

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

THADEU LOPES CORREIA DOS SANTOS

**Otimização geométrica da popa de um submarino
considerando sua eficiência hidro-volume e interação com
propulsor e duto**

São Paulo
2023

THADEU LOPES CORREIA DOS SANTOS

**Otimização geométrica da popa de um submarino
considerando sua eficiência hidro-volume e interação com
propulsor e duto**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Gustavo Roque da Silva Assi

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

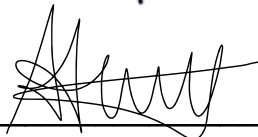
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de dezembro de 2023.

Assinatura do autor:

Thadeu Lopes Corcua dos Santos

Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Santos, Thadeu

Otimização geométrica da popa de um submarino considerando sua eficiência hidro-volume e interação com propulsor e duto / T. Santos -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

120 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Submarinos(otimização) 2.Casco de embarcações 3.Embarcações (projeto)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

Nome: SANTOS, Thadeu Lopes Correia dos

Título: Otimização geométrica da popa de um submarino considerando sua eficiência hidro-volume e interação com propulsor e duto.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 17 de novembro de 2023.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Gustavo Roque da Silva Assi

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. André Mitsuo Kogishi

Instituição: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Julgamento: Aprovado

Prof^a. Dra. Paula Suemy Arruda Michima

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Julgamento: Aprovado

Dedico o esforço que depositei neste trabalho ao meu avô Albertino Correia dos Santos (in memoriam), que continua sendo para mim exemplo de força e inspiração na vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ter me concedido saúde e força para concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Roque da Silva Assi por ter confiado em meu projeto de pesquisa e por todos os ensinamentos passados durante as reuniões e aulas, as quais tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, à minha esposa e ao meu filho, meus alicerces, por todo o apoio, paciência e compreensão nesta fase da minha vida.

Aos engenheiros Teilor Maciel Kopavnick e Odilon Rodrigues Filho que me acompanharam durante o desenvolvimento do tema e me forneceram todo o auxílio necessário.

Ao engenheiro e amigo de turma Rubens Cavalcante da Silva pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

À Escola Politécnica da USP pela confiança e estrutura fornecida para a realização dessa pesquisa.

*“Os povos são e fortes, as nações másculas e livres amam nas suas
Esquadras a imagem de sua própria existência.”*
(BARBOSA, 1896)

RESUMO

SANTOS, T. L. C. **Otimização geométrica da popa de um submarino considerando sua eficiência hidro-volume e interação com propulsor e duto.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

O trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta que tem por objetivo apresentar a geometria de popa de um submarino com a melhor eficiência hidro-volume para um propulsor já projetado, utilizando duto ou não, dentro do conceito intitulado de popa cheia pela literatura. A ferramenta possibilita ao usuário inserir requisitos e restrições geométricas no processo de seleção. Foi escolhido o modelo SUBOFF da DARPA como modelo de referência e o seu Coeficiente de Semnan como parâmetro. Foi criado um código no software MATLAB para a geração das linhas de popa, onde são inseridos os requisitos e as restrições geométricas como forma de seleção das linhas. A partir das linhas selecionadas são criadas as geometrias que serão avaliadas no software *Ansys* para obtenção da eficiência hidro-volume e verificação do comportamento da camada limite. O trabalho foi dividido em três fases: casco limpo, casco com propulsor e casco com propulsor e duto. As geometrias e as simulações no software *Ansys* são realizadas em um processo automatizado. A cada rodada de simulação, a melhor geometria encontrada é inserida em um processo de busca de uma nova linha de popa baseado em uma meta-heurística que guia e modifica as operações para produzir novas geometrias de melhor eficiência. Na 1ª fase é gerada uma popa sem interferência de propulsor ou apêndices no escoamento. Na 2ª fase é utilizado o propulsor MOD5a, cujos resultados também são utilizados para validação da ferramenta. Na 3ª fase é utilizado o MOD10 sem o estator a fim de verificar a influência de um propulsor com duto na eficiência hidro-volume e comparar com os resultados das fases anteriores. Os resultados obtidos das geometrias selecionadas, quando comparados ao modelo de referência, apontaram que a ferramenta se mostrou eficaz em conjunto com a estratégia de busca adotada e que a utilização de propulsor em duto aumenta a eficiência hidro-volume de um submarino.

Palavras-chave: Popa. SUBOFF. Coeficiente de Semnan. Eficiência hidro-volume. Propulsor. Duto. Meta-heurística.

ABSTRACT

SANTOS, T. L. C. **Geometric optimization of a submarine stern considering its hydro-volume efficiency and interaction with propeller and duct.** 2023. Master's Dissertation (Naval Architecture and Ocean Engineering – Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2023).

This study developed a tool that aims to present the stern geometry with the best hydro-volume efficiency for an already designed propeller, using duct or not, within the concept entitled as full stern by literature. The tool allows the user to insert requirements and geometric restrictions in the selection process. The DARPA SUBOFF model was chosen as the reference model and its Semnan coefficient as the parameter. A code was created in the MATLAB software to generate the stern lines, where the requirements and geometric restrictions are inserted as way of selecting these lines. From the selected lines, geometries are created which will be evaluated in the *Ansys* software to obtain the hydro-volume efficiency and check the boundary layer behavior. The study was divided into three phases: bare hull, hull self-propelled and hull self-propelled with duct. The geometries and simulations in the *Ansys* software are carried out in an automated process. At each simulation round, the best geometry found is inserted into a search process for a new stern line based on a metaheuristic that guides and modifies the operations to produce new geometries with better efficiency. In the 1st phase, a stern is generated without interference from the propeller or appendages in the flow. In the 2nd phase, the MOD5a propeller is used, whose results are also used for tool validation. In the 3rd phase, the MOD10 is used without the stator in order to check the influence of a ducted propeller on the hydro-volume efficiency and compare it with the results of the previous phases. The results obtained from the selected geometries, when compared to the reference model, showed that the tool proved to be effective in conjunction with the adopted search strategy and the use of ducted propeller increases the hydro-volume efficiency of a submarine.

Keywords: Stern. SUBOFF. Semnan coefficient. Hydro-volume efficiency. Propeller. Duct. Metaheuristic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Submarino Turtle de Bushnell | 19 |
| Figura 2 - Submarino H.L Hunley | 20 |
| Figura 3 - Submarino a vapor Nordenfelt II..... | 21 |
| Figura 4 - Submarino Type UC-1 | 22 |
| Figura 5 - Submarino Classe Typhoon | 23 |
| Figura 6 - Submarino Classe Ohio (SSGN) | 24 |
| Figura 7 - Submarino Classe 212A..... | 25 |
| Figura 8 - Orientação aplicada à popa..... | 27 |
| Figura 9 - Fluxograma do trabalho..... | 28 |
| Figura 10 - Fluxograma do algoritmo de busca empregado | 31 |
| Figura 11 - Viscosidade dos fluidos | 33 |
| Figura 12 - Regimes de escoamento | 35 |
| Figura 13 - Separação da camada limite | 35 |
| Figura 14 - Características da bolha de separação | 36 |
| Figura 15 - Distribuição da pressão ao longo do casco | 37 |
| Figura 16 - Representação das resistências..... | 39 |
| Figura 17 - Formas de duto mais utilizadas atualmente | 45 |
| Figura 18 - Submarino Classe Yūshio | 48 |
| Figura 19 - Resistência X L/D para um submarino de casco PMB | 48 |
| Figura 20 - Submarino Classe Astute | 49 |
| Figura 21 - Variações de pressão para um corpo de revolução | 50 |
| Figura 22 - Geometria do modelo SUBOFF..... | 52 |
| Figura 23 - Conjunto Universo de soluções..... | 53 |
| Figura 24 - Triangulação de Delaunay..... | 55 |
| Figura 25 - Coeficiente de Cilindro | 56 |
| Figura 26 - Dimensões da geometria com malha fixa..... | 58 |
| Figura 27 - Apresentação da geometria com propulsor (2ª fase) | 58 |
| Figura 28 - Apresentação da geometria com propulsor e duto (3ª fase)..... | 58 |
| Figura 29 - Geração da malha gerada no <i>Ansys Meshing</i> | 59 |
| Figura 30 - Recursos do <i>Ansys Meshing</i> | 59 |
| Figura 31 - Condições de contorno 1..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 - Condições de contorno 2 | 61 |
| Figura 33 - Análise de convergência de malha | 62 |
| Figura 34 - Resultados experimentais do modelo SUBOFF com casco limpo | 63 |
| Figura 35 - SUBOFF x Geometria selecionada da 1ª fase | 66 |
| Figura 36 - Resultados da 1ª rodada sem propulsor | 67 |
| Figura 37 - Resultados da 2ª rodada sem propulsor | 69 |
| Figura 38 - Resultados da 3ª rodada sem propulsor | 72 |
| Figura 39 - Resultados da 4ª rodada sem propulsor | 75 |
| Figura 40 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF com casco limpo | 76 |
| Figura 41 - Linhas de corrente - Geometria selecionada da 1ª fase | 76 |
| Figura 42 - Tensões de cisalhamento – Modelo SUBOFF casco limpo | 77 |
| Figura 43 - Campo de pressão – Modelo SUBOFF com casco limpo | 77 |
| Figura 44 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 1ª fase | 78 |
| Figura 45 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 1ª fase | 78 |
| Figura 46 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF casco limpo | 79 |
| Figura 47 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 1ª fase | 79 |
| Figura 48 - Linhas de corrente - Menor Coef. de Semnan | 81 |
| Figura 49 - Tensões de cisalhamento – Menor Coef. de Semnan | 81 |
| Figura 50 - Campo de pressão - Menor Coef. de Semnan | 82 |
| Figura 51 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Menor Coef. de Semnan | 82 |
| Figura 52 - Linhas de corrente - Maior volume da 1ª rodada | 84 |
| Figura 53 - Tensões de cisalhamento – Maior volume da 1ª rodada | 84 |
| Figura 54 - Campo de pressão - Maior volume da 1ª rodada | 85 |
| Figura 55 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Maior volume da 1ª rodada | 85 |
| Figura 56 - Propulsor MOD5a | 86 |
| Figura 57 - Comparativo método numérico x experimental | 87 |
| Figura 58 - Avaliação numérica do propulsor | 87 |
| Figura 59 - SUBOFF x Geometria selecionada da 2ª fase | 89 |
| Figura 60 - Resultados da 1ª rodada com propulsor | 90 |
| Figura 61 - Resultados da 2ª rodada com propulsor | 91 |
| Figura 62 - Resultados da 3ª rodada com propulsor | 93 |
| Figura 63 - Resultados da 4ª rodada com propulsor | 96 |
| Figura 64 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF | 97 |
| Figura 65 - Linhas de corrente - Geometria selecionada da 2ª fase | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 66 - Tensões de cisalhamento - SUBOFF | 98 |
| Figura 67 - Campo de pressão – SUBOFF | 98 |
| Figura 68 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 2ª fase..... | 99 |
| Figura 69 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 2ª fase | 99 |
| Figura 70 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF - MOD5a..... | 100 |
| Figura 71 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 2ª fase..... | 100 |
| Figura 72 - Conjunto Propulsor/Duto MOD10 | 101 |
| Figura 73 - SUBOFF x Geometria selecionada da 3ª fase | 103 |
| Figura 74 - Condições do fluxo entre popa e duto | 103 |
| Figura 75 - Resultados da 1ª rodada com propulsor e duto..... | 105 |
| Figura 76 - Resultados da 3ª rodada com propulsor e duto..... | 107 |
| Figura 77 - Resultados da 4ª rodada com propulsor e duto..... | 109 |
| Figura 78 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF | 110 |
| Figura 79 - Campo de velocidades do fluxo - Geometria selecionada da 3ª fase... | 110 |
| Figura 80 - Tensões de cisalhamento - SUBOFF | 111 |
| Figura 81 - Campo de pressão – SUBOFF | 111 |
| Figura 82 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 3ª fase..... | 112 |
| Figura 83 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 3ª fase | 112 |
| Figura 84 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF - MOD10..... | 113 |
| Figura 85 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 3ª fase..... | 113 |
| Figura 86 - Comparativo entre as popas selecionadas..... | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Taxa de variação em y entre rodadas | 30 |
| Tabela 2 - Características do modelo SUBOFF | 51 |
| Tabela 3 - Análise de convergência de malha..... | 62 |
| Tabela 4 - Resistência friccional x Resistência de forma – 1ª fase | 65 |
| Tabela 5 - Principais resultados do casco sem propulsor selecionado | 65 |
| Tabela 6 - Resultados da 1ª rodada sem propulsor | 67 |
| Tabela 7 - Resultado da 2ª rodada sem propulsor | 68 |
| Tabela 8 - Resultados da 3ª rodada sem propulsor | 70 |
| Tabela 9 - Resultados da 4ª rodada sem propulsor | 73 |
| Tabela 10 - Resistência friccional x Resistência de forma – Menor eficiência | 80 |
| Tabela 11 - Principais resultados do casco sem propulsor de menor eficiência | 80 |
| Tabela 12 - Resistência friccional x Resistência de forma – Maior volume..... | 83 |
| Tabela 13 - Principais resultados do casco sem propulsor de maior volume | 83 |
| Tabela 14 - Características do propulsor MOD5a | 86 |
| Tabela 15 - Resistência friccional x Resistência de forma – 2ª fase | 89 |
| Tabela 16 - Principais resultados do casco selecionado com propulsor | 89 |
| Tabela 17 - Resultados 1ª rodada com propulsor | 90 |
| Tabela 18 - Resultados 2ª rodada com propulsor | 91 |
| Tabela 19 - Resultados da 3ª rodada com propulsor | 92 |
| Tabela 20 - Resultados da 4ª rodada com propulsor | 94 |
| Tabela 21 - Características da popa do AUV baseado no modelo SUBOFF | 101 |
| Tabela 22 - Resistência friccional x Resistência de forma – 3ª fase | 104 |
| Tabela 23 - Principais resultados do casco selecionado com propulsor e duto | 104 |
| Tabela 24 - Resultados da 1ª rodada com propulsor e duto | 105 |
| Tabela 25 - Resultados da 2ª rodada com propulsor e duto | 106 |
| Tabela 26 - Resultados da 3ª rodada com propulsor e duto | 106 |
| Tabela 27 - Resultados da 4ª rodada com propulsor e duto | 108 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| AIP | Air Independent Propulsion |
| AUV | Autonomous Underwater Vehicle |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DARPA | Defense Advanced Research Projects Agency |
| DDNM | Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha |
| DTRC | David Taylor Research Center |
| EUA | Estados Unidos da América |
| HSwMS | His Swedish Majesty's Ship |
| LabHidro | Laboratório de Hidrodinâmica |
| PMB | Corpo Médio Paralelo |
| RANS | Reynolds Averaged Navier-Stokes |
| SSBN | Ship Submersible Ballistic Nuclear |
| SSGN | Ship Submersible Guided Nuclear |
| SST | Shear Stress Transport |
| STP | Submarine Technology Program Office |
| URSS | União das Repúblicas Socialistas Soviéticas |
| USS | United States Ship |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| τ | Tensão de cisalhamento |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| Re | Número de Reynolds |
| ρ | Massa específica |
| V | Velocidade do corpo submerso |
| L | Comprimento da superfície onde o fluido escoar |
| β | Constante empírica do modelo de turbulência |
| β^* | Constante empírica do modelo de turbulência |
| θ | Variável genérica |
| $\bar{\theta}$ | Variável genérica de valor médio |
| θ' | Variável genérica de valor flutuante |
| α_1 | Constante empírica do modelo k- SST |
| φ | Módulo do tensor de deformação média S_{ij} |
| P^k | Produção de energia cinética por tensão de cisalhamento |
| ω | Taxa de dissipação específica da turbulência |
| k | Energia cinética turbulenta |
| μ_t | Viscosidade dinâmica turbulenta |
| τ_{ij} | Tensor das tensões de Reynolds |
| d | Distância da superfície de não deslizamento |
| F_1 | Função de mistura |
| F_2 | Função de mistura para a viscosidade turbulenta |
| α_1 | Constante do modelo SST |
| arg_1 | Argumento de funções dos modelos SST |
| arg_2 | Argumento de funções dos modelos SST |
| S_{ij} | Tensor taxa de deformação |
| ℓ | Comprimento axial em pés do modelo em escala |
| R | Comprimento radial em pés do modelo em escala |
| I | Intensidade da turbulência |
| φ | Escala de comprimento da turbulência |
| δ | Espessura da camada limite turbulenta |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | A EVOLUÇÃO DAS SILHUETAS DOS SUBMARINOS..... | 18 |
| 1.2 | OS SUBMARINOS PÓS-GUERRA FRIA..... | 23 |
| 1.3 | APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA..... | 25 |
| 1.4 | OBJETIVOS E METODOLOGIA APLICADA..... | 26 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 29 |
| 2.1 | MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADO..... | 29 |
| 2.2 | VISCOSIDADE E TENSÃO DE CISALHAMENTO..... | 32 |
| 2.3 | TRANSIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO..... | 32 |
| 2.4 | A CAMADA LIMITE..... | 34 |
| 2.5 | FORMAS DE RESISTÊNCIAS ABORDADAS..... | 37 |
| 2.5.1 | Resistência Friccional..... | 37 |
| 2.5.2 | Resistência de Forma..... | 38 |
| 2.6 | A TURBULÊNCIA NO ESCOAMENTO..... | 39 |
| 2.6.1 | Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)..... | 40 |
| 2.6.2 | O modelo de turbulência SST k- ω | 41 |
| 2.7 | PROPULSORES EM DUTO..... | 43 |
| 3 | O PERFIL DE POPA | 46 |
| 3.1 | PROBLEMAS NO USO DA POPA CÔNICA..... | 46 |
| 3.2 | O USO DA POPA CHEIA..... | 47 |
| 4 | GERAÇÃO DAS LINHAS DE POPA | 51 |
| 4.1 | O MODELO SUBOFF..... | 51 |
| 4.2 | CRIAÇÃO DAS LINHAS DE POPA..... | 53 |
| 4.3 | PROCESSOS DE SELEÇÃO..... | 54 |
| 5 | SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) | 57 |
| 5.1 | GERAÇÃO DAS GEOMETRIAS..... | 57 |
| 5.2 | ESTRUTURAÇÃO DA MALHA..... | 58 |
| 5.3 | CONDIÇÕES DE CONTORNO..... | 60 |
| 6 | RESULTADOS | 64 |
| 6.1 | PRIMEIRA FASE – SIMULAÇÃO COM CASCO LIMPO..... | 64 |
| 6.1.1 | Resultados da 1ª rodada de simulações com casco limpo..... | 64 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.1.2 | Resultados da 2ª rodada de simulações com casco limpo | 64 |
| 6.1.3 | Resultados da 3ª rodada de simulações com casco limpo | 64 |
| 6.1.4 | Resultados da 4ª rodada de simulações com casco limpo | 65 |
| 6.2 | ANÁLISE DAS GEOMETRIAS NÃO SELECIONADAS | 80 |
| 6.2.1 | Análise da geometria de menor eficiência hidro-volume | 80 |
| 6.2.2 | Análise da geometria de maior volume | 83 |
| 6.3 | SEGUNDA FASE – SIMULAÇÕES COM PROPULSOR | 85 |
| 6.3.1 | Aplicação do propulsor | 86 |
| 6.3.2 | Resultados da 1ª rodada de simulações com propulsor | 88 |
| 6.3.3 | Resultados da 2ª rodada de simulações com propulsor | 88 |
| 6.3.4 | Resultados da 3ª rodada de simulações com propulsor | 88 |
| 6.3.5 | Resultados da 4ª rodada de simulações com propulsor | 88 |
| 6.4 | TERCEIRA FASE – SIMULAÇÕES COM PROPULSOR E DUTO | 101 |
| 6.4.1 | Resultados da 1ª rodada de simulações com propulsor e duto | 101 |
| 6.4.2 | Resultados da 2ª rodada de simulações com propulsor e duto | 102 |
| 6.4.3 | Resultados da 3ª rodada de simulações com propulsor e duto | 102 |
| 6.4.4 | Resultados da 4ª rodada de simulações com propulsor e duto | 102 |
| 7 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS | 114 |
| 7.1 | ANÁLISE DOS RESULTADOS POR MEIO DE CFD | 114 |
| 7.2 | PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS | 116 |
| | REFERÊNCIAS | 117 |

