

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

ARTHUR SENA MARQUES

MODELO CFD PARA DETERMINAÇÃO DO ARRASTO DE UM ROV EM REGIME
PERMANENTE

Joinville

2022

ARTHUR SENA MARQUES

MODELO CFD PARA DETERMINAÇÃO DO ARRASTO DE UM ROV EM REGIME
PERMANENTE

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

Orientador: Dr. Andrea Piga Carboni.

Coorientador: Dr. Lucas Weihmann.

Joinville

2022

ARTHUR SENA MARQUES

MODELO CFD PARA DETERMINAÇÃO DO ARRASTO DE UM ROV EM REGIME
PERMANENTE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 26 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Dr.(a) Andrea Piga Carboni
Orientador(a)/Presidente

Dr.(a) Lucas Weihmann
Coorientador(a)

Dr.(a) Thiago Pontin Tancredi
Membro(a)

Dr.(a) Talita Sauter Possamai
Membro(a)

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, por todo apoio, amor e carinho, mesmo durante os momentos mais difíceis.

Aos colegas e amigos, que proporcionaram horas de discussões calorosas, lições e momentos inesquecíveis, fundamentais para meu desenvolvimento como profissional.

Ao meu colega, Hélio Valdeviezo Catarin, por me acompanhar ao longo de todo este projeto, o qual nos proporcionou experiências e histórias que carregaremos durante toda a vida.

Ao meu orientador, Andrea Piga Carboni, pelo seu precioso tempo e pelos inúmeros ensinamentos, compartilhados ao longo de diversas reuniões e conversas, tanto na Iniciação Científica como no Trabalho de Conclusão de Curso, que realmente serviram de inspiração e me fizeram criar apreço pelo curso e pelo trabalho o qual desempenhei.

Ao professor Lucas Weihmann, por ter sido meu coorientador e ter desempenhado tal função com dedicação ao longo de todas as reuniões deste projeto.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado ao longo de toda a graduação.

As equipes do Laboratório de Simulação Naval (LaSiN) e do Laboratório de Tecnologia Subaquática (LaSub), por proporcionarem as ferramentas e recursos que tornaram este trabalho possível.

RESUMO

O conhecimento da resistência ao avanço de veículos subaquáticos é um fator essencial no projeto de um sistema de controle capaz de dirigir o veículo, seja operado, seja pré-programado. Para veículos de geometria complexa, a obtenção destes fatores através de métodos analíticos é uma tarefa onerosa e nem sempre é possível, assim, uma melhor compreensão destes fatores pode ser obtida através de simulações numéricas em fluidodinâmica computacional. O veículo a ser estudado é um ROV de cinco graus de liberdade que vem sendo desenvolvido pela equipe do Laboratório de Simulação Naval no CTJ da UFSC. O ROV é projetado para atuar como uma plataforma subaquática com propulsão a hidrojato que possa ser utilizada, futuramente, como uma base flutuante para um braço manipulador. Este trabalho tem como objetivo a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, em regime permanente, dos movimentos de translação principais deste ROV, incluindo o movimento para uma direção intermediária qualquer entre os movimentos frontal e lateral deste ROV. Também é abordado um estudo sobre a qualidade da malha gerada e utilizada nas análises finais deste trabalho, bem como os parâmetros avaliados que tiveram mais influência nos resultados finais, que demonstraram variações relativas entre 0,1% e 10%. Além das curvas e a superfície geradas para a obtenção de equações que relacionem a força de arrasto com a velocidade e o ângulo analisado e uma comparação dos resultados com os valores obtidos previamente pelos autores iniciais do projeto deste ROV de 0,9 m/s para uma força de aproximadamente 25N gerada pelos bocais, em comparação com os 0,87 m/s encontrados por este trabalho para o avanço puro do ROV. Os principais objetivos foram atingidos e permitiram a avaliação qualitativa da diferença entre os resultados obtidos em uma máquina de configurações superiores e a máquina utilizada pelo autor, um dos principais limitantes da precisão dos resultados obtidos. Nas conclusões, são também discutidos possíveis trabalhos futuros, necessários para a obtenção de parâmetros hidrodinâmicos e um sistema de controle mais precisos.

Palavras-chave: ROV. CFD. Força de arrasto.

ABSTRACT

Knowledge of the drag resistance of underwater vehicles is an essential factor in the design of a control system capable of steering the vehicle, either operated or pre-programmed. For vehicles with complex geometry, the obtaining of these factors through analytical methods is an onerous task, thus, a better understanding of these factors can be obtained through numerical simulations in computational fluid dynamics. The vehicle to be studied is a five-degree-of-freedom ROV that has been developed by the Naval Simulation Laboratory team at the CTJ of UFSC. The ROV is designed to act as a jet-propelled underwater platform that can be used, in the future, as a floating base for a manipulator arm. This work aims to obtain the hydrodynamic parameters, in steady state, of the main translational movements of this ROV, including the movement to any intermediate direction between the frontal and lateral movements of this ROV. A study on the quality of the mesh generated and used in the final analyzes of this work is also addressed, as well as the evaluated parameters that had the most influence on the final results, which showed relative variations between 0.1% and 10%. In addition to the curves and the surface generated to obtain equations that relate the drag force with the velocity and angle analyzed and a comparison of the results with the values previously obtained by the initial authors of the project of this ROV, of 0.9 m/s for approximately 25N force generated by the nozzles, compared to the 0.87 m/s found by this work for pure ROV advancement. The main objectives were reached and allowed the qualitative evaluation of the difference between the results obtained in a machine with superior configurations and the machine used by the author, one of the main limits of the precision of the obtained results. In the conclusions, possible future works are also discussed, necessary to obtain hydrodynamic parameters and control system more accurate.

Keywords: ROV. CFD. Drag force.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelagem do protótipo do ROV WJUV5 desenvolvido no CTJ da UFSC	14
Figura 2 – Domínio contínuo e domínio discreto	19
Figura 3 – Malha usada para resolver o escoamento interno em um duto	19
Figura 4 – Sistema de coordenadas adotado para o protótipo inicial do ROV	23
Figura 5 – Vistas lateral e superior do ROV	24
Figura 6 – Vista explodida dos três corpos da prancha	25
Figura 7 – Hidrojato	26
Figura 8 – Possíveis configurações do hidrojato	27
Figura 9 – Configuração dos bocais	28
Figura 10 – Exemplos de configuração de abertura de bocais e seus movimentos ..	29
Figura 11 – Força gerada por 2 bocais em função do recuo do obturador	30
Figura 12 – Hélices modelo T100, Blue Robotics	30
Figura 13 – Processo de projeto aplicado	32
Figura 14 – Tipos de movimento da plataforma	34
Figura 15 – Perfil de velocidade para as presentes simulações da Tabela 4	37
Figura 16 – Comparação montagem e sólido	39
Figura 17 – Domínio utilizado nas simulações e suas dimensões	41
Figura 18 – Modelos físicos associados à análise no STAR-CCM+	43
Figura 19 – Comparação entre o movimento do fluido e o movimento do ROV	44
Figura 20 – Exemplo do antes e depois da utilização do retificador de superfície na geração de malha, respectivamente.....	48
Figura 21 – Antes e depois da aplicação do controle de domínio	49
Figura 22 – Antes e depois da aplicação do refinamento de esteira	50
Figura 23 – Disposição dos cilindros e esferas no controle volumétrico	51
Figura 24 – Comparação de malha com variação da taxa de crescimento da superfície	55
Figura 25 – Ilustração da transição volumétrica de oito células para uma	55
Figura 26 – Comparação de malha com variação da taxa de crescimento do volume	56
Figura 27 – Análise visual da distribuição do y^+ no ROV à 0,25 m/s.....	58

Figura 28 – Análise visual da distribuição do y^+ no ROV à 1,25 m/s.....	58
Figura 29 – Processo de análise utilizando o Design Manager	66
Figura 30 – Estudos e respostas obtidas para as análises de ϕ igual a 0°	67
Figura 31 – Curvas polinomiais interpoladoras para os ângulos ϕ analisados.....	68
Figura 32 – Superfície $f(V, \phi, Fd)$ obtida através das análises	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos físicos selecionados	42
Quadro 2 – Malhadores selecionados no software	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões dos maiores e principais corpos do ROV	24
Tabela 2 – Verificação por comparação entre resultados experimentais da literatura e resultados das simulações do autor	37
Tabela 3 – Configurações de hardware principais do computador utilizado nas simulações	53
Tabela 4 – Análise do estudo 4.2.7.1. Tamanho base de célula	60
Tabela 5 – Análise do estudo 4.2.7.3. Taxa de crescimento volumétrica	60
Tabela 6 – Análise do estudo 4.2.7.4. Refinamento de esteira	61
Tabela 7 – Parâmetros das curvas polinomiais interpoladoras de 4° grau para cada ângulo ϕ	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
ROV	Veículo Operado Remotamente
AUV	Veículo Subaquático Autônomo
CFD	Fluidodinâmica Computacional ou Dinâmica dos Fluidos Computacional
IC	Iniciação Científica
GL	Graus de Liberdade
CFTOOL	Curve Fitting Toolbox

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_x	Rotação ao redor do eixo de coordenada x
θ_y	Rotação ao redor do eixo de coordenada y
θ_z	Rotação ao redor do eixo de coordenada z
u	Velocidade do fluido na direção x
v	Velocidade do fluido na direção y
w	Velocidade do fluido na direção z
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
t	Instante de tempo analisado
g_x	Componente x do vetor aceleração da gravidade
g_y	Componente y do vetor aceleração da gravidade
g_z	Componente z do vetor aceleração da gravidade
\mathbf{F}	Vetor de força resultante
F_d	Força de arrasto
F_l	Força de sustentação
c_d	Coefficiente de arrasto
A_f	Área frontal do corpo
Re	Número de Reynolds
L	Dimensão típica ou característica
f	Função polinomial que rege uma superfície
ϕ	Ângulo intermediário de movimento entre o frontal e o lateral
V	Velocidade relativa do movimento
y^+	Distância adimensional da parede
F_s	Força sobre uma superfície
$\mathbf{f}_f^{pressure}$	Vetor de pressão que o fluido exerce na superfície
\mathbf{f}_f^{shear}	Vetor de força de cisalhamento que o fluido exerce na superfície
\mathbf{n}_f	Vetor de direção

p_f	Pressão estática na face
p_{ref}	Pressão de referência
\mathbf{a}_f	Vetor de área da face
\mathbf{T}_f	Tensor de tensão na face
\mathbf{n}_D	Vetor de direção
ρ_{ref}	Densidade de referência
v_{ref}	Velocidade de referência
a_{ref}	Área de referência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. VEÍCULO SUBAQUÁTICO NÃO-TRIPULADO	16
2.2. FLUIDODINÂMICA	17
2.2.1. Conversão do domínio contínuo para o domínio discreto	18
2.2.2. Método dos volumes finitos	20
2.3. FORÇA DE ARRASTO SOBRE CORPOS IMERSOS	20
2.4. VEÍCULO WJUV5	21
2.4.1. Sistema de coordenadas	22
2.4.2. Dimensões principais	23
2.4.3. Prancha	24
2.4.4. Sistema de propulsão	25
3. METODOLOGIA	32
4. SIMULAÇÃO	34
4.1 VERIFICAÇÃO DO SOFTWARE	35
4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO	38
4.2.1. Importação da geometria	38
4.2.2. Definição do domínio	40
4.2.3. Definição dos modelos físicos envolvidos	41
4.2.4. Configurações da região	45
4.2.5. Geração inicial da malha	46
4.2.6. Controles adicionais da malha	48
4.2.6.1. Controle de domínio	48
4.2.6.2. Refinamento de esteira	50
4.2.6.3. Controle volumétrico	51
4.2.7. Qualidade da malha	52
4.2.7.1. Tamanho base de célula	52
4.2.7.2. Taxa de crescimento superficial	54

4.2.7.3. Taxa de crescimento volumétrica	55
4.2.7.4. Refinamento de esteira	56
4.2.7.5. Número de camadas prismáticas	56
4.2.7.6. Valor γ + da parede	57
4.2.8. Análise final da malha.....	59
4.3. PÓS-PROCESSAMENTO	63
4.3.1. Critério de parada.....	63
4.3.2. Geração dos relatórios	63
4.3.3. Geração das cenas, planos de visualização, gráficos e outros	65
4.4. DESIGN MANAGER	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE A – DEMAIS TABELAS DO ESTUDO DE MALHA	79
APÊNDICE B – CURVAS POLINOMIAIS INTERPOLADORAS OBTIDAS PARA CADA ÂNGULO ϕ ANALISADO E PARA ESTUDO VERTICAL	80
APÊNDICE C – PRINCIPAIS COMANDOS UTILIZADOS DENTRO DO SOFTWARE STAR-CCM+ (2021.2) AO LONGO DESTE TRABALHO	83

1. INTRODUÇÃO

Um robô pode ser entendido como um sistema mecânico sob controle automático que realiza operações como manipulação e locomoção (IFTOMM, 2022). A robótica, de maneira geral, está passando por grandes transformações em escopo e dimensão. Está se expandindo rapidamente em ambientes humanos e se engajando em novos desafios, seja na interação, no auxílio ou na exploração (ANTONELLI, 2018).

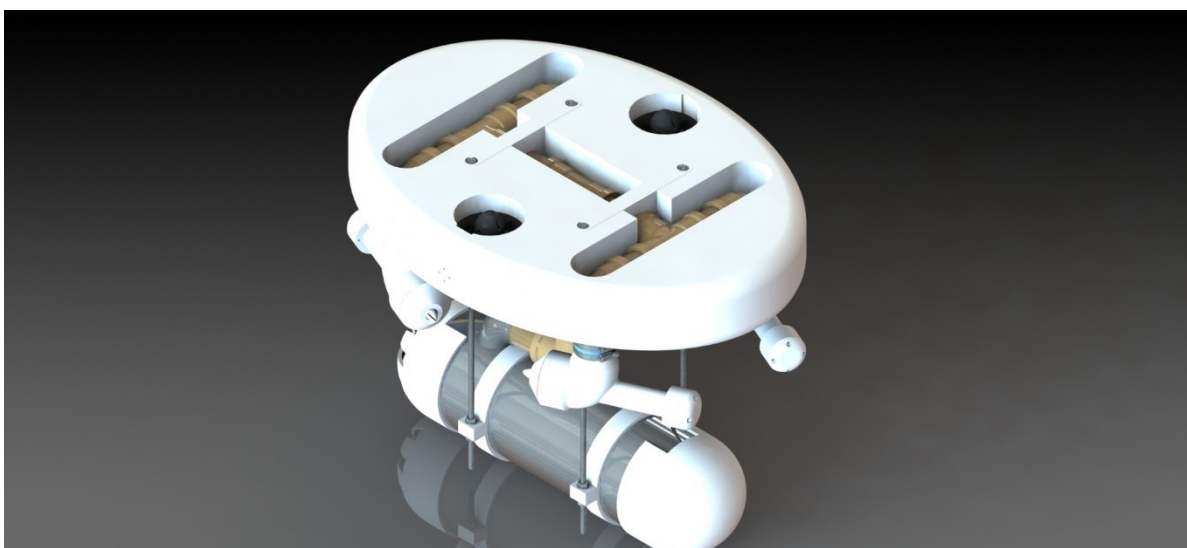
A necessidade do uso desses dispositivos se deve, principalmente, em razão das limitações físicas, inerentes aos seres humanos, seja por questões de segurança ou espaço, que impedem a realização de algumas tarefas. Dentre tais limitações, está a dificuldade de acesso a ferramentas e recursos que possibilitem a realização de trabalhos embaixo d'água (TAVARES, 2005; ZANONI, 2012). Dificuldade que fica ainda mais evidente se tratando do oceano, que é o principal reservatório de água da Terra, que embora cubra cerca de 70% da superfície do globo, ainda é pouco conhecido pelos seres humanos. (CAMPOS, 2014).

Nesse contexto, o uso de veículos subaquáticos não tripulados, como o ROV (Veículo Operado Remotamente) e o AUV (Veículo Subaquático Autônomo) vem se tornando uma importante ferramenta para as empresas e profissionais que atuam nesta área. Dependendo da missão de serviço, os veículos subaquáticos podem ser projetados para uma atividade específica, tal como exploração de recursos à grandes profundidades oceânicas, manutenção e reparo em cascos de navios e atividades de monitoração e pesquisa marinha, ou para várias destas, desde que permitam maior adaptação as suas funções (YUH, 2000).

É sobre esse cenário que o projeto de um ROV de cinco graus de liberdade, vem sendo desenvolvido por um grupo de alunos e orientadores no CTJ (Centro Tecnológico de Joinville) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), como um trabalho de Iniciação científica (IC). O trabalho, dos autores Marques e Catarin (2020), teve início em 2020 com a proposta preliminar de projetar e construir um veículo subaquático com propulsão a hidrojato. A proposta tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma subaquática para suporte de braços robóticos a fim de promover atividades de manutenção em cascos de navios ou manipulação de objetos embaixo d'água.

O trabalho desenvolvido por Marques e Catarin (2020), que teve início como uma IC, envolve fases importantes do projeto preliminar de um protótipo desse ROV (Denominado pelos autores inicialmente de WJUV5 ou Water Jet Underwater Vehicle modelo n°5). Entre as quais, é possível citar o projeto conceitual, o desenvolvimento da plataforma (corpo principal responsável por gerar flutuação e pela coordenação e união dos demais componentes), desenvolvimento do sistema de tubulação, seleção da bomba de porão e estimativa de forças, vazões e impulsos gerados pelo sistema de hidrojetos, além do projeto e detalhamento das demais carenagens e a modelagem 3D do protótipo finalizado, que pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Modelagem do protótipo do ROV WJUV5 desenvolvido no CTJ da UFSC



Fonte: Marques e Catarin (2020, p. 51).

As atividades de manutenção e manipulação subaquáticas apresentam elevado nível de complexidade envolvido, principalmente em virtude da ausência de um suporte fixo para o manipulador. Assim, o projeto de um ROV para esse tipo de trabalho requer o desenvolvimento das equações dinâmicas do ROV, de forma a permitir o sucessivo controle nas condições de trabalho desejadas. O sistema de controle é projetado de forma a dirigir o movimento do ROV apesar das condições externas, como correntezas, por exemplo (MARQUES; CATARIN, 2020).

Para obter um modelo hidrodinâmico representativo do sistema, que possa posteriormente ser utilizado no sistema de controle, este trabalho foca na identificação e obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos deste ROV através da utilização de

simulações e análises em Fluidodinâmica Computacional (CFD). O modelo 3D do protótipo utilizado nas simulações foi disponibilizado por Marques e Catarin (2020).

Este trabalho será a base para que estudantes e pesquisadores deste projeto aprimorem e desenvolvam novos, e mais robustos, componentes para o ROV a partir desse conhecimento. Além disto, poderá ser utilizado como referência para estudos que tenham similaridade com a metodologia e a ferramenta utilizada para as análises e simulações em CFD.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho podem ser subdivididos em:

1.1.1. Objetivo Geral

Obter, a partir de análises e simulações em CFD, os parâmetros hidrodinâmicos do ROV WJUV5, em regime permanente, que vem sendo desenvolvido pela equipe do Laboratório de Simulação Naval (LaSiN) no CTJ da UFSC.

1.1.2. Objetivos Específicos

No processo de conclusão do objetivo geral, pretende-se contemplar e cumprir com os seguintes objetivos específicos:

- a. Realizar um estudo sobre a qualidade da malha utilizada na simulação;
- b. Realizar as simulações necessárias para a obtenção das forças de arrasto;
- c. Obter as curvas de arrasto em função da velocidade;
- d. Avaliar a qualidade dos resultados obtidos por comparação e verificação dos resultados de experimentos já concluídos por outros autores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata da caracterização do tipo de veículo estudado, bem como conceitos associados à hidrodinâmica e à fluidodinâmica computacional. Nas próximas seções é apresentado o referencial teórico fundamental para o entendimento do leitor sobre os assuntos abordados e desenvolvidos ao longo deste trabalho.

2.1. VEÍCULO SUBAQUÁTICO NÃO-TRIPULADO

Veículos subaquáticos não tripulados podem ser utilizados em tarefas que colocariam a vida humana em risco, que necessitem de redução de custos ou que estejam relacionadas a limitações físicas ou humanas, como, por exemplo, a exploração em grandes profundidades (ZANONI, 2012). Em suma, é um veículo composto de um grupo de dispositivos capazes de realizar trabalhos de maneira controlada ou pré-programada. Os veículos subaquáticos não-tripulados podem ser divididos em dois grupos (YUH, 2000): Veículos Operados Remotamente (Remotely Operated Vehicles) e Veículos Subaquáticos Autônomos (Autonomous Underwater Vehicles).

Os ROVs são veículos submarinos controlados diretamente por um operador, de maneira externa. A conexão entre veículo e operador é feita, usualmente, por um cabo umbilical responsável por realizar a troca de informações entre um meio de controle da direção do veículo, como um joystick ou um notebook, e a unidade de processamento interna do veículo, além de possibilitar o fornecimento de energia. Embora o comprimento do cabo umbilical apresente variados tamanhos, sua existência é o maior limitante deste tipo de veículo, principalmente por afetar negativamente a dinâmica do veículo e restringir a máxima distância entre a embarcação, em que o operador normalmente se encontra, e o ROV (TAVARES, 2005; ZANONI, 2012).

