste de força de propulsores	Desenvolvimento do sistema preliminar de controle
2	Teste de pressão dos vasos de pressão	Desenvolvimento de bancada para testes hidrodinâmicos	Desenvolvimento da bancada de teste do sistema de propulsores instrumentados
3	Teste de estanqueidade dos vasos de pressão	Teste de arrasto do submersível	Teste do sistema preliminar de controle
4	Teste das mangueiras de interligação dos sistemas		Desenvolvimento do sistema de controle final e testes de funcionamento
5	Teste de força dos propulsores verticais		Teste do sistema de potência
6	Teste de força dos propulsores horizontais		Teste do sistema de iluminação
7	Teste de força dos flutuadores		Teste do sistema de visão
8			Teste do sistema de sensores
9	Teste de desempenho entre os protótipos desenvolvidos		Desenvolvimento do cabo umbilical e testes de comunicação

Fonte: Adaptado de Salgado e Miranda (2002).

Quadro 2.3 – Etapa de Integração da matriz metodológica de projeto para desenvolvimento de um ROV de inspeção.

Etapa	De Integração		
	Estrutural	Dinâmica	Automação e Controle
1	Integração dos sistemas estruturais e de vasos de pressão		Integração do sistema de potência com o preliminar de controle
2	Projeto e construção dos suportes dos propulsores	Acoplamento dos propulsores ao submersível	Conexão dos propulsores com o sistema preliminar de controle
3	Integração das mangueiras aos propulsores e vasos de pressão	Integração dos sistemas embarcados com o cabo umbilical e a base de operações	
4	Integração do sistema de flutuação com o submersível		
5	Integração e testes dos sistemas de iluminação, visão, sensorimento, propulsão, flutuação, estrutural e de controle		
6	Testes laboratoriais dos sistemas integrados		
7	Testes em campo dos sistemas integrados		
8	Análise dos resultados e replanejamento de ações		
9	Integração ou redefinição dos sistemas embarcados		

Fonte: Adaptado de Salgado e Miranda (2002).

Destaca-se que a Mecânica dos Fluidos tem papel de destaque no projeto dos veículos submarinos, sendo fundamental especialmente em sua subetapa dinâmica, onde, por exemplo, são determinados o coeficiente de arrasto e o centro de empuxo do veículo, bem como são definidas as características dos seus propulsores.

2.3 Características de Projeto dos AUVs

A maioria dos AUVs existente utiliza como geometria base para seu casco a forma de um torpedo, ou seja, corpo cilíndrico com alta razão entre o comprimento e o diâmetro, com perfis suaves na proa e na popa, com sua movimentação feita pelo acionamento de superfícies de controle. A escolha para o uso da forma básica de torpedo para os AUVs se deve às boas características desse tipo de geometria de casco (MADHAM et al., 2006), como segue:

- a) Proporciona um baixo arrasto hidrodinâmico ao conjunto;
- b) Fornece um bom volume interno;

- c) Simplifica o acesso a toda a aparelhagem existente no AUV; e
- d) Reduz significativamente o custo de fabricação.

Normalmente os AUVs tipo torpedo apresentam um sistema de propulsão de hélice único, localizado na parte traseira do veículo, e superfícies de estabilização e controle montadas ao longo do casco do mesmo. A Figura 2.10 ilustra detalhes geométricos externos comuns aos AUVs com casco do tipo torpedo.

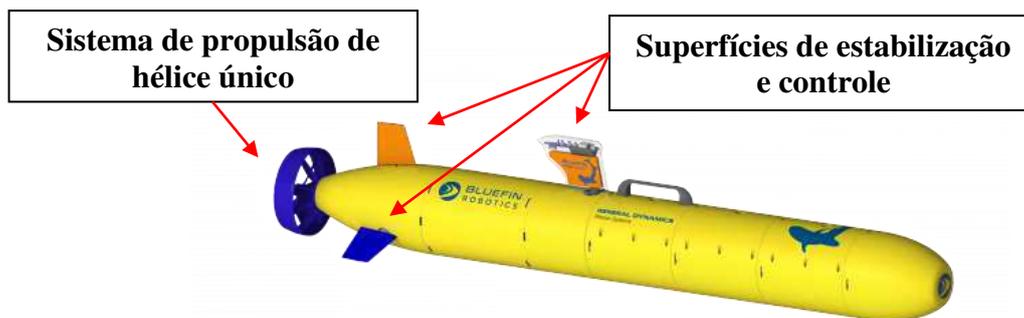


Figura 2.10 – AUV General Dynamics Bluefin SandShark. Fonte: Adaptado de General Dynamics (2018).

Um AUV é equipado e dimensionado de modo a satisfazer a missão a qual se deseja que o veículo realize. O casco deve alojar com segurança todos os equipamentos necessários a execução dessa missão.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais características de projeto (dimensionais e operacionais) de vários AUVs do tipo torpedo construídos por alguns dos principais fabricantes comerciais da atualidade.

2.4 Força de Arrasto Sobre Corpos Imersos e Camada-Limite Hidrodinâmica

Sempre que existir uma velocidade relativa entre um corpo sólido e o fluido que o circunda surgirá uma força resultante \vec{F} sobre este corpo (FOX et al., 2011). O módulo, a direção e o sentido dessa força \vec{F} dependerão de diversos fatores, tais como a velocidade relativa entre o sólido e o fluido, a forma e as dimensões do sólido e as propriedades do fluido.

Tabela 2.1 – Características de projeto de AUVs comerciais do tipo torpedo.

Número	Fabricante	Modelo	Comprimento Total (m)	Diâmetro (mm)	Profundidade máxima de operação (m)	Velocidade máxima de operação (m/s)
1	Teledyne Marine	Gavia	1,80-4,50	200	1.000	2,8
2	Teledyne Marine	SeaRaptor	5,50	630	6.000	2,1
3	General Dynamics	Bluefin-21	4,93	530	4.500	2,3
4	General Dynamics	Bluefin SandShark	1,09-2,03	124	200	2,1
5	Hydroid	Remus 100	1,70	190	100	2,6
6	Hydroid	Remus 600	2,70-5,50	324	600	2,1
7	Hydroid	Remus 6000	3,96	710	6.000	2,3
8	Atlas Elektronik	SeaCat	2,50-3,50	325	600	3,1
9	L3 Ocean Server	Iver 3	1,52-2,16	147	100	2,1
10	L3 Ocean Server	Iver 4	2,50	230	300	2,6

Fontes: Teledyne Marine (2018), General Dynamics (2018), Hydroid (2018), Atlas Elektronik (2018) e L3 Ocean Server (2018).

O escoamento do fluido ao redor do corpo gerará sobre este tensões superficiais de dois tipos:

- a) Tensões tangenciais: Devido à ação viscosa; e
- b) Tensões normais: Devido à pressão local.

Atualmente, a dedução analítica das distribuições dessas tensões só é possível para corpos de geometrias simples, mediante simplificações no modelo físico-matemático que rege o problema, o que não representa a maioria dos problemas práticos envolvendo escoamento externo. Visando preencher essa lacuna, métodos experimentais e, mais recentemente, computacionais vêm sendo amplamente utilizados para as mais diversas análises envolvendo este tipo de escoamento (Figura 2.11).

Convenciona-se decompor a força \vec{F} em (Figura 2.12):

- a) Força de arrasto (\vec{F}_d): Componente paralela à direção do movimento relativo; e
- b) Força de sustentação (\vec{F}_l): Componente perpendicular à direção do movimento relativo.



Figura 2.11 – Modelo de casco de navio sendo testado em tanque de água. Fonte: Bluebird Marine Systems (2019).

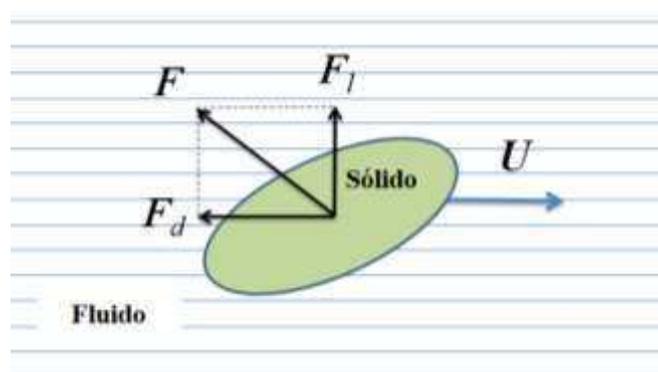


Figura 2.12 – Forças atuantes sobre um corpo imerso em fluido, com velocidade relativa não-nula entre estes.

Para escoamento incompressível, a equação que modela a força de arrasto sobre corpos imersos é da forma:

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_f U^2 \quad (2.1)$$

onde:

- a) C_d é o coeficiente de arrasto, que é função do número de Reynolds do escoamento e de parâmetros geométricos do corpo;

- b) ρ é a densidade do fluido;
- c) A_f é a área frontal do corpo, na direção da corrente de fluido. Destaca-se que para aerofólios e asas utiliza-se, em geral, a área planiforme ao invés da área frontal no cálculo da \vec{F}_d ; e
- d) U é a velocidade relativa entre o corpo sólido e o fluido.

O número de Reynolds, Re , é um parâmetro adimensional que tem grande utilidade na Mecânica dos Fluidos. Representa uma razão entre as forças de inércia e as forças viscosas atuantes no escoamento. O número de Reynolds pode ser definido da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.2)$$

onde:

- a) L é um comprimento de referência; e
- b) μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Uma forma alternativa para representação do número de Reynolds é:

$$Re_v = \frac{\rho UV^{1/3}}{\mu} \quad (2.3)$$

onde:

- a) Re_v é o número de Reynolds volumétrico; e
- b) V é o volume de um corpo sólido submetido ao escoamento externo.

Uma forma alternativa para representação da força de arrasto é:

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_{dv} \rho V^{2/3} U^2 \quad (2.4)$$

onde C_{dv} é o coeficiente de arrasto volumétrico.

Para escoamentos que não geram força de sustentação, o coeficiente de arrasto comumente é dividido em duas componentes, como segue:

$$C_d = C_{dp} + C_{df} \quad (2.5)$$

onde:

- a) C_{dp} é o coeficiente de arrasto de pressão, que contabiliza o arrasto gerado pela distribuição da pressão local; e
- b) C_{df} é o coeficiente de arrasto de atrito, que contabiliza o arrasto gerado devido às tensões viscosas superficiais.

ou, alternativamente:

$$C_{dv} = C_{dpv} + C_{dfv} \quad (2.6)$$

onde:

- a) C_{dpv} é o coeficiente de arrasto de pressão volumétrico; e
- b) C_{dfv} é o coeficiente de arrasto de atrito volumétrico.

Normalmente, quando se investiga o arrasto sobre corpos imersos, faz-se a análise do coeficiente de arrasto, pois o mesmo é mais abrangente do que a própria força de arrasto.

A literatura traz coeficientes de arrasto para vários corpos simples comumente usados em aplicações de engenharia (FOX et al., 2011; HOERNER, 1965; RAWSON e TUPPER, 2001), porém nos casos onde a geometria do corpo é mais complexa, se faz necessário a aquisição desse parâmetro via experimental ou numérica.

Para uma placa plana paralela à direção de escoamento, o arrasto total sobre a mesma é igual ao arrasto de atrito. Considerando uma camada-limite totalmente turbulenta, o coeficiente de arrasto da placa pode ser calculado pela seguinte equação empírica:

$$C_d = C_{df} = \frac{0,0742}{Re^{1/5}} \quad (2.7)$$

válida para $5 \times 10^5 < Re < 10^7$.

A camada-limite hidrodinâmica pode ser definida como a região do escoamento adjacente a uma superfície sólida na qual tensões viscosas estão presentes (FOX et al., 2011). É uma região de grande importância quando se estuda escoamentos externos e pode ser dividida qualitativamente em: Laminar, transicional e turbulenta (Figura 2.13):

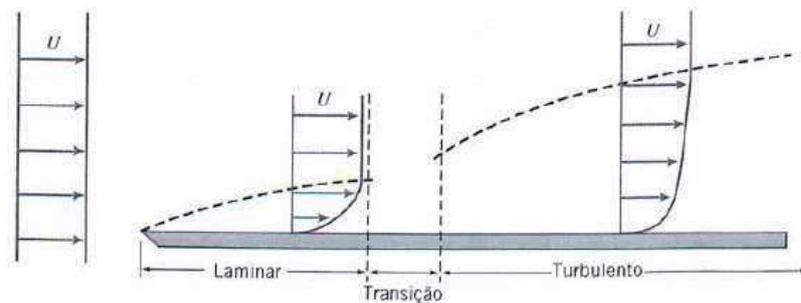


Figura 2.13 – Evolução qualitativa da camada-limite hidrodinâmica. Fonte: Fox et al. (2011).

A camada-limite turbulenta pode ser dividida ainda nas seguintes regiões (Figura 2.14):

- a) Subcamada viscosa: Região mais próxima à parede, onde os efeitos viscosos são muito importantes e o escoamento se comporta como sendo praticamente laminar;
- b) Região totalmente turbulenta: Região mais distante da parede, onde as forças de inércia são predominantes, com grande produção de energia cinética turbulenta, devido aos grandes gradientes de pressão e velocidade; e
- c) Camada de amortecimento: Região intermediária entre as duas supracitadas, onde há igual importância dos efeitos viscosos e inerciais.

2.5 A Fluidodinâmica Computacional

2.5.1 Conceitos Gerais

A solução numérica de problemas de escoamento desempenha um papel cada vez mais importante nos segmentos industrial e científico. O uso de técnicas numéricas para a solução de complexos problemas de engenharia e de física é hoje uma realidade graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento. Por esse motivo, o desenvolvimento de algoritmos para solucionar os mais diversos problemas de engenharia vem recebendo grande atenção dos analistas numéricos.

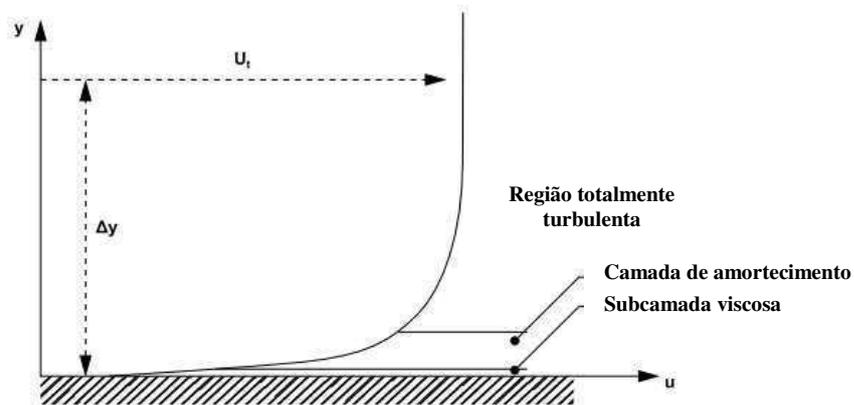


Figura 2.14 – Regiões da camada-limite turbulenta. Fonte: Adaptado de Ansys (2014).

O analista interessado em resolver um determinado problema tem à sua disposição três ferramentas (BORTOLI, 2000):

- a) Métodos analíticos: Têm a desvantagem de serem aplicados normalmente a problemas cujas hipóteses simplificadoras os desviam demais do fenômeno físico real e, comumente, só podem ser aplicados a geometrias simples. Porém as soluções analíticas são de extrema importância, pois, dentre outros, validam casos-limites de modelos numéricos. Vale ressaltar que se um método analítico for suficiente para resolver um problema de interesse, dentro dos níveis de precisão e exigência necessários, ele deve ser preferido, pois uma regra básica na engenharia é o uso da ferramenta adequada ao tamanho do problema que se deve resolver (MALISKA, 2004);
- b) Métodos experimentais: A grande vantagem da experimentação é o fato de se tratar com a configuração real, podendo-se verificar novos fenômenos. Entretanto, o seu custo é normalmente elevado e às vezes é de impossível execução, como, por

exemplo, na reentrada de veículos na atmosfera ou no comportamento dos fluidos em reservatórios de petróleo; e

- c) Métodos numéricos: Praticamente não apresentam limitações, podendo resolver problemas com condições de contorno complexas. O tempo e o custo do projeto de um novo equipamento podem ser sensivelmente reduzidos com o uso dessas ferramentas. Atualmente, as ferramentas de Fluidodinâmica Computacional, ou CFD, que é o ramo da ciência que estuda numericamente problemas envolvendo a Mecânica dos Fluidos e a Transferência de Calor e Massa, são integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho interativo, em que se chega praticamente ao projeto final de equipamentos através de computadores, deixando-se para o laboratório as experiências finais de ajustes e testes. Vale ressaltar que uma metodologia numérica que não foi criteriosamente testada com soluções analíticas já existentes, ou via experimentação em laboratório, não possui validade.

No tocante aos erros existentes em soluções numéricas, podem-se distinguir dois tipos básicos:

- a) Erros numéricos propriamente ditos: Resultados da má solução das equações diferenciais. Para detectá-los, deve-se comparar os resultados com outras soluções analíticas e numéricas, verificando se a equação diferencial foi corretamente resolvida. Esse processo denomina-se “validação numérica”, e atesta a qualidade do método numérico; e
- b) Erros resultantes do uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno: Resultados do uso de um modelo matemático inconsistente com o problema abordado. A validação física, portanto, preocupa-se com a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico (MALISKA, 2004).

Inicialmente, resolviam-se os problemas de escoamento empregando o *método de diferenças finitas*, enquanto o *método de elementos finitos* era empregado na solução de problemas da Mecânica dos Sólidos.

Os métodos dos volumes finitos e dos volumes de controle surgiram com a finalidade de sanar limitações do método de elementos finitos. Pode-se dizer que o método dos volumes finitos é oriundo do de diferenças finitas e o método dos volumes de controle provém da combinação dos métodos de volumes finitos e elementos finitos. Todos esses métodos utilizados para resolver problemas de escoamentos visam objetivos comuns:

- a) Solucionar escoamentos sobre geometrias complexas;
- b) Conservar as propriedades do fluido localmente; e
- c) Economizar tempo computacional.

2.5.2 Modelagem Geométrica

Atualmente existem diversos pacotes de CFD em uso por empresas privadas e centros de pesquisa. O método dos volumes finitos é utilizado por vários desses programas para discretizar o domínio de estudo em pequenos volumes de controle, criando uma malha (Figura 2.15). As equações diferenciais parciais gerais de conservação de massa, momento linear, energia, etc, são transformadas em equações algébricas e resolvidas numericamente para cada volume de controle, dando como resposta “campos de propriedades” (pressão, temperatura, fração volumétrica, etc), que são a solução do problema físico.

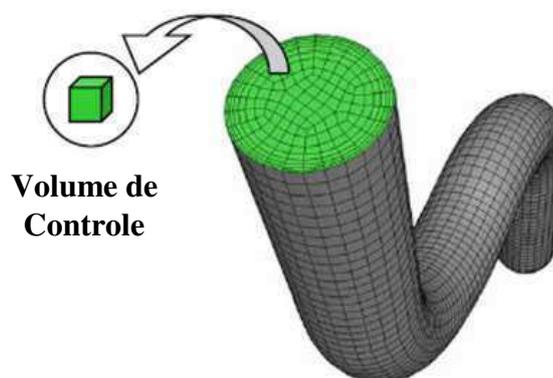


Figura 2.15 – Representação dos volumes de controle em uma malha utilizada na resolução de um problema de escoamento interno em duto. Fonte: Adaptado de Fluent (2006).

O *ANSYS-CFX 15.0* é um simulador numérico que utiliza o método dos volumes finitos baseado em elementos finitos para resolver problemas envolvendo Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor e Massa. Além de resolver as equações de Navier-Stokes em três dimensões, o *software* possui uma ampla quantidade de modelos, como modelos de turbulência, de misturas multifásicas e de combustão (ANSYS, 2014). Além disso, esse código computacional permite a inclusão de novos modelos e a modificação dos já implementados, seja para a consideração de fenômenos físicos ou modificação de esquemas numéricos.

O pacote *CFX* possui três programas principais:

- a) *CFX-Pre*: Onde são definidos o(s) fluido(s) utilizado(s), a modelagem matemática e as condições de contorno do problema;
- b) *CFX-Solver*: Onde o código numérico resolve o problema; e
- c) *CFX-Post*: Onde são visualizados os resultados.

O pacote computacional *CFX* se mostra bastante adequado para trabalhos de pesquisa na área de Termofluido Dinâmica, já que possibilita o teste de diversos modelos matemáticos e a análise da influência de determinados parâmetros, sem a necessidade de implementação das equações de Navier-Stokes ou de modelos matemáticos amplamente conhecidos na literatura (SARMENTO, 2010).

2.5.3 Malha Computacional

Inicialmente, em toda solução via CFD, é necessário a geração de uma malha que defina, em todo o domínio computacional, as células nas quais as variáveis do escoamento serão calculadas. A precisão nesse tipo de solução depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Entretanto, há a necessidade de balanceio entre precisão da solução a partir de refinamento da malha e o custo computacional. A qualidade da malha possui papel fundamental na qualidade da análise, sendo a geração da malha a etapa mais importante e que demanda mais tempo nas análises de CFD (SANTOS, 2010).

As malhas podem ser definidas como estruturadas, não-estruturadas e híbridas (Figura 2.16), onde os seus elementos são triângulos ou quadriláteros, para casos bidimensionais, e tetraedros, prismas ou hexaedros, para casos tridimensionais, podendo sofrer deformações para ajuste à geometria do problema.

2.5.3.1 Malhas Estruturadas

As malhas estruturadas podem ser definidas como malhas que apresentam uma clara lei de orientação dos seus elementos.

A construção de malhas estruturadas pode ser feita, por exemplo, pelo uso da técnica dos multiblocos, que tem como base a associação de blocos com diferentes subdomínios geométricos. Esta técnica permite conectar diversos blocos e construir um domínio inteiro, com uma distribuição uniforme em cada bloco.

Malhas estruturadas oferecem vantagens sobre outros tipos de malha por apresentarem simples implementação e por requererem menor capacidade de armazenamento. Um fato muito importante é que, em geral, malhas estruturadas geram um número menor de células em comparação com malhas não-estruturadas, tendo como referência a mesma geometria base.

A grande desvantagem desse tipo de malha é a falta de flexibilidade em se ajustar a geometrias complexas.

2.5.3.2 Malhas Não-Estruturadas

Ao contrário das malhas estruturadas, malhas não-estruturadas não apresentam uma clara lei de orientação dos seus elementos.