1 INTRODUÇÃO

O submarino militar é uma belonave que possui uma série de atribuições, sendo a principal delas a de negar o uso do mar ao inimigo, contribuindo assim para o controle e fiscalização de áreas marítimas. Sua presença em batalhas tem seu primeiro registro ainda no século XVIII e desde então essas embarcações apresentaram diversas formas de casco e propulsão, até chegarem aos perfis geométricos conhecidos nos dias de hoje.

O processo de evolução do casco de um submarino, assim como a evolução de todas as embarcações de combate, é instigado principalmente por inovações tecnológicas e pela capacidade da construção naval. Porém, vale destacar que esses meios também passam por transformações motivadas por questões fora do âmbito tecnológico-científico, tais como o ambiente em que irá operar, poderio bélico de nações inimigas, recursos energéticos disponíveis, política de defesa e apoio logístico. Além do mais, é importante salientar que a necessidade de dispor de um determinado submarino também envolve questões de natureza geopolítica.

Para uma melhor compreensão das razões que levaram à elaboração desse trabalho, faz-se necessário ressaltar alguns motivos que levaram nações com grande poder naval a adotar um determinado perfil de submarino no decorrer da História e como ele foi se adequando com o cenário geopolítico da época.

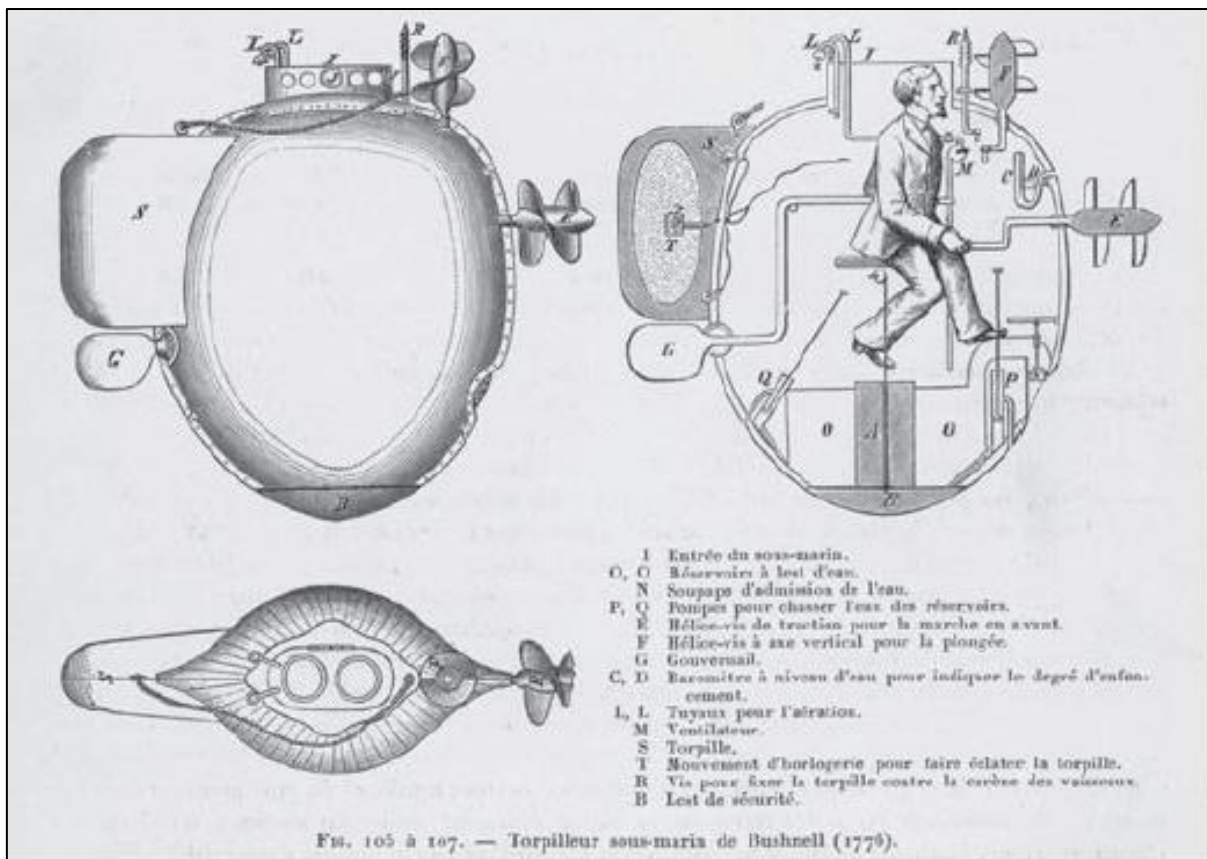
1.1 A EVOLUÇÃO DAS SILHUETAS DOS SUBMARINOS

Na segunda metade do século XVIII, durante a guerra de independência dos EUA, foi registrado pela primeira vez na história o uso em combate de um submarino especificamente projetado para fins militares. Batizado de Turtle, David Bushnell, criador da embarcação, acreditava que a embarcação se assemelhava a duas carapaças de tartaruga de tamanho igual, unidas (NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND, 2017). A Figura 1 ilustra o submarino criado por Bushnell.

Projetado em 1771-1775, ele era operado por somente um tripulante e incorporava os quatro requisitos básicos para um submarino militar: a capacidade de submergir; a capacidade de manobrar debaixo d'água; a capacidade de manter um suprimento de ar adequado para apoiar o operador da embarcação; e a capacidade de realizar operações ofensivas eficazes contra uma embarcação de superfície inimiga (NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND, 2017). Embora dotado dos

requisitos básicos, o Turtle estava longe de atender as exigências de combate da época, e como consequência, a embarcação não obteve sucesso em combate.

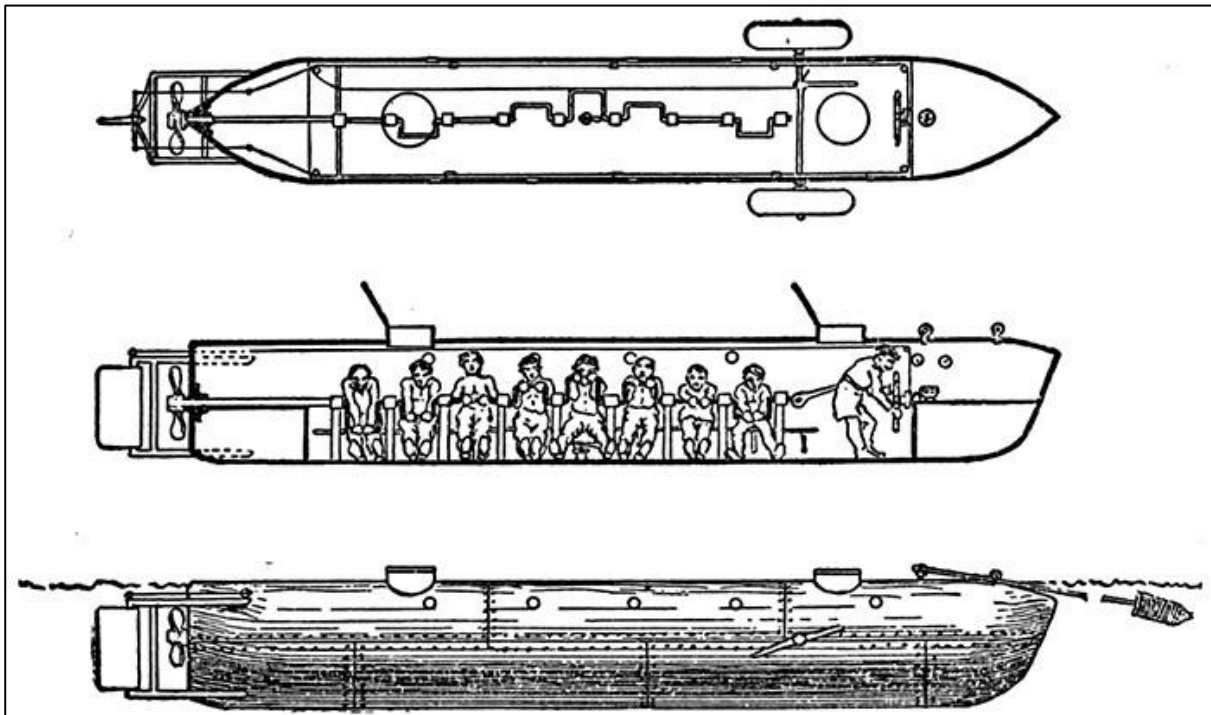
Figura 1 - Submarino Turtle de Bushnell



Fonte: Silent killers: Submarines and Underwater Warfare (2011)

Mas foi em 1864, durante a guerra civil americana, que o submarino confederado H.L. Hunley entrou para a história como o primeiro submarino a afundar um navio de guerra inimigo em tempo de guerra (HISTORY.COM, 2020). Construído a partir de uma caldeira de vapor de ferro e em forma cilíndrica, possuía em suas extremidades perfis cônicos que eram utilizados como tanques de lastro. Foi projetado para nove tripulantes, oito deles em linha para girar uma manivela que movimentava o hélice e um para conduzir a embarcação (ENCYCLOPEDIA OF ALABAMA, 2022). A necessidade de se acomodar oito tripulantes em linha fez com que a embarcação ganhasse um formato cilíndrico, como mostra a Figura 2. O submarino possuía 13,11 m de comprimento, 1,09 m de boca, 1,83 m de calado e alcançava 2,06 m/s de velocidade (EVANS, 2021).

Figura 2 - Submarino H.L Hunley

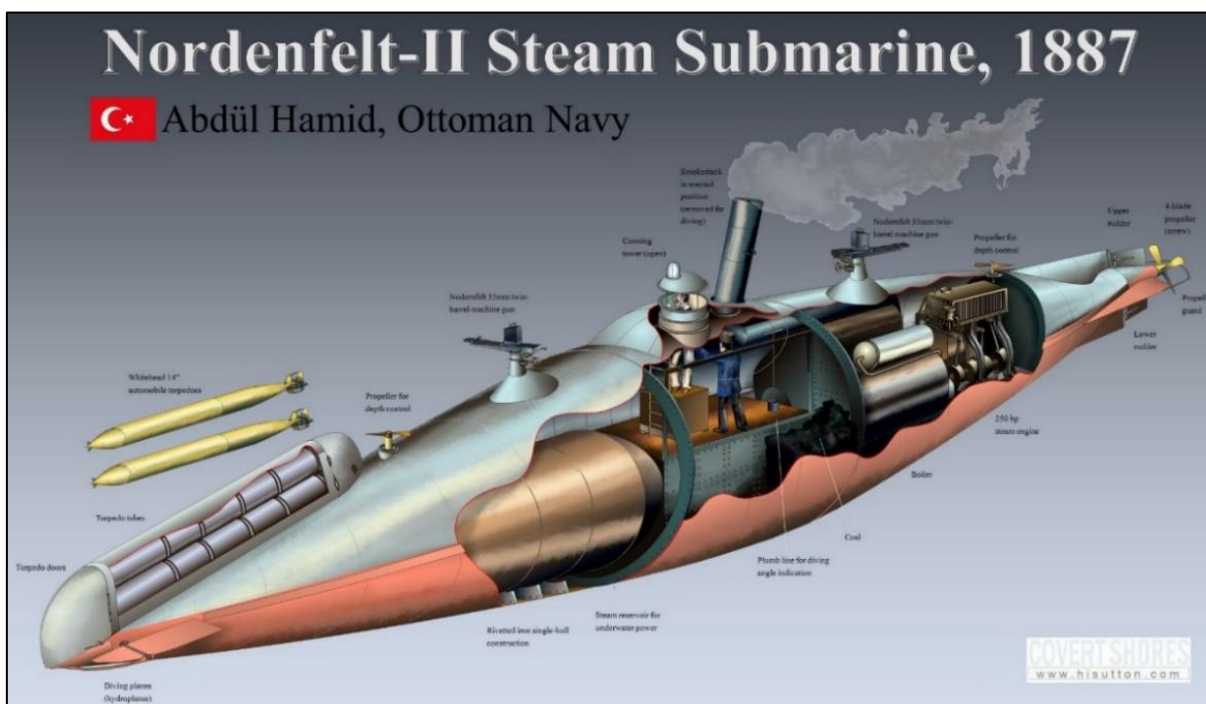


Fonte: Encyclopedia of Alabama (2022)

Ao final do século XIX, são lançados os primeiros submarinos dotados de máquinas à vapor a fim de gerar força motriz. Necessitavam acumular grandes quantidades de energia em tanques especiais para poder se locomover quando submerso. Um exemplo de submarino a vapor da época é o Nordenfelt-II, apresentado na Figura 3. A necessidade de espaço para o armazenamento de carvão, da caldeira e do motor exigiu um aumento no diâmetro a meio navio com a proa e a popa pontiagudas para melhor desempenho hidrodinâmico. Devido ao seu arranjo interno, existia um enorme desconforto que afetava a tripulação devido ao espaço reduzido e a proximidade da caldeira em alta temperatura.

Os primeiros submarinos com motores diesel e com baterias acumuladoras elétricas surgem no início do século XX. Com a eclosão da primeira guerra mundial, as ações de patrulha com ataques a embarcações militares e civis no início do conflito pela marinha imperial alemã, fizeram com que os submarinos passassem a exercer papel significativo em combate. A necessidade de maior alcance e tempo de patrulha, exigiram submarinos maiores para armazenar mais munição, combustível, provisões e pessoal.

