

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

**EDUARDO MICAEL BASTEZINI**

**LEVANTAMENTO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICAS  
DE UM AUV UTILIZANDO SOFTWARE CFD**

Joinville  
2016

**EDUARDO MICAEL BASTEZINI**

**LEVANTAMENTO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICAS  
DE UM AUV UTILIZANDO SOFTWARE CFD**

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

Orientador: Dr. Lucas Weihmann

Joinville

2016

EDUARDO MICAEL BASTEZINI

**LEVANTAMENTO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICAS  
DE UM AUV UTILIZANDO SOFTWARE CFD**

Este trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

**Joinville, 08 de Dezembro de 2016.**

---

**Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.  
Coordenador do Curso**

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.  
Orientador**

---

**Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.**

---

**Prof. Talita Sauter Possamai, Dra. Eng.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus!

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, nas horas mais difíceis, de desânimo e cansaço. Obrigado por tudo.

Agradecer a toda a minha família, minhas irmãs Lucélia e Daiana, minha sobrinha Sofia, minha avó, tios, tias, madrinhas e padrinhos, primos e cunhados.

Ao meu orientador de trabalho de conclusão de curso e também orientador de pesquisa e extensão Professor Dr. Eng Lucas Weihmann, obrigado pela oportunidade de estar realizando este trabalho e por todo empenho, dedicação e compreensão.

Ao meu orientador de estágio e também orientador de curso de Engenharia Naval do Campus UFSC Joinville Professor PhD Thiago Pontin Tancredi, quem sempre vem motivando e inspirando seus alunos a buscarem o conhecimento.

A diretora do Campus Joinville Professora Dra. Catia Carvalho Pinto, com quem fui orientando de pesquisa no começo da minha graduação.

Fazer um agradecimento em especial ao meu Professor do ensino médio Octavio R. de Castro, quem inspirou a mim, e a outros colegas a seguirem no ramo.

Fazer um agradecimento em especial ao meu cunhado Pierry, que em muitas vezes abdicou de seu tempo para me ajudar com monitorias em disciplinas da engenharia.

Agradecer uma pessoa muito especial Ivana Becker, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e compartilhando todos os momentos.

Agradecer ao meu colega Saulo Leonardo, quem me ensinou os primeiros passos do software a ser utilizado neste trabalho. Também fazer um agradecimento ao meu colega de laboratório Rodrigo Michels com quem venho aprendendo constantemente. Ao meu grande amigo e colega de graduação João Pedro. Agradecimento ao meu grande amigo Alexandre Aviz que teve um papel fundamental neste trabalho.

Agradecimento a minha amiga Geovana Folle e ao Rodrigo que me ajudaram num momento muito delicado deste trabalho.

Agradecer a todos meus amigos e colegas, colegas de faculdade e a todos os meus professores e companheiros de treino da Academia Gracie Barra Joinville, com quem estou diariamente.

## RESUMO

Este trabalho retrata a simulação hidrodinâmica de um Veículo Autônomo Submarino (AUV) em software CFD. Essas simulações apresentam como resultados as forças e momentos resultantes da equação de movimento que descreve a trajetória do AUV submerso. A solução do escoamento baseia-se nas soluções das equações de Navier-Stokes e Reynolds. Após as análises dos resultados, a simulação é comparada a trabalhos semelhantes já presentes na literatura.

**Palavras-chave:** CFD. AUV. STAR CCM+. Veículo submarino autônomo.

## **ABSTRACT**

The following work shows the hydrodynamic simulation of a Submarine Autonomous Vehicle (AUV) in CFD software. These simulations present as results the forces and moments resulting from the equation of motion that describes the trajectory of the submerged AUV. The solution of the flow is based on the solutions of the Navier-Stokes and Reynolds equations. After analysis of the results, the simulation is compared to similar works available in the literature.

**Keywords:** CFD. AUV. STAR CCM+. Autonomous underwater vehicle.

## **LISTA DE SIGLAS**

AUV – Veículo Submarino Autônomo.

CFD – Fluidodinâmica Computacional.

CAD - Desenho Assistido por Computador.

ROV - Veículos de Operação Remota.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Problemas de Engenharia. ....                                                                   | 10 |
| Figura 2 – Volume de Controle .....                                                                        | 11 |
| Figura 3 – Importação da Geometria para software CFD. ....                                                 | 16 |
| Figura 4 – Dimensões do Volume de Controle. ....                                                           | 17 |
| Figura 5 – Definição das Superfícies de Controle.....                                                      | 18 |
| Figura 6 – Refino em torno do AUV.....                                                                     | 18 |
| Figura 7 – Blocos de refino de malha nos apêndices. ....                                                   | 19 |
| Figura 8 – Malha em torno da Geometria CAD.....                                                            | 20 |
| Figura 9 – Malha Final do Volume de controle. ....                                                         | 20 |
| Figura 10 – Demonstração da Variação no Ângulo Vertical ( $\alpha$ ).....                                  | 22 |
| Figura 11 – Demonstração da Variação no Ângulo Horizontal ( $\beta$ ).....                                 | 22 |
| Figura 12 – Força de Arrasto em X por Número de iterações. ....                                            | 25 |
| Figura 13 – Comparação das forças na direção X.....                                                        | 27 |
| Figura 14 – Comparação das forças na direção Y.....                                                        | 27 |
| Figura 15 – Comparação das forças na direção Z.....                                                        | 28 |
| Figura 16 – Comparação dos Momentos em <i>Roll</i> .....                                                   | 28 |
| Figura 17 – Comparação dos Momentos em <i>Pitch</i> .....                                                  | 29 |
| Figura 18 – Comparação dos Momentos em <i>Yaw</i> .....                                                    | 30 |
| Figura 19 – Comparação de Força em X.....                                                                  | 30 |
| Figura 20 – Comparação força em Y.....                                                                     | 31 |
| Figura 21 – Comparação força em Z.....                                                                     | 31 |
| Figura 22 – Momento em <i>Roll</i> .....                                                                   | 32 |
| Figura 23 – Momento em <i>Pitch</i> .....                                                                  | 32 |
| Figura 24 – Momento em <i>Yaw</i> .....                                                                    | 33 |
| Figura 25 – Vetores velocidades para as diferentes mudanças do ângulo vertical. ....                       | 34 |
| Figura 26 – Gradiente Escalar de Pressão Total Absoluta por variação de ângulos verticais.....             | 35 |
| Figura 27 – Linhas de corrente do escoamento “ <i>Streamlines</i> ” para 35 ° de inclinação vertical. .... | 36 |



|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 – Vetores velocidades para as diferentes mudanças do ângulo horizontal. ....            | 36 |
| Figura 29 – Gradiente escalar de Pressão Total Absoluta para variações de ângulos verticais. .... | 37 |
| Figura 30 – Vista Lateral AUV Ecomapper. ....                                                     | 41 |
| Figura 31 – Vista de topo AUV Ecomapper. ....                                                     | 41 |
| Figura 32 – Vista traseira AUV Ecomapper. ....                                                    | 42 |
| Figura 33 – Vista de Topo do Leme. ....                                                           | 42 |
| Figura 34 – Dimensões do perfil do leme com corda menor. ....                                     | 43 |
| Figura 35 – Dimensões do leme com corda maior. ....                                               | 44 |
| Figura 36 – Vista lateral bocal do hélice. ....                                                   | 46 |
| Figura 37 – Vista de trás bocal fechado. ....                                                     | 47 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Resultados para variação no ângulo vertical. ....           | 24 |
| Tabela 2 – Resultados para variação no ângulo horizontal. ....         | 24 |
| Tabela 3 – Coordenadas de pontos do perfil do leme (corda menor). .... | 43 |
| Tabela 4 – Coordenadas de pontos do perfil do leme (corda maior). .... | 44 |
| Tabela 5 – Coordenadas de pontos do perfil do bocal do hélice. ....    | 45 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                               |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| $E_{ij}$        | Taxa de deformação                                            |
| $f_{thrust}$    | Força Propulsiva                                              |
| $f_b$           | Forças atuantes no corpo                                      |
| $h$             | Altura                                                        |
| $l$             | Largura                                                       |
| $m$             | Massa                                                         |
| $\rho$          | Densidade                                                     |
| $Re$            | Número de Reynolds                                            |
| $r$             | Raio                                                          |
| $V$             | Vetor Velocidade                                              |
| $\bar{V}$       | Velocidade média                                              |
| $V_t$           | Velocidade referente ao plano                                 |
| $\nu$           | Viscosidade dinâmica                                          |
| $u_i$           | Velocidades em suas correspondentes direções para turbulência |
| $\mu$           | Viscosidade dinâmica de um ponto flutuante                    |
| $\mu_t$         | Representa a viscosidade turbulenta                           |
| $\tau_{hydr}$   | Matriz hidrodinâmica                                          |
| $\tau_{thrust}$ | Matriz do propulsor                                           |

## SUMÁRIO

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                                       | <b>5</b>  |
| 1.1. <i>Objetivos</i>                                                                      | 7         |
| 1.1.1. <i>Objetivos geral</i>                                                              | 7         |
| 1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>                                                        | 8         |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                            | <b>9</b>  |
| 2.1. Métodos de Solução de Problemas de Engenharia                                         | 9         |
| 2.2. Equação Do Movimento que Descreve a Trajetória de um Veículo Submarino Autônomo (AUV) | 10        |
| 2.3. Equação de Reynolds-Averaged-Navier–Stokes (RANS)                                     | 11        |
| 2.4. MODELO DE TURBULÊNCIA K-EPSILON TWO-LAYER                                             | 13        |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                                                      | <b>15</b> |
| <b>4. MODELAGEM DA SIMULAÇÃO DE UM AUV</b>                                                 | <b>16</b> |
| 4.1. Domínio de Resolução                                                                  | 16        |
| 4.2. Criação Do Volume De Controle E Criação Das Superfícies De Controle                   | 16        |
| 4.3. Malha – Física, Criação e Refinamento                                                 | 18        |
| 4.4. Definições da Física Do Problema                                                      | 20        |
| 4.5. SIMULAÇÃO                                                                             | 21        |
| 4.6. CONVERGÊNCIA                                                                          | 22        |
| <b>5. RESULTADOS</b>                                                                       | <b>24</b> |
| <b>6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS</b>                                                         | <b>26</b> |
| 6.1. Comparação dos Resultados com Variação Dos Ângulos Verticais                          | 26        |
| 6.1.1. Força em X                                                                          | 26        |
| 6.1.2. Força em Y                                                                          | 27        |
| 6.1.3. Força em Z                                                                          | 27        |

|           |                                                                |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.1.4.    | Momento em <i>Roll</i>                                         | 28        |
| 6.1.5.    | Momento em <i>Pitch</i>                                        | 28        |
| 6.1.6.    | Momento em <i>Yaw</i>                                          | 29        |
| 6.2.      | Comparação dos Resultados com Variação dos Ângulos Horizontais | 30        |
| 6.2.1.    | Força em X                                                     | 30        |
| 6.2.2.    | Força em Y                                                     | 31        |
| 6.2.3.    | Força em Z                                                     | 31        |
| 6.2.4.    | Momento em <i>Roll</i>                                         | 31        |
| 6.2.5.    | Momento em <i>Pitch</i>                                        | 32        |
| 6.2.6.    | Momento em <i>Yaw</i>                                          | 32        |
| <b>7.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                 | <b>34</b> |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                               | <b>38</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b>                                             | <b>39</b> |
|           | <b>APÊNDICE A – DIMENSÕES AUV ECOMAPPER</b>                    | <b>41</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Veículos Submarinos Autônomos (AUVs) são veículos que operam de forma independente através de baterias e necessitam de operadores apenas para seu lançamento e atracagem. Esses veículos operam em ambientes remotos, águas rasas e profundas, tanto em lagos como em alto mar, podendo ficar muitas horas submersos a profundidades extrema. Por não existir tecnologia confiável que consiga fazer transmissão de dados em baixo de água, é necessário que sua trajetória em missão seja descrita por complexos algoritmos de programação. Esses algoritmos são baseados na equação de movimento Fossen (2011), que descreve toda a trajetória em baixo d'água.

Alguns dos primeiros AUVs foram desenvolvidos pelo Laboratório de Física Aplicada da Universidade de Washington em 1957. O primeiro conhecido como "Veículo de pesquisa submarina de propósito especial", ou Spurv em inglês, foi utilizado para estudar a difusão, a transmissão acústica, e o rastro de ondas submarinas deixadas pra trás por submarinos e navios.

Outros (AUVs) também foram desenvolvidos no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) em 1970. Um deles está em exposição na Galeria Náutica Hart no MIT. Ao mesmo tempo, também foram desenvolvidos na União Soviética, contudo este fato ficou em segredo por muito tempo por causa da guerra fria.

Hoje estes veículos são muito utilizados nas inspeções da indústria offshore para inspeções de: plataformas de petróleo, tubulações, risers, árvores de natal entre outros. Os Veículos Submarinos Autônomos (AUVs) também são empregados para inspeção de canais dos portos, inspecionando a profundidade do canal e a presença de alguns objetos que possam causar danos a embarcações.

Com o aumento da demanda pela extração do petróleo no final do século XIX ficou cada vez mais necessária a extração de combustíveis fósseis em águas ainda mais profundas. Porém, para se extrair petróleo a altas profundidades, novas e mais complexas tecnologias tiveram de ser desenvolvidas, que exigissem cada vez menos ação do trabalho de mergulhadores por conta dos altos risco de vida.

Devido a estes fatores, o desenvolvimento e uso de robôs na indústria offshore está ganhando cada vez mais espaços, tornando o uso de Veículos Submarinos Autônomos (AUVs) indispensáveis em operações subaquáticas.

Na área naval há grande necessidade em se levantar as curvas hidrodinâmicas no projeto preliminar das embarcações. Essas curvas são essenciais para compreender o comportamento das embarcações em diferentes situações durante a operação. O método mais utilizado para esses levantamentos são os testes em modelos nos tanques de prova, que trazem bons resultados, mas são muito caros e demorados, dependendo da quantidade de modelos e do número de testes (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Uma alternativa para substituir os testes em modelos de escala reduzida, como já citados acima, são as simulações em (CFD), que são métodos de simulações computacionais. O CFD vêm ganhando cada vez mais espaço na área da engenharia devido ao aumento na capacidade computacional (processadores e memórias), a evolução dos algoritmos de solução contínua e ao baixo custo operacional (MOLLAND, et al, 2011).

O CFD é a área do conhecimento que trata da solução numérica de problemas envolvendo fluidos. Os principais métodos numéricos utilizados são: volumes finitos, diferenças finitas e elementos finitos (MARCHI, 2010).