Os AUVs, diferentemente do grupo anterior, não sofrem intervenção humana durante sua missão e não possuem cabo umbilical. Essa distinção proporciona maior mobilidade ao veículo, possibilitando a operação e investigação de locais menos acessíveis (TAVARES, 2005). A fonte de energia neste caso está embarcada no veículo, baseada em baterias elétricas, e sua missão é programada com informações

prévias, como as coordenadas de um sítio submarino, adequadamente transcritas para o sistema de coordenadas do AUV, e o objetivo da missão, por exemplo. A autonomia do veículo também depende da presença de um sistema de navegação, além de sensores que o auxiliam a desempenhar tais funções (ZANONI, 2012).

Ambos, ROV e AUV, podem ser equipados com uma série de componentes, instrumentos e/ou ferramentas, que proporcionem ao dispositivo a habilidade de realizar uma variedade de ações úteis. O exemplo mais comum é a utilização de câmeras com conexão a um terminal que possibilitem o acompanhamento síncrono de inspeções de casco e exploração do leito do mar para o ROV, e a gravação e coleta de dados para o AUV, dentre outras atividades dependendo de sua missão de projeto. Assim como pode ser visto em alguns ROV's disponíveis comercialmente, como os da Boxfish Research: Boxfish ROV e Boxfish LUNA (BOXFISH RESEARCH, 2022), ou o Seasam Drone, da Notilo Plus (NOTILO PLUS, 2022).

2.2. FLUIDODINÂMICA

Quando é possível limitar a análise de determinado escoamento para situações mais simples, isto é, que envolvam fluidos newtonianos com escoamentos incompressíveis e viscosidade constante, o modelo desses fluidos pode ser expresso com as Equações (1), (2), (3) e (4).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

onde a Equação (1) é a equação da continuidade, referente a conservação da massa, e as Equações (2), (3) e (4) são as equações de Navier-Stokes, referentes a quantidade de movimento, expressas em coordenadas cartesianas. Além disso ρ é a massa específica, μ a viscosidade dinâmica, t o instante de tempo, g_x , g_y e g_z as

componentes do vetor aceleração da gravidade e u , v e w são as velocidades do fluido nas direções x , y e z , respectivamente (FOX et al., 2011).

Nesse contexto, a obtenção de uma solução analítica exata para um problema composto por Equações Diferenciais Parciais (EDP), como as apresentadas no parágrafo anterior, geralmente, só podem ser empregadas a geometrias simples e têm a desvantagem de serem aplicadas a problemas cujas hipóteses simplificadoras, muitas vezes, as desviam do fenômeno físico real (SOUSA, 2019). Assim, a modelagem numérica CFD vem ganhando espaço no mundo acadêmico e no mercado, pois possibilita, mesmo que com aproximações, a obtenção de respostas para problemas que podem ser considerados de elevada dificuldade.

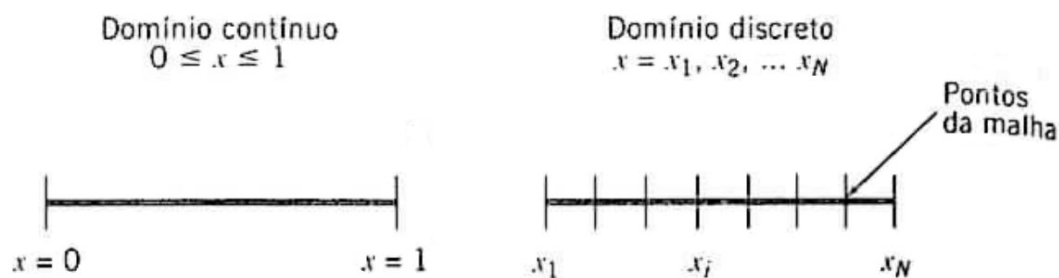
Segundo Hu (2008), a Fluidodinâmica Computacional é uma ciência que, com auxílio de computadores, produz previsões quantitativas de fenômenos de fluxo de fluidos com base nas leis de conservação de massa, momento e energia, que regem o movimento dos fluidos, assim como nas equações vistas anteriormente. Essas previsões nada mais são do que simulações que buscam resultados numéricos de um conjunto de variáveis referentes àquele fluido e situação.

A simulação busca, geralmente, os valores das variáveis de fluxo, como velocidade, pressão e temperatura, para um dado local no domínio especificado e tempo. Pode ainda avaliar o comportamento geral do fluxo, como a taxa de fluxo ou a força hidrodinâmica agindo sobre um objeto que tende a impedir o livre escoamento do fluido (HU, 2008).

2.2.1. Conversão do domínio contínuo para o domínio discreto

Normalmente, a estratégia da Fluidodinâmica Computacional é substituir o domínio contínuo de um problema para um domínio discreto utilizando uma malha. Entende-se por domínio contínuo o conjunto infinito de valores (no conjunto dos \mathbb{R}) existentes entre o ponto inicial e o ponto final de um determinado domínio analisado, assim como pode ser verificado no lado esquerdo da Figura 2. No domínio discreto, cada variável é definida apenas nos pontos, previamente determinados, de uma malha (FOX et al., 2011), como pode ser verificado no lado direito da Figura 2.

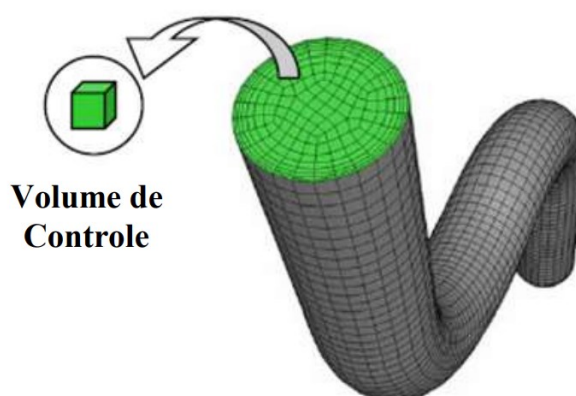
Figura 2 – Domínio contínuo e domínio discreto



Fonte: Fox (2011, p. 190).

Pode-se estender essa conversão de domínio contínuo para domínio discreto também para duas ou três dimensões. Esta abordagem é comumente usada para resolver problemas como a análise de um escoamento sobre uma superfície, a análise do escoamento em torno de um aerofólio ou a análise de escoamento em um tubo em S (FOX et al., 2011). como o exemplo demonstrado na Figura 3. Assim, uma malha pode ser explicada como um conjunto de pequenas subdivisões dentro de um domínio que, para o exemplo de três dimensões, são volumes de controle.

Figura 3 – Malha usada para resolver o escoamento interno em um duto



Fonte: Sousa (2019, p. 40).

A partir do entendimento da análise em domínio discreto para três dimensões, pode-se então abordar de maneira mais significativa os métodos numéricos utilizados para resolver as malhas criadas, em especial o método dos volumes finitos. Este é o assunto do próximo subtópico.

2.2.2. Método dos volumes finitos

Dentre os métodos de discretização mais comumente encontrados na literatura estão o método dos elementos finitos, o método das diferenças finitas e o método dos volumes finitos, sendo este último largamente utilizado em códigos CFD (ANDRADE, 2014). Para Andrade (2014, p. 2): “Uma das vantagens do método dos volumes finitos sobre os outros é a garantia da conservação local das grandezas discretizadas.”, ou seja, garantia de que as equações de conservação são executadas para cada uma das células de uma malha.

O método dos volumes finitos começou a ser difundido com o artigo publicado por Patankar (1972), no qual é tratado como uma classe do método de diferenças finitas, mas com uma formulação para volumes de controle, entre outras palavras, para uma malha tridimensional. Muniz (1995) afirma que as principais características do método dos volumes finitos são a simplicidade da derivação e a facilidade com que as equações discretizadas podem ser interpretadas em termos físicos. Um exemplo de malha tridimensional gerada para se trabalhar com o método dos volumes finitos pode ser visto na Figura 3, no subtópico anterior.

2.3. FORÇA DE ARRASTO SOBRE CORPOS IMERSOS

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

Segundo Fox et al. (2011), o escoamento do fluido ao redor de um corpo sólido gerará sobre este corpo tensões superficiais de dois tipos:

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

sendo que a força resultante F que age sobre o corpo advém das tensões superficiais que agem em cada elemento do corpo analisado.

Para Sousa (2019), a dedução analítica das distribuições das tensões tangenciais e normais só é possível para corpos de geometrias simples, com a utilização de simplificações no modelo físico-matemático que rege determinado problema, entretanto, isso não representa a maioria dos problemas práticos envolvendo escoamento externo. Deste modo, como comentado no tópico 2.2. FLUIDODINÂMICA, métodos computacionais (CFD), vêm sendo amplamente utilizados para diversas análises envolvendo este tipo de escoamento.

Fox (2011), afirma que a força F é tradicionalmente decomposta da seguinte maneira:

- a. Força de arrasto (F_d): Componente paralela à direção do movimento relativo; e
- b. Força de sustentação (F_l): Componente perpendicular à direção do movimento relativo.

Para escoamento incompressível, a força de arrasto pode ser definida como:

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho V^2 A \quad (5)$$

que pode ser dividida em duas componentes, arrasto de atrito e arrasto de pressão, onde c_d é o coeficiente de arrasto, que é função de parâmetros da geometria do corpo e do número de Reynolds (Re) relacionado ao escoamento, ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade relativa entre o corpo e o fluido e A é a área projetada frontal para arrasto de pressão e área molhada para arrasto de atrito.

2.4. VEÍCULO WJUV5

O veículo WJUV 5 é um ROV que vem sendo desenvolvido pela equipe do Laboratório de Simulação Naval do CTJ da UFSC, pelos autores Marques e Catarin (2020). A leitura a seguir faz-se necessária para aprimorar a compreensão do layout e funcionamento do modelo, possibilitando, posteriormente, o estudo hidrodinâmico deste.

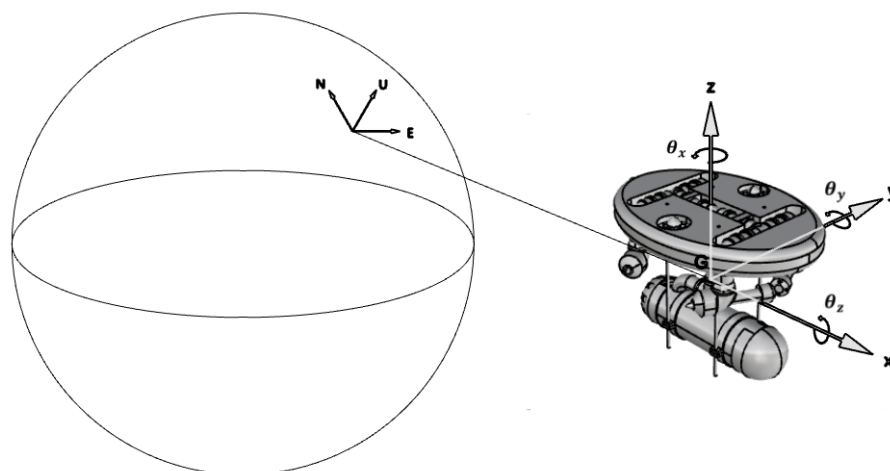
2.4.1. Sistema de coordenadas

É importante ressaltar que a *plataforma submersível*, como foi denominada devido a seu objetivo, possui a concepção inicial de projeto de se trabalhar com cinco graus de liberdade (GL), isto é, três de translação e dois de rotação. Para a implementação do 6º GL, caturro, o modelo como é hoje precisa sofrer algumas atualizações, como a implementação de dois hélices na longitudinal da prancha, ortogonais aos já existentes, por exemplo.

Entretanto, será estudado neste trabalho apenas a movimentação nos três GL associados à translação da plataforma junto ao movimento em uma configuração angular intermediária ϕ , que será melhor discutido no Capítulo 4. SIMULAÇÃO. Ainda assim, é importante estabelecer um sistema de coordenadas que aborde os seis GL, onde, de acordo com Grewal et al. (2001), os sistemas de coordenadas utilizados em navegação inercial são constituídos basicamente por sistemas de coordenadas esféricos. Dos quais, serão utilizados os sistemas a seguir:

- **Sistema ENU (East-North-Up):** É um sistema de navegação local, sua origem pode ser estabelecida em qualquer ponto do globo terrestre, onde x orienta-se para o norte geográfico, o eixo z orienta-se normal a superfície da Terra, para cima, e o eixo y é referenciado de acordo com a regra da mão direita.
- **Sistema RPY (Rol-Pitch-Yaw):** É o sistema de navegação da plataforma, cujos eixos são fixos ao veículo. O eixo x (eixo de roll ou rolamento) é orientado na direção nominal do veículo, aquela que é fixa no longitudinal do veículo (maior comprimento da elipse da plataforma), o eixo z (eixo de yaw ou guinada) é orientado normal a superfície da prancha da plataforma, para cima, e o eixo y (eixo de pitch ou caturro) é orientado conforme regra da mão direita. O modelo de sistema de coordenadas é mostrado na Figura 4, abaixo.

Figura 4 – Sistema de coordenadas adotado para o protótipo inicial do ROV



Fonte: Autor (2022).

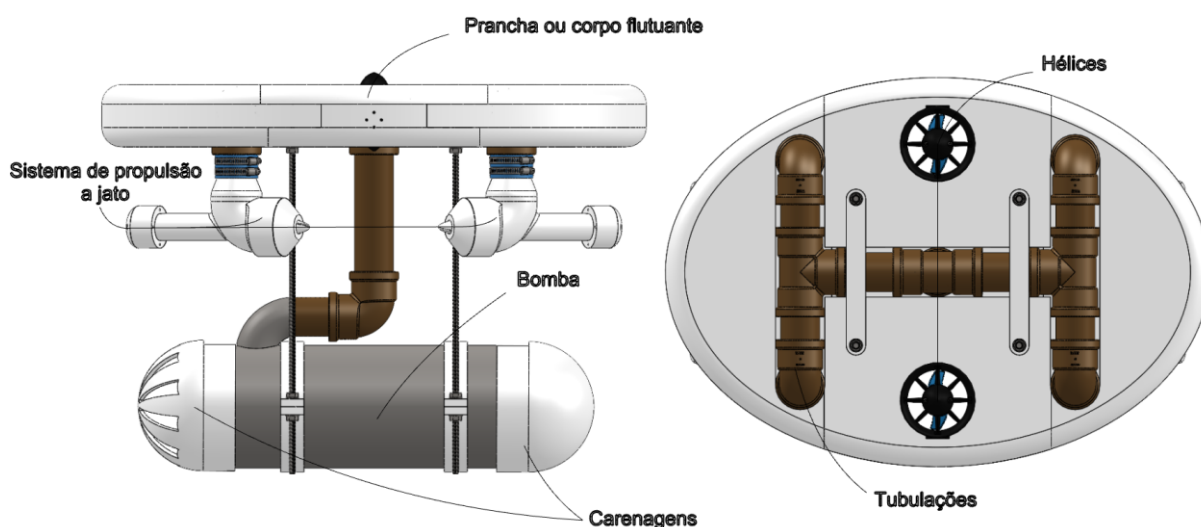
Em que surge, sway e heave (ou avanço, deriva e afundamento), são os graus de liberdade referentes a translação nos eixos de coordenadas ortogonais x , y e z , e roll, pitch e yaw são os graus de liberdade referentes aos eixos de rotação, θ_x , θ_y e θ_z , em torno de x , y e z , respectivamente.

Dentre os sistemas de coordenadas listados por Grewal et al. (2001), ainda é incluído o NED (North-East-Down), que para Zanoni (2012) é amplamente utilizado para navegação de veículos, enquanto o sistema ENU é amplamente utilizado para navegação aérea, sendo que a diferença entre eles está basicamente na direção do eixo de coordenadas z . Apesar disso, o ENU foi adotado no lugar do NED, visto que o primeiro é condizente com o sistema de coordenadas adotado pelo software STAR-CCM+, que será utilizado para a realização das simulações deste trabalho.

2.4.2. Dimensões principais

Do ponto de vista das simulações em CFD, as dimensões dos principais corpos da plataforma são necessárias para que seja possível recriar um volume de controle que atenda suas proporções. A vista lateral e a vista superior do ROV, bem como uma descrição dos principais corpos ou subconjuntos, são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Vistas lateral e superior do ROV



Fonte: Autor (2022).

Os valores dimensionais críticos para o modelo são aqueles que delimitariam um potencial volume de controle da análise, ou seja, as dimensões dadas principalmente pelo corpo flutuante principal e a bomba. Estes dados foram organizados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos maiores e principais corpos do ROV

Região	Dimensão (mm)
Comprimento do corpo flutuante	700
Largura do corpo flutuante	500
Espessura do corpo flutuante	80
Comprimento total da bomba	465
Diâmetro da bomba	158
Comprimento do conjunto bomba e carenagens	585,85
Diâmetro do conjunto bomba e carenagens	168
Altura total do conjunto	515

Fonte: Autor (2022).

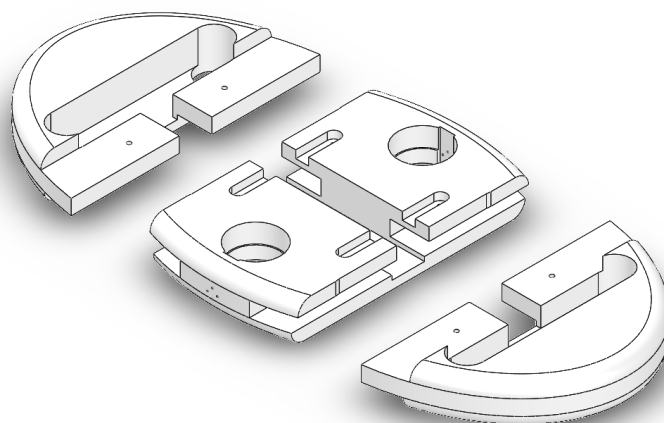
2.4.3. Prancha

A *prancha*, como foi denominada, é o corpo principal do ROV. Sua tarefa, além de unir todo o conjunto de componentes, é gerar flutuação o suficiente para que

o peso e a flutuação do ROV estejam próximos, de forma que o movimento vertical possa ser controlado pelos propulsores.

O projeto precisa passar por algumas modificações antes da obtenção de uma versão capaz de ser considerada final, deste modo, é interessante que todas as peças sejam modulares, permitindo a montagem e desmontagem dos seus componentes. Uma destas modificações foi dividir a própria prancha em três partes, esta subdivisão pode ser vista na Figura 6, abaixo.

Figura 6 – Vista explodida dos três corpos da prancha



Fonte: Adaptado de Marques e Catarin (2020, p. 36).

A conexão entre os dois maiores corpos do ROV, a prancha e a bomba, onde esta última é melhor comentada no próximo subtópico, é feita através de barras M8, porcas e arruelas. Esta conexão também foi utilizada para unir, além do que já foi comentado, os três corpos da prancha, entre si, e as duas peças de fixação das tubulações posicionadas no corpo central.

2.4.4. Sistema de propulsão

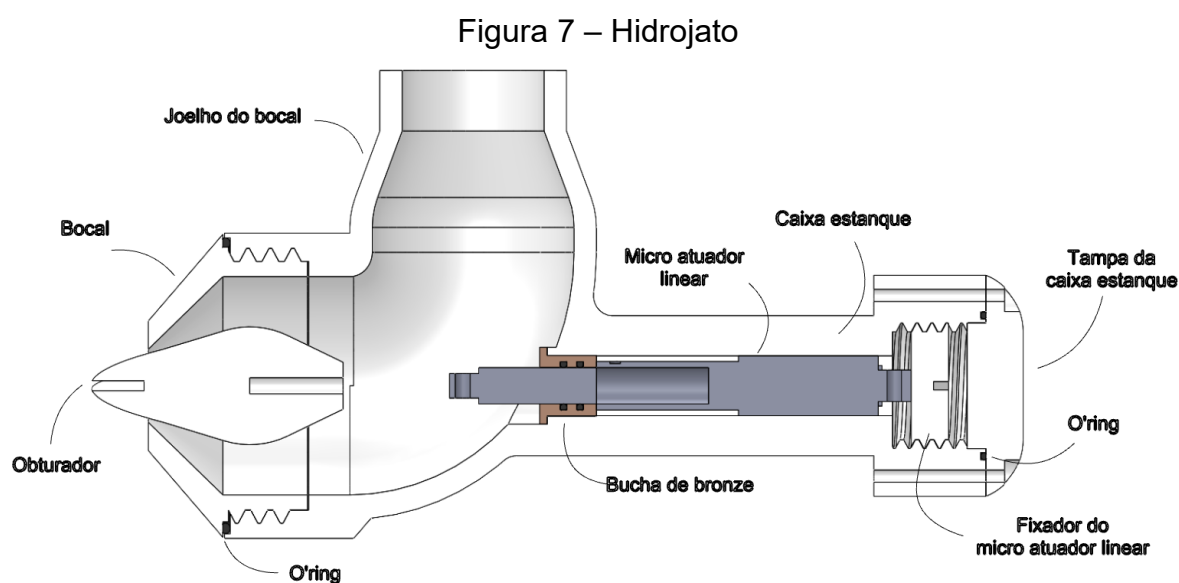
O sistema de propulsão da plataforma, para os 5 GL iniciais, é composto basicamente por quatro subsistemas. São eles:

- 1. Bomba:** tem a função de fazer sucção e promover a rotação da água da plataforma para o sistema de encanamento (ou distribuição). A bomba escolhida inicialmente foi a Bomba Submersível de Aço Inox Modelo

395870, da marca Worker. Compreende a bomba, carenagens e abraçadeiras da bomba;

2. **Tubulações:** tem a função de receber o fluxo de água vindo da bomba e redirecioná-lo para os quatro bocais, subdividindo-se igualmente em dois pontos, conforme exposto na Figura 5, junto com a bomba;
3. **Hélices:** tem a função de promover a propulsão do ROV na direção vertical, além de possibilitar o movimento de rolagem;
4. **Sistema de propulsão a jato:** tem a função de receber o fluxo de água vindo do sistema de tubulações e expeli-lo pelo bocal a fim de promover impulso ao ROV. É composto, resumidamente, por 4 hidrojetos. Sobre estes últimos dois subsistemas será melhor comentado abaixo.

