



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI - CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM

COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Tese de doutorado

**Simulações de escoamentos para análise da influência
da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de
veículos submarinos autônomos**

Apresentada por: Gustavo da Silva Costa

Orientador: Ivan C. da Cunha Lima

Dezembro de 2018

Gustavo da Silva Costa

Simulações de escoamentos para análise da influência da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI - CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Ivan C. da Cunha Lima

Centro Universitário SENAI - CIMATEC

Coorientador: André Telles da Cunha Lima

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Salvador
Centro Universitário SENAI - CIMATEC
2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

C837s Costa, Gustavo da Silva

Simulações de escoamentos para análise da influência da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos / Gustavo da Silva Costa. – Salvador, 2018.

86 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Costa da Cunha Lima.

Coorientador: Prof. Dr. André Telles da Cunha Lima.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2018.

Inclui referências.

1. CFD. 2. Turbulência – Veículos submarinos. 3. VSA. 4. Manobrabilidade. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Lima, Ivan Costa da Cunha. IV. Lima, André Telles da Cunha. V. Título.

CDD: 620.00113

Nota sobre o estilo do PPGMCTI

Esta tese de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (por solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por conceder-me o privilégio da inteligência e o convívio com essas pessoas que me fortalecem e incentivam a busca pelo conhecimento. Agradeço à minha esposa, à minha família, aos meus amigos, aos meus orientadores, aos meus colegas de grupo de pesquisa, aos meus colegas de doutorado e a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a construção deste projeto.

Agradeço ao Senai-Cimatec, ao Projeto Flatfish da BG/Shell e à Finep por dar suporte à realização do projeto e de suas etapas.

Salvador, Brasil
14 de Dezembro de 2018

Gustavo da Silva Costa

Resumo

Esta pesquisa tem por objetivo estudar, através de simulações computacionais, os efeitos da turbulência em escoamentos de fluidos sobre estruturas rígidas, particularmente, influência da esteira turbulenta na manobrabilidade e estabilidade de veículos submarinos autônomos (VSA). Utilizando a plataforma livre e customizável OpenFOAM, baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF) para solução numérica de equações diferenciais, a modelagem de escoamentos bidimensionais e tridimensionais em dutos e em "túneis de vento" em dinâmica dos fluidos aproxima as áreas da Física, Matemática e Computação, viabilizando análises numéricas de padrões de turbulência em fluxos de fluidos confinados e externos. As técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD na sigla em inglês - *Computational Fluid Dynamics*), combinadas com análises estatísticas e espectrais por Transformada de Fourier, são as principais ferramentas utilizadas e vêm se demonstrando de relevante eficácia neste objetivo, como podemos verificar na próspera literatura recente na área em questão. As contribuições para a indústria de transporte de fluidos, engenharia naval e oceânica são inúmeras e favorecem o desenvolvimento de equipamentos com maior precisão e menor custo. Uma modelagem complexa composta por discretizações espaciais por malhas de domínio computacional, modelagem matemática de escoamentos turbulentos por protocolos numéricos de resolução das equações de Navier-Stokes por MVF juntamente com modelos avançados de turbulência e ferramentas de estatística descritiva e análise espectral foi desenvolvida e aprimorada ao longo da pesquisa obtendo resultados satisfatórios e de precisão com a utilização de equipamento de computação de alta performance, indispensável em problemas desse nível de complexidade.

Palavras-chave: CFD, turbulência, VSA, manobrabilidade, estabilidade

Como citar esta Tese de doutorado : da Silva Costa, Gustavo. Simulações de escoamentos para análise da influência da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos. 2018. 85 folhas. Tese(Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) - Centro Universitário SENAI - CIMATEC. Salvador, 2018.

Abstract

This research aims to study, through computational simulations, the effects of turbulence on fluid flows on rigid structures, particularly the influence of the turbulent wake on the maneuverability and stability of autonomous underwater vehicles (AUV). Using the open source platform OpenFOAM, based on the Finite Volume Method (FVM) for the numerical solution of differential equations, the modeling of two-dimensional and three-dimensional flows in ducts and wind tunnels in fluid dynamics approximates the areas of Physics, Mathematics and Computation, enabling numerical analysis of turbulence patterns in confined and external fluid flows. Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques combined with statistical analysis and Fourier transform spectral analysis are the main tools used and have demonstrated their effectiveness in this objective, such as we can see in the thriving recent literature in the area in question. The contributions to the fluid transportation, naval and ocean engineering industries are numerous and favor the development of equipment with greater accuracy and lower cost. A complex modeling consisting of spatial discretizations by computational domain meshes, mathematical modeling of turbulent flows by numerical protocols for solving the Navier-Stokes equations by MVF together with advanced models of turbulence and tools of descriptive statistics and spectral analysis was developed and improved all over the course of the research, obtaining satisfactory and accurate results with the use of high performance computing equipment, indispensable in problems of this level of complexity.

Keywords: CFD, turbulence, AUV, manoeuvrability, stability

How to cite this Tese de doutorado : da Silva Costa, Gustavo. Simulações de escoamentos para análise da influência da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos. 2018. 85 folhas. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) - Centro Universitário SENAI - CIMATEC. Salvador, 2018.

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Alguns conceitos em Engenharia Oceânica | 4 |
| 1.2 | Estado da Arte | 5 |
| 1.3 | Forças e Torques num corpo submarino | 8 |
| 2 | Metodologia | 14 |
| 2.1 | Modelagem e Pré-Processamento | 16 |
| 2.1.1 | O Método dos Volumes Finitos | 16 |
| 2.1.2 | Meshing | 19 |
| 2.1.2.1 | Estudo de Malha para simulações 3-D | 21 |
| 2.2 | Processamento | 24 |
| 2.2.1 | Modelo de Turbulência | 25 |
| 2.2.1.1 | Validação do Modelo Numérico | 30 |
| 2.3 | Análise de dados e Pós-Processamento | 32 |
| 3 | Resultados | 35 |
| 3.1 | Simulação 2-D | 35 |
| 3.1.1 | Artigo 1 | 35 |
| 3.1.1.1 | Introdução | 35 |
| 3.2 | Simulações 3-D | 44 |
| 3.2.1 | Artigo 2 | 44 |
| 3.2.1.1 | Introdução | 44 |
| 3.2.2 | Artigo 3 | 50 |
| 3.2.2.1 | Introdução | 50 |
| 4 | Conclusão | 68 |
| | Referências | 71 |

Lista de Tabelas

- 1.1 Quadro resumo: contribuições, sugestões, indicações e inovações a partir da literatura atualizada na área. 8

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Turbulência observada no campo de velocidades do escoamento de fluido através de obstáculo. | 1 |
| 1.2 | Modelos 2-D e 3-D de VSA. | 2 |
| 1.3 | Graus de liberdade translacionais e rotacionais num veículo submarino em 3-D. | 5 |
| 1.4 | Força por unidade de área na face cinza. | 9 |
| 1.5 | Representação do tensor de estresse num sistema cartesiano. | 11 |
| 2.1 | Ilustração de domínio unidimensional com divisão de volumes de controle. Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007) | 18 |
| 2.2 | Princípio de turbulência gerada por malha inadequada observada em simulações iniciais. | 20 |
| 2.3 | Comparação de malha estruturada (blockMesh) à esquerda com não-estruturada (Hypermesh) à direita. | 20 |
| 2.4 | Exemplos de malhas em 2-D construídas no Hypermesh, destacando diferentes zonas de refinamento. | 21 |
| 2.5 | Túnel de vento e malha 3D. | 21 |
| 2.6 | Dimensões de VSA flatfish. | 22 |
| 2.7 | Detalhes em malha superficial de objeto formato 2-D tria (em vermelho), hexa 3-D em seguida do obstáculo e penta 3-D ao longo do fluido. | 23 |
| 2.8 | Estudo de malha para simulação 3-D. Comparação das séries temporais da componente U_x da velocidade. A malha adotada é representada pela série em azul. | 23 |
| 2.9 | Variação de velocidade axial (U_x) em vizinhança do ponto de separação de camada limite (S) - Comparação de modelo teórico em Tritton (2012) [cima] com obtido por simulação <i>pisoFoam</i> -LES [baixo]. | 31 |
| 2.10 | Fluxo bidimensional por obstáculo e padrões de velocidade axial média (U_x) a montante do obstáculo, sendo (a) mais distante e (d) mais próximo - comparação de modelo teórico em Tritton (2012) [cima] com simulações realizadas com <i>pisoFoam</i> -LES [baixo] onde o gráfico (à direita) ilustra as médias da velocidade U_x - a cor verde representa maior distância do obstáculo e a preta maior proximidade. | 31 |
| 2.11 | Imagens de simulações transientes para verificação inicial de validade de simulações geradas utilizando Paraview. | 33 |
| 2.12 | Filtro sobre série temporal de Coeficiente de Torque utilizando Transformada de Fourier. | 34 |

Lista de Siglas

| | |
|------------|--|
| PPGMCTI .. | Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial |
| WWW | World Wide Web |
| OpenFOAM | Open source Field Operation And Manipulation |
| VSA | Veículo Submarino Autônomo |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| 2-D | Duas dimensões |
| 3-D | Três dimensões |
| MVF | Método dos Volumes Finitos |
| m/s | Metros por segundo |
| mm | Milímetros |
| PIK | Potsdam Institute for Climate Research |
| VC | Volumes de Controle |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| LES | Large Eddy Simulation |
| RANS | Reynolds-Average Navier-Stokes |
| PISO | Pressure Implicit with Splitting of Operators |
| GB | Giga Bytes |
| RAM | Random Acces Memory |
| CAD | Computer-aided design |
| SGS | Sub-grid scale |
| Re | Número de Reynolds |

Lista de Simbolos

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| U | Magnitude da velocidade |
| \mathbf{u} | Vetor velocidade |
| D | Força de Arrasto (Drag) |
| L | Força de Sustentação (Lift) |
| T | Torque |
| ρ | Densidade |
| t | Tempo |
| \mathbf{f} | Força externa |
| ∇ | Operador Gradiente |
| p | Pressão |
| μ | Viscosidade |
| ∇^2 | Operador Laplaciano |
| ∂ | Derivada Parcial |
| C_D | Coefficiente de Drag |
| C_L | Coefficiente de Lift |
| C_T | Coefficiente de Torque |
| A | Área |
| ℓ | Comprimento |
| \mathbf{t} | Vetor de estresse |
| $\hat{\mathbf{n}}$ | Vetor normal |
| \mathbf{e}_i | Versores canônicos |
| $\boldsymbol{\sigma}$ | Tensor de estresse |
| \mathbf{e}_i | Versores canônicos |
| Co | Número de Courant |
| ϕ | Propriedade genérica |
| Γ | Coefficiente de difusão |
| S_ϕ | Força externa (Source forces) |
| Δt | Intervalo de tempo (timestep) |
| L | Escala de comprimento |
| ν | Viscosidade cinemática |
| G | Função filtro |
| τ_{ij} | Tensor |
| L_{ij}, C_{ij}, R_{ij} .. | Tensores SGS |
| k | Energia cinética |
| ε | Dissipação da energia cinética |
| δ_{ij} | Delta de Kronecker |
| $\delta(x)$ | Espessura da camada limite |
| τ_{ij} | Tensor |

Introdução

É comum na natureza que o deslocamento de fluidos em escoamentos internos ou externos se dê de maneira turbulenta, especialmente na presença de uma estrutura rígida (que chamaremos obstáculo) que funciona como um indutor de vorticidade, adicionando turbulência ao sistema, como visto na figura 1.1.

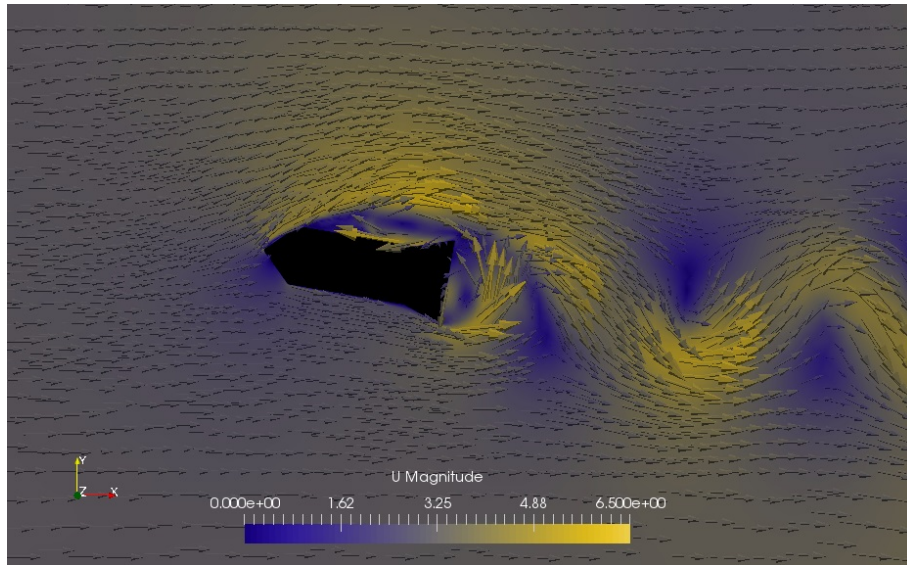


Figura 1.1: Turbulência observada no campo de velocidades do escoamento de fluido através de obstáculo.

Este trabalho de modelagem em CFD (da sigla em inglês - Dinâmica dos Fluidos Computacional) tem por objetivo representar, através de simulações, esses escoamentos turbulentos bem como permitir o cálculo das componentes físicas (velocidade, pressão, forças de arrasto e sustentação, torques) para a análise da influência da turbulência sobre os obstáculos ou até mesmo as consequências da presença destes obstáculos nas alterações do comportamento do escoamento do fluido. As definições da estrutura do modelo, bem como a escolha das ferramentas utilizadas na modelagem e seus processos constitutivos compõem, o que acredita-se ser, um protocolo inovador para simulações de escoamentos em túneis de vento para análise transiente da hidrodinâmica de veículos submarinos.

Destacamos também para esta pesquisa alguns exemplos de aplicações de modelagem em sistemas considerados complexos (por suas características associadas - compostos por muitas partes que apresentam comportamentos coletivos que não seguem um padrão entre si) (NEWMAN, 2011), tais como sistemas de matéria condensada, ecossistemas, sistemas de tráfego viário, o cérebro humano ou, em particular, escoamentos turbulentos e a análise de estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos (em 2-D e 3-D), veja

figura 1.2. “Não há uma definição universal para Sistemas Complexos”. A afirmação é de Delphine Zemp, do Potsdam Institute for Climate Research (PIK). Em certo ponto de vista, Delphine tem razão, caracterizar unicamente um sistema complexo pode ser uma tarefa complicada, mas é possível enumerar uma série de atributos comuns a esses processos ora categorizados como complexos devido a semelhanças consideráveis e padrões de comportamento similares. Como diz o engenheiro pesquisador alemão Christian Schmeltzer,

“nos sistemas complexos nós geralmente encontramos muitos princípios interagindo em diversas escalas diferentes, de modo que é impossível fazer uma descrição universal”

esses princípios, ora chamados ‘agentes’ compõem o sistema com suas características próprias, mas do grande sistema surgem atributos não destacados em suas partes - a emergência - esta pode ser considerada uma das principais propriedades verificadas num sistema dito complexo. Possuem estrutura dinâmica, evolução temporal, aleatoriedade (imprevisibilidade), universalidade, adaptabilidade, auto-organização, (NEWMAN, 2011) dentre tantas características também presentes no caso particular do escoamento turbulento de um fluido incompressível, tal qual o objeto deste trabalho. Daremos maior ênfase à análise dos atributos próprios do escoamento turbulento, mas identificando-o como um sistema complexo por inúmeras de suas propriedades constituintes.

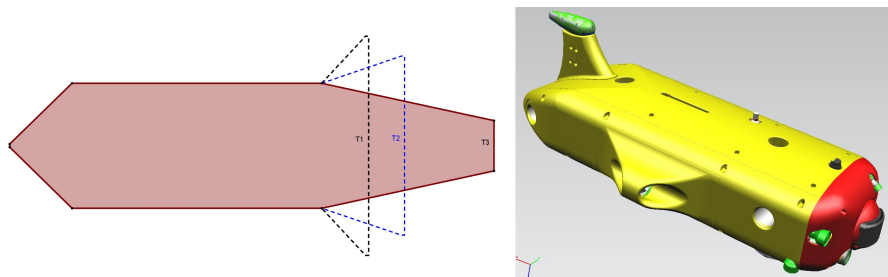


Figura 1.2: Modelos 2-D e 3-D de VSA.

Em veículos submarinos autônomos, um dos objetos deste trabalho, onde não há comando cabeado nem controle remoto, pois foi projetado para operar a grandes profundidades, o software ‘piloto’ deve ser capaz de manter uma rota preestabelecida mesmo na presença de correntes marinhas e/ou interferências originadas pelo deslocamento do fluido e do veículo. O contato dessas correntes com a superfície do VSA parado ou, principalmente, em movimento, induz a presença de vórtices, como visto em Schlichting et al. (2000) e em Pope (2001), caracterizando o regime de escoamento de fluido como turbulento. O próprio veículo funciona como obstáculo ao fluxo, sendo portanto um indutor de vorticidade no sistema (PATIL; TIWARI, 2008), além de gerar uma esteira turbulenta a jusante de suas partes protuberantes que influencia fortemente sua navegação (DACUNHALIMA et al., 2017). Submetido a um regime de escoamento turbulento, o VSA, sob a influência de vórtices, está sujeito a intensas flutuações de forças e torques agindo sobre ele, como visto em

Costa et al. (2017), o que afeta sua estabilidade e consequente manobrabilidade, comprometendo o rumo da missão. No que tange a estes termos, estabilidade e manobrabilidade, é importante trazer definições da literatura da área (CRANE CL ; EDA; LANDSBURG, 1989) que traduzem Estabilidade de Movimento (aqui usado simplesmente como Estabilidade) como a capacidade de retornar a um estado inicial de equilíbrio sem a interferência de movimentos no leme (ou do controle de navegação) quando uma força ou torque externos perturbam o movimento e Manobrabilidade como a capacidade de manter um curso pré-estabelecido assim como realizar manobras a fim de cumprir tarefas específicas, no caso específico dos submarinos, incluindo movimentos tanto horizontais quanto verticais (CRANE CL ; EDA; LANDSBURG, 1989). Em ordem de se manter um equilíbrio dinâmico do corpo rígido (neste caso, um VSA), visando a manutenção de rota predeterminada, uma resultante nula de forças e torques é fator primordial, devendo o sistema de controle autônomo contrabalancear em tempo real as componentes ativas (forças e torques) que desviam o veículo de seu rumo. O que se pretende, num cenário ideal, é que o submarino possa percorrer a rota estabelecida na missão num movimento mais retilíneo possível, evitando o aumento de sua energia cinética rotacional (com o acréscimo de velocidade angular) o que provocaria um desvio de rota (considerando o caso padrão de navegação em linha reta, sem objetivo de efetuar curvas previstas). A estabilidade de um VSA pode ser avaliada, dentre outras análises, a partir do trabalho realizado pelos seus propulsores com o objetivo de anular o efeito dos torques agindo sobre o corpo rígido, evitando assim um movimento circular que causaria um desvio. Um veículo mais estável realiza menor trabalho de ‘correção’ nos propulsores por possuir uma geometria (e consequente momento de inércia) capaz de amortecer por inércia a influência de componentes de alta frequência de torques e forças externas (causadas muitas vezes pela esteira turbulenta - (DACUNHALIMA et al., 2017)), ou mesmo por interferir no fluxo de maneira mais suave criando menores ‘áreas de sombra’ - geração de vórtices em regiões marcantes pela passagem de fluido por partes protuberantes do casco, derivando ao sistema grande incidência de torques - como vistos em Costa et al. (2017). Também em Costa et al. (2017) notamos que o sentido do torque (em relação ao sentido de guinada de curso) pode se refletir num movimento restaurador (torque restaurador), devolvendo o VSA, sem a aplicação de força pelos propulsores, à direção da rota, o que é também considerado um critério de avaliação de estabilidade. Uma outra característica da navegação de VSA que é objeto de análise desta pesquisa é a manobrabilidade, aqui definida pela capacidade do veículo de manter seu curso estabelecido ou de retornar para este sob circunstâncias adversas. Uma medida aqui utilizada para avaliar a manobrabilidade de um VSA (COSTA et al., 2017) é a quantidade de movimentos do leme por minuto, isto é, a frequência com que é necessário alterar a direção de navegação a fim de manter a rota estabelecida. Por leme aqui generalizamos os instrumentos utilizados pelo veículo, através da realização de trabalho geralmente resistivo, para mudar a direção de navegação, por exemplo, propulsores. Esta questão é ainda mais relevante em veículos autônomos. Abaixo neste texto serão descritas algumas características das componentes hidrodinâmicas de forças e torques agindo num VSA em

movimento submerso, seus graus de liberdade translacionais e rotacionais, componentes estas que são quantificadas nas simulações e interpretadas no capítulo 3. Através de simulações computacionais, esta pesquisa tem a intenção de mapear as variações de tais torques e forças hidrodinâmicas que agem ativamente sobre o VSA sob a influência de um escoamento turbulento, trazendo assim uma expectativa de avaliação de estabilidade e um mapeamento de controles de manobrabilidade.

1.1 Alguns conceitos em Engenharia Oceânica

Nesta seção apresentaremos alguns elementos introdutórios sobre Engenharia Oceânica. Não é o objetivo deste trabalho fazer um estudo em profundidade sobre esse vasto tema, mas faz-se necessário fazer aqui um recorte destacando alguns aspectos que descrevem o movimento de um veículo submarino. Um primeiro e importante destaque didático é a restrição aos movimentos de veículos totalmente submersos, pois desta maneira reduz-se a influência dos meios envolventes, restando apenas um, a água, sem a interferência de ondas nem do ar (que representaria um outro meio por apresentar em relação à água diferentes viscosidades).

A figura 1.3 mostra seis graus de liberdade no movimento de um veículo submerso: três translacionais (avanço - *surge*, deriva - *sway* e arfada - *heave*) e três rotacionais (balanço - *roll*, caturro - *pitch* e cabeceio - *yaw*). Para as simulações em 2-D são levados em consideração somente o avanço (deslocamento para frente e para trás) e a deriva (movimento lateral) como graus de liberdade translacionais admitidos e o cabeceio (giro em torno do eixo de arfada) como único grau de liberdade rotacional possível em duas dimensões. As forças (de resistência ou de deslocamento) como arrasto - *drag* (na direção da corrente) e sustentação - *lift* (perpendicular à corrente) são as componentes hidrodinâmicas para avaliação de estabilidade e manobrabilidade para o movimento de translação do veículo, e o torque (cabeceio - *yaw*) para o movimento de rotação (ainda em 2-D). Em simulações tridimensionais é ainda admitida como componente translacional de movimento ascendente/descendente uma força de *lift* na direção de arfada - *heave* (componente de *lift* que foi analisada nesta pesquisa para os casos 3-D) e os demais torques para os outros dois graus de liberdade rotacionais, *roll* e *pitch*, ambos essenciais nas análises da hidrodinâmica de VSA. As forças e torques acima citados que são objetos desta pesquisa são expressados a partir de seus coeficientes, dados pelas equações abaixo, eqs. 1.1, 1.2 e 1.3:

$$C_D = 2 \frac{D}{\rho U^2 A} \quad (1.1)$$

$$C_L = 2 \frac{L}{\rho U^2 A} \quad (1.2)$$

$$C_T = 2 \frac{T}{\rho U^2 \ell A} \quad (1.3)$$

nas quais A é a área da superfície externa do modelo, ℓ seu comprimento, U é a magnitude da velocidade, e ρ é a densidade do fluido. Os coeficientes C_D , C_L e C_T são adimensionais. As forças de arrasto (*drag*) e sustentação (*lift*) e o torque são representados, respectivamente, por D , L e T .

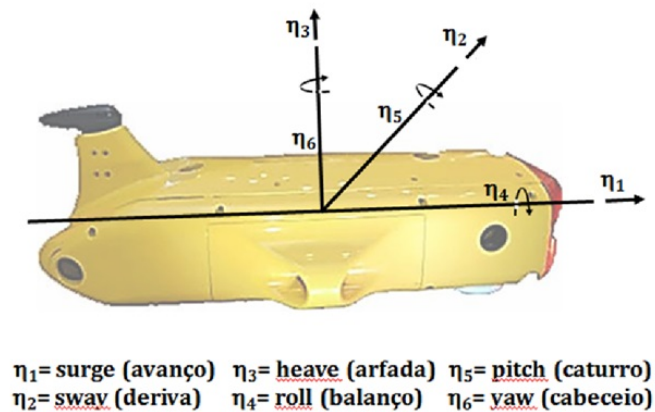


Figura 1.3: Graus de liberdade translacionais e rotacionais num veículo submarino em 3-D.

O exposto acima mostra as componentes de torques e graus de liberdade (rotacionais e translacionais) num veículo submerso em nível macroscópico. Para entender como o modelo computacional calcula essas componentes através da integração ao longo da superfície do corpo rígido, precisamos verificar como se processam microscopicamente as forças e torques hidrodinâmicos agindo num corpo submarino. A seção 1.3 nos leva a este entendimento.

1.2 Estado da Arte

Abordagens de CFD podem ser verificadas amplamente na literatura atual em vários trabalhos acadêmicos de relevância comprovada, bem como em aplicações industriais comerciais e de inovação. Verifica-se esta aplicação na análise da esteira turbulenta formada pela presença de obstáculo em escoamento em Patil e Tiwari (2008), que, através da variação do percentual de bloqueio em um duto parcialmente obstruído, estuda a formação turbulenta a jusante do obstáculo avaliando padrões de formação da esteira e *vortex shedding* (derramamento de vórtices). Este trabalho de Patil e Tiwari (2008) utiliza o Método

de Diferenças Finitas num modelo 2-D avaliando a turbulência, principalmente, a partir de instantâneos da pressão, evolução temporal da esteira, séries temporais da velocidade transversal e seu espectro de Fourier. A aplicação de uma malha estruturada simples numa modelagem desenvolvida para a solução das equações de momento não traz qualquer validação do método numérico aplicado e se apresenta mais simples por se tratar de um caso em duas dimensões. Este trabalho serviu como motivação e instrumentação inicial para as pesquisas desta tese, mas os procedimentos adotados aqui acompanharam a evolução dos métodos numéricos e foi submetido a uma validação numérica comparativa (que será detalhada na seção 2.2.1.1). O processo de construção de malha (*meshing* - detalhado na seção 2.1.2) aqui desenvolvido partiu de princípios mais elaborados e rigorosos de investigação e detalhamento adaptando-se ao Método dos Volumes Finitos, mais utilizado em processos de CFD.