O CFD baseia-se nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo (DANTAS, 2014).

Os modelos CFD vêm ganhando gradativamente seu espaço, um exemplo disto é Dantas (2010), que utiliza de modelos de tanque de provas e semi empíricos para validação do método utilizando CFD, obtendo excelentes valores dentro do intervalo de confiança. Seu método de CFD consiste em simular separadamente os componentes do AUV, como leme, corpo do AUV, e bocal do hélice, deixando uma simulação completa de lado.

Já WANG (2014) em sua metodologia numérica testa o AUV por completo, simulando com o corpo em vários ângulos de horizontais e verticais que se movem em torno do próprio corpo, dessa análise são retirados as forças e momentos aplicadas no veículo que resultam na igualdade da equação de movimento.

Para o seguimento de trajetórias e execução de tarefas complexas, os AUVs demandam estudos mais aprofundados e precisos sobre seu comportamento hidrodinâmico, assim a utilização de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) vem auxiliando nos projetos de novos veículos autônomos.

Este trabalho é a continuação de um grupo de pesquisas em Veículos Submarinos que vem sendo desenvolvido na Universidade Federal de Santa

Catarina, campus Joinville, sob a coordenação do Prof. Dr. Eng. Lucas Weihmann. Sendo os trabalhos de Vaz (2015) e Cruz (2016) desenvolvidos em cima de Veículos de Operação Remota (ROV) e Bastezini (2016) sobre Veículos Submarinos Autônomos.

## 1.1. Objetivos

Obter os parâmetros hidrodinâmicos de um AUV utilizando software CFD. Fazer a análise dos resultados e compará-los com trabalhos presentes na literatura.

### 1.1.1. Objetivos geral

Este trabalho tem por objetivo obter os parâmetros hidrodinâmicos de força de arrasto e dos momentos em torno do AUV, realizando variações nos ângulos verticais e horizontais do próprio veículo. Esses parâmetros são os valores resultantes da matriz que resulta da equação de movimento presentes em Fossen (2011). Assim, com as curvas de força e momentos levantadas em CFD, será necessário fazer a comparação da simulação comparando-as com trabalhos já existentes na literatura (WANG, 2014).

O desenvolvimento desta metodologia começa na representação geometria do AUV Ecomapper em programas CAD. Após essa etapa será importado a geometria para o Software Star CCM+, o qual será utilizado nas simulações para definição.

Assim são definidas as condições de contorno do problema, como modelos de malhas e simplificações (Dantas, 2014) que venham a reduzir as equações de Navier-Stokes (FOX, 2010) e o tempo computacional não causando alterações nos resultados.



### 1.1.2. Objetivos específicos

- Simular, com o software CFD, os esforços hidrodinâmicos do AUV Ecomapper em manobras;
- Levantar os valores da Matriz Hidrodinâmica ( $\tau_{hydr}$ );
- Analisar o comportamento na variação do ângulo de ataque;
- Analisar os resultados;
- Comparar com trabalhos já existentes na literatura;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Métodos de Solução de Problemas de Engenharia

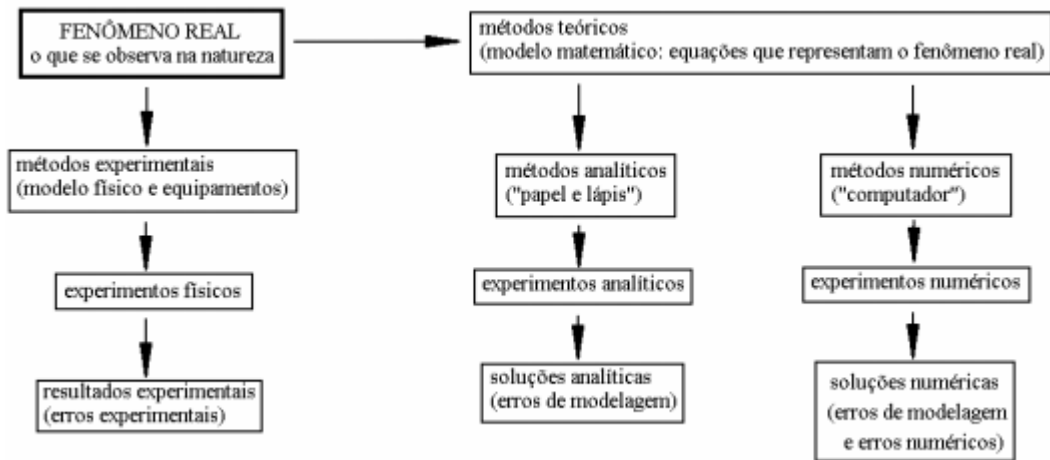
Como é observado na Figura 1, problemas de engenharia são oriundos de fenômenos físicos observados na natureza. Esses fenômenos podem ser calculados de formas experimentais ou teóricas.

Os métodos experimentais são obtidos por meio de experimentos com equipamentos ou modelos físicos, muitas vezes inviáveis por conta do seu alto custo. Tais métodos também apresentam alguns erros experimentais o que pode vir a afetar um projeto de engenharia.

Para os métodos teóricos é possível separar em métodos analíticos e numéricos. Os métodos analíticos consistem na solução de equações obtidas através dos modelos empíricos provados matematicamente na literatura, porém, para soluções que necessitam de um grande número de iterações esta solução se torna inviável.

Com a evolução do processamento computacional foi aumentado a busca pelos métodos numéricos. Estes possuem baixo custo orçamental de operação, e vem apresentando bons resultados, seu único porém é com relação ao custo computacional, mas de fácil reversibilidade se simulados em computadores com alto desempenho. Desde então o CFD se faz cada vez mais presente nos projetos de engenharia envolvendo fluidos, e passou a ser a melhor alternativa no custo benefício.

Figura 1- Problemas de Engenharia.



Fonte: MARCHI (2010, p. 2).

## 2.2. Equação Do Movimento que Descreve a Trajetória de um Veículo Submarino Autônomo (AUV)

A Equação 1, apresentada por Fossen (2011), é a equação do movimento que descreve a trajetória de um Veículo Submarino Autônomo.

$$M\dot{V} + C(V)V + DV = \tau_{hydr} + \tau_{thrust} \quad (1)$$

Definindo  $V = [u, v, w, p, q, r]^T$ ,  $\tau_1 = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ ,  $\tau_2 = [\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]^T$ ,  $\tau_{hydr} = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T$ ,  $\tau_{thrust} = [f_{thrust}, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ . Sendo  $[x, y, z]^T$  representando a posição do AUV Ecomapper em relação ao eixo fixo da terra,  $[\phi, \theta, \psi]^T$  representa o vetor angular Euleriano (*roll*, *pitch*, *yaw*) fixo a terra,  $[x_B, y_B, z_B]^T$  define as coordenadas lineares do veículo,  $[p_B, q_B, r_B]^T$  define as coordenadas angulares do veículo,  $V$  representa as velocidades: lineares  $[u, v, w]$  e angulares  $[p, q, r]$ ,  $[\tau_x, \tau_y, \tau_z]$  é definido como as forças hidrodinâmicas e  $[\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]$  os momentos hidrodinâmicos agindo no AUV.

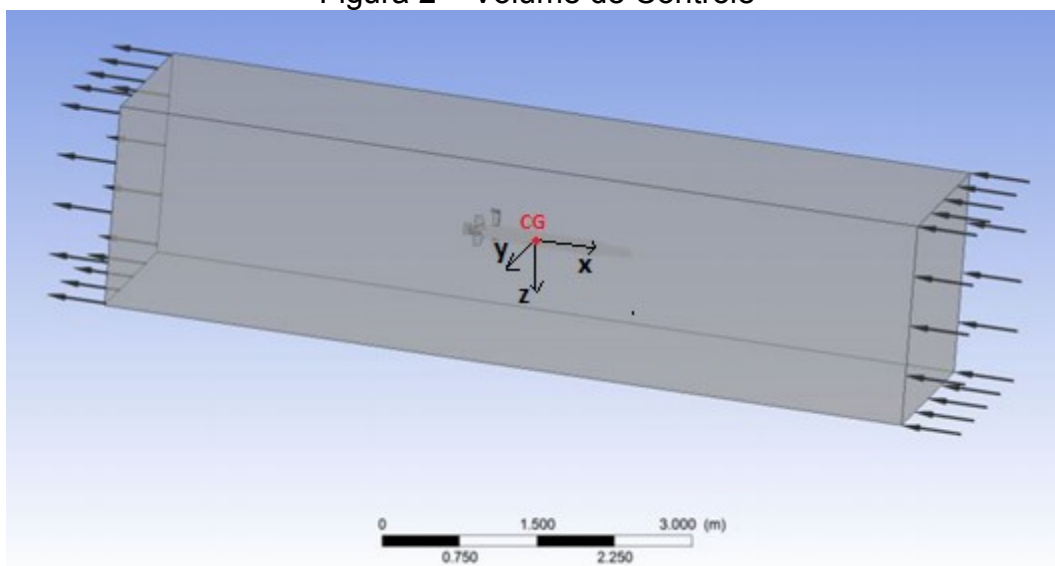
Onde  $M$  é a soma da Matriz de Rigidez do Corpo ( $M_{RB}$ ) com a Matriz de Massa Adicional ( $M_A$ ).

A matriz  $C(V)$  é soma da Matriz de Coeficiente de Coriolis para Corpos Rígidos  $C_{RB}(V)$  com a Matriz de Massa Adicional  $C_A(V)$ . E o termo  $D$  é a Matriz de Amortecimento.

Sendo a massa do veículo  $m = 27,2 \text{ kg}$ , comprimento  $L = 1,59 \text{ m}$ , raio do cilindro  $r = 0,0736 \text{ m}$ , altura  $h = 0,419 \text{ mm}$ , largura  $l = 0,336 \text{ m}$ .

Após apresentados todos os termos chega-se no último termo da Equação de Movimento que é a Matriz Hidrodinâmica ( $\tau_{hydr}$ ). Essa matriz é composta pelas resultantes das forças de arrasto nas três direções e dos três momentos hidrodinâmicos que agem no AUV Ecomapper. O termo  $\tau_{hydr}$  é a base para este trabalho onde serão obtidos seus valores através das simulações do AVU Ecomapper em CFD. A obtenção de  $\tau_{hydr}$  é feita através do escoamento na direção  $-x$ . A obtenção das forças nas direções  $x, y$  e  $z$  e momentos em *roll*, *pitch* e *yaw* é feita em relação ao referencial fixo no centro de geométrico do copo, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Volume de Controle



Fonte: Wang (2014).

### 2.3. Equação de Reynolds-Averaged-Navier–Stokes (RANS)

As equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) são obtidas a partir das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis (FOX ,2010). As equações RANS são utilizadas para número de Reynolds altos segundo Andrade (2015). A Equação de Reynolds descrita por

$R_e = V.L/\nu$  pode confirmar isso, que para o comprimento  $L = 1,59\text{m}$  do AUV Ecomapper, navegando a velocidade de  $V = 1\text{m/s}$ , a temperatura ambiente ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) com viscosidade  $\nu = 1,003 * 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ , tem um valor de número de Reynolds de  $R_e = 1,595 * 10^6$ . Por Fox (2010), valores acima de  $R_e = 1 * 10^5$  para escoamentos externos podem ser considerados turbulentos, assim pode-se utilizar as equações de RANS para este trabalho.

Valores instantâneos das variáveis do movimento turbulento como uma variação randômica em torno dos valores médios, para variável  $\phi$  de solução nas equações de Navier-Stokes instantâneas é decomposta em um valor médio  $\bar{\phi}$  e uma componente flutuante  $\phi'$ :

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2)$$

onde  $\phi$  representa componentes de velocidades, pressão e energia.

O processo de média pode ser pensado como tempo de média para situações de estado estacionário e média de conjunto para situações transitórias repetíveis. Inserindo as variáveis de solução decompostas nas equações de Navier-Stokes resulta em equações para as quantidades médias.

A equação de conservação de massa Equação 3 e conservação de momento Equação 4 podem ser escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot [\rho(\bar{V} - V_t)] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \partial_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{P} + \frac{2}{3} \rho k \right] + \frac{\bar{\partial}}{\partial x_j} \left[ (V + V_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

onde

$\rho$  é a densidade;

$\bar{V}$  e  $\bar{P}$  são as velocidades e pressões médias;

$V_t$  são as velocidades referentes ao plano;

$\mu$  viscosidade dinâmica, de um ponto do fluido;

$f_b$  são as forças que atuam no corpo (tais como a gravidade).

#### 2.4. MODELO DE TURBULÊNCIA K-EPSILON TWO-LAYER

O Modelo de turbulência K-Epsilon é um modelo de duas equações que resolvem as equações de transporte para a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. Tem sido utilizado por várias décadas, e tornou-se um modelo amplamente empregado para aplicações industriais sendo sugerido por Kynan (2012) em seu trabalho.

A equação para a energia cinética turbulenta é resolvida por todo o fluxo. Já a taxa de dissipação turbulenta e a viscosidade turbulenta são especificadas como funções de distância da parede. Os valores especificados na camada próxima da parede são misturados suavemente com os valores calculados a partir da resolução da equação de transporte longe da parede. As equações de energia cinética turbulenta e dissipadas são dadas pelas Equações (15) e Equação (16) presente em Fox (2010, p. 76).

Energia cinética turbulenta  $k$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} \quad (5)$$

Dissipação  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2e} \quad (6)$$

Relação entre viscosidade turbulenta com a energia cinética turbulenta e dissipação é dada pela Equação 7.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

Onde

$u_i$  representa as velocidades em suas correspondentes direções;

$E_{ij}$  representa as componentes da taxa de deformação;

$\mu_t$  representa a viscosidade turbulenta.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a Metodologia que dará seguimento ao trabalho, definindo assim as hipóteses tomadas e também todas as ferramentas utilizadas para efetuar as simulações.

Este trabalho seguirá a metodologia proposta por Wang (2014), com algumas pequenas alterações devido a diferença de software a serem utilizadas. Também será feita algumas alterações com relação a geometria do AUV.

Para comparar os resultados com trabalho de Wang (2014), nas simulações serão efetuadas variações nos ângulos horizontais e verticais no corpo do AUV em relação a direção de entrada do escoamento. A velocidade do escoamento será fixada em um metro por segundo (1m/s), idêntica a velocidade de operação do AUV Ecomapper.