Figura 3 - Submarino a vapor Nordenfelt II



Fonte: Covert Shores (2020)

Junto a esses fatores, a introdução de novos equipamentos e sistemas para atender as necessidades do conflito trouxeram uma redistribuição de pesos em seu interior e novas técnicas de projeto permitiram a construção de submarinos com formas geométricas com melhor eficiência hidrodinâmica. O sistema propulsivo foi deslocado para a popa e o arranjo interno tornou-se mais funcional. Também é possível identificar uma nova geometria de proa para armazenamento e lançamento de torpedos e minas antinavio. Um exemplo de submarino desse período é o Type UC-1 da Marinha Imperial Alemã, ilustrado na Figura 4.

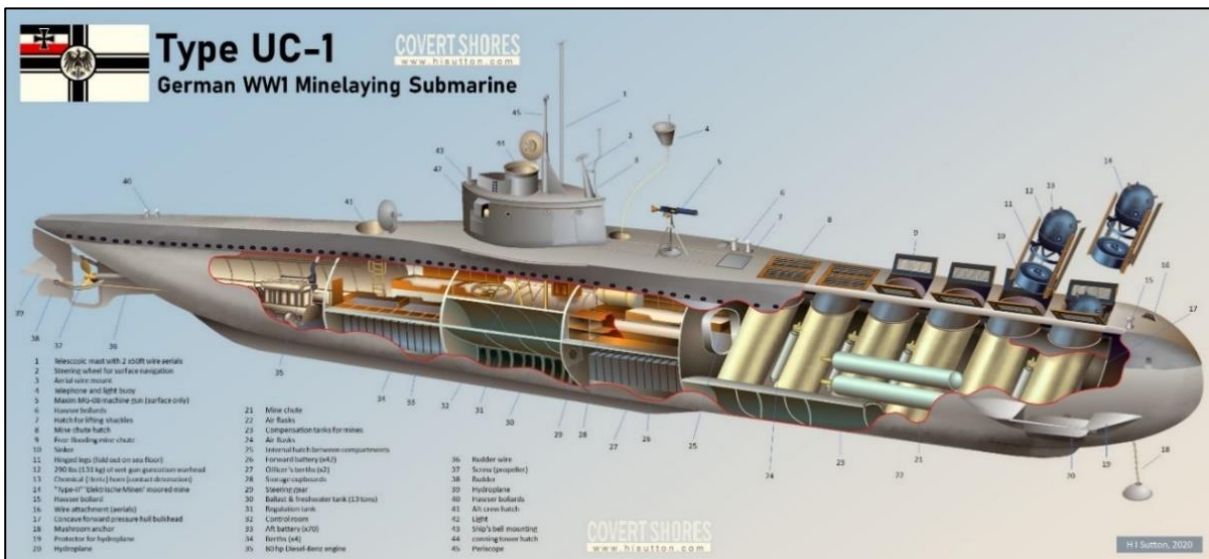
Na 2ª metade do século XX, o interesse no potencial da energia nuclear fez surgir os primeiros submarinos com propulsão nuclear ainda na década de 1950, tais como o USS Nautilus, da Marinha dos EUA e do K-3 Leninsky Komsomol, da URSS. A grande vantagem que traziam consigo é a submersão por tempo “indeterminado” (limitado somente pelo fator humano) e em posição desconhecida. Além do mais, a introdução de mísseis balísticos em submarinos nucleares fez com que eles se tornassem uma arma estratégica para os seus detentores.

Após a segunda guerra mundial, na opinião de Kormilitsin e Khalizev (2001), a introdução da propulsão nuclear nos submarinos, que antes eram vistos como navios de mergulho, os transformaram em verdadeiras embarcações subaquáticas,

atribuição que mais tarde foi estendida aos submarinos convencionais de terceira e quarta geração. A entrada do submarino na era nuclear gerou diversas atualizações tecnológicas que só foram possíveis de se implementar devido à utilização de cascos adaptados a navegar submersos na maior parte do tempo. Vale destacar os trabalhos em hidrodinâmica e acústica submarina que possibilitaram cascos mais eficientes e silenciosos.

Diante do contexto geopolítico da guerra fria, missões de patrulha e espionagem, tanto dos EUA quanto da URSS por longos períodos exigiram submarinos com autonomia maior, necessitando de maiores dimensões e funcionalidade do espaço interno. Partes menores como o propulsor e apêndices do casco evoluíram de forma a atender missões de espionagem, onde o ruído gerado prejudica a ocultação, uma das características mais importantes dos submarinos modernos.

Figura 4 - Submarino Type UC-1



Fonte: Covert Shores (2020)

A Figura 5 é uma ilustração de um submarino da Classe Typhoon construído na União Soviética. A embarcação é uma das maiores já construídas, a necessidade de tal tamanho é principalmente devido à acomodação da propulsão nuclear, maior tripulação e de mísseis balísticos estratégicos. Tais características fizeram com que essa classe de submarinos alcançasse 175 m de comprimento e 23 m de boca.

Figura 5 - Submarino Classe Typhoon



Fonte: Forbes (2020)

1.2 OS SUBMARINOS PÓS-GUERRA FRIA

Norman Friedman (1984), ainda no período da guerra fria, afirmou que os custos em construir um submarino foram aumentando desde o fim da segunda guerra mundial. Valores que chegaram a ultrapassar o dobro de se construir grandes navios de superfície modernos. O autor comparou o submarino de ataque classe Los Angeles que custava US\$ 722 milhões com uma fragata da classe Perry de US\$ 333 milhões.

Justin Branley (2010) em sua pesquisa afirma que durante o período da guerra fria, os EUA seguiam uma política de defesa de forma a conter a ameaça soviética, buscando equilibrar seu poderio militar em tamanho e capacidades para um possível conflito. Com o colapso da URSS e o fim da guerra fria, ocorreu um desmonte de grande parte desse aparato militar. Como consequências estão cortes no orçamento de defesa, redução do número de navios e modificações técnicas em diversas embarcações a fim de atender a uma nova concepção estratégica, um exemplo disso é a redução ou retirada total de sistemas de lançamento de mísseis balísticos (SSBN) e inclusão de sistemas de lançadores de mísseis de cruzeiro (SSGN). A Figura 6 ilustra um submarino da classe Ohio já modificado para SSGN.

Figura 6 - Submarino Classe Ohio (SSGN)



Fonte: NavalNews (2020)

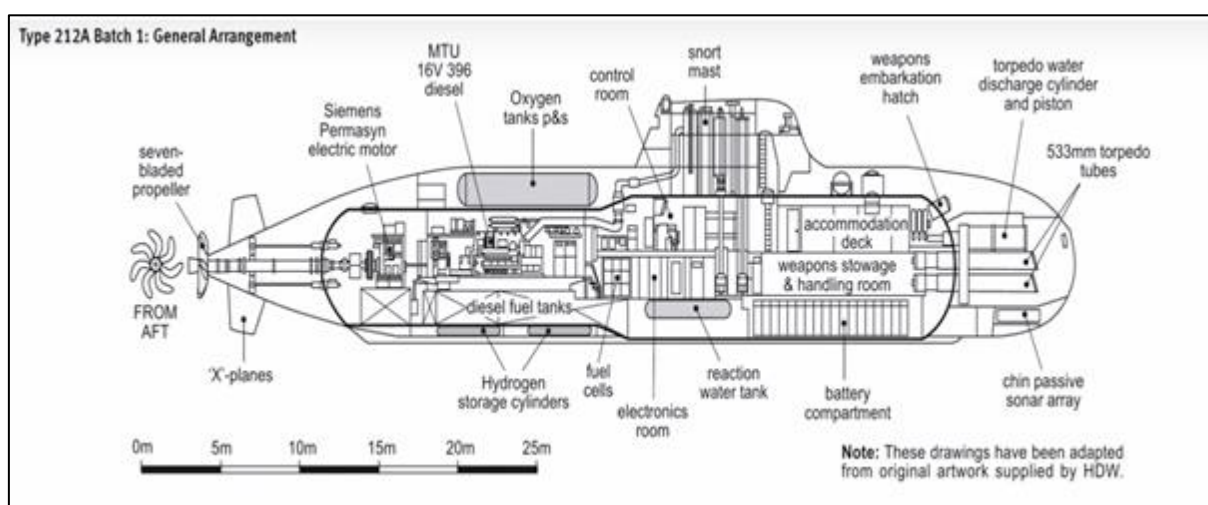
Para os autores Psallidas, Whitcomb e Hootman (2010), os submarinos nucleares são, sem dúvida, os mais adequados para uma missão de patrulha naval ou de escolta em oceano aberto pois navegam em grande velocidade e autonomia quando submersos. No entanto, em um conflito em águas costeiras, onde a profundidade é relativamente menor, os submarinos convencionais tornam-se os mais adequados devido às suas baixas assinaturas acústicas, térmicas e magnéticas. Os autores citam que a prova deste argumento está na Guerra das Malvinas, onde o submarino argentino Type 209 San Luis, que operava a 1481,6 quilômetros de sua base, realizou dois ataques a navios da marinha real britânica, iludindo todos os esforços empregados contra esse submarino. Diante das tentativas de localizar este submarino, ficou claro que combater um submarino convencional em águas costeiras pode ser uma tarefa custosa. Sharkey (2001) explica que, nesse ambiente de operação, o submarino convencional tem a vantagem por ser menor (mais manobrável) e mais silencioso (mais furtivo).

Para Rawson e Tupper (2001), vantagens como as citadas no parágrafo anterior fazem com que atualmente inúmeras pesquisas sejam conduzidas com o propósito de aperfeiçoar o desempenho dos submarinos não-nucleares sem os elevados custos da propulsão nuclear, já que o submarino diesel-elétrico ou convencional possui uma grande limitação quando navega submerso, principalmente

quanto está em alta velocidade, pois necessita utilizar os motores diesel operando o snorkel para recarregar as baterias, que o torna vulnerável.

Quando se trata de autonomia de submarinos não-nucleares, o sistema independente do ar (AIP) provou-se apropriado para o ambiente subaquático. A Figura 7 apresenta uma ilustração em escala do submarino alemão Type 212A cuja energia para a propulsão é gerada em células de combustível de hidrogênio. Com 56 m de comprimento e 6,8 m de diâmetro, possui dimensões reduzidas se comparado com um submarino nuclear e perfil de popa mais cheio, com menor comprimento axial.

Figura 7 - Submarino Classe 212A



Fonte: SubBrief (2021)

Para explicar o poder dessa nova tecnologia, Roblin (2021) relata em seu trabalho a realização dos exercícios militares entre a Marinha dos EUA e a Marinha Real Sueca no ano de 2005. Durante as manobras, o submarino sueco HSwMS Gotland, dotado de sistema AIP, conseguiu “afundar” o porta-aviões americano USS Ronald Reagan e os navios-escolta antissubmarino que realizavam a sua proteção. Nos exercícios seguintes, ele também “afundou” contratorpedeiros e até submarinos nucleares. O HSwMS Gotland realizou diversos “ataques” à frota americana e não foi detectado.

1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Avanços científicos na área de energia e o final da guerra fria trouxeram relevância para o submarino não-nuclear, o que gerou transformações significativas no teatro de operações navais. Dentro dessas mudanças, pode-se citar as missões

de patrulha costeira, que ganharam mais visibilidade e se tornaram indispensáveis no planejamento de novas embarcações militares.

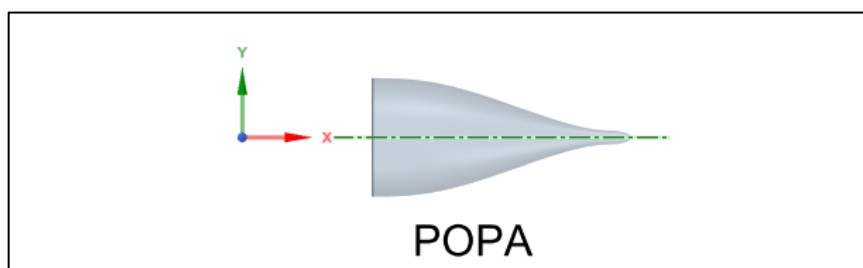
Em vista disso, inúmeras pesquisas são conduzidas atualmente e visam a otimização de submarinos menores, buscando mais eficiência e maior autonomia. Isso significa maior compactação dos sistemas de bordo e maior aproveitamento do espaço interno, que só são possíveis com uma geometria de casco que possibilite ganho de funcionalidade no arranjo interno sem perda de eficiência hidrodinâmica. Essas características são obtidas através de um perfil de casco com alta eficiência hidro-volume.

1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA APLICADA

Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma ferramenta de busca de uma popa de submarino com a melhor eficiência hidro-volume possível para um propulsor já projetado, utilizando duto ou não. A ferramenta possibilita ao usuário inserir requisitos e restrições geométricas no processo de seleção, tendo como parâmetro a eficiência hidro-volume (coeficiente de Semnan) de um modelo de referência, que para esse estudo, foi estabelecido o SUBOFF n° 5470 da DARPA. É abordado o conceito de popa cheia e busca-se obter um volume de popa maior que o do modelo de referência. O trabalho também apresenta perspectivas de vários autores quanto ao uso do perfil de popa cheia, que visam a alinhar e justificar esse estudo com as diretrizes mais modernas a respeito do tema.

Para a geração das linhas de casco é criado um código no software MATLAB utilizando-se como dados de entrada as principais dimensões do modelo SUBOFF (modelo de referência), tais como diâmetro máximo do PMB, diâmetro do bosso e comprimento axial da popa. O processo tem início criando-se pontos de controle no eixo x (Figura 8) sobre o comprimento axial da popa inserido no código. Os pontos (x,y) são interpolados por splines cúbicos para gerarem todas as linhas de casco possíveis, que em seguida passam por processos de seleção inseridos no código. As linhas selecionadas geram uma tabela de pontos na qual são adicionados os pontos da proa e do PMB (ambos do modelo SUBOFF), os valores de volume interno e de área de superfície molhada dos modelos variantes (“filhos”).

Figura 8 - Orientação aplicada à popa



Fonte: Autor

As tabelas de pontos geradas são utilizadas para a construção das geometrias variantes do modelo “pai” (geometrias axissimétricas) no *Ansys SpaceClaim* por um processo automatizado utilizando-se o recurso de *script* do próprio programa e que contém a sequência de comandos escritas em Python necessárias para a criação de cada geometria. As malhas são geradas pelo *Ansys Meshing* e devido às geometrias serem axissimétricas, é analisado somente um setor definido pela simetria radial de cada uma delas com auxílio do recurso do software chamado de Periodic Boundaries Conditions como forma de reduzir tempo de simulação e esforço computacional. No software *Ansys Fluent*, a técnica de solução é baseada nas equações RANS, o modelo de turbulência adotado é o SST k- ω e a velocidade adotada da embarcação é de 6,17 m/s navegando em águas profundas.

São realizadas três fases de avaliações no *Ansys Fluent*, coletando dados de resistência ao avanço, empuxo (2ª e 3ª fases), campo de tensões de cisalhamento, linhas de corrente do escoamento, campo de pressão e avaliação da camada limite. O processo de busca da melhor geometria de popa é baseado em uma meta-heurística que guia e modifica as operações para produzir novas geometrias de melhor eficiência. O objetivo é maximizar o coeficiente de Semnan dentro das restrições geométricas implementadas no MATLAB.