O sistema de propulsão a jato compreende itens internos inerentes ao seu projeto e objetivo. Efetuando um corte transversal em um único hidrojato é possível observar as peças representadas na Figura 7.



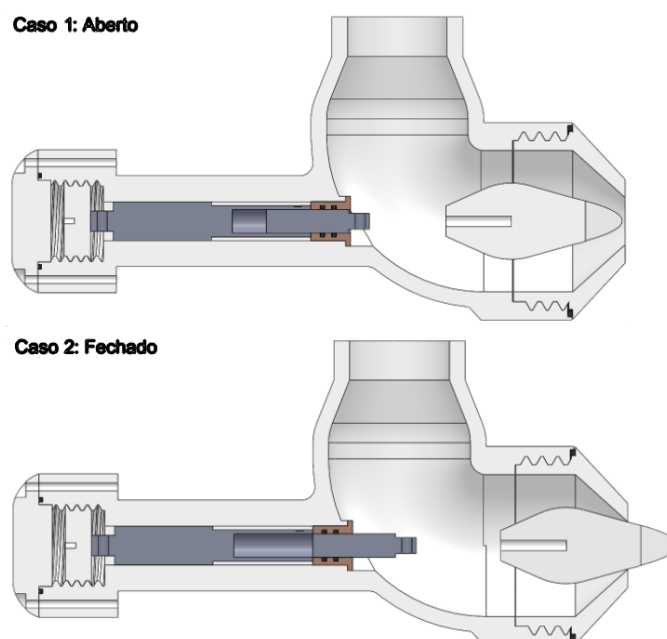
Fonte: Adaptado de Marques e Catarin (2020, p. 48).

Em suma, o sistema de propulsão a jato funciona da seguinte maneira:

- a. O joelho do bocal recebe o fluxo de água vindo da tubulação, mudando a direção do escoamento em 90°;

- b. O fluxo de água é enviado ao bocal, onde encontra uma região com diminuição de seção, o que causa aumento de velocidade e redução de pressão;
- c. O fluxo será expelido para o ambiente externo somente se o micro atuador linear estiver totalmente recuado. Deste modo, o bocal estará aberto, de forma que o fluxo de água passe sem maiores restrições. Assim como é possível visualizar no caso 1 da Figura 8.
- d. Considerando a hipótese de que o micro atuador linear esteja totalmente estendido, o obturador impedirá totalmente a saída de água, assim como é possível visualizar no caso 2 da Figura 8. Logo, este bocal não estará gerando força para a movimentação da plataforma. É claro que qualquer configuração intermediária também é possível, dependendo apenas de quão aberto estará o bocal, em relação a sua área de abertura total, naquele instante.

Figura 8 – Possíveis configurações do hidrojato



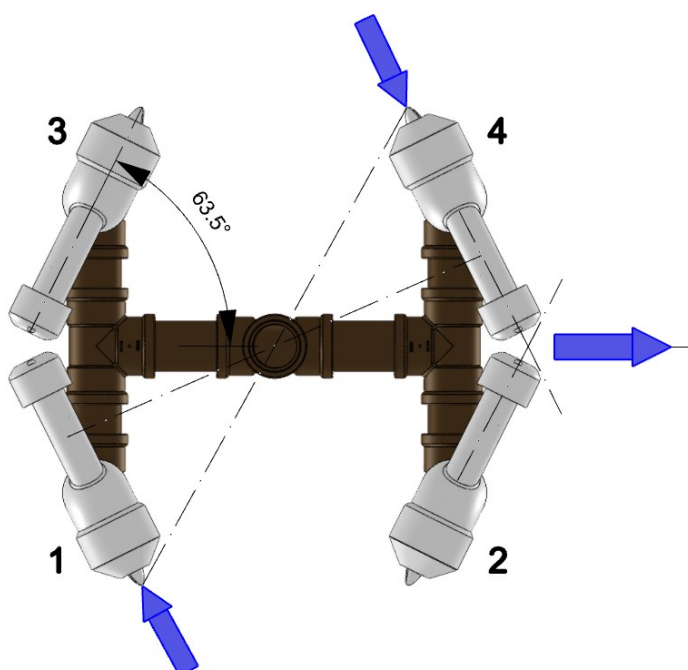
Fonte: Autor (2022).

As demais peças atuam de forma a auxiliar o micro atuador linear a garantir sua fixação e estanqueidade. A caixa estanque, por exemplo, tem o objetivo de impedir a entrada de água até o micro atuador linear, visto que, escolhido previamente

o micro atuador linear tipo LV-11 da empresa Motor Run Yes, não possui estanqueidade de fábrica. Cabe ressaltar a futura existência de um prolongador, cuja função é conectar o atuador linear ao obturador, que, conseqüentemente, não está presente na Figura 7 e Figura 8.

Como comentado no subtópico 2.4.1. dos cinco graus de liberdade estudados até o momento no projeto, três deles se devem à força gerada nos jatos, sendo o avanço, a deriva e a guinada. Deste modo, seguindo a configuração de quatro bocais, enumerados como na Figura 9

Figura 9 – Configuração dos bocais



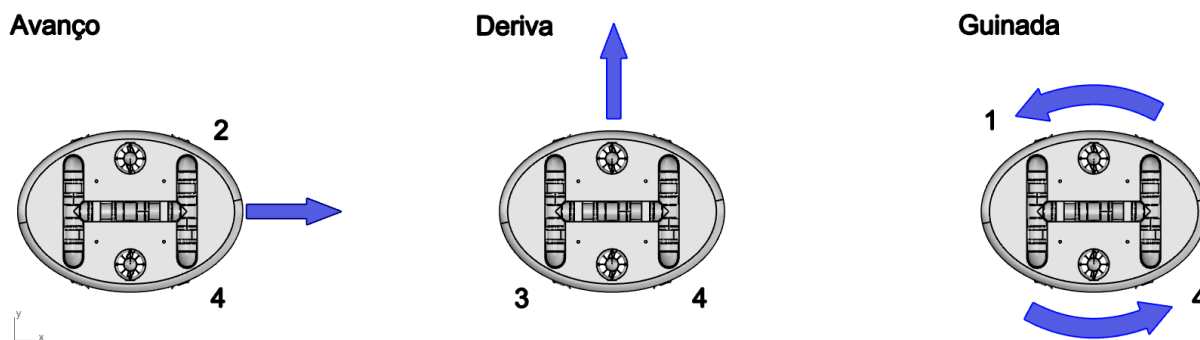
Fonte: Autor (2022).

é possível obter o movimento de avanço através da ativação (total ou parcial) dos bocais 2 e 4, por exemplo. Neste caso, se os bocais forem abertos em proporções iguais, as forças geradas nas direções y pelos dois bocais se cancelarão, obtendo movimento apenas na direção x. Da mesma maneira, é possível obter o movimento de deriva abrindo-se os bocais 1 e 2, ou 3 e 4, igualmente, como mostra a Figura 10

Qualquer configuração de abertura que não seja igualitária para os dois bocais, geraria um movimento em ambas as direções (x e y). Seguindo esta lógica, pode-se gerar rotação em torno do eixo z da plataforma (guinada) através do binário

gerado entre os bocais 1 e 4, por exemplo, como mostra a Figura 10. Efeito similar, porém, em sentido contrário, ocorreria com a abertura igualitária dos bocais 2 e 3.

Figura 10 – Exemplos de configuração de abertura de bocais e seus movimentos

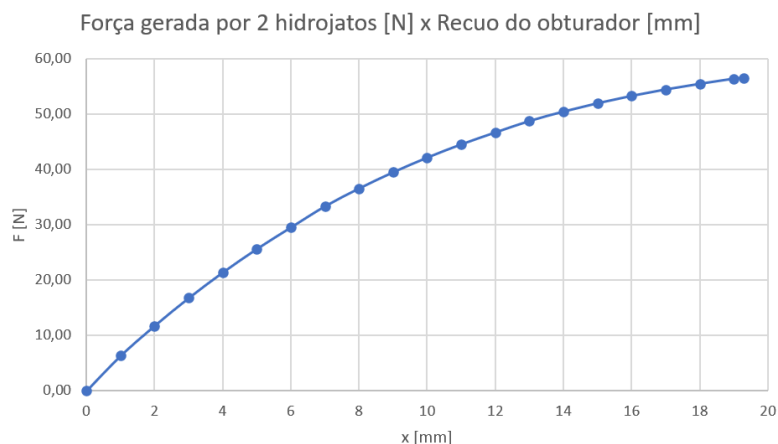


Fonte: Autor (2022).

Vale destacar a importância da configuração angular aplicada aos bocais, que os fixa como mostrado na Figura 9, com ângulo entre a saída do bocai e o centro do cano principal (eixo x) em $63,5^\circ$. Essa configuração permite que os movimentos de avanço e deriva da plataforma possuam velocidade máxima aproximadamente igual, pois, enquanto a área projetada lateral da plataforma é maior, gerando maior arrasto, o bocai apontado à $63,5^\circ$ tem a maior componente de força apontada para a direção y, de forma a compensar o arrasto. Para os cálculos realizados por Marques e Catarin a partir das configurações, simplificações e dos dados da bomba utilizada e previamente citada, a velocidade máxima encontrada para ambos os movimentos de avanço e deriva é de aproximadamente 0,9 m/s.

Os autores Marques e Catarin (2020) disponibilizam ainda dados e gráficos do recuo do obturador em função da área de saída do bocai, e dados da área de saída de dois bocais em função da força gerada por dois hidrojetos. Com base nestas informações é possível criar um gráfico da força gerada por dois bocais, em N, pelo recuo do obturador, em mm, conforme a Figura 11, que demonstra que a força máxima obtida por dois bocais totalmente abertos e com ângulo de 0° é de 56,58 N.

Figura 11 – Força gerada por 2 bocais em função do recuo do obturador



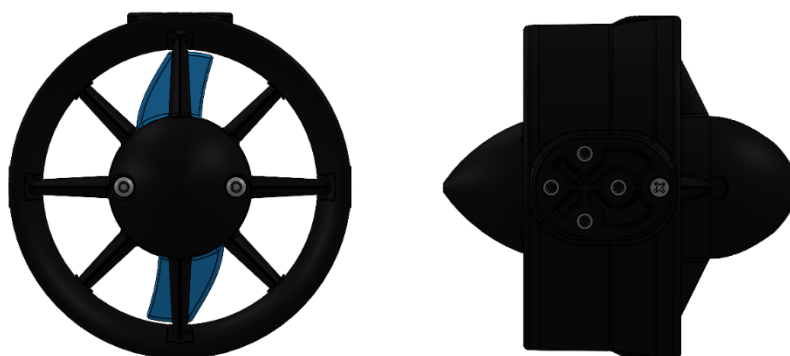
Autor (2022).

Por fim, embora o hélice, que tem a atribuição de promover as movimentações de afundamento e rolagem, gerando mais dois graus de liberdade, não faça parte interna do sistema de propulsão interligado à bomba, faz parte do sistema de propulsão da plataforma como um todo.

De forma detalhada, o movimento de subida e descida (afundamento), pode ser efetuado através da rotação de ambos os hélices na direção normal, ou reversa, simultaneamente. Já o movimento de roll pode simplesmente ser obtido rotacionando um dos hélices para a direita, e um para a esquerda, também simultaneamente.

O hélice selecionado foi o modelo T100 da empresa Blue Robotics, como mostrado na Figura 12. Embora este modelo não esteja mais disponível comercialmente, devido ao desenvolvimento de versões superiores, foi selecionado pelos autores por estar disponível no laboratório.

Figura 12 – Hélices modelo T100, Blue Robotics



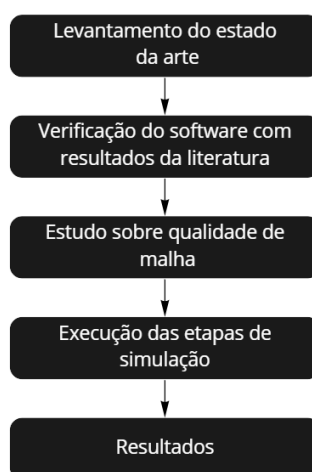
Fonte: Autor (2022).

Após apresentação de todos os itens associados à modelagem tridimensional da plataforma, pode-se prosseguir ao tópico referente à metodologia e posteriormente a verificação e a simulação que, para analisar o escoamento dos fluidos ao redor do ROV, utiliza os modelos 3D citados neste capítulo.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho. Tem início com a etapa de referencial bibliográfico, onde, primeiramente, se busca fazer uma revisão da literatura, com o objetivo de levantar o estado da arte sobre modelagem de veículos subaquáticos, posteriormente abordando a etapa de verificação, comparando resultados de estudos em CFD com resultados experimentais da literatura. É sucedido por um estudo sobre a qualidade da malha aplicada nas análises, a execução das etapas de simulação e, finalmente, a análise dos resultados obtidos. O processo de projeto aplicado pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 – Processo de projeto aplicado



Fonte: Autor (2022).

Inicialmente, será realizado um levantamento do estado da arte, que compreende o referencial bibliográfico acerca de veículos subaquáticos e suas particularidades, a teoria básica por trás da fluidodinâmica computacional e o equacionamento básico de força de arrasto sobre corpos imersos em regime quase estático. Utiliza como técnica a pesquisa bibliográfica nas principais revistas de publicação e meios acadêmicos. Esta etapa é importante para avaliar o nível de profundidade que os estudos na área em que este trabalho se insere são encontrados.

A etapa de verificação de resultados necessita, anteriormente, de um estudo aprofundado sobre o funcionamento do STAR-CCM+, tendo como objetivo

desenvolver os conhecimentos do autor sobre o software utilizado e suas técnicas internas, bem como capacidades operacionais e limitações. Em sequência, na etapa de verificação, serão comparados resultados experimentais bem estabelecidos na literatura e replicáveis em simulação, com os resultados obtidos no STAR-CCM+ através da réplica em CFD destes experimentos. Tem como principal técnica a comparação numérica e como principais ferramentas o STAR-CCM+ e o Excel.

Será dada continuidade com a geração da malha no domínio fluido ao redor do ROV, bem como um estudo sobre a qualidade da malha, ou seja, o quão bem ela está representando a realidade visto todas as limitações computacionais envolvidas, tanto com o software quanto com o computador utilizado para realizar as simulações, e quais os parâmetros mais influenciam no resultado final, afim de identificar aqueles que requerem mais esforço computacional. A principal técnica utilizada é a comparação numérica entre os resultados obtidos no estudo e as principais ferramentas são o STAR-CCM+ e o Excel.

Em sequência serão realizadas as etapas de simulação, inerentes a procedimentos envolvendo técnicas e softwares CFD, tais como o pré-processamento, envolvendo a definição do domínio, dos modelos físicos e dos controles de malha utilizados, e o pós-processamento, envolvendo a geração dos relatórios e cenas para visualização dos resultados. As principais técnicas são a pesquisa bibliográfica com auxílio do manual do usuário do STAR-CCM+ e a principal ferramenta é o STAR-CCM+.

Por fim, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações, bem como a avaliação de sua qualidade e a comparação com os resultados obtidos previamente pelos autores Marques e Catarin (2020). São também criadas curvas de arrasto em função da velocidade para diferentes casos analisados e uma superfície de arrasto em função da velocidade e do ângulo de locomoção da plataforma perante o eixo x global adotado. As principais técnicas são a simulação CFD e análise dos resultados e as principais ferramentas são O STAR-CCM+, o Excel, e o módulo Curve Fitting Toolbox (CFTOOL), do MATLAB.

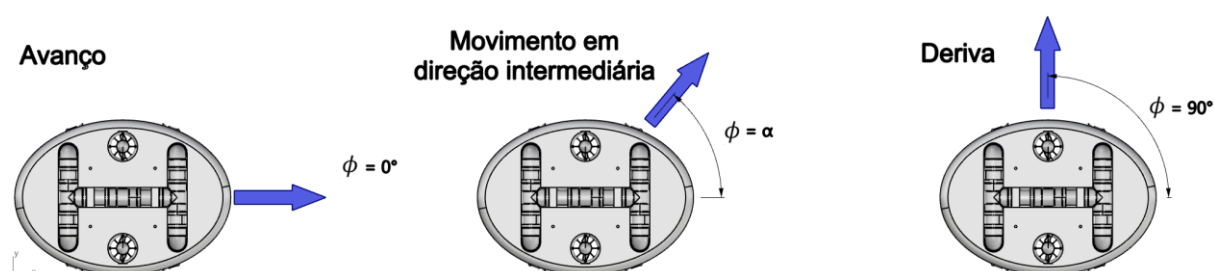
4. SIMULAÇÃO

Dos softwares CFD disponíveis no mercado, tais como Autodesk CFD, Ansys, OpenFOAM, dentre outros, um onde o autor encontrou poucas referências em trabalhos acadêmicos, em especial, da UFSC, é o Simcenter STAR-CCM+. Pode-se destacar os trabalhos de Iervolino (2015), que fez um estudo da resistência ao avanço de uma embarcação de planeio, e de Bastezini (2016), que fez um levantamento dos esforços hidrodinâmicos de um AUV, dando enfoque especial as forças e momentos obtidos.

O STAR-CCM+ é uma ferramenta de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) criada para resolver problemas multidisciplinares em mecânica dos fluidos e dos sólidos, dentro de uma única interface integrada. É utilizado principalmente para resolver problemas envolvendo fluxo e transferência de calor (SIEMENS, 2021). Por possuir uma interface integrada e amigável ao usuário, proporciona fácil entendimento e aprendizagem, assim, é o software que será utilizado para as simulações que virão nas etapas adiante deste trabalho. Sua utilização foi possível graças a disponibilização das licenças no Laboratório de Simulação Naval e no Laboratório de Tecnologia Subaquática, no CTJ da UFSC.

O objetivo das simulações, assim como previamente comentado, é a obtenção das forças de arrasto para diferentes configurações de movimento da plataforma, isto é, além dos movimentos nas direções ortogonais, x, y e z, busca-se também descobrir o arrasto, em regime permanente, ao longo de uma direção intermediária entre x e y identificada pelo ângulo ϕ , como visto na Figura 14.

Figura 14 – Tipos de movimento da plataforma



Fonte: Autor (2022).

É válido comentar que θ_z e ϕ , para as aplicações deste trabalho, são sempre iguais em sentidos contrários, pois, para simular o movimento da plataforma com um ângulo ϕ , é aplicado um ângulo θ_z de valor igual na plataforma e mantido o fluxo em x global, para que, assim, não seja necessário alterar toda a configuração do domínio e a direção do fluxo, tal como esclarecido no tópico 4.2.

Em sequência, busca-se variar a velocidade da plataforma entre dois valores limitantes, com incremento definido e constante, com o objetivo de obter, no fim, a força de arrasto para cada velocidade, para uma mesma configuração inicial do movimento. Deste modo, é possível estabelecer uma curva polinomial que representa a força de arrasto em função da velocidade, para determinado ângulo ϕ , através dos pontos (F_d, V) obtidos, onde F_d é a força de arrasto e V é a velocidade relativa entre o fluido e o corpo analisado.

Como a força de arrasto depende também do ângulo analisado, uma representação mais completa desta força é obtida através de uma superfície em função de V e ϕ . Assim, dado que a plataforma se encontra em movimento constante a um ângulo ϕ e a uma velocidade relativa V , pode-se obter a força de arrasto da plataforma para qualquer ponto dessa superfície como uma função f , sendo f a equação que rege essa superfície, da seguinte maneira:

$$F_d = f(V, \phi) \quad (6)$$

Para obter tal resultado, deve-se realizar etapas comuns em softwares de CFD, como o pré-processamento, abordando toda a questão da importação da geometria, definição dos modelos físicos envolvidos e da geração, configuração e aperfeiçoamento da malha, além do pós-processamento, abordando a configuração da visualização e manipulação dos resultados encontrados. Antes disso, é ainda necessária a etapa de verificação, que é responsável por firmar o conhecimento do autor sobre as aplicações do software CFD utilizado, através de comparação com resultados bem estabelecidos na literatura.

4.1. VERIFICAÇÃO DO SOFTWARE

A verificação é uma etapa essencial inerente a qualquer trabalho envolvendo análises CFD. Serve como base para demonstrar que o usuário do software, aplicador

da análise, tem segurança nos seus métodos e pode, a partir de diferentes técnicas que variam de software para software, chegar nos resultados esperados e que são condizentes com a realidade.

Uma das maneiras mais comumente adotadas na realização da verificação de dados é a comparação de resultados de experimentos bem estabelecidos com o resultado obtido por CFD, tais como a análise de escoamento ao redor de uma esfera, por exemplo. Para a verificação deste trabalho, visando a quantidade de dados experimentais existentes na literatura, a verificação por comparação com resultados experimentais de escoamento ao redor de uma esfera foi empregada.

Para isso, a comparação dos dados de coeficientes de arrasto retirados de experimentos de diferentes autores, para diferentes números de Reynolds (Re), é necessária.

O número de Reynolds, Re , é definido como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas de um fluido, da seguinte maneira

$$Re = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (7)$$

em que ρ é a massa específica, μ é a viscosidade dinâmica, V é a velocidade e L é a dimensão típica ou característica (FOX, 2011).