Neste trabalho foram utilizados os seguintes softwares: Rhinceros 5 para desenho das geometrias e montagem das peças; Solidworks para o cálculo do centro de massa e centro de gravidade; e o Star CCM+ 11.02.009 que fará as simulações CFD. Essas opções se devem ao fato da obtenção de licença pela Universidade Federal de Santa Catarina.

A primeira etapa deste trabalho é feita a modelagem do AUV. Primeiro são retiradas as suas dimensões utilizando instrumentos de medição como paquímetros e fita métrica, depois são desenhados cada parte do AUV Ecomapper como: leme, bocal do hélice e corpo com antena. Após o desenho da geometria é feita a montagem das peças no Rhinoceros 5 e retirados suas propriedades no software Solidworks.

A segunda etapa está relacionada com a simulação da geometria do AUV Ecomapper no software CFD Star CCM+ 11.02.009. O processo de simulação inicia com a criação do volume de controle seguindo os mesmo parâmetros implementados em Wang (2014), onde o volume de controle assemelha-se ao tanque recirculante que mede as forças de arrasto e momentos. Após isso são definidas a física da malha, parâmetros físicos do problema e números de iterações da simulação.

Após as simulações são levantados os resultados e o trabalho é comparado aos resultados obtidos com o trabalho de Wang (2014).



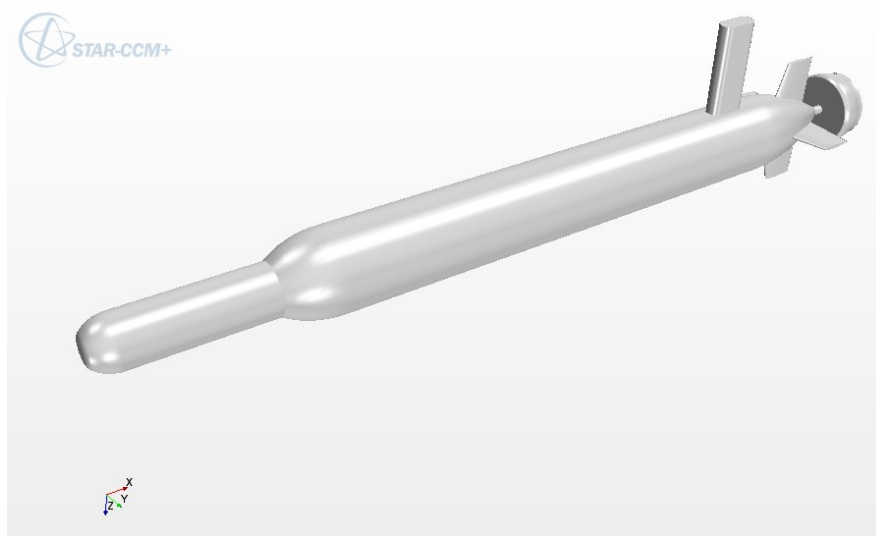
## 4. MODELAGEM DA SIMULAÇÃO DE UM AUV

Neste capítulo será apresentada a modelagem da simulação do AUV utilizando o software CFD Star CCM+ 11.02.009 que vai desde o pré-processamento como: importação da geometria, criação do volume de controle, definição das regiões, parâmetros físicos adotados, criação da malha, refinamentos de malha; até o pós-processamento: retiradas dos dados e das imagens simuladas.

### 4.1. Domínio de Resolução

A primeira etapa da simulação consiste na importação da geometria para o CFD Star CCM+ 11.02.009 como apresentado na Figura 3. A geometria tem seu centro geométrico fixada no ponto de origem do plano do software.

Figura 3 - Importação da Geometria para software CFD.

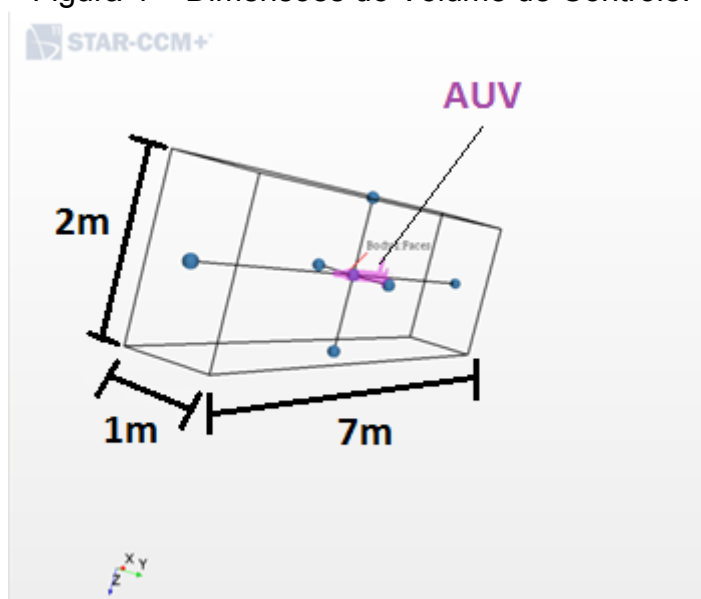


Fonte: Autor (2016).

### 4.2. Criação Do Volume De Controle E Criação Das Superfícies De Controle

O perfil do volume de controle segue a metodologia de Wang (2014), criando um volume de controle com as mesmas dimensões do tanque de teste recirculante utilizadas por Wang (2014). As dimensões do volume de controle podem ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Dimensões do Volume de Controle.

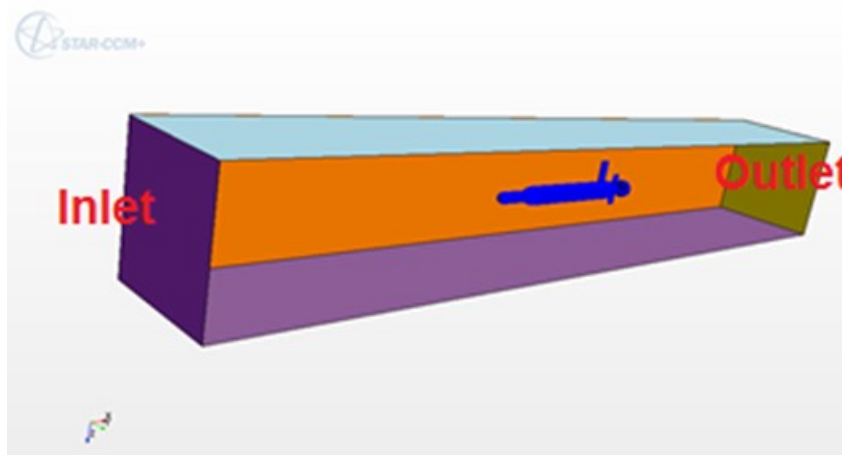


Fonte: Autor (2016).

As condições de contorno do volume de controle serão separadas por regiões, sendo a região “*input*” para o software a região de entrada de fluido definida através da magnitude do vetor de velocidade e tomada a partir da direção especificada de Fluxo. Já a saída de fluido é selecionado a opção “*Pressure outlet*” com condição inicial e com valor limite, a pressão é inserida como um perfil de pressão. Para as demais regiões como as paredes laterais, topo, fundo e o próprio AUV, são selecionadas a opção “*wall*”, o qual é definido como uma superfície de parede que age sobre um fluido que passa através dele.

Na Figura 5, podemos identificar as superfícies de acordo com a cor. A cor roxa escura apresenta a região de entrada do escoamento, a região amarela apresenta a região de saída de fluido, as demais regiões representam os corpos rígidos do volume de controle.

Figura 5 – Definição das Superfícies de Controle.



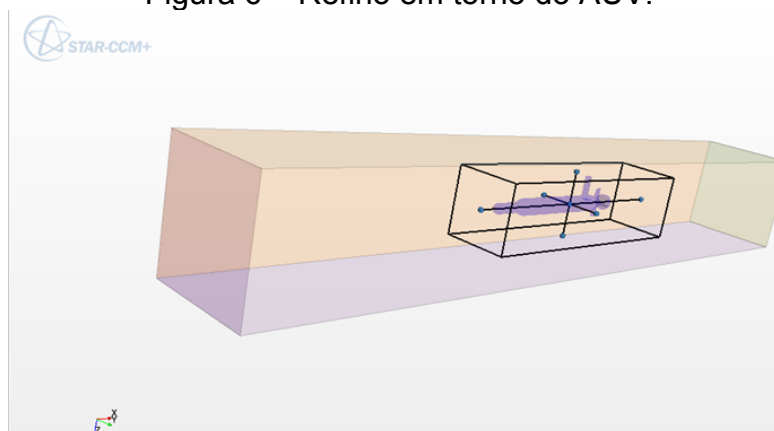
Fonte: Autor (2016).

#### 4.3. Malha – Física, Criação e Refinamento

Os modelos de malha para escoamentos submersos são indicadas por Kynan (2012), que sugere o tipo de malha “Trimmer articulada” como o mais adequado para este trabalho. Esse modelo de malha utilizada é construída a partir de células hexaédrica. Uma condição utilizada é que as malhas tem seus tamanhos uniformes entre arestas.

Para obter melhores resultados é feito uma malha mais refinada em torno do Ecomapper com tamanho de 0,01m através de um volume de controle no formato de um bloco como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Refino em torno do AUV.

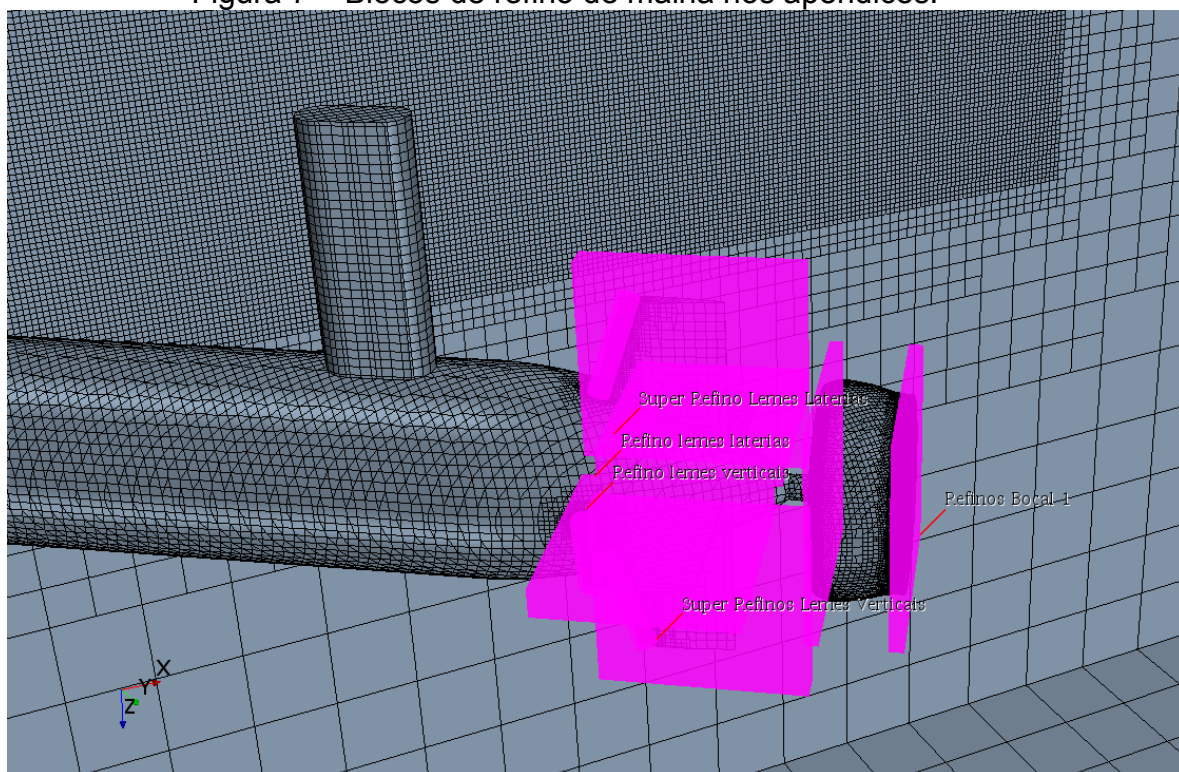


Fonte: Autor (2016).

As áreas dos apêndices como os Lemes, Bocal e Antena, exigem uma malha mais refinada, pois suas extremidades podem alterar significativamente os

resultados das simulações. Um refino na ordem de 0,0005m é feita nas extremidades do bocal dos lemes. Já para as partes de não extremidades é colocado uma malha com o valor de 0,01m para que replique fielmente as curvas do desenho em CAD.

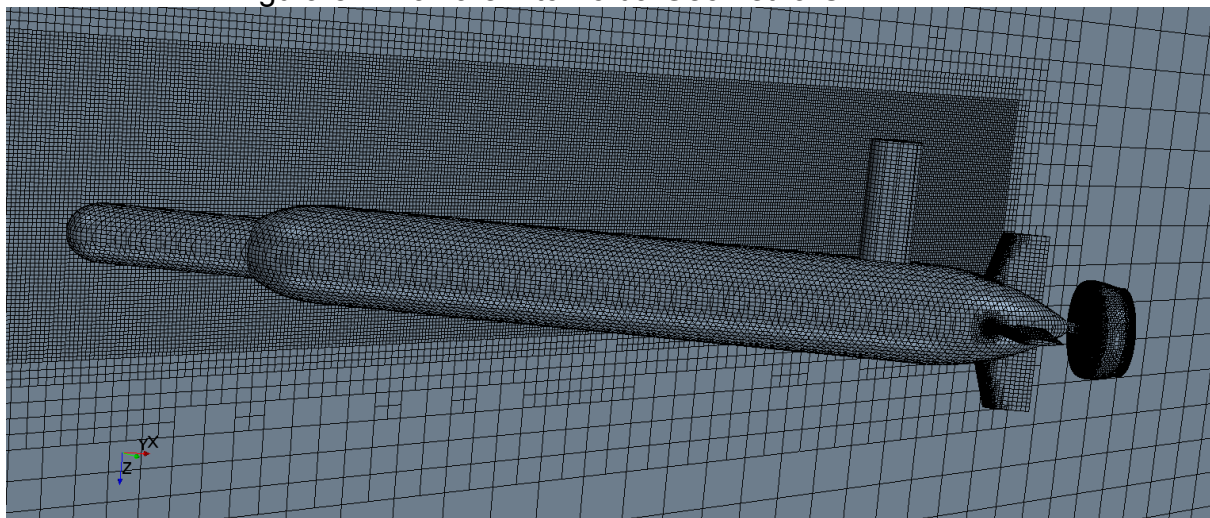
Figura 7 – Blocos de refino de malha nos apêndices.



Fonte: Autor (2016).