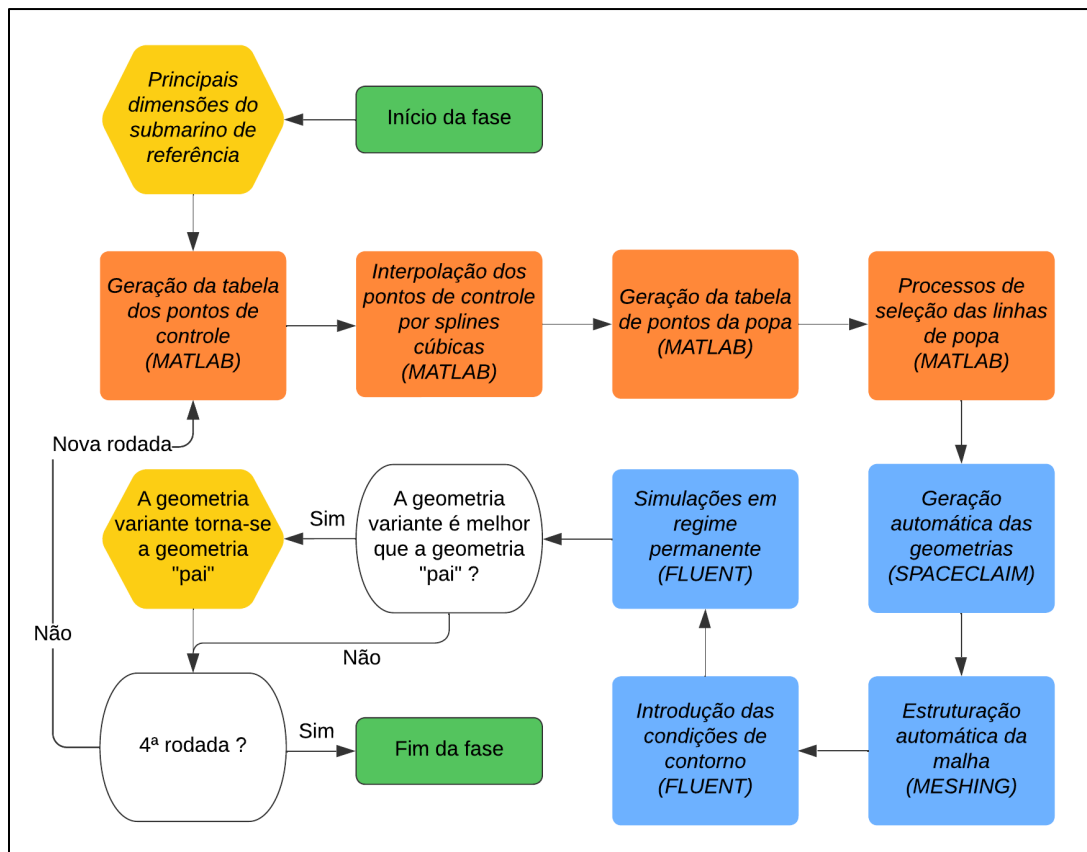
Na primeira fase, as geometrias são avaliadas sem o uso do propulsor, ou seja, casco limpo e sem apêndices. Na segunda fase, as geometrias são avaliadas com o uso de um propulsor e com o mesmo processo realizado na primeira fase. O propulsor escolhido é o MOD5a, desenvolvido no LabHidro da DDNM e projetado para o modelo SUBOFF. Na terceira fase é utilizado o MOD10 sem o uso do estator, também desenvolvido no LabHidro.

O processo de busca é estruturado da seguinte maneira: Cada fase é constituída de quatro rodadas de simulações, tal que a cada nova rodada, há uma

geometria “pai” que teve um melhor desempenho que a geometria “pai” da rodada anterior, com exceção da primeira rodada, que não possui geometria “pai”. A melhor geometria encontrada na rodada, serve de base para uma nova geração de linhas no MATLAB com o intervalo entre os pontos em y associado com os parâmetros da rodada correspondente (o processo é detalhado no subitem 2.1). Em cada rodada, as geometrias passam por um processo de simulação utilizando a ferramenta *Ansys Journal File do Ansys Workbench* contendo uma sequência de comandos cujo propósito é automatizar o processo. A fase é encerrada após a seleção do melhor resultado da 4ª rodada.

O referencial teórico que fundamenta este trabalho é apresentado no capítulo 2. Os principais conceitos quanto à abordagem da popa cheia em projetos de submarinos estão descritos no capítulo 3. O processo de geração das linhas de popa está detalhado no capítulo 4. A modelagem no software *Ansys Fluent* é detalhada no capítulo 5. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 6 e as conclusões do trabalho junto com as propostas para estudos futuros são discutidas no capítulo 7. A Figura 9 apresenta o fluxograma do trabalho desenvolvido.

Figura 9 - Fluxograma do trabalho



2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados os referenciais teóricos que fundamentam o trabalho apresentado. O método de otimização adotado é baseado em uma meta-heurística e foi considerado o mais adequado diante da complexidade do problema. O fluido é considerado incompressível e o seu escoamento através do submarino é regido pelas equações de Navier-Stokes e da continuidade. Conceitos sobre a viscosidade do fluido, regimes de escoamento e camada limite são essenciais para contextualizar o estudo e para o entendimento das formas de popa selecionadas. O trabalho não aborda sobre forças discretizadas, ou seja, em nível atômico/molecular. É aplicada a hipótese do contínuo, onde uma porção infinitesimal de fluido consegue manter as suas propriedades, limitando-se ao campo das tensões. Ao final do capítulo são detalhadas as equações de governo, o modelo de turbulência aplicado para obtenção dos resultados e alguns conceitos a respeito do uso do duto para compreensão de sua influência nos resultados obtidos.

2.1 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADO

A otimização em engenharia pode ser conceituada como um processo constante de busca de soluções cujo propósito é de melhorar resultados, ou seja, a busca pela condição ótima. Para um determinado problema, encontrar a condição ótima significa encontrar a melhor solução possível ou a mais favorável que vai resultar na maximização ou na minimização de uma função objetivo para um determinado domínio limitado por restrições.

O método de solução empregado na busca das melhores linhas de popa é coordenado por uma meta-heurística desenvolvida para atender especificamente a proposta deste trabalho. Para Glover e Kochenberger (2003), a finalidade de uma meta-heurística é aplicar um procedimento de busca robusta com estratégias de alto nível no espaço de soluções, tendo a capacidade de escapar de máximos locais.

As meta-heurísticas estão enquadradas nos métodos de otimização estocástica. No entendimento de Sean Luke (2016), a otimização estocástica é uma classe de algoritmos e técnicas que empregam algum grau de aleatoriedade para encontrar soluções tão ótimas quanto possível para problemas reconhecidamente difíceis.

A escolha do método, apesar de não oferecer a garantia de encontrar a solução ótima, deve-se ao fato da complexidade do cálculo do coeficiente de Semnan, cuja solução exige modelagem em software (CFD). Além do mais, enquanto a camada limite permanece anexada à superfície, as geometrias variantes que possuem alto grau de semelhança entre si apresentam pequenas variações no comportamento da resistência ao avanço. Isso faz com que a probabilidade de cair em máximos locais seja baixa.

Os parâmetros de entrada no código de seleção são o diâmetro máximo, o diâmetro do boss e comprimento longitudinal da popa, todos referentes ao modelo SUBOFF. Estes parâmetros geraram um conjunto universo de 20.736 linhas de popa. A função objetivo é maximizar coeficiente de Semnan sem haja separação da camada limite. O processo de criação das linhas de popa encontra-se detalhado no subitem 4.2 e as restrições implementadas, no subitem 4.3.

O processo é apresentado de forma simplificada na Figura 10. Na primeira rodada são avaliadas todas as geometrias criadas pelas linhas selecionadas no código de seleção, com um espaçamento entre os pontos em y de 2 centímetros. A geometria com o maior coeficiente de Semnan sem separação da camada limite tem a sua linha de popa utilizada como base para a segunda rodada, não englobando mais todo o conjunto de pontos possíveis. O espaço de busca para as rodadas seguintes passa a ser as linhas criadas pelos pontos acima e abaixo dos pontos da linha selecionada, além do ponto da própria linha de cada rodada numa distância específica. A distância entre os pontos em y passa ser de 1,5 centímetros na segunda rodada, 1 centímetro na terceira rodada e 0,5 na quarta rodada. A Tabela 1 apresenta as taxas de variação em y para cada rodada.

Tabela 1 - Taxa de variação em y entre rodadas

| Rodada | Taxa de variação em y |
|-----------|-------------------------|
| 1ª rodada | 2,0 cm |
| 2ª rodada | 1,5 cm |
| 3ª rodada | 1,0 cm |
| 4ª rodada | 0,5 cm |

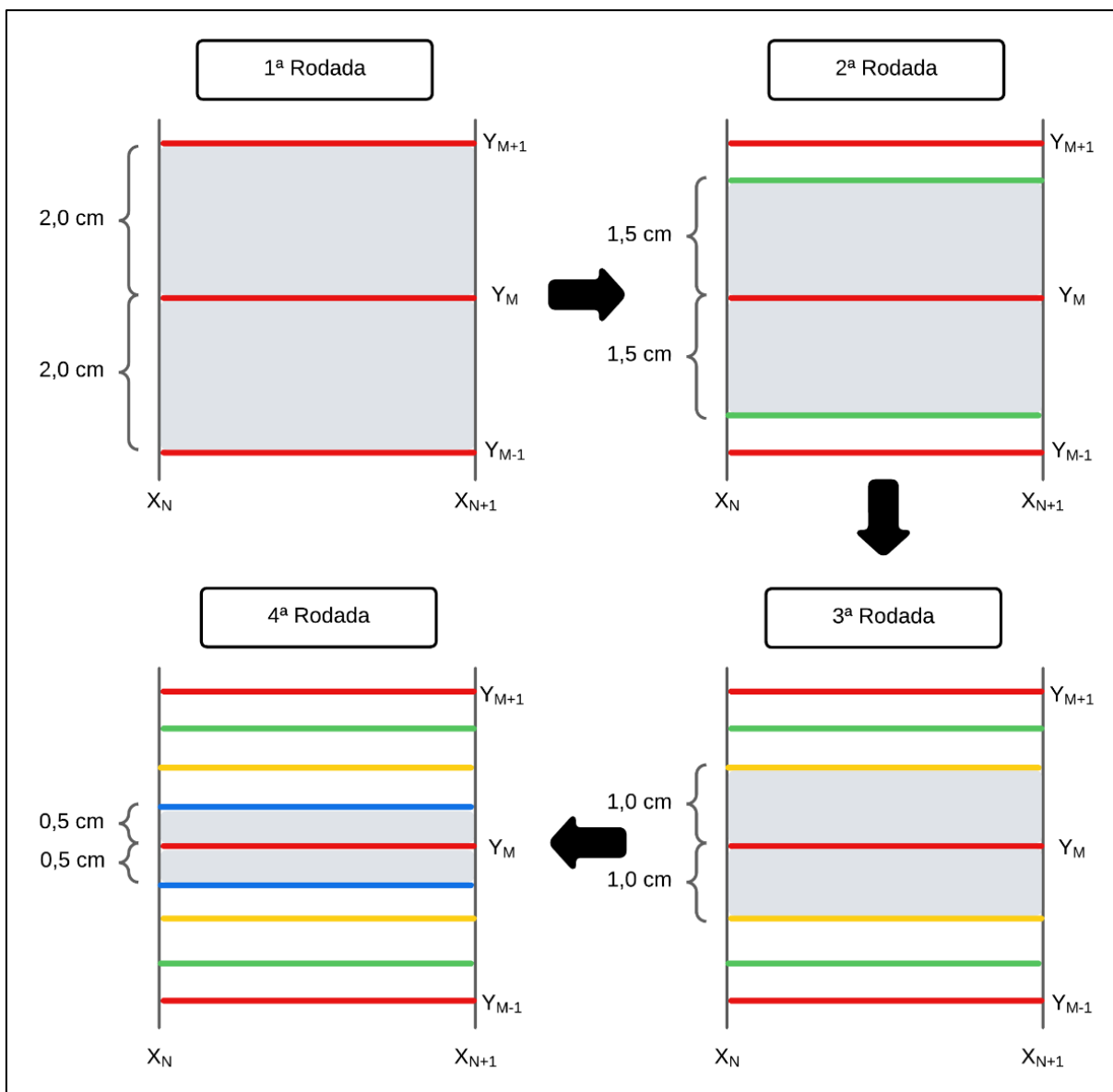
Fonte: Autor

A popa ao longo do comprimento em X é dividida em 6 pontos (X_1 a X_6), sendo que X_1 e X_6 são pontos fixos em $y = 0,254$ metros e $y = 0,029$ metros, respectivamente. Para os demais pontos (X_2 a X_5), existirão 3 pontos em y para formar uma nova linha de popa, totalizando 81 linhas possíveis. Supondo que a linha vermelha do meio foi a

que apresentou o maior coeficiente de Semnan, as análises são conduzidas da seguinte forma:

- 1ª rodada: Todas as linhas vermelhas são avaliadas.
- 2ª rodada: A linha vermelha do meio e as linhas verdes são avaliadas.
- 3ª rodada: A linha vermelha do meio e as linhas amarelas são avaliadas.
- 4ª rodada: A linha vermelha do meio e as linhas azuis são avaliadas.

Figura 10 - Fluxograma do algoritmo de busca empregado



Fonte: Autor

2.2 VISCOSIDADE E TENSÃO DE CISALHAMENTO

O fluido que escoar por todo o casco do submarino e conjunto propulsor/duto é considerado um fluido newtoniano, ou seja, é aquele cuja tensão de cisalhamento é linearmente proporcional à taxa de deformação. Essa relação é chamada de viscosidade dinâmica e surge devido ao atrito entre as moléculas que estão em movimento, em outras palavras, é a resistência que o fluido apresenta às tensões de cisalhamento.

Considerando um fluido viscoso (newtoniano) que se movimenta sobre a superfície do submarino, a camada de fluido que adere à superfície do casco possui velocidade nula em relação ao submarino (Princípio da aderência).

Na Figura 11, sendo y a distância vertical de uma camada de fluido qualquer e a superfície do casco e a pressão constante em todo o fluido, é possível verificar que surgirá uma variação de velocidade entre as camadas do fluido. Essa variação é explicada pela presença da tensão de cisalhamento, que é a responsável pela resistência ao fluxo do fluido na superfície do casco, dependendo somente da viscosidade e do gradiente de velocidade. Brunetti (2008) explica que essa resistência viscosa tende a manter as camadas movendo-se suavemente uma sobre a outra. É possível afirmar que, quando as forças estão em equilíbrio, o fluido continua em movimento, mas com velocidade constante.

A tensão de cisalhamento é representada pela equação 1:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dV}{dy} \quad (1)$$

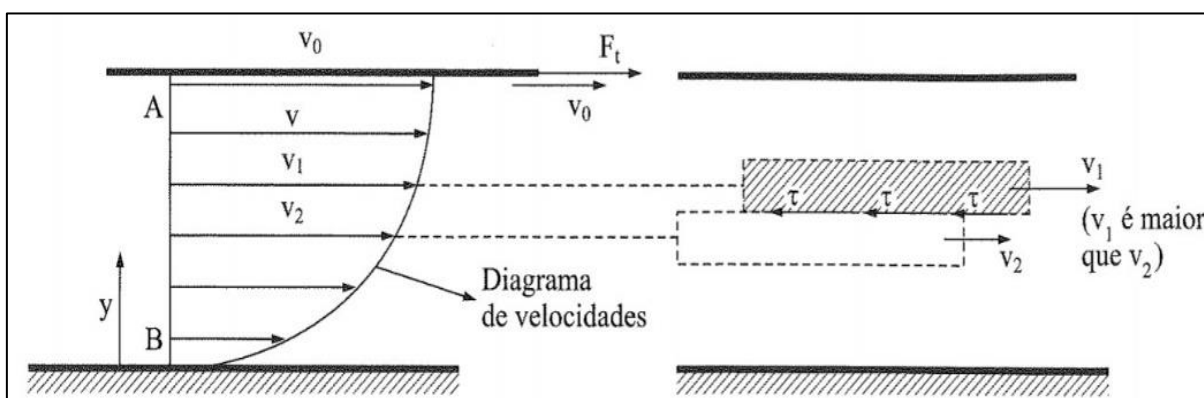
A deformação por cisalhamento aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão. Portanto, a tensão de cisalhamento não depende da deformação causada e sim da taxa de variação.

2.3 TRANSIÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO

A importância desse conceito na popa do submarino vem da necessidade de identificar o escoamento como laminar ou turbulento, o que possibilita examinar o comportamento do fluxo da água do mar sobre o casco de submarino. No escoamento laminar, as partículas se movimentam ao longo de trajetórias que se assemelham a lâminas ou camadas. No escoamento turbulento, Gilberto Cortez (2020) explica que

as partículas percorrem trajetórias irregulares, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida conforme ilustrado na Figura 12. Esse padrão de escoamento é comum na água, cuja viscosidade é relativamente baixa.

Figura 11 - Viscosidade dos fluidos



Fonte: Guia da Engenharia (2020)

O fluxo laminar reduz as perdas de fluxo, pois o fluxo turbulento consome maior quantidade de energia devido ao aumento da resistência friccional. É extremamente difícil manter o fluxo laminar em grandes objetos que se movem através de fluidos, como é o caso do submarino. Para Joubert (2004), se o fluxo laminar pudesse ser mantido em uma porção considerável do casco de um submarino, as vantagens não englobariam somente ganhos de velocidade, alcance e economia de combustível, mas também o tornaria mais silencioso.

A transição do regime de escoamento laminar para o turbulento pode acontecer também de forma natural sem que seja aplicada uma perturbação externa. Esse fenômeno é chamado de Instabilidade de Kelvin-Helmholtz para camadas cisalhantes livres, resultado do equilíbrio instável entre as forças viscosas e a carga cinética do fluido. Devido à instabilidade, surgem rapidamente variações que levam a distúrbios tridimensionais chamados de vórtices. Esses vórtices aumentam em dimensão até que iniciam uma quebra em cascata gerando vórtices menores e tornando o movimento aleatório. Quanto maior é a velocidade do fluido, maior é a carga inercial e a transição ocorrerá de forma mais rápida.