É possível também encontrar aplicações desta modelagem, além de tantas outras fontes, na análise de componentes hidrodinâmicas (força de arrasto) gerada por cilindro em [Cao et al. \(2014\)](#) que utiliza aplicação de MATLAB num modelo de Elementos Finitos em equipamentos comerciais de pesca. As análises de componentes hidrodinâmicas, como a força de arrasto presente no trabalho de [Cao et al. \(2014\)](#) são utilizadas no trabalho de pesquisa que gerou esta tese tanto para análise da física em modelos simplificados como em modelos comerciais reais a partir da aplicação de modelagem robusta de CFD em plataformas livres, porém consideravelmente consistentes em seus modelos e suas possibilidades de customização de métodos - OpenFOAM em [Greenshields \(2015\)](#).

Mais especificamente, como é o objetivo desta pesquisa, as análises por CFD sobre VSA (veículos submarinos autônomos) são numerosas tais como vemos em [Dantas e Barros \(2013\)](#), [Seo, Jo e Choi \(2008\)](#), [Chakrabarti et al. \(2014\)](#), [Costa et al. \(2017\)](#), [daCunhaLima et al. \(2017\)](#), dentre tantos outros.

Em [Dantas e Barros \(2013\)](#) as ferramentas de CFD foram aplicadas para avaliar os esforços hidrodinâmicos sobre o VSA Pirajuba - em formato de torpedo - nas análises de manobrabilidade avaliada pelo controle dos efeitos de superfície e ângulo de ataque (deslizamento e deflexão). O trabalho de [Dantas e Barros \(2013\)](#) traz um estudo de caso bastante completo sobre o VSA Pirajuba, constituído por análise de malha, validação de método e testes comparativos em tanques. A modelagem numérica-computacional foi feita a partir de um modelo isotérmico, incompressível (assim como esta tese), em regime permanente a partir do fluxo médio obtido pelo modelo de turbulência de Médias de Reynolds (*RANS - Reynolds Average Navier-Stokes*) aplicando o Método dos Volumes Finitos no pacote comercial ANSYS-FLUENT. Apesar de bastante rico, o trabalho de [Dantas e Barros \(2013\)](#) não aborda a manobrabilidade dinâmica como nesta pesquisa, uma vez que utiliza o fluxo médio em regime permanente, não considera as variações transientes das componentes hidrodinâmicas analisadas, o que traria as noções de manobrabilidade

em tempo real em situações de navegação. A utilização do modelo de Médias de Reynolds, apesar de ser amplamente utilizado na área por sua extensa gama de aplicações e relativo custo computacional (reduzido quando comparado aos modelos mais precisos *LES* e *DNS*) aborda apenas o fluxo médio, deixando de lado importantes contribuições das flutuações de tensores que, a depender do tipo de aplicação, representam importância fundamental nas análises pretendidas. As restrições isotérmica e incompressível, muito comuns nas pesquisas desta área, não comprometem a qualidade dos resultados, uma vez que é possível restringir as condições de aplicação do VSA a regiões que satisfazem em bom nível a essas aproximações, especialmente se o foco da investigação é a definição de uma metodologia de análise.

Também analisando manobrabilidade de um VSA em formato de pinguim, o trabalho de [Chakrabarti et al. \(2014\)](#) aborda a questão através de resultados analíticos e experimentais. Embora o texto desta pesquisa não esteja focado na realização de experimentos, é possível extrair do trabalho de [Chakrabarti et al. \(2014\)](#) a importância observada nas características do casco (formato - *shape*) do VSA em sua habilidade de manobrar. Assim como este trabalho, [Chakrabarti et al. \(2014\)](#) também usou comparações de características hidrodinâmicas (*drag*) entre diferentes formatos de VSA ([COSTA et al., 2017](#)). Pelas características do VSA tipo pinguim como a baixa ação da força de arrasto (semelhantemente verificada aqui na geometria T3 do VSA em formato de cauda de peixe visto em [Costa et al. \(2017\)](#)) e sua difícil manobrabilidade, [Chakrabarti et al. \(2014\)](#) baseou seus esforços em mitigar esse problema através de análises da força de *lift* a partir de variações do ângulo de ataque do leme, verificando o impacto desta ação na manobrabilidade do VSA. O trabalho de [Chakrabarti et al. \(2014\)](#) trouxe diversas premissas importantes para a análise da manobrabilidade de VSA e várias destas foram implementadas ou adaptadas para esta pesquisa, inclusive com a vantagem econômica do uso de simulações como metodologia principal. Além de avaliar as componentes de *drag* e *lift*, foram implementadas aqui as análises transientes dos torques e adaptação da ideia do ângulo de ataque, o que traz, além dos benefícios econômicos das verificações computacionais, mais informações hidrodinâmicas numa mesma bateria de testes (simulações) em condições que podem ser reproduzidas ou modificadas a partir de alterações nas configurações da modelagem.

Em [Seo, Jo e Choi \(2008\)](#) foram observadas performances de um VSA do tipo *glider* (uma analogia ao termo “planador”, pois converte o movimento vertical em horizontal) a partir de simulações em variados ângulos de *pitch* numa abordagem de CFD que verifica a capacidade do veículo a partir da velocidade e do ângulo de mergulho. Esta tese levou em conta muitos dos aspectos deste artigo e, considerando as particularidades do *glider*, adaptou e estendeu as análises transientes aos três graus de liberdade rotacionais considerando ângulos *yaw* de ataque.

Análises com avançadas técnicas de CFD tais como a geração dinâmica de malhas (*dy-*

namic meshing) foram aplicadas em Wu et al. (2014) para análise de um veículo ao se aproximar da sua área de docagem, esperando obter informações sobre a influência da turbulência gerada pela estrutura da doca na estabilidade do submarino. Esta ideia além de outras tais como influência da rugosidade do casco na camada limite, variações do fundo do oceano nas correntes atuando sobre o VSA, obstáculos a montante do veículo gerando turbulência, controles avançados de manobra e acoplamento térmico ao levar em conta a variação de temperatura no contexto de navegação, foram consideradas para trabalhos futuros evoluídos a partir da modelagem desenvolvida aqui.

Tabela 1.1: Quadro resumo: contribuições, sugestões, indicações e inovações a partir da literatura atualizada na área.

| Referência | Contribuições das referências | Inovações desta tese |
|---------------------------|---|--|
| Patil e Tiwari (2008) | Método das Diferenças Finitas Malha estruturada simples Sem validação de soluções numéricas | Método dos Volumes Finitos Malha não-estruturada com variações de refinamento Validação comparativa com modelo experimental e teórico |
| Cao et al. (2014) | Método dos Elementos Finitos MATLAB (<i>software</i> comercial) Força de arrasto | Método dos Volumes Finitos OpenFOAM (<i>software</i> livre) Forças de arrasto, sustentação e torques |
| Dantas e Barros (2013) | Modelo isotérmico e incompressível ANSYS-FLUENT (<i>software</i> comercial) Modelo de turbulência <i>RANS</i> Análise hidrodinâmica em regime permanente Variações de tensores por fluxo médio | Modelo isotérmico e incompressível OpenFOAM (<i>software</i> livre) Modelo de turbulência <i>LES</i> Análise hidrodinâmica em regime transiente Séries temporais de tensores - manobrabilidade dinâmica |
| Chakrabarti et al. (2014) | Resultados analíticos e experimentais Manobrabilidade a partir do formato (<i>shape</i>) do VSA Variações de ângulo de ataque do leme Análise de arrasto e sustentação | Resultados por simulações numéricas computacionais Manobrabilidade a partir do formato (<i>shape</i>) do VSA Variações de ângulos de ataque de cabeceio Análise de arrasto e sustentação e torques |
| Seo, Jo e Choi (2008) | Análise de torque - <i>pitch</i> Variação de ângulos de caturro | Análise de torque - <i>pitch</i> , <i>yaw</i> e <i>roll</i> Variação de ângulos de cabeceio |

1.3 Forças e Torques num corpo submarino

A aplicação do modelo de simulações para estudo da estabilidade e manobrabilidade de um VSA submerso passa pela compreensão de como são decompostas e calculadas as forças e

torques agindo no corpo submarino. Após a apresentação das componentes macroscópicas necessário se faz compreender os fenômenos agindo em menor escala. O primeiro passo na compreensão microscópica da ação de forças e torques num corpo submarino é compreender o vetor de estresse, que é a força agindo num elemento de área Δa cuja normal seja $\hat{\mathbf{n}}$, por unidade de área, no limite em que $\Delta a \rightarrow 0$:

$$\mathbf{t}(\hat{\mathbf{n}}) = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{f}(\hat{\mathbf{n}})}{\Delta a}$$

Podemos observar que a força depende da posição e da orientação do elemento de área. Vamos tomar três eixos cartesianos x_1 , x_2 e x_3 , e um tetraedro como na figura 1.4:

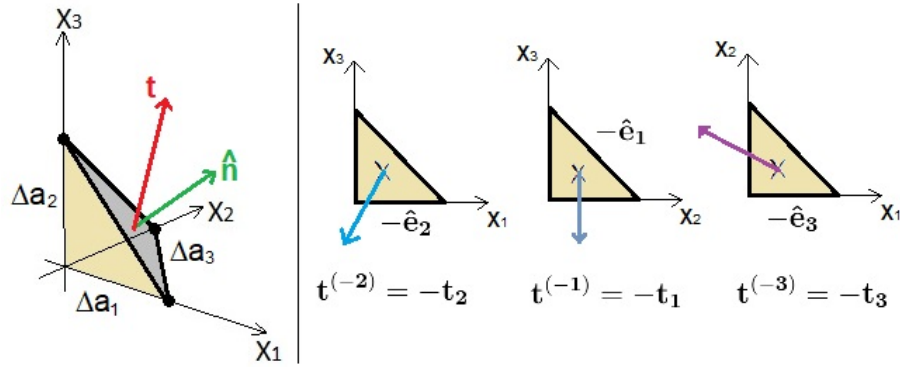


Figura 1.4: Força por unidade de área na face cinza.

Na ausência de forças de volume,

$$\mathbf{t}\Delta a - \mathbf{t}_1\Delta a_1 - \mathbf{t}_2\Delta a_2 - \mathbf{t}_3\Delta a_3 = \rho\Delta V\mathbf{a}.$$

Como a área vetorial de uma superfície fechada é nula, temos:

$$\Delta a\hat{\mathbf{n}} - \Delta a_1\hat{\mathbf{e}}_1 - \Delta a_2\hat{\mathbf{e}}_2 - \Delta a_3\hat{\mathbf{e}}_3 = 0$$

$$\Delta a\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{e}}_i - \Delta a_i\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_i = 0$$

De onde deduzimos:

$$\Delta a_i = \Delta a(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}})$$

Como o elemento de volume tetraédrico é $\Delta V = \frac{\Delta h}{3}\Delta a$, temos:

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_1(\hat{\mathbf{e}}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}}) + \mathbf{t}_2(\hat{\mathbf{e}}_2 \cdot \hat{\mathbf{n}}) + \mathbf{t}_3(\hat{\mathbf{e}}_3 \cdot \hat{\mathbf{n}}) + \rho\frac{\Delta h}{3}\mathbf{a}$$

No limite em que o tetraedro tendo a um ponto,

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_i(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}).$$

Precisamos compreender o significado de \mathbf{t}_i quando o tetraedro ‘encolhe’ até um ponto. Isto deve ser interpretado no sentido do limite em que \mathbf{t}_i significa a força por unidade de área nas faces do tetraedro definidas pelos três eixos: \mathbf{t}_i é a força por unidade de área na face cuja normal é $\hat{\mathbf{e}}_i$. Assim podemos reescrever:

$$\mathbf{t} = (\mathbf{t}_i \hat{\mathbf{e}}_i) \cdot \hat{\mathbf{n}}.$$

$(\mathbf{t}_i \hat{\mathbf{e}}_i)$ é um diádico chamado de Tensor de estresse:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{t}_1 \hat{\mathbf{e}}_1 + \mathbf{t}_2 \hat{\mathbf{e}}_2 + \mathbf{t}_3 \hat{\mathbf{e}}_3 = \mathbf{t}_j \hat{\mathbf{e}}_j \quad (1.4)$$

Assim chegamos à **Fórmula do Estresse de Cauchy**, que é:

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (1.5)$$

Podemos identificar a expressão do vetor de estresse agindo numa superfície de normal $\hat{\mathbf{n}}$ como sendo:

$$\mathbf{t}^{(\hat{\mathbf{n}})} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}}.$$

O tensor de estresse é uma propriedade do meio contínuo. Uma vez conhecidas suas componentes σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), dada uma superfície cuja normal seja $\hat{\mathbf{n}}$, usamos a fórmula de Cauchy e calculamos a força por unidade de área, \mathbf{t} . É possível também identificar a componente do vetor \mathbf{t} na direção i através das suas projeções (produto escalar):

$$t_i = \hat{\mathbf{e}}_i \cdot \mathbf{t} = \hat{\mathbf{e}}_i \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \hat{\mathbf{n}}.$$

Como o diádico pode ser representado por sua matriz σ_{ij} nos eixos x_1, x_2, x_3 ,

$$t_1 = \sigma_{11}n_1 + \sigma_{12}n_2 + \sigma_{13}n_3$$

$$t_2 = \sigma_{21}n_1 + \sigma_{22}n_2 + \sigma_{23}n_3$$

$$t_3 = \sigma_{31}n_1 + \sigma_{32}n_2 + \sigma_{33}n_3,$$

onde n_1, n_2, n_3 são os cossenos diretores, $n_i = \hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}$. Representando matricialmente:

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}.$$

Agora temos uma interpretação para os elementos de $\boldsymbol{\sigma}$: Se $n_1 = 1, n_2 = n_3 = 0$, a normal

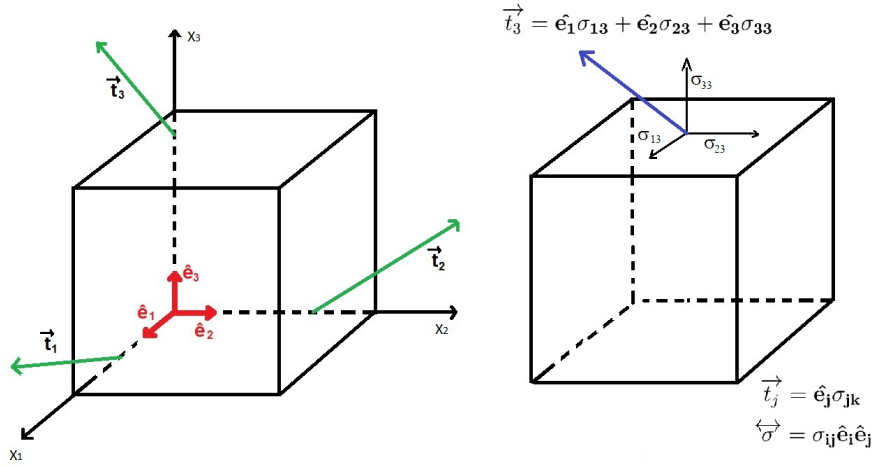


Figura 1.5: Representação do tensor de estresse num sistema cartesiano.

está na direção \hat{e}_1 e assim:

$$\begin{aligned} t_1 &= \sigma_{11} \\ t_2 &= \sigma_{21} \\ t_3 &= \sigma_{31} \end{aligned}$$

o primeiro índice de σ se refere à direção da força de superfície e o segundo à orientação da superfície (dada pela normal). Assim, a força por unidade de área agindo num elemento de superfície orientada pela normal na direção $\hat{n} \equiv \hat{e}_j$ é:

$$\mathbf{t}_j = \hat{e}_1\sigma_{1j} + \hat{e}_2\sigma_{2j} + \hat{e}_3\sigma_{3j} = \hat{e}_i\sigma_{ij}.$$

Desse modo, o tensor de estresse pode ser expresso como

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{t}_j\hat{e}_j = \sigma_{ij}\hat{e}_i\hat{e}_j.$$

Podemos observar que, sendo \hat{e}_i e \hat{e}_j dois vetores, $\boldsymbol{\sigma}$ é, de fato um tensor de *rank* 2.

Neste ponto podemos acrescentar a influência da força de superfície devido à pressão (lembrando que as componentes do tensor de estresse têm dimensão de pressão) que serão adicionados seus termos p_x , p_y e p_z (com sinal negativo) às entradas σ_{ii} da diagonal principal do tensor.

Se fizermos uma rotação dos eixos,

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

lembrando que a rotação é um operador unitário $R^{-1} = R^T$.

O próximo passo na identificação dos cálculos das componentes de forças e torques hidrodinâmicos agindo num corpo submarino é podermos representar e calcular os vetores e tensores acima num sistema qualquer de coordenadas. Para isso tomemos a equação para a rotação com os vetores unitários nas respectivas coordenadas:

$$\bar{\hat{\mathbf{e}}}_1 = R_{11}\hat{\mathbf{e}}_1 + R_{12}\hat{\mathbf{e}}_2 + R_{13}\hat{\mathbf{e}}_3,$$

de onde se vê facilmente que:

$$R_{ij} = \bar{\hat{\mathbf{e}}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j$$

$$\bar{\hat{\mathbf{e}}}_i = R_{ij}\hat{\mathbf{e}}_j.$$

O tensor de estresse no sistema rotacionado será:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij}\bar{\hat{\mathbf{e}}}_i\bar{\hat{\mathbf{e}}}_j &= \bar{\sigma}_{ij}R_{il}\hat{\mathbf{e}}_lR_{jk}\hat{\mathbf{e}}_k \\ &= \bar{\sigma}_{ij}R_{il}R_{jk}\hat{\mathbf{e}}_l\hat{\mathbf{e}}_k \\ &= \sigma_{lk}\hat{\mathbf{e}}_l\hat{\mathbf{e}}_k \end{aligned}$$

logo,

$$\sigma_{lk} = \bar{\sigma}_{ij}R_{il}R_{jk}$$

então:

$$\bar{\sigma}_{ij} = R_{il}R_{jk}\sigma_{kl}.$$

Com a matriz nas novas coordenadas, obtemos as componentes das forças nesse novo sistema de coordenadas:

$$\mathbf{t}_i = \bar{\sigma}_{ij}\bar{n}_j.$$

Nos situando mais próximas da realidade do cálculo das forças hidrodinâmicas num veículo submarino, vejamos o caso em que temos uma superfície $\delta\Omega$, um sistema de coordenadas η_1, η_2, η_3 com origem no centro de massa do corpo submerso, um elemento de superfície dS na posição $\boldsymbol{\eta}$, onde a normal $\hat{\mathbf{n}}$ e a matriz do tensor de estresse foi calculada com base num sistema de coordenadas x_1, x_2, x_3 próprio do elemento de superfície em $\boldsymbol{\eta}$. Se quisermos saber a força total agindo num corpo por causa dessas forças de superfície, temos que, para cada $\boldsymbol{\eta}$:

$$\bar{\sigma}_{ij}(\boldsymbol{\eta}) = R_{ik}(\boldsymbol{\eta})R_{jl}(\boldsymbol{\eta})\sigma_{kl}(\boldsymbol{\eta}).$$

Um protocolo possível para se calcular a força total numa superfície $\delta\Omega$ seria definir uma malha de N elementos $\Delta S_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, N$, em cada uma delas uma normal $\hat{\mathbf{n}}_\alpha$, que fariam coincidir com um sistema de eixos local tal que $\hat{\mathbf{n}}_\alpha = \hat{\mathbf{e}}_3$, deixando a escolha de um eixo, por exemplo, $\hat{\mathbf{e}}_1$, arbitrário. A força agindo nesse elemento de área seria:

$$\Delta \mathbf{f}_\alpha = (\hat{\mathbf{e}}_1\sigma_{13} + \hat{\mathbf{e}}_2\sigma_{23} + \hat{\mathbf{e}}_3\sigma_{33})\Delta S_\alpha$$

notando que, de fato,

$$\Delta \mathbf{f}_\alpha = (\hat{\mathbf{e}}_1^{(\alpha)} \sigma_{13}^{(\alpha)} + \hat{\mathbf{e}}_2^{(\alpha)} \sigma_{23}^{(\alpha)} + \hat{\mathbf{e}}_3^{(\alpha)} \sigma_{33}^{(\alpha)}) \Delta S_\alpha$$

cada uma dessas forças seria decomposta nas componentes do sistema escolhido para o corpo, $\hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3$. Assim,

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{f}_\alpha = & \{ \hat{\eta}_1 [(\hat{\eta}_1 \cdot \hat{\mathbf{e}}_1^{(\alpha)}) \sigma_{13}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_1 \cdot \hat{\mathbf{e}}_2^{(\alpha)}) \sigma_{23}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_1 \cdot \hat{\mathbf{e}}_3^{(\alpha)}) \sigma_{33}^{(\alpha)}] + \\ & + \hat{\eta}_2 [(\hat{\eta}_2 \cdot \hat{\mathbf{e}}_1^{(\alpha)}) \sigma_{13}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_2 \cdot \hat{\mathbf{e}}_2^{(\alpha)}) \sigma_{23}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_2 \cdot \hat{\mathbf{e}}_3^{(\alpha)}) \sigma_{33}^{(\alpha)}] + \\ & + \hat{\eta}_3 [(\hat{\eta}_3 \cdot \hat{\mathbf{e}}_1^{(\alpha)}) \sigma_{13}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_3 \cdot \hat{\mathbf{e}}_2^{(\alpha)}) \sigma_{23}^{(\alpha)} + (\hat{\eta}_3 \cdot \hat{\mathbf{e}}_3^{(\alpha)}) \sigma_{33}^{(\alpha)}] \} \Delta S_\alpha \end{aligned}$$

ou seja:

$$\Delta \mathbf{f}_\alpha = \hat{\eta}_i (\hat{\eta}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j^{(\alpha)}) \sigma_{j3}^{(\alpha)} \cdot \Delta S_\alpha$$

somando em toda a superfície:

$$\mathbf{F} = \sum_{\alpha=1}^N \hat{\eta}_i (\hat{\eta}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j^{(\alpha)}) \sigma_{j3}^{(\alpha)} \cdot \Delta S_\alpha. \quad (1.6)$$

Quanto ao torque, teremos que localizar a superfície ΔS_α por sua posição em relação à origem dos eixos $\hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3$, ΔS_α está determinado pelo vetor η_α . O torque causado por $\Delta \mathbf{f}_\alpha = \hat{\eta}_i (\hat{\eta}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j^{(\alpha)}) \sigma_{j3}^{(\alpha)} \cdot \Delta S_\alpha$ será:

$$\begin{aligned} \Delta \tau_k &= \epsilon_{kli} \eta_l^{(\alpha)} \Delta f_{\alpha,i} \\ &= \epsilon_{kli} \eta_l^{(\alpha)} (\hat{\eta}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j^{(\alpha)}) \sigma_{j3}^{(\alpha)} \cdot \Delta S_\alpha \end{aligned}$$

e o torque total:

$$\tau_k = \sum_{\alpha=1}^N \epsilon_{kli} \eta_l^{(\alpha)} (\hat{\eta}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j^{(\alpha)}) \sigma_{j3}^{(\alpha)} \cdot \Delta S_\alpha. \quad (1.7)$$

Até agora admitimos a superfície $\delta\Omega$ sólida. A origem do tensor de estresse pelo contato de uma superfície com um fluido viscoso newtoniano é:

$$\sigma_{ij} = \mu s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (1.8)$$

onde μ é a viscosidade, s_{ij} o tensor de deformação, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ as três componentes do vetor velocidade do fluido na superfície A_α de acordo com o sistema de coordenadas estabelecido neste elemento de superfície.

Será descrito nos capítulos posteriores a modelagem e os resultados da influência da esteira turbulenta na geração de forças e torques em veículos submarinos afetando sua estabilidade e manobrabilidade.

Metodologia

Esta pesquisa interdisciplinar tem como ênfase informações obtidas por simulações numéricas computacionais (modelagem numérica em Dinâmica dos Fluidos). Como pode ser visto em vários estudos atuais como em [Dantas e Barros \(2013\)](#), [Santos et al. \(2017\)](#), [Wu et al. \(2014\)](#), [Costa et al. \(2017\)](#), [Mansoorzadeh e Javanmard \(2014\)](#), [daCunhaLima, daCunhaLima e Almeida \(2017\)](#), a utilização de ferramentas CFD na análise hidrodinâmica, de estabilidade e manobrabilidade de VSA é uma forte recomendação e prospera em pesquisas em crescimento tanto academicamente quanto comercialmente em nível industrial.

Neste capítulo será descrito o caminho metodológico adotado para o trabalho. As etapas da modelagem, os procedimentos, as escolhas e suas justificativas, enfim, a sistemática da abordagem nas simulações e análises dos dados obtidos. Um dos desafios encontrados aqui neste trabalho interdisciplinar, com tema geral em modelagem de fluxos turbulentos, é trazer um texto de qualidade e relevância neste tema que transita entre a robustez das simulações como ferramentas das engenharias como a Mecânica e a Oceânica e a acurácia das análises numéricas associadas à Física e à Matemática. Ainda que a ênfase esteja na modelagem desses sistemas, poderá ser observada aqui alguma relativa profundidade nas descrições das ferramentas associadas a cada grande área temática, embora se trate de um trabalho interdisciplinar em modelagem computacional.

Na grande área da Dinâmica de Fluidos, mais especificamente na subárea computacional (CFD), a modelagem de escoamentos de fluidos é realizada, de maneira geral, a partir das soluções numéricas de equações diferenciais parciais, em particular para fluidos newtonianos e incompressíveis, as equações de Navier-Stokes, eq. [2.1](#), em conjunto com as equações de continuidade, eq. [2.2](#), quando são observadas as conservações de quantidade de movimento e massa do sistema, respectivamente, fato amplamente consolidado, como visto em referências tradicionais da área como [Schlichting et al. \(2000\)](#), [Pope \(2001\)](#).