O valor para a malha base é no valor de 0,1m, o volume de controle de refino do AUV tem tamanho de malha de 0,01m. Na Figura 8 vemos a malha final.

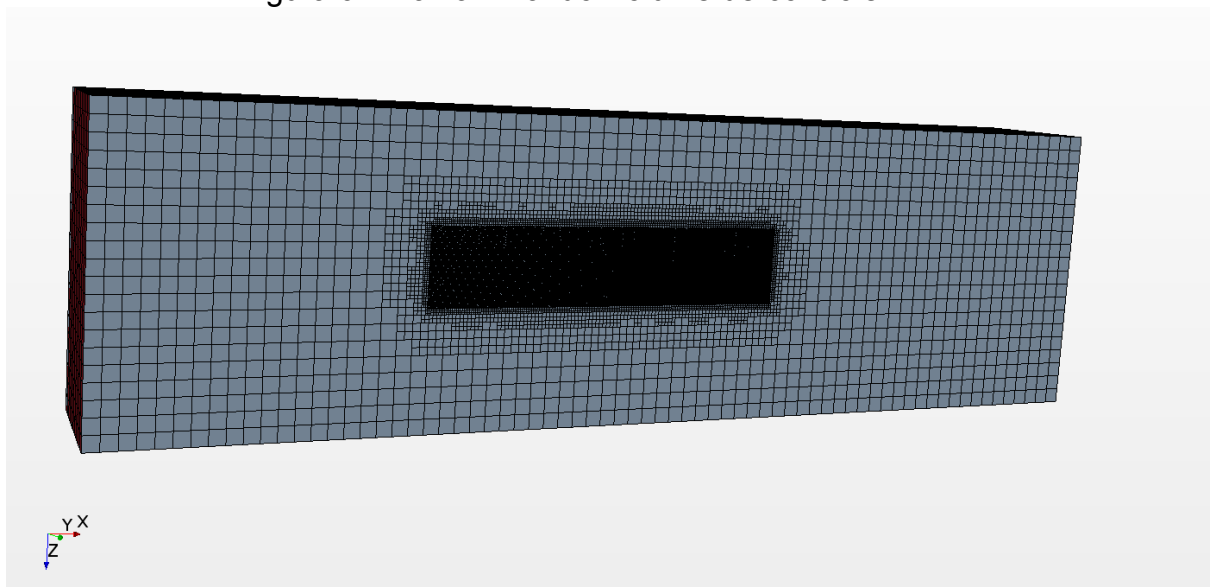
Figura 8 – Malha em torno da Geometria CAD.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 9 é apresentada a malha final do volume de controle e o número médio de células para cada simulação ficou em torno de 9-11 milhões.

Figura 9 - Malha Final do Volume de controle.



Fonte: Autor (2016).

#### 4.4. Definições da Física Do Problema

O modelo físico tem como objetivo simplificar ou dar maior grau de complexidade para a solução das equações de Navier-Stokes ou equação da continuidade. Para esse teste foram selecionados os seguintes parâmetros físicos:

- Tridimensionalidade – Simulação em três dimensões;
- Fluido Líquido – Água;
- Velocidade do escoamento na direção  $-x$  com valor de 1 m/s;
- Gravidade  $g = 9,81\text{m/s}$ ;

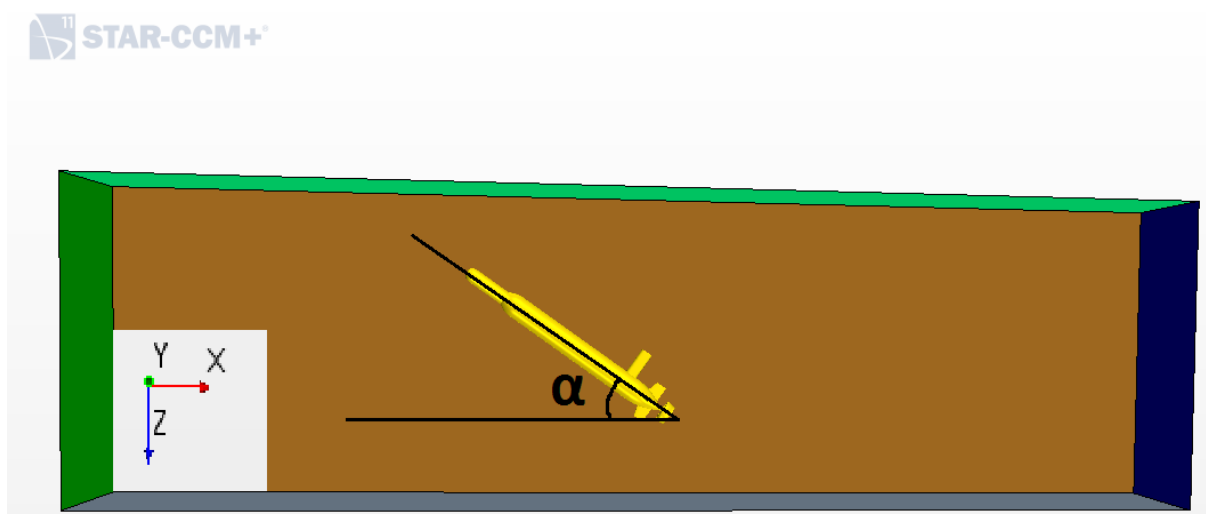
Densidade Constante do Fluido - ( $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ )

- Viscosidade dinâmica  $\mu = 1.10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  ;
- Pressão inicial: Pressão atmosférica.
- Gradientes de pressão e velocidade;
- Solução das RANS;
- Fluxo Segregado – Condição que calcula Pressão e Densidade juntas;
- Escoamento Turbulento;
- Modelo de turbulência do tipo K-Epsilon Two-Layer;
- Nas simulações foi desconsiderada a força da gravidade agindo no AUV Ecomapper como apresenta Wang (2014), por estar em equilíbrio estático com a força de empuxo;
- Também foi desconsiderados Vórtices por conta do seu aumento no tempo computacional das simulações;

#### 4.5. SIMULAÇÃO

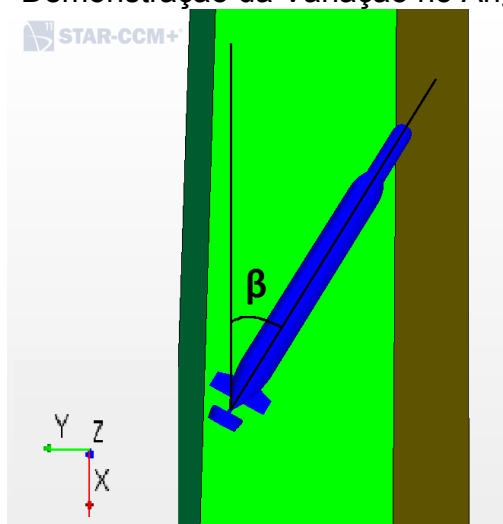
Após todas as etapas do pré-processamento chega-se ao ponto de efetuar a etapa de simulação. Nesta etapa será rodada a simulação e efetuada as iterações do programa CFD. Cada simulação foi configurada para duas mil iterações e foram feitas simulações em duas etapas.

Na primeira etapa é feito a variação vertical ( $\alpha$ ) do AUV Ecomapper de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  em intervalos de  $5^\circ$ . É chamada de variação vertical a variação do ângulo na direção  $x$  como mostra a Figura 10 (para concordar com a definição de Wang).

Figura 10 – Demonstração da Variação no Ângulo Vertical ( $\alpha$ ).

Fonte: Autor (2016).

Na segunda etapa é feita variações do ângulo horizontal do AUV Ecomapper de também de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$ . É chamada de variação horizontal a variação do ângulo na direção z como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Demonstração da Variação no Ângulo Horizontal ( $\beta$ )

Fonte: Autor (2016).

#### 4.6. CONVERGÊNCIA

Os critérios de convergência da simulação serão analisados através dos erros residuais das equações de movimento, da equação da continuidade e das equações da turbulência K- $\epsilon$ , medidos em RMS. Segundo Dantas (2014) para valores abaixo

de 0,0001 RMS são valores adequados para considerar a simulação convergente. O termo RMS é definido como “Raiz Média Quadrada” representado pela Equação \*\*.

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n r^2}$$

Onde,  $r$  é o erro absoluto na solução de uma variável particular e  $n$  o número de células da simulação.



## 5. RESULTADOS

Após as duas mil iterações e convergência dos resíduos são montadas tabelas com os dados das simulações como podem ser visto na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Resultados para variação no ângulo vertical.

| Vertical  |           |         |        |               |        |        |
|-----------|-----------|---------|--------|---------------|--------|--------|
| Ângulo    | Força [N] |         |        | Momento [N.m] |        |        |
| Graus (°) | x         | y       | z      | roll          | pitch  | yaw    |
| 35        | 25,792    | -25,740 | 5,916  | 1,233         | -2,462 | -5,471 |
| 30        | 20,168    | -20,723 | 3,954  | 0,551         | -1,701 | -3,871 |
| 25        | 15,339    | -19,694 | 2,305  | -0,262        | -1,146 | -3,221 |
| 20        | 11,791    | -15,637 | 0,435  | -0,673        | -0,289 | -1,867 |
| 15        | 9,070     | -10,499 | -0,141 | -0,440        | 0,011  | -0,646 |
| 10        | 7,168     | -1,852  | 0,573  | 0,451         | -0,449 | 1,711  |
| 5         | 5,337     | -4,627  | 0,657  | -0,316        | -0,502 | -0,366 |
| 0         | 4,685     | -0,051  | 0,923  | 0,006         | -0,570 | -0,570 |

Fonte: Autor (2016).

Tabela 2 – Resultados para variação no ângulo horizontal.

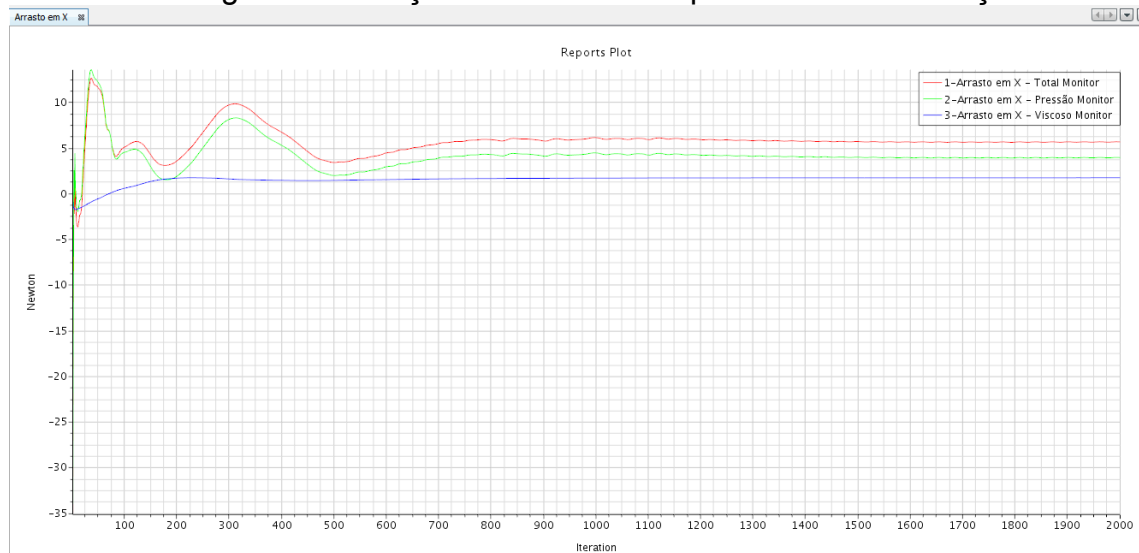
| Horizontal |           |        |         |               |        |        |
|------------|-----------|--------|---------|---------------|--------|--------|
| Ângulo     | Força [N] |        |         | Momento [N.m] |        |        |
| Graus (°)  | x         | y      | z       | roll          | pitch  | yaw    |
| 35         | 17,903    | -0,367 | -15,903 | 0,085         | 1,611  | -0,129 |
| 30         | 14,772    | -0,097 | -14,811 | 0,001         | 1,000  | -0,001 |
| 25         | 12,028    | 0,297  | -12,231 | -0,005        | -0,042 | 0,080  |
| 20         | 9,837     | 0,943  | -8,645  | -0,158        | -0,988 | 0,537  |
| 15         | 7,927     | 0,583  | -6,269  | -0,110        | -1,219 | 0,359  |
| 10         | 6,272     | -0,112 | -5,363  | 0,070         | -0,271 | -0,170 |
| 5          | 5,636     | -1,502 | -0,923  | 0,159         | -1,120 | -0,790 |
| 0          | 4,685     | -0,051 | 0,923   | 0,006         | -0,570 | -0,570 |

Fonte: Autor (2016).

Os gráficos de forças e momentos foram plotados com suas parcelas viscosas e de pressão, e também foi feito o gráfico com a soma das duas que resulta na força e momento totais, em função do número de iterações. Na Figura 12 é mostrada uma curva de convergência da Força de Arrasto em x em função do

número de iterações para mostrar que os resultados convergiram para uma resposta única sem oscilação.

Figura 12 - Força de Arrasto em X por Número de iterações.



Fonte: Autor (2016).

## 6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo será feita as comparações dos resultados obtidos na simulação. As comparações serão feitas via gráficos, através das curvas geradas por interpolação dos dados obtidos na simulação e da interpolação dos dados apresentados no trabalho de Wang (2014). Para cada gráfico, as curvas de interpolação serviram para comparação dos resultados das variações dos ângulos verticais e horizontais do corpo do AUV Ecomapper. Os dados que serão apresentados correspondem aos valores de forças e momentos agindo no AUV Ecomapper. Para melhor entendimento as curvas efetuadas em simulação CFD serão chamadas de “curva simulação” e as curvas para comparação do trabalho de Wang (2014) serão chamadas de “Curva de Wang”. Lembrando que ângulos para manobras maiores que 20° tanto horizontais como verticais não são comumente empregados em veículos que operam em água.