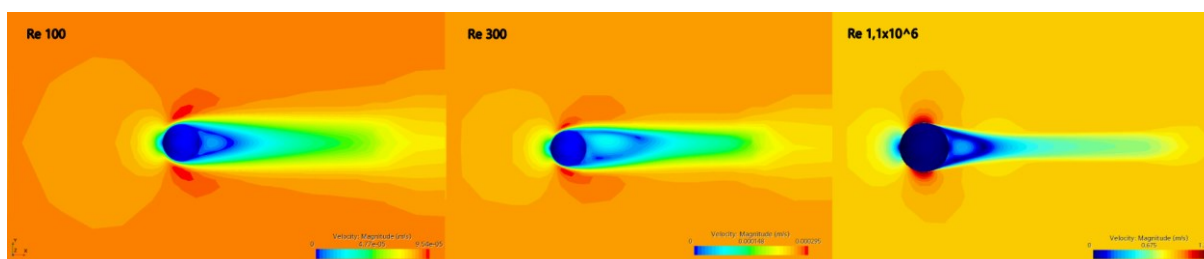
Assim, através dos métodos descritos no tópico 4.2. , pode-se obter os coeficientes de arrasto para uma esfera de raio qualquer para escoamentos sob Re iguais a 100, 300 e $1,1 \cdot 10^6$ e compará-los com os resultados experimentais obtidos por diferentes autores. A comparação pode ser visualizada na Tabela 2, a seguir, e as linhas de fluxo para cada caso podem ser vistas na Figura 15.

Tabela 2 – Verificação por comparação entre resultados experimentais da literatura e resultados das simulações do autor

Número de Reynolds	Fonte	Coefficiente de arrasto (c_d)	Erro relativo associado (%)
100	Simulação do autor	1,080	-
	Fornberg (1988)	1,085	0,46
	Kim e Choi (2002)	1,090	0,92
300	Simulação do autor	0,651	-
	Johnson e Patel (1999)	0,626	3,99
	Constantinescu e Squires (2000)	0,655	0,61
1,1.10 ⁶	Simulação do autor	0,108	-
	Achenbach (1972)	0,120	10,00
	Constantinescu et al. (2002)	0,084	28,57

Fonte: Autor (2022).

Figura 15 – Perfil de velocidade para as presentes simulações da Tabela 4



Fonte: Autor (2022).

Como visto na Tabela 2, a maior parte dos resultados para escoamento laminar ($Re \leq 2000$) se encontram com erros relativos baixos. Enquanto para escoamento turbulento ($Re \geq 50000$, para esferas com superfície rugosa), que é o caso da simulação deste trabalho, os erros relativos entre os resultados simulados e os da literatura, se encontram entre 10% e 28,57%, circundando o valor encontrado pela simulação acima e abaixo, mostrando que, neste caso, o resultado encontrado pela simulação se encontra num meio termo. Demonstrando que mesmo os resultados experimentais encontrados nas literaturas podem ter variações significativas, onde, uma das possíveis causas, é a escolha do parâmetro de viscosidade da esfera

adotada pelos autores. Assim, os erros deste caso podem ser considerados razoáveis e passíveis de tolerância.

4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

A etapa de pré-processamento compreende todos os passos de configuração necessários até que a simulação propriamente dita possa ser realizada, ou seja, compreende todos os passos anteriores ao momento em que a máquina utilizada realizará os cálculos necessários e apresentará ao operador os resultados requisitados. Os subtópicos a seguir compreendem estes passos.

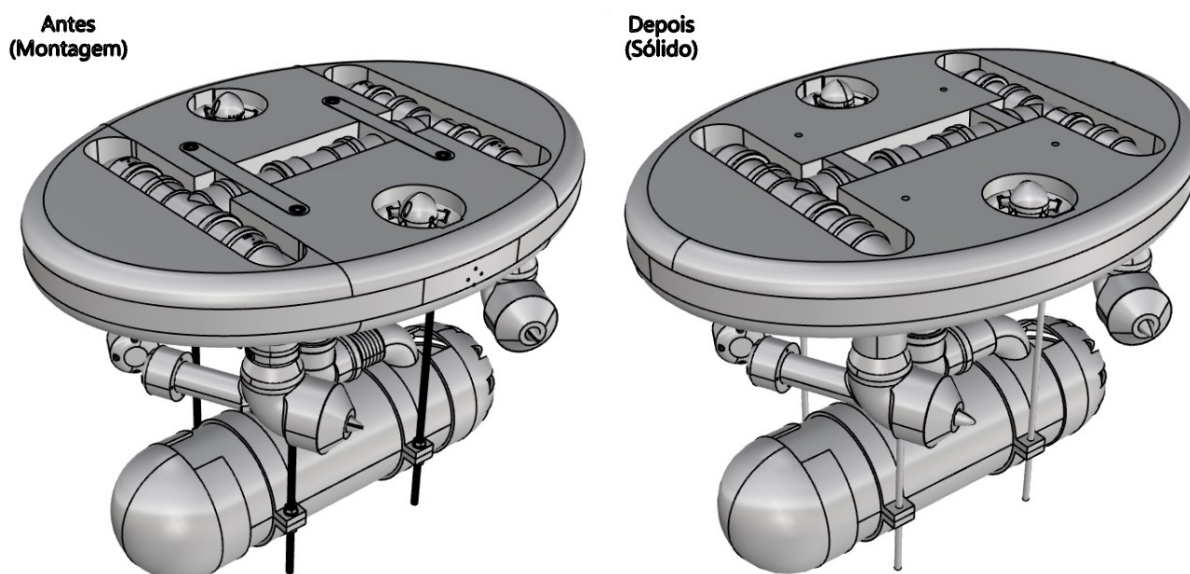
4.2.1. Importação da geometria

Embora o modelo 3D da montagem completa da plataforma já estivesse disponível, é necessário fazer uma simplificação da sua geometria para excluir pequenos ressaltos, divisões ou outros detalhes que possam gerar maior quantidade de células na malha do que o necessário, relativamente. Isto é, muitas vezes os pequenos detalhes de uma geometria podem trazer diferenças quase irrelevantes à força de arrasto ou ao coeficiente de arrasto total para determinada situação de análise.

Assim, é possível unificar todos os componentes essenciais da montagem total da plataforma em um único sólido, desta maneira, além de diminuir determinados ressaltos, deixando a superfície externa com menos faces, também é possível excluir algumas faces internas que existiam.

Com esse objetivo, foi criado o corpo sólido único, com a utilização do software Rhinoceros, que consiste basicamente no corpo da montagem completa da plataforma em um único componente e com a simplificação dos seguintes detalhes: Ressaltos em texto dos canos excluídos, suportes para encanamento simplificados para face única, porcas e roscas das barras M8 e da conexão da bomba excluídos, encaixe das três peças da plataforma simplificados para uma única peça, encaixes dos parafusos e afins da prancha, bocais e dos hélices excluídos e/ou simplificados. Estas modificações podem ser visualizadas na Figura 16, a seguir.

Figura 16 – Comparação montagem e sólido



Fonte: Autor (2022).

É válido ressaltar ainda a dificuldade envolvida em fazer estas simplificações. Foi verificado que alguns detalhes, como roscas e faces internas, podem gerar erros de interpretação do STAR-CCM+, além disso, a importação para o software pode ser dificultada devido à falta de faces, ou devido a faces sobressalentes da montagem.

Embora as simplificações ao modelo do corpo analisado levem algum tempo, a redução do esforço computacional necessário na etapa de simulação pode compensar o tempo utilizado na melhoria do modelo. Além disso, dependendo da quantidade de detalhes empregado, a geração de malha do modelo, que será melhor comentada nos próximos tópicos, pode ficar complexa o suficiente para que a malha 3D total do conjunto domínio-modelo, ou ainda, do fluxo, supere a memória RAM instalada no computador, impedindo a simulação de prosseguir, fato que ocorreu algumas vezes durante as simulações deste trabalho.

Por fim, a partir da edição do modelo, é possível criar uma variável auxiliar dentro do software, através da ferramenta de rotação. Esta variável é necessária para controlar a rotação do modelo do ROV em um ângulo ϕ , sem alterar a posição do domínio. Será utilizada no tópico 4.4. quando comentado sobre a abordagem de estudo utilizando o Design Manager.

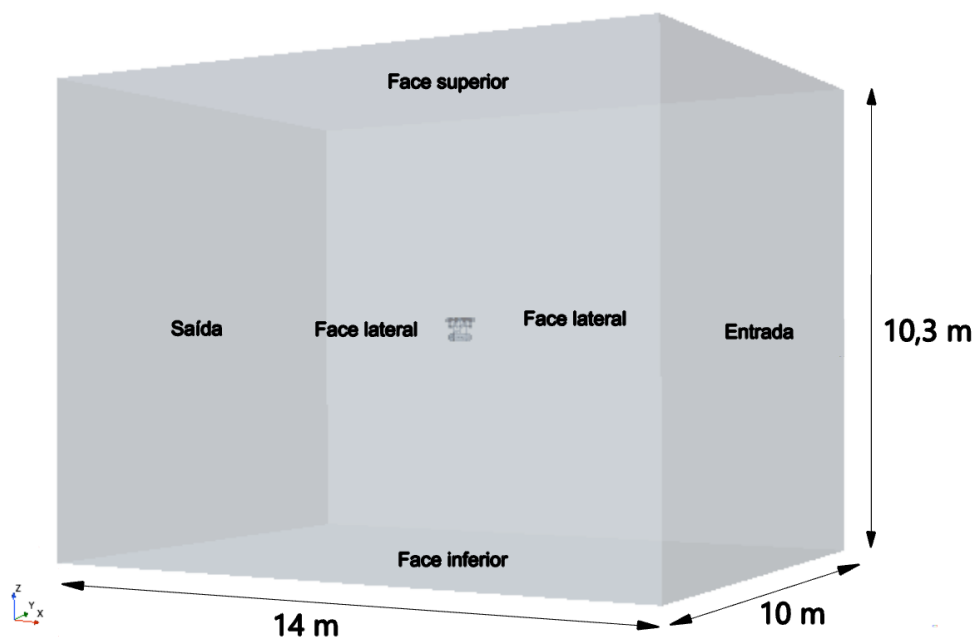
4.2.2. Definição do domínio

O espaço físico que se deseja resolver, de acordo com os requisitos de projeto, é chamado de domínio da simulação. Esse domínio pode incluir a geometria do mundo real, seu conteúdo e o ambiente à sua volta (SIEMENS, 2021). Assim, o domínio nada mais é do que o meio no qual o fluido utilizado na análise se encontra e onde o corpo que se pretende analisar será inserido. O tamanho tridimensional do domínio precisa ser grande o suficiente para conter o corpo e para prover resultados suficientemente próximos da realidade.

Para Chin e Lau (2012), a maior dificuldade é a determinação das dimensões do domínio. Para o estudo de forças de arrasto agindo em um ROV em um domínio fluido, um domínio infinitamente largo é necessário, entretanto, isso não é praticável tanto em CFD como experimentalmente. Ou seja, no geral, o tamanho do domínio deve ser aquele no qual, desde que aumentado mais em quaisquer direções, os resultados finais da simulação não se alterem significativamente.

Os autores ainda utilizam em suas simulações dimensões em torno de 20 vezes o comprimento, largura e altura do ROV (CHIN e LAU, 2012). Através de experimentos testando a variação de resultados entre simulações, realizando alterações tridimensionais do domínio, expandindo-o, foi verificado que as proporções utilizadas por Chin e Lau (2012) são adequadas com os parâmetros da plataforma. O domínio utilizado nas simulações finais, suas dimensões e os nomes dados a cada uma das faces são mostrados na figura a seguir.

Figura 17 – Domínio utilizado nas simulações e suas dimensões



Fonte: Autor (2022).

Em sequência, dentre os passos mais importantes para a continuação da simulação, primeiramente, é a obtenção do domínio fluido, isto é, do volume de fluido que fica disposto entre o domínio e o corpo do veículo, ou seja, interno ao domínio, e externo ao veículo. Para isso, o próprio STAR-CCM+ oferece uma ferramenta que auxilia o usuário com este objetivo, o comando subtração. E em seguida, a definição dos modelos físicos, necessários para uma formulação correta da análise que se pretende fazer dentro do software, assunto este que é tratado no próximo subtópico. O Apêndice C contempla uma lista dos principais comandos utilizados dentro do software, tais como o subtração, durante o desenvolvimento deste trabalho.

4.2.3. Definição dos modelos físicos envolvidos

A configuração dos modelos físicos envolvidos define as variáveis primárias da simulação e quais as formulações matemáticas serão usadas para gerar a solução (SIEMENS, 2021). Neste contexto, é importante selecionar os modelos físicos que mais se adequam e que melhor representam a realidade em determinada análise. O Quadro 1 a seguir identifica quais os modelos físicos selecionados para a análise da plataforma, junto a definições de alguns modelos e considerações.

Quadro 1 – Modelos físicos selecionados

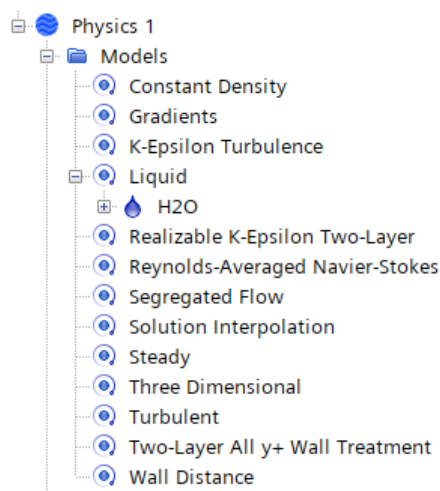
Modelo	Definição/Consideração	Tipo de seleção
Tridimensional	Propriedade do escoamento	Alternativa para seleção de espaço.
Líquido: H_2O	Propriedade do fluido	Alternativa para seleção de material.
Fluxo segregado	O modelo de fluxo segregado é uma alternativa para escoamentos incompressíveis ou levemente compressíveis, particularmente quando os recursos computacionais são um problema (SIEMENS, 2021).	Alternativa para seleção de tipo de fluxo.
Densidade constante	Propriedade do fluido	Alternativa para seleção de equação de estado.
Regime permanente	Propriedade do escoamento	Alternativa para seleção de tempo.
Turbulento	Propriedade do escoamento	Alternativa para seleção de regime viscoso.
Turbulência K-Epsilon	O modelo de turbulência K-Epsilon é um modelo de duas equações que resolve equações de transporte para a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação turbulenta para determinar a viscosidade turbulenta de vórtices. Várias formas do modelo K-Epsilon estão em uso há várias décadas e se tornou o modelo mais amplamente utilizado para aplicações industriais (SIEMENS, 2021).	Alternativa para seleção de turbulência média de Reynolds.
Interpolação da solução – Vizinho mais próximo	O modelo Interpolação de Solução permite que você escolha o método de interpolação usado para mapear os dados da solução quando solicitado uma nova malha (SIEMENS, 2021). Onde é selecionado o modelo “Vizinho mais próximo” que mapeia os dados da solução de uma malha para outra comparando os centroides das células em cada malha. (SIEMENS, 2021). A seleção deste modelo acelera a interpolação das soluções em troca de uma interpolação menos suave.	Modelo opcional.

Fonte: Autor (2022).

Dentre os modelos de turbulência disponíveis para seleção no software estão os modelos K-Epsilon e K-Omega. O modelo K-Omega possui algumas vantagens e desvantagens em relação ao modelo K-Epsilon, destacando sua sensibilidade para condições de contorno de entrada (SIEMENS, 2021). O modelo K-Epsilon se tornou o modelo mais utilizado para aplicações industriais e também é o modelo utilizado por Iervolino (2015), Bastezini (2016) e é um dos modelos estudados por Sousa (2019). Desta forma, foi o modelo de turbulência escolhido para este trabalho.

É válido ressaltar ainda que o STAR-CCM+ se encarrega de selecionar quaisquer outros métodos que estejam relacionados com as escolhas feitas pelo usuário automaticamente. Isso torna a seleção total dos modelos físicos associados à análise conforme a Figura 18.

Figura 18 – Modelos físicos associados à análise no STAR-CCM+

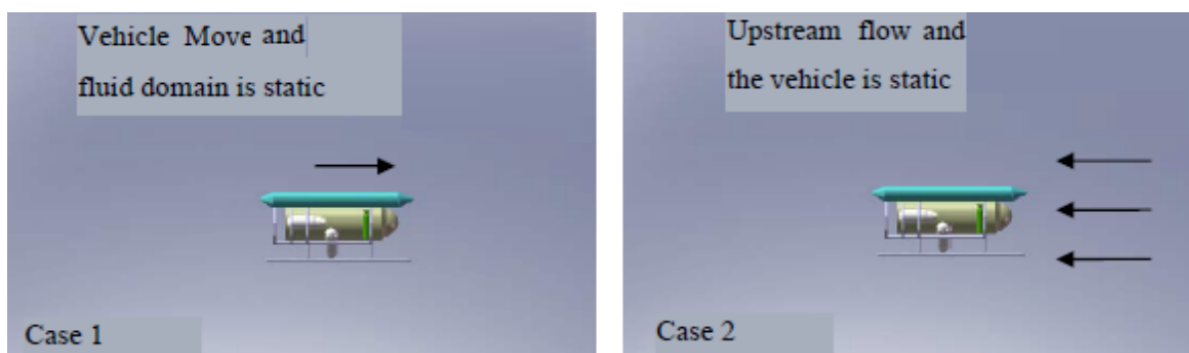


Fonte: Autor (2022).

É necessária ainda a definição de uma variável que representará a velocidade do fluido. É possível criá-la, dentro do software, atribuindo um nome, uma dimensão (que nesse caso é de velocidade em m/s) e o valor escalar. O valor exato da variável não é importante neste momento, pois será trocado de maneira automática mais a frente quando discutido o Design Manager. Deste modo, o valor escalar atribuído por padrão a variável é zero.

É válido destacar que em uma simulação é mais fácil fazer o fluido se mover a uma velocidade constante e em direção oposta ao ROV, que permanece estático, em vez de fazer o ROV se mover para frente em velocidade constante, enquanto o domínio fluido permanece estático, sem fluxo de corrente. Como a força de arrasto depende apenas do movimento relativo entre o corpo e o fluido, o resultado obtido das duas simulações é o mesmo (CHIN, 2012). Uma comparação entre os dois casos pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Comparação entre o movimento do fluido e o movimento do ROV



Fonte: Chin (2012, p. 5).

A vantagem de manter o ROV estático é que as condições de contorno podem ser configuradas mais facilmente para a simulação, sem alterar o domínio, por exemplo. Por outro lado, mover o ROV criaria mais malhas e em regime dinâmico, com a malha se alterando com o tempo e, portanto, seria mais complexo de manusear e necessitaria de maior poder computacional (CHIN, 2012).

Assim, é possível utilizar a variável de velocidade previamente obtida para alterar uma das condições iniciais dentro da física da simulação, que neste caso, é a velocidade inicial do fluido dentro de cada célula. Em regime permanente, a velocidade do fluxo interno de cada célula já é constante e igual a velocidade que seria adotada pelo veículo. Já as demais condições iniciais podem ser mantidas como os padrões indicados pelo STAR-CCM+. A pressão, por exemplo, é a manométrica, que é considerada como zero para uma pequena diferença de altura provida pela altura total da plataforma.

Deste modo, pode-se alterar a velocidade inicial para se igualar a velocidade que se busca analisar na simulação, pois a velocidade inicial definida como padrão pelo software é zero. A definição da velocidade inicial é feita vetorialmente, neste caso, a simulação será feita com o fluxo se movendo no sentido negativo do eixo x inercial (ou de E, no caso do sistema ENU, por exemplo).

Com a definição dos modelos físicos envolvidos, é possível avançar para as configurações da região e, posteriormente, a geração e análise da malha e os diversos parâmetros que podem ser alterados para a obtenção de um resultado final mais próximo da realidade. A configuração da região, entradas e saídas de fluxo e outras definições são discutidos no subtópico a seguir.

4.2.4. Configurações da região

Antes da geração e configurações da malha, é necessário aplicar as partes envolvidas no domínio a uma região. Regiões são domínios de volume (ou áreas, em um caso bidimensional) no espaço que são completamente cercadas por limites. Elas não são necessariamente contíguas, e são discretizadas por uma malha conforme constituída de faces conectadas, células e vértices (SIEMENS, 2021).

Pode haver várias regiões em uma única simulação, cada uma com um nome e propriedades exclusivas (SIEMENS, 2021). Entretanto, apenas uma região é necessária para a aplicação do problema abordado por este trabalho, pois apenas um domínio fluido é analisado, sem variações ou propriedades diferentes.

Assim como comentado no subtópico 4.2.2. Definição do domínio, o fluido do domínio, isto é, aquele que está entre as paredes do domínio e o corpo da plataforma, pode ser obtido diretamente dentro do software através da subtração entre o volume total do domínio e o volume do veículo. O domínio fluido, como foi denominado, é então atribuído a uma região para que as configurações necessárias possam ser feitas e, posteriormente, a malha possa ser gerada em cima desta região.

A configuração mais importante nessa etapa é a definição do tipo de contorno que cada face da região oferece à simulação. As faces de entrada, superior, inferior, e faces laterais foram todas definidas como *Entrada de Velocidade*, entretanto, por padrão, o software define o vetor do fluxo perpendicular a face, o que apontaria um fluxo ao centro do domínio por todas as faces, menos a de saída.

Isso pode ser alterado manualmente, desta maneira, cada uma das faces laterais, superior e inferior do domínio também são definidas como entradas, porém, com fluxo correndo em x, paralelamente as faces. Esta configuração permite que cada face não seja enxergada pelo software como uma parede, que traria restrições ao escoamento, e sim como um domínio aberto com entrada de velocidade constante na direção do escoamento, isso é, perpendicular apenas a face de entrada. Já a face de saída é definida como *Saída de Pressão*.