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (2.2)$$

Nas equações [\(2.1\)](#) e [\(2.2\)](#), ρ representa a densidade do fluido, \mathbf{u} o vetor velocidade, p a pressão, μ a viscosidade do fluido, e \mathbf{f} a força externa ([SCHLICHTING et al., 2000](#)).

Para análise da variação de temperatura devemos incluir também as equações que representam o balanço de energia, o que não é objetivo deste trabalho. Em alguns casos de escoamentos simples, como os laminares, as equações podem até ser resolvidas analiticamente, mas, na presença de turbulência, o nível de complexidade do sistema se eleva e são necessárias aproximações por métodos numéricos para obtenção das soluções (SCHLICHTING et al., 2000; WILCOX et al., 1998; POPE, 2001; PONTES; MANGIAVACCHI, 2016; TRITTON, 2012; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A partir da determinação das variáveis \mathbf{u} e p (velocidade e pressão), poderemos avançar para os cálculos das componentes hidrodinâmicas (*drag*, *lift* e torques), usando as equações 1.1, 1.2 e 1.3, que serão utilizadas nas análises de estabilidade e manobrabilidade de VSA.

A análise de estabilidade e manobrabilidade de um veículo submarino autônomo é uma tarefa de grande importância para a engenharia oceânica. A perda deste tipo de equipamento por desvio de rota, perda de direção, dentre outros desvios associados à presença de correntes marinhas, turbulência, falta de estabilidade ou incapacidade de realizar manobras em tempo hábil é um problema recorrente e gera prejuízos de alta ordem. A operação de VSA em águas profundas, onde o telecomando e a presença humana são inviáveis ganham muito mais segurança e confiabilidade quando apoiadas numa análise de estabilidade e manobrabilidade. Quando a realização destas análises pode ser feita por simulações computacionais, reduz-se o custo das operações e ainda são gerados dados para otimização do software de controle de navegação (COSTA et al., 2017; DANTAS; BARROS, 2013; DACUNHALIMA et al., 2017; CHAKRABARTI et al., 2014; SEO; JO; CHOI, 2008). Este trabalho visa entender como se comportam a estabilidade e a manobrabilidade de VSA submetidos à corrente marinha levando em consideração a interação dos vórtices induzidos na esteira com o casco do veículo (DACUNHALIMA et al., 2017). A partir da decomposição das forças viscosas e da pressão nas direções de interesse, determinamos a série temporal das forças e torques e realizamos a análise de estabilidade e manobrabilidade (COSTA et al., 2017; DACUNHALIMA et al., 2017). Um importante aspecto a se destacar é o fato de termos realizado um filtro de frequências (realizado a partir da transformada de Fourier das séries temporais dos torques) considerando que os propulsores não respondem tão rapidamente a comandos de oscilações de alta frequência nos torques bem como esses “efeitos das componentes oscilatórias de frequências mais altas dos torques hidráulicos rotacionais são eliminados no movimento real por um processo de auto-média devido à inércia do VSA” (COSTA et al., 2017). Detalhes deste filtro serão descritos na seção 2.3.

Assim como em muitos tipos de sistemas complexos, a dinâmica de um escoamento - especialmente se turbulento - sua análise tende a ser feita através de simulações. Neste trabalho na área de modelagem computacional, a simulação numérica computacional de escoamentos turbulentos é a principal ferramenta, que aliada a fortes análises estatísticas e matemáticas, tem oferecido resultados consistentes que vêm sendo reconhecidos por especialistas mundiais na área através das publicações. A interface computacional em

utilização é o OpenFOAM, uma plataforma *open source* de resolução de equações diferenciais baseada em C++ e com grande possibilidade de recursos customizáveis. O OpenFOAM se baseia no Método dos Volumes Finitos (MVF) para a solução numérica das equações diferenciais (detalhes sobre o MVF serão apresentados na seção 2.1.1), e seu código aberto com possibilidade de customização faz deste software uma ferramenta robusta que tem se mostrado positivamente adequada na realização das simulações.

Para a utilização do MVF são necessárias discretizações do espaço (*mesh*) e do tempo (*timestep*). A construção de malhas (*meshing*) é uma tarefa altamente especializada (principalmente quando são tridimensionais) e foi realizada com o uso do software comercial Hypermesh, distribuído pela Altair (detalhes desta etapa estão descritos na seção 2.1). A depender do grau de refinamento das malhas adotadas são necessários recursos computacionais de alto desempenho como o uso de supercomputadores para processamento e pós-processamento dos dados das simulações. Nas simulações tridimensionais realizadas durante a pesquisa foi indispensável a utilização do supercomputador Yemoja, situado no SENAI-Cimatec (detalhes serão descritos na seção 2.2). Em uma fase inicial, a pesquisa se deu sobre um modelo bidimensional simplificado, a fim de se investigar em detalhes a física envolvida no problema para posterior expansão 3-D e análise da física complexa. Foram realizadas simulações de fluxo turbulento através de três modelos simplificados de VSA com geometria de “cauda de peixe” com análise de estabilidade e manobrabilidade a partir de variações do ângulo de ataque (*yaw*) - cabeceio - em relação à corrente marinha, resultados publicados em [Costa et al. \(2017\)](#).

2.1 Modelagem e Pré-Processamento

Nesta seção, destacaremos os pontos iniciais do processo de modelagem em CFD. O pré-processamento consiste nas etapas de discretizações espaciais e temporais para a consequente aplicação do método de solução numérica. O método aqui utilizado é o Método dos Volumes Finitos (MVF), que será descrito na seção 2.1.1. Em seguida, detalhes da construção das malhas computacionais são explicados na seção 2.1.2.

2.1.1 O Método dos Volumes Finitos

No estudo em Dinâmica dos Fluidos, especialmente em escoamentos turbulentos, a solução de equações diferenciais parciais complexas se torna inviável de maneira analítica, sendo necessário recorrer a métodos numéricos que tragam aproximações aceitáveis para a modelagem. O método utilizado neste trabalho é o Método dos Volumes Finitos (MVF) ([VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007](#)), que consiste basicamente na integração das equações

diferenciais do problema em um volume conhecido, geralmente utilizado em conjunto com malhas estruturadas ou não-estruturadas. Este método, como afirmam [Pontes e Mangiavacchi \(2016\)](#), é o mais utilizado quando se trata de problemas de transporte de massa, calor ou momento devido à conexão de suas equações deduzidas e adequa-se perfeitamente ao problema desta pesquisa. Apesar da sua adequação ideal para problemas da Mecânica de Meios Contínuos, o MVF também é utilizado em outras áreas e pode seguir, de acordo com [Osses \(2016\)](#), as seguintes etapas:

1. Decomposição do domínio em volumes de controle (*meshing*);
2. Formular as equações integrais de conservação para cada volume de controle;
3. Aproximar numericamente as integrais;
4. Aproximar os valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais;
5. Montar e resolver o sistema algébrico obtido.

É possível verificar abaixo no texto uma pequena ilustração da aplicação do MVF num caso particular de um problema puramente difusivo em regime permanente, aplicado à Equação de Transporte para uma propriedade genérica ϕ ([VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007](#)). Partindo da equação geral de transporte,

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi, \quad (2.3)$$

onde ρ é a densidade, t o tempo, \mathbf{u} o vetor velocidade, Γ é o coeficiente de difusão e S_ϕ uma força externa, podemos eliminar o termo convectivo (por estarmos tratando de um caso meramente difusivo) e o termo da variação temporal (por ser o regime permanente), resultando na equação:

$$\text{div}(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi = 0. \quad (2.4)$$

Supondo um domínio unidimensional (para facilidade da ilustração), toma-se uma divisão deste em volumes de controle (VC), cada subdivisão (células) com um ponto nodal em seu interior, como ilustrado na figura [2.1](#) e obtém-se a equação [2.4](#) para um domínio como descrito na forma:

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S = 0, \quad (2.5)$$

onde o termo S é a fonte antes chamada S_ϕ .

Considerando a integração da equação [2.5](#) no VC, obtemos:

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S dV = \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0, \quad (2.6)$$

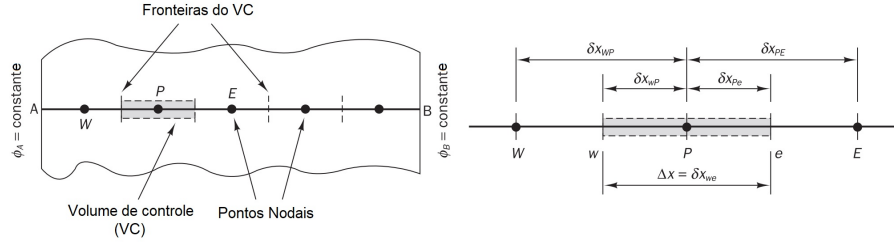


Figura 2.1: Ilustração de domínio unidimensional com divisão de volumes de controle. Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

A sendo a área da seção transversal da face do VC, ΔV o volume e \bar{S} o valor médio de S no VC. Considerando agora a forma discretizada das derivadas

$$\left(\frac{d\phi}{dx}\right)_e = \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}}\right)$$

e

$$\left(\frac{d\phi}{dx}\right)_w = \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}}\right)$$

nas fronteiras e e w , e uma aproximação linear

$$\bar{S}\Delta V = S_u + S_p\phi_P,$$

obtemos a forma algébrica e discretizada da equação 2.6:

$$\left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}}A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}}A_w - S_p\right)\phi_P = \left(\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}}A_w\right)\phi_W + \left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}}A_e\right)\phi_E + S_u \quad (2.7)$$

A generalização da equação acima para um problema convectivo-difusivo (incluindo o termo convectivo da equação 2.3) em três dimensões pode ser encontrada facilmente em Versteeg e Malalasekera (2007).

Para a incorporação dos esquemas de discretização temporal necessários nas simulações transientes há diversas possibilidades disponíveis. Para este trabalho a opção foi pelos protocolos de Gauss para gradientes, divergentes e operador Laplaciano, e pelo esquema chamado *backward time scheme* (ESI-OPENCDF, 2018) para as derivações temporais. Algumas propriedades deste esquema, tais como o fato de ser ele implícito, transiente, de segunda ordem e condicionalmente estável, favorecem sua aplicação em CFD, especialmente quando procura garantir uma solução de continuidade ao utilizar dois instantes anteriores no cálculo do instante atual, como ilustrado na equação a seguir para uma propriedade genérica ϕ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2}\phi - 2\phi^1 + \frac{1}{2}\phi^0 \right), \quad (2.8)$$

onde Δt é o *timestep* estabelecido, e os índices sobre-escritos representam valores de ϕ em instantes anteriores (0 - inicial, 1 - intermediário).

2.1.2 Meshing

Os procedimentos de *meshing*, termo que pode ser traduzido para “Construção de Malha”, compõem a etapa de discretização espacial no processo de modelagem por simulações numéricas por volumes finitos. A decomposição do domínio (um túnel de vento com obstáculo no interior, nas simulações que realizamos nesta pesquisa) em volumes de controle menores de acordo com as características geométricas e objetivos da simulação é uma tarefa de extrema importância e de alta complexidade no escopo geral da modelagem, muitas vezes sendo necessário recorrer a ferramentas especializadas de pré-processamento. A utilização do *software* Hypermesh, produzido pela empresa Altair, se fez necessária para a otimização de processamento nos casos 2-D e, especialmente nos casos 3-D, pela complexidade geométrica e enorme exigência computacional para desenvolvimento das simulações.

Antes de descrever as malhas 2-D é necessário esclarecer que o OpenFOAM, tratando-se de volumes finitos, só lida com malhas tridimensionais. As simulações 2-D são na verdade “pseudo-planas” por serem formadas por uma única célula na direção z , impossibilitando a variação de fluido e tensores na terceira dimensão, no caso z .

No processo *meshing*, a evolução das malhas se deu de maneira crescente, de acordo com os resultados obtidos primariamente com as rodadas iniciais de simulações. Para as simulações 2-D, partiu-se inicialmente de malhas estruturadas desenvolvidas na ferramenta de pré-processamento nativa do pacote OpenFOAM, o *blockMesh*. Tal ferramenta tem limitações para definições de formas geométricas e priorização de regiões alvo (células são basicamente de formato hexa). As primeiras simulações realizadas com as malhas geradas no *blockMesh* levavam um tempo muito maior de processamento (comparado aos tempos das simulações com as malhas otimizadas) e ainda apresentavam pequenas inconsistências numéricas (como turbulência gerada pela própria malha - ver figura 2.2) observadas visualmente na análise dos filmes, disto surgiu a necessidade da otimização dessas malhas utilizando uma ferramenta de *meshing* mais precisa. A utilização do Hypermesh na construção das malhas 2-D permitiu que as malhas geradas apresentassem regiões de refinamento especiais, como podem ser vistos em [Costa et al. \(2017\)](#), para objetivos específicos tais como, captação de variações de velocidade ao longo da camada limite e aumento da precisão de captação de fenômenos físicos em regiões próximas ao obstáculo para detecção de variações de torques e forças agindo sobre o corpo. As malhas otimizadas com Hypermesh não somente permitiram maior precisão na observação de fenômenos, mas também reduziram consideravelmente a duração das simulações, viabilizando maiores tempos finais de simulação e um pós-processamento mais eficiente, isto também pela

utilização de diferentes composições de formatos de células de tipos tria, penta e hexa. A figura 2.3 mostra malhas geradas pelas diferentes ferramentas e seus aspectos gerais. As diferentes abordagens possibilitadas pelo Hypermesh na concentração de células em regiões alvo ou sua dispersão em regiões de menor relevância (ajuste de refinamento) sem comprometer os resultados finais podem ser observados na figura 2.4.

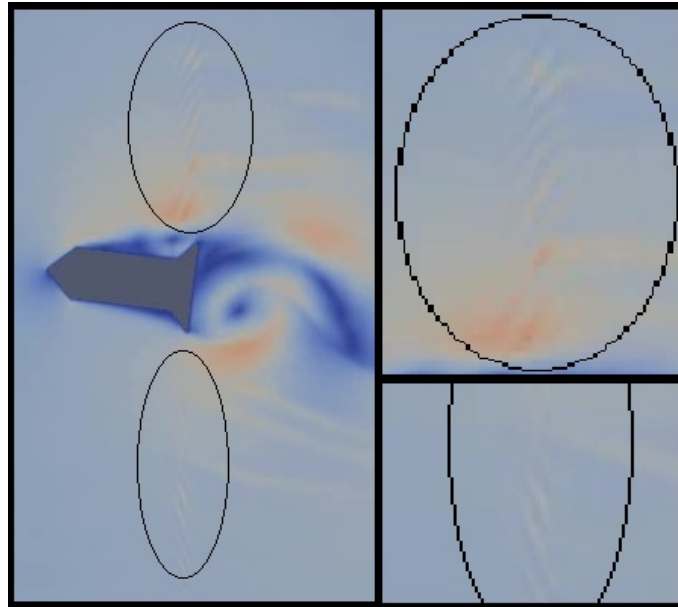


Figura 2.2: Princípio de turbulência gerada por malha inadequada observada em simulações iniciais.

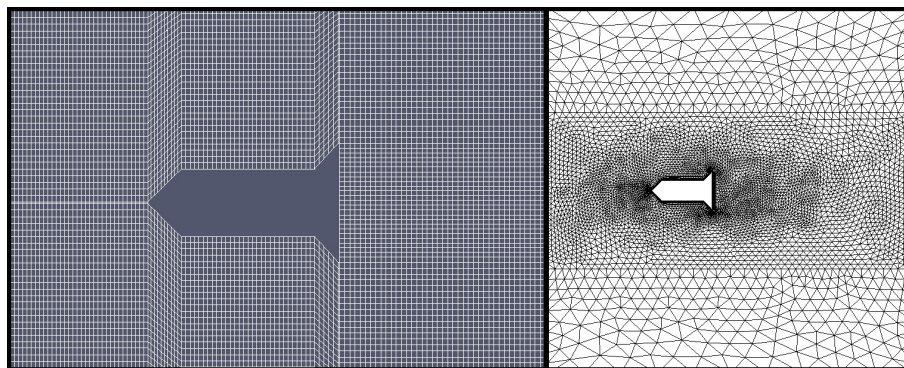


Figura 2.3: Comparação de malha estruturada (blockMesh) à esquerda com não-estruturada (Hypermesh) à direita.

O pré-processamento das simulações 3-D exige ainda mais cuidado e expertise na preparação. Nesta pesquisa tratamos de um modelo real de VSA, portanto foi necessário partir de um modelo digital do objeto (em algum formato CAD - *computer-aided design*) e sua posterior migração para o Hypermesh onde foi inserido num “túnel de vento” digital - modelo computacional que reproduz a ferramenta industrial de análise aerodinâmica/hidrodinâmica (o termo ‘vento’ é aqui utilizado para atender a praxe da literatura e da indústria, embora, nos casos simulados nesta pesquisa, o fluido que ‘preenche’ a estrutura é modelado para se assemelhar à água salgada). O túnel de vento e alguns aspectos da malha 3-D (ajuste de refinamento, geometria de células, etc.) podem ser ob-

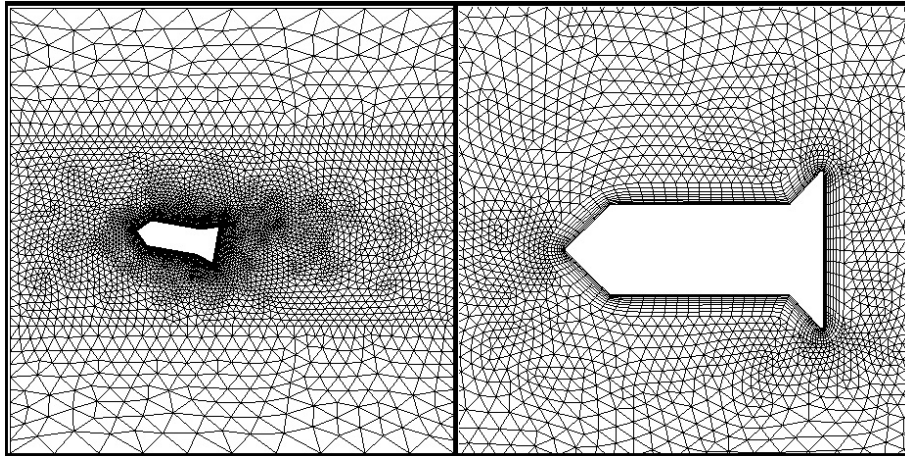


Figura 2.4: Exemplos de malhas em 2-D construídas no Hypermesh, destacando diferentes zonas de refinamento.

servados na figura 2.5. Os tipos de células priorizados nas malhas 3-D são Hexa e Penta, compondo as superfícies e os volumes da malha não-estruturada de 8.73 milhões de células geradas no Hypermesh.

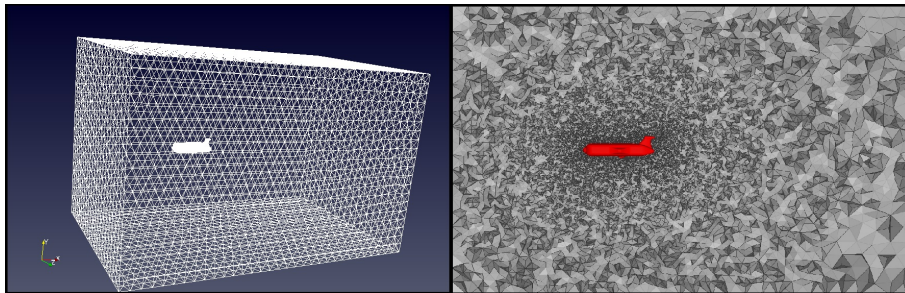


Figura 2.5: Túnel de vento e malha 3D.

2.1.2.1 Estudo de Malha para simulações 3-D

Para a definição da estrutura de discretização espacial das simulações 3-D, um estudo mais rigoroso da malha a ser utilizada fez-se necessário. Esta seção do texto traz os detalhes e resultados do desenvolvimento deste processo.

Com objetivo de obter precisão em resultados de simulações realísticas do modelo em escala 1-1 do VSA flatfish, alguns aspectos da construção da malha deveriam ser observados, tais como:

- Tamanho do túnel de vento;
- Refinamento em zonas alvo específicas;
- Tamanho inicial de células;

- Taxa de crescimento do tamanho das células.

Esses tópicos representam itens de grande importância na construção da malha, mas não esgotam as análises realizadas durante o estudo.

Tendo suas dimensões como as descritas na figura 2.6 e baseando-se nas orientações de posicionamento e tamanho de túnel adotado para estudos aerodinâmicos e hidrodinâmicos (HUCHO, 2013), estabeleceu-se um túnel de vento de dimensões $\Delta x = 16m$, $\Delta y = 10m$ and $\Delta z = 10m$. Isto situa o VSA dois comprimentos do *inlet*, cinco comprimentos do *outlet* e aproximadamente sete comprimentos de distância das laterais e das faces superior e inferior. Estes afastamentos das bordas são considerados adequados para evitar efeitos de parede, retornos e, em geral, interferências do túnel nos resultados das simulações sobre o objeto.

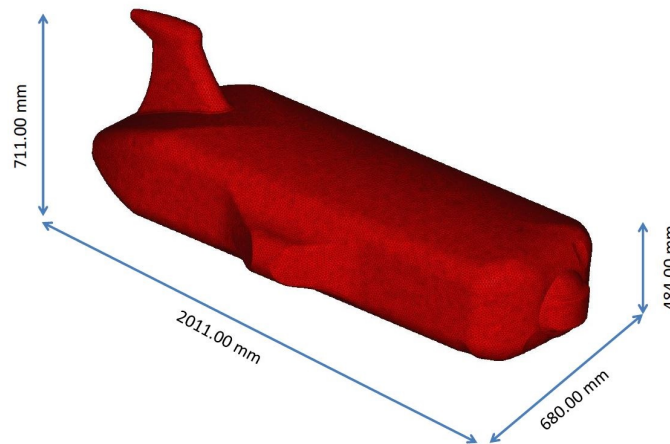


Figura 2.6: Dimensões de VSA flatfish.

Foram definidas como zonas importantes de avaliação onde o refinamento da malha seria reforçado as áreas próximas ao obstáculo (VSA), a malha superficial do próprio VSA e, especialmente, as primeiras camadas de células tridimensionais logo em seguida ao obstáculo, que receberam especificamente o tipo hexa e refinamento particularmente rigoroso a fim de captar as variações do fluxo nas proximidades da camada limite (veja figura 2.7). A figura 2.5 mostra o túnel de vento que representa o domínio computacional e o aspecto da malha 3-D no interior do domínio onde se percebe a concentração de células próximo ao objeto e o crescimento desses elementos em direção às paredes do túnel (afrouxamento do refinamento para fins de otimização de tempo computacional).

Observados como um conjunto, os aspectos de tamanho inicial de células e sua taxa de crescimento, acrescidos de um fator limitante de tamanho de células (que foi observado durante a construção da malha como necessário acrescentar a fim de criar malhas mais homogêneas), resultam na quantidade total de elementos da malha, parâmetro que foi usado como referência para as malhas apresentadas no estudo. A taxa de crescimento

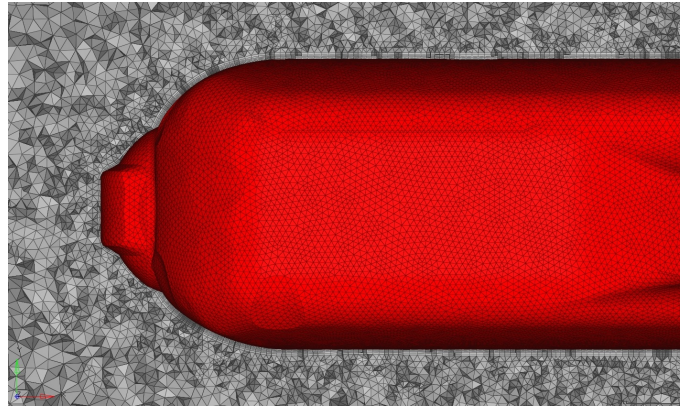


Figura 2.7: Detalhes em malha superficial de objeto formato 2-D tria (em vermelho), hexa 3-D em seguida do obstáculo e penta 3-D ao longo do fluido.

identificada como ideal foi de 1, 2, ou seja, 20%, partindo de células de aproximadamente $8mm$, $10mm$ e $12mm$ chegou-se a três malhas de tamanhos 5,54, 8,73 e 9,36 milhões de células, respectivamente associados aos tamanhos iniciais anteriores. A figura 2.8 mostra a comparação das séries temporais da componente U_x da velocidade para as três malhas estudadas. Esse critério de avaliação das malhas foi adotado por se tratar, particularmente, de simulações transientes e as variações e flutuações da velocidade referentes à malha intermediária (8,73 milhões de elementos) se mostraram deveras semelhantes à malha mais rigorosa (9,36 milhões de elementos) enquanto preservaram a estabilidade numérica da simulação. A adoção da malha intermediária ainda representou significativa economia de tempo computacional, uma vez que a malha mais refinada consumiu tempo de uso de máquina aproximadamente 80% superior.

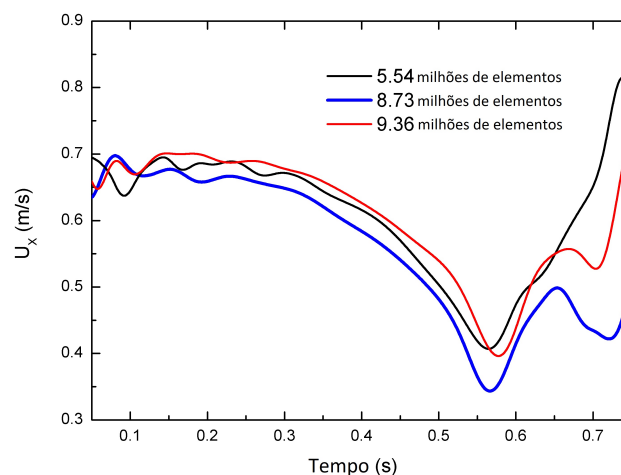


Figura 2.8: Estudo de malha para simulação 3-D. Comparação das séries temporais da componente U_x da velocidade. A malha adotada é representada pela série em azul.