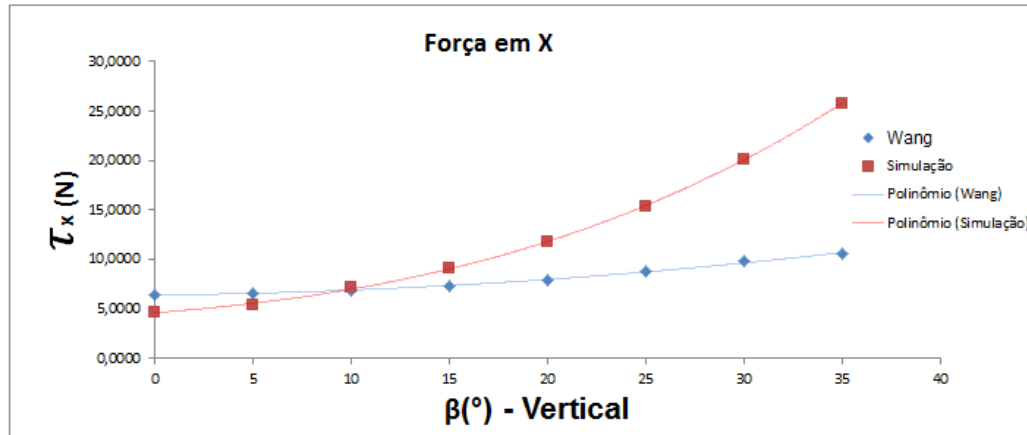
### 6.1. Comparação dos Resultados com Variação Dos Ângulos Verticais

Neste tópico serão avaliadas as variações dos ângulos na direção vertical e comparados os parâmetros de forças e momentos via gráficos. Para melhor entendimento do problema será utilizado o recurso de imagens, com a finalidade de trazer um melhor entendimento do problema ao se comparar apenas com os dados dos gráficos.

#### 6.1.1. Força em X

Como podemos ver na Figura 13, a força na direção x se mantém com uma pequena diferença nas duas curvas até no ângulo de 15°, a medida que a variação do ângulo vertical aumenta, a resistência dada pela curva simulação começa a ter um aumento muito elevado em comparação a curva de Wang (2014).

Figura 13 - Comparação das forças na direção X.

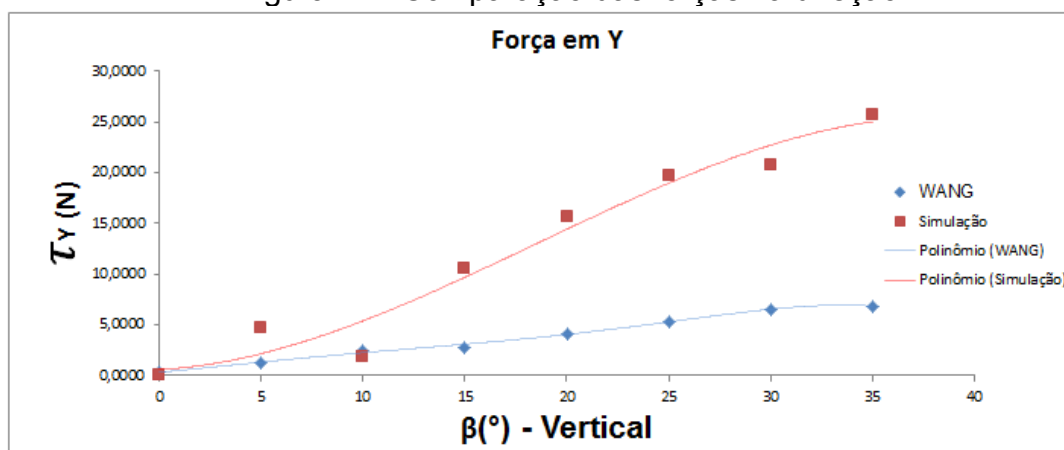


Fonte: Autor (2016)

### 6.1.2. Força em Y

A curva Simulação tem valor aproximado com a curva Wang para os três primeiros valores de ângulos, mas os valores da simulação acabam se afastando dos valores em comparação. Porém, vale ressaltar que a curva Simulação (Figura 14) demonstra ter uma mesma forma que as curvas de força de arrasto na direção y e calculada por Wang (2014), mostrando uma diferença de ângulo.

Figura 14 - Comparação das forças na direção Y.

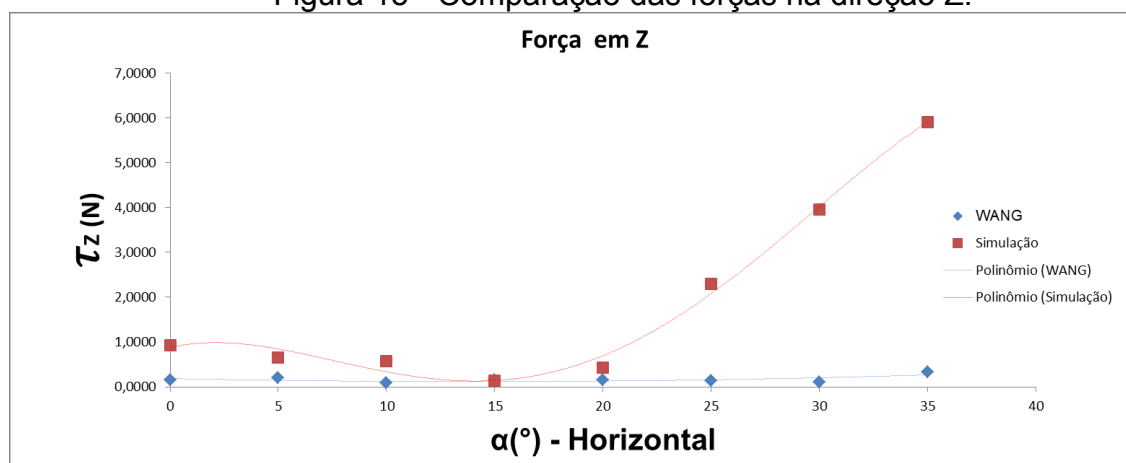


Fonte: Autor (2016).

### 6.1.3. Força em Z

Pelo que é percebido na Figura 15, as curvas de força de arrasto em z se divergem significativamente para ângulos superiores a 20° do ângulo de incidência. A curva Simulação apresenta uma grande inclinação em 25° enquanto a curva de Wang se mantém próxima de zero.

Figura 15 - Comparação das forças na direção Z.

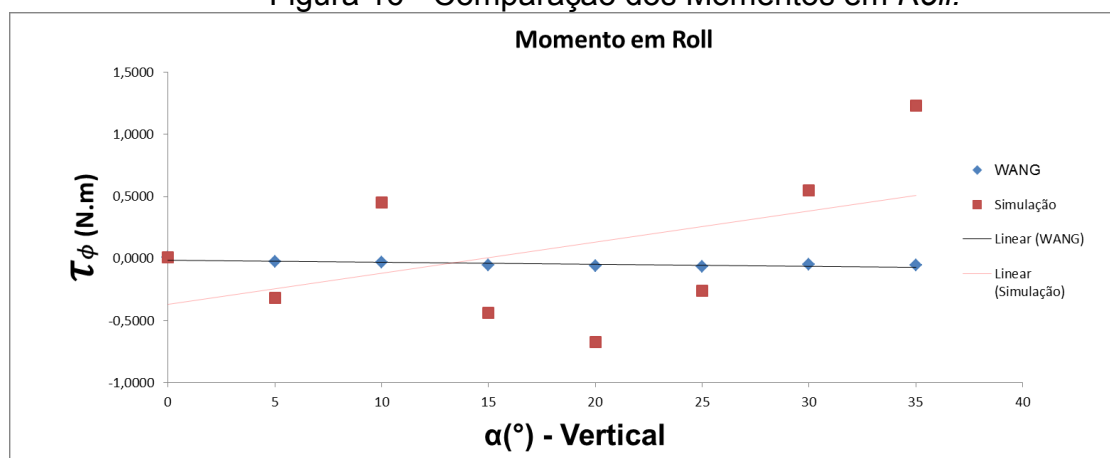


Fonte: Autor (2016).

#### 6.1.4. Momento em *Roll*

Os momentos em *Roll* são muito próximos de zero. Então seguindo Wang (2014), podemos desprezar as ações de momento nesse sentido.

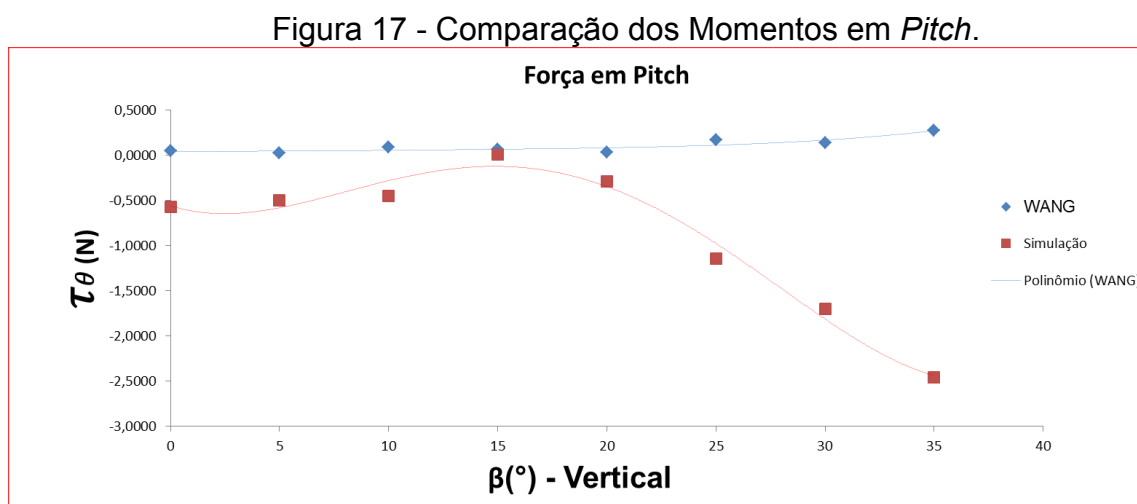
Figura 16 - Comparação dos Momentos em *Roll*.



Fonte: Autor (2014).

#### 6.1.5. Momento em *Pitch*

Os momentos em *pitch* apresentam valores muito próximos para até 20° nas variações de ângulos. Em 25° é evidente a divergência de valores e o valor da curva da simulação começa a aumentar muito em relação ao trabalho proposto por Wang (2014). Para valores inferiores a 20°, os valores de momentos são desprezíveis (WANG, 2014).

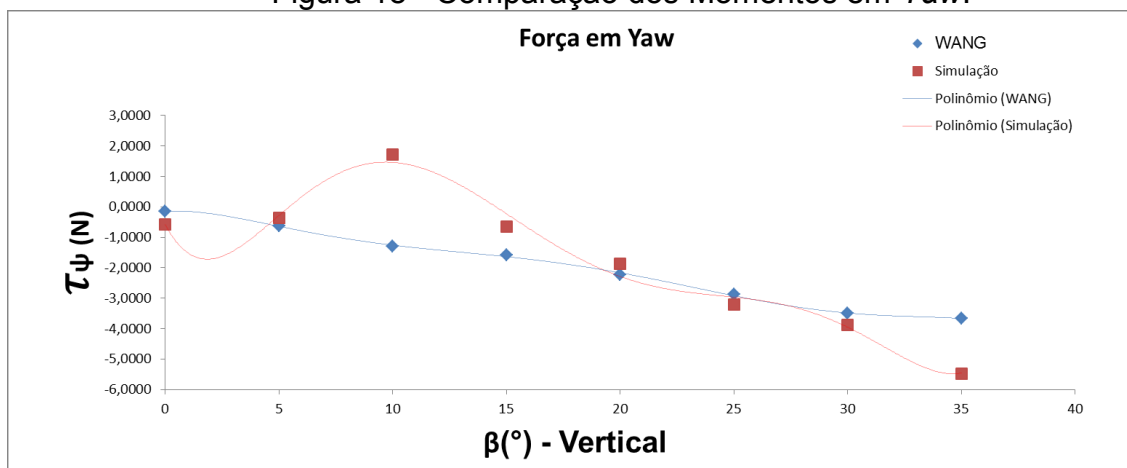


Fonte: Autor (2016).

#### 6.1.6. Momento em Yaw

Como podemos notar, conforme Figura 18, as variações de valores significativas do momento em Yaw acontecem para o ângulo de 10° e 35°. Podendo esse valor 10° um caso isolado que possa envolver a malha da simulação. Já a diferença na variação de 35°, vem sendo constante nas simulações até o momento.

Figura 18 - Comparação dos Momentos em Yaw.



Fonte: Autor (2016).

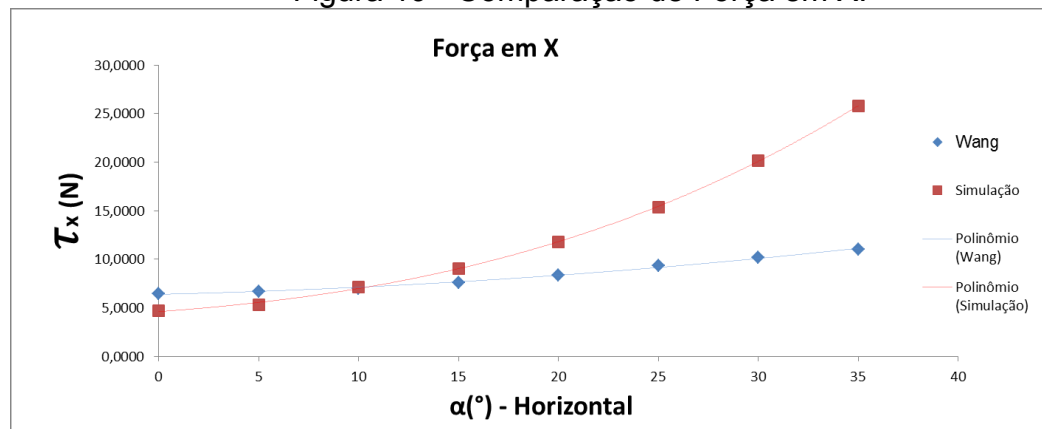
## 6.2. Comparação dos Resultados com Variação dos Ângulos Horizontais

Neste tópico serão avaliadas as variações dos ângulos na direção horizontal e avaliado e comparados os parâmetros de forças e momentos via gráficos.

### 6.2.1. Força em X

Percebe-se que há uma divergência significativa quando a mudança do ângulo é maior que  $20^{\circ}$ , a medida que o ângulo aumenta essa diferença fica cada vez mais evidente.

Figura 19 - Comparação de Força em X.