2.4 A CAMADA LIMITE

A camada de água que se move próxima à superfície do casco é conhecida como camada limite. Possui na sua composição partículas que estão tendendo a girar em torno de seu próprio eixo devido à influência da viscosidade. Na definição prática de camada limite, sua espessura é definida como a distância em que a velocidade atinge 99% da velocidade do escoamento ao longe. A camada limite sobre uma placa plana lisa passa a apresentar instabilidade com pequenas perturbações em um número de Reynolds suficientemente alto, tipicamente na faixa de $1,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$.

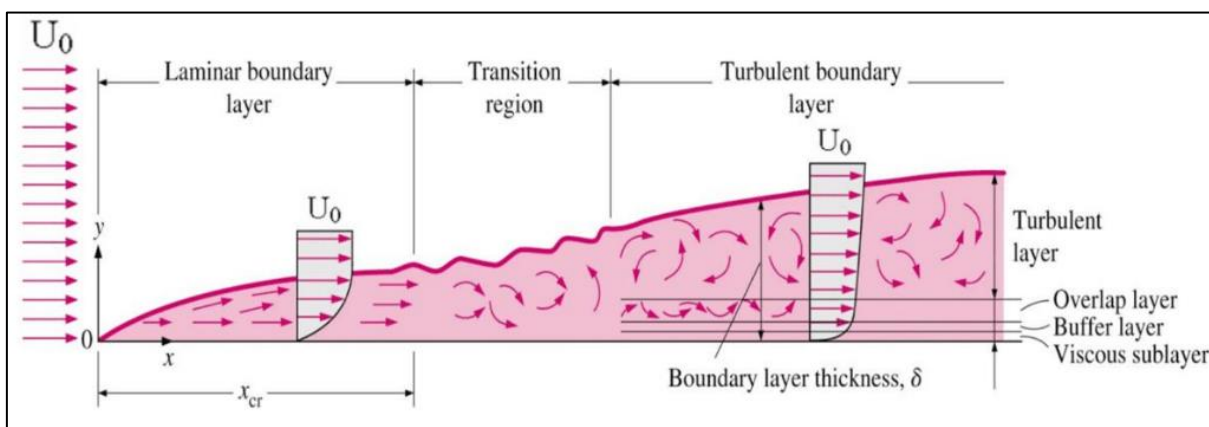
A separação da camada limite é explicada por Harvald (1983) como o desprendimento do fluxo principal sobre uma superfície sólida devido a um gradiente de pressão desfavorável, normalmente causado por uma mudança brusca da direção de curvatura da superfície. Aranha (2010) afirma que o gradiente de pressão é dito desfavorável quando tende a diminuir a velocidade da partícula fluida, diminuindo sua energia cinética e favorecendo assim a separação da camada limite. Essa pressão estática vai aumentando e chega ao ponto de empurrar o fluxo na direção oposta, criando uma área de recirculação e separando-o do corpo.

O perfil de um submarino interfere no gradiente de pressão de forma relevante. Uma região de redução de pressão na direção do fluxo conduz a um fluxo laminar na camada limite. No entanto, uma região de aumento de pressão na direção do fluxo distorce a condução do fluxo laminar. Joubert (2004) explica que rugosidade e ondulação na superfície do casco também atuam contra o fluxo laminar e promovem turbulência.

Quando o escoamento passa a ter um regime turbulento, a dificuldade para separar a camada limite é maior que no regime laminar e isso se deve ao aumento da quantidade de movimento entre as camadas de fluido, conforme ilustrado na Figura 12, apresentando um perfil de velocidade mais acentuado na direção y .

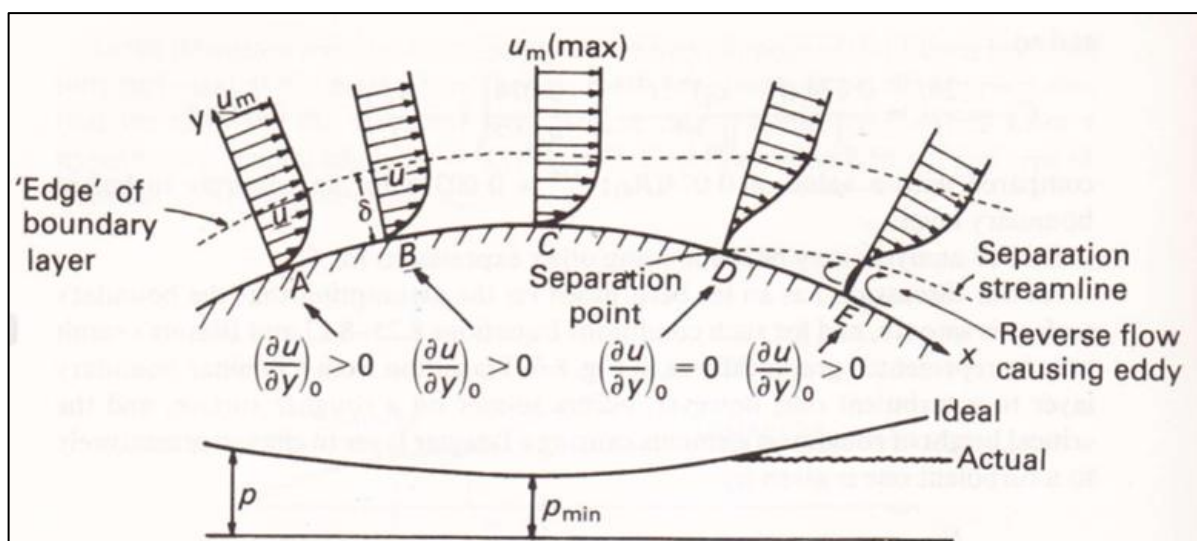
Para o perfil representado na Figura 13, o fluido atravessa uma região de pressão decrescente na parte frontal do corpo e uma pressão crescente na parte traseira. Com a queda da pressão, há um ganho de velocidade pois o fluido é acelerado. Isso resulta em uma camada limite relativamente fina e estável sobre a parte frontal e uma camada limite espessa e instável e a conseqüente separação sobre a parte traseira, onde o aumento da pressão desacelera o fluido.

Figura 12 - Regimes de escoamento



Fonte: Nuclear-power (2023)

Figura 13 - Separação da camada limite



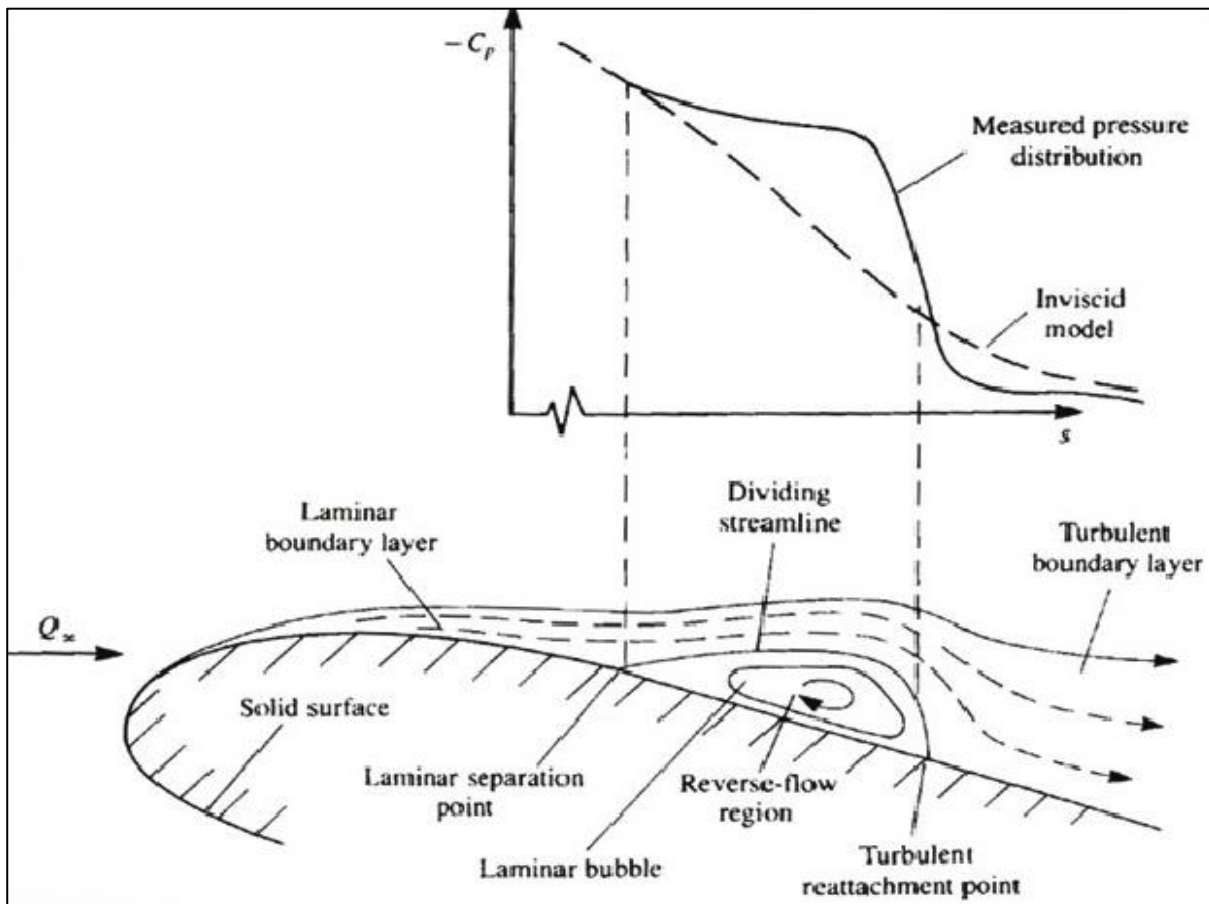
Fonte: EduRev (2023)

Com o aumento do valor de Reynolds, há maior inércia em relação à viscosidade e as camadas de fluido pertencentes à camada limite iniciam uma mudança de direção, causando rotação em diversos pontos em seu interior e sua separação da superfície. No ponto D, a tensão de cisalhamento apresenta valor igual a zero (Figura 13). A consequência dessa separação é a geração de ruído e aumento acentuado da resistência de forma devido à diferença de pressão à vante e a ré do submarino. Para Martin Renilson (2015), a geração de ruídos oriundos da camada limite afeta o funcionamento de sensores existentes no submarino e perda de eficiência do propulsor.

A camada limite separada, dependendo das condições do problema, pode reconectar à superfície. Na região entre o ponto de separação laminar e o ponto de

reconexão turbulenta dá-se o nome de bolha de separação laminar (laminar devido ao regime de escoamento no ponto de separação ser laminar - Figura 14). No fluxo separado, ocorrem pequenas perturbações que são amplificadas ao longo do escoamento. Esse fenômeno é chamado de instabilidade de Tollmien-Schlichting, gerando ondas no fluxo e causando a transição do regime para turbulento.

Figura 14 - Características da bolha de separação



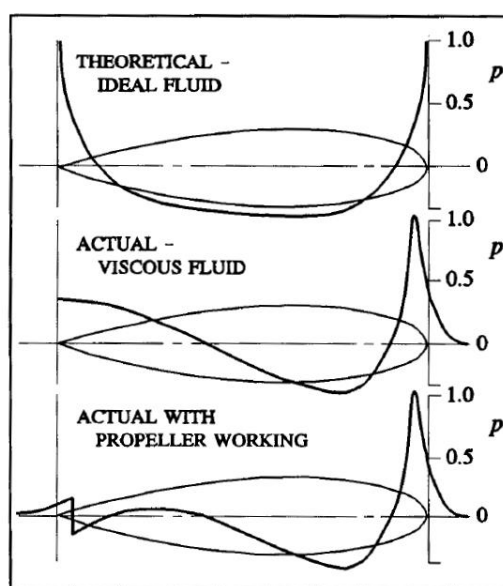
Fonte: Low Reynolds Number Flows and Transition (2012).

Uma vez que as ondas de Tollmien-Schlichting atingem uma certa amplitude, seus efeitos causam uma transferência significativa de energia cinética, distorcendo a estrutura do fluxo. Neste ponto, a camada limite está a caminho de se tornar turbulenta. Após a transição do regime na camada limite induzida pela separação, a distribuição da pressão retorna como se não houvesse bolha (KATZ e PLOTKIN, 2001). Essas condições fazem com que aconteça o fenômeno da reconexão da camada sobre a superfície do corpo.

A Figura 15 foi retirada do artigo elaborado por Harry A. Jackson (1992) e ilustra a distribuição de pressão ao longo do casco submerso e em movimento. Foi baseado

no teorema da conservação de energia de Bernoulli. A energia térmica foi ignorada devido ao valor ser relativamente pequeno. A curva superior representa o gradiente de pressão em um fluido invíscido. A curva do meio ilustra a perda de energia devida ao atrito. Na curva inferior é inserida a perda adicional de pressão causada pelo propulsor. Nos pontos em que as curvas estão abaixo de zero, a pressão é menor que a ambiente.

Figura 15 - Distribuição da pressão ao longo do casco



Fonte: Fundamentals of Submarine Concept Design (1992).

2.5 FORMAS DE RESISTÊNCIAS ABORDADAS

As formas de resistência estudadas para um casco de submarino são as resistências friccional e de forma. Martin Renilson (2015) cita que a principal diferença da resistência ao avanço entre uma embarcação de superfície e um submarino navegando submerso é que não haverá resistência por geração de onda. A resistência total é representada pela soma da resistência friccional e de forma.

2.5.1 Resistência Friccional

Para Burcher e Rydill (1994), a resistência friccional está relacionada com a superfície exposta do casco e sua velocidade. É desejável reduzir ao máximo a área superficial para menor arrasto de superfície. Uma superfície lisa e sem descontinuidades ou pontas também auxiliam para melhor desempenho. Para

Kormilitsin e Khalizev (2001), submarinos modernos com cascos axissimétricos bem hidrodinâmicos, a resistência friccional representa 50 a 60% da resistência total.

Martin Renilson (2015) cita que uma parcela dessa resistência está relacionada ao atrito de superfície, que é equivalente ao atrito em uma placa plana com mesma área molhada do submarino, ou seja, mesmo número de Reynolds. Ainda há uma outra parcela dessa resistência devido à forma da superfície, embora seja muito pequena. O submarino possui forma característica, a velocidade do fluxo que passa pelo casco hidrodinâmico não será a mesma que passa por uma placa plana. Em alguns lugares será mais alto e em outros será mais baixo. A resistência friccional de forma é simplesmente a parcela da resistência friccional total causada pela diferença no fluxo entre aquele que passa sobre uma placa plana e o fluxo sobre o submarino.

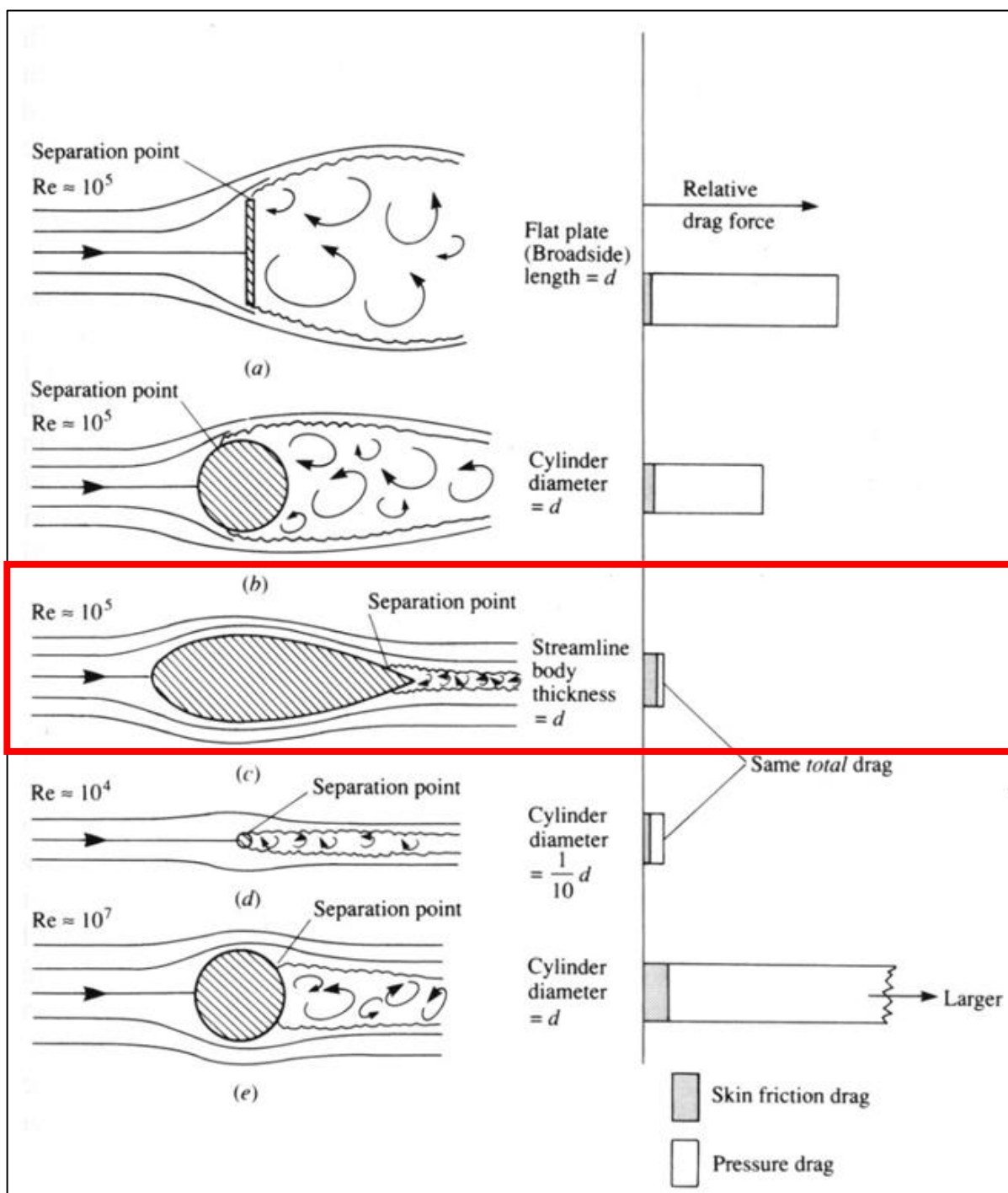
2.5.2 Resistência de Forma

Kormilitsin e Khalizev (2001) explicam que a resistência de forma reflete a influência da forma do casco e das relações de dimensões principais na distribuição de pressão ao longo do casco do submarino. Para submarinos modernos com cascos axissimétricos bem hidrodinâmicos, o valor da resistência de forma possui 10 a 20% como valor máximo. Para Burcher e Rydill (1994) A resistência de forma poder ser minimizada com variações suaves na forma do casco em direção à popa tendendo uma forma mais afilada. Ela sempre terá direção da região de alta pressão para de baixa pressão, fazendo oposição ao movimento.