2.2 *Processamento*

Na etapa de *Processamento* nos deparamos com os processos de resolução das equações diferenciais parciais de governo do sistema. Descreveremos aqui as ferramentas computacionais aplicadas à solução das equações de Navier-Stokes, eq. 2.1, e de Continuidade, eq. 2.2 associadas à ferramenta OpenFOAM. Além destas equações, através das quais determinamos as principais variáveis de estado do sistema (velocidade \mathbf{u} e pressão p), o pacote OpenFOAM nos permite criar ferramentas que, através do processo descrito na seção 1.1 e usando as variáveis de estado acima citadas, possam calcular as componentes de forças e torques hidrodinâmicos associados aos corpos submarinos objetos do trabalho utilizando as já mencionadas equações 1.1, 1.2 e 1.3.

A priori devemos destacar o tipo global de fluxo escolhido para a modelagem: o regime transiente. Esta escolha tem importante impacto sobre as próximas decisões tomadas, bem como, escolha/customização de *solver*, definição de *timestep*, refinamento de malha, estratégia de pós-processamento (que será descrita na seção 2.3), dentre outras.

A partir da definição do regime de escoamento turbulento, transiente e incompressível, o direcionamento se dá para um *solver* de natureza como tal. Por se tratar de um regime de escoamento comum na natureza, a plataforma OpenFOAM dispõe de alguns pacotes que atendem a essas características de fluxos e, para os casos que estudamos nesta pesquisa, o *solver pisoFoam* se encaixa perfeitamente (GREENSHIELDS, 2015). A partir do protocolo *PISO* (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators* da sigla em inglês) que é uma ferramenta computacional eficiente para a resolução das equações de Navier-Stokes em regimes não-estacionários. Como visto em Gschaider (2017), o algoritmo PISO pode ser resumido da seguinte forma:

1. Defina as condições de contorno;
2. Resolva a equação de momento discretizada para calcular um campo de velocidade intermediário;
3. Calcule os fluxos de massa nas faces das células;
4. Resolva a equação de pressão;
5. Corrija os fluxos de massa nas faces da célula;
6. Corrija as velocidades com base no novo campo de pressão;
7. Atualize as condições de contorno;
8. Repita a partir de 3 para o número prescrito de vezes;
9. Aumente o intervalo de tempo e repita de 1.

Além do algoritmo PISO, as condições para a aplicação do *pisoFoam* incluem o estabelecimento de um *timestep* (Δt) capaz de manter a estabilidade da simulação (como em todo método numérico) através do controle do Número de Courant, dado pela equação 2.9, ajustando também a partir do grau de refinamento da malha, ilustrado na equação por Δx :

$$Co = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x}. \quad (2.9)$$

U é a magnitude da velocidade.

Aliada à aplicação do *solver* , a resolução das equações de Navier-Stokes em regimes turbulentos exige um conjunto de aproximações chamado de Modelo de Turbulência, que possibilita uma redução do custo computacional da aplicação do método. Dentre os principais modelos de turbulência destacam-se o RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), o LES (*Large Eddy Simulations*) e o DNS (*Direct Numerical Simulations*) das siglas em inglês. A subseção abaixo descreverá a escolha do modelo adotado bem como suas principais diferenças para os demais modelos.

2.2.1 Modelo de Turbulência

A relação entre as forças inerciais e viscosas num fluxo de um fluido immortalizada por Osborne Reynolds traz uma caracterização do regime do escoamento (laminar, transitório e turbulento) por um intervalo de valores de referência do chamado Número de Reynolds, $Re = \frac{UL}{\nu}$ (onde U representa a magnitude da velocidade, L uma escala representativa de comprimento e ν a viscosidade cinemática), além disso, dois escoamentos são ditos similares se possuem o mesmo Re (SCHLICHTING et al., 2000). Os escoamentos da faixa de regime turbulento, que interessam primordialmente esta pesquisa, apresentam uma característica de flutuações aleatórias e caóticas em torno da média e, como são abundantes em ocorrências e aplicações, possuem grande interesse para pesquisa acadêmica, engenharia e indústria (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Alguns modelos mais simples de escoamentos (laminares, de regime permanente, por exemplo) são passíveis de solução analítica em alguns casos, o que se torna inviável com o acréscimo da turbulência. Na aplicação de métodos numéricos para a solução das Equações de Navier-Stokes, Eq. 2.1, em conjunto com a Equação de Continuidade, Eq. 2.2, o ideal seria poder aplicar uma malha extremamente refinada, capaz de captar o máximo possível de escalas de comprimento e os efeitos no fluxo dos vórtices (*eddies*) de diversas escalas. Para isso, uma reduzida escala temporal (*timestep*) também seria necessária, a fim de representar os fenômenos de transferência de energia e dissipação que ocorrem nesse nível

de representação temporal e espacial. Esta solução direta do escoamento por um método numérico é chamada de Simulação Numérica Direta (*DNS* da sigla em inglês) e exige um esforço computacional imenso em velocidade e tempo de processamento, bem como enorme capacidade de armazenamento de dados, especialmente em domínios de geometria complexa (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Na impossibilidade de se resolver as equações de governo por *DNS*, dois caminhos podem ser adotados como alternativas, os chamados Modelos de Turbulência. As aproximações das soluções do fluxo podem ser realizadas a partir de diferentes abordagens: por média temporal (chamadas Médias de Reynolds) do fluxo ou por destacamento de vórtices por escalas de comprimento. Por tratar-se de uma pesquisa sobre análise de séries temporais (incluindo média e flutuação) de forças e torques hidrodinâmicos, a aproximação de soluções pelo fluxo médio (temporal), o chamado Modelo *RANS* (*Reynolds Average Navier-Stokes*- Médias de Reynolds e Navier-Stokes), muito utilizado em processos de engenharia, não foi considerado adequado para este trabalho. O modelo de turbulência aqui adotado foi o *LES* (*Large Eddy Simulations* - Simulação de Grandes Vórtices), que é passível de aplicação com o MVF e que será detalhado em seguida.

O primeiro passo na compreensão do modelo *LES* de turbulência passa pelo entendimento do processo de filtragem. Uma função de filtro espacial G é executada sobre as variáveis envolvidas no problema, neste caso, a velocidade \mathbf{u} e pressão p . Há diversas possibilidades de filtros espaciais a serem aplicados na modelagem *LES* e aqui foi aplicada a mais utilizada das opções, o chamado *Top-Hat* ou *Box filter* (também chamado filtro de caixa de média ou de raiz cúbica volumétrica - *CubeRootVol*), definido pela expressão:

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3}, & \text{se } |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0, & \text{se } |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| > \frac{\Delta}{2}, \end{cases}$$

onde \mathbf{x} e \mathbf{x}' são vetores posição no domínio e Δ é a banda de corte do filtro (largura). Para uma variável genérica ϕ , será denotada como ‘filtrada’ (após a aplicação da função filtro) com uma barra superior, semelhante à notação de média temporal:

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) \phi(\mathbf{x}', t) dx' dy' dz',$$

sendo que, para a função *Top-Hat*, o valor da largura de corte é dado por $\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$ (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; WILCOX et al., 1998).

Esta operação de filtragem restringe os valores da função ϕ à sua média espacial $\bar{\phi}$ para uma região próxima (vizinhança definida pelo corte Δ) ao ponto \mathbf{x} . Na aplicação do MVF, a definição da malha (*Meshing*) do domínio computacional estabelece naturalmente um filtro espacial associado à estrutura de células que compõem o grid. Isto é chamado de filtragem implícita, e é como é executada no OpenFOAM a partir do refinamento da malha. Esse processo de separação de vórtices em grandes escalas (calculados diretamente)

e pequenas escalas (modeladas) reduz consideravelmente o custo computacional do método comparado ao *DNS*. Este procedimento é adequado na medida em que entende-se que menores escalas de turbulência são mais homogêneas e isotrópicas, portanto mais passíveis de modelagem (JASAK, 1996). À medida em que se refina a malha, o número de escalas que requer modelagem diminui e o *LES* se aproxima do *DNS*.

Assumindo um fluido incompressível (densidade não variável) para os casos aqui estudados e aplicando a operação de filtragem (*Top-Hat*) sobre as equações de conservação (Continuidade e Navier-Stokes), obtemos as equações filtradas de conservação - observa-se que não haverá variação temporal da densidade ρ e que os termos fonte referentes às forças externas também serão nulos - assim obtemos:

$$\text{div}(\rho\bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{u})) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{v})) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{w})), \quad (2.13)$$

sendo $\mathbf{u} = (u, v, w)$ o vetor velocidade.

É possível notar nas equações acima que a operação de filtragem trouxe para as equações de conservação de momento (Eqs. 2.11, 2.12 e 2.13) um termo desconhecido $\text{div}(\rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{u}})$, sendo u_i a componente do vetor velocidade, já que a operação filtro espacial é linear, mas não separa o produto. Faz-se necessária a utilização de um artifício algébrico simples sobre o termo convectivo para forçar o aparecimento da expressão calculável $\text{div}(\rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{u}})$. Escrevendo

$$\text{div}(\rho\bar{\phi}\bar{\mathbf{u}}) = \text{div}(\rho\bar{\phi}\bar{\mathbf{u}}) + (\text{div}(\rho\bar{\phi}\bar{\mathbf{u}}) - \text{div}(\rho\bar{\phi}\bar{\mathbf{u}})), \quad (2.14)$$

reescrevemos as equações de conservação de momento, obtendo as equações de conservação de momento para o *LES*:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{u})) - (\text{div}(\rho\bar{u}\bar{\mathbf{u}}) - \text{div}(\rho\bar{u}\bar{\mathbf{u}})) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{v})) - (\text{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}}) - \text{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}})) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\text{div}(\nabla(\bar{w})) - (\text{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}) - \text{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}})) \quad (2.17)$$

Para a definição da modelagem a ser aplicada sobre os termos à direita das equações de conservação de momento do *LES*, é necessário realizar a decomposição da propriedade ϕ em duas partes: uma filtrada (média espacial) e a outra não calculada, oriunda de escalas menores, chamadas escalas de sub-grid ou SGS (*sub-grid scale*):

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \bar{\phi}(\mathbf{x}, t) + \phi'(\mathbf{x}, t) \quad (2.18)$$

Aplicando a decomposição da equação 2.18 na equação 2.14, podemos identificar o tensor SGS, τ_{ij} , como:

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad (2.19)$$

e é fácil verificar (veja em [Versteeg e Malalasekera \(2007\)](#)) que:

$$\overline{u_i u_j} = \bar{u}_i \bar{u}_j + L_{ij} + C_{ij} + R_{ij}, \quad (2.20)$$

representados em notação de Einstein, onde:

$$\left. \begin{aligned} L_{ij} &= \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \\ C_{ij} &= \overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{\bar{u}_j u'_i} \\ R_{ij} &= \overline{u'_i u'_j} \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Os termos L_{ij} , C_{ij} e R_{ij} são chamados, respectivamente, de Tensor de Leonard, Tensor cruzado e Tensor *LES* de Reynolds. Dentre os três tensores acima, o de Leonard (L_{ij}) é o único calculado, os demais serão modelados devido à presença de componentes em SGS, eliminados na segunda filtragem (decomposição) ([WILCOX et al., 1998](#)).

Para a modelagem dos tensores SGS há várias possibilidades. Será brevemente descrita aqui a abordagem adotada nas simulações realizadas: o modelo SGS dinâmico denotado por *dynamicKEqn*, proposto por Kim e Menon ([KIM; MENON, 1995](#)), que representa um modelo dinâmico de equação única baseado no conceito de viscosidade turbulenta (ν_T) em escala de sub-grid com utilização da energia cinética de sub-grid, $k_{sgs} = \frac{1}{2}(\overline{u_i u_i} - \bar{u}_i \bar{u}_i)$. Este modelo traz uma vantagem significativa comparado a modelos clássicos como o de Smagorinsky-Lilly e o modelo dinâmico de Germano (que também são baseados em ν_T) evitando o parâmetro algébrico independente do tempo de Smagorinsky cujo pressuposto é um equilíbrio local entre a produção de energia e a taxa de dissipação da SGS, que inevitavelmente negligencia os efeitos não-locais da turbulência ([ZOUNTOURIDIS, 2017](#)).

O modelo *dynamicKEqn* utiliza ajustes dos coeficientes de viscosidade turbulenta e dissipação de maneira dinâmica como funções do tempo e posição, melhorando a aproximação local do coeficiente e levando em conta características físicas do problema tais como convecção, produção e dissipação da energia cinética de sub-grid. Essa abordagem presume

uma escala entre as escalas resolvidas e a SGS, denotaremos por $\bar{\Delta}$, que é usualmente chamada de segunda filtragem ou filtragem teste, com largura de corte igual ou superior ao corte do filtro da malha, usualmente o dobro ($\bar{\Delta} = 2\Delta$). Assim como no modelo de Smagorinsky, o modelo baseado em viscosidade turbulenta ν_T , que é modelada pela equação:

$$\nu_T = C_\nu \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (2.22)$$

utiliza como base uma k -equação de transporte da energia cinética de sub-grid, a Eq. 2.24, para determinação do coeficiente (C_ν), usando a aproximação da viscosidade turbulenta (como sugerido pelo nome). Este modelo adota para os tensores SGS para antes do filtro teste a expressão:

$$\tau_{ij} = -2\nu_T \bar{S}_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} k_{sgs}, \quad (2.23)$$

onde

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

A distribuição de k_{sgs} é obtida a partir da equação de transporte para a energia cinética, dada por

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_T \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) \quad (2.24)$$

Um novo parâmetro a ser modelado surge da equação 2.24, a taxa de dissipação da energia cinética de sub-grid ε . Uma análise dimensional revela que ε está associada a escalas de comprimento e velocidade modeladas pela expressão:

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k_{sgs}^{\frac{3}{2}}}{\Delta},$$

onde C_ε é a outra constante do modelo.

As energias cinéticas turbulentas no nível de filtro de teste e no nível da malha são relacionadas pelo traço do termo de Leonard, de modo que outra equação de transporte para K (pós filtro teste) não é necessária:

$$K = \bar{k}_{sgs} + \frac{1}{2} L_{ii}.$$

Para a modelagem do C_ν é usada a expressão:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} = 2C_\nu M_{ij}, \quad (2.25)$$

com

$$M_{ij} = - \left(\bar{\Delta} \sqrt{K} \bar{S}_{ij} - (\Delta \sqrt{k_{sgs}} S_{ij}) \right),$$

e o C_ν é determinado pelo Método dos Mínimos Quadrados a partir da expressão:

$$C_\nu = \frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}}.$$

Um procedimento análogo é adotado para o coeficiente de dissipação C_ε , através da razão entre a diferença entre a taxa ε de dissipação em escalas resolvíveis e em escala de filtro de teste como descrito na equação:

$$C_\varepsilon = \nu \frac{\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)}{\left(\frac{K^{\frac{3}{2}}}{\Delta} - \left(\frac{k_{sgs}^{\frac{3}{2}}}{\Delta} \right) \right)}. \quad (2.26)$$

Observa-se que a equação 2.26 é escalar em uma variável, sendo possível a determinação de C_ε sem o Método dos Mínimos Quadrados, como definem [Kim e Menon \(1995\)](#).

2.2.1.1 Validação do Modelo Numérico

Um questionamento que surge naturalmente é: como garantir a validade das soluções obtidas por tal modelagem *pisoFoam-LES*?

Para responder a isto, conduzimos uma simulação em uma seção de um duto parcialmente obstruído com um refinamento rigoroso de uma malha estruturada (partindo de um retângulo de dimensões $\Delta x = 5mm$ e $\Delta y = 0,05mm$ com crescimento na direção y até $1mm$ na borda do obstáculo) a fim de mapear as variações dos padrões de velocidade da Camada Limite nas proximidades do obstáculo, como identificado na literatura em [Tritton \(2012\)](#). Para uma estimativa da espessura da Camada Limite (a fim de determinarmos o refinamento da malha na direção y) utilizamos a solução de Blasius ([SCHLICHTING et al., 2000](#)) dada por

$$\delta(x) \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U}}, \quad (2.27)$$

sendo $\delta(x)$ é a altura da Camada Limite à distância x do *inlet*, ν a viscosidade cinemática e U a magnitude da velocidade. Obtem-se desta forma um valor por volta de $10mm$ para a altura da camada, o que nos dá uma grande quantidade de células (aproximadamente 200) para identificação da variação da velocidade.

A dependência da velocidade axial (Ux) média com a distância da parede é comparada com o comportamento teórico universal, identificado em [Tritton \(2012\)](#). Foram marcados

duzentos pontos de controle distribuídos verticalmente (y) em cinco diferentes posições a montante de um obstáculo (indutor de vorticidade) de onde foram extraídos os valores da componente axial (U_x) da velocidade, e os resultados comparados com semelhantes experimentos realizados e identificados em Tritton (2012), veja figuras 2.9 e 2.10. Os experimentos representam um fluxo bidimensional turbulento por um canal retangular passando por um obstáculo quadrado, de onde foram observados comportamentos da velocidade e da Camada Limite. A simulação realizada com o *solver pisoFoam* e modelo LES de turbulência, configurados da mesma forma para as simulações transientes 2-D e 3-D dos submarinos, identificou padrões de variação da velocidade ao longo da Camada Limite (daí o refinamento muito rigoroso a fim de captar pequenas variações de subcamadas) e foi capaz de reproduzir, em semelhantes condições, o modelo (teórico e experimental) proposto em Tritton (2012). As figuras 2.9 e 2.10 mostram comparativos dos resultados teóricos/experimentais com os obtidos pelas simulações *pisoFoam*-LES.

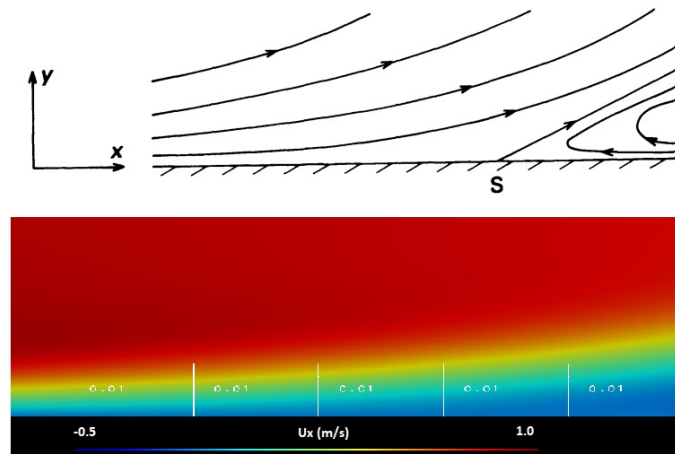


Figura 2.9: Variação de velocidade axial (U_x) em vizinhança do ponto de separação de camada limite (S) - Comparação de modelo teórico em Tritton (2012) [cima] com obtido por simulação *pisoFoam*-LES [baixo].

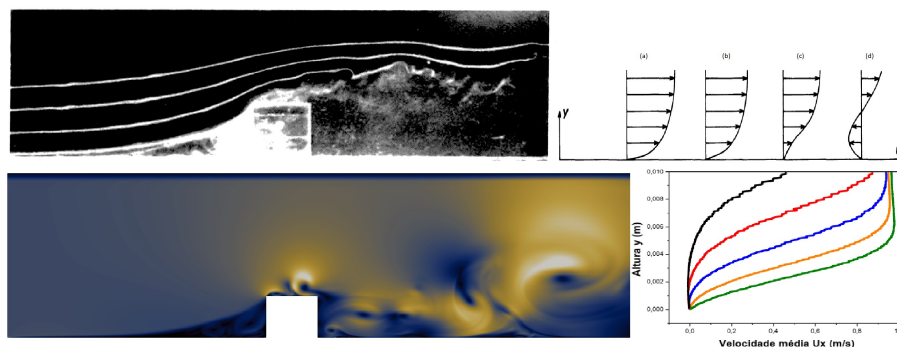


Figura 2.10: Fluxo bidimensional por obstáculo e padrões de velocidade axial média (U_x) a montante do obstáculo, sendo (a) mais distante e (d) mais próximo - comparação de modelo teórico em Tritton (2012) [cima] com simulações realizadas com *pisoFoam*-LES [baixo] onde o gráfico (à direita) ilustra as médias da velocidade U_x - a cor verde representa maior distância do obstáculo e a preta maior proximidade.

Verificamos na figura 2.9 a semelhança entre os padrões de velocidade encontrados nos

experimentos em Tritton (2012) e nas simulações aqui realizadas para as divisões da Camada Limite. O decréscimo da velocidade axial Ux quando o fluxo se aproxima da parede inferior do duto bem como do obstáculo, chegando mesmo a inverter o sentido do fluxo identificando valores negativos de Ux , é identificado em ambos os casos estudados (experimento e simulação) com uma inversão do gradiente de pressão e surgimento de uma ‘zona de retorno’, que também pode ser observada na figura 2.10, ilustrado pelo aparecimento de pequenos vórtices a montante do obstáculo. Os gráficos da figura 2.10, exibem claramente o comportamento de Ux como descrito acima, com tendência de inversão do fluxo nas proximidades anteriores do obstáculo.

De acordo com o alto nível de fidelidade obtido na comparação dos resultados das simulações com um modelo consolidado, foi possível validar a modelagem *pisoFoam-LES* na solução das equações de Navier-Stokes para fluxos turbulentos em regime transiente e assumir um ótimo nível de acurácia nos valores obtidos, trazendo segurança às demais simulações realizadas com o mesmo modelo.

2.3 Análise de dados e Pós-Processamento

Numa pesquisa baseada em simulações numéricas como esta, as ferramentas e procedimentos utilizados após o processamento representam importante parte do pacote metodológico global. A análise e o tratamento dos dados brutos obtidos através de ferramentas estatísticas, visualizadores específicos de simulações por fotos e filmes, planilhas geradoras de gráficos e tabelas constituem o conjunto de tarefas que chamamos de pós-processamento.

Como parte do pacote OpenFOAM, desenvolvida pela empresa Kitware, a ferramenta de pós-processamento Paraview foi utilizada, em primeira instância, para dar uma validação inicial às simulações. A geração de filmes e imagens dos fluxos transientes (veja figura 2.11) são necessários para que se tenha uma visão do comportamento dinâmico do comportamento do fluido em escoamento bem como para detecção de possíveis falhas ou inconsistências na simulação geradas pelo método numérico utilizado ou por instabilidades computacionais.

Passada essa etapa inicial de verificação, parte-se para análises estatísticas sobre os dados. Embora uma ampla gama de frequências se manifeste na esteira turbulenta num regime de fluxo transiente através de um obstáculo, a natureza constante das correntes (*vortex shedding*) longe (a jusante) do veículo garante a suposição da hipótese ergódica (TENNEKES et al., 1972). Ainda para garantir a ergodicidade, um grande número de iterações no processo numérico foi considerado antes que o fluxo turbulento fosse considerado “estável”, isto é, que a turbulência tenha atingido um estágio maduro, estatisticamente estacionário,

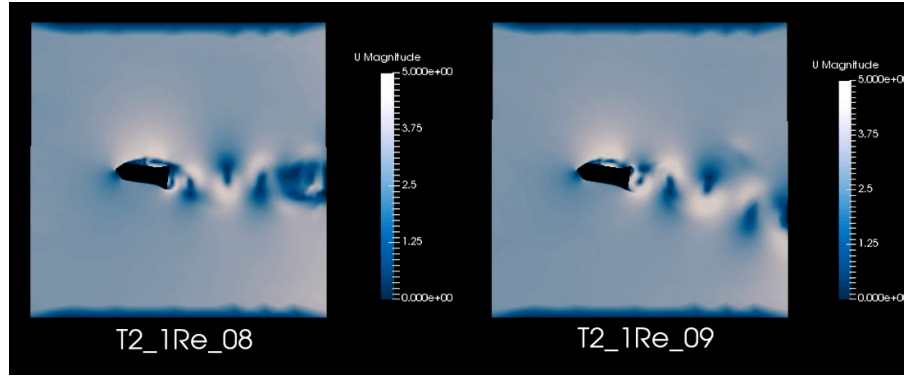


Figura 2.11: Imagens de simulações transientes para verificação inicial de validade de simulações geradas utilizando Paraview.

a fim de podermos utilizar as médias temporais em substituição das médias de ensemble (LUMLEY, 2007). Por inspeção dos resultados obtidos pela equação 2.28, para cada tipo de simulação foi estabelecido um t_0 onde, para $t \geq t_0$, $\langle u(\mathbf{r}, t) \rangle \approx \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\mathbf{r}, t') dt'$.

$$\overline{u(\mathbf{r}, t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\mathbf{r}, t') dt' \quad (2.28)$$

Nas equações acima, foi utilizada a velocidade u , na posição \mathbf{r} , como exemplo de cálculo da média. Tais procedimentos de obtenção de estacionariedade estatística podem ser observados em Costa et al. (2017), Santos et al. (2017), daCunhaLima et al. (2017).

Outro procedimento importante realizado nesta etapa de pós-processamento foi um filtro nas séries temporais dos torques (veja exemplo na figura 2.12). Este filtro de frequências foi realizado para que fossem registrados os efeitos reais dos torques sobre os VSA, uma vez que, para intervalos de tempos muito pequenos, da ordem de 10^{-3} ou 10^{-5} segundos, o processo de inércia do corpo do veículo absorve essas pequenas oscilações, além do que, nenhum software piloto seria capaz de proporcionar mudanças de curso do VSA em tão pequeno período de tempo. Para as simulações aqui realizadas, a frequência de corte foi de aproximadamente 3Hz (COSTA et al., 2017; DACUNHALIMA et al., 2017).