Uma grande vantagem das malhas não-estruturadas, em relação às estruturadas, é o seu fácil ajuste a geometrias complexas, devido à maior flexibilidade de forma que os seus elementos podem assumir. Porém, a demanda de capacidade de armazenamento é maior em comparação com uma malha similar estruturada.

Em geral, esse tipo de malha é gerado semi-automaticamente pelo *software* utilizado, o que é apreciável, porém erros de geração são comuns.

2.5.3.3 Malhas Híbridas

Uma malha híbrida consiste na utilização das malhas estruturada e não-estruturada simultaneamente, agregando os benefícios de ambos os tipos de malhas.

Em locais onde haja maior necessidade de detalhamento usa-se malha estruturada e, onde o perfil analisado for de menor interesse, usa-se não-estruturada.

A desvantagem das malhas híbridas é a exigência de prática e experiência para gerar malhas em geometrias complexas.

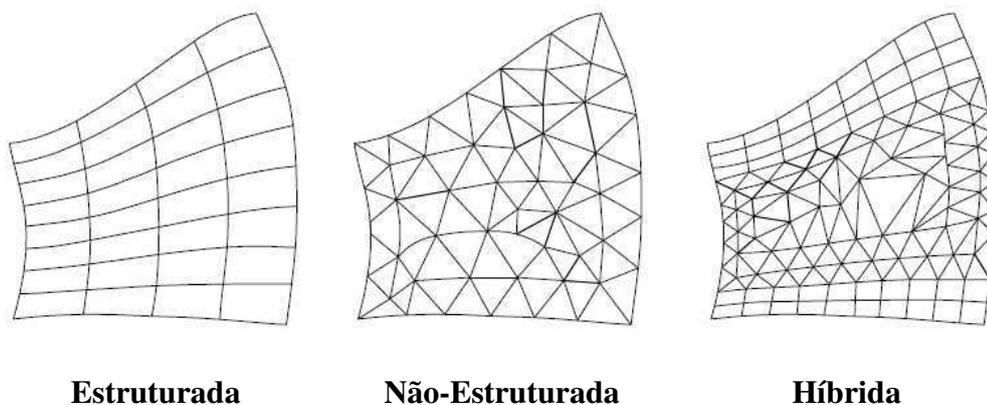


Figura 2.16 – Representação dos tipos de malhas computacionais. Fonte: Santos (2010).

2.6 Estado da Arte na Pesquisa Envolvendo o Arrasto em AUVs do Tipo Torpedo Utilizando Ferramentas CFD

Esta seção visa identificar o estado da arte e os principais avanços e tendências envolvendo o estudo do arrasto de AUVs do tipo torpedo utilizando ferramentas CFD, mediante análise de alguns trabalhos científicos publicados recentemente (entre os anos de 2014 e 2018), que foram selecionados e são resumidos a seguir:

- a) Vasudev et al. (2014) utilizaram uma ferramenta CAGD (sigla em inglês para *Computer Aided Geometric Definition*) integrada a uma ferramenta CFD, para construção de um modelo que estimasse a força de arrasto sobre o casco de um AUV, visando otimização do seu projeto. Foram definidas faixas aceitáveis para os parâmetros geométricos do casco estudado, baseadas em um casco-padrão, e foi executado um processo iterativo combinado de geração de geometria e simulação numérica do escoamento axial ao redor de cada casco gerado. Obteve-se um casco otimizado, com uma relação arrasto/volume 18,5% inferior à obtida para o casco-padrão, denotando que a metodologia empregada foi eficaz na otimização pretendida;
- b) Sousa et al. (2014) estudaram o escoamento ao redor do casco de um AUV visando a redução do seu coeficiente de arrasto mediante otimização dos perfis geométricos da proa e popa do veículo, além de estudarem as componentes relativas à fricção e à pressão desse coeficiente. Foi obtido um casco otimizado, com arrasto apenas 5,3% superior ao obtido para um elipsoide de revolução com dimensões similares, porém com volume 10,3% superior quando comparado com esse mesmo elipsoide. Verificou-se também que o arrasto de pressão foi a parcela predominante do arrasto total do casco, representando aproximadamente 85% deste;
- c) Mansoorzadeh e Javanmard (2014) utilizaram conjuntamente ferramentas experimentais e CFD para estudar o efeito da superfície livre no arrasto e na sustentação de um AUV com três lemes (dois horizontais e um vertical inferior). Foram avaliadas profundidades de operação entre 0,87 e 5,22 vezes o diâmetro do veículo e velocidades de operação entre 1,5 e 2,5 m/s. Foi observado que esses parâmetros, nas faixas analisadas, tiveram forte influência sobre os coeficientes hidrodinâmicos do AUV analisado;
- d) Gao et al. (2016) estudaram variações de parâmetros geométricos específicos do casco de um AUV, visando a obtenção de um veículo otimizado que gerasse o menor arrasto possível, atendendo alguns requisitos de projeto. Foi utilizado um processo iterativo combinado de geração de geometria e simulação numérica do escoamento axial ao redor de cada casco gerado, tendo sido obtido um casco otimizado. A validação das simulações, que se deram em duas dimensões, foi feita mediante experimentos com quatro geometrias selecionadas;

- e) Tian et al. (2017) utilizaram o método das redes neurais integrado a uma ferramenta CFD para definição do melhor *layout* para movimentação conjunta de dois cascos de AUVs, visando redução do arrasto do conjunto. Foi utilizado um processo iterativo combinado de geração de geometria, com variação das posições relativas dos cascos, e simulação numérica do escoamento axial ao redor do conjunto. Obteve-se uma posição relativa otimizada para os cascos simulados, onde o arrasto do conjunto foi reduzido em 12%, quando comparado com a situação de deslocamento dos dois cascos de forma escoteira (isolados);
- f) Aymen et al. (2017) estudaram a influência do ângulo de ataque no coeficiente de arrasto do casco de um AUV navegando próximo à superfície livre, além de analisarem a influência da estrutura de suporte do casco, comumente usada em ensaios experimentais, nesse coeficiente. Foi avaliada uma profundidade de operação de quatro vezes o diâmetro do veículo e ângulos de ataque entre 0 e 15°. Foi observado que para os maiores ângulos de ataque houve grande turbulência na região próxima à superfície livre, bem como que o incremento nesse ângulo acarreta aumento significativo no arrasto do casco. Foi verificado ainda que a estrutura de suporte do casco tem pouca influência no coeficiente de arrasto do mesmo;
- g) Madan e Manoj (2017) estudaram as forças de arrasto, de sustentação e o momento de arfagem sobre o casco de AUVs usando uma abordagem semi-empírica e CFD. Foram analisadas três configurações geométricas dos cascos com razões entre o comprimento e o diâmetro de 8,5 a 12,5, bem como ângulos de ataque entre 0 e 20°. Concluiu-se que os resultados obtidos via simulação numérica se aproximaram dos previstos por equações empíricas específicas, especialmente para menores ângulos de ataque; e
- h) Aymen et al. (2018) estudaram a influência da geometria da popa do casco de um AUV no seu coeficiente de arrasto, para número de Reynolds entre 1,0 e $3,6 \times 10^5$. Obteve-se um casco otimizado, com menor arrasto dentre os analisados, além de um mapeamento das regiões do escoamento com alta vorticidade, o que se mostrou relevante para o posicionamento futuro de lemes, propulsores e equipamentos adicionais (sensores, sonares, etc).

Pelo exposto, é possível verificar que vários estudos vêm sendo feitos visando a criação e o aperfeiçoamento de modelos que fundamentem projetos para a construção de AUVs com

o menor arrasto possível, atendendo alguns requisitos de projeto e considerando algumas situações operacionais específicas.

Ressalta-se que há escassez de trabalhos científicos que avaliem numericamente a variação no coeficiente de arrasto, e em suas componentes, de AUVs em função de alguns parâmetros ambientais específicos, tais como a profundidade de operação do veículo, ou a influência das superfícies de controle na hidrodinâmica do submarino. Esses fatos foram os motivadores para a elaboração da presente dissertação.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia para a análise numérica do escoamento ao redor de um AUV do tipo torpedo utilizada na presente dissertação é um aperfeiçoamento daquela desenvolvida por Sousa (2012), descrita em detalhes neste capítulo.

3.1 Estratégia de Solução

Na Figura 3.1 é ilustrado, em resumo, o passo a passo seguido para a solução do problema abordado nesse trabalho, com ênfase para o *software* utilizado em cada etapa do processo. Destaca-se que foram utilizados dois *softwares* comerciais: o *ANSYS ICEM CFD 15.0*, onde foram geradas a geometria e a malha utilizadas posteriormente na solução do problema; e o *ANSYS-CFX 15.0*, onde foi definida a modelagem físico-matemática, executada a solução numérica e analisados os resultados. De forma detalhada, tem-se:

- a) *Definição do problema*: Consiste na descrição geral do problema a ser abordado, no caso, o estudo do escoamento ao redor de um AUV, e da definição do objetivo da análise, que, para esse trabalho, é levantar alguns parâmetros referentes a este escoamento, tais como o arrasto teórico do AUV e os campos de pressão e velocidade

do fluido ao redor do veículo. Vale destacar que segundo a metodologia descrita por Salgado e Miranda (2002), esse trabalho encontra-se inserido na subetapa dinâmica da etapa preliminar do projeto de um veículo submarino;

- b) Geração da geometria e da malha: Consiste na definição de todos os parâmetros geométricos do sistema a ser analisado e da criação de uma malha numérica sobre essa geometria, convertendo o domínio contínuo em um domínio discreto;
- c) Modelagem física e matemática: É a escolha do modelo físico-matemático, das simplificações e das condições de contorno que foram utilizadas para resolver o problema numericamente;
- d) Solução numérica: Etapa onde o código numérico converte as equações diferenciais parciais em equações algébricas, as aplica a todos os volumes de controle do domínio e resolve iterativamente esse sistema de equações; e
- e) Análise dos resultados: Etapa final, onde os resultados das simulações são organizados e analisados, e conclusões são obtidas.

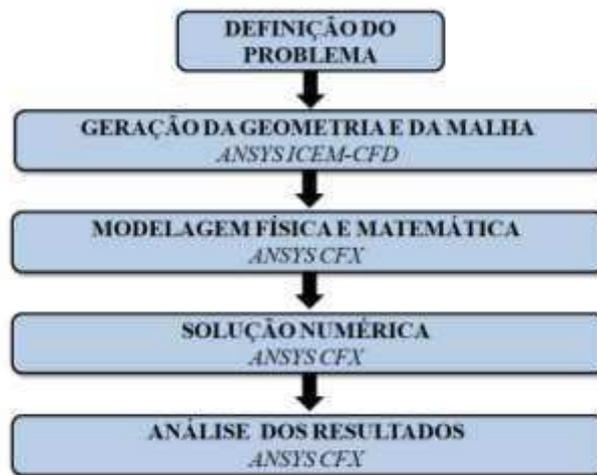


Figura 3.1 – Etapas seguidas para a solução do problema abordado via CFD. Fonte: Adaptado de Sousa (2012)

3.2 Abordagem do Problema Físico

O problema físico trata da definição das dimensões geométricas do domínio de estudo. É fundamental iniciar a abordagem do problema conhecendo-se detalhadamente a geometria do AUV, bem como as dimensões do domínio fluido externo ao mesmo.

3.2.1 Casco do AUV

O AUV analisado na presente dissertação tem casco do tipo torpedo, devido às suas boas características (ver *seção 2.3*), o que justifica o amplo uso desse tipo de casco pelos principais fabricantes comerciais dessa classe de veículos.

Para modelar os perfis da proa e popa do veículo recorreu-se às equações de Myring. Essas equações teóricas descrevem contornos para as extremidades de corpos do tipo torpedo que geram baixos coeficientes de arrasto (MYRING, 1976). As equações são da seguinte forma:

a) Proa:

$$r_1(x_1) = \frac{1}{2}D \left[1 - \left(\frac{x_1 - a}{a} \right)^2 \right]^{1/n} \quad (3.1)$$

b) Popa:

$$r_2(x_2) = \frac{1}{2}D \left[\frac{3D}{2c^2} - \frac{tg\theta}{c} \right] x_2^2 + \left[\frac{D}{c^3} - \frac{tg\theta}{c^2} \right] x_2^3 \quad (3.2)$$

onde todos os parâmetros de alimentação das equações, com exceção do parâmetro potencial n , são geométricos, e estão mostrados na Figura 3.2.

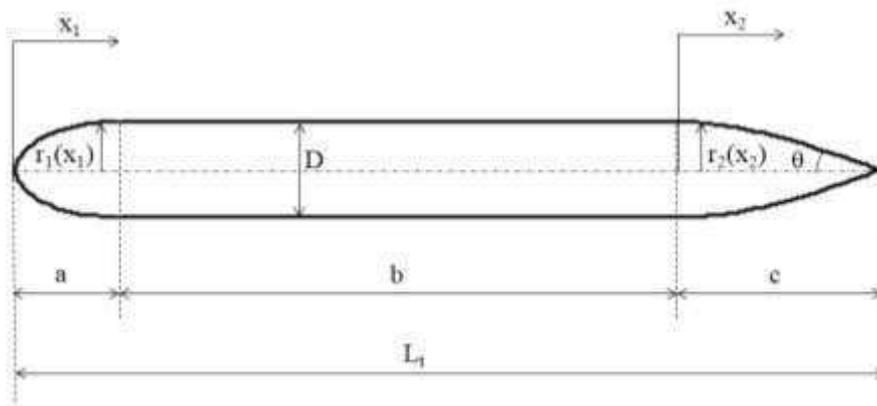


Figura 3.2 – Representação dos parâmetros geométricos necessários para alimentação das equações de Myring.

O AUV analisado no presente trabalho tem as características geométricas do seu casco (Tabela 3.1) baseadas no casco *Afterbody1*, estudado por Jagadeesh et al. (2009). Essa escolha se deu em virtude da disponibilidade de dados experimentais referentes ao coeficiente de arrasto do casco, bem como pelo fato das dimensões desse casco estarem inseridas nos intervalos dimensionais de AUVs comerciais existentes (ver Tabela 2.4 apresentada na seção 2.3).

Tabela 3.1 – Parâmetros geométricos do casco do AUV estudado.

Parâmetro	Valor
$L_t = a + b + c$	1.400 mm
a	250 mm
b	700 mm
c	450 mm
D	140 mm
n	2
θ	20°

3.2.2 Superfícies de Controle do AUV

As superfícies de controle do AUV estudado são do tipo cruciforme (+), ou seja, quatro lemes distribuídos ao longo da circunferência do veículo, com perfil NACA0015, desenvolvido pelo *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) dos Estados Unidos, localizadas na popa do submarino. O perfil NACA0015 (Figura 3.3) é simétrico e foi escolhido em virtude das suas recorrentes aplicações em superfícies de controle navais (RAWSON e TUPPER, 2001).

Detalhes geométricos dos lemes do AUV analisado nesta dissertação são mostrados na Figura 3.4 e na Tabela 3.2, e foram baseados nos lemes utilizados no AUV Pirajuba (DANTAS, 2014), que possui relação $L_t/D = 7,44$, que se assemelha à relação do AUV analisado no presente trabalho ($L_t/D = 10$).

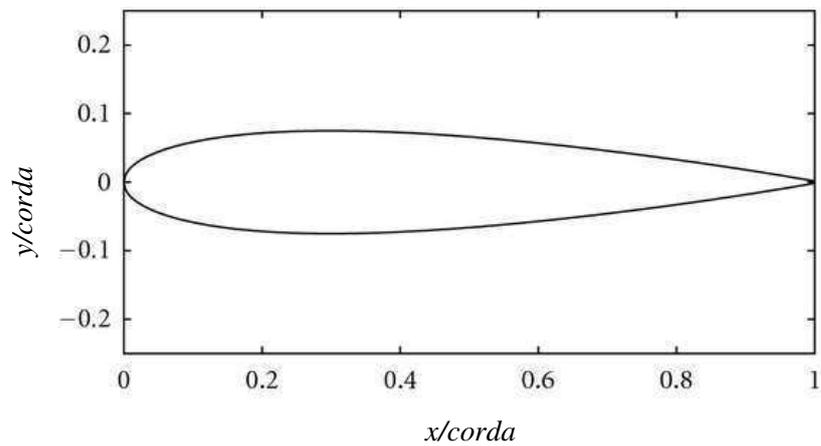


Figura 3.3 – Dimensões do perfil NACA0015 em função da sua corda. Fonte: Adaptado de Carrigan et al. (2012).

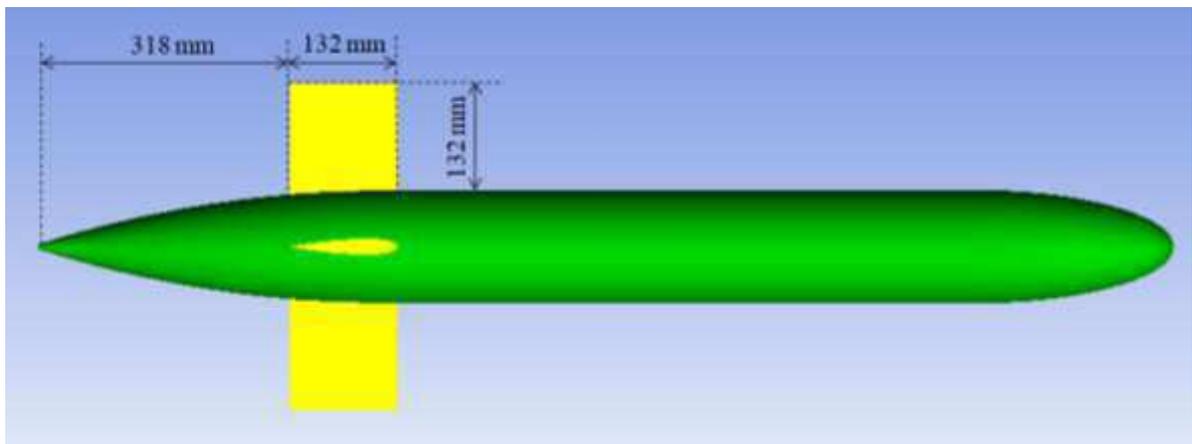


Figura 3.4 – Detalhes geométricos dos lemes do AUV estudado.

Tabela 3.2 – Detalhes geométricos dos lemes (perfil NACA0015) do AUV estudado.

Parâmetro	Valor / Característica
Tipo	Retangular
Altura	132 mm
Corda	132 mm

3.2.3 Domínio Fluido

Optou-se por um domínio fluido de forma semicilíndrica, visando a obtenção de uma malha numérica com menor quantidade de volumes de controle, quando comparado a um domínio paralelepípedo, reduzindo assim o custo computacional para solução do problema.

As dimensões desse domínio (Figura 3.5) foram escolhidas baseadas no trabalho de Sousa (2012), que estudou o escoamento ao redor do casco de um AUV com $L_t/D = 9$, e são informadas na Tabela 3.3.

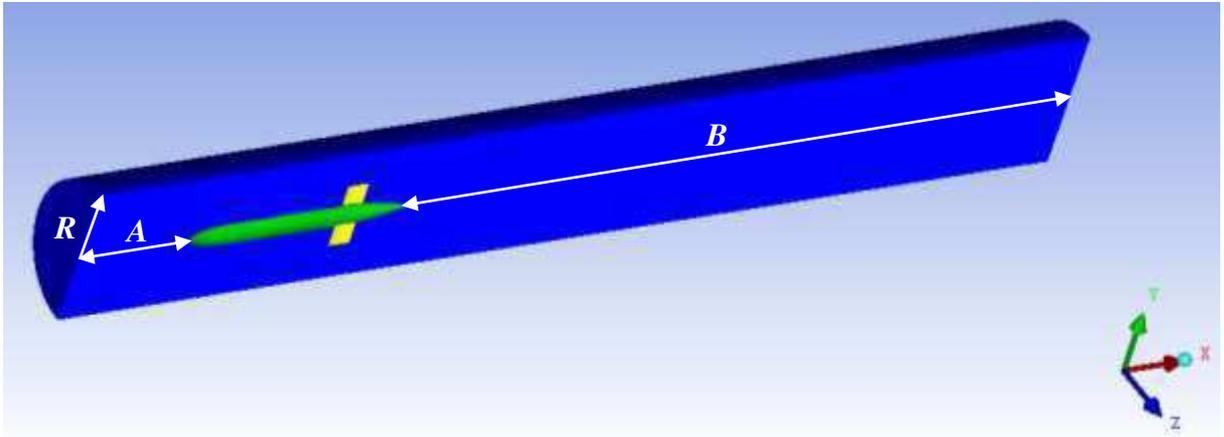


Figura 3.5 – Dimensões do domínio fluido analisado.

Tabela 3.3 – Parâmetros geométricos que definem as dimensões do domínio fluido analisado.

Parâmetro	Valor (mm)
A	$0,5 L_t = 700$
B	$3 L_t = 5.200$
R	$3 D = 420$

3.3 Geração das Malhas Computacionais

Devido à complexidade da geometria do AUV estudado na presente dissertação, em especial devido aos seus lemes, optou-se pela construção de malhas híbridas para as simulações.

Muitos cuidados devem ser tomados ao construir malhas numéricas visando resolver problemas de escoamento sobre corpos imersos. Vários fatores foram levados em conta, seguindo as orientações de Ansys (2014), que traz uma equação para a espessura média da camada-limite hidrodinâmica, δ , para corpos imersos, como segue:

$$\delta = 0,035LRe^{-1/7} \quad (3.3)$$

Tomando por base os parâmetros geométricos do AUV analisado, bem como a faixa do número de Reynolds utilizada neste trabalho (entre 6 e 22×10^5), chegou-se a uma espessura média da camada-limite de aproximadamente 7 mm. Nessa região deve-se ter pelo menos 10 camadas de volumes de controle, visando permitir que os modelos de turbulência funcionem adequadamente (ANSYS, 2014), fato que foi respeitado na construção das malhas.

Na Figura 3.6 é apresentado um panorama geral da malha construída para o AUV com lemes analisado, enquanto que nas Figuras 3.7 a 3.15 são mostrados detalhes da malha na região da proa, popa e lemes do veículo.