Kormilitsin e Khalizev (2001) também citam que a resistência de forma é sensível ao casco como um todo e ao formato de suas extremidades. Essa sensibilidade se deve ao fato de a natureza dessa resistência se originar da resultante das forças de pressão distribuídas ao redor do casco. Portanto, a forma do casco determina o perfil da força de pressão. Porém, até em corpos hidrodinâmicos de revolução, existem consideráveis gradientes de pressão nas partes dianteira e traseira do casco.

A Figura 16 apresenta um quadro comparativo entre as resistências friccional e de forma em cinco corpos com diferentes perfis. É possível observar que a resistência friccional assume a maior parcela da resistência total em um corpo hidrodinâmico.

Figura 16 - Representação das resistências



Fonte: Fundamentals of Aerodynamics (2010)

2.6 A TURBULÊNCIA NO ESCOAMENTO

O escoamento da maioria dos fluidos newtonianos é turbulento, total ou parcialmente. Também possui como características no movimento a irregularidade (aperiódico) e a instabilidade, fatores que atribuem à quantidade de massa transportada flutuabilidade no tempo e no espaço. Nas escalas de turbulência

continuam sendo atribuídas a hipótese do contínuo, pois são muito maiores que as escalas de movimentos moleculares. A turbulência é uma propriedade do movimento do fluido, não sendo considerada uma propriedade física.

Quando é analisado o fluxo instantâneo do fluido turbulento, é possível verificar um movimento aleatório e imprevisível, porém as médias no tempo do campo de fluxo apresentam informações sobre o escoamento.

A fim de viabilizar a modelagem da turbulência, é introduzido o conceito de campo de fluxo de tempo médio, de modo que qualquer variável de fluxo em um escoamento turbulento pode ser representada como a soma de uma variável média e uma variável flutuante (instantânea).

2.6.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

O objetivo das equações de Reynolds-Averaged Navier Stokes é estabelecer um conjunto de equações com as quais podemos resolver o campo de fluxo médio. Em vez de resolver as estruturas de turbulência no tempo e espaço para depois calcular a média da solução, calcula-se primeiro a média das equações para as variáveis de tempo médio, reduzindo assim o esforço computacional.

A decomposição de Reynolds é aplicada nas equações de Navier-Stokes para se obter as equações Navier-Stokes com médias de Reynolds. A decomposição estabelece os valores instantâneos do fluido em uma variação em torno dos valores médios.

E o vetor da velocidade média é definido por:

$$\vec{V} = \bar{u}\hat{i} + \bar{v}\hat{j} + \bar{w}\hat{k} \quad (2)$$

A equação da continuidade (RANS) é apresentada como:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (3)$$

Se o fluido é incompressível,

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4)$$

Portanto:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5)$$

Aplicando a técnica da equação (2) na equação da conservação da quantidade de movimento, é obtido:

$$\rho \left(\frac{\delta \vec{V}}{\delta t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (6)$$

Na equação de movimento, o termo $\overline{u_i u_j}$ é chamado de tensor de Reynolds que é das tensões exercidas no fluido pelas flutuações turbulentas. É um componente de difícil solução, sendo necessária a introdução de um modelo de turbulência no problema para que possa ser resolvido, pois não há uma abordagem exata na Física para as tensões de Reynolds. O estudo utiliza o software *Ansys Fluent* para a solução da turbulência, que utiliza a técnica RANS com o modelo SST k- ω .

2.6.2 O modelo de turbulência SST k- ω

Modelo desenvolvido por Florian R. Menter (1994) com o objetivo de remover a dependência que o modelo k- ω padrão possui com as condições de contorno da corrente livre. A proposta é fazer com que o modelo SST (Shear Stress Transport) tenha comportamento k- ω padrão perto da superfície do casco e k- ϵ distante da superfície.

No modelo SST k- ω , o tensor de Reynolds é modelado a partir da hipótese de Boussinesq (1877), onde é assumido que as tensões turbulentas são diretamente proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento. No modelo proposto, a viscosidade turbulenta é modelada em função da energia cinética turbulenta k e da taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta ω .

As equações listadas a seguir descrevem o processo de cálculo utilizado no modelo de turbulência dentro do software.

A equação de Boussinesq é definida como:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

Onde:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

A viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_t = \frac{\rho k \alpha_1}{\max(\alpha_1 \omega, \varphi F_2)} \quad (9)$$

Onde:

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2) \quad (10)$$

$$\text{arg}_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \mu}{\rho d^2 \omega} \right) \quad (11)$$

$$\varphi = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (12)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

A equação de k do modelo é definida como:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

Onde:

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (15)$$

$$P_k = \min(P, 20 \rho \beta^* k \omega) \quad (16)$$

A equação de ω do modelo é definida como:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \gamma \frac{\rho}{\mu_t} P - \rho \beta \omega^2 + (1 - F_1) CD \quad (17)$$

$$CD = 2 \sigma_{\omega^2} \frac{\rho}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (18)$$

Onde:

$F_1 = 1$ para $y \rightarrow 0$ (na extremidade interna da camada limite turbulenta)

$F_1 = 0$ para $y \rightarrow \infty$ (região externa da camada)

A função F_1 é responsável pela ligação entre os modelos k- ϵ e k- ω . É definida por:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad (19)$$

$$\text{arg}_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\mu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho k \sigma_{\omega 2}}{CD_{kw} d^2} \right] \quad (20)$$

$$CD_{kw} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (21)$$

Cada uma das constantes é uma mistura de uma constante interna (ϕ_1) e externa (ϕ_2), combinada por meio de:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (22)$$

As condições de contorno recomendadas em Menter (1994) são:

$$\frac{U_\infty}{L} < \omega_{farfield} < 10 \frac{U_\infty}{L} \quad \frac{10^{-5} U_\infty^2}{Re_L} < k_{farfield} < \frac{0,1 U_\infty^2}{Re_L}$$

$$\omega_{wall} = 10 \frac{6\mu}{\rho \beta_1 (\Delta d_1)^2} \quad k_{wall} = 0$$

Onde L é o comprimento aproximado do domínio computacional e a combinação dos dois valores de campo distante deve produzir uma viscosidade turbulenta de fluxo livre entre 10^{-5} e 10^{-2} vezes a viscosidade laminar de fluxo livre.

As constantes são:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} k^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

| | | |
|----------------------|-----------------------------|--------------------|
| $\sigma_{k1} = 0,85$ | $\sigma_{\omega 1} = 0,5$ | $\beta_1 = 0,075$ |
| $\sigma_{k2} = 1$ | $\sigma_{\omega 2} = 0,856$ | $\beta_2 = 0,0828$ |
| $\beta^* = 0,09$ | $k = 0,41$ | $\alpha_1 = 0,31$ |

2.7 PROPULSORES EM DUTO

O estudo realiza na 3ª fase uma busca da popa com a maior eficiência hidrovolume para o MOD10. O referido conjunto foi projetado para um AUV com algumas características semelhantes ao modelo SUBOFF (mais detalhes no subitem 6.4) e não chegou a ser fabricado para testes em tanque de provas até a data da publicação

desse estudo. Alguns conceitos físicos básicos para entendimento do uso dessa opção de propulsor são descritos abaixo.

Um propulsor em duto consiste em uma combinação de um aerofólio anular e um rotor, atuando como elemento de propulsão da embarcação.

Alex Brasil (2010) afirma que o objetivo do rotor é aplicar aceleração à massa líquida, para que adquira energia cinética e se realize assim a transformação da energia mecânica de que está dotado.

O duto de aceleração e o de desaceleração são os mais comuns em projetos navais atualmente.

Van Manen Oosterveld (1970) em seu trabalho aborda sobre os conceitos físicos envolvidos na aplicação do duto de aceleração e de desaceleração. O duto de aceleração é usado em casos em que o propulsor do navio é fortemente carregado ou limitado em diâmetro. Ele oferece uma forma de aumentar a eficiência do propulsor fortemente carregado. O duto em si já produz um empuxo positivo.

No caso do duto de desaceleração, o objetivo do seu uso é aumentar a pressão estática na região do propulsor. Este sistema de propulsor em duto é o chamado *pumpjet*. O duto produzirá um empuxo negativo. Este duto pode ser usado se o retardo da cavitação da hélice for desejado. Para os submarinos, seu emprego pode ser interessante por auxiliar na redução do nível de ruído, o que pode ser importante para reforçar o seu poder de ocultação.

Para Burcher e Rydill (1994), a força axial que atua no propulsor geralmente difere do empuxo líquido do sistema. Uma força positiva ou negativa pode atuar no duto, dependendo de seu formato e das condições de operação. Devido à ação do duto, a velocidade no plano do propulsor pode ser menor ou maior que a velocidade no plano de um propulsor aberto com o mesmo diâmetro e velocidade de avanço.

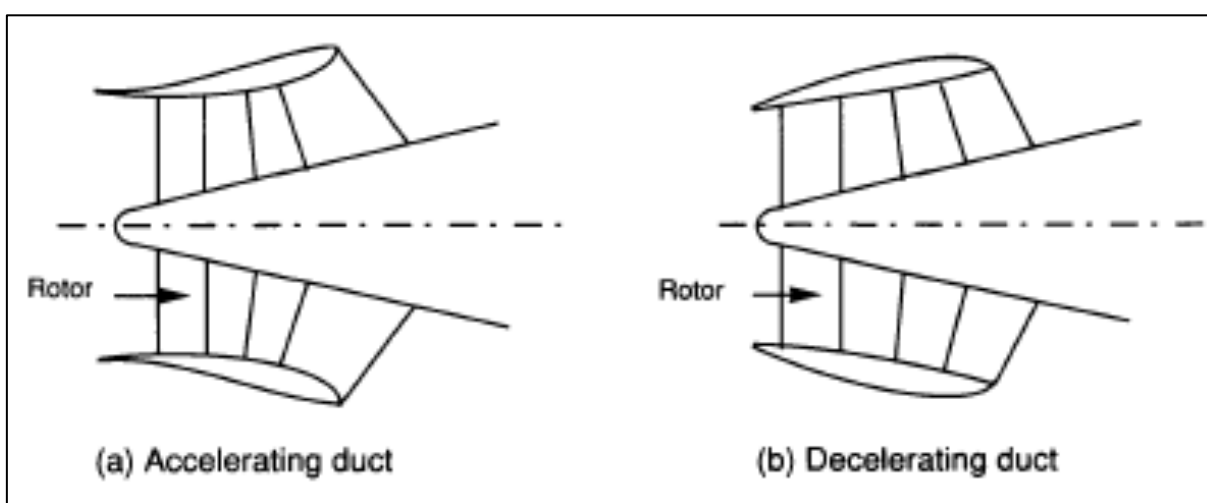
O autor ainda aborda que em um propulsor sem duto ou aberto, a ponta da pá não consegue fornecer grande quantidade de empuxo devido à diferença de pressão entre a parte da frente e a de trás da pá resultar em uma rotação do fluido, levando ao que é chamado de vórtice de ponta. Além da deficiência de empuxo na ponta da pá, o vórtice de ponta pode levar à cavitação em operações próximas à superfície devido à pressão muito baixa no centro do vórtice e à geração de ruído altamente indesejável.

Se a pá do propulsor for desenvolvida para operar com uma mínima folga do duto, a diferença de pressão entre as duas faces da pá é sustentada. Esta é uma das

razões pelas quais um propulsor em duto de diâmetro menor pode ser usado em comparação com um propulsor aberto. O duto também oferece proteção ao propulsor contra detritos ou gelo.

No entendimento de Takahashi e Gargan-Shingles (2023), vários estudos experimentais e numéricos sobre propulsores em duto já foram realizados. No entanto, o desempenho de propulsores em duto em submarinos ainda não está claro, e os parâmetros e procedimentos de projeto detalhados desses propulsores não são publicados devido à natureza confidencial dos estudos.

Figura 17 - Formas de duto mais utilizadas atualmente



Fonte: Concepts of Submarine Design (1994).

3 O PERFIL DE POPA

A acomodação dos sistemas no interior de um submarino exige que seja realizada de forma mais eficiente do que nos meios de superfície, pois a disposição é praticamente longitudinal. Partindo desse pressuposto, é fundamental que seja estabelecida uma relação de equilíbrio entre um arranjo interno funcional e um perfil de popa de baixa resistência ao avanço, ou seja, alta eficiência hidro-volume.

Atualmente a forma de casco de um submarino é projetada para acomodar o seu sistema de propulsão relativamente a ré a fim de manter maior proximidade com o propulsor. A propulsão demanda maior espaço interno e uma configuração de arranjo aprimorada para maior ganho de funcionalidade. Essa ordenação gera conflito durante o desenvolvimento do projeto, pois há sempre necessidade de se afunilar a popa para evitar a separação da camada limite.

O estudo adota o uso de uma popa de maior volume ou popa cheia em vez da popa mais cônica, que na literatura é chamada de popa tradicional. Para Christopher L. Warren (1997), os projetos de popa cônica tradicionais possuem uma popa com um comprimento de 2 a 3 diâmetros máximos, partindo do diâmetro máximo até a conexão com o propulsor. O modelo de referência adotado neste trabalho possui um comprimento de popa de 2 diâmetros máximos, o que permite enquadrá-lo como um modelo de popa cheia. De igual modo, os modelos variantes selecionados.

O capítulo contextualiza a abordagem de popa cheia aplicada ao trabalho, apresentando questionamentos de diversos autores a respeito dos problemas quanto ao uso da popa cônica tradicional e as vantagens do uso da popa cheia.

3.1 PROBLEMAS NO USO DA POPA CÔNICA

Para Kormilitsin e Khalizev (2001), é mais fácil desenhar uma forma ideal que forneça a menor resistência hidrodinâmica do que projetar um casco de submarino real. Dentro dos motivos mencionados pelos autores estão:

- a) Problemas com a acomodação de componentes em compartimentos em um casco otimizado em relação à razão comprimento / diâmetro;
- b) Perfil de popa não compatível com os atuadores do leme e linha de eixo; e
- c) Falta de volume interno suficiente a ré para instalação dos tanques de lastro.

É importante também ressaltar que tais desvios do ideal aumentam naturalmente a resistência do submarino e reduzem as qualidades furtivas, portanto é

possível afirmar que um ganho de volume em uma popa considerada ideal implicaria em perda na eficiência hidrodinâmica.

Burcher e Rydill (1994) afirma que um afunilamento suave na popa também pode trazer problemas no projeto do casco resistente do submarino, pois a conexão da forma cônica da popa com o casco resistente pode não ser viabilizada devido ao ângulo de abertura ser muito pequeno, o que pode forçar a adoção de uma forma de popa considerada não ideal. É necessário que se tenha uma diferença entre os perfis dos cascos, porém deve possuir o mínimo necessário de forma a viabilizar a instalação dos tanques externos e demais sistemas de bordo, além de possibilitar o acesso para montagem, pintura, inspeções e manutenções. O motivo para esse volume ser o mínimo possível é devido a essa área ser alagada quando o submarino está submerso, fazendo com que esse volume de água entre os perfis precise também ser deslocado, exigindo mais da propulsão.