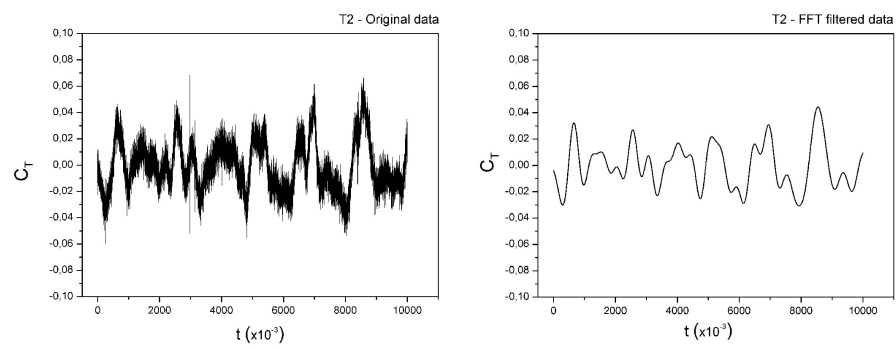


Figura 2.12: Filtro sobre série temporal de Coeficiente de Torque utilizando Transformada de Fourier.

Resultados

Este capítulo de Resultados, capítulo 3, está voltado para a apresentação, sob a forma de artigos publicados, dos resultados obtidos com as simulações após a interpretação dos dados, validação de resultados, análises comparadas com conceitos teóricos e com a literatura da área. Está subdividido em duas categorias de simulações: 2-D e 3-D. Na seção 3.1 será apresentado o artigo “Numerical analysis of stability and manoeuvrability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) with fishtail shape”, indicado nas referências como Costa et al. (2017), publicado na revista Ocean Engineering, da Elsevier. Já na seção 3.2, serão apresentados resultados publicados (ou submetidos à publicação) sobre o modelo 3-D de VSA no formato *flatfish*, veículo objeto de projetos de pesquisa no Senai-Cimatec.

3.1 Simulação 2-D

3.1.1 Artigo 1

A seguir, será apresentado, como mencionado acima, o artigo “*Numerical analysis of stability and manoeuvrability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) with fishtail shape*”. Uma breve introdução antecede o artigo propriamente dito.

3.1.1.1 Introdução

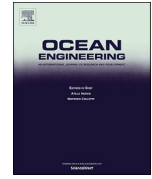
No trabalho apresentado abaixo, uma análise de estabilidade e manobrabilidade de modelos simplificados de VSA em 2-D é feita através da realização de simulações numéricas computacionais a partir dos cálculos das componentes hidrodinâmicas de Arrasto (*drag*), Sustentação (*lift*) e Torque (*Yaw* - cabeceio). Submissão dos modelos a diferentes ângulos de ataque (*yaw*) e análise de como a turbulência gerada influencia a estabilidade e a manobrabilidade dos modelos de VSA. Os modelos simplificados em 2-D são adotados para um estudo mais preciso da Física (mais simples que em 3-D) e para uma acessibilidade computacional mais moderada. Grande parte das simulações foi realizada em computador pessoal (Processador Intel i7 - 4 núcleos com 16GB de memória RAM) num tempo aproximado de duas horas por caso. A complexidade computacional exigida para casos 3-D aumenta consideravelmente, como será descrito na seção 3.2. Um destaque para a

geometria do casco é dado, uma vez que o formato do veículo se mostrou como fator determinante na geração da esteira turbulenta e na conseqüente estabilidade e manobrabilidade do VSA. A comparação de três diferentes modelos (com preservação da área molhada e incremento da ‘cauda de peixe’) traz ferramentas importantes para a construção de veículos submarinos, especialmente quando percebe-se grande influência desta ‘*fish tail*’ na geração de vórtices na esteira e como estes influenciam as componentes hidrodinâmicas avaliadas. As análises físico-matemáticas foram baseadas nos balanços de massa e quantidade de movimento (como já mencionado no capítulo 2) através da plataforma OpenFOAM, pelo MVF (detalhado na seção 2.1.1). Dentre as estratégias de pós-processamento adotadas ressalta-se a criação de um filtro de frequências a partir da Transformada de Fourier das séries temporais dos torques a fim de aproximar os movimentos a serem feitos pelo software piloto em correção aos efeitos de torque sobre a estrutura do VSA, uma vez que as altas frequências são filtradas pela inércia do veículo além de serem inviáveis sua execução de movimento. As análises de estabilidade e manobrabilidade destes modelos em 2-D mostraram-se muito eficazes como estudos preliminares para o aprofundamento em modelos realísticos em 3-D de VSA operacionais.



Contents lists available at ScienceDirect

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng

Numerical analysis of stability and manoeuvrability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) with fishtail shape



G. da Silva Costa^{a,b}, A. Ruiz^b, M.A. Reis^b, A.T. da Cunha Lima^{c,d}, M.P. de Almeida^{e,d}, I.C. da Cunha Lima^{b,d,f,*}

^a Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Camaçari, BA, Brazil

^b SENAI-Cimatec, Salvador, BA, Brazil

^c Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brazil

^d Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, INCT-GP, Salvador, BA, Brazil

^e Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brazil

^f Pursuelife - Consultancy on Applied Science, Salvador, BA, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Stability

Manoeuvrability

AUV

CFD

OpenFOAM

ABSTRACT

This paper aims to understand the stability and the manoeuvrability of an Autonomous Underwater Vehicles (AUV) through the simulation of the drag, lift and torque acting on the hull by the passing seawater. These are important questions in deep water conditions where telecommand is impracticable. The present study is based on the behaviour of a stern shaped as a fishtail in three different ways, and considers several attack angles. The solutions of the Navier-Stokes equations are computed with the OpenFOAM library. An open source library based on the Finite Volume Method (FVM) using C++ language. An analysis of the effects of the fishtail shape on the resistance and stability is based on the calculation of the averages drag, lift and torque. A filtering on the Fourier transform of the torque is used to discuss the manoeuvrability in each case.

1. Introduction

Advances on high-performance computing brought the possibility of numerically solving differential equations with high degree of difficulty, and also extensive problems requiring high processing power in a relatively short time. This is the case of the dynamics of an autonomous underwater vehicle (AUV) under the action of forces and torques generated by a fluid flow in a turbulent regime governed by the Navier-Stokes equation (Schlichting and Gersten, 2003). The present work aims to understand how the shape of the vehicle stern influences its stability and manoeuvrability taking into account the interaction of the vortices injected by the stern into the turbulent wake with the AUV hull. The analysis is performed for different attack angles. We adopted a quasi-two-dimensional model for the vehicle, using a fishtail shape for its stern, as shown in Fig. 1 and described below. We explored the effects produced by progressive changes on the fishtail shape on the forces and torques applied by the fluid flow on the AUV body. The wet area is preserved in the calculation of the three shapes. The choice of a quasi-two-dimensional model provides a much simpler way to understand the effects of these forces and torques, at the time it makes the

computation much faster and treatable.

Recent studies (Seo et al., 2008; Cao et al., 2014; Wu et al., 2014) explored the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) tools to analyze hydrodynamical components in AUV and other submersed structures. In the present case we performed the CFD calculation on the OpenFOAM platform (OpenFOAM; Greenshields, 2015). The OpenFOAM platform has been widely used for evaluating the dynamics of underwater vehicles. The OpenFOAM is an open source set of solvers for differential equations using the Finite Volume Method (FVM) (Versteeg and Malalasekera, 2007; Fletcher, 2006) in C++ language. The choice for this tool box was made based on its ample possibility of interaction with several platforms in CFD, on its versatility for solvers customization and on the fact that it is open source and free. Other calculations have been performed for AUV models subject to ocean currents. Ref. Seo et al. (2008) focus on the pitch degree of motion, which is primordial for an underwater glider. In Ref. Mansoorzadeh and Javanmard (2014), besides experimental procedures, an evaluation of drag and lift coefficients vs. relative submergence depth was made. Combining experimental and analytical results Ref. Chakrabarti et al. (2014) highlights the importance of the penguin shape in drag decrement and the necessity of a modern

* Corresponding author. SENAI-Cimatec, Salvador, BA, Brazil.

E-mail address: ivandacunhalima@pq.cnpq.br (I.C. da Cunha Lima).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.030>

Received 6 December 2016; Received in revised form 10 July 2017; Accepted 17 August 2017

0029-8018/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

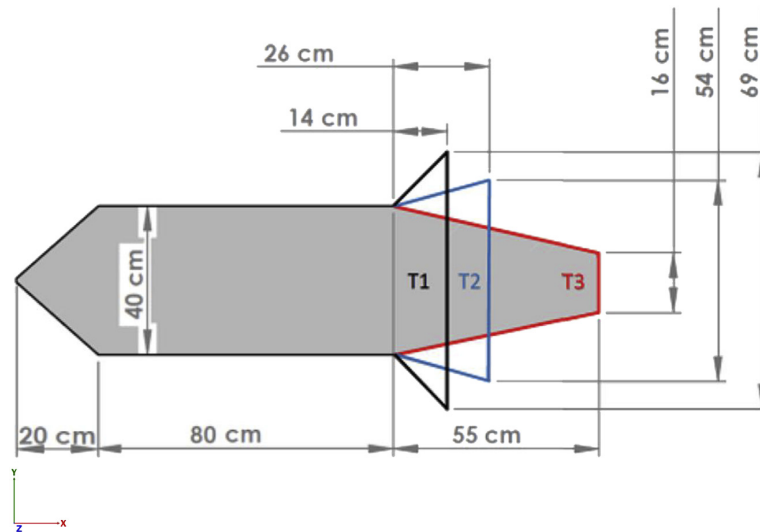


Fig. 1. 2-D AUV Models. Wet area is conserved in all three stern shapes.

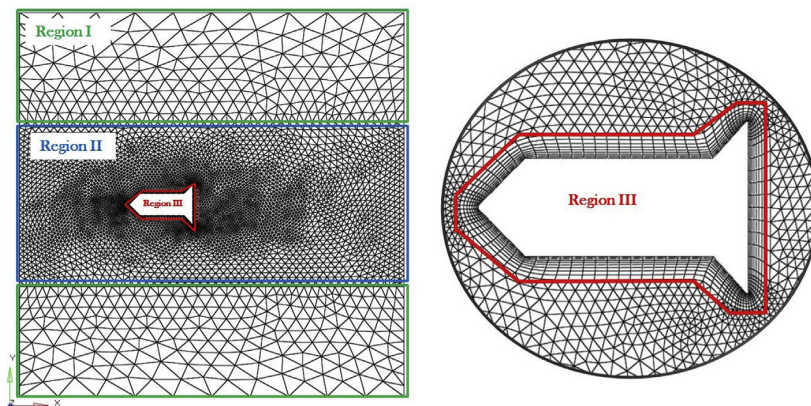


Fig. 2. The mesh of the domain is divided into three regions, taking T1 as an example. The figure shows region I limited by the green lines with a less refined mesh; region II, limited by the blue lines with an intermediate refinement; and region III, highly refined, enclosing the boundary layer. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

type of rudder for manoeuvrability control, since the penguin shape helps to lower the drag, but brings less stability. Numerical investigations with complex meshing developments performed on the Pirajuba AUV in Ref. Dantas and Dee Barros (2013) has shown satisfactory results using CFD tools when investigating manoeuvrability by analyzing the hydrodynamic efforts of the vehicle.

In this work we study the effects of the fishtail shape, as seen in Fig. 1, on the stability and manoeuvrability of AUV models when subjected to ocean currents. The forces and torques on the AUV body are calculated for different attack angles, in an attempt to identify parameters for optimizing the AUV shapes, in addition to establish a methodology for the analysis of manoeuvrability based on frequency filtering on the torque time series. At this point it is worthwhile to make explicit the meaning of quasi-two-dimensionality used in this work. First, we must say that the finite volume method used by OpenFOAM requires, necessarily, a three-dimensional domain (Greenshields, 2015). When building the mesh in this domain we can force a reduction on the dimensionality by defining a single cell in one of the directions. In the present case the reduced dimension is on the z-direction, where the single cell corresponds also to the thickness of the AUV. By doing this, no flow is allowed

below or above the AUV. The fluid flows only on the xy-plane. In consequence, drag is the force acting on the AUV on the same direction of the general flow, considered as the x-direction, and lift is the force acting on the direction perpendicular to the flow, namely the y-direction. Both forces acting on the xy-plane, the torque consequently has component only on the z-direction, perpendicular to the plane where the AUV lies. This torque is responsible for the yaw motion, the rotation around the z-axis. Lift and drag forces act together and must be balanced by the forces provided by the thrusters. On the other hand, the control system has to respond also to the torque generated by all forces acting simultaneously. This torque acts on the AUV generating angular acceleration in the axis of yaw, the z-direction, the angular acceleration depending on the moment of inertia. The automated navigational system must respond immediately to angular acceleration, but it also must neglect high frequency components of this random motion. This is the reason, here, for performing the spectral analysis on the torque. The choice of the so called quasi-two-dimensional motion reduces enormously the computational difficulties on meshing and on the time processing. This choice also makes it much clear the physical properties behind the interaction of the turbulent flow and the shape of the AUV stern. It also contributes to

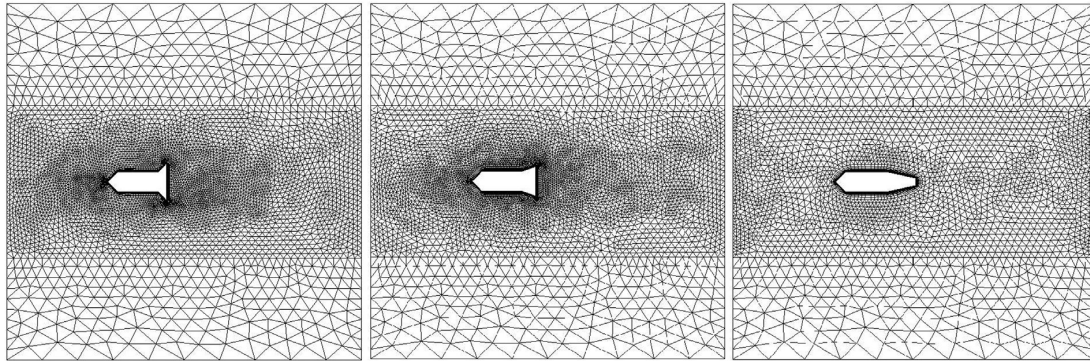


Fig. 3. Mesh visualization for geometries T1, T2, and T3, from left to right.

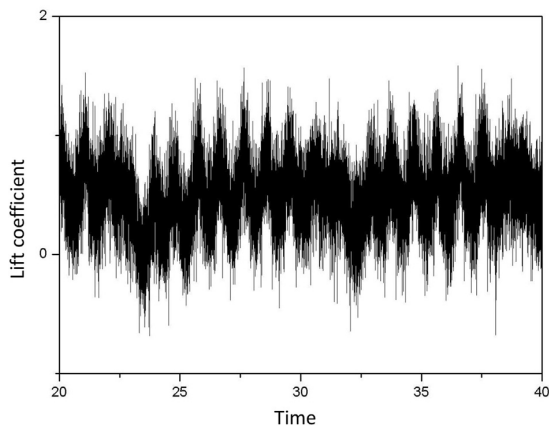


Fig. 4. Typical lift coefficient oscillations for the T1 geometry under a head on current.

understanding the role of the vehicle stern on the stability and manoeuvrability. However, it must be said that information about the other rotational degree of freedom (roll and pitch) are not considered.

2. Details of the simulation

2.1. Pre-processing

When using the OpenFOAM platform, the first step is the preparation

of the model, where the domain information is discretized in the control volume. In the present case the simulation is performed inside a wind tunnel in the shape of a slab of length 7 m, width 7 m, and thickness 10 cm. The simulations require a model based on the FVM, where the whole space is divided into small volumetric elements. Although the model is, in fact, two-dimensional, in order to use OpenFOAM we need to create a “quasi-2D” domain in real three dimensions, with a single layer in the z direction, and special boundary conditions at the front and back planes. Our study used a software dedicated to the pre-processing of meshes known commercially as HyperMesh, provided by Altair company (HyperMesh). This tool allows to create and connect different types of elements, which constitutes the discretization of the control volume studied. The models presented here have three-dimensional elements of two types: hexa and penta, which respectively have six and five faces. This strategy of combining elements was necessary to gain precision and performance in the simulations (Jasak, 1996). Therefore, the surface was divided into three regions of reference, and for each of them, a different degree of refinement was defined, as can be seen in Fig. 2. Greater refinement in regions II and III may be noted. These are the regions where the most important contributions to generating the turbulence around the AUV body occur. Therefore, the derivatives of the velocity fields must be carefully calculated. A special attention is given to the region containing the turbulent boundary layer, close to the AUV walls and just after the stern, inside the turbulent wake. For these reasons, only in the region III hexa type elements were used which, by having an even number of nodes, allow the construction of a structured and more refined model. We note in Fig. 2 that the elements follow a linear structure, and an uniform growth rate in all directions. This is important to ensure that the phenomena are observed during post-processing in a balanced way. Fig. 3

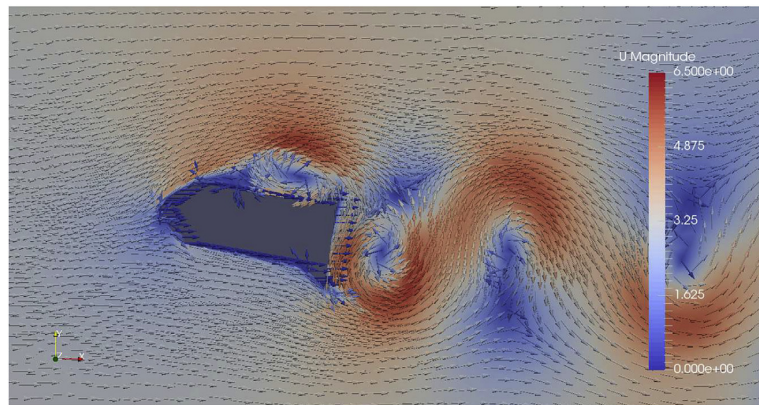


Fig. 5. Velocity (U) oscillation caused by turbulence in AUV model by angle of attack of 10°.

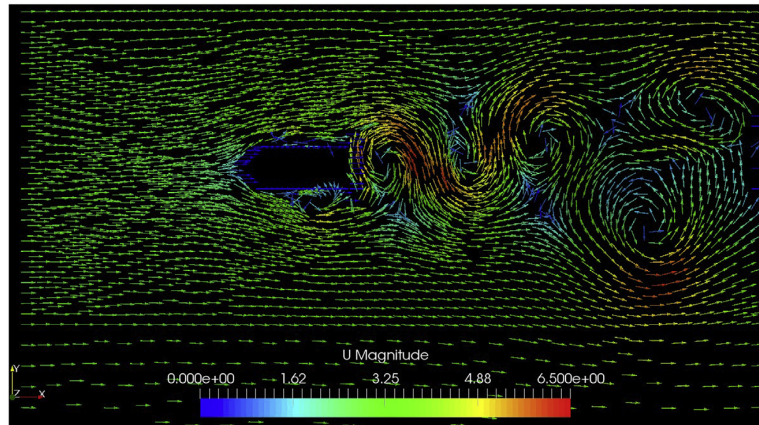


Fig. 6. ParaView image with detailed vector field of velocities (U) in flow due model T1 of AUV with angle of attack 0°.

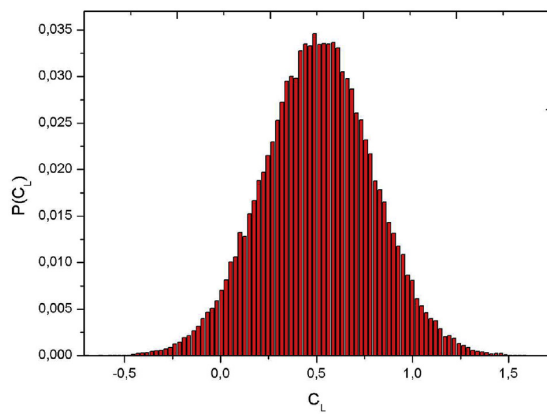


Fig. 7. Lift coefficient histogram for the T1 model at an angle of 10°.

shows the discretized space for all three models.

2.2. Processing

The LES (Large Eddy Simulations) turbulence model, and the transient solution (pisoFoam solver) were used in this simulation. The OpenFOAM platform provides the users with a variety of alternatives to the above choices, in addition to the possibility of customizing the

original method for the solution of the problem by inserting codes in C++.

In Fluid Dynamics, the flow dynamics is governed by the Navier-Stokes equations for the velocity fields,

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \tag{1}$$

together with the continuity equations, or mass conservation equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \tag{2}$$

In Eqs. (1) and (2), ρ represents the density, \mathbf{u} the velocity field vector, p the pressure, μ the viscosity, and \mathbf{f} the external body force. The parameters and the initial conditions of the system necessary for the solution of differential equations were established in order to characterise the fluid as saltwater in deep sea. The unperturbed velocity was scaled to adjust the relative speed of ocean currents and the moving vehicle. A typical operational speed over ground (SOG) for an AUV is in the range 1–2 knots. The relative current speed considered in these simulations is 3 m/s, corresponding to 1.5 knots. The non-slip condition was adopted at the domain boundary and at the AUV walls.

The torque, T , the drag and the lift, D and L , respectively, are calculated by OpenFOAM during the processing of the solutions of the Navier-Stokes equations through the integration of the stress tensor over the surface of the AUV and projected on the drag, lift and torque directions. The hydrodynamic coefficients for the drag (C_D), lift (C_L) and torque (C_T) are defined according to:

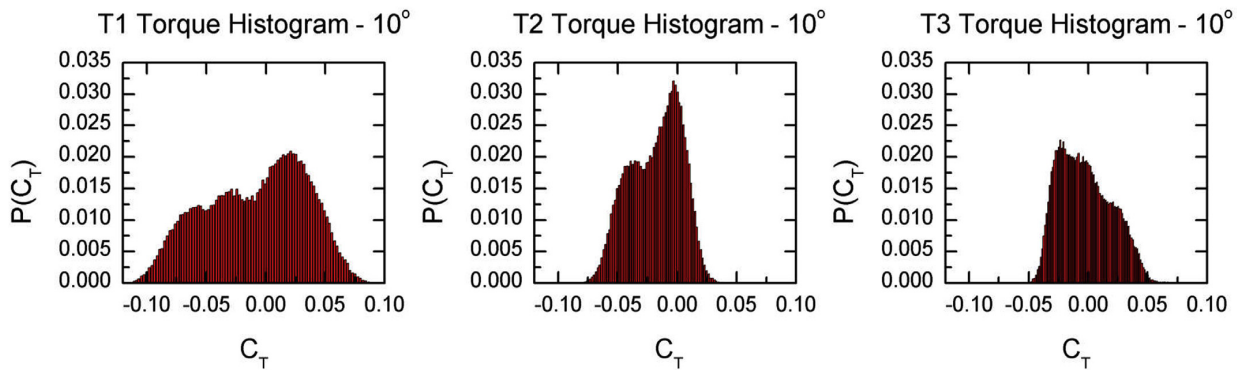


Fig. 8. Torque coefficient histograms for the T1, T2 and T3 models at an angle of 10°.

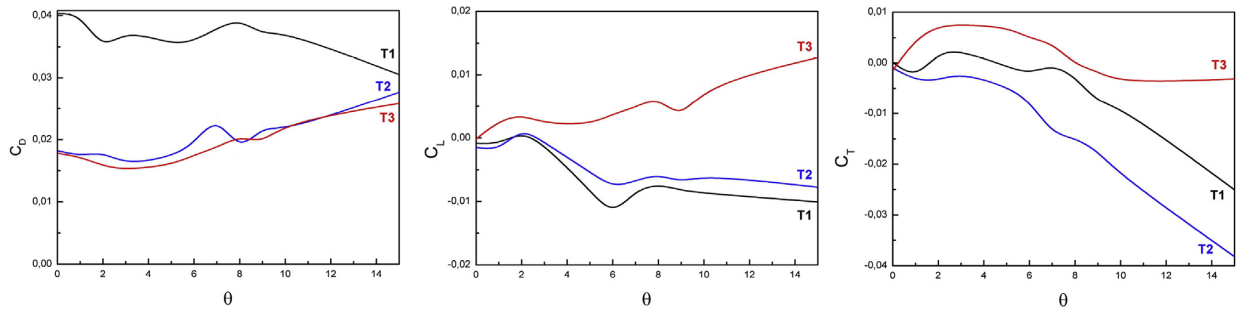


Fig. 9. Drag, lift and torque coefficients for models T1, T2, and T3 as a function of the angle of attack.

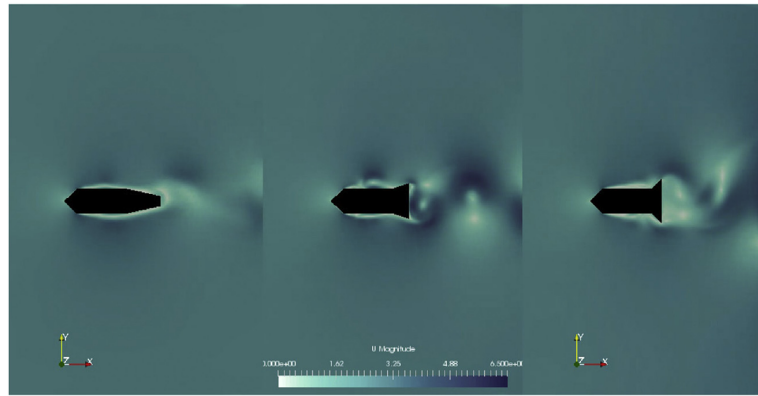


Fig. 10. Turbulence generated by the three models of AUV, from left to right: T3, T2 and T1.

$$C_D = 2 \frac{D}{\rho U^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = 2 \frac{L}{\rho U^2 A} \quad (4)$$

$$C_T = 2 \frac{T}{\rho U^2 \ell A} \quad (5)$$

A is the area of the external surface of the model, ℓ its length, U is the speed at the inlet of the wind tunnel, and ρ is the fluid density. The coefficients C_D , C_L and C_T are dimensionless. These coefficients, which are all dependent on the speed of the flow, determine the power law of drag, lift and torque on the flow velocity. In other words, they determine how these quantities deviates from the square law.