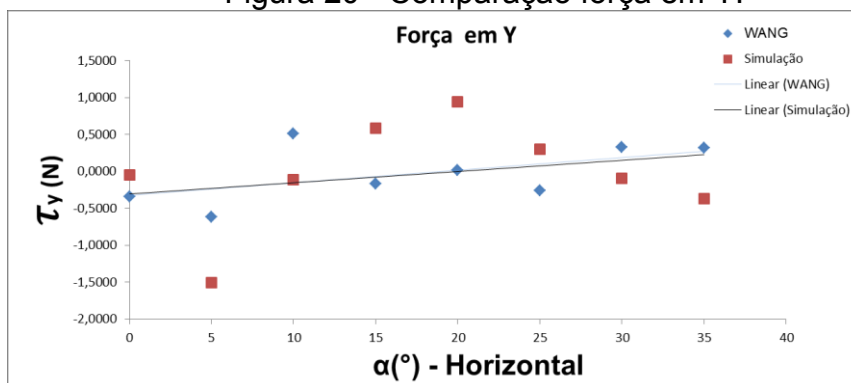


Fonte: Autor (2016).

### 6.2.2. Força em Y

Seguindo metodologia imposta por Wang (2014), e por conter número insignificante para o problema, é desconsiderado o arrasto em Y.

Figura 20 - Comparação força em Y.

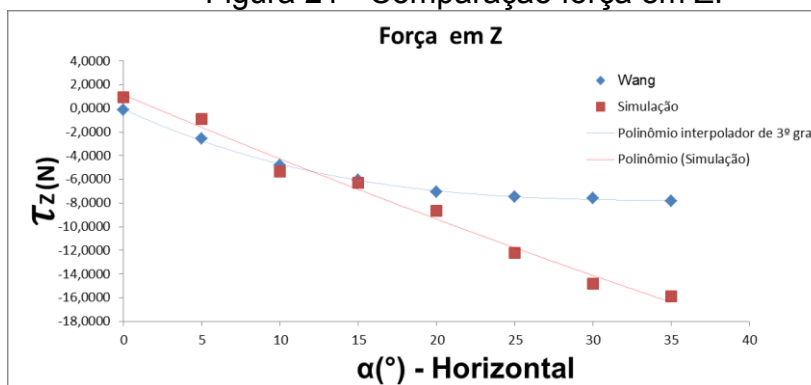


Fonte: Autor (2016).

### 6.2.3. Força em Z

Pelo que é percebido as curvas de força de arrasto em z se divergem significativamente no momento que é aumentado para 25° o ângulo de incidência. Porém, a curva de tendência continua semelhante.

Figura 21 - Comparação força em Z.



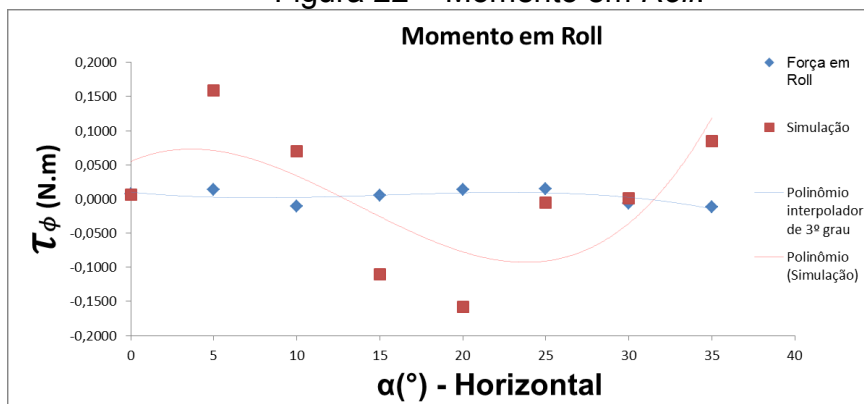
Fonte: Autor (2016).

### 6.2.4. Momento em Roll



Seguindo metodologia imposta por Wang (2014), e por conter número insignificante para o problema, é desconsiderado o momento em *Roll*.

Figura 22 – Momento em *Roll*.

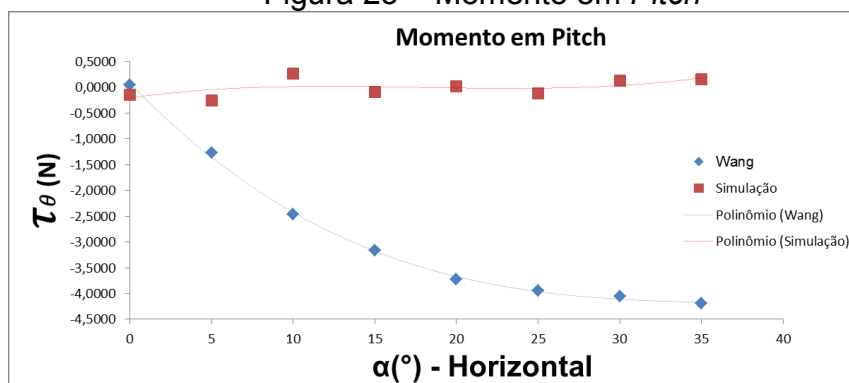


Fonte: Autor (2012).

#### 6.2.5. Momento em *Pitch*

Para o momento em *pitch* com variação no ângulo horizontal a curva Simulação se mantém quase intacta, enquanto as curvas Wang crescem significativamente. Isto pode estar relacionado com o centro de gravidade coincidir com o centro geométrico, o que acarreta que a força resultante do escoamento se mantém sempre próxima do centro geométrico do AUV Ecomapper.

Figura 23 – Momento em *Pitch*

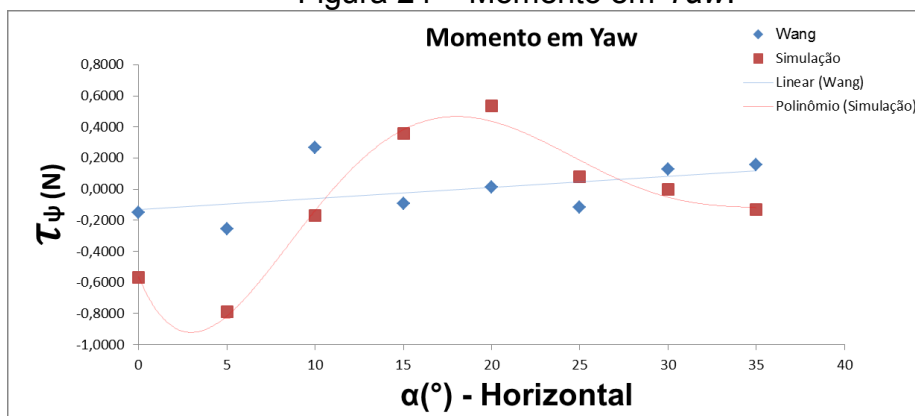


Fonte: Autor (2016).

#### 6.2.6. Momento em *Yaw*

Seguindo metodologia imposta por Wang (2014), e por conter número insignificante para o problema, então o momento em *Yaw* é desconsiderado.

Figura 24 – Momento em Yaw.

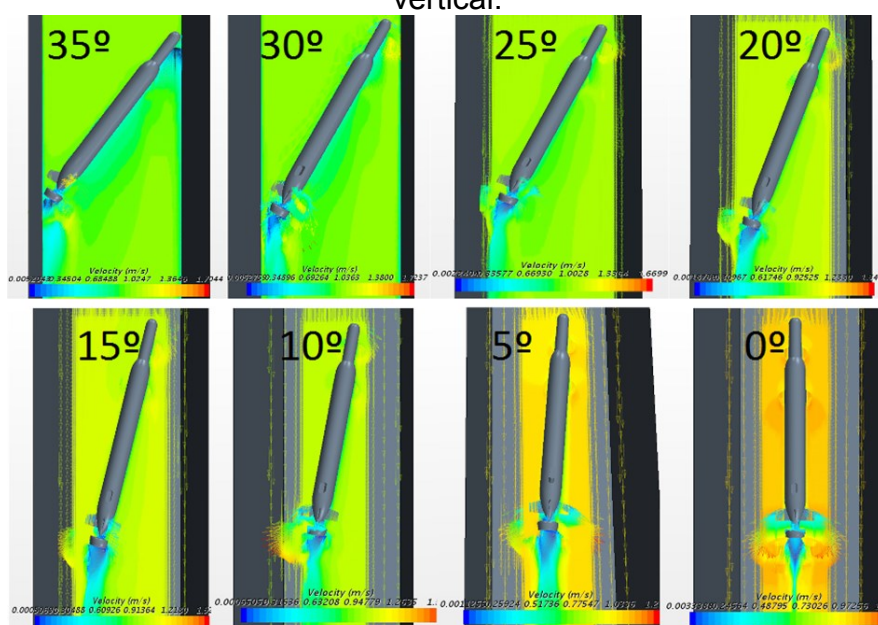


Fonte: Autor (2016).

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor entendimento do problema, na Figura 25, são apresentados os gradientes de velocidade, no plano x-y, do escoamento em regime permanente para os diferentes ângulos verticais. Ao se analisar as imagens, é possível verificar que à medida que o ângulo vai aumentando o AUV Ecomapper passa a ficar com suas extremidades mais próximas da parede do tanque, isso acarreta em uma baixa velocidade na parte traseira como observado nas variações de ângulo de 20° a 25°. O fluido muito próximo a parede tende a aderir à ela, movendo-se com uma velocidade que tende a zero ao passo que se aproxima da parede. Se a parede abaixo do fluido é estacionária, o fluido junto à parede adere a ela e possui velocidade zero (FOX, 2010). As escalas de velocidades e pressão das Figuras 25 a 24 são fornecidas pelo próprio software que fornece a escala com os valor máximo e o valor mínimo de cada parâmetro.

Figura 25 – Vetores velocidades para as diferentes mudanças do ângulo vertical.

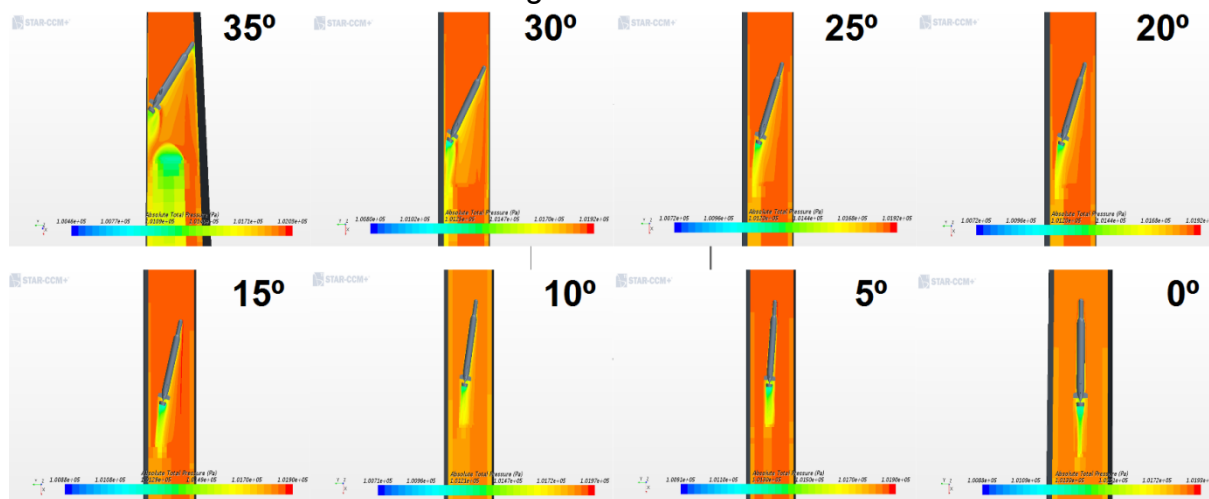


Fonte: Autor (2016).

A Figura 26, mostra o gradiente escalar de pressão total absoluta. Analisando a figura pode-se verificar que a medida que o ângulo aumenta, há um aumento muito significativo no gradiente de pressão, uma zona de baixa pressão crescendo brusquemente. Para o ângulo de 25° essa área de baixa começa a tomar forma,

crescer quase dobrando seu tamanho e dar um salto exponencial no seu crescimento para o ângulo de 30°.

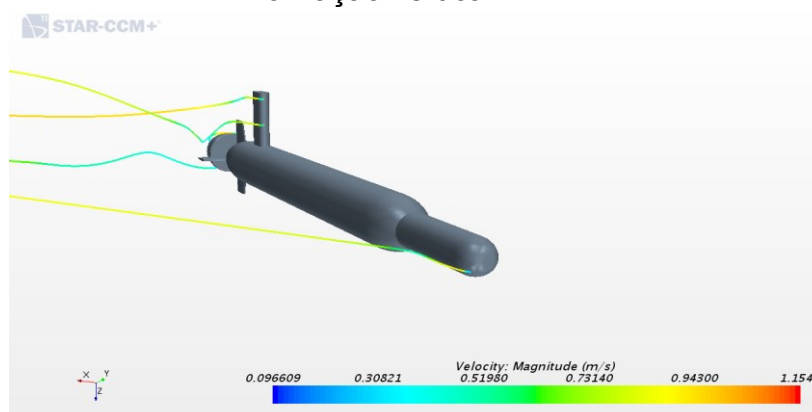
Figura 26 – Gradiente Escalar de Pressão Total Absoluta por variação de ângulos verticais.



Fonte: Autor (2016).

A medida que o AUV se aproxima das paredes laterais na sua parte traseira o escoamento é estrangulado pela ação dos lemes verticais contra a parede lateral. Isso faz com que o fluido acelere, porém quando as extremidades do AUV quase tocam a parede, que é o caso entre 30° e 35°, o escoamento quase não passa nessa região principalmente entre o bocal e a parede que estão mais próximos. Então sofre uma desaceleração, a ponto de formar um “*vácuo*” e criando um gradiente de baixa pressão o que acarreta em uma pressão adversa do escoamento resultando em um aumento na resistência. Isso explica o porquê da diferença de resultados entre as curvas resultados da simulação e os resultados obtidos por Wang (2014). Na Figura 27 podem ser vistas as linhas de corrente do escoamento “Streamlines” para de inclinação 35 ° vertical.

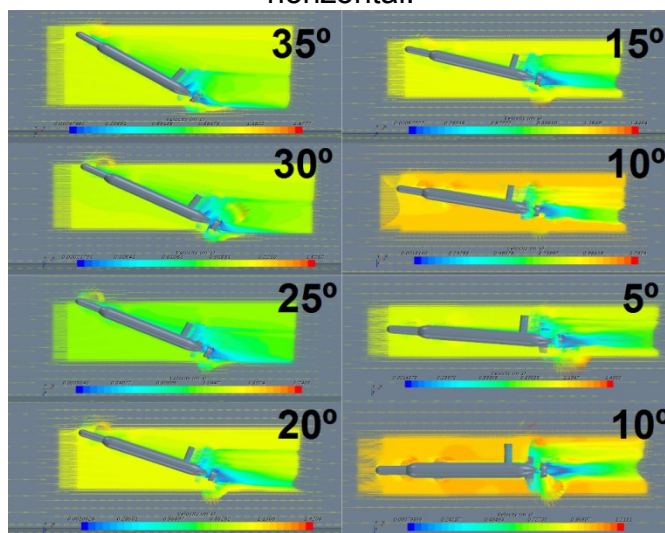
Figura 27 – Linhas de corrente do escoamento “Streamlines” para 35° de inclinação vertical.