Para Christopher Warren (1997), para que seja evitada a separação da camada limite, os projetos de submarinos de popa cônica geralmente não alcançam um meio ângulo do cone de popa maior que 20° . Essa questão interfere na razão comprimento/diâmetro do submarino.

Burcher e Rydill (1994) também cita que o eixo principal é conduzido da vedação do casco resistente até o cubo do propulsor e que há requisitos de projeto para o posicionamento dos lemes e hidroplanos na popa, caso contrário, as linhas dos controladores de superfícies interceptariam a linha do propulsor. Uma popa mais afunilada dificulta o cumprimento desses requisitos. A Figura 18 ilustra um submarino japonês da classe *Yūshio*, exemplo de perfil de popa cônica.

3.2 O USO DA POPA CHEIA

Christopher L. Warren (1997) afirma que a solução para o conflito das questões apresentadas no subitem anterior pode ser o uso da forma de casco de popa cheia. Ao manter uma popa mais cheia, a forma do casco resultante ganhará uma quantidade considerável de volume interno e funcional. O projeto dessa forma de popa oferece flexibilidade considerável nos arranjos interno e externo do submarino, e é capaz de fornecer maior flutuabilidade. Assim, é possível mover os principais componentes da propulsão mais para ré e, assim, encurtar o comprimento total do submarino.

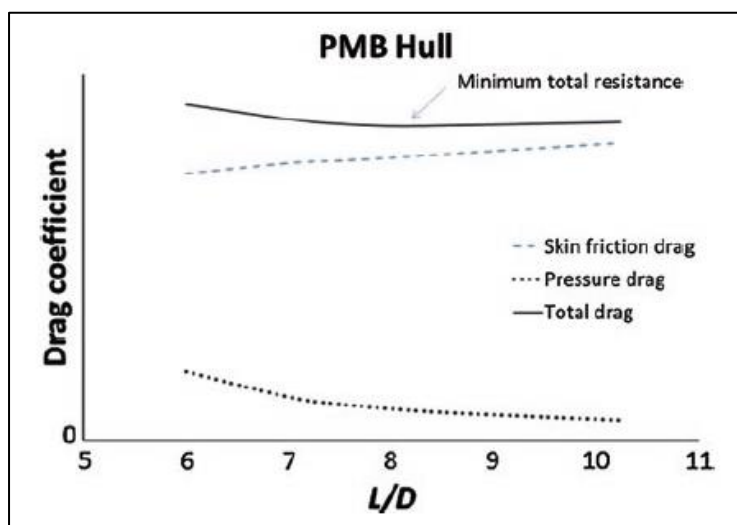
Figura 18 - Submarino Classe Yūshio



Fonte: Reddit (2018)

O autor também cita que um formato de casco mais curto reduz a relação comprimento/diâmetro e, com a mesma potência de eixo instalada, o submarino pode atingir uma velocidade maior se comparado ao submarino de popa cônica projetada convencionalmente. Martin Renilson (2015) explica que o submarino que possui um corpo médio paralelo tem uma relação comprimento/diâmetro próxima do ideal na razão 8:1. A Figura 19 descreve a relação entre a razão comprimento axial/diâmetro máximo e o coeficiente de arrasto de um submarino com corpo médio paralelo.

Figura 19 - Resistência X L/D para um submarino de casco PMB



Fonte: Concepts of Submarine Design (1994)

Christopher L. Warren (1997) ainda afirma que uma desvantagem de um submarino de popa cheia é a possível perda de eficiência do propulsor/duto devido ao aumento do arrasto friccional e de forma quando o fluxo entra no duto, porém a embarcação pode ter uma velocidade máxima maior devido ao formato do casco mais curto e à melhor relação comprimento / diâmetro.

O autor ainda cita que estudos já realizados mostraram que uma popa cheia reduz o comprimento do submarino em 5 a 18%, mantendo o equipamento e pesos em suas devidas posições no arranjo. Em um projeto de popa cheia, uma forma de controle da camada limite é acelerá-la com a utilização do duto.

A Figura 20 ilustra o submarino nuclear britânico da classe Astute como exemplo de submarino de popa cheia com utilização de duto.

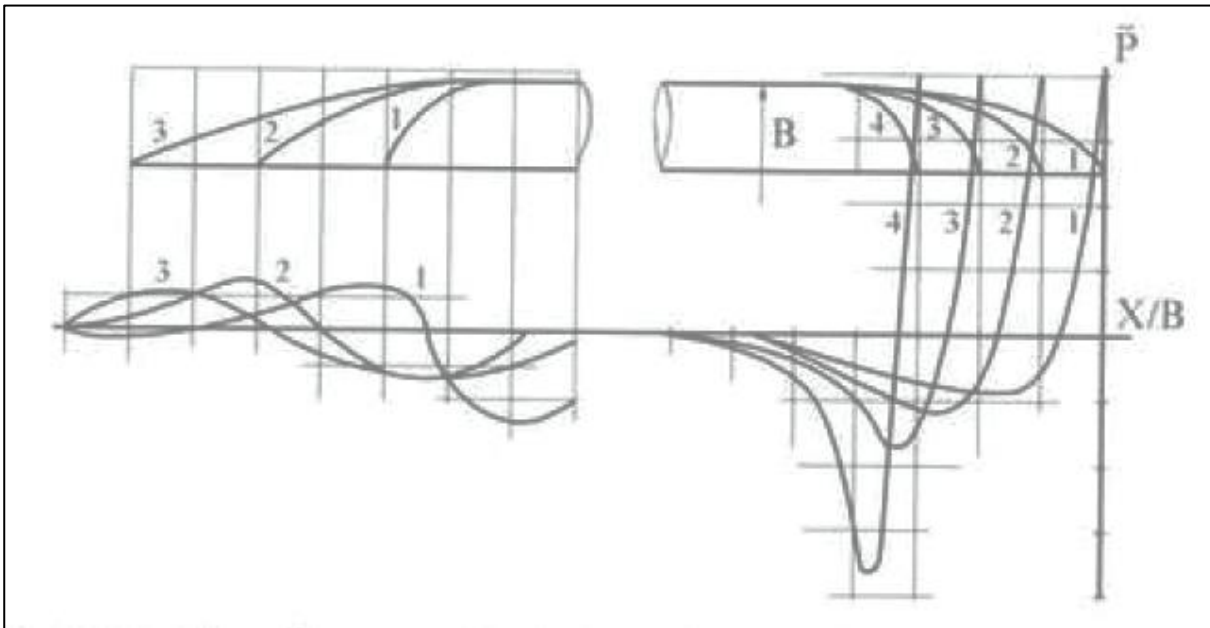
Figura 20 - Submarino Classe Astute



Fonte: Navy Lookout (2023)

Joubert (2004) cita uma vantagem adicional de uma popa mais cheia que é fornecer flutuabilidade em um local onde muitas vezes há componentes pesados da propulsão, como o motor elétrico. A Figura 21, apresentada no trabalho de Kormilitsin e Khalizev (2001), ilustra as variações do gradiente de pressão para um corpo de revolução devido à variação do comprimento da extremidade de proa e popa. Os autores também afirmam que a introdução de um corpo médio paralelo e a redução do comprimento das seções de proa e popa resultam no aumento dos diferenciais de pressão nas extremidades do submarino e, portanto, no aumento da resistência de forma.

Figura 21 - Variações de pressão para um corpo de revolução



Fonte: Theory of Submarine Design (2001)

Na prática, a redução da área de superfície molhada supera o aumento da resistência de forma devido ao coeficiente prismático (L_{PMB} / L_{TOTAL}) aumentar, reduzindo a resistência total.

Joubert (2004) também faz um alerta que a melhor forma de popa fornecendo o arrasto mínimo para um corpo aerodinâmico sendo rebocado através de um fluido pode ser diferente de um sendo empurrado através do mesmo fluido com um propulsor montado na popa. Isso ocorre porque o influxo (aumento da velocidade) induzido pela hélice afeta a distribuição de pressão no corpo

4 GERAÇÃO DAS LINHAS DE POPA

O estudo utiliza um código elaborado no software MATLAB e as principais características do modelo SUBOFF como parâmetros de entrada. O código possui estrutura recursiva, propriedade que atribui ao código capacidade de invocar a si mesmo. Essa estruturação é utilizada para que a geração das linhas e os processos de seleção sejam ordenados em instâncias lógicas de modo que a manipulação das variáveis não gere interferência entre elas. Os processos de seleção das linhas para as simulações também são apresentados nesse capítulo.

4.1 O MODELO SUBOFF

Com o propósito de auxiliar em projetos de submarinos avançados, o Submarine Technology Program Office (STP) da Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) financiou o projeto SUBOFF, que foi desenvolvido pelo David Taylor Research Center (DTRC) e que apresentou uma geometria de casco de submarino axissimétrico junto com os seus resultados de medições experimentais realizados em tanques de provas. A medida visa a estabelecer um referencial para pesquisadores compararem previsões numéricas e medições experimentais obtidos em seus trabalhos envolvendo submarinos com ou sem apêndices.

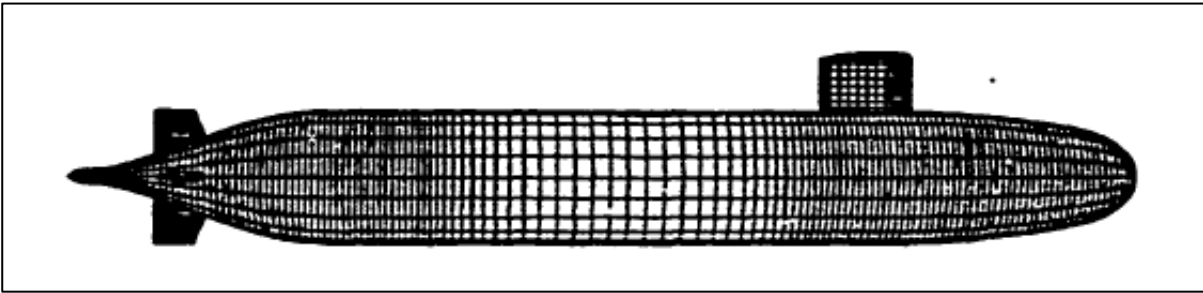
Os dados do modelo foram coletados do relatório oficial do centro de pesquisas (DTRC). Cada seção é descrita por equações que fornecem o valor do raio ao longo do seu comprimento longitudinal, sempre com os valores de entrada e de saída em pés. Os dados da geometria do modelo SUBOFF são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do modelo SUBOFF

| Característica | Valor |
|--|---------------------|
| Comprimento da seção da proa | 3,333 Ft (1,016 m) |
| Comprimento da seção do corpo médio paralelo | 7,313 Ft (2,229 m) |
| Comprimento da seção da popa | 3,333 Ft (1,016 m) |
| Comprimento da seção do bosso | 0,313 Ft (0,095 m) |
| Comprimento total do corpo | 14,292 Ft (4,356 m) |
| Diâmetro máximo do corpo | 1,667 Ft (0,508 m) |
| Razão de escala (real / modelo) | 24 |

Fonte: *Geometric Characteristics of DARPA Suboff Models* (1989)

Figura 22 - Geometria do modelo SUBOFF



Fonte: Geometric Characteristics of DARPA Suboff Models (1989)

A geometria do corpo é obtida pela revolução das linhas limitadas pelas funções apresentadas no relatório da agência e descritas abaixo.

Equação da Proa

De $0 \text{ Ft} \leq \ell \leq 3,333 \text{ Ft}$

$$R = R_{\text{MAX}} [1,126(0,3\ell - 1)^4 + 0,443\ell^2(0,3 - 1)^3 + 1 - (0,3\ell - 1)^4 (1,2\ell + 1)]^{1/2,1} \quad (23)$$

$$R_{\text{MAX}} = \frac{5}{6} \text{ Ft}$$

Corpo Médio Paralelo

De $3,333 \text{ Ft} \leq \ell \leq 10,646 \text{ Ft}$

$$R = R_{\text{MAX}}$$

Equação da Popa

De $10,646 \text{ Ft} \leq \ell \leq 13,979 \text{ Ft}$

$$R = R_{\text{MAX}} \left[r_h^2 + r_h k_o \xi^2 + (20 - 20r_h^2 - 4r_h k_o - \frac{1}{3} k_1) \xi^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h k_o + k_1) \xi^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h k_o - k_1) \xi^5 + (-10 + 10r_h^2 + r_h k_o + \frac{1}{3} k_1) \xi^6 \right]^{1/2} \quad (24)$$

$$r_h = 0,1175 \quad k_o = 10 \quad k_1 = 44,624 \quad \xi = \frac{13,979 - x}{3,333}$$

Equação do Bosso

De $13,979 \text{ Ft} \leq \ell \leq 14,291 \text{ Ft}$

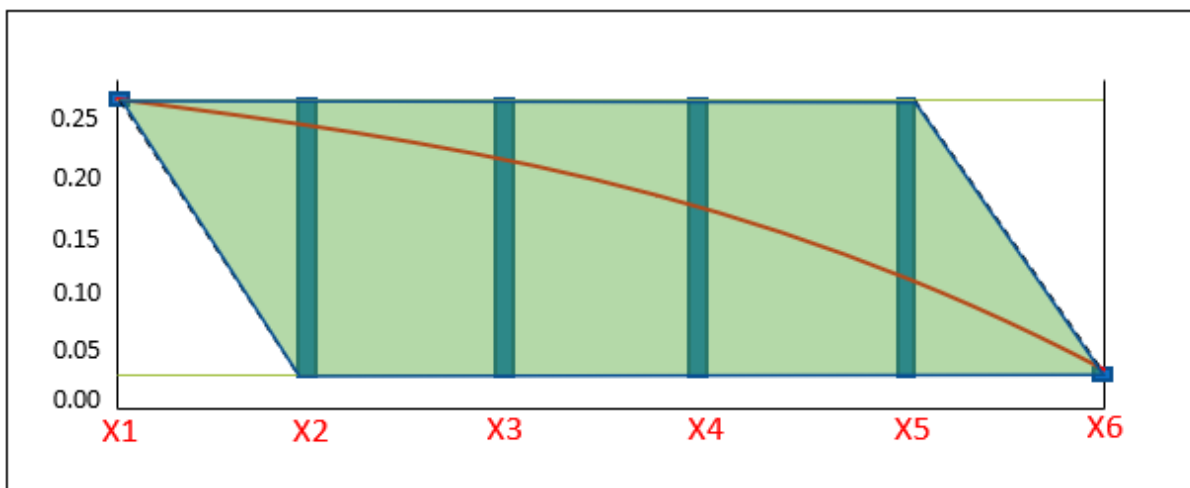
$$R = 0,118 R_{\text{MAX}} [1 - (3,2 \ell - 44,733)^2]^{1/2} \quad (25)$$

4.2 CRIAÇÃO DAS LINHAS DE POPA

As linhas de popa criadas pelo código MATLAB variantes do modelo SUBOFF (modelo de referência) são utilizadas para a criação das geometrias dos submarinos variantes (sólido axissimétrico) utilizando-se como informações de entrada: diâmetro do PMB, comprimento longitudinal de popa e diâmetro do bosso.

O processo tem início estabelecendo-se seis pontos de controle sobre o comprimento longitudinal igualmente distribuídos sobre o eixo x de modo que o primeiro ponto é fixo em y sobre o raio máximo do submarino (X_1) e o último ponto é fixo sobre o raio do bosso (X_6). Os pontos restantes (X_2, X_3, X_4 e X_5) são variáveis em y de um valor mínimo igual a X_6 e um valor máximo igual a X_1 com uma taxa de variação descrita na Tabela 1 (1ª rodada). A Figura 23 ilustra o conjunto de intervalo de valores possíveis para as linhas de popa.

Figura 23 - Conjunto Universo de soluções



Fonte: Autor

Após o estabelecimento do conjunto de pontos possíveis em y, esses são inseridos na *structure* modelos.PTS. Cada linha dessa *structure* representa um possível candidato à linha de popa. Logo em seguida, os seis pontos de cada linha são interpolados por splines cúbicos em 100 pontos. Esse processo cria a *structure* modelos.INT. Os pontos em x também são interpolados utilizando-se a função *linspace* em 100 pontos.

São adicionados 2 arquivos no código com a tabela de pontos das linhas de proa e do bosso com o objetivo de completar a linha de casco do submarino, criando as *structures* modelos.PROA e modelos.CAP respectivamente. Todas as geometrias recebem as geometrias de proa, do PMB e do bosso do modelo SUBOFF a fim de completar o perfil do submarino variante.