The three coefficients were calculated for each AUV geometry and for each angle of attack - the angle between the apparent current and the bow-stern axis of the vehicle - ranging from 0 to 15°. The torque is the basis for analysing stability and maneuverability, as discussed below. In all cases we observed oscillations on time with two different ranges of frequencies, as it is evident after Fig. 4 for the lift coefficient C_L . The origin of these oscillations lies on the eddies formation inside the turbulent wake behind the AUV stern, as easily seen in Fig. 5.

2.3. Post-processing

The analysis of the output data starts with the ParaView package (the post-processing tool from the OpenFOAM platform). There, the general conditions of the time line of flow can be visualised in details, as in the case of the velocity vector field shown in Fig. 6 for a particular snapshot. The statistical analysis for the drag, lift and torque is performed after the

simulation with programs coded in FORTRAN.

The histogram shown in Fig. 7 represents the lift coefficient distribution of the T1 fishtail stern, with an angle of attack of 10°. It is remarkable that, in this asymmetric condition, we still obtain a Gaussian-like distribution. On the other hand, Fig. 8 shows the histograms for the torque on the AUV under the same angle of attack of 10°. In this case we observe the asymmetry on the distribution profile. This asymmetry and the torque spectral analysis are paramount for studying stability and maneuverability.

Although a large range of frequencies are manifested in the turbulent regime of the flow past the AUV, the steady nature of the currents far from the vehicle guarantees the assumption of the ergodic hypothesis (Tennekes and Lumley, 1972). In fact, after a large number of iterations ($t = t_0$) the process becomes stable. By this we mean that, for any given field, for instance $u(\mathbf{r}, t)$, the time average

$$\overline{u(\mathbf{r}, t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\mathbf{r}, t') dt' \quad (6)$$

does not depend on t if $t \geq t_0$. In that case the ensemble average $\langle \dots \rangle$ (Lumley, 1998) can be replaced by the time average over a large time interval starting at $t \geq t_0$:

$$\langle u(\mathbf{r}, t) \rangle \approx \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\mathbf{r}, t') dt'. \quad (7)$$

By inspection of the results obtained with Eq. (6), we made the averages in all post-processing calculation at a start point corresponding to the iteration 10,000 and an interval T corresponding to 40,000 iterations.

3. Results and discussions

Fig. 9 shows the average of the three coefficients as a function of the

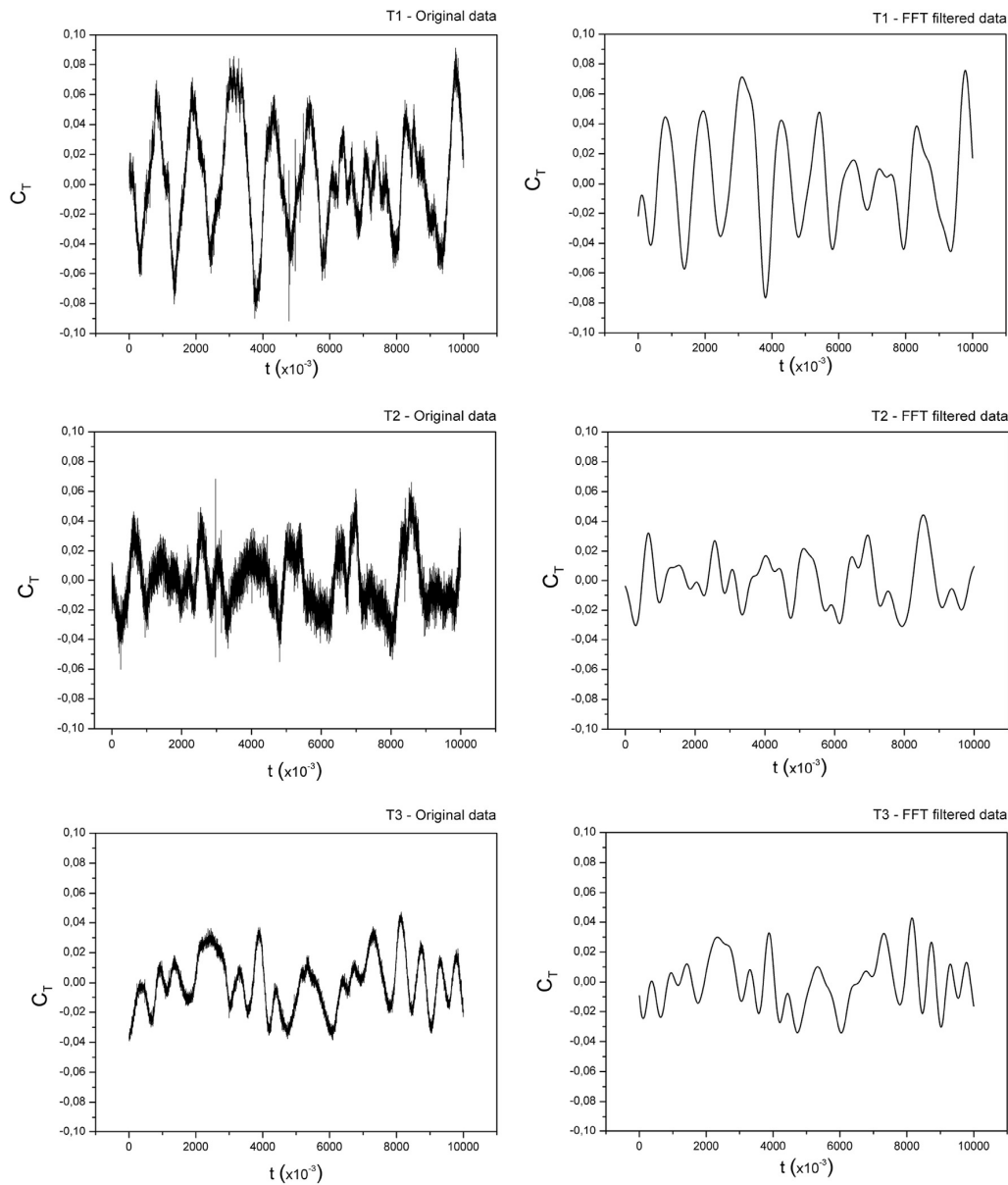


Fig. 11. Fluctuations and filtered torque for head current on model T1.

angle of attack. It is important to emphasize the fact that the current is assumed to reach the AUV by its port side. This angle, therefore, increases in the clockwise sense. The x-axis is directed along the current flow, from left to right. The y-axis points from port to starboard when the angle of attack is zero, therefore the z-axis points “up”, outside the plane represented on the figures. This means that a positive torque tends to decrease the angle of attack and vice versa.

We observe the drag to be much higher in model T1 than for the other two models, for all angles of attack. This is because in this model the cross section area for the action of the drag force is maximal, resulting in a high power needed to sustain the motion. Observing the behaviour for T2, we notice a slight increase on the drag for an angle near 6° , and a common tendency for both T2 and T3 to increase the drag with the attack angle. This increase represents the fact that the influence of the fishtail shape on the effective cross section increases. In fact, once the angle is measured

on the clockwise sense, the tail at the bottom increases the cross section, while that at the top, after a certain angle, enters the shadow zone of the bow.

On the other hand, the lowest lift values are observed when the geometry of the AUV has a larger “fish tail”, models T1 and T2. Contrarily to the drag coefficient, for T1 and T2 the lift decreases with the angle of attack, showing a local minimum at nearly 6° . The reason for this minimum is the same as for the local maximum on the drag coefficient. It is worthwhile to stress the important effect of the fishtail shape on reducing the lift coefficient.

The last graph on Fig. 9 shows the torque coefficient under the same conditions of the previous graphs. Notice, again, that the simulations assume an increasing angle of attack corresponding to turning clockwise the axis bow-stern. A positive torque turns the bow-stern axis anti-clockwise around the axis passing through the center of mass. Therefore,

a positive torque applied to the AUV restores a deviation (yaw) in the sense of increasing the attack angle. Actually, stability (in a helm-free sense) is attained with a positive torque applied by the passing fluid on the AUV body whenever the attack angle increases. In other words, stability at a given attack angle results from a positive derivative of the torque with that angle. A positive deviation of the attack angle implies on the hydrodynamics forces (drag and lift) acting together to produce a restoring torque if the derivative is positive. For a neutral helm, i.e., when no control acts on the AUV, a positive hydrodynamical torque turns the bow onto the current direction. With the above considerations in mind we see, as an example, that when the AUV faces a current head-on, T3 is stable, while T1 and T2 are unstable.

Another question concerns manoeuvrability. In that case, the vortex production on the wake of the AUV is paramount. The fishtail stern influences the size of vortices generated (Patil and Tiwari, 2008), since it is known that obstacles are vorticity injectors in flows with high Reynolds number (da Cunha Lima et al., 2017). Fig. 10 shows snapshots of the simulations for the three models with the vortices generated at the AUV wake.

In this work we consider the number of movements on the helm per minute necessary to keep course as a measure of manoeuvrability. In terms of the AUV this is reflected on the frequency and the range of amplitudes the control system has to interfere to keep course.

In order to obtain such figure of merit we proceeded in the following way. First, we obtained the time series for the torque during a period large enough to assume ergodicity. Then, we perform a Fourier transform of this time series. Notice that the effect of the high frequencies components of the hydraulic torque on the yaw is eliminated in the real motion by a self-averaging process due to the inertia of the AUV. Therefore, we select, by hand, a cut-off frequency and consider only those components inside the low frequency region (smaller than the cut-off). With these components we perform an anti-transform to obtain a filtered time series for the torque, on the basis of which we analyze manoeuvrability. Our choice for the frequency cut-off was 3 Hz. The results are shown in Fig. 11. We observe that model T1 requires much less frequent and much more regular control intervention than the other two models.

4. Conclusions

The object of the present work was to understand the effects of a turbulent wake on the stability, controllability and manoeuvrability of an AUV at different angles of attack, and moving in a current of the order of 3 m/s. In order to have a control on the turbulence generation at the wake, and at the same time observe the influence of the vortices downstream on the body of the AUV, we design a stern as a fish tail of three different shapes keeping constant the wet area. Based on the numerical simulations described above, we can conclude that: (1) the shape T1, offering the largest cross section area, offers, naturally, the larger resistance to motion at low angle of attack. As the angle increases, shapes T1 and T2 increase almost equally the resistance, except for an oscillation in the case of T2 with is due to a shadowing effect of the tail. At large angles of attack the differences among the models decrease due to the same shadowing effect. (2) The shape T3 of the stern makes the AUV approach the form of an airfoil, where the lift increases with the attack angle up to approximately 14° (above the range of the present simulations). The turbulence near the stern makes this lift to decrease on shapes T1 and T2. We understand the fact that shape T2 shows a lift a little higher than T1

for angles above 3° also due to the effect of shadowing, as the typical oscillation on the torque appears in both models near 6°. In conclusion, model T1 is more resistive, but shows a low drift. (3) In what concerns the helm-free stability, both T1 and T2 are unstable moving against a bow current, but T3 is stable for small angles of attack.

The discussion about manoeuvrability is a key point for an AUV. Filtering the oscillations on the torque created by the vortices at the wake is an essential step, since as already stressed, the inertia of the AUV provides a self-averaging mechanism for erasing the high frequency components. In consequence, the enhanced fish tailing of model T1 provides a better choice for the sake of an efficient course keeping control.

The conclusions of the simulation were based on the behaviour of an oversimplified model. However, they make clear the reason for which the shape of the ship stern is so important for manoeuvrability. The torque governing yaw is determined by the vortex creation on the wake, and the spectral analysis of this turbulent wake separates low and high frequencies, the latter being, in fact, erased by the ship inertia. Therefore, the project of a control system for navigating an AUV, according to the present results, should be supported by a previous simulation of the hydrodynamical forces and torques acting on the ship under cruising circumstances. The shape of the ship stern could assume a fundamental role in saving energy and optimizing the thrusters power and positioning.

Acknowledgements

This work was supported by Shell Company and by the Project number 01.13.0327.00 of FINEP, Brazil.

References

- Cao, D., et al., 2014. Determining the drag coefficient of a cylinder perpendicular to water flow by numerical simulation and field measurement. *Ocean Eng.* 85, 93–99.
- Chakrabarti, R., et al., 2014. Maneuverability and handling of the penguin-shaped autonomous underwater vehicle (AUV) PreToS, analytical and experimental results. In: *OCEANS 2014-TAIPEI*. IEEE, pp. 1–6.
- da Cunha Lima, A., da Cunha Lima, T., da Cunha Lima, I.C., Almeida, M.P., 2017. Analysis of turbulence power spectra and velocity correlations in a pipeline with obstructions. *Int. J. Mod. Phys. C* 18 (1), 1750019.
- Dantas, J.L., Dee Barros, E.A., 2013. Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability. *Appl. Ocean Res.* 42, 168–181.
- Fletcher, C.A.J., 2006. *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, second ed., vol. I. Springer-Verlag.
- Greenshields, C.J., 2015. *OpenFOAM-the Open Source CFD Toolbox User Guide*. Version, V. 3. N. 0.
- For details of HyperMesh by Altair, see <http://www.altairhyperworks.com/product/HyperMesh>.
- Jasak, H., 1996. *Error Analysis and Estimation for Finite Volume Method with Application to Fluid Flows*. Ph.D. thesis. Imperial College, University of London.
- Lumley, J.L., 1998. *Stochastic Tools in Turbulence* p.4, Dover.
- Mansoorzadeh, S., Javanmard, E., 2014. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *J. Fluids Struct.* 51, 161–171.
- For downloading the OpenFOAM library, go to www.openfoam.org.
- Patil, P.P., Tiwari, S., 2008. Effect of blockage ratio on wake transition for flow past square cylinder. *Fluid Dyn. Res.* 40 (11), 753–778.
- Schlichting, H., Gersten, K., 2003. *Boundary-layer Theory*. Springer Science and Business Media.
- Seo, D.C., Jo, G., Choi, H.S., 2008. Pitching control simulations of an underwater glider using CFD analysis. In: *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-ocean*. IEEE, pp. 1–5.
- Tennekes, H., Lumley, J.L., 1972. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, p. 212.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method*. Pearson Education.
- Wu, L., et al., 2014. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents. *Ocean Eng.* 85, 110–126.

3.2 Simulações 3-D

Após um estudo preliminar em modelos 2-D, a modelagem do sistema complexo caracterizado pela influência da esteira turbulenta na estabilidade e manobrabilidade de VSA através da análise transiente por MVF pôde ser estabelecida como competência alcançada e eficaz nos resultados apresentados. A partir daí, a pesquisa evolui para modelos em escala realística em 3-D aumentando a complexidade da Física envolvida e, principalmente, requerendo discretizações espaciais com malhas robustas (da ordem de oito milhões de elementos) exigindo um potencial computacional só alcançado em supercomputadores. As simulações desta natureza foram realizadas no supercomputador Yemoja, situado no Senai-Cimatec, utilizando um total de 320 núcleos distribuídos de 20 em 20 em 16 nós de processamento numa partição de 256GB de memória RAM. Mesmo com todo esse aparato computacional, as simulações transientes realizadas aqui duraram por volta de quatro semanas cada caso, uma ilustração do nível de complexidade atingido e exigido na pesquisa.

3.2.1 Artigo 2

O texto aqui apresentado foi publicado e apresentado na conferência internacional *Ocean's 17*, realizada em Anchorage AK/US no ano de 2017 e está apresentado nas referências desta tese como [daCunhaLima et al. \(2017\)](#). Uma introdução antecede o manuscrito que leva o título “*Effects of torque produced by wake on the maneuverability of a flatfish autonomous underwater vehicle*”.

3.2.1.1 Introdução

Esta seção traz o texto onde analisam-se simulações numéricas da manobrabilidade de um VSA no formato *flatfish* em 3-D sob três ângulos de ataque e duas diferentes velocidades. O foco das simulações baseia-se na comparação das séries temporais dos torques nos três graus de liberdade rotacionais (*roll* - balanço, *pitch* - caturro, *yaw* - cabeceio) em três diferentes ângulos (*yaw*) de ataque (0° , 5° e 10°) para uma velocidade (relativa entre a corrente marinha e o movimento do VSA) de 1,0 m/s. Para o ângulo de 0° ainda análise dos mesmos torques para uma velocidade de 0,5 m/s, considerada adequada para missões de inspeção e filmagem do fundo do oceano. Lançando mão do equipamento computacional que dá suporte ao Projeto Flatfish (Supecomputador Yemoja), análises sob *solvers* transientes gerando séries temporais de torques nos três graus de liberdade rotacionais admitidos foram feitas para avaliar a manobrabilidade. A modelagem físico-matemática e as customizações de processamento foram baseadas em [Costa et al. \(2017\)](#)

e também em daCunhaLima, daCunhaLima e Almeida (2017) e Santos et al. (2017), diferenciando, principalmente as etapas de pré-processamento e pós-processamento. Um filtro baseado na Transformada de Fourier das séries temporais dos torques semelhante ao utilizado em Costa et al. (2017) foi aplicado para atender ao processo de auto-média que anula, por inércia, as flutuações de alta frequência. Como pode ser visto no texto, a relevante influência da esteira turbulenta na manobrabilidade do VSA tipo *flatfish* fica evidenciada pelo ganho oscilatório observado nos torques com o aumento do número de Reynolds (representado pelo aumento da velocidade de navegação - velocidade de *inlet*) ainda destacando onde pode haver interferência na geometria do casco para atenuar as variações na aceleração angular nas direções indicadas nas simulações.

Effects of torque produced by wake on the maneuverability of a flatfish autonomous underwater vehicle

Ivan C. da Cunha Lima
SENAI-CIMATEC, Salvador-BA, Brazil
INCT-GP, Salvador-BA, Brazil
Email: ivandacunhalima@gmail.com

Gustavo da Silva Costa
SENAI-CIMATEC, Salvador-BA, Brazil
IFBA, Camaçari-BA, Brazil
Email: gustavocosta77@gmail.com

Alberto Ruiz
SENAI-CIMATEC, Salvador-BA, Brazil
Email: albertoruizfilho@gmail.com

André T. da Cunha Lima
UFBA, Salvador-BA, Brazil
INCT-GP, Salvador-BA, Brazil
Email: at.cunhalima@ufba.br

Murilo P. Almeida
UFC, Fortaleza-CE, Brazil
INCT-GP, Salvador-BA, Brazil
Email: murilo@fisica.ufc.br

Marco Reis
SENAI-CIMATEC, Salvador-BA, Brazil
Email: marcoreis@fieb.org.br

Abstract—Autonomous underwater vehicles (AUV) are important resources to be used in the oil exploration industry in deep waters as well as a platform for scanning devices used in open sea regions of difficult human access. This work aims to analyze through computer simulations the influence of marine currents on the maneuverability of a flatfish shaped AUV. The 3D realistic scale simulations were performed on the Yemoja supercomputer located at SENAI-CIMATEC and describe the temporal evolution of the torques in the three rotational degrees of freedom - roll, yaw and pitch. The torques were calculated for two different inlet velocities and three angles (yaw) of attack showing a significant gain in the amplitude of these with increasing velocity and pitch being the component with the greatest amplitude of oscillation.

I. INTRODUCTION

Deep sea oil exploration presented new technological challenges. In particular, here we explore the difficulties on surveying seabed lying structures, like pipelines and sensors used in Oceanic Background Seismic (OBS). These sensors are installed at the bottom of the sea, in substitution to the conventional emission and acquisition of signals by surface vessels. The former includes pipelines and manifolds transporting the oil from the well to the risers. An interesting surveying system is that on board of underwater vehicles. In this case, another technological challenge presented is that of the vehicle maneuverability, in consequence of the human presence being extremely complicated and of the reliable remote control being impossible due to the difficult propagation of electromagnetic signal in the deep sea salt water. As a consequence, an attractive starting point in such a project is to assume the surveillance system to be installed on board an autonomous underwater vehicle (AUV). The design of such vehicle, however, must consider the fact that the propulsion gear (thrusters) will face the action of turbulent currents generating forces and torques [1]. As we can see in some papers about maneuverability analysis like in Ref. [2], the AUV hull shape represents huge influence on hydrodynamics

components. This work aims to calculate these effects of the turbulent flow on a realistic three-dimensional model of an AUV, in particular, the well known flatfish model. Similar approaches were done by AUV researches like in Ref. [2]–[5] analyzing hydrodynamical components in order to evaluate AUV performances. The maneuverability of a flatfish shaped AUV is analyzed through simulations of the torque acting on the hull due to the flow of seawater. Vortices created at the turbulent wake interact with the AUV structure at its stern by imposing a random torque. The AUV maneuverability depends on the response of the hull to this torque through its rotational degrees of freedom (determined by the moment of inertia) and the capacity of the control/navigational system to react promptly to the angular accelerations.

Advances in high performance computing (HPC) have promoted many possibilities of applications on Computational Fluid Dynamics (CFD). The access to supercomputers allows for the treatment of three-dimensional problems requiring large number of processors and huge memory. This is the case of the calculation of the stress tensor (pressure and shear stress) acting on a 3D realistic underwater vehicle such as a flatfish. The need for computational resources is huge in these cases, due to the incredibly detailed mesh structures and the small time-step required for the simulations in three dimensions.

Starting from a detailed surface grid, an unstructured meshing was obtained and several simulations were performed in a wind tunnel for realistic currents with a few attack angles. A set of transient flow simulations were performed in order to obtain the time history of the torque roll, yaw and pitch components. The Navier-Stokes equations were solved numerically in the OpenFOAM platform, an open source library for solving differential equations based on the Finite Volume Method using C++ language [6]. The LES (Large Eddy Simulations) turbulence model was adopted. The simulations were performed in the high performance computer Yemoja located

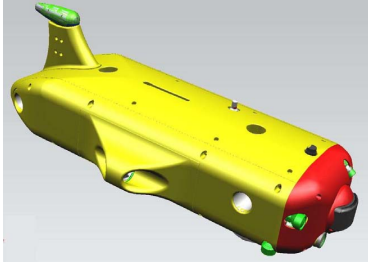


Fig. 1. Flatfish model representative image

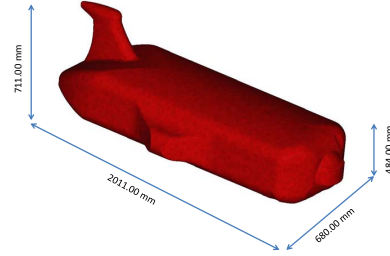


Fig. 2. AUV dimensions

at SENAI-CIMATEC using 16 processors nodes totalizing 320 cores in a partition of 256 GB of memory. In order for the time history to cover a reasonable time interval, the simulations had to be performed for a duration corresponding to ten times the interval necessary for the fluid to cross the whole AUV length. The constraint concerning the Courant number required a time step of 10^{-5} seconds.

To study the effects of the wake on the maneuverability, a filtering on the Fourier Transform was built in Fortran language to highlight the important amplitude oscillations and frequencies of the torques responsible for the roll, yaw and pitch accelerations. Next, the spectra was filtered in order to obtain the low frequent components compatible with the response time of the autopilot and to the set of power thrusters. The results obtained in this work provide guidelines to projecting flatfish shaped AUV taking into consideration the currents they will face in route and when approaching the docking area, as done in Ref. [7].

II. SIMULATIONS DETAILS

This section contains the simulation specifications and the description of the methods used. First we describe the dimensions of the AUV and the pre-processing meshing method. Then the simulation details and the mathematical modeling are described, and finally the results and some discussion are presented.

A. Model Specifications and Meshing

The flatfish shaped AUV, seen in Fig. 1, that is part of the Flatfish Project at SENAI-CIMATEC in partnership with BG Brasil, was developed to perform visual inspections in high resolution 3D to achieve advanced levels in gas and oil exploration in deep water. The model dimensions are shown in Fig. 2. The simulations were performed in 3D realistic scale.

The meshing process, in order to perform the pre-processing step, was built using the Hypermesh software by Altair, provided by SENAI-CIMATEC [8]. Spatial discretization stipulates a growth rate of cell size along the wind tunnel, emphasizing refinement near the obstacle (AUV) in order to detect velocity variations close to the boundary layer. The 3D cells take penta and hexa forms and start from a size of $10mm$. Figure 3 shows the details of the mesh of both the tunnel and

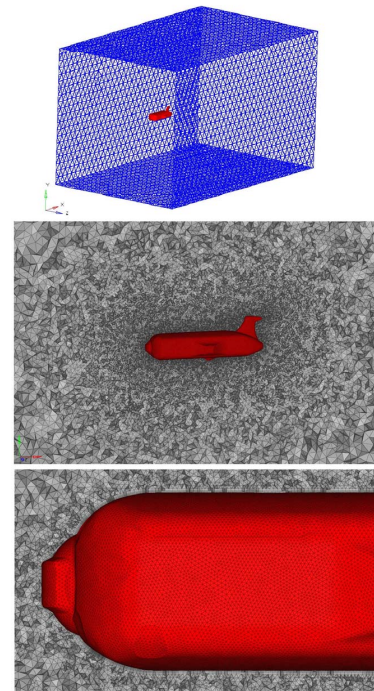


Fig. 3. Images of mesh grid and wind tunnel

the object as well as the 3D region of the fluid, including the growing aspect.

B. Processing Developments

In order to perform the mathematical modeling, the equations to represent the flow dynamics are the Navier-Stokes equations for the velocity fields,

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

together with the continuity equations, or mass conservation equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0. \quad (2)$$

In Eqs.(1) and (2), ρ represents the density, \mathbf{u} the velocity field vector, p the pressure, μ the viscosity, and \mathbf{f} the external body force. The parameters and the initial conditions of the system necessary for the solution of differential equations were established in order to characterize the fluid as saltwater in deep sea. The unperturbed velocity was scaled to adjust the relative speed of ocean currents and the moving vehicle. The velocity values at the inlet of the wind tunnel was chosen to be $0.5m/s$ and $1.0m/s$ in the opposite sense to the frontal displacement of the AUV. The non-slip condition was adopted at the domain boundary and at the AUV walls. The angles of attack are three, 0° , 5° and 10° increasing clockwise at the xz -plane, corresponding to the yaw direction. The torques, roll, yaw and pitch, are calculated by OpenFOAM during the processing of the solutions of the Navier-Stokes equations through the integration of the stress tensor over the surface of the AUV and projected on its directions, respectively.