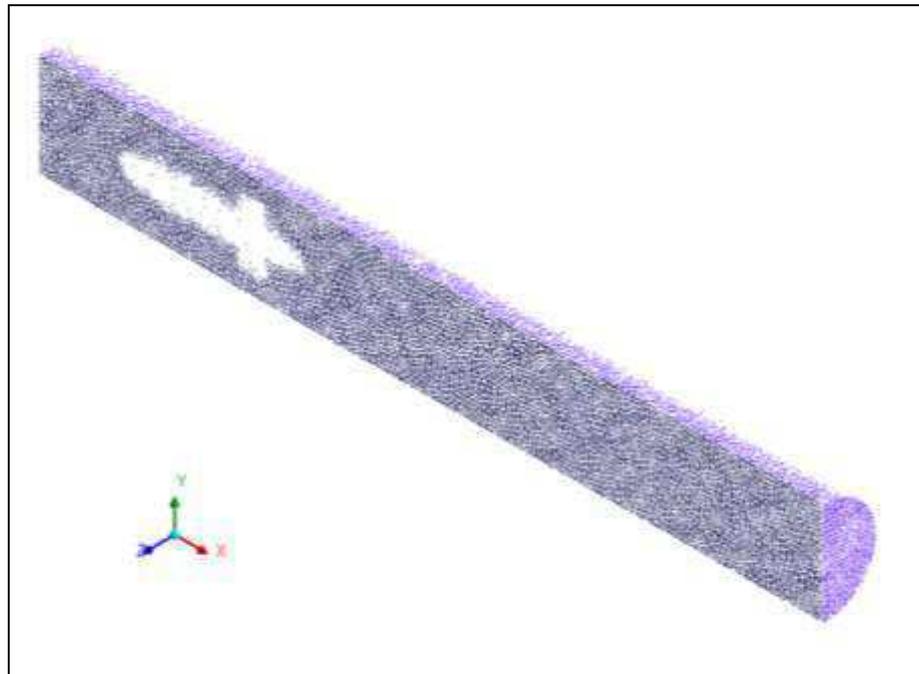


Figura 3.6 – Malha numérica do AUV com lemes analisado.

Destaca-se que a mesma metodologia de construção da malha para o AUV com lemes foi adotada para a construção da malha no caso do AUV sem lemes, visando possibilitar análises comparativas válidas entre ambas as situações. A malha para essa última geometria (sem lemes) tem aspecto similar ao da primeira (com lemes), logo as imagens dessa não estão exibidas no presente trabalho.

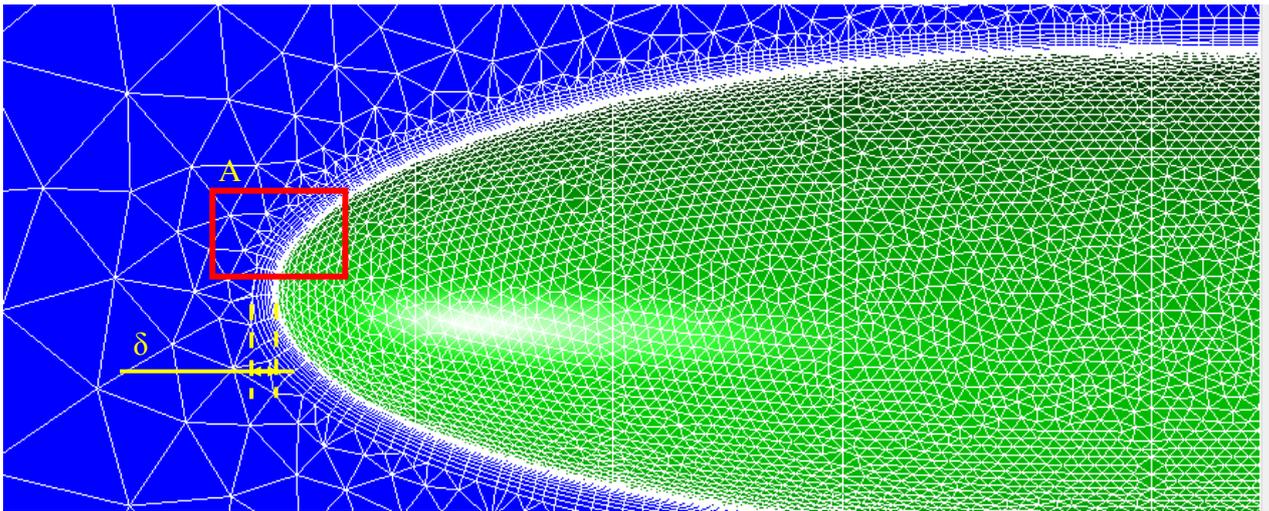


Figura 3.7 – Detalhe da malha na região da proa do AUV com lemes analisado, com destaque para a espessura estimada da camada-limite hidrodinâmica.

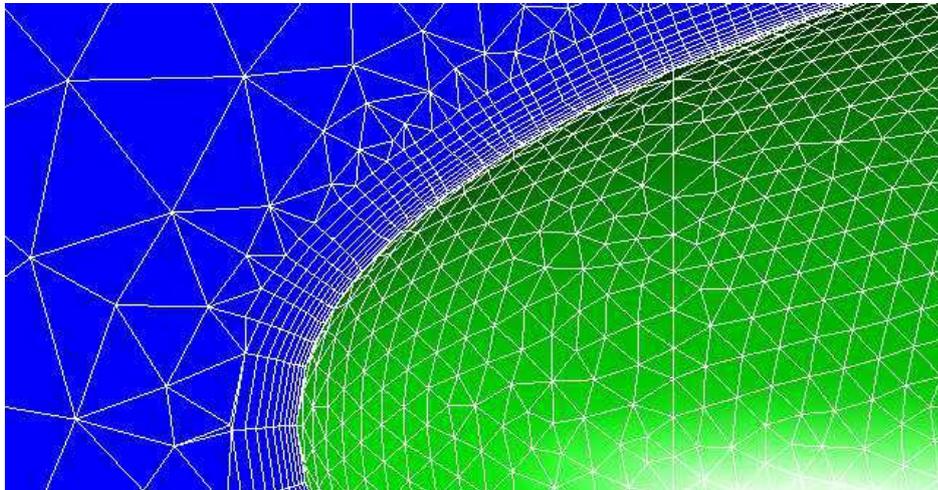


Figura 3.8 – Detalhe da malha na região A, destacada na Figura 3.7.

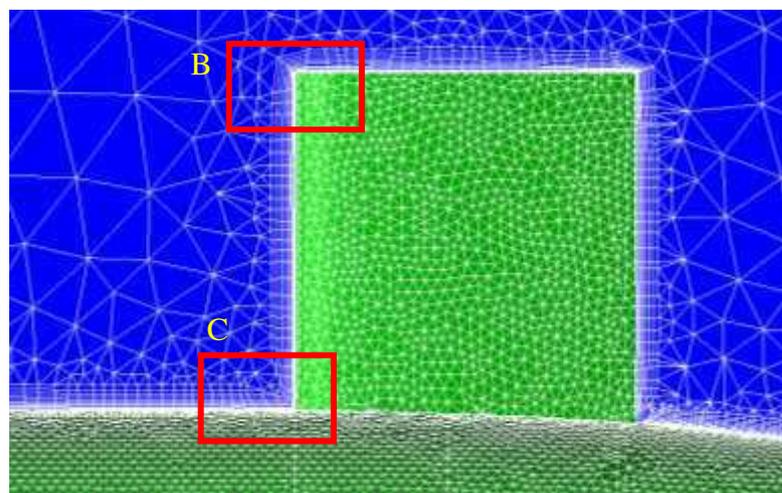


Figura 3.9 – Detalhe da malha na região ao redor de um dos lemes do AUV analisado.

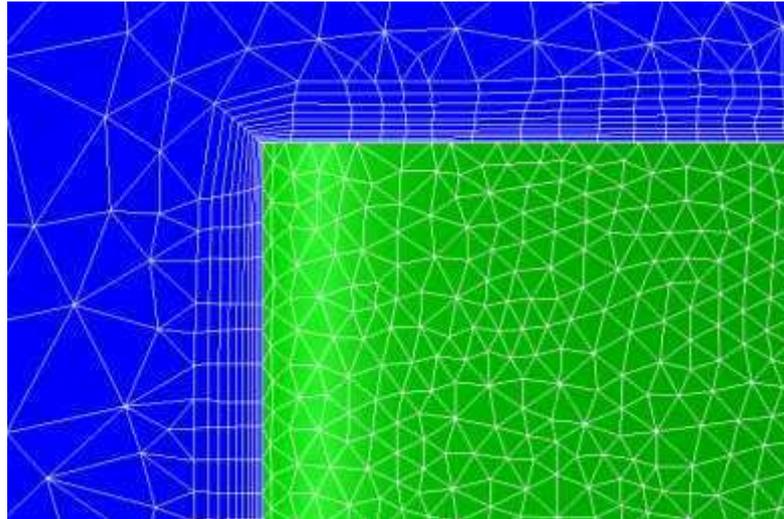


Figura 3.10 – Detalhe da malha na região B, destacada na Figura 3.9.

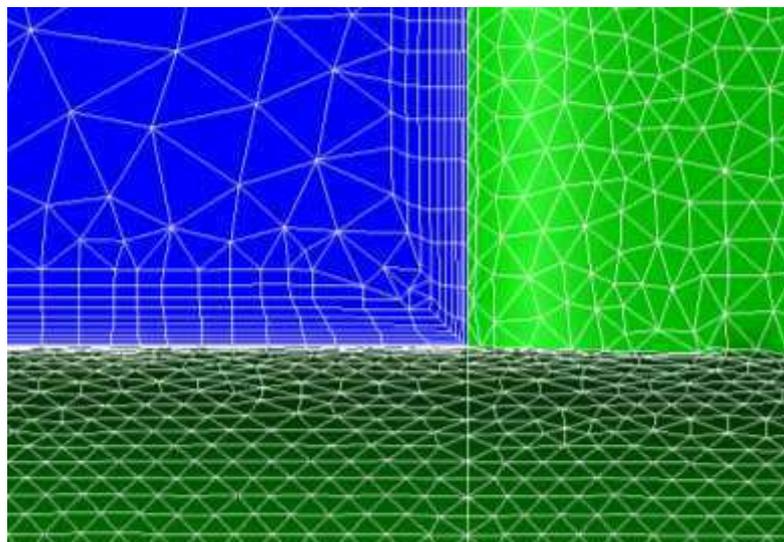


Figura 3.11 – Detalhe da malha na região C, destacada na Figura 3.9.

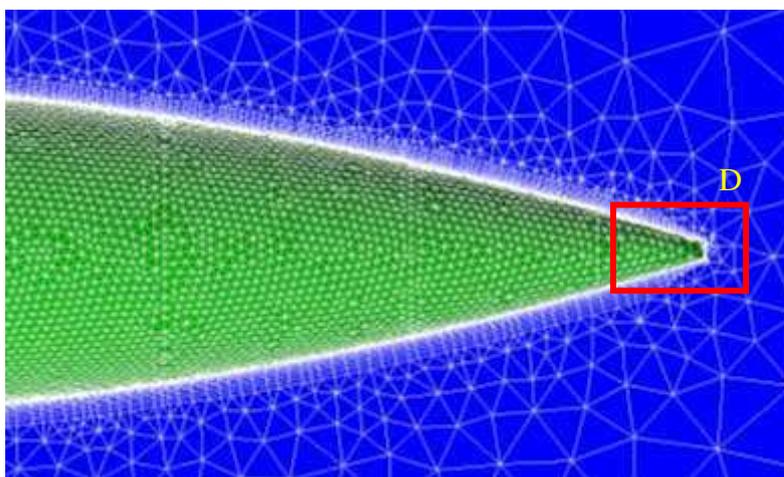


Figura 3.12 – Detalhe da malha na região da popa do AUV com lemes analisado.

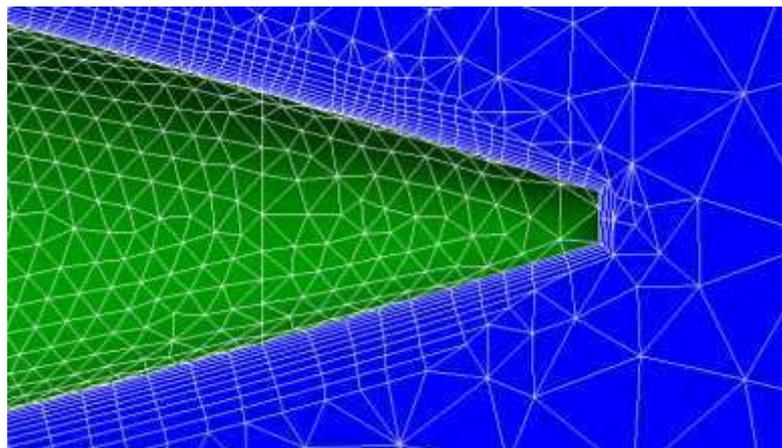


Figura 3.13 – Detalhe da malha na região D, destacada na Figura 3.12.

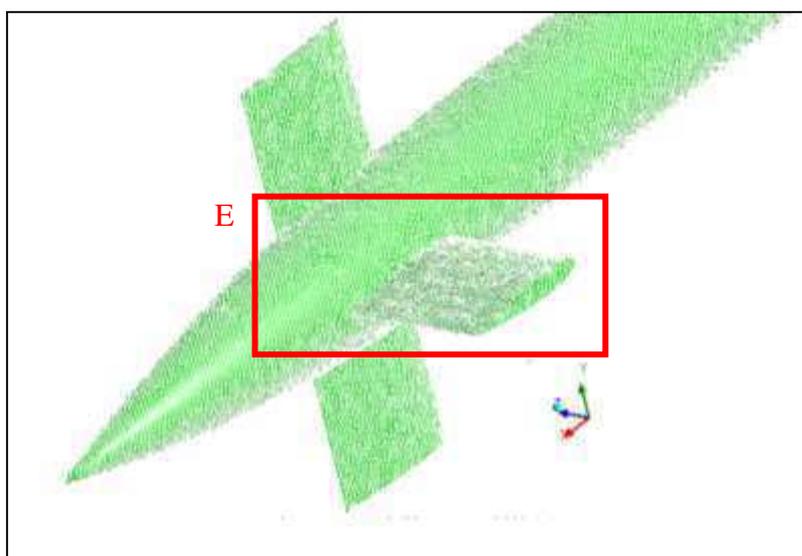


Figura 3.14 – Detalhe da malha na região ao redor dos lemes do AUV analisado.

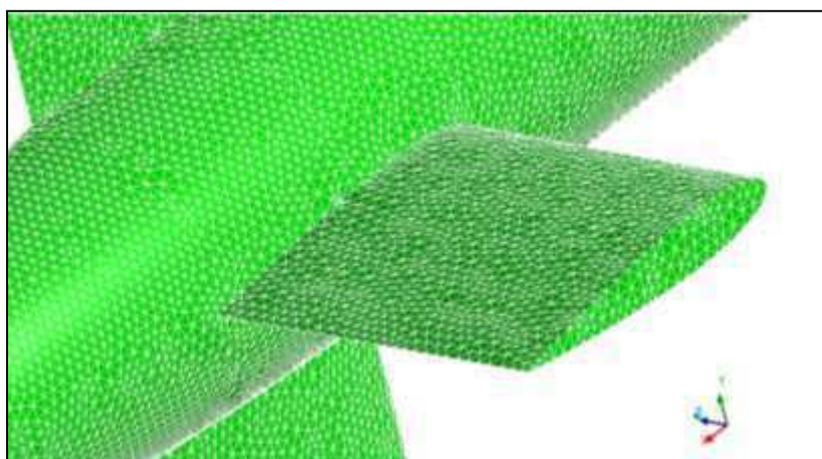


Figura 3.15 – Detalhe da malha na região E, destacada na Figura 3.14.

No presente trabalho foi usado como critério de aceitação das malhas o parâmetro *qualidade*. Cada malha utilizada foi considerada aceitável se a qualidade de pelo menos 75% dos seus volumes de controle for superior a 75% e a qualidade de no máximo 1% dos seus volumes de controle for inferior a 25%. Todas as malhas utilizadas nessa dissertação atenderam a esse critério.

O parâmetro qualidade é calculado diferentemente para cada tipo de volume de controle. Para os volumes tetraédricos a qualidade é baseada na razão de aspecto do elemento, ra , que é definida por:

$$ra = \frac{(v_e/r_e^3)}{(v_i/r_i^3)} \quad (3.4)$$

onde:

- a) v_e é o volume do elemento;
- b) r_e é o raio da menor esfera hipotética que circunscreve o elemento;
- c) v_i é o volume do elemento ideal (tetraedro equilátero); e
- d) r_i é o raio da menor esfera hipotética que circunscreve o elemento ideal.

Para volumes tetraédricos a razão de aspecto, e conseqüentemente a qualidade, varia então de 0 e 100%, sendo 0% o valor teórico para o pior elemento possível (com volume nulo) e 100% para o melhor elemento possível (tetraedro equilátero).

Para os volumes prismáticos o cálculo da qualidade é feito de forma mais complexa, sendo utilizados dois parâmetros simultaneamente, que, em linhas gerais, avaliam o desvio do volume analisado quando comparado a um elemento ideal (prisma equilátero), em uma escala de 0 a 100%.

Um parâmetro relevante na modelagem do escoamento externo é a distância adimensional y^+ , que é comumente utilizada para definir o refinamento ideal da malha nas regiões de parede. Esse parâmetro é definido pela seguinte equação:

$$y^+ = \frac{\Delta n}{\mu / \sqrt{\rho \tau_w}} \quad (3.5)$$

onde:

- a) Δn é a altura da primeira camada de volumes de controle, medida normalmente à parede; e
- b) τ_w é a tensão de cisalhamento na parede.

A escolha adequada do valor de y^+ apresenta grande relevância na solução de problemas numéricos, sendo indicado que as malhas tenham y^+ mínimo de 1 e máximo em função do número de Reynolds do escoamento, onde, por exemplo, para escoamentos com número de Reynolds da ordem de 10^9 podem ser construídas malhas com y^+ superior a 1.000 (ANSYS, 2014).

3.4 Modelagem Matemática

3.4.1 Equações Governantes

Nessa seção são mostradas as equações gerais de conservação adotadas pelo ANSYS-CFX 15.0 na solução do escoamento monofásico, isotérmico e turbulento ao redor do AUV estudado nesta dissertação. As equações básicas são as da conservação da massa e da conservação da quantidade de movimento linear, que são mostradas abaixo:

a) Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (3.6)$$

b) Equação da conservação da quantidade de movimento linear:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{U})^T + \rho \vec{g} \quad (3.7)$$

onde:

- a) μ_{eff} é a viscosidade efetiva, que contabiliza os efeitos turbulentos, e é definida como:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.8)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta;

- b) p' é a pressão corrigida; e
c) \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade.

Além das equações básicas, se faz necessário adicionar ao modelo equações que rejam o fenômeno da turbulência presente no escoamento. A turbulência consiste de flutuações no campo de fluxo no tempo e no espaço. É um processo complexo e pode ter um efeito significativo sobre as características do fluxo. A turbulência ocorre quando as forças de inércia agindo no fluido se tornam significativamente maiores que às forças viscosas, e é caracterizada por um elevado número de Reynolds do escoamento. O número de Reynolds nos casos analisados nesse trabalho é da ordem de 10^5 - 10^6 , o que caracteriza a presença de turbulência no escoamento.

Neste trabalho foram utilizados, não simultaneamente, dois modelos de turbulência: O SST (sigla em inglês para *Shear Stress Transport*) e o k- ϵ .

O modelo SST é baseado no modelo k- ω . Utilizou-se esse modelo devido ao seu bom tratamento de problemas envolvendo escoamento externo com altos números de Reynolds e sua boa precisão em prever a separação do fluxo quando o mesmo é submetido a gradientes de pressão adversos (ANSYS, 2014).

O modelo SST introduz duas variáveis ao problema, que são a variável k , que é a energia cinética turbulenta, e a variável ω , que é a frequência turbulenta. Essas variáveis são calculadas pelas seguintes equações:

c.1) Equação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{C_{k1}} \right) \nabla k \right] + P_k - C_{k2} \rho k \omega \quad (3.9)$$

d.1) Equação da frequência turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{C_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + C_{\omega 2} P_k \frac{\omega}{k} - C_{\omega 3} \rho \omega^2 \quad (3.10)$$

onde:

- a) C_{k1} , C_{k2} , $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ e $C_{\omega 3}$ são constantes, e valem, respectivamente, 2; 0,09; 2; 5/9; e 0,075; e
- b) P_k é a produção de turbulência, que é modelada por meio da equação:

$$P_k = \mu_t \nabla \vec{U} \cdot (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U} (3\mu_t \nabla \cdot \vec{U} + \rho k) \quad (3.11)$$

O modelo SST assume que a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética turbulenta e à frequência turbulenta pela relação:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.12)$$

O modelo SST assume também que a pressão corrigida, p' , é modelada pela equação:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (3.13)$$

onde p é a pressão.

O modelo k-ε é considerado o modelo padrão pela maior parte dos solucionadores CFD comerciais e oferece boa relação entre precisão e robustez (ANSYS, 2014), conseguindo modelar satisfatoriamente tanto escoamentos internos quanto externos (DANTAS, 2014).

Similarmente ao modelo SST, o k-ε introduz duas variáveis ao problema, que são a variável k , que é a energia cinética turbulenta, e a variável ε , que é a dissipação de turbulência. Essas variáveis são calculadas pelas equações:

c.2) Equação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.14)$$

d.2) Equação da dissipação de turbulência:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.15)$$

onde σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são constantes, e valem, respectivamente, 1,0; 1,3; 1,44; e 1,92.

O modelo k-ε assume que a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética turbulenta e à dissipação de turbulência pela relação:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

onde C_μ é uma constante e vale 0,09.

A produção de turbulência e a pressão corrigida são modeladas de forma similar tanto no modelo SST quanto no modelo k-ε.

A inclusão de um modelo de transição de regime de turbulência na camada-limite hidrodinâmica do escoamento adicionaria ao problema novas equações de transporte, além de requerer uma malha mais refinada, em especial nesta camada, fatos que acarretariam aumento significativo do custo computacional necessário para solução desse problema.

Visando simplificação da modelagem adotada neste trabalho, foram negligenciados os escoamentos laminar e de transição, sendo todos eles modelados como completamente turbulentos em todas as simulações.

3.4.2 Modelagem Próxima à Parede

Em problemas envolvendo escoamento externo a correta determinação da camada-limite é fundamental, pois a turbulência e os campos de velocidade são bastante afetados pelas características desta.