Fonte: Autor (2016).

Para o escoamento com variação nos ângulos horizontais, acontece algo semelhante com a variação de ângulo na vertical. Como podemos ver na Figura 28, há uma aumento gradativo da zona de baixa pressão atrás do escoamento que aumenta linear de 0° a 20°, porém, esse aumento se torna não linear quando passa de 20° para 25° e acaba acarretando numa grande zona de baixa pressão quando se aproxima de 35°.

Figura 28 – Vetores velocidades para as diferentes mudanças do ângulo horizontal.

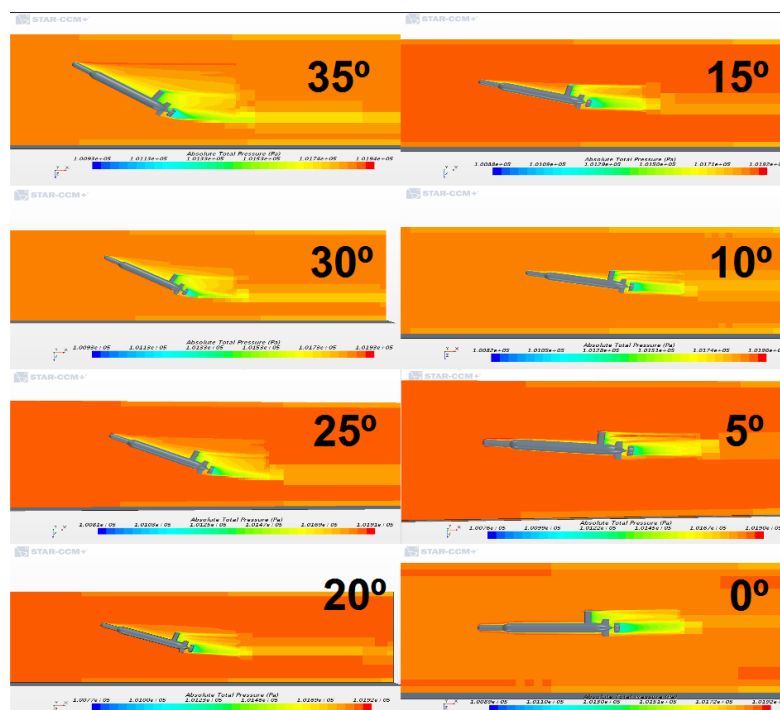


Fonte: Autor (2016).

Como também é visto na Figura 29, há uma redução da energia cinética e uma desaceleração do fluido uma vez que o fluido na parte interior da camada limite é muito lento, e é afetado pelo gradiente de pressão crescente. Para um aumento de pressão grande o suficiente, este fluido pode retardar a velocidade a

um valor nulo o que conhecemos como desprendimento da camada limite que gera uma pressão adversa, isso causa um aumento no arrasto e nas forças e momentos atuantes no AUV Ecomapper.

Figura 29 – Gradiente escalar de Pressão Total Absoluta para variações de ângulos verticais.



Fonte: Autor (2016).

Uma maneira de contornar esse gradiente de pressão é o aumento das paredes do volume de controle, evitando assim o escoamento de ser afetado pelas paredes do tanque, que para este trabalho é algo que não pode ser alterado devido ao fato do tanque deste trabalho replicar o mesmo tanque utilizado no trabalho de Wang (2014).

## 8. CONCLUSÃO

Concluimos que os resultados simulados obtiveram resultados semelhantes para ângulos com até vinte graus de inclinação para ambas as direções, vertical e horizontal, porém para ângulos maiores houve uma divergência em relação aos resultados obtidos. Algumas simulações apresentaram pontos fora da linha de tendência da curva, que foi o caso do momento em Yaw para dez graus, a qual pode estar relacionada com o refino de malha e por falta de tempo hábil não foi simulada novamente. Outras curvas também apresentaram pontos fora da linha de tendência da curva, porém seus baixos valores foram desconsiderados.

Ao que tudo indica, as paredes laterais muito próximas do tanque influenciou de maneira geral nos resultados finais, principalmente para ângulos superiores a vinte graus verticalmente onde foi observado gradientes de pressões e diferenças bruscas de velocidade nos pontos extremos do AUV. Para trinta e cinco graus houve um aumento exponencial em relação a outros ângulos, isto se deve ao fato das extremidades do AUV estarem muito próximas da parede quase chegando a tocá-las.

A considerar as circunstâncias, as variações horizontais do ângulo também tiveram uma pequena influência das paredes superiores e inferiores, mas com uma menor razão em relação às paredes verticais, isso se dá ao fato das paredes superiores e inferiores serem de tamanhos maiores em comparação as paredes laterais.

Outro fator que possivelmente influenciou no resultado final é a divergência entre o centros geométrico e de massa em ambos os trabalhos, já que no trabalho de Wang (2014) essas propriedades não são fornecidas

Uma maneira de contornar isso é aumentando o volume de controle do tanque, simulando o AUV Ecomapper em águas profunda. Segundo Fox (2010), escoamentos próximos as paredes aumenta a resistência. Com isso seria possível fazer uma análise mais profunda e ver se esse foi o real motivo.

Outra modificação para trabalhos futuros é alterar o tipo de malha. Testar outras malhas pode alterar significativamente os resultados. Também podem ser utilizados os parâmetros físicos de vórtice e considerar a ação da gravidade que foi desconsiderada no trabalho de Wang (2014).

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Fernando Oliveira de. **Mecânica dos fluidos ambiental II**. Curitiba: Slide, 2015. 48 slides, color.

DANTAS, João Lucas Dozzi. **Metodologia numérica para estimativa da manobrabilidade de veículos autônomos submarinos**. 2014. 354 p. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecatrônica, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BASTEZINI, Eduardo Micael. Simulation CFD Rudder of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV). **Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**, Joinville, jul. 2016.

FOSSEN, Thor I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. 5. ed. **John Wiley & Sons Ltd**, 2011. 582 p.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2010. 441 p. V. 8.

CRUZ, Jordana Tureck. Distribution of Forces and Moments in the Propulsion System of a Remotely Operated Vehicle. **Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**, Joinville, v. 2, n. 1, p.43-47, jul. 2016.

KYNAN MALEY (Singapore). Star Ccm+ (Org.). **The South East Asian Conference 2012**: Singapore: Cd-adapco, 2012. 40 slides, color.

MARCHI, C. H. **DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**. 2010.

Disponível em:

<[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM257/Semestres\\_antteriores/Semestre\\_2010\\_1/plano\\_TM257\\_CFD\\_2010\\_1.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM257/Semestres_antteriores/Semestre_2010_1/plano_TM257_CFD_2010_1.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2016.



MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, **Dominic A.** **Ship Resistance and Propulsion: practical estimation of ship propulsive power.** Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 563 p.

PEREZ, Dr Tristan; FOSSEN, Professor Thor I; ROSS, Andrew. **Manoeuvring Models:** Bol: One-day Tutorial. 33 slides, color.

VAZ, Thiago Francisco Fuckner. **Desenvolvimento de um Simulador para Veículos Subaquáticos com Interface 3D e Análise de Configurações de Propulsores.** 2015. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

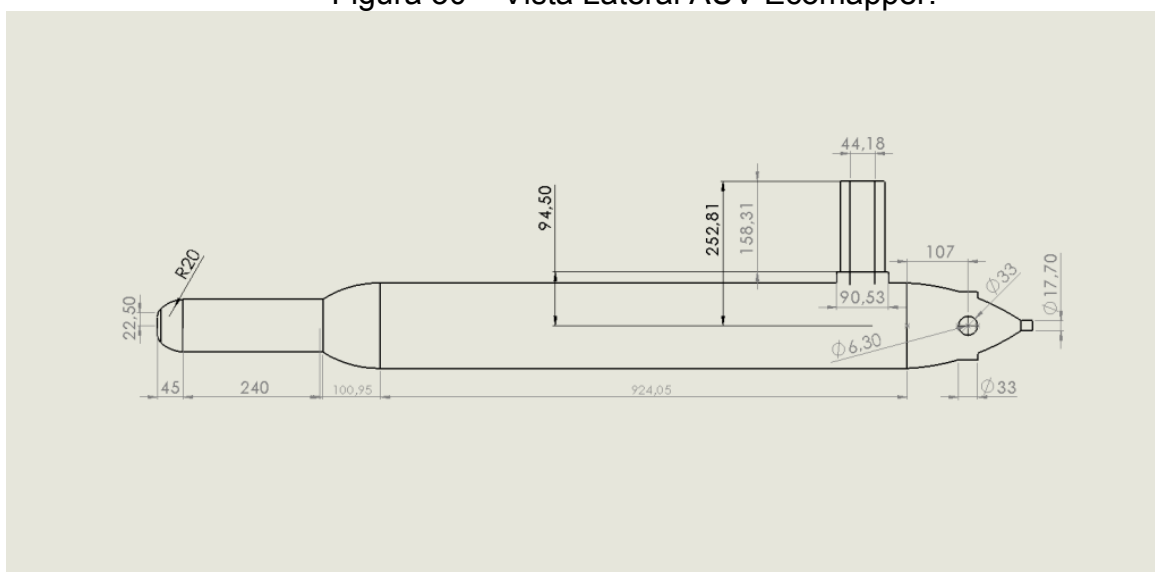
WANG, Chuanf Eng; ZHANG, Fumi N; SCHAEFER, Dirk. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. **Sci Technol.** n. 20, p.199-212, 21 may 2014.

## APÊNDICE A – DIMENSÕES AUV ECOMAPPER

Abaixo são apresentadas as dimensões do AUV Ecomapper, dividida em Corpo e Antena, Leme e Bocal. As medidas são dadas em milímetros.

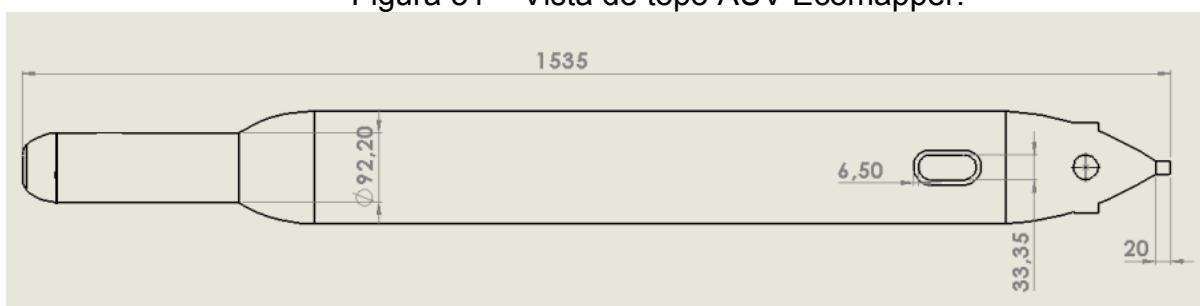
### CORPO E ANTENA

Figura 30 – Vista Lateral AUV Ecomapper.



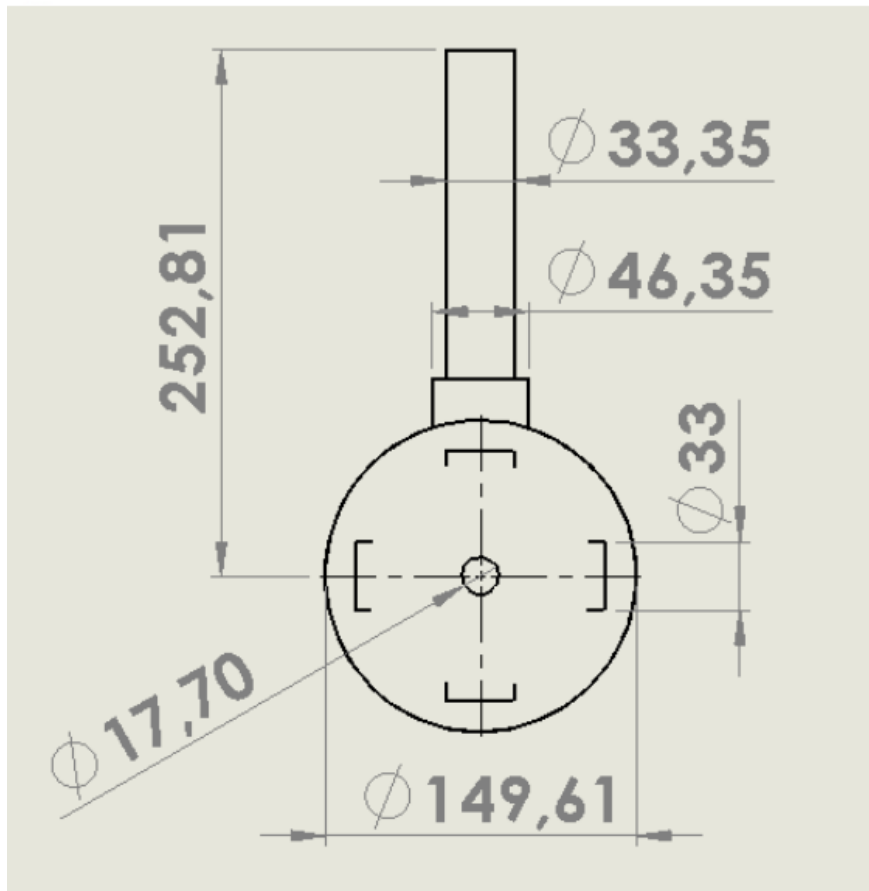
Fonte: Autor (2016).

Figura 31 – Vista de topo AUV Ecomapper.



Fonte: Autor (2016).