A configuração *Entrada de Velocidade* representa, por exemplo, a entrada de um duto no qual a velocidade do fluxo é conhecida, enquanto a configuração de *Saída de Pressão* é a configuração compatível com este tipo de entrada. Existem ainda outras configurações, mais complexas, que podem ser utilizadas dependendo do tipo de problema analisado no software, como *Entrada de Fluxo de Massa*, *Entrada de*

Estagnação, Plano de Simetria, dentre outras, mas as configurações definidas para a presente análise, conforme descrição nos parágrafos anteriores, suprem as necessidades deste trabalho.

Por fim, é aplicada a configuração *Parede* é aplicada a face externa do corpo do ROV. Essa configuração aplicará todas as condições necessárias para o software tratar o ROV como uma parede impermeável, representando restrição ao movimento e toda condição de não deslizamento necessária para os cálculos.

Para Chin (2012), a maioria das operações com ROV, considerando sua escala e velocidade, possuem números de Reynolds típicos maiores que $1,1 \cdot 10^6$, indicando turbulência no fluxo. Assim como já foi considerado no Capítulo 4.2.3. Definição dos modelos físicos envolvidos Neste sentido, outro parâmetro que merece atenção é a intensidade da turbulência.

Para escoamentos ao redor de carros, submarinos e aviões em domínios de fluidos estacionários normalmente se tem o caso de baixa turbulência, com intensidades menores que 1%. Para ROVs, esse valor pode ser ainda menor, como o caso adotado pelo autor em 0,1% (CHIN, 2012). Para manter um coeficiente de segurança razoável, considerando a complexidade da geometria do ROV, foi optado por utilizar a intensidade de turbulência em 1%, que também é o padrão sugerido pelo software. Para as demais configurações de região foram mantidas os padrões do software com base nas escolhas de modelos físicos e nas propriedades do fluido selecionados anteriormente.

Como foi previamente comentado, com todas as definições sobre a região estabelecidas, pode-se passar para a geração, análise e aperfeiçoamento da malha da simulação. Os próximos tópicos e subtópicos foram direcionados para a geração e estudo da malha da simulação, aplicado ao caso do ROV analisado.

4.2.5. Geração inicial da malha

Semelhante ao que foi comentado no Capítulo 2.2.1, uma malha é uma representação discretizada de um domínio geométrico no domínio computacional. Esse domínio pode incluir geometrias do mundo real, seus conteúdos e seu ambiente circundante (SIEMENS, 2021), como o domínio visto em 4.2.2. Definição do domínio.

Os solucionadores do STAR-CCM+ encontram soluções para equações físicas nos locais definidos pela malha. Para Volume Finito, o software calcula os

valores nos centros das células (SIEMENS, 2021). Deste modo, os solucionadores do software são responsáveis por resolver as equações localmente de acordo com os elementos da malha, assim, a malha é também responsável por entregar resultados, com maior ou menor precisão, da simulação. Portanto, é necessário realizar um bom estudo sobre a qualidade de malha da análise.

A criação da malha pode ser feita pelo programa através da geração automática de malha que tem como objetivo gerar malhas de superfície e volume para peças de entrada selecionadas. Esta operação fica responsável por gerenciar as medidas, controles padrão e controles personalizados da malha (SIEMENS, 2021). Os geradores de malha ou malhadores, são os modelos responsáveis pela geração da malha selecionados e são mostrados com demais esclarecimentos no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2 – Malhadores selecionados no software

Modelo	Definição/Consideração	Tipo de seleção
Malhador de células aparadas	O malhador de células aparadas fornece um método robusto e eficiente de produzir uma grade de alta qualidade para problemas de geração de malha simples e complexos. Ele combina vários atributos de malha altamente desejáveis em um único esquema de malha, dentre eles: malha predominantemente hexaédrica com assimetria de célula mínima e refinamento baseado no tamanho da malha da superfície e outros controles de refinamento definidos pelo usuário (SIEMENS, 2021).	Alternativa para gerador de volume do núcleo.
Retificador de superfície	A fim de melhorar a qualidade geral de uma superfície existente e otimizá-la para os modelos de malha de volume, o retificador de superfície pode ser usado para retriangular a superfície (SIEMENS, 2021). Um exemplo do antes e depois de sua utilização pode ser visto na Figura 20.	Seleção única para malhador de superfície.
Reparo automático de superfície	A ferramenta de reparo automático de superfície fornece um procedimento automático para corrigir uma série de problemas geométricos que podem existir na superfície do corpo analisado, uma vez que o processo de retificação da superfície seja concluído (SIEMENS, 2021).	Seleção opcional para malhador de superfície.
Malhador de camadas prismáticas	O malhador de camada de prisma é usado para gerar células prismáticas ortogonais próximas às superfícies ou limites da parede. Esta camada de células é necessária para melhorar a precisão da solução de fluxo (SIEMENS, 2021).	Seleção opcional para malhador de camada limite.

Fonte: Autor (2022).

Figura 20 – Exemplo do antes e depois da utilização do retificador de superfície na geração de malha, respectivamente



Fonte: SIEMENS (2021, p. 1861).

Os controles internos padrões disponibilizados pelo software não serão alterados neste momento pois dependem de um estudo mais aprofundado a respeito da qualidade da malha produzida pela alteração destes recursos principais, além da capacidade de processamento que o computador utilizado para a geração da malha, e da simulação, pode oferecer. Assim, os controles padrões principais são melhor discutidos no Capítulo 4.2.7. Qualidade da malha.

O software disponibiliza ainda recursos para que o usuário possa gerar controles adicionais para a malha dependendo da sua aplicação de análise. Os controles adicionais utilizados são discutidos a seguir.

4.2.6. Controles adicionais da malha

Os controles adicionais, ou controles customizáveis se sobressaem sobre os controles padrões para os modeladores de superfície ou de volume. Este recurso permite refinar ou engrossar a malha em superfícies, geometrias ou volumes especificados pelo usuário. Os controles adicionais especificados para a análise do ROV são vistos nos tópicos quaternários a seguir.

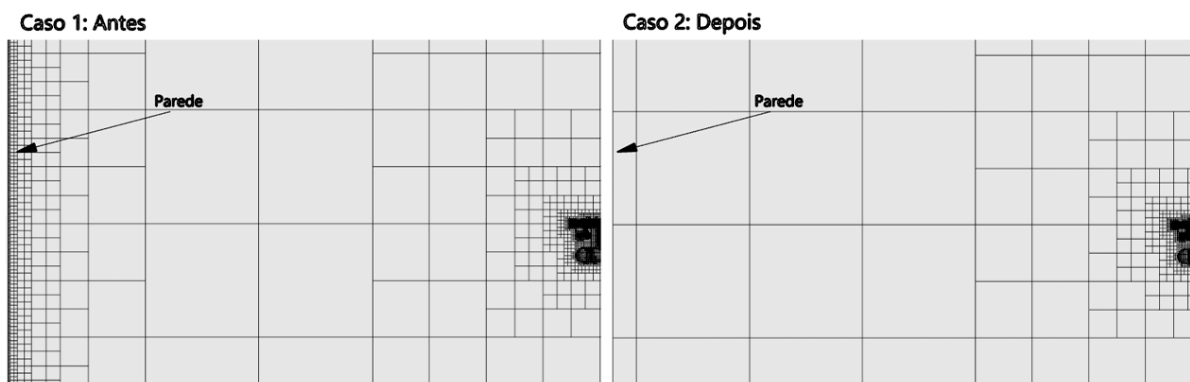
4.2.6.1. Controle de domínio

O *controle de domínio – tamanho da superfície* possui o objetivo de manter as células da superfície do domínio em grande escala, do contrário, o STAR-CCM+ tende

a, por padrão, diminuir as células da região por estar próximo de uma parede. Entretanto, a precisão do fluxo próximo as paredes do domínio não é necessária, visto que essa região representa um volume de água relativamente distante do ROV.

Esta modificação pode reduzir o esforço computacional próximo as extremidades do domínio, que poderá ser melhor utilizado próximo ao corpo da plataforma, onde a precisão será mais requisitada. O padrão para o tamanho de superfície alvo foi adotado em 5000% do tamanho base de célula, que será comentado no tópico 4.2.7.1. Tamanho base de célula. Uma ilustração do antes e depois do controle adicional de domínio aplicado a uma malha pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 – Antes e depois da aplicação do controle de domínio



Fonte: Autor (2022).

O resultado obtido na figura acima tem como base os parâmetros que serão definidos mais a frente como definitivos da simulação, no Capítulo 4.2.8. Análise final da malha, com um tamanho base de 21 mm. Embora aparente ter pouca diferença bidimensionalmente, é válido lembrar que o domínio é tridimensional e com proporções 20 vezes maiores que a do corpo.

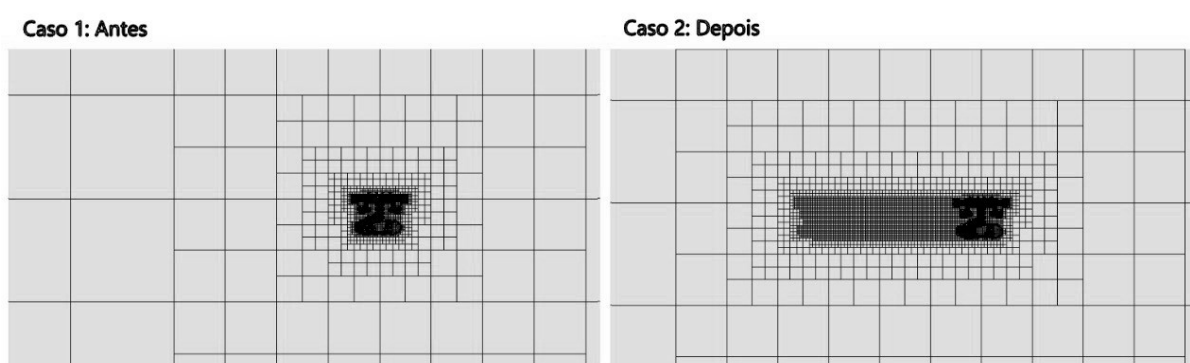
Assim, em relação a quantidade de células da malha, o caso 2 apresenta um total de aproximadamente 873 mil células, enquanto o caso 1 apresenta um total de 5476 mil células, ou seja, a aplicação do controle de domínio na malha representa uma diminuição porcentual equivalente a aproximadamente 84% do número de células original da malha, reduzindo processamento.

4.2.6.2. Refinamento de esteira

O controle *refinamento de esteira* possui o objetivo de refinar a malha da esteira formada atrás do corpo do ROV, de forma a modelar os efeitos da turbulência e possíveis alterações do fluxo as quais poderiam afetar o arrasto do corpo. Tornando a simulação mais próxima da realidade. Foi definido equivalente a três vezes o comprimento total do corpo analisado, isto é, 2,1 m, e com demais dimensões características semelhantes ao corpo. O padrão para o refinamento de esteira foi adotado em 100% do tamanho base, isto é, igual ao tamanho base de célula definido.

A principal vantagem de usar a opção de refinamento de esteira em vez de um controle volumétrico é a definição da zona de refinamento com uma superfície. Portanto, se a superfície limite muda, o refinamento da esteira também muda. Esta característica é útil em estudos paramétricos ou em lote, onde as mesmas configurações são aplicadas a várias geometrias (SIEMENS, 2021). No caso em questão, essa característica é útil para quando a malha precisar ser refeita para cada ângulo de análise. Uma ilustração do antes e depois do controle de esteira aplicado a uma malha pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Antes e depois da aplicação do refinamento de esteira



Fonte: Autor (2022).

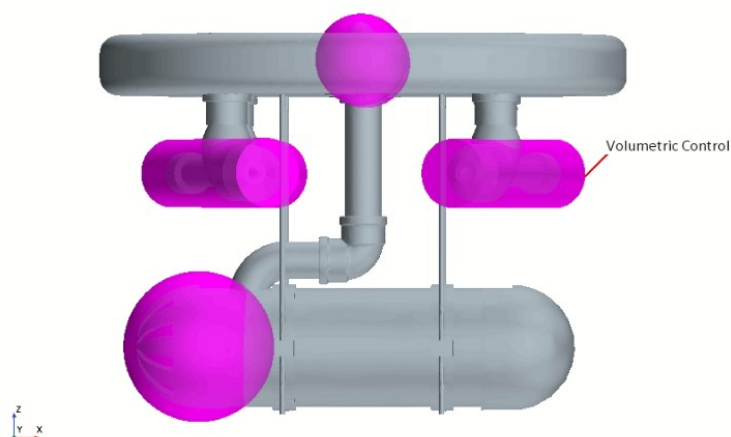
Semelhante ao que foi comentado no tópico anterior, o número de células apresentado no caso 2 representa um aumento de apenas 1% quando comparando as 873 mil células obtidas no caso 1 com as 930 mil do caso 2. Nesta situação, a elevação do número de células pode ser benéfica, gerando resultados finais mais próximos da realidade, sem alterações significativas no esforço computacional.

4.2.6.3. Controle volumétrico

O *controle volumétrico* aplica um refinamento de malha em regiões volumétricas que requerem um controle mais apurado, seja por possuir mais ressaltos, entalhes ou curvaturas. No todo, são aplicados 4 cilindros cobrindo completamente os bocais, 2 esferas cobrindo os hélices e uma esfera cobrindo a carenagem traseira da bomba, que possui aberturas para passagem da água.

O padrão para o controle volumétrico foi adotado em 50% do tamanho base, isto é, metade do tamanho base de célula padrão. A disposição dos cilindros e esferas de controle podem ser vistos na Figura 23 e estes corpos podem ser adicionados ao comando de rotação comentada no subtópico 4.2.1. Importação da geometria, deste modo, quando o ROV for rotacionado, os corpos volumétricos refinadores também rotacionarão.

Figura 23 – Disposição dos cilindros e esferas no controle volumétrico



Fonte: Autor (2022).

Comparando com os controles anteriores, este caso não apresenta diferenças visuais de maneira significativa, e o aumento do número de células em relação ao refinamento de esteiro é de apenas 1,5 mil, sendo menor que 1%. Este é um ponto positivo se tratando da simulação, pois essa pequena alteração pode trazer resultados mais precisos em troca de pouco processamento adicional comparado aos parâmetros anteriores.

4.2.7. Qualidade da malha

Em geral, uma malha volumétrica de baixa qualidade pode reduzir a precisão e eficiência da solução obtida (SIEMENS, 2021). O guia do usuário do STAR-CCM+ indica a análise dos seguintes aspectos globais na avaliação da qualidade geral da malha, além de outras considerações a nível local:

- a. Densidade de malha - a malha é suficientemente densa em áreas de alto gradiente para representar fenômenos de fluxo com precisão?
- b. Distribuição da malha – a distribuição da malha entre as áreas de alto e baixo gradiente é ótima?
- c. Camadas próximas à parede - a malha contém camadas próximas à parede suficientes para calcular a turbulência adequadamente?
- d. Intervalo y^+ - os valores de y^+ são razoáveis para o modelo de turbulência selecionado?

Considerando estes aspectos, é necessário fazer um estudo sobre a qualidade de malha da análise. O estudo foi realizado através de simulações, testes e comparações envolvendo todos os parâmetros discutidos nos tópicos quaternários a seguir.

Como base para o estudo, os testes realizados nos subtópicos posteriores, realizam modificações numéricas em um ou mais dos parâmetros que serão discutidos, mantendo-se como base para qualquer outro as configurações média ou padrão, normalmente sugeridas pelo STAR-CCM+. Além disso, as configurações para os controles adicionais são mantidas como previamente definidas e a velocidade de entrada e inicial em cada célula é definida como 0,9 m/s, igual a máxima velocidade previamente encontrada pelos autores Marques e Catarin (2020). Os testes comparam tanto a diferença que o parâmetro faz em um único *tamanho base de célula*, como a diferença que ele faz entre tamanhos base diferentes.

4.2.7.1. Tamanho base de célula

O parâmetro *tamanho base de célula* especifica os valores de comprimento utilizados como referência para todos os outros controles baseados em tamanho

relativo, que também serão utilizados. De maneira geral, quanto menor o tamanho base, menor é o tamanho padrão das células, localizadas normalmente próximo a superfície, antes da aplicação de outros controles padrões ou adicionais.

Convencionalmente, utiliza-se uma precisão equivalente a 1% do comprimento total do corpo para se obter bons resultados. É válido lembrar que o corpo utilizado nesta simulação possui dimensões semelhantes de altura e largura, necessitando de uma avaliação única para casos onde o corpo possui o comprimento muito maior que a largura, por exemplo, pois isso pode comprometer a qualidade da malha em determinada região, sendo necessária a utilização de controles volumétricos adicionais.

Embora fosse interessante a utilização de uma precisão de malha de 1% de tamanho base, equivalente a 7 mm de comprimento da célula, os primeiros testes com essa precisão mostraram que o computador utilizado para a simulação não suportava a malha gerada, isto é, não possuía poder computacional suficiente para gerar a malha ou mesmo para rodar uma simulação nestas proporções. No Star-CCM+ este problema resulta em um aviso de malha inválida ou falta de memória necessária para realizar a simulação. Assim, o tamanho base de 7 mm foi descartado do estudo. As configurações de hardware do computador utilizado para as simulações podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Configurações de hardware principais do computador utilizado nas simulações

Componente	Configuração instalada
HD	1 T
SSD	128 Gb
Memória RAM	20 Gb
Processador	Intel Core i5 9th Gen 2,4 Ghz
Placa de vídeo	NVIDIA GeForce GTX 1650 4 Gb

Fonte: Autor (2022).

Como será comentado no Capítulo 4.4., é optado por fazer variações do ângulo de rotação ϕ entre 0° e 90° , com incremento constante de 15° , e variações de velocidade V entre 0,25 m/s e 1,25 m/s, com incremento constante de 0,25 m/s para

cada ângulo, além da avaliação vertical, totalizando 40 simulações em lote. Neste sentido, a precisão de 2%, ou 14 mm, também foi descartada dos estudos, pois uma única simulação levaria, em média, 4 horas a partir dos testes feitos com a máquina utilizada e o tempo para a realização do trabalho é limitado.

Portanto, para o parâmetro tamanho base, é optado por fazer o estudo com as precisões de 3%, 4% e 5%, equivalentes a 21 mm, 28 mm e 35 mm de tamanho de célula, respectivamente. Os resultados serão apresentados mais a frente, no Capítulo 4.2.8. Análise final da malha. Estes padrões de tamanho de célula podem então ser utilizados para os testes dos parâmetros abordados nos tópicos quaternários abaixo.

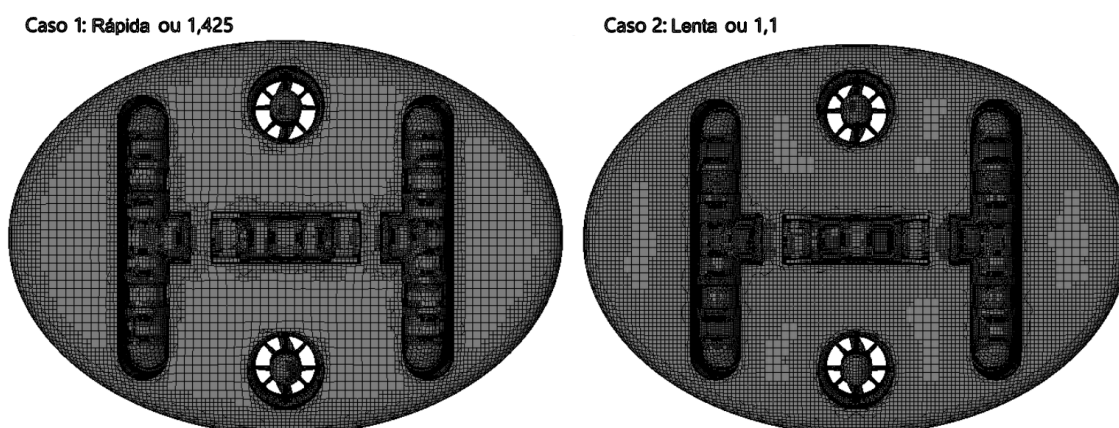
4.2.7.2. Taxa de crescimento superficial

A *taxa de crescimento da superfície* é o parâmetro que controla a velocidade de crescimento dos triângulos em uma superfície. O crescimento acontece sempre que a superfície não encontra nenhum plano perpendicular ou em outras direções, ou seja, sempre que a célula está livre para crescer na mesma direção original (SIEMENS, 2021). Resumidamente, o parâmetro busca maior precisão em regiões com mudanças de direção das faces, como ressaltos, por exemplo.

Para este parâmetro os testes foram realizados com os três tamanhos base previamente mencionados, variando a taxa de crescimento superficial nas configurações rápida, padrão e lenta, equivalentes, respectivamente, a uma taxa de aproximadamente 1,425, 1,3 e 1,1.

Os resultados visuais para as malhas obtidas para o tamanho base de 21 mm comparando a menor e maior taxa de crescimento podem ser vistos na Figura 24. Os resultados obtidos em todos os testes de malha serão melhor discutidos no Capítulo 4.2.8. Análise final da malha, e podem ser vistos a partir da Tabela 4.

Figura 24 – Comparação de malha com variação da taxa de crescimento da superfície

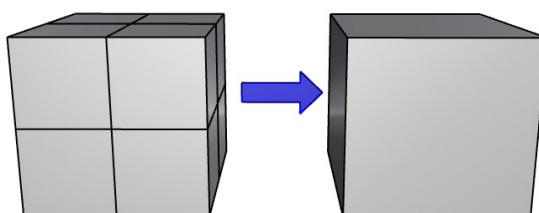


Fonte: Autor (2022).