Assumindo que uma função logarítmica se aproxime razoavelmente da distribuição de velocidade próxima à parede, esse perfil forneceria um meio de calcular a tensão de cisalhamento do fluido como uma função da velocidade, a uma determinada distância dessa parede. Essa modelagem é conhecida como *função de parede*.

A função de parede, utilizada na modelagem matemática adotada, faz uso de relações analíticas e semi-empíricas para extrapolar a solução numérica obtida na região totalmente turbulenta para as demais regiões da camada-limite.

3.4.3 Considerações Adotadas e Condições de Contorno

No presente trabalho foram adotadas as seguintes considerações para a investigação do escoamento ao redor do AUV, além das já descritas nas seções anteriores:

- a) Não há reações químicas;
- b) Não foi considerado o efeito da superfície livre;
- c) Não foi considerada a influência do propulsor sobre o escoamento;
- d) Considerou-se o efeito gravitacional, onde foi adotado o valor de $-9,81 \text{ m/s}^2$ para a aceleração da gravidade; e
- e) O escoamento é monofásico, isotérmico, incompressível, axial ao casco do AUV e em regime permanente.

A Figura 3.16 mostra as condições de contorno às quais o domínio está sujeito.

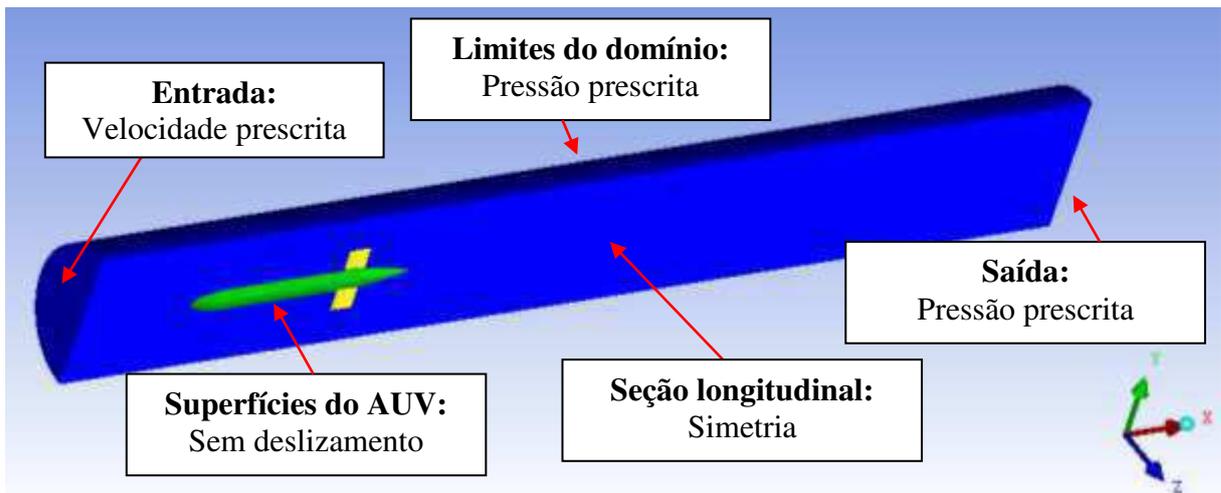


Figura 3.16 – Condições de contorno do domínio.

De forma mais detalhada, as condições de contorno do domínio são:

- Entrada: Velocidade prescrita, normal à superfície de entrada;
- Saída: Pressão hidrostática prescrita;
- Superfícies do AUV: Superfície perfeitamente lisa e sem deslizamento, ou seja, velocidade do fluido que está imediatamente em contato com o sólido igual à velocidade desse sólido (hipótese do não-deslizamento);
- Limites do domínio: Condição de *fronteira aberta*, com pressão hidrostática prescrita. A condição de fronteira aberta permite que o fluxo entre e/ou saia do domínio; e
- Seção longitudinal: Plano de simetria, onde os gradientes das variáveis escalares na direção normal, bem como a componente da velocidade nessa direção, têm valor nulo.

3.5 Propriedades dos Fluidos Utilizados nas Simulações

Foram utilizados os seguintes fluidos nas simulações:

- Água do mar: Para as simulações que analisam a influência da profundidade de operação nas características do escoamento ao redor do AUV estudado (ver *seção 4.3*); e

b) Água pura: Para as demais simulações.

Para a água do mar utilizou-se propriedades variáveis em função da profundidade de operação do AUV, visto que a viscosidade dinâmica é fortemente influenciada por esse parâmetro.

Conforme mostra a Figura 3.17, para regiões equatoriais e tropicais (que abrangem boa parte do litoral brasileiro), o comportamento médio da temperatura da água em função da profundidade oceânica pode ser dividido em três regiões:

- a) Camada de mistura: Região de até 500 m de profundidade, onde não há grandes variações na temperatura da água (região isotérmica);
- b) Termoclina principal: Região entre 500 e 1.000 m, onde há grandes gradientes de temperatura; e
- c) Camada de fundo: Região de profundidades superiores a 1.000 m, onde não há grandes variações na temperatura da água (região praticamente isotérmica).

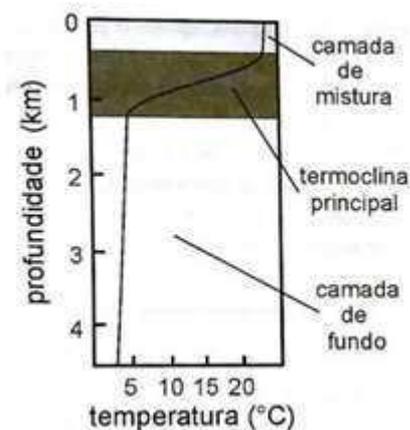


Figura 3.17 – Perfil típico da temperatura da água do mar em função da profundidade. Fonte: Schmiegelow, 2004.

Baseado no perfil vertical médio de temperatura das águas oceânicas, para regiões equatoriais e tropicais, e considerando a salinidade média dessas águas como sendo 35 g/kg, chegou-se às propriedades da água do mar descritas na Tabela 3.4, que foram utilizadas no presente trabalho.

Tabela 3.4 – Propriedades da água do mar utilizadas nas simulações.

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Densidade (kg/m³)	Viscosidade dinâmica (mPa.s)
500	25	1.023	0,9600
750	15	1.026	1,2300
1.000	3	1.028	1,7200

Fonte: The Engineering Toolbox, 2018.

Para a água pura utilizou-se as propriedades descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades da água pura utilizadas nas simulações.

Propriedade	Valor
Densidade	997 kg/m ³
Viscosidade	0,8899 mPa.s

Fonte: Ansys, 2014.

3.6 Processo para Obtenção da Solução Numérica

Solucionadores numéricos empregam uma estratégia de solução onde as equações de momento são resolvidas primeiro, usando uma “pressão estimada”, e gerando uma equação para a correção dessa pressão. Devido à natureza de “estimar e corrigir” do sistema linear, um grande número de iterações é geralmente necessário (ANSYS, 2014).

O *ANSYS-CFX 15.0* utiliza um método de solução acoplada, onde se resolve as equações hidrodinâmicas (para velocidade e pressão) como um sistema único. Esta abordagem utiliza uma solução totalmente implícita na discretização das equações (ANSYS, 2014).

A Figura 3.18 traz um fluxograma que ilustra, de forma simplificada, o processo de solução utilizado pelo *CFX-Solver* para o problema do escoamento ao redor do AUV estudado nesse trabalho.



Figura 3.18 – Fluxograma representando o processo simplificado de solução utilizado pelo *CFX-Solver* para o problema do escoamento ao redor do AUV estudado. Fonte: Adaptado de Ansys (2014).

3.7 Comentários Gerais sobre as Simulações

As simulações foram realizadas no ambiente do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Foi utilizado um computador *Intel Core i5-3210M 2,5 GHz e 4 Gb* de memória RAM.

Para o controle das simulações foram adotados os critérios de parada mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Critérios de parada adotados para as simulações.

Critério de parada	Consideração
Primário	Alcançado erro RMS de 10^{-5}
Secundário	Alcançadas 300 iterações

A Tabela 3.7 traz um resumo das simulações analisadas no presente trabalho.

Tabela 3.7 – Resumo das simulações analisadas.

Caso	AUV com ou sem lemes?	Modelo de Turbulência	Fluido utilizado	Velocidade de escoamento (m/s)	Profundidade de operação (m)	Malha utilizada
1	Sem lemes	SST	Água pura	0,4	-	1
2	Sem lemes	SST	Água pura	0,6	-	1
3	Sem lemes	SST	Água pura	0,8	-	1
4	Sem lemes	SST	Água pura	1,0	-	1
5	Sem lemes	SST	Água pura	1,2	-	1
6	Sem lemes	SST	Água pura	1,4	-	1
7	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,4	-	1
8	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,6	-	1
9	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,8	-	1
10	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,0	-	1
11	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,2	-	1
12	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,4	-	1
13	Sem lemes	SST	Água pura	0,4	-	2
14	Sem lemes	SST	Água pura	0,6	-	2
15	Sem lemes	SST	Água pura	0,8	-	2
16	Sem lemes	SST	Água pura	1,0	-	2
17	Sem lemes	SST	Água pura	1,2	-	2
18	Sem lemes	SST	Água pura	1,4	-	2
19	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,4	-	2
20	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,6	-	2
21	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,8	-	2
22	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,0	-	2
23	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,2	-	2
24	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,4	-	2
25	Sem lemes	SST	Água pura	0,4	-	3
26	Sem lemes	SST	Água pura	0,6	-	3
27	Sem lemes	SST	Água pura	0,8	-	3
28	Sem lemes	SST	Água pura	1,0	-	3
29	Sem lemes	SST	Água pura	1,2	-	3
30	Sem lemes	SST	Água pura	1,4	-	3
31	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,4	-	3
32	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,6	-	3
33	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	0,8	-	3
34	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,0	-	3
35	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,2	-	3
36	Sem lemes	k- ϵ	Água pura	1,4	-	3
37	Com lemes	SST	Água pura	0,4	-	4
38	Com lemes	SST	Água pura	0,6	-	4
39	Com lemes	SST	Água pura	0,8	-	4
40	Com lemes	SST	Água pura	1,0	-	4

Tabela 3.7 – Resumo das simulações analisadas.

Caso	AUV com ou sem lemes?	Modelo de Turbulência	Fluido utilizado	Velocidade de escoamento (m/s)	Profundidade de operação (m)	Malha utilizada
41	Com lemes	SST	Água pura	1,2	-	4
42	Com lemes	SST	Água pura	1,4	-	4
43	Sem lemes	SST	Água do mar	1,0	500	2
44	Sem lemes	SST	Água do mar	1,0	750	2
45	Sem lemes	SST	Água do mar	1,0	1.000	2
46	Com lemes	SST	Água do mar	1,0	500	4
47	Com lemes	SST	Água do mar	1,0	750	4
48	Com lemes	SST	Água do mar	1,0	1.000	4

Visando validar a modelagem numérica-matemática utilizada nesta dissertação, foi procedida a comparação entre resultados experimentais disponíveis na literatura com os resultados numéricos obtidos neste trabalho. Nas simulações iniciais (*seção 4.1*: AUV sem Superfícies de Controle) foram considerados dois modelos de turbulência (k-ε e SST) e três malhas com refinamentos distintos.

A variação dos modelos de turbulência visou avaliar qual deles se adapta melhor ao problema em estudo, visando minimizar os desvios do coeficiente de arrasto volumétrico obtido numericamente com o obtido experimentalmente.

O coeficiente de arrasto volumétrico foi obtido numericamente fazendo uso da seguinte equação:

$$C_{dv} = C_{dpv} + C_{dfv} = \frac{(\int p dA_s)_{A_s} \vec{i}}{\frac{1}{2} \rho U^2 V^{2/3}} + \frac{(\int \tau_w dA_s)_{A_s} \vec{i}}{\frac{1}{2} \rho U^2 V^{2/3}} \quad (3.17)$$

onde:

- a) A_s é a área superficial do AUV; e
- b) \vec{i} é o vetor unitário paralelo à direção de escoamento.

Na *seção 4.1* também foi procedida a avaliação do desvio do coeficiente de arrasto volumétrico obtido numericamente com o obtido experimentalmente, em função do

refinamento da malha. Esse refinamento se deu a partir de uma malha base (menos refinada) e seguiu o critério de incremento aproximado do fator de refinamento de malha em 25% a cada nova malha. A quantidade de volumes de controle da malha base foi escolhida em função da experiência prévia do autor do presente trabalho.

O fator de refinamento de malha, f , pode ser definido como:

$$f = \frac{Q-Q^-}{Q^-} \quad (3.18)$$

onde:

- a) Q é a quantidade de volumes de controle da malha avaliada; e
- b) Q^- é a quantidade de volumes de controle da malha menos refinada.

Na *seção 4.3* são apresentadas, para o AUV sem e com lemes, equações de ajuste para o C_{dv} , C_{dpv} e C_{dfv} , em função do Re_v ou da profundidade de operação do veículo, p^* . Essas equações de ajuste são polinomiais de grau 2 quando a variável independente tratar-se do Re_v , sendo então da seguinte forma:

$$Y = \bar{A} + \bar{B}.X + \bar{C}.X^2 \quad (3.19)$$

onde:

- a) \bar{A} , \bar{B} e \bar{C} são coeficientes da equação;
- b) Y é a variável dependente, ou seja, C_{dv} , C_{dpv} ou C_{dfv} ; e
- c) X é a variável independente.

Quando a variável independente tratar-se da p^* , essas equações de ajuste são polinomiais de grau 1, sendo então representadas da seguinte forma:

$$Y = \bar{A} + \bar{B}.X \quad (3.20)$$

Destaca-se que todas as equações de ajuste possuem coeficientes de correlação, R^2 , de, no mínimo, 95,00%.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AUV sem Superfícies de Controle

A Tabela 4.1 traz dados das três malhas avaliadas, que possuem elementos tetraédricos (quatro faces) e prismáticos (cinco faces), estando estes últimos concentrados próximos às superfícies do AUV. Todas as malhas possuem valores médios de y^+ próximos, entre 10 e 11.

Tabela 4.1 – Dados das malhas avaliadas.

Malha	Q (volumes de controle)	f (%)	y^+ médio (-)
1	367.055	0	10
2	454.950	24	11
3	537.672	46	11

A Tabela 4.2 traz os resultados obtidos para a malha 1 (casos 1 a 12). Verifica-se que tanto o modelo de turbulência SST, quanto o k- ϵ representaram bem o fenômeno do escoamento ao redor do AUV estudado (casco nu), baseado no baixo desvio entre o C_{dv} obtido numericamente e experimentalmente. Esse pequeno desvio pode ser atribuído à associação de erros experimentais, erros numéricos e da pequena variação entre a geometria de casco simulada computacionalmente e a utilizada nos experimentos.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para a malha 1.

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} experimental* (-)	C _{dv} numérico (SST) (-)	C _{dv} numérico (k-ε) (-)	Desvio entre C _{dv} numérico (SST) e experimental (%)	Desvio entre C _{dv} numérico (k-ε) e experimental (%)
0,4	6,27	1,05	0,0489	0,0459	0,0450	6,2	8,0
0,6	9,41	1,57	0,0451	0,0422	0,0420	6,3	6,9
0,8	12,55	2,10	0,0434	0,0400	0,0399	7,9	8,0
1,0	15,68	2,62	0,0419	0,0384	0,0384	8,5	8,4
1,2	18,82	3,15	0,0407	0,0371	0,0371	8,8	8,7
1,4	21,96	3,67	0,0389	0,0361	0,0362	7,1	7,1

* Dados obtidos de Jagadeesh et al. (2009)

A Figura 4.1 traz os coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 1 em função do número de Reynolds volumétrico. Verifica-se que as simulações reproduziram comportamento similar aos experimentos, apresentando ambos a mesma tendência decrescente do coeficiente de arrasto volumétrico com o aumento do número de Reynolds volumétrico. Verifica-se ainda que os modelos de turbulência k-ε e SST apresentaram resultados muito próximos, especialmente para Re_v superior a 2×10^5 .

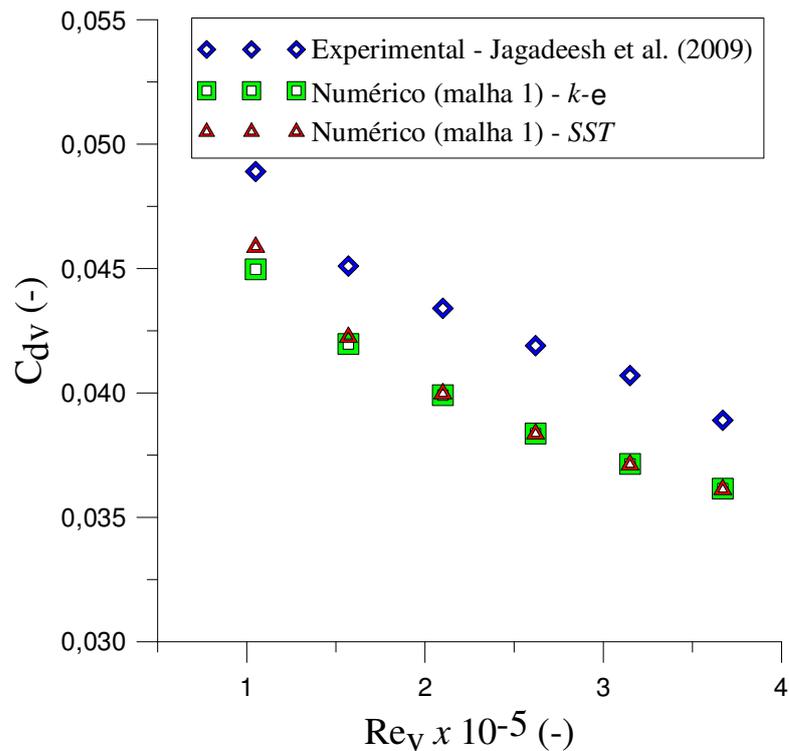


Figura 4.1 – Coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 1 em função do número de Reynolds volumétrico.

A Tabela 4.3 traz os resultados obtidos para a malha 2 (casos 13 a 24). Verifica-se comportamento similar ao visto para a malha 1, porém com redução geral dos desvios, quando comparados aos resultados obtidos com a malha 1.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos para a malha 2.

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} experimental* (-)	C _{dv} numérico (SST) (-)	C _{dv} numérico (k-ε) (-)	Desvio entre C _{dv} numérico (SST) e experimental (%)	Desvio entre C _{dv} numérico (k-ε) e experimental (%)
0,4	6,27	1,05	0,0489	0,0460	0,0450	5,9	8,1
0,6	9,41	1,57	0,0451	0,0424	0,0421	6,0	6,8
0,8	12,55	2,10	0,0434	0,0401	0,0400	7,6	7,7
1,0	15,68	2,62	0,0419	0,0385	0,0385	8,1	8,1
1,2	18,82	3,15	0,0407	0,0372	0,0373	8,5	8,3
1,4	21,96	3,67	0,0389	0,0362	0,0363	6,8	6,6

* Dados obtidos de Jagadeesh et al. (2009)

A Figura 4.2 traz os coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 2 em função do número de Reynolds volumétrico. Verifica-se comportamento similar ao observado para a malha 1.

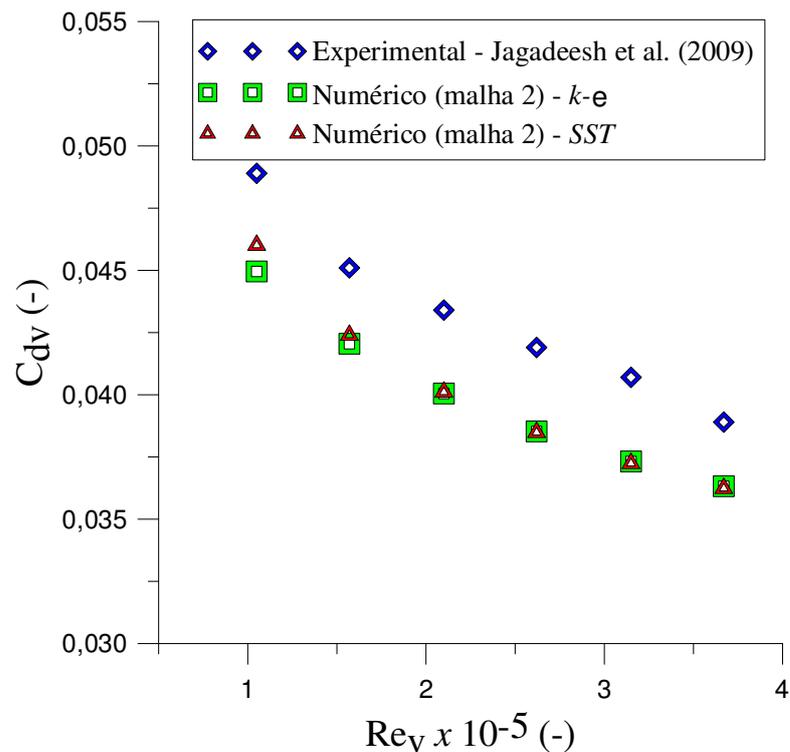


Figura 4.2 – Coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 2 em função do número de Reynolds volumétrico.

A Tabela 4.4 traz os resultados obtidos para a malha 3 (casos 25 a 36). Verifica-se comportamento similar ao visto para as malhas 1 e 2, porém com aumento geral dos desvios, quando comparados aos resultados obtidos com essas malhas.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos para a malha 3.

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} experimental* (-)	C _{dv} numérico (SST) (-)	C _{dv} numérico (k-ε) (-)	Desvio entre C _{dv} numérico (SST) e experimental (%)	Desvio entre C _{dv} numérico (k-ε) e experimental (%)
0,4	6,27	1,05	0,0489	0,0457	0,0445	6,5	8,9
0,6	9,41	1,57	0,0451	0,0421	0,0417	6,7	7,6
0,8	12,55	2,10	0,0434	0,0398	0,0397	8,3	8,6
1,0	15,68	2,62	0,0419	0,0382	0,0382	8,9	8,9
1,2	18,82	3,15	0,0407	0,0369	0,0370	9,3	9,2
1,4	21,96	3,67	0,0389	0,0359	0,0360	7,7	7,5

* Dados obtidos de Jagadeesh et al. (2009)

A Figura 4.3 traz os coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 3 em função do número de Reynolds volumétrico. Verifica-se comportamento similar ao visto para as malhas 1 e 2.