The simulations were performed with the OpenFOAM platform, an open source tool for solving differential equations using Finite Volume Method (FVM) (as we can observe in [9]) in C++ language. The PISO (Pressure Implicit with Splitting Operators) protocol, that makes up the transient solver `pisoFoam`, was used combined with the Large Eddy Simulations (LES) turbulence model. Another concern about simulating a 3D realistic scale AUV is the control of the Courant number (we can see its expression in Eq. (3)). For a small Δx , representing a rigorous mesh refinement like how it was done here (starting from $10mm$), an even smaller scale of Δt , representing the time discretization (timestep), is necessary in order to keep the simulation working. For this set of jobs, the timestep adopted was $10^{-5}s$. U represent the magnitude of the velocity field.

$$Co = \frac{U \cdot \Delta x}{\Delta t}. \quad (3)$$

C. Results and Discussion

The post-processing was realized at first with the Paraview package [10] (Visualization Toolkit by Kitware, part of the OpenFOAM), for visualization and simulation checking. After this stage, the torques calculation take place after a turbulent flow maturation. In order to attain the maneuverability analysis, a Fourier transform filter was performed on the torque time series. Notice that the effect of the high frequency components of the hydraulic torques are eliminated in the real motion, therefore, we select, by hand, a cut-off frequency and consider only those components inside the low frequency region (smaller than the cut-off).

It was expected, and the simulations confirmed it, that with increasing Reynolds number (here represented by the increment in inlet velocity), the level of turbulence flow increases and it would bring greater influence of the wake on the oscillations of the torques [11]. Figure 4 shows that the three torques present a considerable gain in the amplitude

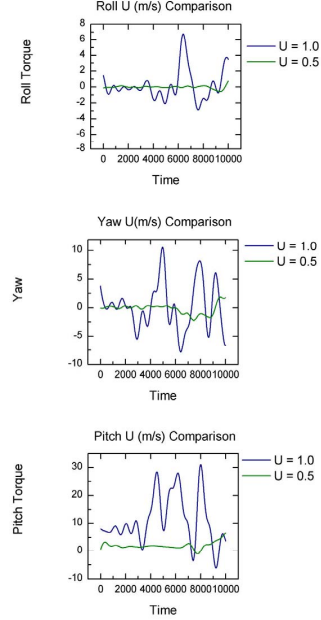


Fig. 4. Comparative torques for different inlet velocities

of oscillations when the velocity increases from $0.5m/s$ to $1.0m/s$. It illustrates the expanded influence of the wake on the AUV maneuverability, highlighting the roll as a more stable component and pitch as the wider oscillation. These graphs also demonstrate that at low speeds the torques oscillate weakly around the zero value, demonstrating that the flatfish format is suitable for visual inspections or filming of the sea floor because of its small course variation.

Another approach is the observation of torque oscillations under attack yaw angles. Three angles of attack (0° , 5° , 10°) were simulated clockwise in the xz -plane with an inlet velocity of $1.0m/s$ and the torques time series were calculated. Results are shown in Fig. 5. With regard to maneuverability, the vortex production on the wake of the AUV is paramount. The flatfish AUV stern influences the size of vortices generated [12], since it is known that obstacles are vorticity injectors in flows with high Reynolds number [13]. We consider here the number helm movements per minute necessary to keep course as a measure of maneuverability. Regarding to AUV torques, it reflects on the frequency and the range of corrections the control system has to do to keep course, and we can analyze this oscillations on torque time series evaluating the rotational degrees of freedom of this shape of AUV. Observing Fig. 5, we can see that the roll and yaw increase slightly (in the positive direction) with the increment of the angle from 0° to 5° and that the oscillations and amplitudes grow more strongly by 10° , also with a positive trend. On the other hand, pitch, at 5° , presents oscillations closer to zero than when the angle

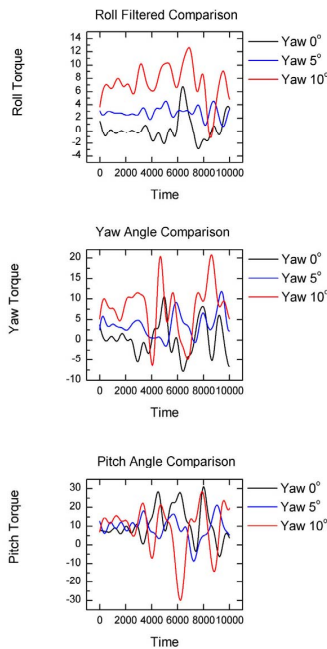


Fig. 5. Comparative torques for different yaw attack angles

is 0° , but varies sharply when the angle of attack reaches 10° , which illustrates greater difficulty in maneuvering in this direction. It is important to point that a positive yaw turns the AUV anticlockwise, restoring the angle of attack, and a positive pitch points the AUV down.

III. CONCLUSION

The aim of this work was to analyze the torque effects produced by the wake on the maneuverability of a flatfish shaped AUV, by computational simulations in a 3D realistic scale. After a high frequency filtering on the torques time series, knowing that the inertia of the AUV provides a self-averaging mechanism for erasing the high frequency components, we could conclude that the flatfish shape has an excellent capacity of maneuverability under low velocities, demonstrated by its very small torque variations over time as the inlet speed decreases. Another important observation is about the pitch acceleration; it is the primordial concern about flatfish shaped AUV maneuverability because of its high torque oscillations over time observed at some yaw angles. It showed a huge increment of amplitudes when the yaw angle becomes 10° . The roll component has shown the lowest oscillation among the three rotational degrees of freedom, and the yaw acceleration increases moderately with the increase of attack yaw angles. In fact, the features described above characterize this form of an AUV as suitable for use in filming and scanning inspection missions, tasks that are performed at

low speeds and require stability and good controllability of the vehicle.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Flatfish Project of SENAI-CIMATEC and BG Brasil, and the FINEP project number 01.13.0327.00.

REFERENCES

- [1] Schlichting, H.; Gersten, K., *Boundary-layer theory*, Springer Science and Business Media, 2003.
- [2] Chakrabarti, R. et al., *Maneuverability and handling of the penguin-shaped autonomous underwater vehicle (AUV) PreToS, analytical and experimental results*. In: OCEANS 2014-TAIPEI. IEEE, p. 1-6, 2014.
- [3] Mansoorzadeh, S; Javanmard, E., *An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods*. Journal of Fluids and Structures, v. 51, p. 161-171, 2014.
- [4] Dantas, J. L. D.; de Barros, E. A., *Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability*. Applied Ocean Research, v. 42, p. 168-181, 2013.
- [5] Seo, D. C.; Jo, G.; Choi, H. S., *Pitching control simulations of an underwater glider using CFD analysis* In: OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. IEEE, p. 1-5, 2008.
- [6] Greenshields, C. J., *OpenFOAM-the open source CFD toolbox user guide*, 2015.
- [7] Wu, L. et al., *Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents*. Ocean Engineering, v. 85, p. 110-126, 2014.
- [8] For details of HyperMesh by Altair, see <http://www.altairhyperworks.com/product/HyperMesh>.
- [9] Versteeg, H. K.; Malalasekera, W., *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education, 2007.
- [10] For details of Paraview by Kitware, see <https://www.paraview.org>.
- [11] Tennekes, H. and Lumley, J. L., *A first Course in Turbulence*, MIT Press, 1972.
- [12] Patil, P. P.; Tiwari, S., *Effect of blockage ratio on wake transition for flow past square cylinder*. Fluid Dynamics Research, v. 40, n. 11, p. 753-778, 2008.
- [13] da Cunha Lima, A. T.; da Cunha Lima, I. C.; Almeida, M. P., *Analysis of turbulence power spectra and velocity correlations in a pipeline with obstructions*, Int. Journ. Mod. Phys. C, p. 1750019, 2016.

3.2.2 Artigo 3

O texto aqui apresentado foi submetido e está sob revisão para publicação na revista Ocean Engineering. Constitui-se num rico complemento e reforço nas análises de estabilidade e manobrabilidade apresentados na conferência Ocean's 17 (DACUNHALIMA et al., 2017), apresentando análises elaboradas sobre a influência do formato do casco na produção da esteira turbulenta e sua influência na manobrabilidade dentre outras adições.

3.2.2.1 Introdução

Neste item serão detalhados para o mesmo modelo *flatfish* as características hidrodinâmicas do VSA a partir de simulações computacionais. A análise das forças de arrasto (*drag*) e de sustentação (*lift*) trarão consistência à análise da estabilidade do modelo bem como da influência da turbulência gerada pela esteira na governabilidade do VSA. As simulações realísticas em 3-D para análise de estabilidade e manobrabilidade do *flatfish* ganharam grande consistência teórica aliada à avaliação dos resultados das simulações à luz de elementos de Engenharia Oceânica, Engenharia Mecânica, Física, Estatística, Computação e Matemática. Foram incluídos, por exemplo, cálculos do Momento de Inércia do VSA e das acelerações angulares obtidas por efeito de torques rotacionais, trazendo maior relevância e aplicabilidade aos resultados.

3-D realistic simulations over a Flatfish shaped AUV submitted to ocean currents.

G. da Silva Costa^{a,b}, M. P. Almeida^{c,d}, A. R. V. de Melo Filho^b, A. T. da
Cunha Lima^{e,d}, I. C. da Cunha Lima^{b,d,f,*}

^a*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Camaçari, BA, Brazil*

^b*SENAI-Cimatec, Salvador, BA, Brazil*

^c*Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brazil*

^d*Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, INCT-GP, Salvador, BA, Brazil*

^e*Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brazil*

^f*Pursuelife - Consultancy on Applied Science, Salvador, BA, Brazil*

Abstract

This work aims to analyze the torque effects produced by the hull-wake interaction on the maneuverability of a flatfish-shaped AUV, by 3-D realistic scale computational simulations. On account of the inertia the AUV provides a self-averaging mechanism that erases the high frequency components. Following this line, we processed a high frequency filter on the torques time series. We concluded that the flatfish shape has an excellent capacity of maneuverability under low velocities, demonstrated by its very small torque variations over time as the inlet speed decreases. We also observe that the pitch component has high torque oscillations over time with drift (also called yaw) angles, showing a significant increment of amplitudes when this angle becomes 10° . That represents an important concern about flatfish maneuverability while, on the other hand, the roll component has shown the lowest oscillations among the three rotational degrees of freedom. The yaw component increases moderately with the increase of yaw angles of attack. The description above, especially for low speeds, indicates that the flatfish-shaped AUV presents suitable conditions for missions executing scanning and filming tasks that require good stability and controllable maneuverability.

Keywords: AUV, numerical simulation, maneuverability, OpenFOAM

*Corresponding author at ivandacunhalima@pq.cnpq.br

1. Introduction

The occurrence of oil reservoirs in deep waters around the world has stimulated several researches on equipments, seabed lying structures, exploration and monitoring procedures, among other related areas. The impossibility of human presence in that depth, and the extreme difficulty of electromagnetic signal propagation in deep sea salt water present challenges for monitoring submersed structures. Modern technologies, for instance Oceanic Background Seismic (OBS), use submersed sensors. Other equipments like risers, pipelines and manifolds are also present in deep waters for oil and gas exploration. This new reality on oil exploration energized the area of autonomous underwater vehicles (AUV), an interesting device to solve problems like the ones described above.

Two concepts are important to the understanding of the vehicle hydrodynamic behavior. Motion stability (here called just stability) is defined as the capacity to return to an initial equilibrium state without helmsman intervention (control system) when an external force or torque momentarily disturbs the motion. Maneuvering ability concerns the capacity to keep a predefined course, as well as to perform maneuvers to accomplish specific tasks. In the case of submarines this ability (here mentioned as maneuverability) includes both horizontal and vertical motions [1]. For full use, AUV needs precision on following its routes, on facing ocean currents and turbulence which require stability in missions. The AUV must present a control system capable of keeping and correcting course in presence of deviations. Thrusters should provide opposing forces to maintain balance in presence of torques and forces generated by the incoming turbulent currents, as well as those generated by the turbulent wake. The vehicle hull shape represents a huge influence on generating this turbulent wake [2] that mightily interferes on maneuverability and stability. The design of such vehicle, therefore, must consider the fact that the thrusters must overcome the effects on maneuverability caused by these forces and torques [3].

Recent researches [2, 4, 5, 6, 7] enhance the importance of simulations of the hydrodynamic components analysis and the influence of the hull shape on the t AUV maneuverability and stability. The possibility of autonomous docking to recharge batteries and transmit data for the control base also represents a smart choice of logistic action in face of difficulties presented by high depth. The approach to the docking area also requires precision on maneuverability and good stability from the AUV[8].

Thanks to modern advances in high performance computing it is possible, at present, to perform simulations in realistic 3-D scale, like the ones done in this work. These simulations took place at Yemoja supercomputer, at SENAI-CIMATEC (Bahia-Brazil). In order to calculate the time series of torques and forces in a transient regime simulation, the Navier-Stokes equations were solved with the OpenFOAM platform, an open source software for solving differential equations encoded in C++ language, using the Finite Volume Method [9]. The pisoFoam solver and the LES (Large Eddy Simulations) turbulence model were the basis for the transient numerical procedures. The constraint concerning numerical stability required a timestep of 10^{-5} seconds for a rigorous refined mesh. More discussions about discretization of time and space will be given in subsection 2.1. The subsection 2.3 brings details of further calculations, like Fourier Transform filtering over time series (to absorb inertial response) and average calculation procedures (to encompass the fully developed turbulence and ergodicity).

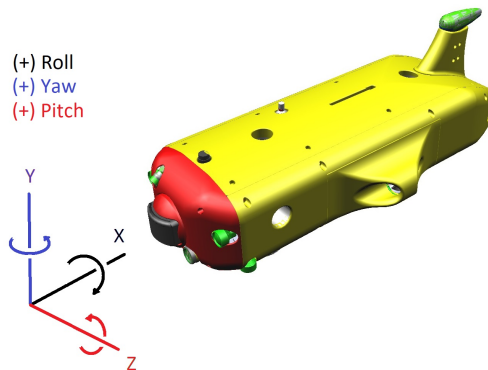


Figure 1: The Flatfish AUV 3-D model representative image with rotational degrees of freedom.

2. Simulations Details

2.1. Model Specifications and Meshing

The Flatfish Project of SENAI-CIMATEC in partnership with Shell/BG Brazil conducted researches on a flatfish shaped AUV, as shown in Fig. 1.

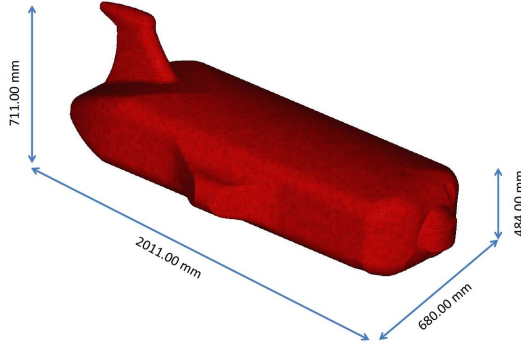


Figure 2: The Flatfish AUV surface mesh with dimensions for reference.

The project aimed to achieve precision in high resolution visual 3-D inspections on gas and oil exploration equipments placed in deep water. The ability to maintain a pre-established route is fundamental for the mission success. To accomplish such goal, a stability and maneuverability analysis is paramount. In this work, in parallel to the Flatfish Project, we performed simulations in a 3-D realistic scale (the real model dimensions can be seen in Fig. 2). The domain wind tunnel dimensions are: $\Delta x = 16m$, $\Delta y = 10m$ and $\Delta z = 10m$. This places the AUV two length scales from the inlet wall of the tunnel, five length scales from the outlet, six and half width scales from the upper and lower walls, and seven width scales from left and right sides. This approach is in agreement with the pattern used by automotive industries [10].

The unstructured mesh grid was built in Hypermesh software by Altair [11] with a total of 8.73 million elements. After some meshing tests, a mesh grid was established starting from a size of $10mm$ that emphasizes greater refinement close to the boundary layer region in order to capture more precisely the effects of the turbulent wake over the AUV hull. Figures 3 and 4 show the details of the mesh inside the wind tunnel and details on the AUV wet surface as well as the important region of the fluid surrounding it. Figure 4 shows the growth rate of cell size along the domain that was assigned to achieve optimal computational performance.

A mesh study was conducted based on the velocity time series, as shown in Fig. 5 with the convergence of the component U_x for three different mesh resolutions along the initial 0.7 s, corresponding to 70,000 iterations. We adopted the grid with 8.73 million elements because it showed similar oscillations to the most refined mesh (the one with 9.36 million elements) while

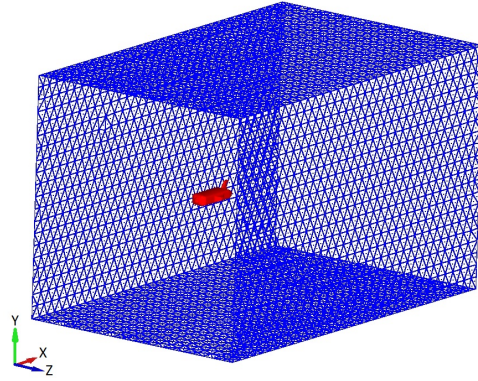


Figure 3: Wireframe for wind tunnel with Flatfish AUV positioned inside.

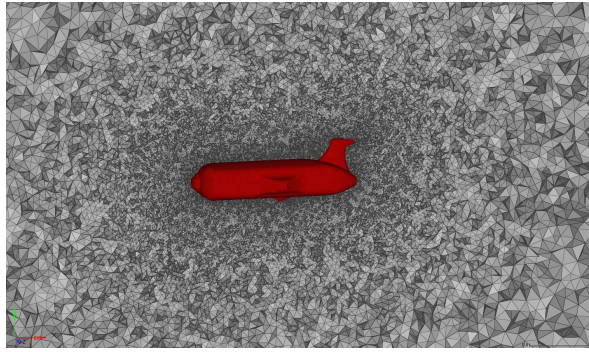


Figure 4: 3-D Mesh details.

guaranteeing the numerical procedures stability. We also found this choice reasonable in what concerns CPU running time.

The complexity of the numerical calculation required the use of 16 processor nodes in a total of 320 cores on 256 GB memory partitions. In these conditions, each simulation lasted for three to four weeks for a total of approximately two million iterations.

2.2. Numerical Procedures

The dynamics of the velocity field is governed by the momentum and mass conservation, consisting of the Navier-Stokes equations,

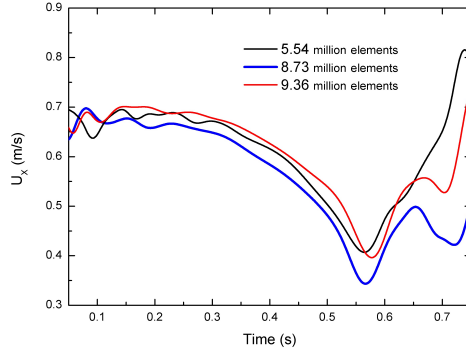


Figure 5: U_x analysis of three different mesh domains.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

together with the continuity equations, or mass conservation equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (2)$$

In equations (1) and (2), the operators D/Dt and ∇ represent the material derivative and the gradient, respectively. ρ represents the density, \mathbf{u} the velocity field vector, p the pressure, μ the viscosity, and \mathbf{f} the external body force. The parameters and the initial conditions of the system necessary for the solution of differential equations were established in order to characterise the fluid as deep seawater. The non-slip condition was adopted, and the inlet velocity was set to $1.0m/s$ and $0.5m/s$, considering the relative velocity between the AUV and the frontal sea current to the submarine.

The torque, T , the drag and the lift forces, D and L , respectively, were calculated by OpenFOAM during the processing of the Navier-Stokes equations solutions through the integration of the stress tensor over the surface of the AUV. Once the drag (D) and lift (L) components are obtained, the hydrodynamic coefficients for the drag (C_D) and lift (C_L) are obtained, according to:

$$C_D = 2 \frac{D}{\rho U^2 A}, \quad (3)$$

$$C_L = 2 \frac{L}{\rho U^2 A}, \quad (4)$$

where A is the area of the external surface of the model, ℓ its length, U is the speed at the inlet of the wind tunnel, and ρ is the fluid density. The coefficients C_D and C_L are dimensionless. These coefficients determine the power law of drag and lift on the flow velocity. In other words, they determine how these quantities deviates from the square law.

The OpenFOAM platform applies the Finite Volume Method (FVM) to solve differential equations in a C++ language encoded routine [12]. To generate the time series of torques and hydrodynamical forces, we adopt the pisoFoam solver (native of OpenFOAM with PISO - Pressure Implicit with Splitting of Operator - protocol) for a transient regime. In order to validate the simulations carried out by the pisoFoam-LES package, we performed a series of simulations in a section of a partially obstructed duct with a rigorous refinement of a structured mesh to study the variations of the boundary layer velocity patterns in the vicinity of the obstacle, comparing with the experimental results observed in the literature in [13]. Considerable agreement was achieved, and this was taking as a criterium of reliability in the numerical results obtained by the solver.

Limited by computational issues, as well as by the numerical stability of the applied methods, it became necessary to use the LES (Large Eddy Simulations) turbulence model [14] and a timestep of 10^{-5} seconds in order to control de Courant number, expressed by:

$$Co = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x}. \quad (5)$$

For a small Δx , representing a rigorous mesh refinement like the one that has been used here (starting from $10mm$), an even smaller scale of Δt , representing the time discretization (timestep), becomes necessary, in order to keep the simulation running, specially in 3-D realistic scale simulations that requires huge computational power. All coefficients were calculated for the AUV real characteristics, and for three different angles of attack - the angle between the apparent current and the bow-stern axis of the AUV, 0° , 5° , and 10° .

2.3. Post-processing

In order to proceed to the simulation post-processing steps, some precautions were taken. At first, it was necessary to assure that the fluid had flown approximately ten times the AUV dimension, establishing an end time for the simulation associated to the inlet velocity. That demand was necessary to guarantee the enforcement of the ergodic hypothesis [15]. As we can see in [16, 17, 18], precaution was taken to prevent oscillations on the velocity vector generated by an undeveloped turbulence. A large number of iterations was considered before the process becomes statistically stationary, i. e., before it reaches a mature (ergodicity attained) stage of turbulence and permit the use of the time averages in replacement of the ensemble averages [19]. By inspection of starting times t , we calculated all post-processing averages only after a starting point corresponding to the 100,000 iteration [16].

$$\overline{u(\mathbf{r}, t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\mathbf{r}, t') dt' \quad (6)$$

Another important aspect of the post-processing is the high frequency oscillations on the time series for torques and forces. A self-averaging mechanism due the inertia of the AUV erases these components (in a natural process) indicating that the control system should not be concerned with these fast deviations. In order to filter these oscillations, we processed a Fourier Transform at the time series establishing a cut-off frequency of $3Hz$ (by hand). The anti-transform of the Fourier series generates a smoother curve considering only the low-frequency range [16]. Proceeding this way the results are better associated to the real motion and also better interpreted by the navigation control system. The effect of the Fourier filter on the yaw torque can be seen in the Fig. 6.

The post-processing tool package Paraview, by Kitware obtained with the OpenFOAM [20] was used at first for checking simulations visualization. We observed important turbulence beside and behind the AUV stern, as we can easily see in Fig. 7. The velocity vector deviations inside the turbulent wake observed all over the simulations can explain the oscillations we have seen on the torques time series. These oscillations are caused by the presence of protruding structures on the hull like sails or fins, mainly. As we will discuss in Section 3, the turbulent wake generated by AUV hull shape [2] represents significant influence on AUV maneuverability and stability.

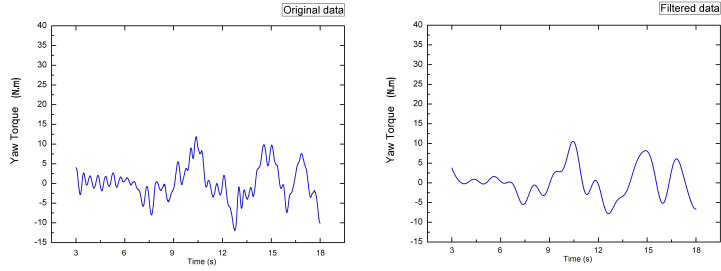


Figure 6: Effect of the FFT filter applied on the yaw component of the torque.

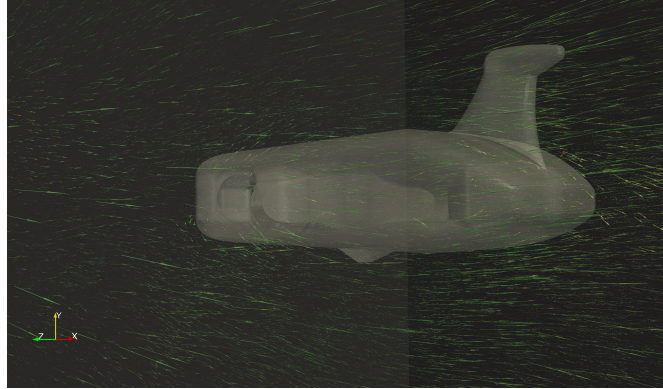


Figure 7: Velocity vector deviations inside the turbulent wake.

3. Results and discussions

Figure 8 shows the probability density function for the drag coefficient according to Eq.(3) for two different values of the drift angles of attack. We notice a normal distribution function in both cases. In order to analyze the results, we fitted a Gaussian single peak function of the form:

$$y = y_0 + A \exp \frac{-(x-x_0)^2}{2w^2} \quad (7)$$

where x_0 is the average and w the variance.

The drag distribution function for the Flatfish AUV facing the sea current (zero drift angles of attack), shows the distribution function to be sharper

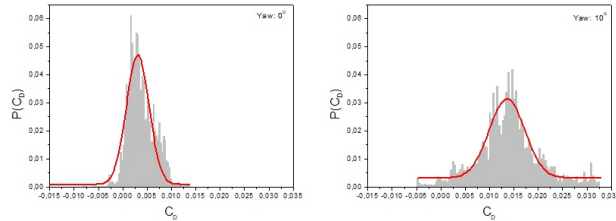


Figure 8: Column diagrams for the drag distribution.