4.2.7.3. Taxa de crescimento volumétrica

A *taxa de crescimento volumétrica*, semelhante a taxa de crescimento da superfície, representa a velocidade de crescimento volumétrica da malha. É definida como o número mínimo de camadas sequenciais, com volume de célula constante, que devem ocorrer antes da transição volumétrica de oito células para uma, cubicamente, como ilustra a Figura 25. Já que neste caso foi optado pela utilização do modelo de malha de célula aparada (SIEMENS, 2021).

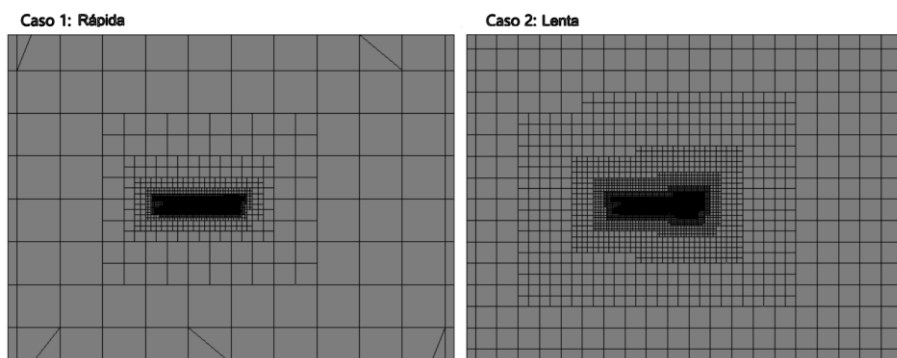
Figura 25 – Ilustração da transição volumétrica de oito células para uma



Autor (2022).

Assim como na taxa de crescimento superficial, os testes foram realizados para as configurações rápida, média e lenta, com valores equivalentes respectivamente ao mínimo de 1 camada antes da transição, 2 camadas e 4 camadas. Os resultados visuais para as malhas obtidas para um base size de 21 mm podem ser vistos na Figura 26, demonstrando um corte longitudinal do domínio.

Figura 26 – Comparação de malha com variação da taxa de crescimento do volume



Fonte: Autor (2022).

4.2.7.4. Refinamento de esteira

Como comentado no tópico 4.2.6.2. Refinamento de esteira, o controle possui o objetivo de refinar a malha da esteira formada atrás do corpo do ROV. Ao contrário dos últimos parâmetros, este não tem diferença significativa, visualmente, na malha como um todo. Sua principal característica é a mudança da precisão do tamanho base da célula dentro da esteira. Neste teste, os tamanhos relativos de tamanho de célula utilizados foram 100%, 50% e 25%.

4.2.7.5. Número de camadas prismáticas

O modelo de malha de camada de prisma é usado para gerar células prismáticas ortogonais próximas às superfícies. As camadas do prisma permitem que o solucionador resolva o fluxo próximo à parede com precisão, o que é crítico para determinar não apenas as forças e a transferência de calor nas paredes, mas também as características de fluxo, como separação. A separação, por sua vez, afeta os resultados integrais, como arrasto ou queda de pressão (SIEMENS, 2021). Para esse teste, foi avaliada a condição de 2, 5 e 8 camadas de prisma. Sendo 2 camadas a configuração padrão do STAR-CCM+.

4.2.7.6. Valor y^+ da parede

A previsão das características do fluxo como as citadas no tópico anterior depende da resolução dos gradientes de velocidade e temperatura normais à parede. O valor y^+ é uma distância não dimensional que determina se o espaçamento próximo à parede é apropriado para o tratamento de parede selecionado para a simulação (SIEMENS, 2021).

O cálculo do y^+ é feito conforme a equação a seguir

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (8)$$

onde, y é a distância normal da parede ao centroide da célula da parede, ν é a viscosidade cinemática e u^* é uma velocidade de referência. A velocidade de referência é derivada de uma quantidade de turbulência específica para o modelo de turbulência. Para modelos mistos e de duas camadas, a velocidade de referência u^* pode ser calculada iterativamente através da lei da parede (SIEMENS, 2021).

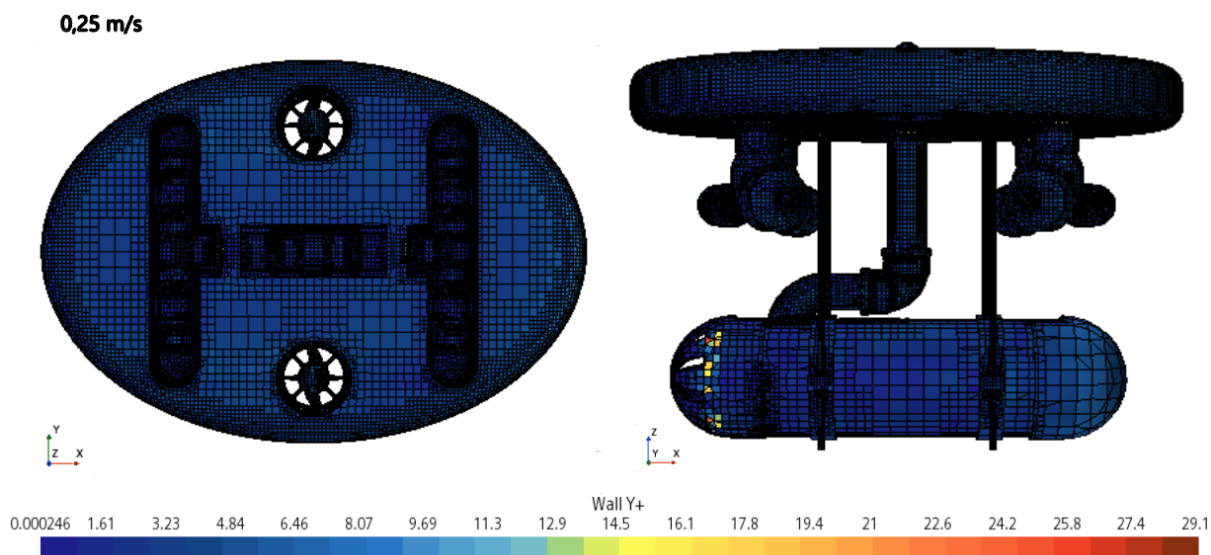
Afim de resolver o y^+ , o STAR-CCM+ disponibiliza duas opções de modelos, o tratamento de parede para todo y^+ e o tratamento de parede para baixo y^+ .

- a. O tratamento de parede para baixo y^+ assume que a subcamada viscosa está devidamente resolvida ($y^+ \leq 1$) e, portanto, as leis de parede não são necessárias. A tensão de cisalhamento da parede é calculada como seria em um fluxo laminar ou em uma simulação numérica direta.
- b. O tratamento de parede para todo y^+ não faz suposições sobre o quão bem a subcamada viscosa é resolvida. Usando uma lei de parede combinada para estimar a tensão de cisalhamento, o resultado é semelhante ao tratamento de parede para baixo y^+ se a malha for suficientemente fina. Se a malha for suficientemente grossa ($y^+ > 30$), a lei da parede é equivalente a um perfil logarítmico (SIEMENS. 2021).

Desta maneira, é importante que a malha alcance um bom valor de y^+ , isto é, $1 < y^+ < 30$, para a obtenção de bons resultados próximo a superfície do ROV, e, portanto, resultados de arrasto mais fiéis à realidade. Neste contexto, é suficiente a

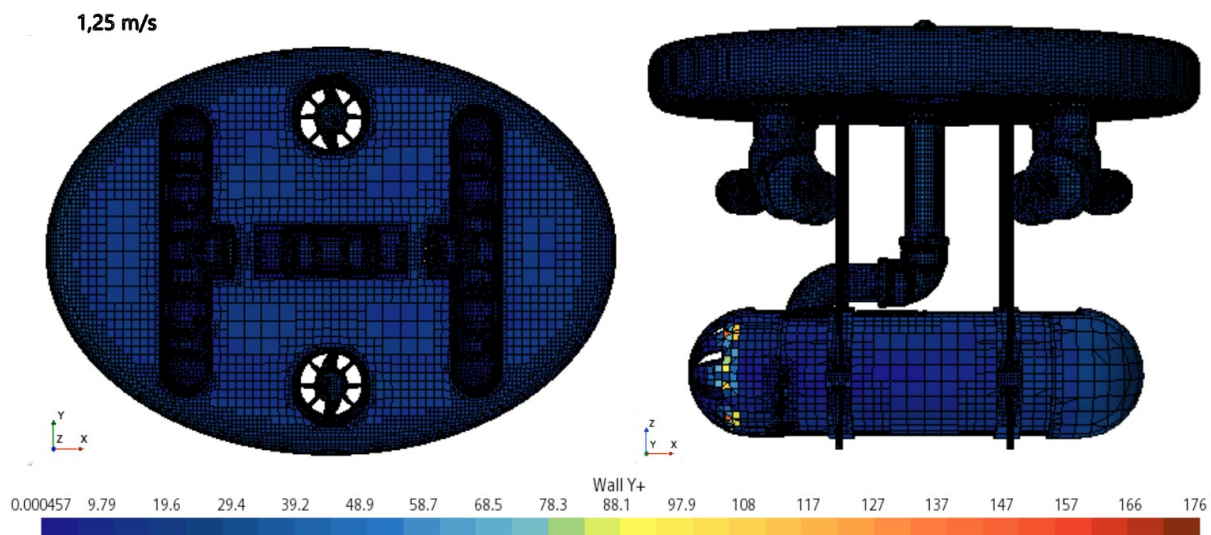
avaliação do y^+ para a configuração da malha final que é definida no Capítulo 4.2.8. Análise final da malha, que pode ser feita através da verificação visual dos dados entregues pelo programa, conforme a Figura 27 e a Figura 28.

Figura 27 – Análise visual da distribuição do y^+ no ROV à 0,25 m/s



Fonte: Autor (2022).

Figura 28 – Análise visual da distribuição do y^+ no ROV à 1,25 m/s



Fonte: Autor (2022).

Como pode ser visto na Figura 28, a grande maioria das células possui valores de y^+ entre 1 e 30, indicando bons resultados de malha, e uma quantidade muito

pequena de células, as quais estão em regiões de grande mudança de direção, porém com grande tamanho, apresentaram resultados variados.

Também é importante fazer a comparação entre a Figura 27 e a Figura 28, que mostram que a velocidade relativa entre o fluido e o ROV influem no valor de y^+ . Para 0,25 m/s, todos os valores são aceitáveis, e para 1,25 m/s, poucas células saem do range, deste modo, pode-se considerar que a malha como um todo está suficientemente trabalhada em relação ao y^+ da superfície, dentro do regime de trabalho analisado para o ROV.

4.2.8. Análise final da malha

Para a realização da comparação final são então necessárias algumas etapas que serão posteriormente discutidas no Capítulo 4.3., referentes a obtenção da força de arrasto através do software STAR-CCM+. Entretanto, estas etapas já foram realizadas nestes testes de malha a fim de comparar os resultados de força encontrados a partir de cada uma das malhas.

Os principais resultados obtidos são mostrados nas tabelas a seguir, comparando o tipo de parâmetro analisado, o número de células, o tempo médio da simulação e a força de arrasto obtida. Além disso, foram também comparados os erros relativos da variação dos resultados de um parâmetro para um mesmo tamanho base de célula, considerando a configuração mais precisa como a base para comparação, chamado de erro relativo local. Foram também comparados os erros relativos considerando todos os resultados, isto é, entre tamanhos base de célula diferentes, considerando como base para comparação, neste caso, o valor mais preciso do menor tamanho analisado, normalmente 21 mm, chamado de erro relativo global.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos no teste 4.2.7.1. Tamanho base de célula, onde o resultado mais significativo obtido nesse caso é o grande aumento percentual da quantidade total de células quando variando 1% de precisão do tamanho base. A tabela indica um aumento de 163% para o tamanho base de 14 mm (2%) em relação ao de 35 mm (5%), esse aumento de células tem relação direta com o aumento do tempo de simulação, que salta para mais de 4 horas.

Tabela 4 – Análise do estudo 4.2.7.1. Tamanho base de célula

Tamanho Base (mm)	Quantidade de células	Tempo da simulação (h)	Força (N)	Erro relativo global (%)	Varição relativa de células global (%)
35	620887	1,64	23,55	5,37	-
28	679854	1,74	24,26	8,55	9
21	1033444	2,62	22,78	1,92	66
14	1632859	4,38	22,35	-	163

Fonte: Autor (2022).

Relembrando que, como comentado no Capítulo 4.2.7.1., um tempo de simulação de 4 horas é um problema considerando as 40 simulações em lote que precisam ser feitas na solução final, deste modo, o tamanho base de célula de 14 mm foi descartado dos demais testes.

São interessantes ainda os resultados obtidos nos testes 4.2.7.3. e 4.2.7.4. Estes resultados são apresentados, respectivamente, na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Análise do estudo 4.2.7.3. Taxa de crescimento volumétrica

Tamanho base (mm)	Taxa de crescimento volumétrica	Quantidade de células	Tempo da simulação (h)	Força (N)	Erro relativo local (%)	Erro relativo global (%)	Varição relativa de células local (%)	Varição relativa de células global (%)
35	Rápida	575972	1,32	23,84	1,92	5,49	-	-
35	Média	620887	1,64	23,55	0,68	4,20	8	8
35	Lenta	759284	1,68	23,39	-	3,50	32	32
28	Rápida	639023	1,67	24,58	2,20	8,76	-	11
28	Média	679854	1,74	24,26	0,87	7,35	6	18
28	Lenta	828473	2,08	24,05	-	6,42	30	44
21	Rápida	967910	2,72	22,92	1,42	1,42	-	68
21	Média	1033444	2,62	22,78	0,80	0,80	7	79
21	Lenta	1262531	3,28	22,60	-	-	30	119

Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 – Análise do estudo 4.2.7.4. Refinamento de esteira4.2.7.4.

Tamanho base (mm)	Refinamento de esteira (%)	Quantidade de células	Tempo da simulação (h)	Força (N)	Erro relativo local (%)	Erro relativo global (%)	Varição relativa de células local (%)	Varição relativa de células global (%)
35	100	620887	1,64	23,55	0,99	3,47	-	-
35	50	699385	2,05	23,54	0,94	3,43	13	13
35	25	1254066	3,23	23,32	-	2,46	102	102
28	100	679854	1,74	24,26	1,55	6,59	-	9
28	50	816183	2,51	24,12	0,96	5,98	20	31
28	25	1819022	4,94	23,89	-	4,96	168	193
21	100	1033444	2,62	22,78	0,09	0,09	-	66
21	50	1349695	3,41	22,74	0,09	0,09	31	117
21	25	3580002	8,54	22,76	-	-	246	477

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 5 indica que o erro relativo local, ou seja, aquele que avalia a diferença entre as configurações rápida, média e lenta para cada tamanho base analisado, encontra-se menor ou igual a 2,2%. Isso indica que não é vantajoso o aperfeiçoamento da precisão da taxa de crescimento volumétrica, já que, para uma precisão levemente melhorada, um aumento de até 32% do número de células local é necessário. Entretanto, globalmente os erros relativos chegam até 8,76%.

Já na Tabela 6 o maior erro relativo local encontra-se em 1,55%, enquanto o maior erro relativo global encontra-se em 6,59%. Isso indica que o refinamento do parâmetro de esteira possui pouca influência ou baixa relevância em comparação à taxa de refinamento volumétrica, por exemplo. Entretanto, é interessante que para o caso específico do tamanho base de 21 mm, para ambas as configurações rápida e lenta, existe um erro local de apenas 0,09% em relação a configuração lenta, indicando que o tamanho base de 21 mm já está preciso o suficiente para que o refinamento do parâmetro não faça mais tanta diferença.

Por questão de brevidade, as tabelas para a análise dos estudos 4.2.7.2. e 4.2.7.5. se encontram no Apêndice A. O estudo do parâmetro taxa de crescimento superficial mostrou resultados muito semelhantes ao dos testes da taxa de crescimento volumétrica. Já os testes do parâmetro número de camadas prismáticas

mostraram uma grande diferença sobre o resultado final, com erros globais de até 9,49%, porém, o aperfeiçoamento local deste parâmetro resulta num aumento de células de 51 a 103%. Estes resultados podem ser vistos nas tabelas A.1 e A.2.

Por fim, com base nos resultados apresentados e na capacidade computacional limitada do computador utilizado para o trabalho, é optado por utilizar as seguintes configurações para as simulações em lote realizadas para a obtenção da solução final:

- a. Tamanho base de célula: 21 mm. O tamanho base mais preciso analisado, assim como esperado, apresentou os menores erros relativos locais em uma comparação geral de todos os parâmetros;
- b. Taxa de crescimento superficial: Rápida. Dado que o tamanho base mais preciso foi escolhido, a escolha da pior taxa de crescimento superficial é possível, já que os erros locais dos testes chegam a aproximadamente 1%;
- c. Taxa de crescimento volumétrica: Rápida. Semelhante à taxa de crescimento superficial, os erros relativos locais deste parâmetro estão na ordem de 1% e são considerados pequenos. Deste modo, é válida a escolha que levaria a um menor tempo de processamento.
- d. Refinamento de esteira: 100%. Ao contrário do que se esperava, o parâmetro refinamento de esteira foi aquele que produziu os menores erros locais e globais, sendo, portanto, o parâmetro com menor influência no resultado final.
- e. Número de camadas prismáticas: 5. Este parâmetro mostrou influência relevante nos resultados da simulação, relativamente atrás apenas do tamanho base. Na tentativa de obter melhores resultados, porém sem exagerar no poder computacional necessário, optou-se por manter uma configuração média neste caso.

A partir das configuração dos parâmetros conforme descritos na síntese acima, o tempo necessário para cada simulação realizada para a obtenção dos resultados finais conforme os objetivos deste trabalho é de, em média, aproximadamente 2 horas e meia. Definidas estas configurações, pode-se dar sequência com a etapa de pós-processamento.

4.3. PÓS-PROCESSAMENTO

A etapa de pós-processamento diz respeito a todos os passos necessários para que seja possível uma correta análise dos resultados da simulação. Embora leve este nome, alguns dos passos realizados nesta etapa são executados antes da solução da simulação propriamente dita, para que os resultados sejam exibidos com sucesso. Neste contexto, as principais configurações de pós processamento utilizadas na simulação são discutidas nos subtópicos a seguir.

4.3.1. Critério de parada

Os critérios de parada permitem especificar por quanto tempo a solução é executada, iterativamente, e sob quais condições ela deve parar de iterar. Vários critérios podem ser combinados para criar um critério de parada complexo usando as propriedades disponibilizadas pelo STAR-CCM+. O padrão disposto pelo software é abortar/parar a solução quando é alcançada a milésima iteração.

No caso analisado para este trabalho, o padrão disposto pelo software foi adotado, pois nos testes realizados a convergência do resultado ocorria, com resíduos na ordem de 10^{-5} , em torno da iteração 600. Assim, é possível manter um padrão entre os estudos realizados, além de adicionar um fator de segurança para que a convergência sempre ocorra.

4.3.2. Geração dos relatórios

A fim de obter os resultados esperados da simulação, é necessária a geração de relatórios que abriguem os dados das soluções que o usuário desejar, neste caso, principalmente a força de arrasto. Relatórios apresentam um resumo calculado da simulação atual ou dados da CPU. Permitem que grandezas de engenharia como arrasto, sustentação, torque ou fluxo de massa sejam calculadas. Eles também são úteis para calcular grandezas de diagnóstico, como volume celular mínimo ou parede média (SIEMENS, 2021).

Para o cálculo da força de arrasto é necessário primeiramente que um relatório de força seja gerado. Para que o relatório apresente os dados desejados, é então necessário configurar o vetor de direção da força, a unidade de força, em

Newtons, e a parte da região que será alvo dos cálculos, que é a superfície do corpo do ROV.

É importante ressaltar que para calcular arrasto, por exemplo, através do cálculo de força do STAR-CCM+, é necessário especificar o vetor de direção na direção do movimento, e para sustentação, especificar a direção normal ao movimento (SIEMENS, 2021). Como nesse estudo é buscado o cálculo da força de arrasto sobre o corpo do ROV, o vetor de direção é especificado como $[-1, 0, 0]$, pois o fluxo está para a direção negativa de x .

A força sobre uma superfície é calculada pelo software por:

$$F_s = \sum_f (\mathbf{f}_f^{pressure} + \mathbf{f}_f^{shear}) \cdot \mathbf{n}_f \quad (9)$$

onde $\mathbf{f}_f^{pressure}$ e \mathbf{f}_f^{shear} são os vetores de pressão e força de cisalhamento que o fluido exerce na face da superfície e \mathbf{n}_f é um vetor de direção especificado pelo usuário que indica a direção na qual será computada a força. O vetor de força de pressão e o vetor de força de cisalhamento na face da superfície são calculados, respectivamente, como:

$$\mathbf{f}_f^{pressure} = (p_f - p_{ref}) \cdot \mathbf{a}_f \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_f^{shear} = -\mathbf{T}_f \cdot \mathbf{a}_f \quad (11)$$

onde p_f é a pressão estática na face, \mathbf{a}_f é o vetor da área da face, p_{ref} é a pressão de referência (manométrica) e \mathbf{T}_f é o tensor de tensão na face (SIEMENS, 2021).