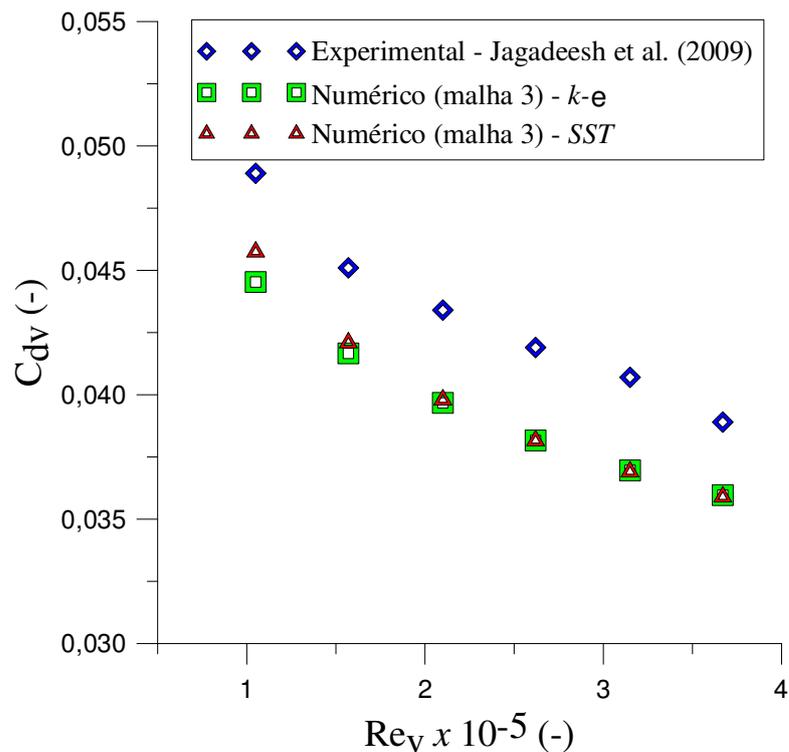


Figura 4.3 – Coeficientes de arrasto experimentais e numéricos obtidos para a malha 3 em função do número de Reynolds volumétrico.

A Tabela 4.5 e a Figura 4.4 trazem os desvios máximos e médios obtidos entre os casos numéricos e experimentais, para as três malhas analisadas (casos 1 a 36). Verifica-se que todas as malhas apresentaram ambos os tipos de desvios abaixo de 10%, no tocante ao coeficiente de arrasto volumétrico, sendo este o critério adotado neste trabalho para aceitação das simulações como representativas do fenômeno estudado.

Tabela 4.5 – Desvios entre os coeficientes de arrasto volumétricos obtidos experimentalmente* e numericamente.

Malha	Desvio entre C_{av} numérico ($k-\epsilon$) e experimental* (%)		Desvio entre C_{av} numérico (SST) e experimental* (%)	
	Máximo	Médio	Máximo	Médio
1	8,7	7,9	8,8	7,5
2	8,3	7,6	8,5	7,2
3	9,2	8,5	9,3	7,9

* Dados obtidos de Jagadeesh et al. (2009)

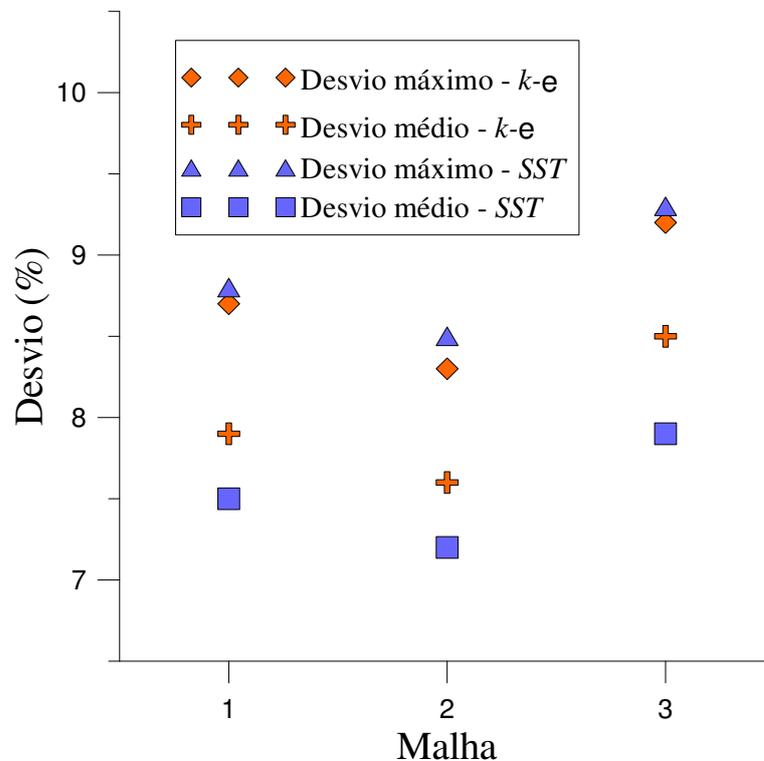


Figura 4.4 – Desvios máximos e médios obtidos entre os casos numéricos e experimentais, para as três malhas analisadas.

Observa-se também que a malha 2, de refinamento intermediário, foi a que apresentou menores desvios, inclusive quando comparada com a malha mais refinada (malha 3). Esse fenômeno pode ter se dado em virtude do incremento na quantidade de elementos da malha 3, quando comparada com as malhas 1 e 2, gerar maiores erros numéricos, em virtude da maior complexidade para solução dos sistemas de equações algébricas, mostrando que o aumento da quantidade de volumes de controle da malha numérica não acarreta necessariamente em melhores resultados.

Outro ponto relevante é visto quando o modelo de turbulência SST é comparado ao k- ϵ . O SST apresentou desvios máximos levemente superiores aos observados para o k- ϵ , porém os desvios médios foram consideravelmente inferiores.

As Tabelas 4.6 a 4.8 trazem resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para as malhas 1 a 3 (casos 1 a 36). Observa-se que os casos simulados em todas as malhas apresentaram comportamento similar, independente do modelo de turbulência adotado, onde o critério primário de convergência (resíduos RMS na solução das equações inferior a 10^{-5}) só foi atingido para as simulações com mais altas velocidades (1,4 m/s). Entretanto, em todos os casos o C_{dv} convergiu para um valor praticamente constante por volta da 30ª iteração (Figura 4.5), denotando que mesmo não se tendo atingido o critério primário de convergência, o arrasto sobre o AUV convergiu. Vale destacar que o fato de apenas as simulações com mais altas velocidades, e conseqüentemente maiores números de Reynolds, atenderem ao critério primário de convergência pode ser explicado pelo fato da consideração de camada-limite totalmente turbulenta se adequar melhor a esta situação.

No tocante ao tempo de simulação, o mesmo se mostrou praticamente constante para as simulações com velocidades entre 0,4 e 1,2 m/s, para cada malha, apresentando acréscimo no tempo médio de simulação proporcional ao número de volumes de controle da malha em questão (Tabela 4.9, onde a malha 1 é a referência). Para os casos com velocidade de 1,4 m/s, o tempo de simulação foi em torno de 6 vezes inferior aos demais casos, com menores velocidades de escoamento, mostrando que a modelagem numérica-matemática apresenta melhor condição de convergência para mais altas velocidades de escoamento.

Tabela 4.6 – Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 1.

U (m/s)	Re x 10^{-5} (-)	Re _v x 10^{-5} (-)	Modelo de turbulência k-ε			Modelo de turbulência SST		
			Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)	Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)
0,4	6,27	1,05	Não	300	36	Não	300	36
0,6	9,41	1,57	Não	300	34	Não	300	36
0,8	12,55	2,10	Não	300	34	Não	300	38
1,0	15,68	2,62	Não	300	36	Não	300	38
1,2	18,82	3,15	Não	300	34	Não	300	38
1,4	21,96	3,67	Sim	45	6	Sim	43	6

Tabela 4.7 – Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 2.

U (m/s)	Re x 10^{-5} (-)	Re _v x 10^{-5} (-)	Modelo de turbulência k-ε			Modelo de turbulência SST		
			Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)	Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)
0,4	6,27	1,05	Não	300	43	Não	300	44
0,6	9,41	1,57	Não	300	41	Não	300	44
0,8	12,55	2,10	Não	300	41	Não	300	43
1,0	15,68	2,62	Não	300	45	Não	300	43
1,2	18,82	3,15	Não	300	43	Não	300	43
1,4	21,96	3,67	Sim	43	7	Sim	43	7

Tabela 4.8 – Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 3.

U (m/s)	Re x 10^{-5} (-)	Re _v x 10^{-5} (-)	Modelo de turbulência k-ε			Modelo de turbulência SST		
			Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)	Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)
0,4	6,27	1,05	Não	300	52	Não	300	53
0,6	9,41	1,57	Não	300	51	Não	300	53
0,8	12,55	2,10	Não	300	51	Não	300	53
1,0	15,68	2,62	Não	300	51	Não	300	52
1,2	18,82	3,15	Não	300	49	Não	300	52
1,4	21,96	3,67	Sim	47	8	Sim	46	9

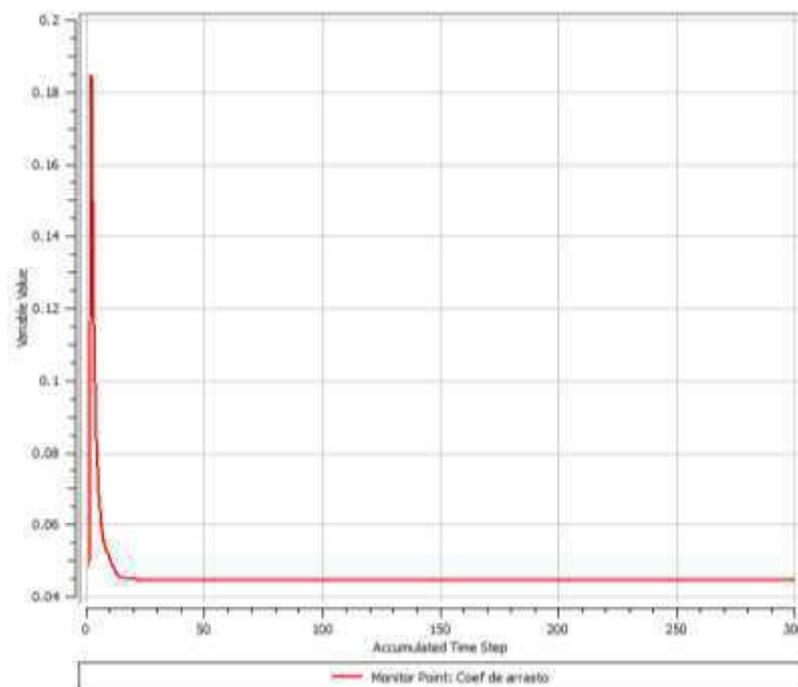


Figura 4.5 – Curva de convergência do coeficiente de arrasto volumétrico para o caso 19.

Tabela 4.9 – Tempo de simulação para os casos com velocidade de escoamento entre 0,2 e 1,2 m/s.

Malha	f (%) (Equação 3.17)	Tempo médio de simulação (min)	Tempo médio de simulação normalizado (%)
1	0	36	100
2	24	43	119
3	46	52	144

Baseando-se em todos os resultados expostos, comprova-se que a modelagem numérica-matemática utilizada no presente trabalho representa bem o fenômeno do escoamento ao redor do AUV (sem lemes) analisado, para a faixa do número de Reynolds avaliada. Baseando-se nos desvios entre os coeficientes de arrasto volumétricos obtidos experimentalmente e numericamente, conclui-se que a malha 2, de refinamento intermediário, foi a ideal, dentre as simuladas. Esse padrão de refinamento de malha foi utilizado nas demais simulações abordadas nas próximas seções da presente dissertação.

4.2 AUV com Superfícies de Controle

A malha 4, utilizada nas simulações do AUV com suas superfícies de controle (lemes), possui 1.012.855 elementos, dentre tetraedros e prismas, e apresenta valores de y^+ em torno de 8. Mesmo tendo seu refinamento baseado na malha 2 (que possui 454.950 elementos), a malha 4 tem mais que o dobro do número de volumes de controle da primeira, em virtude do incremento considerável na área superficial do veículo (29%) devido aos lemes, o que demandou grande quantidade de elementos prismáticos adicionais próximos às superfícies destes (ver *seção 3.5*).

A Tabela 4.10 traz os resultados obtidos para a malha 4 (casos 37 a 42), tendo sido utilizado nas simulações o modelo de turbulência SST, que representou bem o escoamento ao redor do AUV sem lemes. Destaca-se ainda que o volume de referência utilizado para cálculo do C_{dv} foi o volume do casco do AUV, visando padronização com os dados analisados na *seção 4.1*, sendo esse padrão utilizado no restante do presente trabalho. Foram comparados os resultados obtidos via simulação numérica com uma aproximação obtida mediante a soma do coeficiente de arrasto do casco do AUV, obtido experimentalmente, com o coeficiente de arrasto dos lemes, modelados, de forma simplificada, como placas planas (ver Equação 2.7 mostrada na *seção 2.4*).

Tabela 4.10 – Resultados obtidos para a malha 4.

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	Modelagem simplificada: C _{dv} do casco (experimental)* + C _{dv} dos lemes (placas planas) (-)	C _{dv} numérico (SST) (-)	Desvio (%)
0,4	6,27	1,05	0,0674	0,0896	25
0,6	9,41	1,57	0,0622	0,0831	25
0,8	12,55	2,10	0,0595	0,0793	25
1,0	15,68	2,62	0,0573	0,0770	26
1,2	18,82	3,15	0,0556	0,0753	28
1,4	21,96	3,67	0,0533	0,0740	28

* Dados obtidos de Jagadeesh et al. (2009)

Verifica-se que houve um desvio médio de 26% entre os resultados obtidos com a modelagem simplificada (combinação experimental-empírica) e os obtidos numericamente. Esse incremento no arrasto obtido via simulação é justificado pelo fato de ser esperado que o

arrasto do conjunto casco-lemes seja superior ao do casco e dos lemes isolados, visto que as superfícies de controle perturbam o escoamento ao redor do casco, e vice-versa, incrementando o arrasto total do AUV. Além disso, em virtude da modelagem simplificada considerar os lemes como placas planas, a parcela do arrasto de pressão gerado sobre os mesmos foi considerada nula, gerando assim um decremento no arrasto total previsto por esta modelagem.

A Figura 4.6 traz os coeficientes de arrasto volumétricos obtidos numericamente e mediante modelagem simplificada em função do número de Reynolds volumétrico. Verifica-se um comportamento decrescente desse coeficiente com o aumento do número de Reynolds volumétrico para ambas as situações, existindo maiores gradientes para mais baixos números de Reynolds.

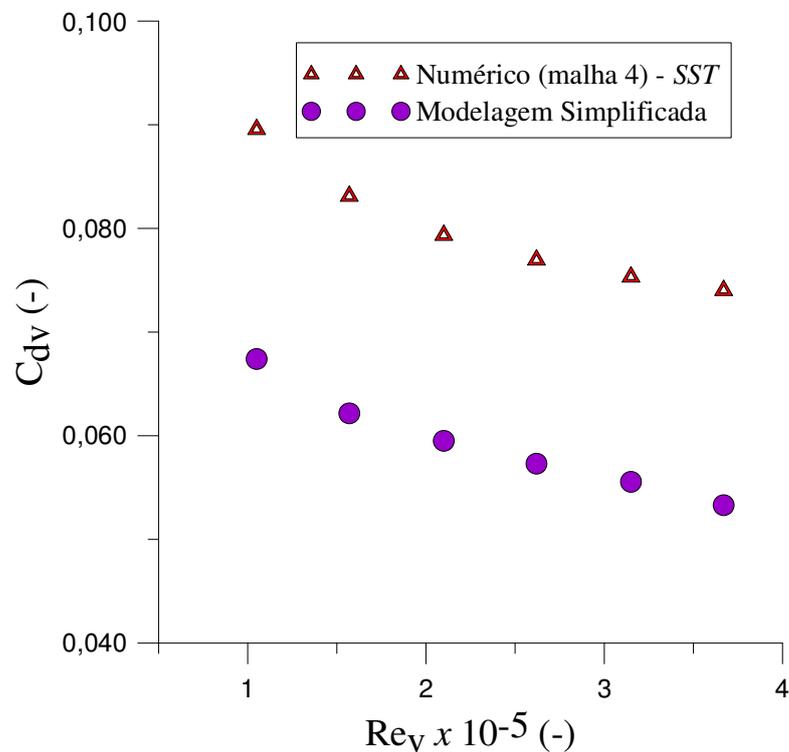


Figura 4.6 – Coeficientes de arrasto obtidos numericamente e mediante modelagem simplificada, para a malha 4, em função do número de Reynolds volumétrico.

Diante disso, considerou-se que a modelagem numérica-matemática utilizada nas simulações foi representativa do fenômeno do escoamento ao redor do AUV com superfícies de controle.

A Tabela 4.11 traz resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 4. Observa-se que o critério primário de convergência (resíduos RMS na solução das equações inferior a 10^{-5}) só foi atingido para as simulações com mais altas velocidades (1,2 e 1,4 m/s). Entretanto, em todos os casos o C_{dv} convergiu para um valor praticamente constante por volta da 30ª iteração (Figura 4.7), denotando que, mesmo não se tendo atingido o critério primário de convergência, o coeficiente de arrasto volumétrico do AUV com superfícies de controle convergiu.

Tabela 4.11 – Resultados referentes à convergência das soluções dos casos analisados para a malha 4.

U (m/s)	Re x 10^{-5} (-)	Re _v x 10^{-5} (-)	Modelo de turbulência SST		
			Critério dos resíduos atingido?	Quantidade de iterações	Tempo de simulação (min)
0,4	6,27	1,05	Não	300	100
0,6	9,41	1,57	Não	300	102
0,8	12,55	2,10	Não	300	100
1,0	15,68	2,62	Não	300	99
1,2	18,82	3,15	Sim	68	24
1,4	21,96	3,67	Sim	66	23

No tocante ao tempo de simulação, o mesmo se mostrou praticamente constante para as simulações com velocidades entre 0,4 e 1,0 m/s. Com relação aos casos com velocidade de 1,2 e 1,4 m/s, o tempo de simulação foi em torno de 4 vezes inferior aos demais casos, com menores velocidades de escoamento, mostrando que a modelagem numérica-matemática apresenta melhor condição de convergência para mais altas velocidades de escoamento.

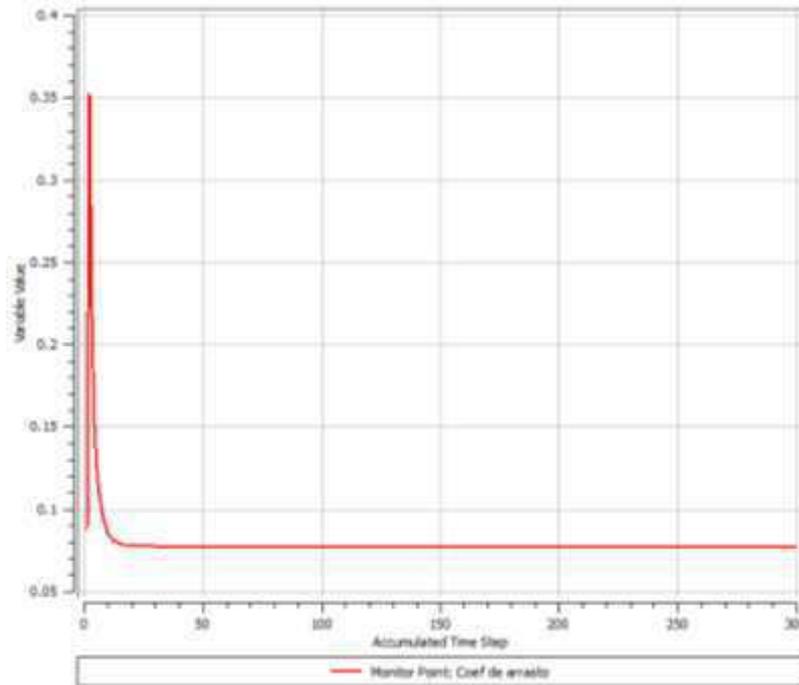


Figura 4.7 – Curva de convergência do coeficiente de arrasto volumétrico para o caso 40.

4.3 Análise Comparativa do AUV com e sem Superfícies de Controle

As Tabelas 4.12 e 4.13, a Figura 4.8 e as Equações 4.1 e 4.2 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto volumétricos obtidos para o AUV com e sem suas superfícies de controle (lemes), em função do número de Reynolds volumétrico (casos 13 a 18 e 37 a 42). Verifica-se um comportamento decrescente do coeficiente de arrasto volumétrico com o aumento do número de Reynolds volumétrico para ambas as situações, existindo, entretanto, maiores gradientes, principalmente para mais baixos números de Reynolds volumétricos, no caso do AUV com lemes. Verifica-se ainda que o coeficiente de arrasto volumétrico para o AUV com lemes foi aproximadamente o dobro dos casos sem lemes, mostrando que o uso das superfícies de controle tem forte impacto no arrasto total do veículo.

Verificou-se, para a situação do AUV sem lemes, que as parcelas do arrasto total devido à pressão e ao atrito foram, em média, respectivamente, 12,5% e 87,5%. Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Sousa (2012), que verificou numericamente, utilizando o modelo de turbulência SST, que as parcelas referentes ao arrasto de pressão e atrito, para um casco de AUV tipo torpedo com razão $L_t/D = 9$ e número de Reynolds da ordem de 10^6 , foram em média de 15% e 85%.