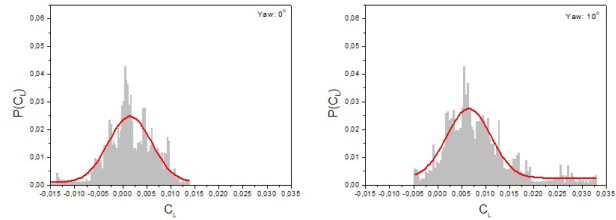


Figure 9: Column diagrams for the lift distribution.

with low $x_0 = 0.00397$, $w = 0.00234$, $A = 0.04615$ confirming a great probability for the occurrence of a relatively low drag. As we look for 10° , the distribution function becomes wider, with greater $x_0 = 0.01361$, $w = 0.00366$, and smaller $A = 0.02829$. The probability for the occurrence of higher drags increases for greater angles of attack, as expected.

Figure 9 shows the probability density function for the lift coefficient Eq.(4) for the same two values of drift angles of attack. For 0° the parameters of the distribution function are: $x_0 = 0.00151$, $w = 0.00451$, $A = 0.02388$. As we look at the distribution for 10° , it gives $x_0 = 0.00649$, $w = 0.00459$, $A = 0.0251$, showing that it has greater variance.

We calculated the average drag and lift coefficients for two different drift angles of as can be seen in Fig. 10. It can be noted that the lift increases by a factor of 10 for each 5° of angle variation. That indicates that the lift is a relevant parameter for course keeping. One can also note that there is a decreasing drag from 0° to 5° and a turnaround for its growth when the angle goes from 5° to 10° , which is consistent with results obtained for a fishtail shaped AUV [16]. It is important to stress, however, that different hull shapes result into different hydrodynamic behavior, as emphasized by

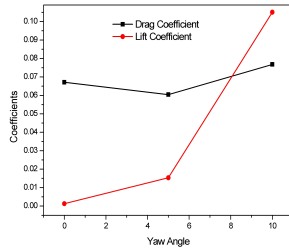


Figure 10: Drag and Lift coefficients over angle of attack.

these simulations.

A great concern lies on the torque oscillations under different drift angles of attack, which must be compensated by the control of the thrusters, playing the role of an auto-pilot. The same previous conditions were imposed in order to calculate the torque time series: three angles of attack (0° , 5° , 10°) were simulated clockwise in the xz -plane, and an inlet velocity of $1.0m/s$. The results for the three components of the torque, yaw, pitch and roll, are shown in Fig. 11. The vortex production on the wake of the AUV is paramount. The flatfish AUV hull influences the size of the generated vortices [21], since it is known that obstacles are vorticity injectors in flows with high Reynolds number [17]. Therefore, the torque applied on the AUV hull results from two different sources. The first one is a direct effect of the incident turbulent flow. The second, much more important in the present analysis, results from the interaction hull-wake. In order to establish some reference for the maneuverability, we considered here the number of helm movements per minute necessary to keep course. The choice for torques analysis is about the range of corrections the auto-pilot has to do in order to keep the mission course. Since this corrections have to be done promptly and continuously, the evaluation of the torques time series of the three rotational degrees of freedom proved to be essential in maneuverability study. According to the observation of Fig. 11, we can see that the roll and yaw torques increase slightly (in the positive direction) with the increment of the angle from 0° to 5° , and that the oscillations and amplitudes grow more strongly near 10° , also with a positive trend. On the other hand, pitch at 5° presents oscillations closer to zero than when the angle is 0° , but varies sharply when the angle of attack reaches 10° , which illustrates greater difficulty in maneuvering in this

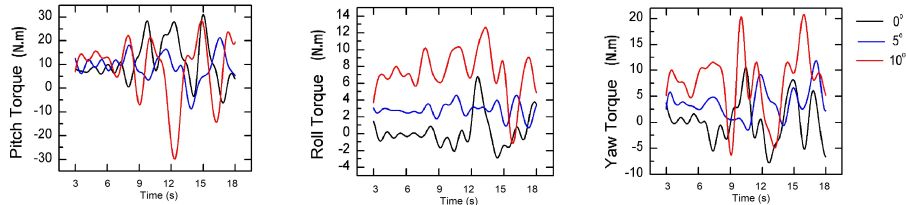


Figure 11: Comparative torques for different drift angles of attack. Black lines for 0° , blue lines for 5° and red lines for 10° .

direction. The presence of a sail (also called fin) at the end of the body breaks the symmetry of the hull shape. The fin induces a deviation on the fluid flow behind the sail causing turbulence on the wake, increasing the oscillations on the pitch moment [7, 22]. This behavior can be observed both on Figs. 11 and 12 illustrating the turbulent velocity vector on the AUV wake. It is important to point that a positive yaw turns the AUV anticlockwise, restoring the course, and a positive pitch points the AUV down. In terms of stability, a restoring torque is paramount. When fluid-structure interaction causes the body to rotate in some direction, a restoring torque produced by the shape of the hull gives the AUV a natural tendency to maintain course, which translates into good stability. As can be seen in figure 11, as the drift angle increases from 0° to 10° , a positive yaw torque trend is also increased, which tends to return the AUV to the original position with the restoring torque action.

It is expected that with increasing Reynolds numbers (here represented by the increment in inlet velocity), the level of turbulence in the flow increases and it would bring greater influence of the wake vorticity resulting into stronger oscillations of the torques [15]. To confirm this assumption another group of simulations were performed with an inlet speed of $0.5m/s$. Figure 13 shows that the three torques present a considerable gain in the amplitude of oscillations when the velocity increases from $0.5m/s$ to $1.0m/s$. It illustrates the expanded influence of the wake on the AUV maneuverability, highlighting the roll as the most stable component and the pitch as the responsible for the strongest oscillations. These graphs also demonstrate that at low speeds the torques oscillate weakly around the zero value, demonstrating that the Flatfish hull shape is suitable for visual inspections or filming of

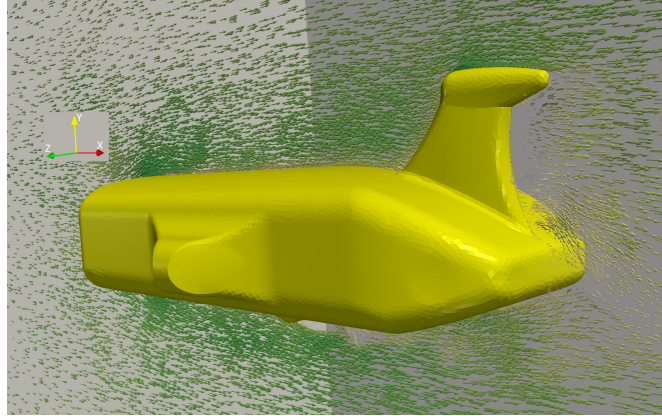


Figure 12: Velocity vector in the turbulent wake behind the AUV fin.

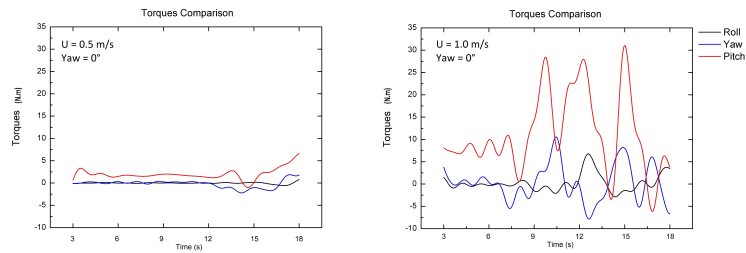


Figure 13: Comparative torques for different inlet velocities. Black lines for Roll, blue lines for Yaw and red lines for Pitch.

the seabed because of its small course variation at low speed.

The dynamic response to the torque is the generated angular acceleration in the corresponding rotation axis. These accelerations are determined by the components of the inertia tensor. A too much fast oscillation of the angular acceleration does not change the angular velocity considerably. The inertia tensor depends on the mass distribution (hull, navigation system and payload inside the AUV).

A complete treatment of the dynamics of the AUV, even in the bare hull approximation, goes beyond the scope of this work. However, some hints about stability and maneuverability can be extracted from the torques and their response.

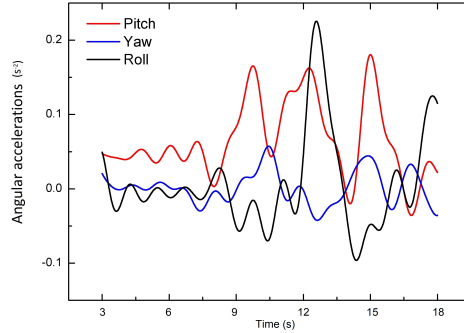


Figure 14: Angular accelerations for yaw angle 0° and $1.0m/s$ inlet velocity. Black lines for Roll, blue lines for Yaw and red lines for Pitch.

We calculated the components of the inertia tensor in an unrealistic and unfavorable condition, that of a homogeneous mass distribution with the same density of the salt water filling completely the inner volume of the bare hull. The principal axis components obtained in the simulation are much greater than the off-diagonal components. These elements are, in this approach, constant. Their values are, respectively, $I_{xx} = 29.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_{yy} = 184.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ and $I_{zz} = 172.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. With these parameters the time series for the angular acceleration for yaw, pitch and roll responding to the torques at yaw angle of attack 0° are shown in Fig. 14. It is important to stress that these response are just indicative of trends. In fact, as discussed previously, the torque depends on the angle of attack and this must be taken into account in the solution for the rotational motion. In any case, Fig. 14 indicates that, with the assumption of uniform mass distribution inside the hull, the instantaneous initial rotation at zero angle of attack is dominated by the pitch.

4. Conclusions

We have performed numerical simulations of the Navier-Stokes equation to calculate the hydrodynamic forces and torques applied on a bare hull Flatfish model for an AUV. The results show how important is to guarantee a propulsion such that the thrusters ensemble might overcome the lift generated

by a non-zero angle of attack to keep the course. A Fourier transform used to filter high frequency oscillations suggests how fast the navigational control system must react to guarantee maneuverability of the AUV.

The initial torques obtained are all positives generated by restoring forces, showing stability in the rotational motion. The calculation also put in evidence the effect of the AUV fin generating the turbulent wake. While the fin has a fundamental contribution to the stability in the yaw degree of freedom, it also contributes to increase the wake turbulence and increasing the pitch component of the rotational motion.

To conclude, we believe time-dependent numerical simulations of the hydrodynamical forces and torques based on realistic models, as the ones performed here for a Flatfish AUV, are important tools to the design and to the project of the navigational system of the vehicle. In the present case, we put in evidence the wake-stern interaction on the dynamic response. The effects of this interaction appears when the simulation provides the fluctuating velocity fields instead of the average fields. The fluctuations on the torque for low frequencies are an important effect determining the AUV maneuverability.

Acknowledgment

I. C. da Cunha Lima thanks the FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) (Grant 1241/2017). This work was partially supported by the Shell/BG Brazil - Flatfish Project .

References

- [1] Crane, C.L., Eda, H., Landsburg, A., 1989. Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [2] Chakrabarti, R. et al., 2014. Maneuverability and handling of the penguin-shaped autonomous underwater vehicle (AUV) PreToS, analytical and experimental results. In: OCEANS 2014-TAIPEI. IEEE, p. 1-6.
- [3] Schlichting, H., Gersten, K., 2003. Boundary-layer theory. Springer Science and Business Media.
- [4] Mansoorzadeh, S., Javanmard, E., 2014. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle

(AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*, v. 51, p. 161-171.

- [5] Dantas, J.L.D.; de Barros, E.A., 2013. Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability. *Applied Ocean Research*, v. 42, p. 168-181.
- [6] Seo, D.C., Jo, G., Choi, H.S., 2008. Pitching control simulations of an underwater glider using CFD analysis In: *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*. IEEE, p. 1-5.
- [7] Kim, S.E., Rhee, B.J. and Miller, R.W. 2013. Anatomy of turbulent flow around DARPA SUBOFF body in a turning maneuver using high-fidelity RANS computations. *International Shipbuilding Progress*, v. 60, p. 207231. See, also, references therein.
- [8] Wu, L. et al., 2014. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents. *Ocean Engineering*, v. 85, p. 110-126.
- [9] Greenshields, C.J., 2015. *Openfoam-the Open Source CFD Toolbox User Guide*. Version, v. 3, n. 1.
- [10] Hucho, W.H., 2013. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. Elsevier.
- [11] For details of HyperMesh by Altair, see <http://www.altairhyperworks.com/product/HyperMesh>.
- [12] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education,
- [13] Tritton, D. J., 2012. *Physical fluid dynamics*. Springer Science and Business Media.
- [14] Pope, Stephen B. , 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- [15] Tennekes, H. and Lumley, J.L., 1972. *A first Course in Turbulence*, MIT Press.

- [16] da Silva Costa, G., Ruiz, A., Reis, M.A., da Cunha Lima, A.T., de Almeida, M.P. and da Cunha Lima, I.C., 2017. Numerical analysis of stability and manoeuvrability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) with fishtail shape. *Ocean Engineering*, v. 144, p. 320-326.
- [17] da Cunha Lima, A.T., da Cunha Lima, I.C., Almeida, M.P., 2016. Analysis of turbulence power spectra and velocity correlations in a pipeline with obstructions. *International Journal of Modern Physics C*, p. 1750019.
- [18] Santos, F.R., da Silva Costa, G., da Cunha Lima, A.T., de Almeida, M.P., da Cunha Lima, I.C. ,2017. Detection of memory loss of symmetry in the blockage of a turbulent flow within a duct. *International Journal of Modern Physics C*, v. 28, n. 06, p. 1750079.
- [19] Lumley, J.L., 1998. *Stochastic Tools in Turbulence*, p.4, Dover.
- [20] For details of Paraview by Kitware, see <https://www.paraview.org>.
- [21] Patil, P.P.; Tiwari, S., 2008. Effect of blockage ratio on wake transition for flow past square cylinder. *Fluid Dynamics Research*, v. 40, n. 11, p. 753-778.
- [22] Lee, S., 2015. *Topology Model of the Flow around a Submarine Hull Form*. No. AR-016-453, DST-Group-TR-3177. Defence Science and Technology Group, Maritime Division Fishermans Bend, Victoria Australia.

Conclusão

Este trabalho teve por objetivo construir um modelo para análise de estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos (VSA). É sabido que essas análises podem ser de grande valor para o desenvolvimento desses equipamentos. O dimensionamento de potência, capacidade de manobrar, bem como a estabilidade de veículos, autônomos, particularmente, são características essenciais a serem identificadas com qualidade, e as simulações numéricas computacionais são uma ferramenta indicada para tal, amplamente verificada pela vasta literatura na área, bem como confirmada com a modelagem proposta nesta pesquisa. Em grande parte, o estabelecimento de uma metodologia de análise dos atributos hidrodinâmicos de modelos de veículos submarinos, especialmente quando estes são autônomos, é a ideia central que norteia toda a pesquisa.

Diversas situações e diferentes modelos de VSA foram submetidos à análise proposta aqui através de simulações computacionais baseadas no MVF (Método dos Volumes Finitos) e realizadas com o uso da plataforma livre OpenFOAM por solução das equações diferenciais parciais de Navier-Stokes, além de equações complementares como de Continuidade e da Energia Cinética, dentre outras.

Um importante aspecto do modelo proposto é o filtro de frequências de séries temporais aplicado para eliminação de flutuações não realísticas captadas pelas simulações. Através da aplicação da Transformada de Fourier sobre as séries temporais de forças e torques destacando as frequências e eliminando as mais altas (*cutoff* de aproximadamente 3Hz) pela aplicação da anti-Transformada no retorno ao domínio do tempo, espera-se representar mais fielmente as oscilações que de fato podem ser captadas pelo controle autônomo do VSA e que não foram absorvidas pela inércia do veículo, trazendo um retrato mais realístico das flutuações de componentes hidrodinâmicas.

No que tange às considerações estatísticas, foram descritas na seção 2.3 as precauções adotadas na modelagem para que fossem cumpridos os requisitos de aplicação da Teoria Ergódica tais como a inspeção da estacionariedade estatística através da estabilidade das médias e a garantia do alcance da natureza constante das correntes de vórtices (*vortex street*), sustentando a ergodicidade como condição aplicável e indispensável aos cálculos realizados.

Os resultados das análises resultantes desse conjunto de protocolos de pré-processamento, processamento e pós-processamento (descritos, respectivamente nas seções 2.1, 2.2 e 2.3) foram publicados na forma de artigos científicos e registrados neste texto como parte

integrante da pesquisa (ver capítulo 3).

Foi proposto um modelo de investigação por simulações para avaliar a influência do formato (*shape*) do veículo na sua estabilidade e manobrabilidade quando submetido à corrente marinha. Uma bateria de simulações sobre três modelos simplificados de VSA com variação de sua popa em formato de “cauda de peixe - *fishtail*” foram realizadas nos moldes descritos no capítulo 2 pelo protocolo *visoFoam-LES*. Os resultados obtidos estão publicados em [Costa et al. \(2017\)](#) e exibem a capacidade de captação das características hidrodinâmicas de cada *fishtail-shape* e seus impactos na navegação do veículo. Os dados obtidos com a modelagem permitiram uma análise bastante completa da influência do *fishtail* na estabilidade e manobrabilidade dos modelos (ver resultados em 3.1.1), bem como dos efeitos de ângulos de ataque (cabecio) na geração de torques, componente fundamental da avaliação de estabilidade e manobrabilidade. A metodologia estabelecida neste artigo, projetada para dar consistência a partir de uma física mais simples por se tratar de um sistema 2-D, verificou-se deveras robusta e se tornou base de referência, como planejado, para a abordagem seguinte, em três dimensões.

A partir de uma modelagem bem estabelecida e validada para simulações 2-D, partiu-se para seu aperfeiçoamento e ampliação para um domínio tridimensional. É sabido que os fenômenos físicos não são distintos em sua natureza, mas sim em complexidade por aumento da dimensão, especificamente o aumento dos graus de liberdade do movimento, o que afeta diretamente o estudo de estabilidade e manobrabilidade. O maior agravante neste salto dimensional é, seguramente, o aumento da necessidade de poder computacional envolvido para a realização das simulações. O impacto pôde ser verificado nas três etapas da modelagem: *meshing*, solução numérica e análise de dados, mas também, muito severamente, em desempenho computacional e armazenamento de dados. Na construção das malhas o trabalho tornou-se muito mais especializado com necessidades de estudos de domínio computacional mais rigorosos (descrito na seção 2.1.2.1). No processamento das equações, agora vetorialmente tridimensionais, a definição do *timestep* precisou de novo ajuste adaptado às novas condições de simulação - ajuste mais fino de Número de Courant, bem como maior volume de informações processadas, muito embora o conjunto de equações seja o mesmo por natureza. O pós-processamento, lidando com uma massa de dados muito mais robusta, sofreu adaptações na estrutura do código FORTRAN e requereu maior capacidade computacional para executar as tarefas, mesmo as mais simples como a inspeção visual dos resultados por filmes, mantendo-se a descrição estatística e os esquemas de filtro por Transformada de Fourier. No que se refere ao desempenho de máquina requerido e ao armazenamento requisitado, o aumento da demanda só pôde ser equacionado pela utilização da computação paralela de alta performance (HPC Yemoja) e da utilização de espaços computacionais de ordem superior a 1TB (um TeraByte). No que concerne aos estudos de estabilidade e manobrabilidade, as bases teóricas e a modelagem já estavam bem estabelecidas, restando um ajuste para modelos reais em 3-D a partir do

acréscimo de novos graus de liberdade, principalmente os rotacionais. Analisando agora três componentes de torque (e não mais apenas uma como em 2-D), o mapeamento da estabilidade e manobrabilidade do VSA foi enriquecido e sua análise bem sucedida dependeu também da comparação das magnitudes e sentidos desses torques, além de ter sido acrescentada em um comparativo de velocidades de cruzeiro, onde foi possível identificar nitidamente a característica do *flatfish-shape* como excelente veículo para missões de inspeção e filmagem em baixas velocidades.

A modelagem construída ao longo da pesquisa se mostrou realmente eficaz na identificação de diversas características hidrodinâmicas de VSA: influência de hidrofólio na assimetria de torques afetando estabilidade e capacidade de manobra, influência de velocidade na flutuação e magnitude de torques sobre o casco, influência decisiva do *shape* na capacidade de manobrar e se manter em rumo de um veículo, são algumas das possibilidades indicadas pelo modelo interdisciplinar Matemático-Físico-Computacional-Oceânico proposto. Isto não significa, nem de perto, que a modelagem é completa em todos os aspectos que merecem nota neste tema, mas cumpre com clareza ao que se propôs (como verificado pelos resultados no capítulo 3) dentro de um escopo plenamente factível, razoável e aplicável do estudo de veículos submarinos. Nesse sentido, aliado às limitações e expectativas listadas na seção 1.2, abre-se uma gama de possibilidades para trabalhos futuros associados à esta pesquisa. A verificação da influência da rugosidade do casco na hidrodinâmica de um VSA a partir dos impactos gerados na camada limite é um ponto de interessante análise a ser realizada. Diversos aspectos que influenciam as correntes marinhas atuando num VSA em atividade chegaram a ser cogitados como itens de análise, mas terminaram por compor a lista de continuidade posterior da pesquisa: variações do relevo do fundo do oceano, obstáculos a montante do submarino tais como uma estrutura de doca, são elementos que indicam uma variação na natureza das correntes antes do contato com o VSA, o que sugere grande impacto nas tarefas de manobra, sem dúvida, um ponto por demais interessante a ser investigado. Um estudo mais complexo e avançado em técnicas de *meshing* dinâmico e adaptativo constituem importante avanço nas análises de manobrabilidade, também esperado como desenvolvimento a partir desta pesquisa. Espera-se que este trabalho possa ser um primeiro importante passo na continuidade de pesquisas nesta área agregando robustez, solidez e novos elementos que traduzam cada vez mais de perto uma realidade de aplicação.

Referências Bibliográficas

- CAO, D.; SONG, L.; LI, J.; YUAN, J.; ZHOU, Y. Determining the drag coefficient of a cylinder perpendicular to water flow by numerical simulation and field measurement. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 85, p. 93–99, 2014.
- CHAKRABARTI, R.; GELZE, J.; LEHR, H.; SCHMIDT, T. Maneuverability and handling of the penguin-shaped autonomous underwater vehicle (auv) pretos, analytical and experimental results. In: IEEE. *OCEANS 2014-TAIPEI*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- COSTA, G. da S. et al. Numerical analysis of stability and manoeuvrability of autonomous underwater vehicles (auv) with fishtail shape. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 144, p. 320–326, 2017.
- CRANE CL ; EDA, H.; LANDSBURG, A. *Principles of naval architecture*. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.
- DACUNHALIMA, A.; DACUNHALIMA, I.; ALMEIDA, M. Analysis of turbulence power spectra and velocity correlations in a pipeline with obstructions. *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific, v. 28, n. 02, p. 1750019, 2017.
- DACUNHALIMA, I. et al. Effects of torque produced by wake on the maneuverability of a flatfish autonomous underwater vehicle. In: IEEE. *OCEANS 2017-Anchorage*. [S.l.], 2017. p. 1–4.
- DANTAS, J. L. D.; BARROS, E. A. de. Numerical analysis of control surface effects on auv manoeuvrability. *Applied Ocean Research*, Elsevier, v. 42, p. 168–181, 2013.
- ESI-OPENCDFD. *OpenFOAM: The open source CFD toolbox*. 2018. URL: <https://openfoam.com>.
- GREENSHIELDS, C. J. Openfoam user guide. *OpenFOAM Foundation Ltd, version*, v. 3, n. 1, 2015.
- GSCHAIDER, B. *OpenFOAMWiki.net*. Dezembro 2017. URL: <https://openfoamwiki.net>.
- HUCHO, W.-H. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- JASAK, H. *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*. Tese (PhD em Engenharia Mecânica) — Imperial College, Londres, 1996.

- KIM, W.-W.; MENON, S. A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. In: *33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 356.
- LUMLEY, J. L. *Stochastic tools in turbulence*. [S.l.]: Courier Corporation, 2007.
- MANSOORZADEH, S.; JAVANMARD, E. An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (auv) using computational and experimental fluid dynamics methods. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 51, p. 161–171, 2014.
- NEWMAN, M. E. Complex systems: A survey. *arXiv preprint arXiv:1112.1440*, 2011.
- OSSES, J. *O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS*. Dezembro 2016.
[Http://www.esss.com.br/blog/2016/12/o-metodo-de-volumes-finitos/](http://www.esss.com.br/blog/2016/12/o-metodo-de-volumes-finitos/).
- PATIL, P. P.; TIWARI, S. Effect of blockage ratio on wake transition for flow past square cylinder. *Fluid Dynamics Research*, Elsevier, v. 40, n. 11, p. 753–778, 2008.
- PONTES, J.; MANGIAVACCHI, N. *Fenômenos de Transferência*. [S.l.]: SBM, 2016.
- POPE, S. B. *Turbulent flows*. [S.l.]: IOP Publishing, 2001.
- SANTOS, F. R.; COSTA, G. da S.; LIMA, A. da C.; ALMEIDA, M.; LIMA, I. da C. Detection of memory loss of symmetry in the blockage of a turbulent flow within a duct. *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific, p. 1750079, 2017.
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K.; KRAUSE, E.; OERTEL, H. *Boundary-layer theory*. [S.l.]: Springer, 2000.
- SEO, D. C.; JO, G.; CHOI, H. S. Pitching control simulations of an underwater glider using cfd analysis. In: IEEE. *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L.; LUMLEY, J. et al. *A first course in turbulence*. [S.l.]: MIT press, 1972.
- TRITTON, D. J. *Physical fluid dynamics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. [S.l.]: Pearson Education, 2007.
- WILCOX, D. C. et al. *Turbulence modeling for CFD*. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1998.
- WU, L.; LI, Y.; SU, S.; YAN, P.; QIN, Y. Hydrodynamic analysis of auv underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 85, p. 110–126, 2014.

ZOUNTOURIDIS, K. P. *Large Eddy Simulation of buoyant plumes*. Dissertação (Mestrado in Environmental Engineering) — University of Stavanger, Stavanger, 2017.

Simulações de escoamentos para análise da influência da turbulência na estabilidade e manobrabilidade de veículos submarinos autônomos

Gustavo da Silva Costa

Salvador, Dezembro de 2018.