Embora não seja utilizado diretamente nas análises de resultados deste trabalho, também é interessante a geração do relatório de coeficiente de força, que por sua vez foi utilizado no Capítulo 4.1. O coeficiente de força, para esta aplicação, ainda é avaliado na direção do escoamento x , e por sua vez por ser chamado de coeficiente de arrasto. O coeficiente de força de uma superfície é definido conforme equação a seguir:

$$c_d = \frac{\sum_f (\mathbf{f}_f^{pressure} + \mathbf{f}_f^{shear}) \cdot \mathbf{n}_D}{\frac{1}{2} (\rho_{ref} v_{ref}^2 a_{ref})} \quad (12)$$

onde ρ_{ref} , v_{ref} e a_{ref} são a densidade, velocidade e área de referência, respectivamente e \mathbf{n}_D é o vetor de direção especificado pelo usuário.

Para o cálculo do coeficiente de força é também necessária a entrada de uma área de referência. A área de referência pode ser calculada, dentro do software, a partir de outro relatório e precisa da superfície do corpo que será analisado dentro da região especificada, neste caso, o ROV, o vetor de direção normal a face que se deseja calcular a área projetada, Normal = [1, 0, 0], e o vetor que aponta na direção superior da face, Superior = [0, 0, 1].

4.3.3. Geração das cenas, planos de visualização, gráficos e outros

Por fim, ainda é necessária a geração das cenas, essenciais para a visualização, seja da geometria, malha ou resultados. No estudo em questão as cenas mais utilizadas foram as de malha e escalar.

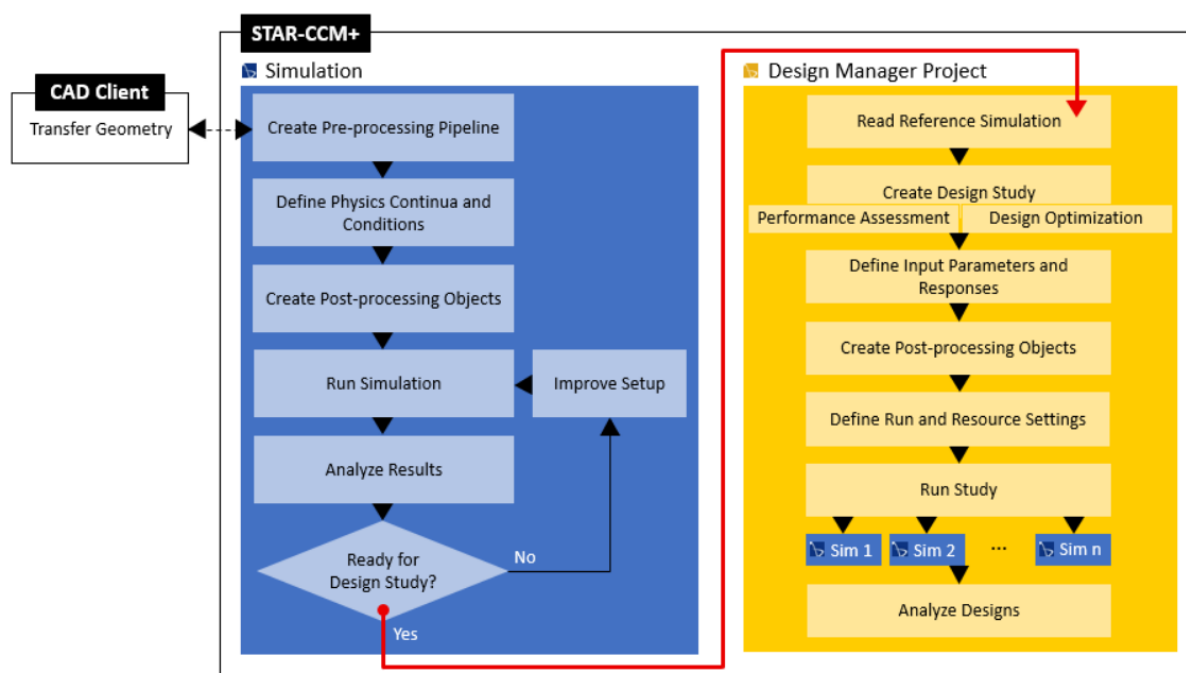
Para melhor visualização dos resultados, ainda é necessária a criação de planos de visualização, responsáveis por demonstrar o desenvolvimento da malha, na etapa de geração de malha, e o desenvolvimento do escoamento e demais funções, na etapa de visualização dos resultados. Os planos são necessários para visualizar um corte da malha em uma direção escolhida, no estudo em questão foi optado, principalmente, por cortes longitudinais no centro da face transversal da plataforma. Após a geração, os planos podem ser associados a cena de visualização de malha e escalar.

O software ainda permite a criação de gráficos bidimensionais ou tridimensionais a partir dos resultados gerados pela análise. Além de ferramentas de colorificação de partes da região, planos e escalas, e opções de visualização de funções, como a apresentada no tópico 4.2.7.6., para a análise do valor y^+ ao longo do corpo do ROV.

4.4. DESIGN MANAGER

O Design Manager é um módulo interno ao STAR-CCM+ que fornece uma abordagem automatizada para executar estudos de exploração de projeto. Abrange tanto a avaliação de desempenho quanto a otimização (SIEMENS, 2021). O Design Manager permite ao usuário a avaliação de diversos casos da análise previamente estabelecida (denominada referência), a partir da modificação de diversas variáveis, sejam elas associadas a parâmetros do modelo 3D ou modelos físicos envolvidos, escalares ou vetoriais. O diagrama a seguir (Figura 29) fornece uma visão geral do processo de análise utilizando o Design Manager do Simcenter STAR-CCM+:

Figura 29 – Processo de análise utilizando o Design Manager

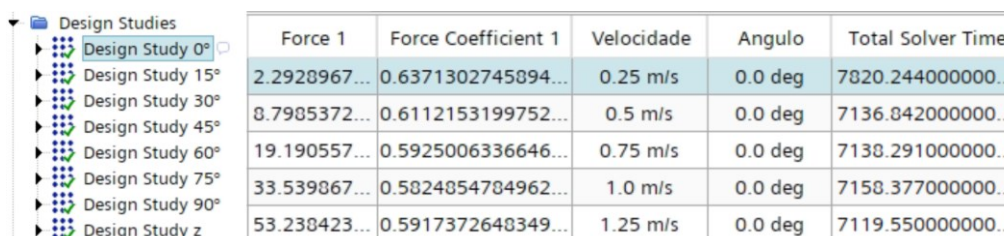


SIEMENS (2021, Ajuda do software STAR-CCM 2021).

A utilização do Design Manager, então, facilita a variação dos parâmetros previamente estabelecidos como variáveis, ao longo deste trabalho, tais como a velocidade de locomoção da plataforma, e o ângulo de rotação ao redor do eixo z da plataforma, ϕ . Assim, é possível definir um total de 8 estudos, sendo 7 deles relacionados com a variação de ϕ de 0° a 90° , igualmente espaçados, e o último relacionado ao estudo do movimento no eixo z.

O estudo é então realizado através da variação da velocidade de 0,25 m/s a 1,25 m/s, igualmente espaçados, para cada um dos 8 casos criados no Design Manager, totalizando 40 casos de análise. Para o estudo de ângulo a 0° , por exemplo, apenas a velocidade é variada entre cada uma das análises, enquanto o ângulo de rotação ϕ é mantido constante a 0° , ou seja, não é aplicada rotação à plataforma. A resposta buscada para cada estudo é principalmente a força de arrasto obtida em cada análise, também foram solicitados como respostas o coeficiente de arrasto e o tempo total de simulação (Figura 30).

Figura 30 – Estudos e respostas obtidas para as análises de ϕ igual a 0°



Force 1	Force Coefficient 1	Velocidade	Angulo	Total Solver Time
2.2928967...	0.6371302745894...	0.25 m/s	0.0 deg	7820.244000000...
8.7985372...	0.6112153199752...	0.5 m/s	0.0 deg	7136.842000000...
19.190557...	0.5925006336646...	0.75 m/s	0.0 deg	7138.291000000...
33.539867...	0.5824854784962...	1.0 m/s	0.0 deg	7158.377000000...
53.238423...	0.5917372648349...	1.25 m/s	0.0 deg	7119.550000000...

Fonte: Autor (2022).

Para os resultados relacionados ao eixo z, ou seja, aqueles que obterão a força de arrasto de subida ou descida do ROV, uma modificação nas regiões previamente estabelecidas foi necessária. Isto foi feito a partir de uma cópia da simulação de referência utilizada para os outros casos, mudando a face de entrada para a face inferior da região e a face de saída para a face superior e então alinhados os vetores de direção do escoamento neste sentido de movimentação.

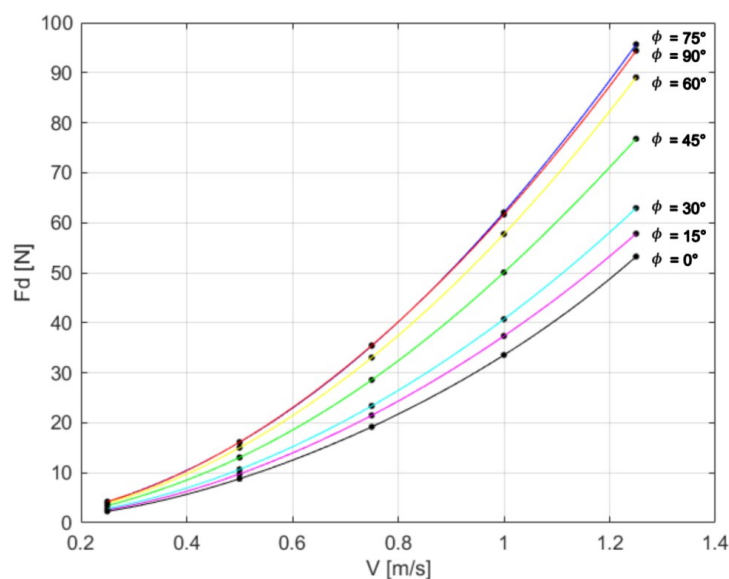
Por fim, é possível solicitar ao software as cenas de exibição e a geração de gráficos que ajudem na visualização das respostas obtidas em cada estudo. As cenas mantêm a configuração previamente configurada no arquivo de referência. São então solicitadas as cenas escalares e os gráficos força de arrasto (N) x velocidade (m/s) de todas as análises. Deste modo, após a execução dos 40 casos de análise solicitados, é possível prosseguir com a análise e manipulação dos resultados obtidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada ângulo de rotação analisado para a plataforma foram obtidos 5 resultados de força diferentes, isto é, respectivos as velocidades da plataforma (ou do fluido) igual a 0,25; 0,5; 0,75; 1,00 e 1,25 m/s. Deste modo, para cada um dos 8 estudos, é possível gerar uma curva entre os 5 pontos formados pela composição $(x, y) = (V, F_d)$, onde V é a velocidade de análise e F_d é a força de arrasto. Assim, pode-se descobrir a força de arrasto correspondente para qualquer velocidade entre 0,25 e 1,25 m/s através da curva polinomial interpoladora gerada. As velocidades foram definidas entre um limite inferior próximo a 0 m/s e um limite superior levemente acima da máxima velocidade encontrada por Marques e Catarin (2020), de aproximadamente 0,9 m/s.

Neste sentido, foi utilizado um módulo interno do software MATLAB (da MathWorks) conhecido como Curve Fitting Toolbox ou CFTOOL. O módulo fornece, resumidamente, um aplicativo e funções para ajustar curvas e superfícies a determinados dados de entrada fornecidos (MATHWORKS, 2020). As curvas polinomiais interpoladoras geradas para todos os ângulos podem ser visualizadas na Figura 31 e seus parâmetros na Tabela 7.

Figura 31 – Curvas polinomiais interpoladoras para os ângulos ϕ analisados



Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Parâmetros das curvas polinomiais interpoladoras de 4° grau para cada ângulo ϕ

Parâmetro	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 15^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 45^\circ$	$\phi = 60^\circ$	$\phi = 75^\circ$	$\phi = 90^\circ$
p1	14,090	9,035	3,627	-9,259	1,707	-5,227	3,691
p2	-34,470	-26,520	-10,900	24,270	-6,837	13,140	-15,630
p3	60,780	62,440	49,460	25,080	63,070	47,630	77,150
p4	-7,780	-8,504	-1,821	11,290	-0,383	7,305	-4,269
p5	0,923	1,196	0,359	-1,316	0,189	-0,776	0,695

Fonte: Autor (2022).

Sendo então possível escrever a Equação (13), que calcula uma a força de arrasto para uma velocidade qualquer entre 0,25 e 1,25 m/s para estudo de ϕ entre 0 e 90° com incremento fixo de 15°, como:

$$f(V) = p1.V^4 + p2.V^3 + p3.V^2 + p4.V + p5 \quad (13)$$

onde os parâmetros são definidos conforme a Tabela 7.

Como observado na Figura 31, as curvas polinomiais demonstram que a força de arrasto aumenta conforme o aumento do ângulo ϕ analisado, o que era esperado visto que o aumento de ϕ implica no aumento da área frontal projetada em relação a direção do escoamento. Ainda é possível observar que não existe uma variação padronizada da força de arrasto entre os incrementos consecutivos de 15°, entretanto, esse incremento fica mais claro ao essas figuras em três dimensões, isto é, a partir da geração de uma superfície, assim como será comentado posteriormente e pode ser visto na Figura 32.

É válido lembrar que a interpolação gerada é uma aproximação para qualquer velocidade que não seja exatamente a dos 5 pontos principais calculados, isto é, não é possível prever o comportamento do arrasto para as infinitas velocidades entre as analisadas. Entretanto, quanto maior a quantidade de pontos utilizados, mais próximo da realidade a curva se torna, isto é, mais próximo o domínio discreto se torna do domínio contínuo. Porém, neste trabalho, mais do que 5 simulações por estudo se tornaria inviável quando se tratando de tempo total investido.

A interpolação polinomial de 4° grau foi escolhida neste contexto, pois foi a que se ajustou com R^2 mais próximo de 1 e com a soma quadrática dos resíduos (SSE) mais próxima de 0, com erros em torno da terceira casa decimal. É claro que até mesmo a própria simulação utilizando CFD é uma aproximação que depende de diversos fatores e simplificações, mas toda tentativa de redução dos erros locais contribui para a redução do erro máximo global, garantindo que o resultado seja o mais preciso possível, ou seja, mais próximo da realidade.

Próximo ao fim do trabalho foi concedido acesso a um computador com maior poder de processamento, de configurações principais: placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 e processador Intel Core i7 de 11ª ger. pelo Laboratório de Tecnologia Subaquática (LaSub) da UFSC, no qual foi possível realizar simulações mais pesadas a fim de comparar com os resultados anteriores. Foram geradas malhas com tamanho de base 7 mm, taxa de crescimento superficial lenta e taxa de crescimento volumétrica lenta, alterando o tamanho mínimo de célula para 30% em vez dos 10% anteriores, pois foi detectado uma divergência da solução para células menores que estas, provavelmente devido a aspectos da geometria do ROV.

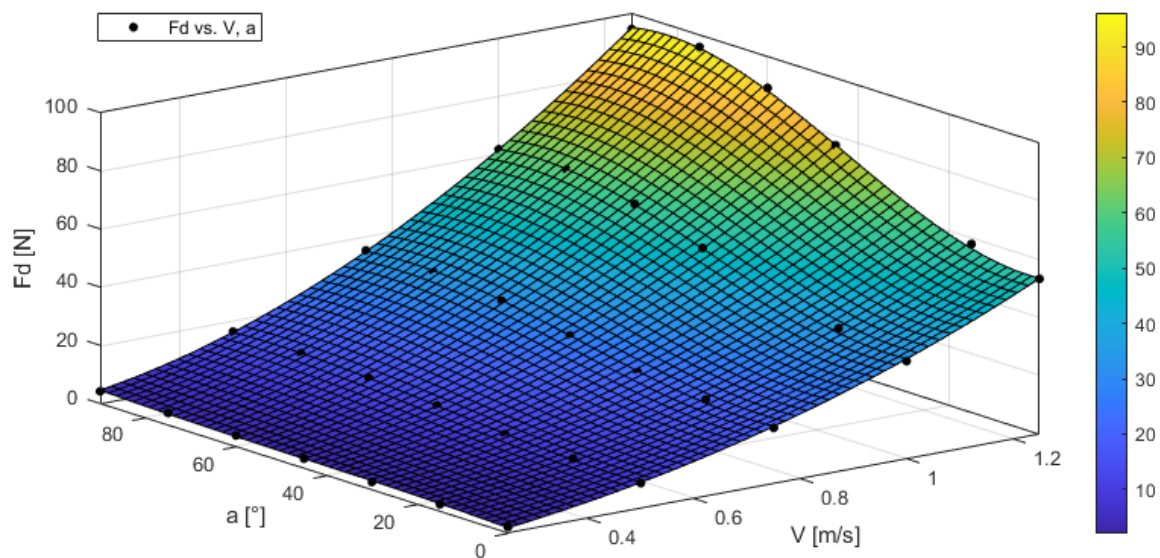
Assim, foram obtidas malhas de aproximadamente 3 milhões de células que foram testadas apenas para as velocidades de 0,25 e 1,25 m/s e para os ângulos de 0° e 90°, totalizando 4 simulações que tem como objetivo avaliar os extremos do intervalo de análise. Os resultados encontrados pelo solucionador variaram de 0,04% à 4,56% se tratando de erros relativos em comparação com as malhas de 930 mil células, validando os resultados obtidos anteriormente e demonstrando que o estudo de qualidade de malha proporcionou aproximações razoáveis.

Pode-se ainda comparar os resultados obtidos através das simulações com o resultado analítico obtido por Marques e Catarin (2020). O cálculo da força obtida para 2 bocais totalmente abertos resultou em uma máxima de 56,58 N, assim como na Figura 11. Aplicado um cosseno de 63,5° a fim de obter a componente x deste vetor, é obtida uma força máxima de 25,25 N que, através da Equação (5), resultou em uma velocidade de 0,9 m/s para os autores. Entretanto, através da Figura 31, para ϕ igual a 0°, verifica-se que a velocidade equivalente para a mesma força de arrasto obtida neste trabalho é de aproximadamente 0,87 m/s. Indicando que os resultados de velocidade obtidos pelos autores estavam levemente superestimados ou, em outras palavras, a força de arrasto estava subestimada.

Algumas considerações devem ser ainda levadas em conta como, por exemplo, o fato de que a estimativa da força de arrasto calculado pelos autores ainda não considerava a área gerada pelos bocais que, com um ângulo de $63,5^\circ$ geram uma área frontal consideravelmente maior do que os mesmos a 0° , e por isso havia sido desconsiderada. Desta maneira, a força de arrasto encontrada pelos autores pode ter sido menor do que a encontrada na realidade e pela simulação, e de fato foi. Além disso, existem outros aspectos intrínsecos quanto ao funcionamento do CFD que proporcionam uma análise muito mais complexa do escoamento ao redor dos entornos e das arestas de todos os componentes da plataforma, cálculos que não podem ser realizados através da simplificação adotada pelos autores.

É interessante notar que, apesar de tudo, os resultados encontrados por Marques e Catarin e os simulados para uma mesma velocidade de comparação foram consideravelmente próximos, demonstrando que o método utilizado foi razoável para uma análise mais grosseira da força de arrasto. Porém, é claro, não é esse o objetivo deste trabalho.

Por fim, foi gerada uma superfície que tem como objetivo a obtenção de uma função $f(V, \phi)$, conforme descrito na Equação (6), que, dada uma velocidade de movimento relativo entre ROV e fluido qualquer entre 0,25 e 1,25 m/s V e um ângulo qualquer entre 0° e 90° ϕ , retorna a força de arrasto F_d . Utilizando novamente o CFTOOL, pode-se obter a superfície $f(V, \phi, F_d)$ conforme visto na Figura 32 através de uma interpolação polinomial de 4º grau em V e de 3º grau em ϕ . A equação final para essa superfície é vista em seguida (Equação (14)).

Figura 32 – Superfície $f(V, \phi, Fd)$ obtida através das análises

Fonte: Autor (2022).

$$\begin{aligned}
 f(V, \phi) = & -1,395 + 6,096.V + 0,251.\phi + 30,540.V^2 - 0,836.V\phi \\
 & - 0,007.\phi^2 - 3,420.V^3 + 0,577.V^2\phi + 0,002.V\phi^2 \\
 & + 5,55.10^{-5}.\phi^3 + 2,523.V^4 - 0,106.V^3\phi \\
 & - 4,78.10^{-4}.V^2\phi^2 - 1,8.10^{-4}.V\phi^3
 \end{aligned} \tag{14}$$

Por questão de brevidade, cada curva e seus respectivos parâmetros são apresentadas separadamente no Apêndice B Incluindo a curva para a análise do movimento vertical do ROV.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram identificados os parâmetros hidrodinâmicos obtidos em regime permanente para a plataforma subaquática. Foi realizado um estudo sobre a qualidade da malha utilizada na simulação, o qual resultou numa configuração dos parâmetros que foram posteriormente utilizados na geração de malha das simulações. Foram obtidas as forças e os coeficientes de arrasto para as translações da plataforma através de simulações CFD, o que permitiu a obtenção de uma superfície que relacionasse a força de arrasto da plataforma com as velocidades e os ângulos analisados, possibilitando, finalmente, a comparação com os resultados obtidos anteriormente pelos autores Marques e Catarin (2020).

A dificuldade em reproduzir ensaios e testes experimentais em tanques de prova para ROVs ou AUVs, de geometria complexa, fomenta o desenvolvimento e a utilização de métodos alternativos para a estimativa da força de arrasto nestes veículos. Não só pela dificuldade geométrica empregada, mas também por uma questão de redução de custos.