Tabela 4.12 – Resultados obtidos para o AUV sem superfícies de controle (lemes)

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} (-)	C _{d_{pv}} (-)	C _{d_{pv}} / C _{dv} (%)	C _{d_{fv}} (-)	C _{d_{fv}} / C _{dv} (%)
0,4	6,27	1,05	0,0460	0,0055	12,0	0,0405	88,0
0,6	9,41	1,57	0,0424	0,0052	12,2	0,0372	87,8
0,8	12,55	2,10	0,0401	0,0050	12,4	0,0351	87,6
1,0	15,68	2,62	0,0385	0,0049	12,6	0,0336	87,4
1,2	18,82	3,15	0,0372	0,0048	12,8	0,0325	87,2
1,4	21,96	3,67	0,0362	0,0047	12,9	0,0315	87,1

Tabela 4.13 – Resultados obtidos para o AUV com superfícies de controle (lemes)

U (m/s)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	Re _v x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} (-)	C _{d_{pv}} (-)	C _{d_{pv}} / C _{dv} (%)	C _{d_{fv}} (-)	C _{d_{fv}} / C _{dv} (%)
0,4	6,27	1,05	0,0896	0,0359	40,1	0,0536	59,9
0,6	9,41	1,57	0,0831	0,0343	41,3	0,0488	58,7
0,8	12,55	2,10	0,0793	0,0335	42,3	0,0458	57,7
1,0	15,68	2,62	0,0770	0,0331	43,0	0,0439	57,0
1,2	18,82	3,15	0,0753	0,0328	43,6	0,0425	56,4
1,4	21,96	3,67	0,0740	0,0326	44,0	0,0414	56,0

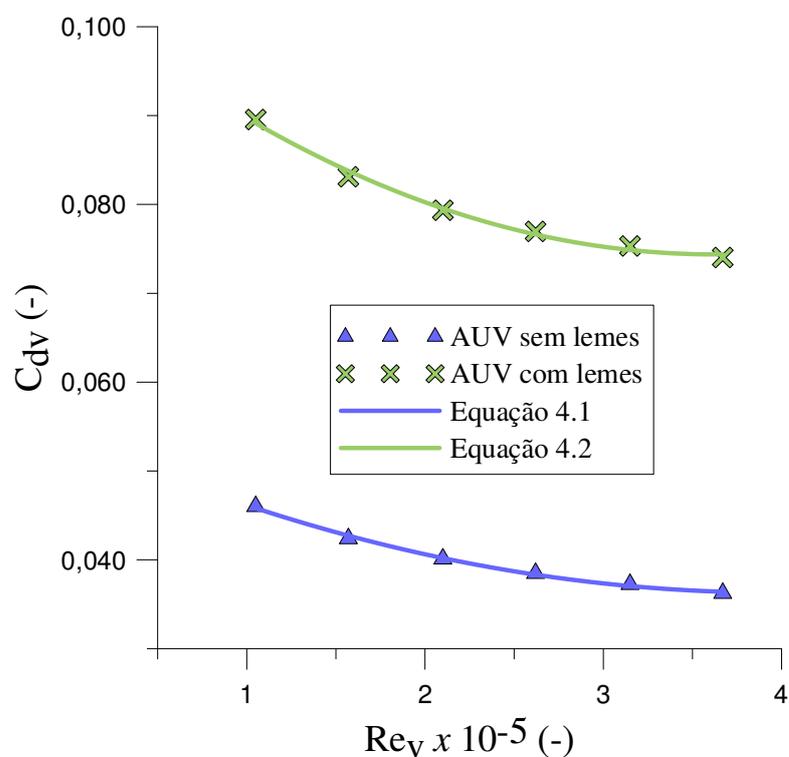


Figura 4.8 – Comparação dos coeficientes de arrasto volumétricos obtido para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico.

$$C_{dv} = 0,0539 - 0,0089(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0011(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.1)$$

onde R^2 foi de 99,63%.

$$C_{dv} = 0,1036 - 0,0161(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0022(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.2)$$

onde R^2 foi de 99,34%.

Jagadeesh et al. (2009) verificaram, também numericamente, utilizando o modelo de turbulência k- ϵ , que as parcelas referentes ao arrasto de pressão e atrito, para o mesmo casco de AUV e a mesma faixa de número de Reynolds analisados na presente dissertação, foram em média de 15% e 85%, respectivamente. Esses dados também são compatíveis com os obtidos neste trabalho, corroborando para a validação da modelagem apresentada nesta pesquisa.

Stevenson et al. (2007) afirmaram que, em média, a parcela do arrasto total de um AUV devido aos lemes é de 10%. Entretanto tal valor depende fortemente de vários parâmetros, tais como a geometria do casco do AUV, a forma e o posicionamento dos lemes e o número de Reynolds do escoamento. Para essa dissertação verificou-se que a parcela do arrasto total do AUV referente aos seus lemes foi em média de 50%, acima da esperada, porém justificada pelo tipo (retangular) e pelas grandes dimensões relativas dos lemes utilizados, além da baixa faixa de velocidade de escoamento. Pelo exposto, fica evidente que o arrasto adicional máximo gerado pelos lemes de um AUV pode ser entendido como um requisito de projeto, onde, visando sua minimização, pode-se fazer uso de diversas abordagens sobre os lemes do veículo, tais como a mudança do seu perfil, do seu tipo, da sua quantidade e posição, da sua corda média, dentre outras.

A Figura 4.9 e as Equações 4.3 e 4.4 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtidos para o AUV com e sem lemes, em função do número de Reynolds volumétrico (casos 13 a 18 e 37 a 42). Verifica-se um comportamento praticamente constante desse coeficiente, para o AUV sem e com lemes, onde, para essa última situação, o mesmo é quase 7 vezes superior. Isso se dá em virtude do aumento da área frontal do veículo em 68%, o que gera um incremento na separação do escoamento e

consequente aumento da região de esteira. Além disso, verifica-se que o percentual médio do arrasto de pressão em relação ao arrasto total do veículo subiu de 12,5% para 42,4%, considerando o AUV com lemes.

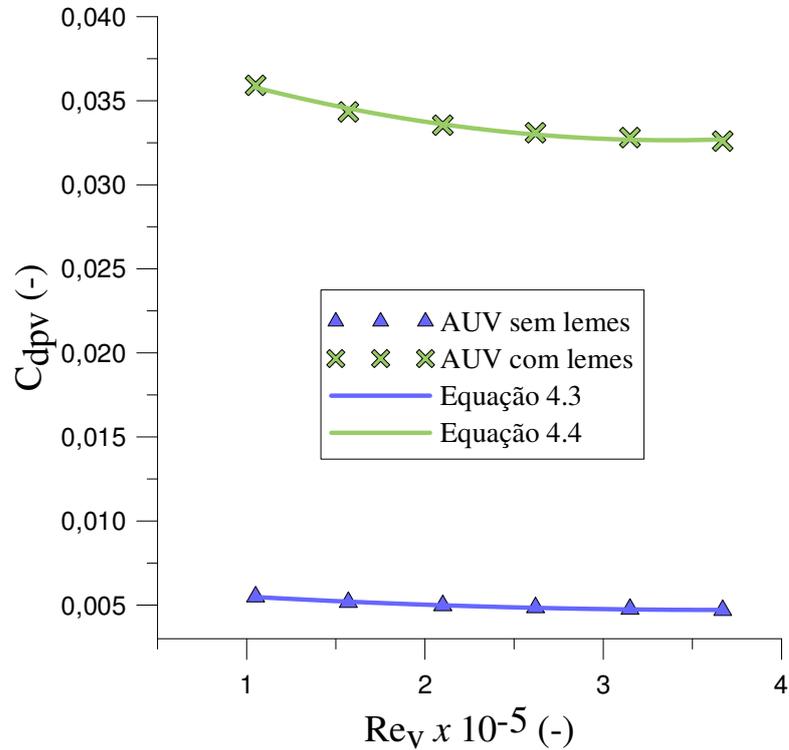


Figura 4.9 – Comparação dos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico.

$$C_{dpv} = 0,0062 - 0,0008(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0001(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.3)$$

onde R^2 foi de 99,32%.

$$C_{dpv} = 0,0392 - 0,0039(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0006(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.4)$$

onde R^2 foi de 98,67%.

A Figura 4.10 e as Equações 4.5 e 4.6 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV com e sem lemes, em função do número de Reynolds volumétrico (casos 13 a 18 e 37 a 42). Verifica-se um comportamento

decrecente do coeficiente de arrasto de atrito volumétrico, para o AUV sem e com lemes, onde, para essa última situação, o mesmo é cerca de 31% superior, em virtude do aumento da área molhada do veículo em 29%, o que incrementa a área sujeita às tensões de ordem viscosa geradas pelo escoamento. Além disso, verifica-se que o percentual médio do arrasto de atrito em relação ao arrasto total do veículo caiu de 87,5% para 57,6%, considerando o AUV com lemes.

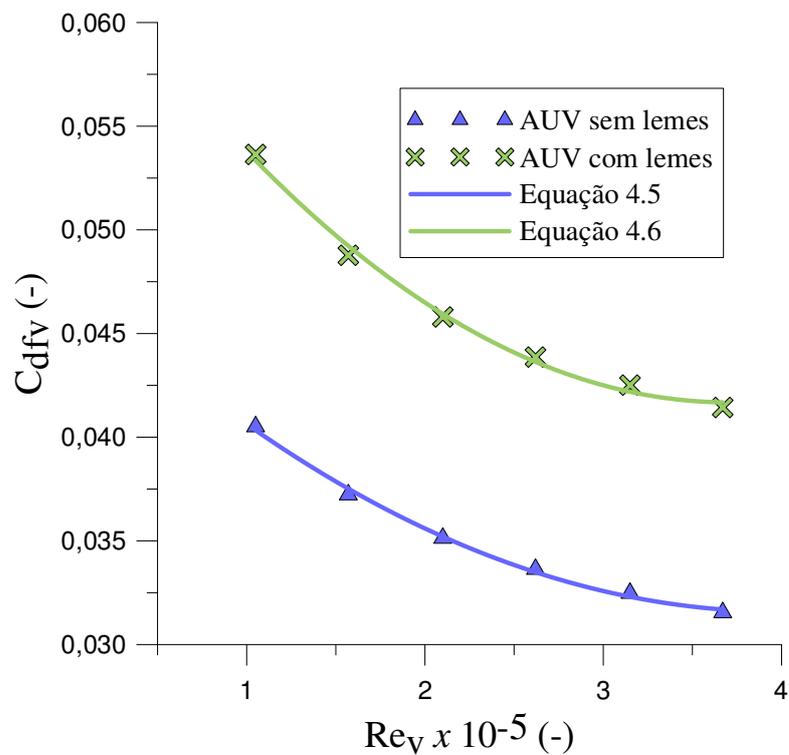


Figura 4.10 – Comparação dos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função do número de Reynolds volumétrico.

$$C_{dfv} = 0,0477 - 0,0081(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0010(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.5)$$

onde R^2 foi de 99,65%.

$$C_{dfv} = 0,0644 - 0,0123(Re_v \cdot 10^{-5}) + 0,0017(Re_v \cdot 10^{-5})^2 \quad (4.6)$$

onde R^2 foi de 99,49%.

As Tabelas 4.14 e 4.15, a Figura 4.11 e as Equações 4.7 e 4.8 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto volumétricos obtidos para o AUV sem e com suas superfícies de controle (lemes), em função da profundidade de operação do veículo, p^* , para uma velocidade de escoamento de 1,0 m/s (casos 43 a 48). Foi feita ainda a consideração de que o fluido utilizado nas simulações (água do mar) apresentaria suas propriedades constantes nas camadas de mistura (0 a 500 m) e de fundo (acima de 1.000 m), visto que são regiões praticamente isotérmicas. Verifica-se um comportamento crescente do coeficiente de arrasto volumétrico com a mudança das camadas oceânicas, devido ao aumento da profundidade, para ambas as situações, sendo mais predominante no caso do AUV com lemes. Isso se explica em virtude do aumento da viscosidade da água do mar, devido à queda considerável da temperatura à medida que se avança para as camadas oceânicas mais profundas.

Tabela 4.14 – Coeficientes de arrasto em função da profundidade de operação, obtidos para o AUV sem superfícies de controle (lemes).

p^* (m)	$Re \times 10^{-5}$ (-)	$Re_v \times 10^{-5}$ (-)	C_{dv} (-)	$C_{d_{pv}}$ (-)	$C_{d_{pv}}/C_{dv}$ (%)	$C_{d_{fv}}$ (-)	$C_{d_{fv}}/C_{dv}$ (%)
500	14,92	2,71	0,0399	0,0050	12,5	0,0349	87,5
750	11,68	2,12	0,0421	0,0053	12,6	0,0368	87,4
1.000	8,37	1,52	0,0447	0,0057	12,8	0,0390	87,2

Tabela 4.15 – Coeficientes de arrasto em função da profundidade de operação, obtidos para o AUV com superfícies de controle (lemes).

p^* (m)	$Re \times 10^{-5}$ (-)	$Re_v \times 10^{-5}$ (-)	C_{dv} (-)	$C_{d_{pv}}$ (-)	$C_{d_{pv}}/C_{dv}$ (%)	$C_{d_{fv}}$ (-)	$C_{d_{fv}}/C_{dv}$ (%)
500	14,92	2,71	0,0796	0,0341	42,8	0,0455	57,2
750	11,68	2,12	0,0830	0,0352	42,4	0,0477	57,6
1.000	8,37	1,52	0,0885	0,0363	41,0	0,0522	59,0

A Figura 4.12 e as Equações 4.9 e 4.10 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtido para o AUV sem e com suas superfícies de controle (lemes), em função da profundidade de operação do veículo, para as mesmas considerações operacionais supracitadas (casos 43 a 48). Verifica-se um comportamento praticamente constante do coeficiente de arrasto de pressão volumétrico com o aumento da profundidade de operação, para ambas as situações, mostrando que a mudança dessa profundidade tem pouca influência na variação do arrasto de pressão do veículo.

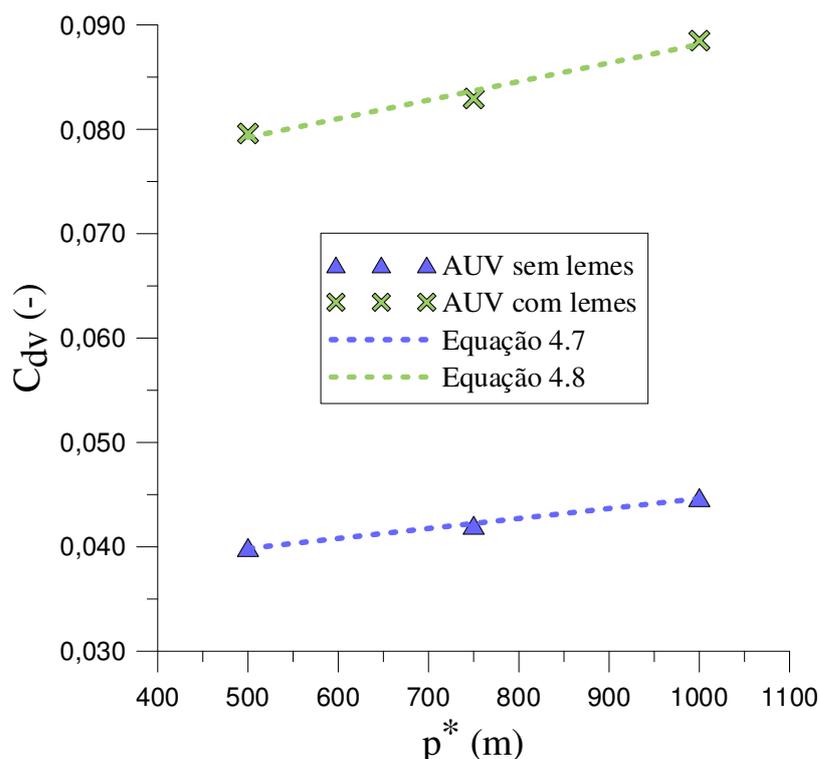


Figura 4.11 – Comparação dos coeficientes de arrasto volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação.

$$C_{dv} = 0,0351 + 0,0956(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.7)$$

onde R^2 foi de 99,61%.

$$C_{dv} = 0,0703 + 0,0178(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.8)$$

onde R^2 foi de 98,02%.

A Figura 4.13 e as Equações 4.11 e 4.12 trazem os resultados referentes aos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV sem e com suas superfícies de controle (lemes), em função da profundidade de operação do veículo, para as mesmas considerações operacionais supracitadas (casos 43 a 48). Verifica-se um comportamento crescente desse coeficiente com a mudança das camadas oceânicas, devido ao aumento da profundidade, para ambas as situações, sendo mais predominante no caso do AUV com lemes. Isso se explica em virtude do aumento da viscosidade da água do mar, devido à queda considerável da

temperatura à medida que se avança para as camadas oceânicas mais profundas, mostrando que a mudança na profundidade de operação tem grande influência na variação do arrasto de atrito do veículo.

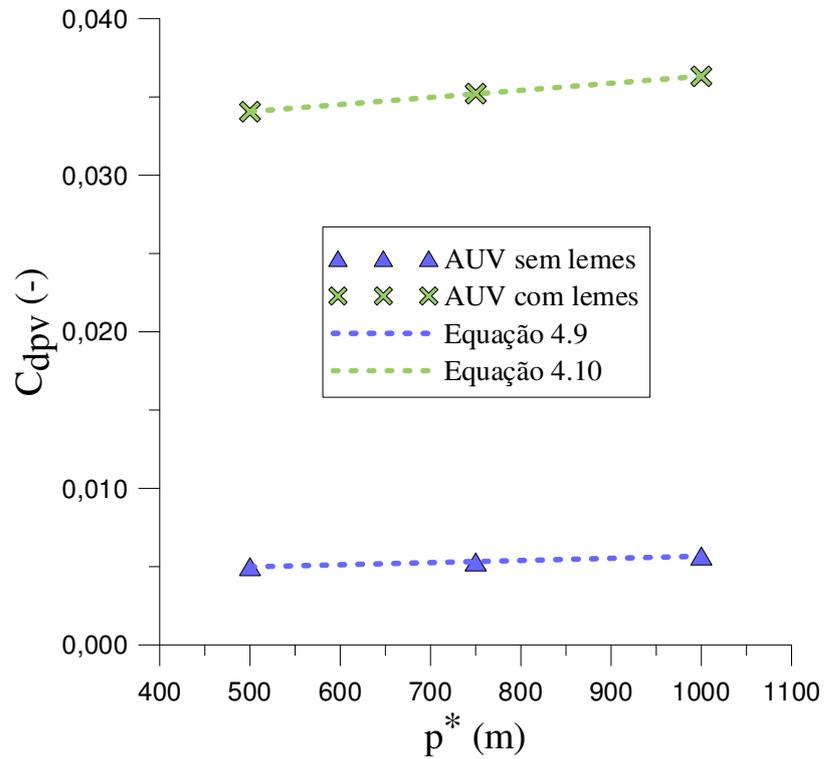


Figura 4.12 – Comparação dos coeficientes de arrasto de pressão volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação.

$$C_{dpv} = 0,0043 + 0,0137(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.9)$$

onde R^2 foi de 99,51%.

$$C_{dpv} = 0,0318 + 0,0452(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.10)$$

onde R^2 foi de 99,98%.

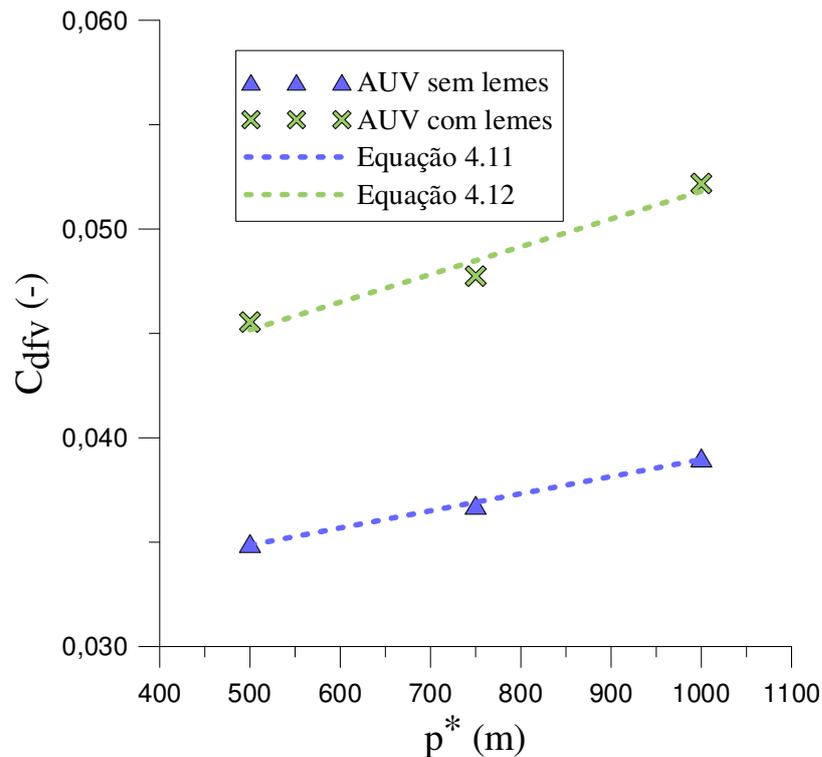


Figura 4.13 – Comparação dos coeficientes de arrasto de atrito volumétricos obtidos para o AUV sem e com lemes em função da profundidade de operação.

$$C_{dfv} = 0,0308 + 0,0820(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.11)$$

onde R^2 foi de 99,63%.

$$C_{dfv} = 0,0385 + 0,1327(p^* \cdot 10^{-4}) \quad (4.12)$$

onde R^2 foi de 96,34%.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 são apresentados, respectivamente, os campos de pressão absoluta obtidos em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem e com suas superfícies de controle (lemes), para a profundidade de operação de 750 m (casos 44 e 47, nesta ordem). Verifica-se que esses campos apresentam zonas de alta pressão na ponta da proa do veículo e zonas de baixa pressão na transição das superfícies de suavização da proa para o núcleo cilíndrico, para ambos os casos. Verifica-se ainda que no caso do AUV com lemes existem zonas de alta pressão adicionais nos bordos de ataque dos mesmos, bem como

zonas de baixa pressão adicionais nas pontas dos lemes (Figura 4.16). Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

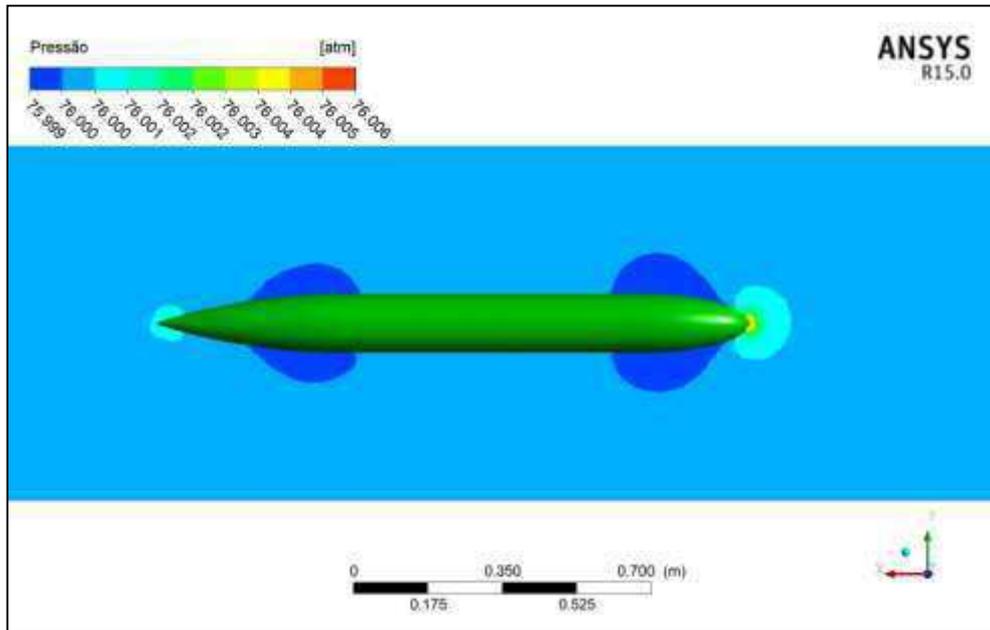


Figura 4.14 – Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem lemes, para profundidade de operação de 750 m.