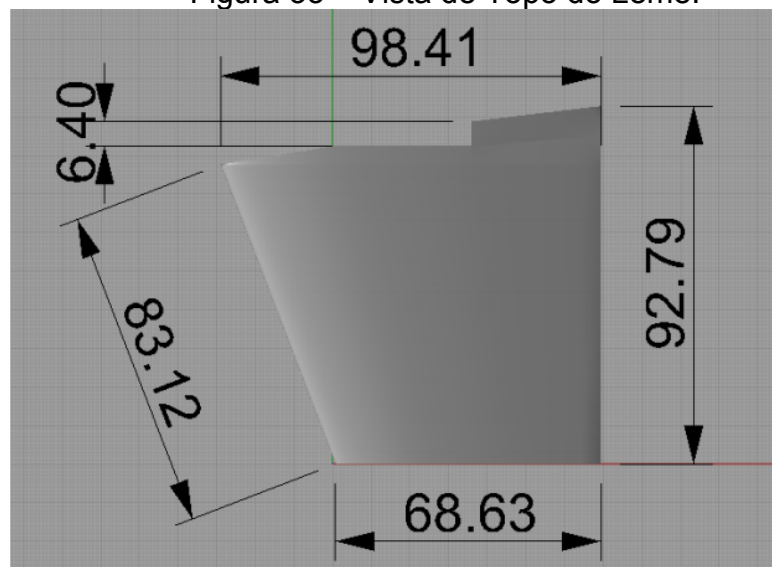
Figura 32 – Vista traseira AUV Ecomapper.



Fonte: Autor (2016).

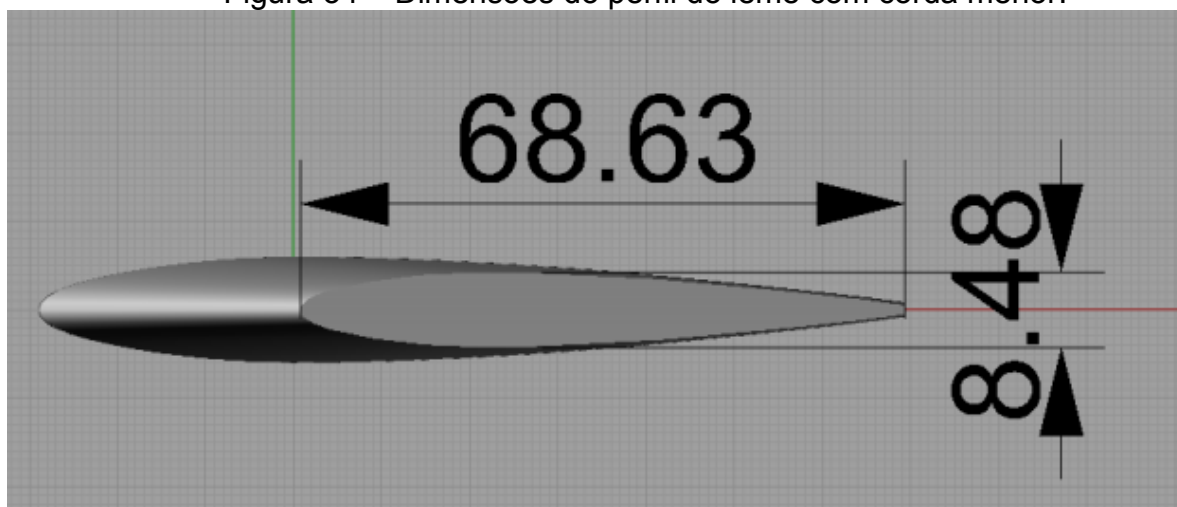
### LEME

Figura 33 – Vista de Topo do Leme.



Fonte : Autor (2016).

Figura 34 – Dimensões do perfil do leme com corda menor.



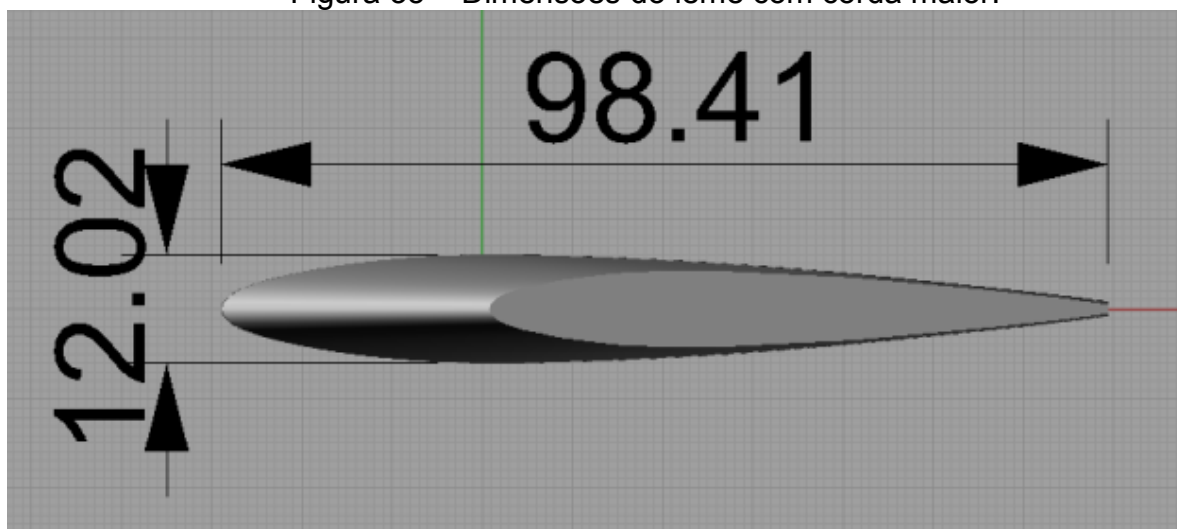
Fonte: Autor (2016).

Tabela 3 – Coordenadas de pontos do perfil do leme (corda menor).

| X      | Y     | Z      |
|--------|-------|--------|
| 0,000  | 0,000 | 0,000  |
| 2,300  | 0,000 | 2,200  |
| 14,700 | 0,000 | 4,275  |
| 26,200 | 0,000 | 4,300  |
| 41,000 | 0,000 | 3,575  |
| 53,800 | 0,000 | 2,350  |
| 68,100 | 0,000 | 0,800  |
| 69,400 | 0,000 | 0,500  |
| 0,000  | 0,000 | 0,000  |
| 2,300  | 0,000 | -2,200 |
| 14,700 | 0,000 | -4,275 |
| 26,200 | 0,000 | -4,300 |
| 41,000 | 0,000 | -3,575 |
| 53,800 | 0,000 | -2,350 |
| 68,100 | 0,000 | -0,800 |
| 69,400 | 0,000 | -0,500 |

Fonte: Autor (2016).

Figura 35 – Dimensões do leme com corda maior.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4 - Coordenadas de pontos do perfil do leme (corda maior).

| X       | Y      | Z      |
|---------|--------|--------|
| 0,000   | 82,400 | 0,000  |
| 3,321   | 82,400 | 3,121  |
| 21,224  | 82,400 | 6,065  |
| 37,828  | 82,400 | 6,100  |
| 59,196  | 82,400 | 5,072  |
| 77,677  | 82,400 | 3,334  |
| 98,323  | 82,400 | 1,135  |
| 100,200 | 82,400 | 0,709  |
| 0,000   | 82,400 | 0,000  |
| 3,321   | 82,400 | -3,121 |
| 21,224  | 82,400 | -6,065 |
| 37,828  | 82,400 | -6,100 |
| 59,196  | 82,400 | -5,072 |
| 77,677  | 82,400 | -3,334 |
| 98,323  | 82,400 | -1,135 |
| 100,200 | 82,400 | -0,709 |

Fonte: Autor (2016).

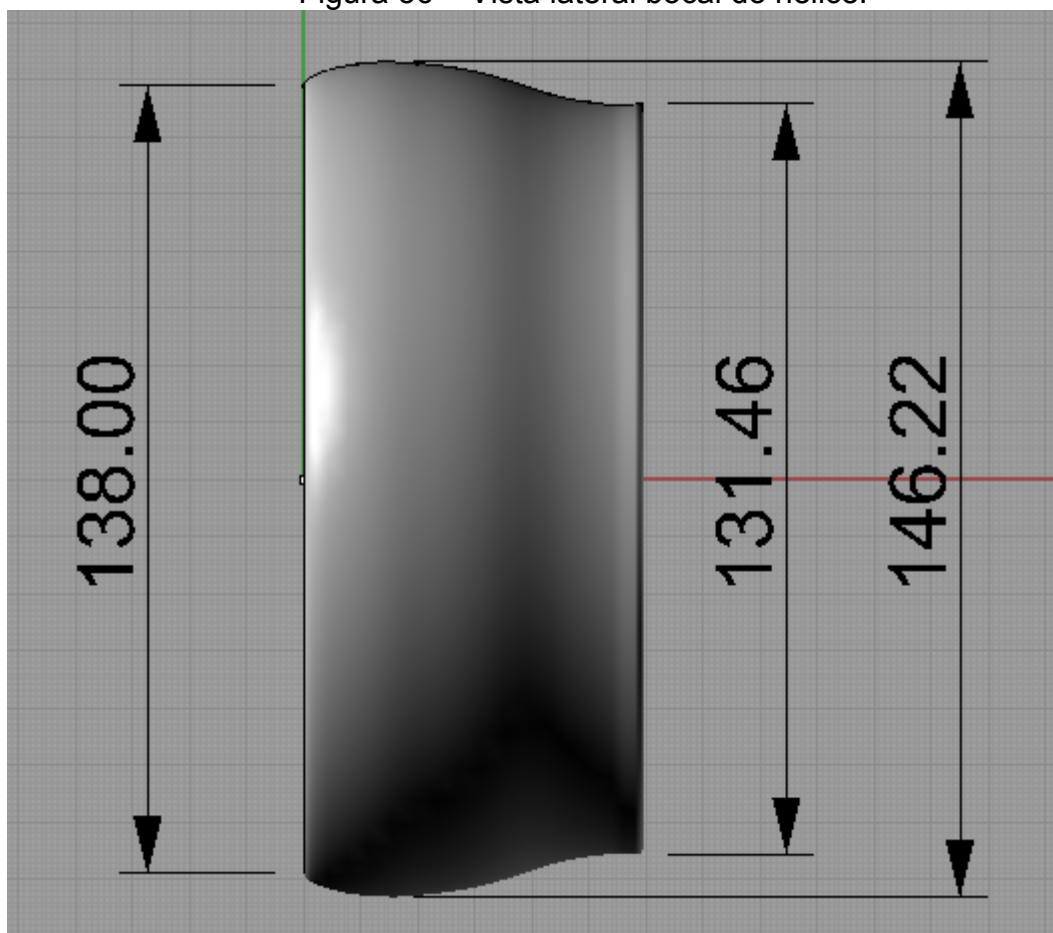
**BOCAL DO HÉLICE**

Tabela 5 - Coordenadas de pontos do perfil do bocal do hélice.

| X    | Y     | Z |
|------|-------|---|
| 0    | 69    | 0 |
| 9,5  | 72,7  | 0 |
| 20   | 72,5  | 0 |
| 27   | 71,5  | 0 |
| 35   | 70    | 0 |
| 43   | 67,5  | 0 |
| 50   | 66    | 0 |
| 54,7 | 65,5  | 0 |
| 59,4 | 65,75 | 0 |
| 0    | 69    | 0 |
| 9,5  | 62,1  | 0 |
| 20   | 60,4  | 0 |
| 27   | 60,1  | 0 |
| 35   | 60,4  | 0 |
| 43   | 60,1  | 0 |
| 50   | 60,8  | 0 |
| 54,7 | 62,2  | 0 |
| 59,4 | 63,75 | 0 |

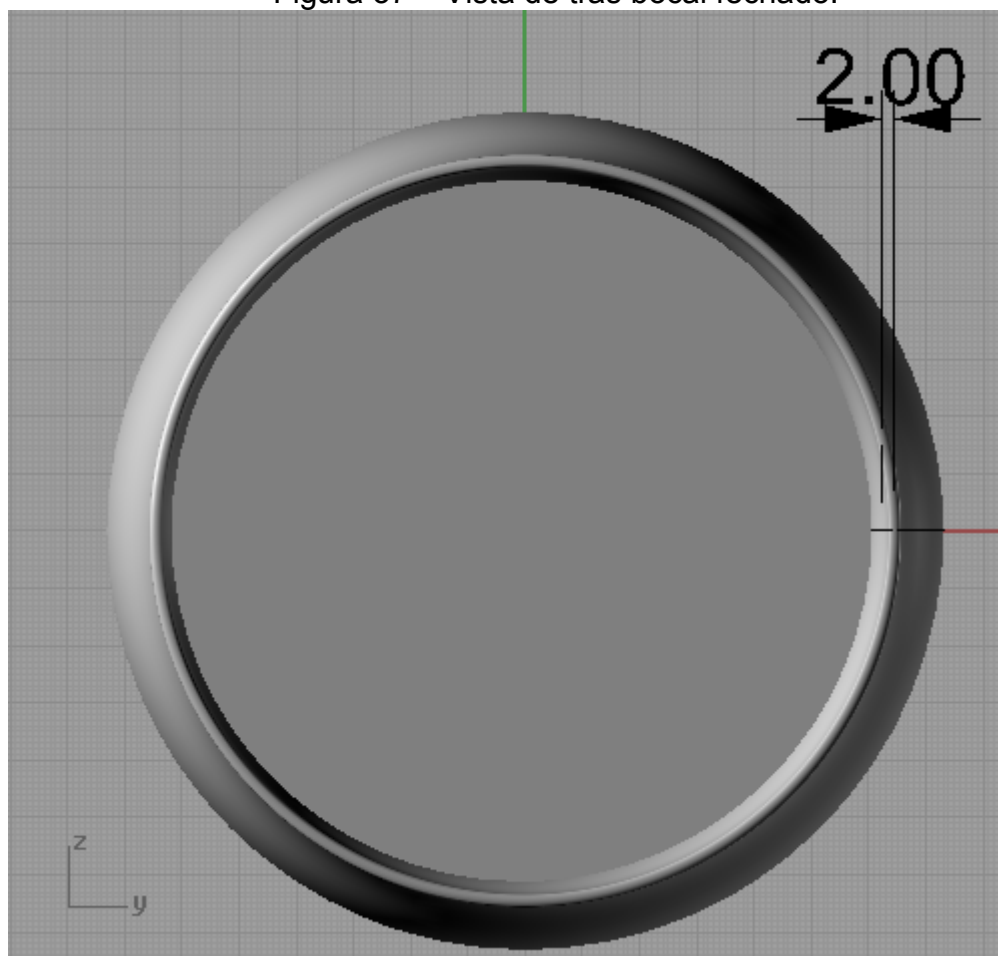
Fonte: Autor (2016).

Figura 36 – Vista lateral bocal do hélice.



Fonte: Autor (2016).

Figura 37 – Vista de trás bocal fechado.



Fonte: Autor (2016).

Espessura da borda de saída do bocal = 2 mm.