A utilização de técnicas CFD demonstrou, ao decorrer do trabalho, que tem emprego viável em diversas etapas de um processo de projeto, isto é, podem ser utilizadas como fonte de informação crucial para o progresso de um projeto caracterizado por um processo cíclico de planejamento, desenvolvimento, verificação e ação, também conhecido como PDCA (Plan, Do, Check, Act). Ou seja, a facilidade com que os resultados podem ser obtidos através do CFD é capaz de ser utilizada a favor de um projeto. Tornando possível a realização de mudanças anteriores a uma versão final, sem a inclusão de gastos grandiosos com experimentos.

Um dos motivos associados a facilidade previamente comentada é a agilidade de comunicação entre usuário e software, gerada pela interface gráfica agradável e de rápida compreensão do STAR-CCM+. Deste ponto, o STAR-CCM+ abre horizontes para aqueles alunos e/ou pesquisadores que desejam se iniciar na área de CFD. Entretanto, a interface gráfica do software também pode ser um problema de alguns pontos de vista, pois faz o uso de configurações padronizadas, podendo impedir a utilização de configurações mais específicas, necessárias dependendo do caso analisado. Problema este que não ocorre com o software OpenFOAM, por exemplo,

visto que sua utilização ocorre por linhas de código, sob módulos novos ou já existentes.

Apesar disso, o STAR-CCM+ também inclui diversas opções de configurações personalizáveis para o usuário, como as utilizadas para geração de controles adicionais de malha, por exemplo. Assim, a utilização do software necessita ser mais explorada, neste sentido, avaliando sua eficiência ao tratar de problemas que fujam das configurações pré-determinadas disponíveis.

No que diz respeito ao estudo sobre a qualidade da malha utilizada na simulação, os resultados apresentados nas tabelas e na síntese do subtópico 4.2.8. Análise final da malha, demonstraram-se eficientes quando em comparação com os resultados obtidos no computador disponibilizado pelo Laboratório de Tecnologia Subaquática. Dando margem para novos estudos, que incluam mais parâmetros ou com nova abordagem.

Em relação aos resultados obtidos, é importante a ressalva de que a precisão utilizada não é a desejada para um resultado final. Tendo em vista que, para o projeto de um controlador capaz de abrir os bocais corretamente, isto é, de maneira que a força seja entregue, com valor, ângulo e direção corretos para combater os estímulos externos quaisquer sobre a plataforma, as equações de resistência ao avanço que regem o movimento do ROV sob diferentes ângulos (o produto deste trabalho), precisam ser o mais precisas possível.

A imprecisão associada aos resultados obtidos está relacionada com o poder de processamento da máquina utilizada para as simulações, além de outros fatores. Assim, é necessária a realização de um novo trabalho, com uma máquina de configurações superiores, a fim de obter resultados mais precisos e, além disso, poder estimar o quão distante os resultados atuais estão da realidade, porém estendendo o estudo para todos os resultados e não apenas para os extremos do intervalo, como realizado com os estudos da qualidade de malha.

Ainda assim, os resultados obtidos neste trabalho indicam proximidade por poucos pontos percentuais dos obtidos pelas análises iniciais de Marques e Catarin (2020), como foi comentado no capítulo de resultados. Portanto, sinalizando que estes resultados podem ser utilizados para posteriores etapas do projeto da plataforma subaquática, dando a oportunidade para que novos pontos de análise e projetos de componentes adicionais sejam iniciados.

Um dos próximos passos é a análise da influência do cabo umbilical sobre a plataforma que, por se tratar de um ROV, é indispensável para alimentação dos componentes internos do sistema. Como este trabalho trata de uma análise inicial da modelagem hidrodinâmica da plataforma através de software CFD, a análise do conjunto ROV e cabo umbilical foi desconsiderada, entretanto, o cabo pode trazer, além de arrasto, influência sobre a hidrodinâmica geral da plataforma, afetando também como os controles podem reagir a estes estímulos. O que abre oportunidade para um trabalho futuro envolvendo uma análise mais detalhada do conjunto ROV e umbilical.

Por fim, este trabalho apresenta o modelo hidrodinâmico da plataforma em regime permanente. Seria interessante, em sequência, a obtenção do modelo hidrodinâmico em regime transiente, que incluiria uma análise mais complexa do equacionamento envolvido, por exemplo, se tornando um bom ponto de partida para trabalhos futuros nesta área.

REFERÊNCIAS

- ACHENBACH, E. **Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds number**. Journal of Fluid Mechanics, vol. 54, p. 565-575, 1972.
- ANDRADE, Henrique Conde Carvalho de. **O método dos volumes finitos aplicado a escoamentos de convecção forçada e natural**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. (MODELO DISSERTAÇÃO)
- ANTONELLI, Gianluca. **Underwater robots**. Springer Tracts in Advanced Robotics. vol. 96. Springer International Publishing, 2018.
- BASTEZINI, Eduardo Micael. **Levantamento dos esforços hidrodinâmicos de um AUV utilizando software CFD**. 2016. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- BLUE ROBOTICS. **T100 Thruster**. Disponível em: <https://bluerobotics.com/store/retired/t100-thruster/>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- BOXFISH RESEARCH. **Boxfish Products**. Disponível em: <https://www.boxfish.nz/products/>. Acesso em: 05 maio 2022.
- CAMPOS, Edmo J. D. **O papel do oceano nas mudanças climáticas globais**. Revista Usp, v. 1, n. 103, p. 55-66, 22 nov. 2014.
- CHIN, Cheng; LAU, Michael. **Modeling and testing of hydrodynamic damping model for a complex-shaped remotely-operated vehicle for control**. J. Marine. Sci. Appl. 11, p. 150–163, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11804-012-1117-2>.
- CONSTANTINESCU, G. S; PACHECO, R; SQUIRES, K. D. **Detached-Eddy simulation of flow over a sphere**. AIAA, Aerospace Sciences Meeting, Paper 2002-0425, 2002.
- CONSTANTINESCU, G. S; SQUIRES, K. D. **LES and DES investigations of turbulent flow over a sphere**. AIAA Paper 2000-0540, 2000.
- FORNENBERG, B. **Steady viscous flow past a sphere at high Reynolds numbers**, J. Fluid Mech. vol. 190, p. 471-489, 1988.
- FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.
- GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Position System, Inertial Navigation and Integration**. New York, USA. John Wiley & Sons. 2001.

HU, Howard H. Computational fluid dynamics. In: KUNDU, Pijush K.; COHEN, Ira M. **Fluid Mechanics**. 4. ed. Burlington: Elsevier, p. 411-464, 2008.

IERVOLINO, Lucas Arrigoni. **Estudo de resistência ao avanço de uma embarcação de planeio de 26 pés**: abordagem computacional baseada em CFD. 2015. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

IFTOMM. **IFTOMM Terminology**.

Disponível em: <https://iftomm-terminology.antonkb.nl/2057/frames.html>. Acesso em: 10 jul. 2022.

JOHNSON, T. A.; PATEL, V. C. **Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300**. J. Fluid Mech. vol. 378, p. 19-70, 1999.

KIM, D.; CHOI, H. **Laminar flow past a sphere rotating in the stream wise direction**. Journal of Fluid Mechanics, vol. 461, p. 365-386, 2002.

MARQUES, Arthur Sena; CATARIN, Hélio Valdeviezo. **Projeto e controle de uma plataforma subaquática com propulsão a jato**. Joinville, 2020. Relatório (Iniciação científica) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

MUNIZ, Luis Antonio Resende. **Método dos volumes finitos aplicados à problemas de escoamentos bidimensionais na região de entrada de dutos cilíndricos**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 1995.

NOTILO PLUS. **Seasam Drone**.

Disponível em: <https://seasam.notiloplus.com/autonomous-rov-seasam/>. Acesso em: 05 maio 2022.

SIEMENS DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE. **Simcenter STAR-CCM+ User Guide**, version 2021.2.

SOUSA, João Victor Nunes de. **Análises Hidrodinâmica e Geométrica, via CFD, do Escoamento ao Redor de um Veículo Autônomo Submarino**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

TAVARES, Adilson Melcheque; GOMES, Sebastião Cícero Pinheiro; CUNHA, Mauro André Barbosa. **Modelagem dinâmica e controle de um veículo subaquático**. Vetor, Rio Grande, v. 15, n. 2, p. 101-116, 2005.
Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/3377>. Acesso em: 05 mai. 2022.

THE MATHWORKS INC. **MATLAB**. 2020. version 9.8.0 (R2020a). Natick, Massachusetts.

YUH, J. **Design and control of autonomous underwater robots: A survey**. Autonomous Robots, v. 8, n. 1, p. 7-24, 2000.

ZANONI, Fábio Doro. **Modelagem e implementação do sistema de navegação para um AUV**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia de Controle e Automação Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-23032012-114741/publico/Dissertacao_Fabio_Doro_Zanoni.pdf. Acesso em: 05 maio 2022.

APÊNDICE A – Demais tabelas do estudo de malha

Tabela A.1 – Análise do estudo 4.2.7.2.

Base Size (mm)	Surface growth rate	Quantidade de células	Tempo da simulação (h)	Força (N)	Erro relativo local (%)	Erro relativo global (%)	Varição relativa de células local (%)	Varição relativa de células global (%)
35	Fast	602831	1,70	23,52	1,55	4,58	-	-
35	Default	620887	1,64	23,55	1,68	4,71	3	3
35	Slow	682607	1,60	23,16	-	2,98	13	13
28	Fast	651267	1,76	24,55	3,24	9,16	-	8
28	Default	679854	1,74	24,26	2,02	7,87	4	13
28	Slow	802454	2,23	23,78	-	5,74	23	33
21	Fast	995432	2,40	22,75	1,16	1,16	-	65
21	Default	1033444	2,62	22,78	1,29	1,29	4	71
21	Slow	1217197	2,80	22,48	-	-	22	102

Tabela A.2 – Análise do estudo 4.2.7.5. Número de camadas prismáticas

Base Size (mm)	Number of prism layers	Quantidade de células	Tempo da simulação (h)	Força (N)	Erro relativo local (%)	Erro relativo global (%)	Varição relativa de células local (%)	Varição relativa de células global (%)
35	2	409828	0,98	22,75	2,44	0,04	-	-
35	5	620887	1,64	23,55	1,68	4,71	51	51
35	8	815177	3,53	24,92	-	9,49	99	99
28	2	443206	1,10	22,63	5,27	0,57	-	8
28	5	679854	1,74	24,26	2,02	7,87	53	66
28	8	898678	2,08	23,89	-	4,96	103	119
21	2	680966	2,93	21,85	4,00	4,00	-	66
21	5	1033444	2,62	22,78	1,29	1,29	52	152
21	8	1362625	5,55	23,16	-	-	100	232

APÊNDICE B – Curvas polinomiais interpoladoras obtidas para cada ângulo ϕ analisado e para estudo vertical

Figura B.1 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 0°

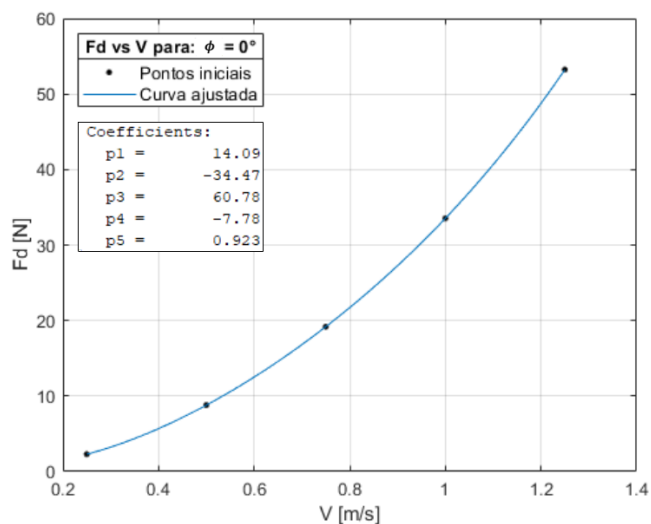


Figura B.2 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 15°

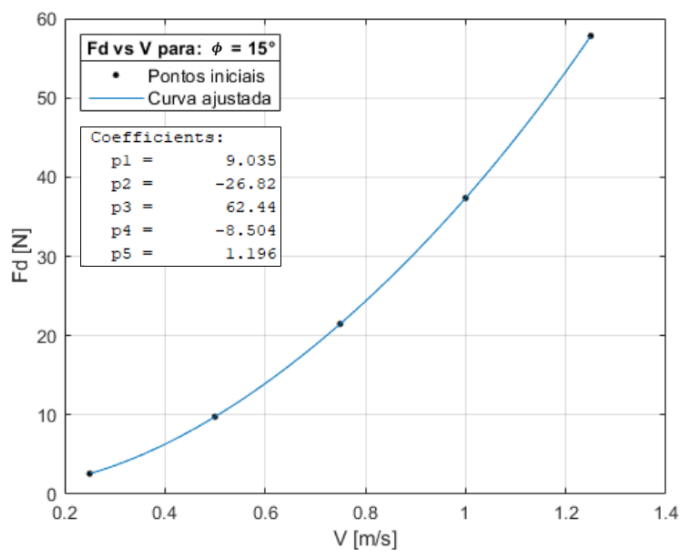


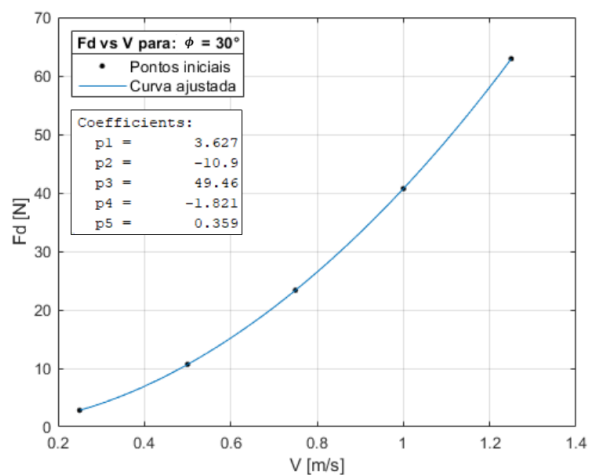
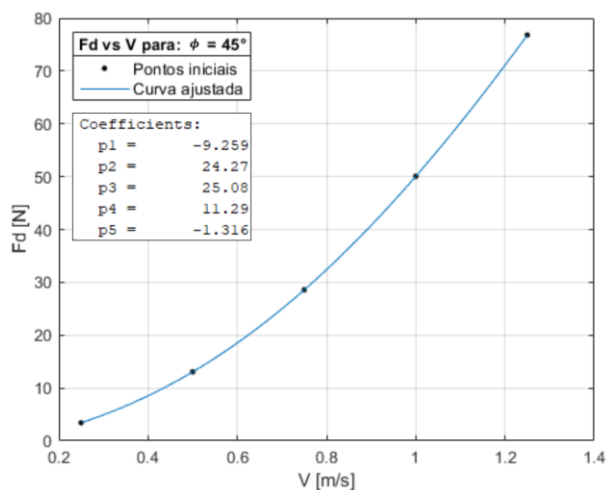
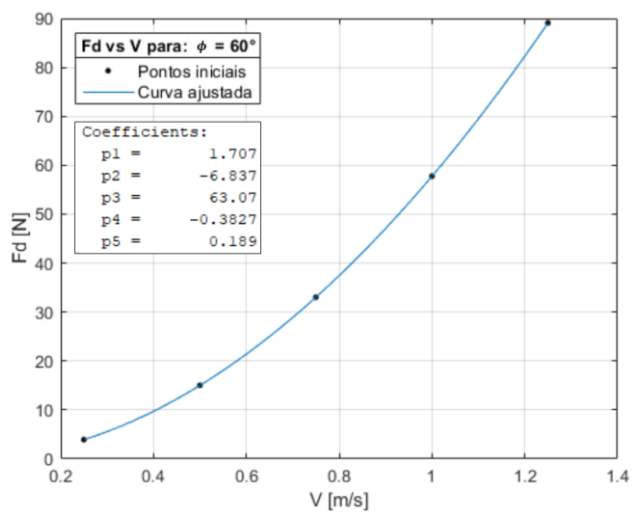
Figura B.3 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 30° Figura B.4 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 45° Figura B.5 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 60° 

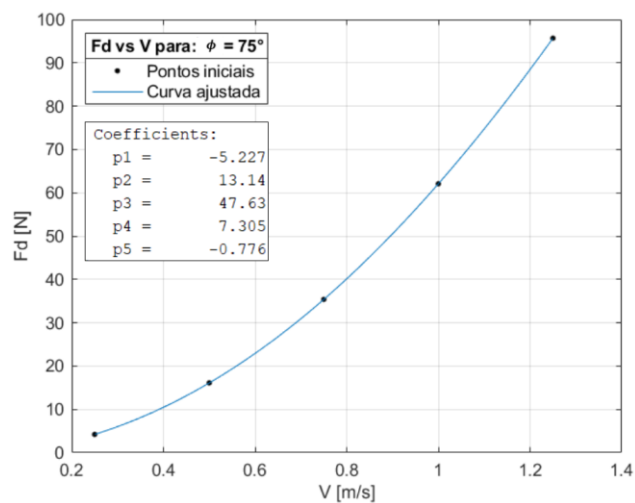
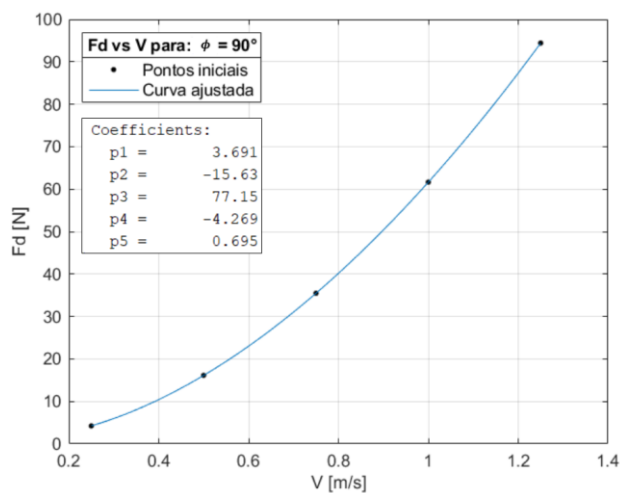
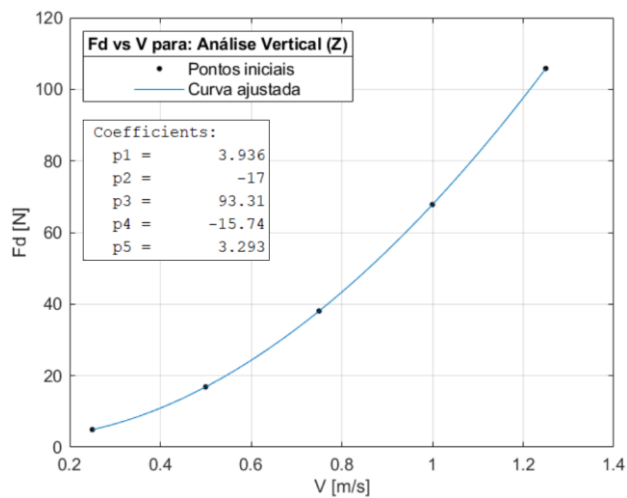
Figura B.6 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 75° Figura B.7 – Curva polinomial interpoladora para o estudo do ângulo ϕ de 90° 

Figura B.8 – Curva polinomial interpoladora para o estudo vertical (z)



APÊNDICE C – Principais comandos utilizados dentro do software STAR-CCM+ (2021.2) ao longo deste trabalho

A navegação dentro do STAR-CCM+ (versão 2021.2) ocorre através do acesso de pastas e subpastas. O objetivo deste apêndice é a demonstração de como acessar alguns comandos específicos utilizados ao longo deste trabalho. O símbolo “>” utilizado representa o acesso de uma subpasta, comando ou ferramenta interna.

Importação:

O módulo básico do STAR-CCM + oferece suporte de importação apenas aos arquivos .stp (STEP) e .igs (IGES). Formatos que podem ser convertidos e utilizados normalmente entre o STAR-CCM+ e o Rhinoceros. É possível a obtenção de módulos extras para o STAR-CCM+ que auxiliam na importação de formatos como os disponibilizados diretamente por softwares como Rhinoceros, SolidWorks, CATIA, entre outros.

A importação ocorre através das pastas Geometry > 3D CAD.

Terminologia de variáveis:

Quanto a criação e utilização de variáveis, a terminologia adotada pelo software é a seguinte: \${NomeDaVariável}

Criação da variável de rotação: Através da edição do modelo 3D, acessando a ferramenta Transform > Rotate.

Criação de uma peça ou parte: Geometry > 3D-CAD Models > “Modelo 3D” > New Geometry Part

Ferramenta de subtração de volumes: Geometry > Operations > Subtract

Seleção dos modelos físicos: Continua > New Physics Continuum. Physics 1 > Select Models

Criação de uma região: Parts > “Parte/Peça” > Assign Parts to Regions

Alteração da direção padrão do fluxo:

Pode ser alterado a partir do comando Boundaries > “*Face Name*” > Physics Conditions > Flow Direction Specification, onde é possível alterar de normal à superfície para componentes, assim, é possível alterar a direção do fluxo vetorialmente para cada uma das faces conforme a necessidade da simulação em Physics Values > Flow Direction e definindo a magnitude da velocidade em Physics Values > Velocity Magnitude com o vetor de velocidade criado anteriormente.

Criação da malha automática: Geometry > Operations > New > Mesh > Automated Mesh

Criação de relatórios de força: Reports > New Report > Flow / Energy > Force

Criação de relatório de área frontal: Reports > New Report > Metrics > Frontal Area

Geração de cenas: Scene > New Scene

Geração de planos para visualização: Derived Parts > New Part > Section > Plane