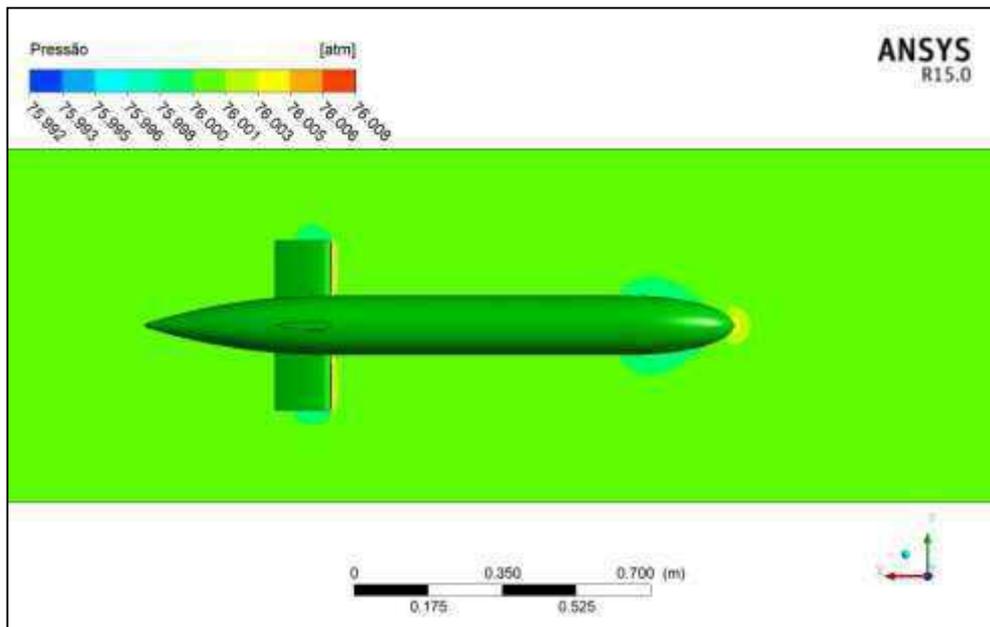


Figura 4.15 – Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

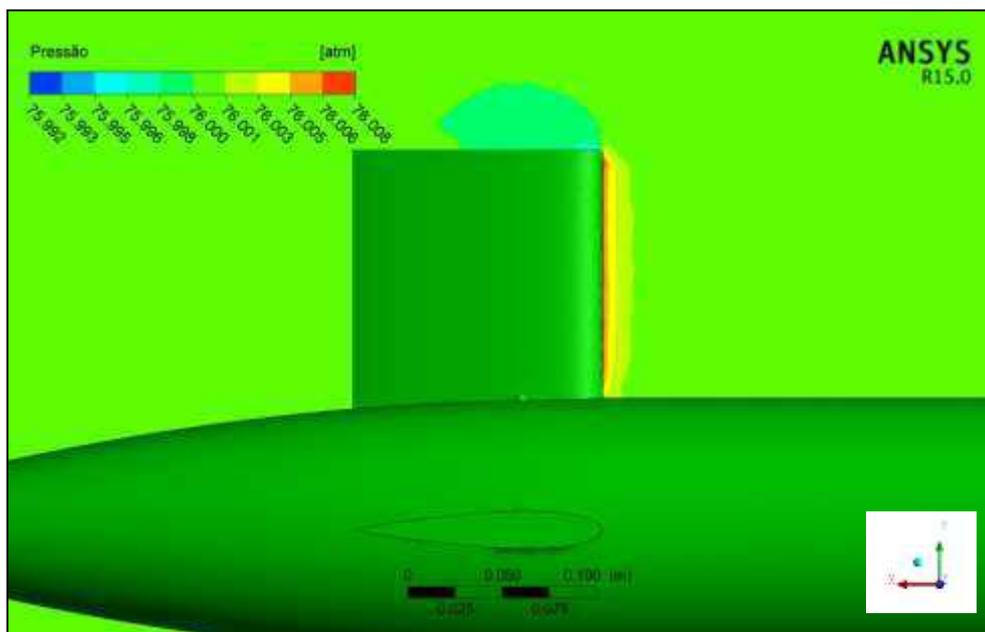


Figura 4.16 – Detalhe do campo de pressão absoluta ao redor de um dos lemes, obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV, para profundidade de operação de 750 m.

Na Figura 4.17 é representado o campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com suas superfícies de controle, para a profundidade de operação de 750 m (caso 47). Esse plano intercepta transversalmente todos os lemes do veículo. Verifica-se uma zona de baixa pressão ao redor de todo o veículo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

Na Figura 4.18 é representado o campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com suas superfícies de controle, para a profundidade de operação de 750 m (caso 47). Esse plano intercepta transversalmente um dos lemes do veículo. Verifica-se uma zona de alta pressão no bordo de ataque desse leme, bem como zonas de baixa pressão simétricas tanto no intradorso, quanto no extradorso do perfil, fato fisicamente esperado, visto que o perfil NACA0015 é simétrico e o AUV se desloca com ângulo de ataque nulo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

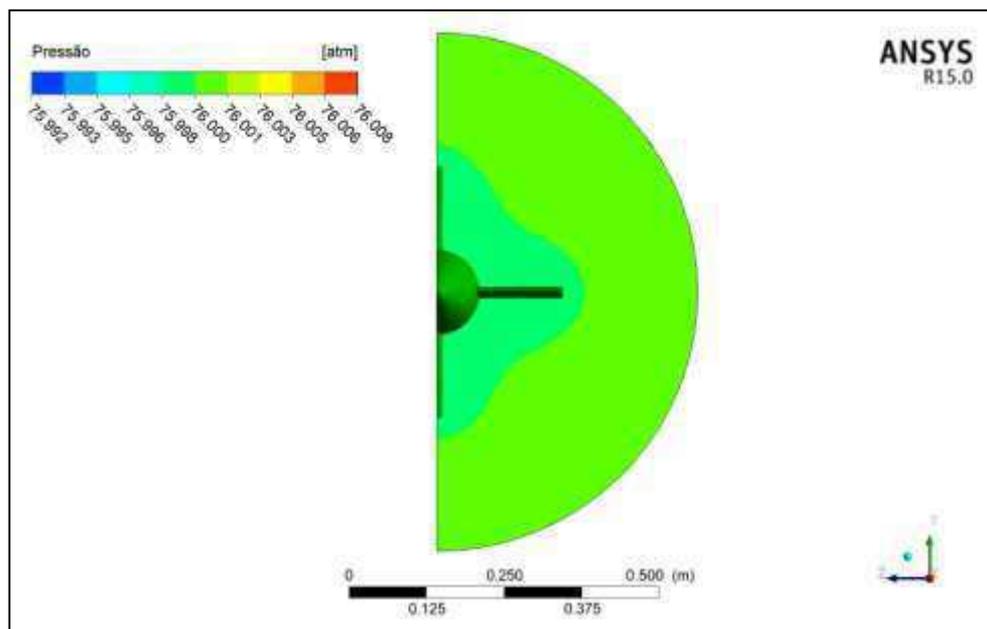


Figura 4.17 – Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

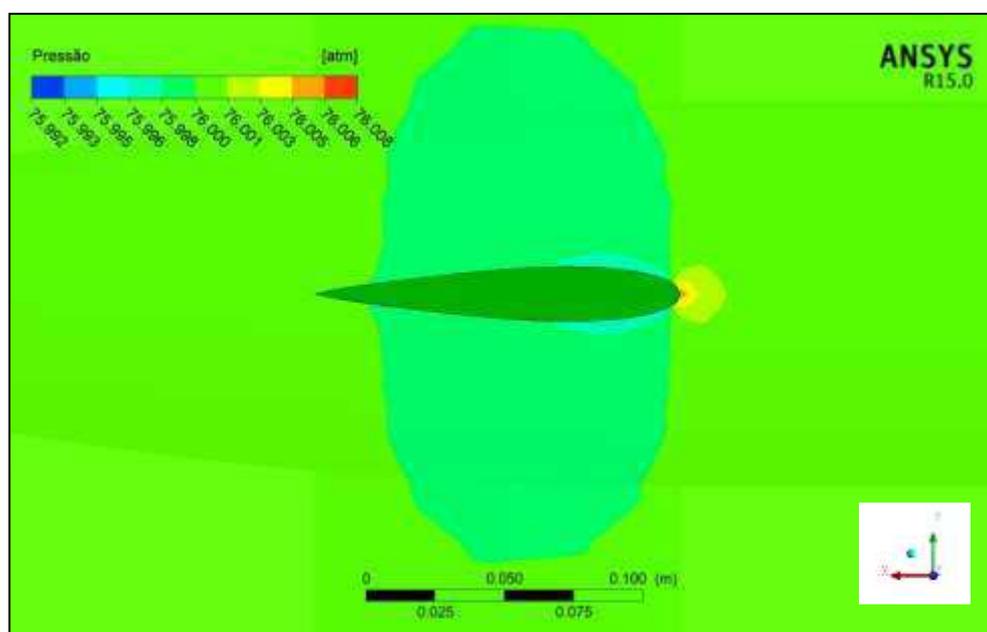


Figura 4.18 – Campo de pressão absoluta obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 são apresentados, respectivamente, os campos de velocidade obtidos em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem e com suas superfícies de controle (lemes), para a profundidade de operação de 750 m (casos 44 e 47,

nesta ordem). Verifica-se que esses campos apresentam zonas de baixa velocidade na ponta da proa do veículo, bem como na região de esteira a jusante da popa do mesmo. A ponta da proa do AUV é um ponto de estagnação, onde se verifica velocidade nula e pressão máxima no escoamento (76,006 e 76,008 atm, para o AUV sem e com lemes, respectivamente), conforme é apresentado na Figura 4.21. Verifica-se ainda que no caso do AUV com lemes o escoamento ao redor do veículo é consideravelmente mais perturbado, especialmente a jusante dos lemes. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

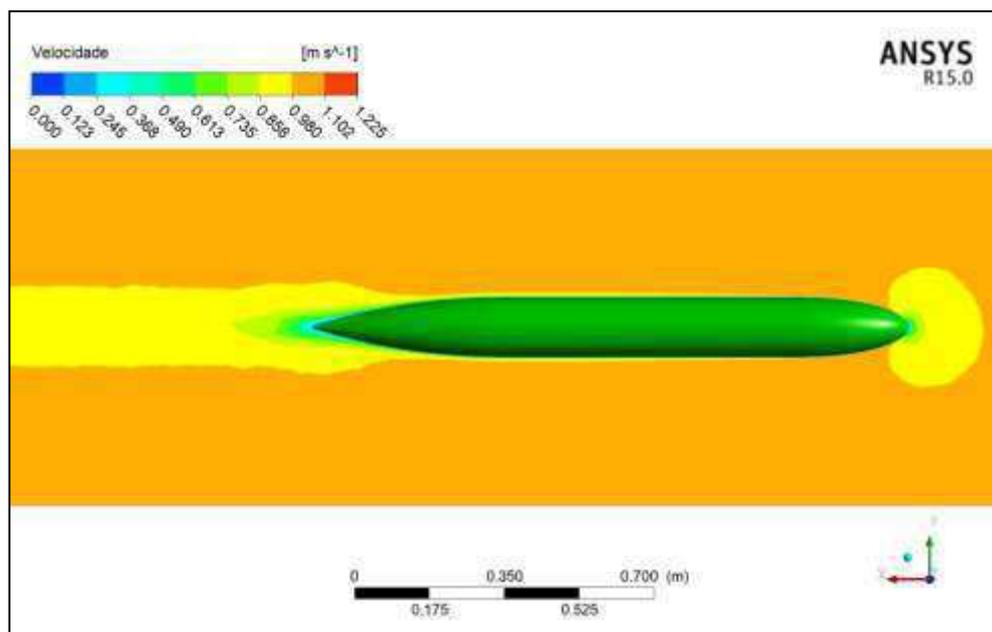


Figura 4.19 – Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV sem lemes, para profundidade de operação de 750 m.

Na Figura 4.22 é apresentado o campo de velocidade obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com superfícies de controle, para a profundidade de operação de 750 m (caso 47). Esse plano intercepta transversalmente todos os lemes do veículo. Verificam-se zonas de alta velocidade entre a raiz e a ponta dos lemes, sendo estas simétricas tanto no intradorso, quanto no extradorso desses lemes, fato fisicamente esperado, visto que o perfil NACA0015 é simétrico e o AUV se desloca com ângulo de ataque nulo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

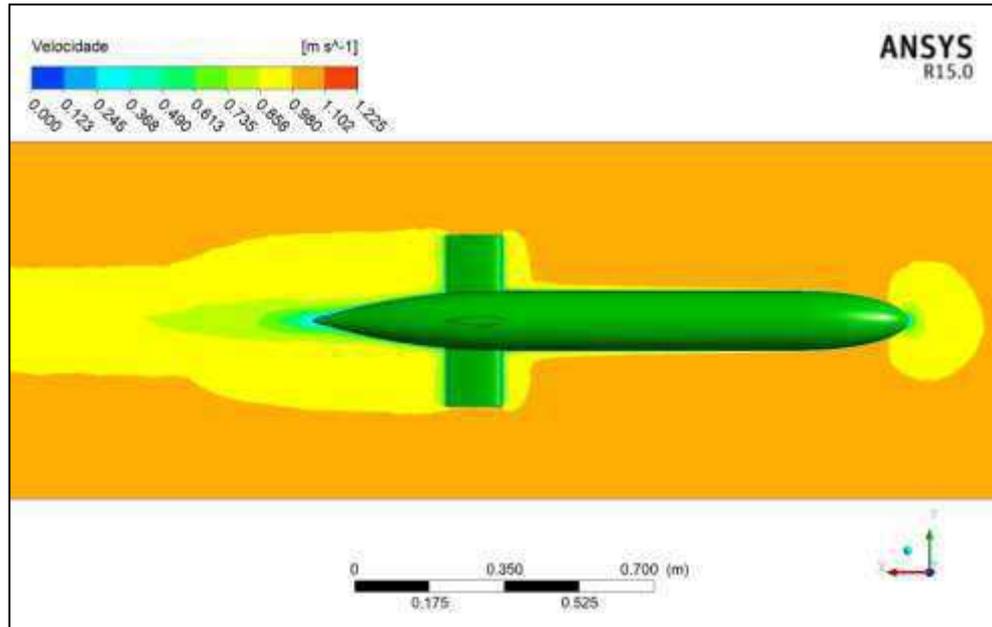


Figura 4.20 – Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

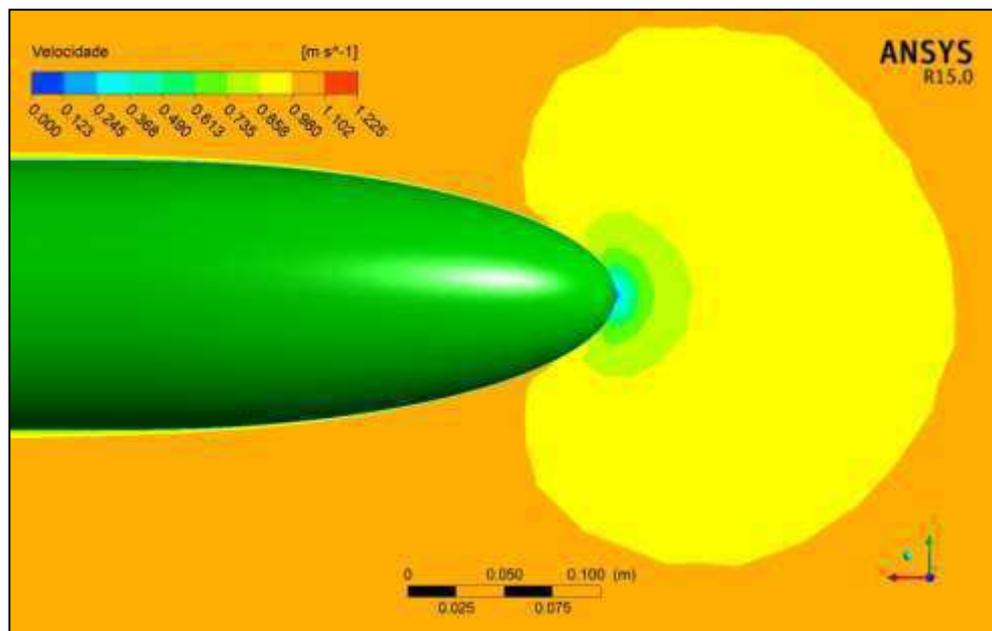


Figura 4.21 – Detalhe do Campo de velocidade na proa, obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

Na Figura 4.23 é apresentado o campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com suas superfícies de controle, para a

profundidade de operação de 750 m (caso 47). Esse plano intercepta transversalmente um dos lemes do veículo. Verificam-se zonas de baixa velocidade no bordo de ataque e na região de esteira desse leme, bem como zonas de alta velocidade simétricas tanto no intradorso, quanto no extradorso do perfil, fato fisicamente esperado, visto que o perfil NACA0015 é simétrico e o AUV se desloca com ângulo de ataque nulo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

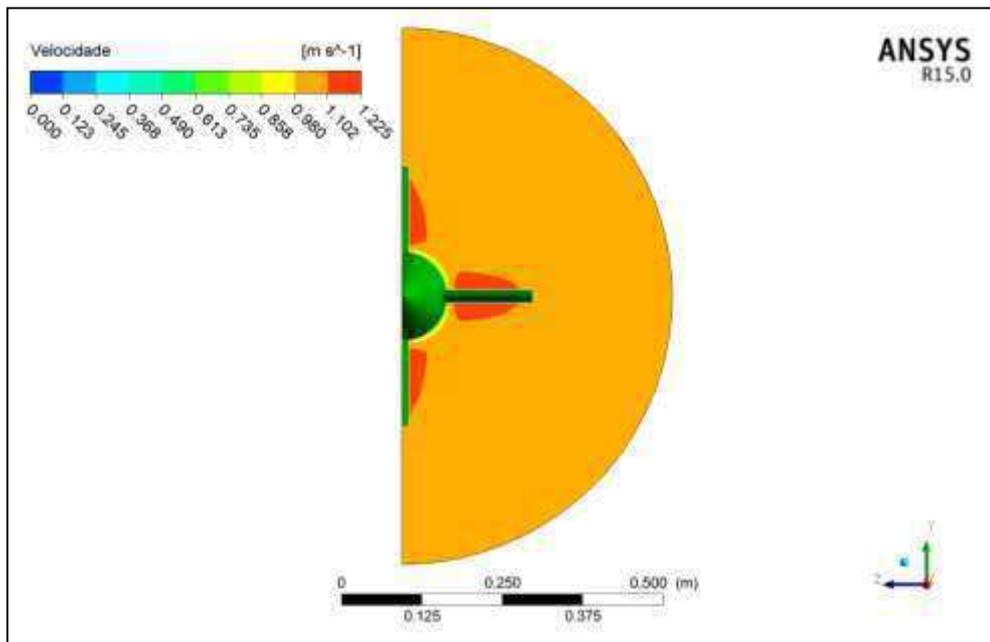


Figura 4.22 – Campo de velocidade obtido em um plano vertical YZ localizado a 0,4 m da ponta da popa do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 são apresentadas, respectivamente, as linhas de corrente obtidas em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com superfícies de controle e em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV também com suas superfícies de controle, ambos para a profundidade de operação de 750 m (caso 47). Verifica-se que as linhas de corrente são bastante ordenadas ao redor do AUV, o que se deve à geometria hidrodinâmica do casco e dos lemes do veículo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

A Figuras 4.26 mostra o campo vetorial obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com superfícies de controle, para a profundidade de operação de

750 m (caso 47). Verifica-se uma pequena zona de recirculação à jusante da proa do veículo. Esse padrão foi verificado também nos casos simulados a 500 e 1.000 m de profundidade.

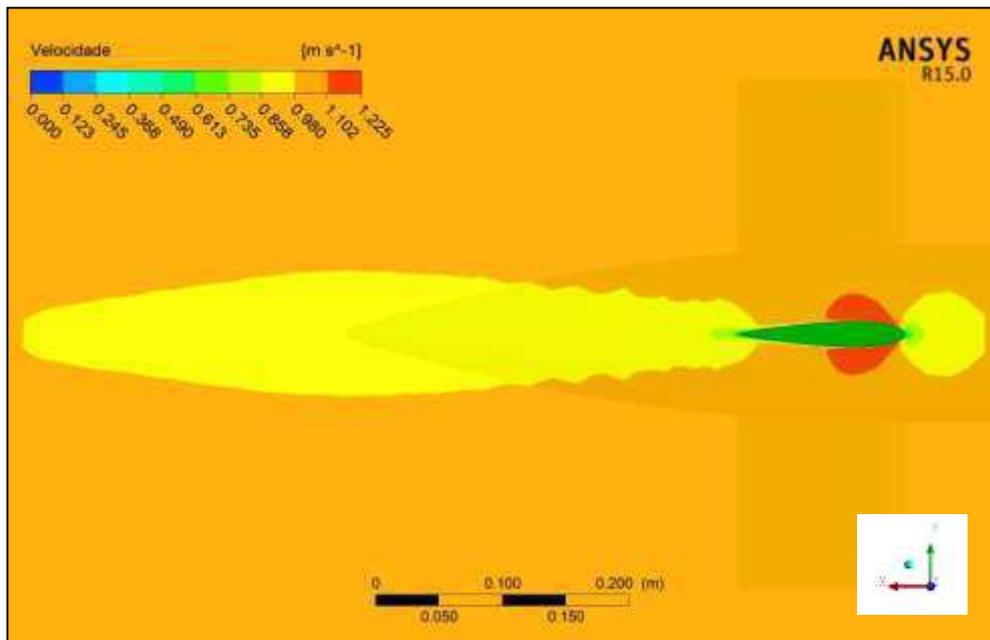


Figura 4.23 – Campo de velocidade obtido em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

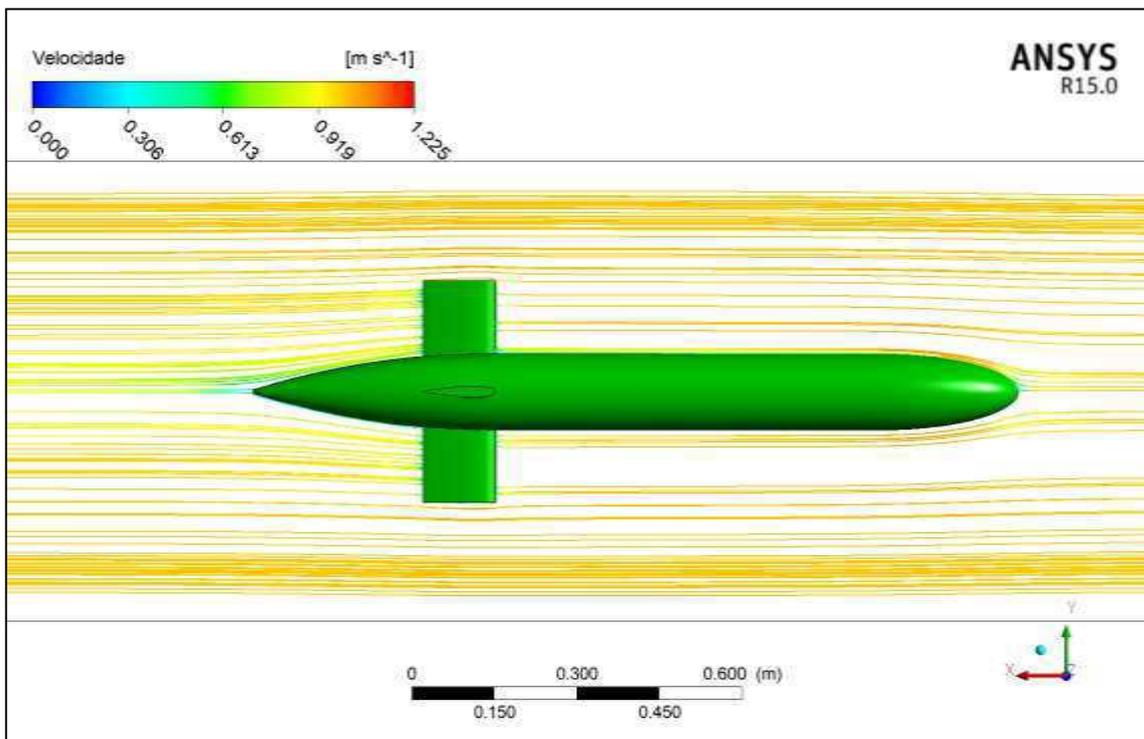


Figura 4.24 – Linhas de corrente obtidas em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

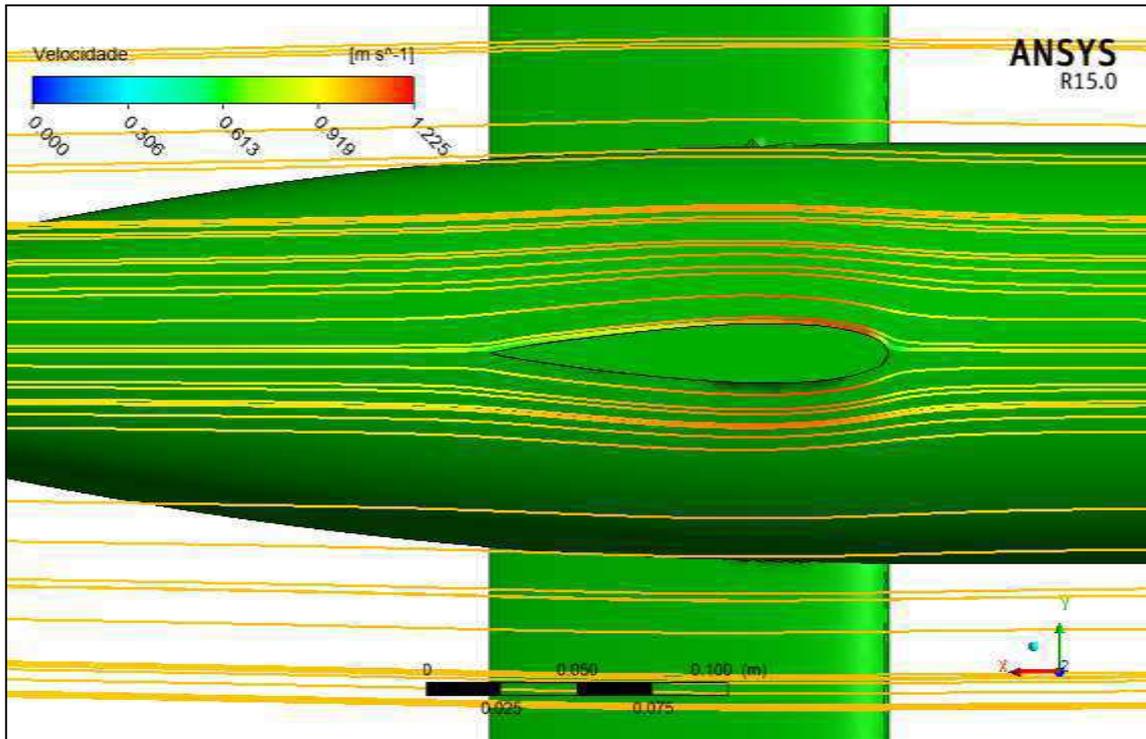


Figura 4.25 – Linhas de corrente obtidas em um plano vertical XY localizado a 0,15 m da linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

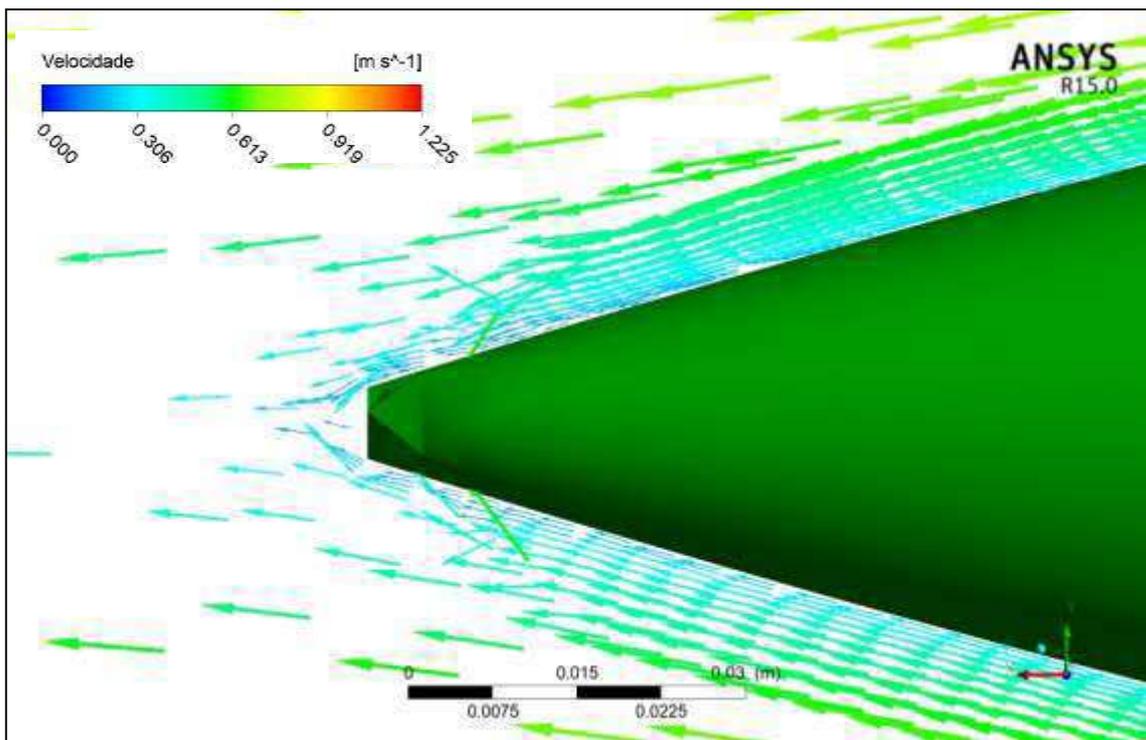


Figura 4.26 – Campo vetorial obtido em um plano vertical XY localizado na linha de centro do AUV com lemes, para profundidade de operação de 750 m.

Pelo exposto, fica evidente que os campos de pressão e velocidade, bem como as linhas de corrente e os campos vetoriais, para o AUV tanto com, quanto sem lemes, apresentaram coerência física, denotando que a modelagem numérica-matemática adotada nesta dissertação representa bem o fenômeno do escoamento ao redor do AUV em ambas as situações.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisou-se a hidrodinâmica do escoamento ao redor de um Veículo Autônomo Submarino (AUV) com e sem superfícies de controle (lemes), abordando numericamente o problema, mediante aplicação de ferramentas CFD, usando dos *softwares* comerciais ICEM-CFD 15.0 e ANSYS CFX 15.0, onde este último foi utilizado na etapa de simulação propriamente dita, que se deu mediante aplicação do método dos volumes finitos baseado em elementos finitos.

Do exposto no presente trabalho, conclui-se que:

- a) A modelagem numérica-matemática adotada representou bem o fenômeno do escoamento ao redor do AUV, com e sem superfícies de controle;
- b) A metodologia de análise desenvolvida mostrou-se adequada à solução do problema em questão;
- c) Tanto o modelo de turbulência SST, quanto o $k-\epsilon$ representaram bem o fenômeno do escoamento turbulento ao redor do AUV, com e sem superfícies de controle;
- d) Para a situação do AUV sem superfícies de controle, o tempo de simulação se mostrou praticamente constante para as simulações com velocidades de escoamento entre 0,4 e

- 1,2 m/s, para cada malha analisada, apresentando acréscimo no tempo médio de simulação proporcional ao número de volumes de controle da malha em questão;
- e) Para a situação do AUV sem superfícies de controle, com velocidade de escoamento de 1,4 m/s, o tempo de simulação foi em torno de 6 vezes inferior aos demais casos, com menores velocidades, mostrando que a modelagem numérica-matemática apresentou melhor condição de convergência para mais altas velocidades de escoamento, para essa configuração geométrica;
 - f) Para o AUV com e sem suas superfícies de controle há um comportamento decrescente do seu coeficiente de arrasto volumétrico com o aumento do número de Reynolds volumétrico, para ambas as situações, existindo, entretanto, maiores gradientes, principalmente para mais baixos números de Reynolds volumétricos, no caso do AUV com lemes;
 - g) O coeficiente de arrasto volumétrico para o AUV com lemes é aproximadamente o dobro dos casos sem lemes, mostrando que o uso das superfícies de controle tem considerável impacto no arrasto total do veículo;
 - h) A parcela do arrasto total do AUV referente aos seus lemes foi de 50%, acima da média esperada, porém justificada pelo tipo (retangular) e pelas grandes dimensões relativas dos lemes utilizados, além da baixa faixa de velocidade de escoamento. O arrasto adicional máximo gerado pelos lemes de um AUV pode ser entendido como um requisito de projeto do veículo;
 - i) Há um comportamento praticamente constante do coeficiente de arrasto de pressão volumétrico com o aumento do número de Reynolds volumétrico, para o AUV sem e com lemes, onde, para essa última situação, o mesmo é quase 7 vezes superior, em virtude do aumento da área frontal do veículo;
 - j) O percentual médio do arrasto de pressão em relação ao arrasto total do veículo subiu de 12,5% para 42,4%, considerando o AUV sem e com lemes, respectivamente;
 - k) Há um comportamento decrescente do coeficiente de arrasto de atrito volumétrico com o aumento do número de Reynolds volumétrico, para o AUV sem e com lemes, onde, para essa última situação, o mesmo é cerca de 31% superior, em virtude do aumento da área molhada do veículo;
 - l) O percentual médio do arrasto de atrito em relação ao arrasto total do veículo caiu de 87,5% para 57,6%, considerando o AUV sem e com lemes, respectivamente;

- m) Há um comportamento crescente do coeficiente de arrasto volumétrico com o aumento da profundidade de operação do AUV, na faixa entre 500 e 1.000 m, para o veículo com e sem lemes, sendo mais predominante no primeiro caso;
- n) Há um comportamento praticamente constante do coeficiente de arrasto de pressão volumétrico com o aumento da profundidade de operação, na faixa entre 500 e 1.000 m, para o AUV com e sem lemes, mostrando que a mudança dessa profundidade tem pouca influência na variação desse coeficiente;
- o) Há um comportamento crescente do coeficiente de arrasto de atrito volumétrico com o aumento da profundidade de operação, na faixa entre 500 e 1.000 m, para o AUV com e sem lemes, sendo mais predominante no primeiro caso, mostrando que a mudança na profundidade de operação tem grande influência na variação do arrasto de atrito do veículo;
- p) Foram obtidas correlações para o coeficiente de arrasto volumétrico, o coeficiente de arrasto de pressão volumétrico e o coeficiente de arrasto de atrito volumétrico do AUV com e sem superfícies de controle, em função do número de Reynolds volumétrico (Equações 4.1 a 4.6) e da profundidade de operação do veículo (Equações 4.7 a 4.12), visando subsidiar pesquisas e projetos relacionados à essa classe de veículos; e
- q) Os campos de pressão e velocidade, as linhas de corrente e os campos vetoriais do fluido ao redor do AUV tanto com, quanto sem lemes, apresentaram coerência física, além de evidenciar que o escoamento ao redor do AUV com lemes é consideravelmente mais perturbado do que na situação do AUV sem lemes.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- a) Acrescentar à modelagem o efeito do(s) hélice(s) propulsore(s), aproximando mais ainda as simulações das condições operacionais reais;
- b) Analisar a influência dos parâmetros geométricos dos lemes, tais como quantidade, tipo, posição e corda, na hidrodinâmica do AUV;
- c) Analisar a influência do ângulo de ataque do AUV na sua hidrodinâmica;
- d) Analisar a influência da rugosidade das superfícies do AUV na sua hidrodinâmica; e

- e) Analisar, mediante simulações em regime transiente, situações operacionais dependentes do tempo, tais como acelerações, desacelerações e mudanças bruscas de direção do AUV, visando avaliar o impacto dessas ações em sua hidrodinâmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, **CFX-Theory Manual (Release 15.0)**. Ansys Inc. 2014.

ATLAS ELEKTRONIK. Disponível em <<https://www.atlas-elektronik.com/solutions/unmanned-naval-systems.html>>. Acesso em: 06 de ago. de 2018.

AYMEN, M.; HEDI, K.; ABID, M.S.; ZIED, D. **Numerical Study of Attack's Angle Effect on Drag Coefficient of AUV Hull Design**. American Journal of Mechanical Engineering, 2017, Vol. 5, No. 1, 8-13.

AYMEN, M.; HEDI, K.; ABID, M.S.; ZIED, D. **Impact of Stern Design on Hydrodynamic Drag of AUV's Hull**. Indian Journal of Geo Marine Sciences, 2018, Vol. 47, No. 1, 89-95.

AUVAC - AUTONOMOUS UNDERSEA VEHICLE APPLICATIONS CENTER. Disponível em <<http://auvac.org/configurations/view/75>>. Acesso em: 04 de ago. de 2018.

BLUEBIRD MARINE SYSTEMS. Disponível em <[http://www.bluebird-electric.net/oceanography/Ocean Plastic International Rescue/Watertank Reviews Testing Basin Design History.htm](http://www.bluebird-electric.net/oceanography/Ocean%20Plastic%20International%20Rescue/Watertank%20Reviews%20Testing%20Basin%20Design%20History.htm)>. Acesso em: 17 de jun. de 2019.

BORTOLI, A.L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Porto Alegre – Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

CARRIGAN, T.J.; DENNIS, B.H.; HAN, Z.X.; WANG, B.P. **Aerodynamic Shape Optimization of a Vertical-Axis Wind Turbine Using Differential Evolution**. ISRN Renewable Energy, 2012, ID 528418.

DANTAS, J.L.D. **Metodologia Numérica para Estimativa da Manobrabilidade de Veículos Autônomos Submarinos**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, 2014.

FLUENT. **Introduction to CFD Analysis – Introductory FLUENT Training**. Ansys Inc., 2006.

FOX, R.W.; McDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª edição. LTC Editora, 2011.

GAO, T.; WANG, Y.; PANG, Y.; CAO, J. **Hull Shape Optimization for Autonomous Underwater Vehicles Using CFD**. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2016, 10:1, 599-607.

GENERAL DYNAMICS MISSION SYSTEMS. Disponível em <<https://gdmissionsystems.com/underwater-vehicles/>>. Acesso em: 05 de ago. de 2018.

GLOBAL FIREPOWER. **Strength in Numbers**. Disponível em <<https://www.globalfirepower.com/navy-submarines.asp>>. Acesso em: 06 de abr. de 2018.

HECHT, L.A.R. **Submarino Nuclear: Sua Importância para o Brasil**. Monografia do Curso de Política e Estratégia Marítimas. Escola de Guerra Naval (Marinha do Brasil). 2007.

HOERNER, S. F. **Fluid-Dynamic Drag**. Publicado pelo autor. 1965.

HYDROID. Disponível em <<https://www.hydroid.com/>>. Acesso em: 06 de ago. de 2018.

ICOLARI, G. **The ROV Handbook: A User Guide for ROV Pilot Technician**, 1ª Edição. Publicado pela Atlantis Deep Sea Ltd. 2018.

JAGADEESH, P.; MURALI, K.; IDICHANDY, V.G. **Experimental Investigation of Hydrodynamic Force Coefficients over AUV Hull Form**. Ocean Engineering, 36, 113-118, 2009.

JIMENEZ, T.S. **Contribution na la Commande d'un Robot Sous-marin Autonome de Type Torpille**. Universite Montpellier II. These, 2004.

L3 OCEAN SERVER. Disponível em <<https://ocean-server.com/>>. Acesso em: 06 de ago. de 2018.

MADAN, A.D.; MANOJ, T.I. **Hydrodynamic Analysis of AUV Hulls Using Semi-empirical and CFD Approach**. Universal Journal of Mechanical Engineering 5(5): 137-143, 2017.

MADHAM, R.; DESA, ELGAR; PRABHUDESAI, S.; SEBASTIÃO, L.; PASCOAL, A.; DESA, EHRLICH; MASCARENHAS, A.; MAURYA, P.; NAVELKAR, G.; AFZULPURKAR, S.; KHALAP, S. **Mechanical Design and Development Aspects of a Small AUV - MAYA**. National Institute of Oceanography (India) and Institute for Systems and Robotics (Portugal), 2006.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª edição, revista e ampliada. LTC Editora, 2004.

MANSOORZADEH, S.; JAVANMARD, E. **An Investigation of Free Surface Effects on Drag and Lift Coefficients of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Using Computational and Experimental Fluid Dynamics Methods**. Journal of Fluids and Structures, Volume 51, November 2014, Pages 161-171.

MICHAELIS. **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?id=xRP7R>>. Acesso em: 06 de abr. de 2018.

MYRING, D. F. **A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow**. *Aeronautical Quarterly*, 27(3):186–94, August 1976.

OLIVEIRA, L.M. **Desenvolvimento de Veículos Autônomos Submarinos para Aplicações Oceanográficas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Controle e Automação. Universidade de São Paulo. 2018.

OSIL - OCEAN SCIENTIFIC INTERNATIONAL. Disponível em <<http://osil.com/Products/OtherMarineInstruments/tabid/56/agentType/View/PropertyID/44/Default.aspx>>. Acesso em: 05 de ago. de 2018.

PODER NAVAL. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2010/09/24/submarino-tupi-hoje-em-santos/>>. Acesso em: 06 de abr. de 2018.

RAWSON, K.J.; TUPPER, E.C. **Basic Ship Theory – Volume 2**. 5ª edição. Editora Elsevier, 2001.

SALGADO, M.U.C.; MIRANDA, G.V. **Veredas – Formação Superior de Professores**. Módulo I, Volume 1. Secretaria de Educação do Estado de Minas Gerais. 2002.

SANTOS, M.M. **Simulação Numérica do escoamento Bifásico Óleo-Água em Tubos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, 2010.

SARMENTO, G.H. **Transporte Não-Isotérmico de Óleos Pesados em Risers Submersos**. Monografia apresentada para obtenção do título de ênfase em petróleo e gás (PRH-25/ANP/MCT). 2010.

SCHMIEGELOW, J.M.M. **O Planeta Azul – Uma Introdução às Ciências Marinhas**. 1ª edição. Editora Interciência, 2004.

SOUSA, J.V.N. Conceção do Casco de um Veículo Autônomo Submarino via Simulação Computacional. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande. 2012.

SOUSA, J.V.N.; MACÊDO, A.R.L.; AMORIM JUNIOR, W.F.; LIMA, A.G.B. Numerical Analysis of Turbulent Fluid Flow and Drag Coefficient for Optimizing the AUV Hull Design. Open Journal of Fluid Dynamics, 2014, 4, 263-277.

STEVENSON, P.; FURLONG, M.; DORMER, D. AUV Shapes – Combining the Practical and Hydrodynamic Considerations. Oceans, 2007, 1-6.

TELEDYNE MARINE. Disponível em <<http://www.teledynemarine.com>>. Acesso em: 05 de ago. de 2018.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Sea Water Properties.** Disponível em <https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html>. Acesso em: 28 de set. de 2018.

TIAN, W.; MAO, Z.; ZHAO, F.; ZHAO, Z. Layout Optimization of Two Autonomous Underwater Vehicles for Drag Reduction with a Combined CFD and Neural Network Method. Hindawi Complexity, 2017.

TRITON SUBS. Disponível em <<http://tritonsubs.com/products-services/all-subs/t33003/>>. Acesso em: 03 de ago. de 2018.

VASUDEV, K.L.; SHARMA, R.; BHATTACHARYYA, S. A CAGD+CFD Integrated Optimization Model for Design of AUVs. Oceans 2014 - Taipei.