4.3 PROCESSOS DE SELEÇÃO

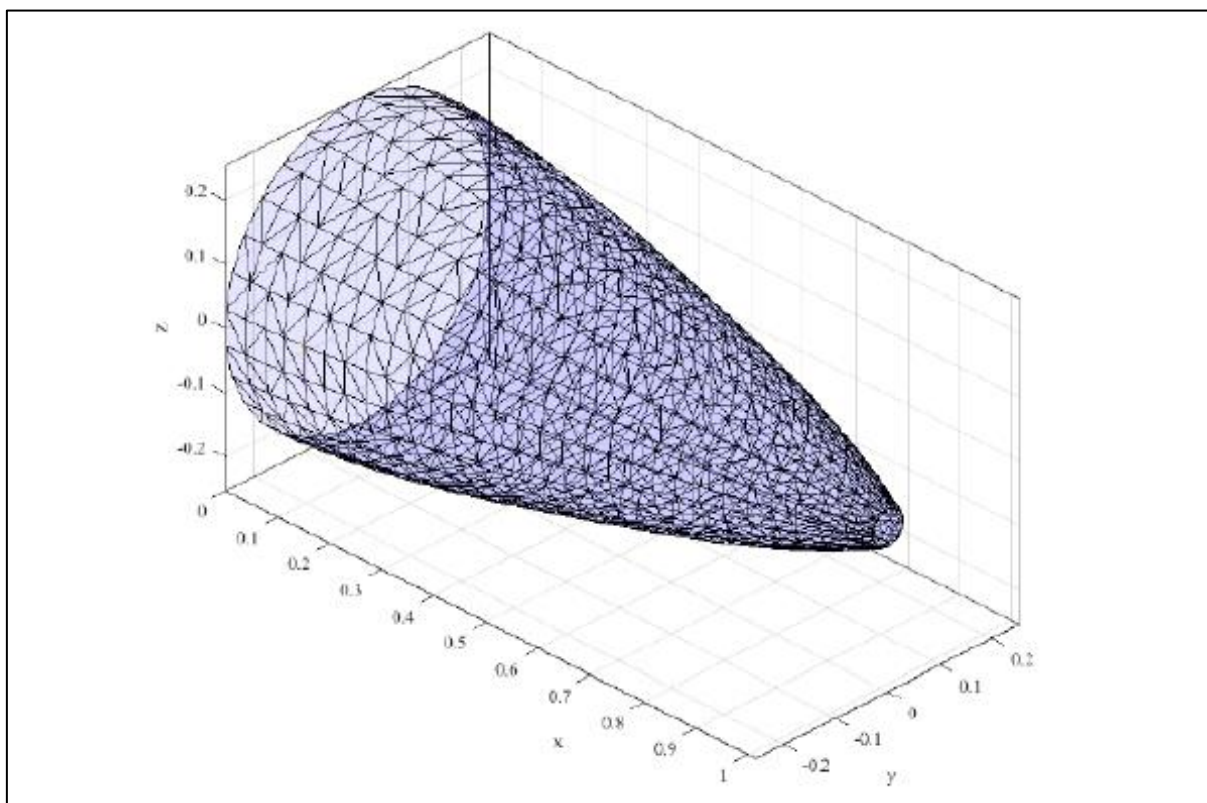
O primeiro processo estabelecido no código é a eliminação das linhas que possuem derivada positiva em algum ponto. Após a eliminação, é gerada a *structure* modelos.SEL1 com as linhas remanescentes.

O segundo processo é chamado de regra da tangente e está relacionada com a tangente máxima que a linha de popa pode alcançar. No estudo, foi estabelecido que $\max[\text{tg}(\theta)] = 1$. Linhas com tangente maior que 1 entre dois pontos no eixo x é eliminada do processo. A *structure* modelos.SEL2 é criada com as linhas que não infringiram a regra da tangente.

Na sequência, a linha de perfil do modelo SUBOFF é inserida no código e junto com os perfis selecionados são calculados a área de superfície molhada e o volume da popa. Os pontos em y do modelo SUBOFF são obtidos pelas equações descritas na seção 4.1 e são inseridos junto com os valores das linhas variantes na *structure* modelos.SEL2D. Para o cálculo da área de superfície molhada, é utilizado o recurso chamado de Triangulação de Delaunay. Os valores das áreas são armazenados na *structure* modelos.AS. A Figura 24 ilustra a triangulação de Delaunay em uma geometria de popa durante o processo de cálculo no estudo. Devido à geometria de popa ser um sólido de revolução, o volume foi calculado utilizando-se o método dos cilindros e os valores inseridos na *structure* modelos.VOL.

O terceiro processo de seleção envolve a eliminação das geometrias que possuem volume menor que a geometria de “pai”. O motivo dessa eliminação é devido ao estudo buscar uma geometria de popa com maior volume que o modelo de referência.

Figura 24 - Triangulação de Delaunay



Fonte: Autor

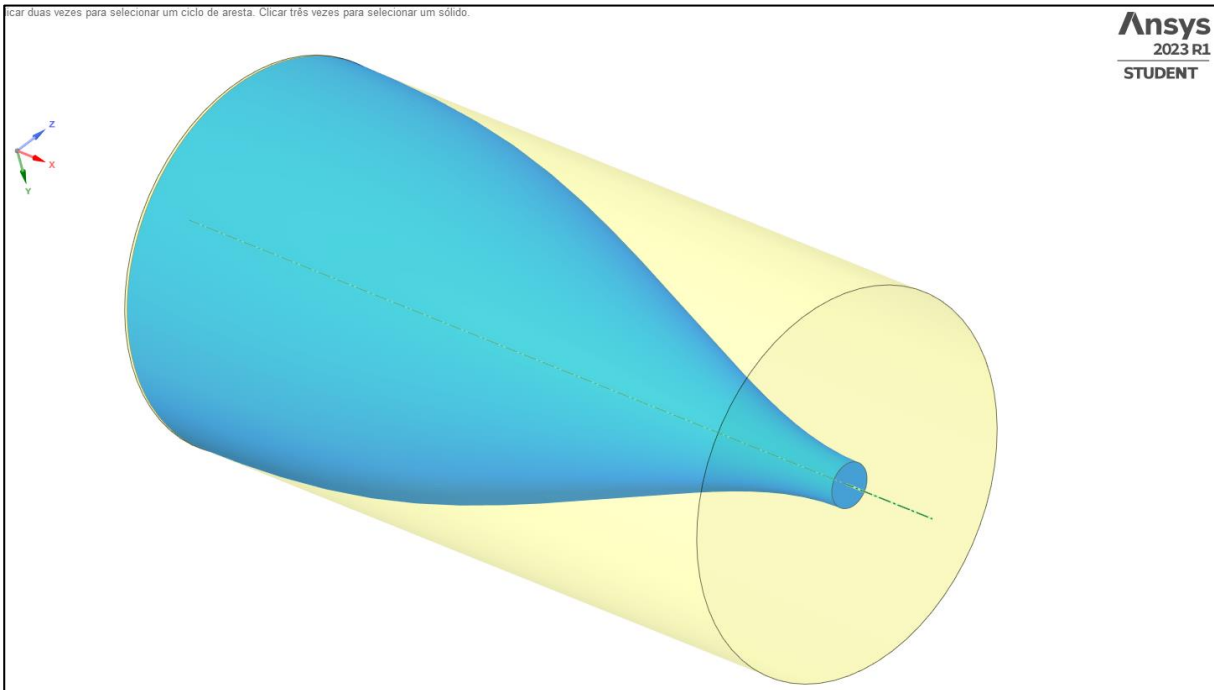
Para realizar a busca, é criado um parâmetro adimensional que é atribuído o nome de coeficiente de cilindro. Esse coeficiente é a razão entre o volume da geometria e o volume de um cilindro de raio máximo e comprimento da popa inseridos no código. Geometrias com coeficiente de cilindro menores que o coeficiente do modelo SUBOFF são eliminadas.

Todos os valores do coeficiente de cilindro são inseridos na *structure* modelos.CIL e somente os valores das geometrias selecionadas são inseridos na *structure* modelos.CIL2. A Figura 25 ilustra em amarelo o cilindro e em azul uma geometria de uma linha selecionada para o cálculo do coeficiente de cilindro.

Ao final do código, são geradas as tabelas de pontos em y de cada linha de popa, uma tabela de pontos em x, uma de área de superfície molhada e de coeficiente de cilindro. As 2 primeiras tabelas são utilizadas para a criação das geometrias no *Ansys SpaceClaim* e as 2 últimas para cálculo do coeficiente de Semnan.

$$\text{Coef de cilindro} = \frac{\text{Volume da geometria}}{1,016 \times \pi(0,254^2)} \quad (26)$$

Figura 25 - Coeficiente de Cilindro



Fonte: Autor

5 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

As simulações computacionais desse trabalho são realizadas com auxílio do software *Ansys Student*, exclusivo para uso acadêmico e que oferece acesso ao pacote *Ansys Workbench*. As geometrias são criadas no *Ansys SpaceClaim* a partir das linhas de popa. Através de um código inserido no mesmo software, as geometrias são geradas de modo automático.

Um dos objetivos das simulações em todas as fases é obter a resistência total das geometrias criadas. O valor dessa resistência é utilizado para o cálculo do Coeficiente de Semnan.

O coeficiente de Semnan é um parâmetro usado para medir a "eficiência hidrovolume". Para se obter uma boa forma de submarino, esse coeficiente é muito importante porque conta tanto a resistência quanto o volume. Valores maiores deste coeficiente proporcionam melhor projeto (MOONESUN, KOROL, *et al.*, 2017).

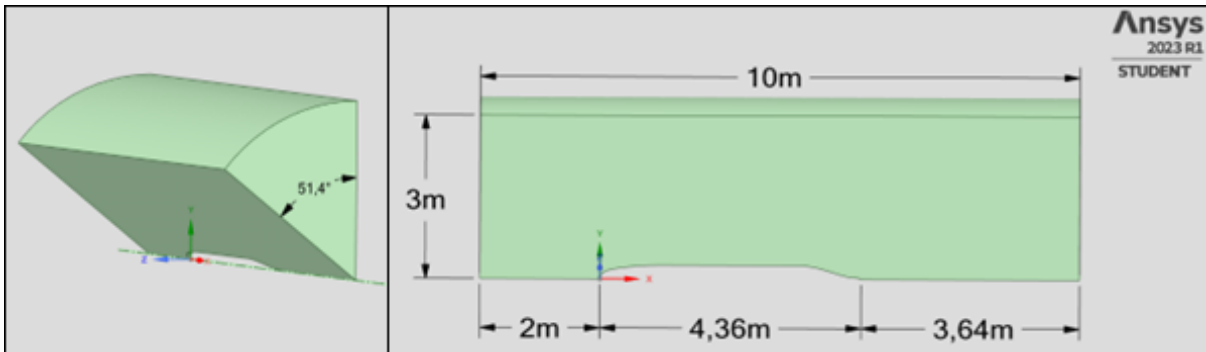
$$\text{Coeficiente de Semnan} = \frac{\text{Volume}^{\frac{1}{3}}}{\text{Coeficiente de Resistência Total}} \quad (27)$$

5.1 GERAÇÃO DAS GEOMETRIAS

Após geradas as tabelas de pontos das linhas de popa no software MATLAB, é criado um código em Python que visa automatizar o processo de criação das geometrias pelo *Ansys SpaceClaim* que em seguida são utilizadas no *Ansys Fluent* para as simulações. Devido às geometrias serem axissimétricas, é possível reduzir o esforço computacional e tempo de simulação analisando somente um setor de $\frac{2\pi}{7}$ radianos na 1ª e 2ª fases devido ao propulsor MOD5a possuir 7 pás e $\frac{2\pi}{9}$ radianos na 3ª fase devido às 9 pás do propulsor MOD10. A Figura 26 ilustra as dimensões de uma das geometrias não rotativa utilizada na 1ª fase.

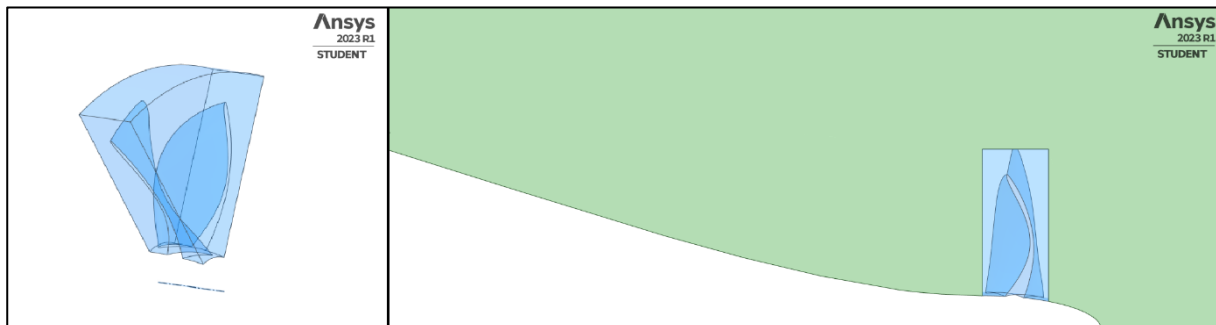
Na 2ª e 3ª fases, a Figura 27 e a Figura 28 apresentam as geometrias rotativas utilizadas nas respectivas fases. Na 3ª fase, o duto é representado pela parte sem malha acima da malha rotativa.

Figura 26 - Dimensões da geometria com malha fixa



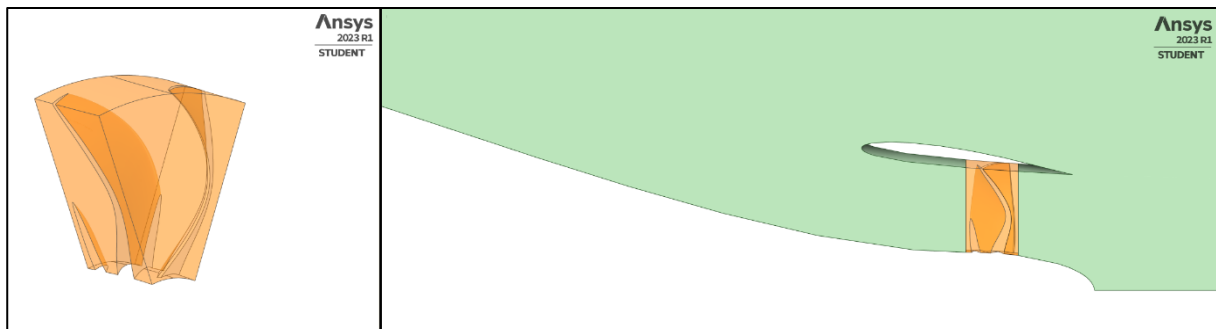
Fonte: Autor

Figura 27 - Apresentação da geometria com propulsor (2ª fase)



Fonte: Autor

Figura 28 - Apresentação da geometria com propulsor e duto (3ª fase)



Fonte: Autor

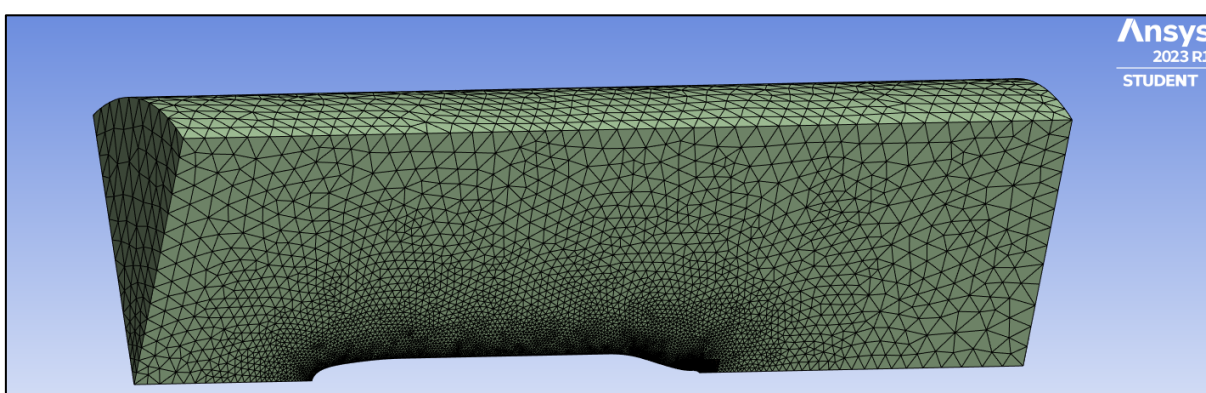
5.2 ESTRUTURAÇÃO DA MALHA

A estruturação da malha é realizada no *Ansys Meshing*. A Figura 29 apresenta uma malha já estruturada em uma geometria da 1ª fase. Para a obtenção de resultados mais precisos, foram utilizados os seguintes recursos do software:

- a) Face Sizing: Aplicada em toda a face que representa a superfície do casco do submarino e do duto com tamanho de 3 cm;

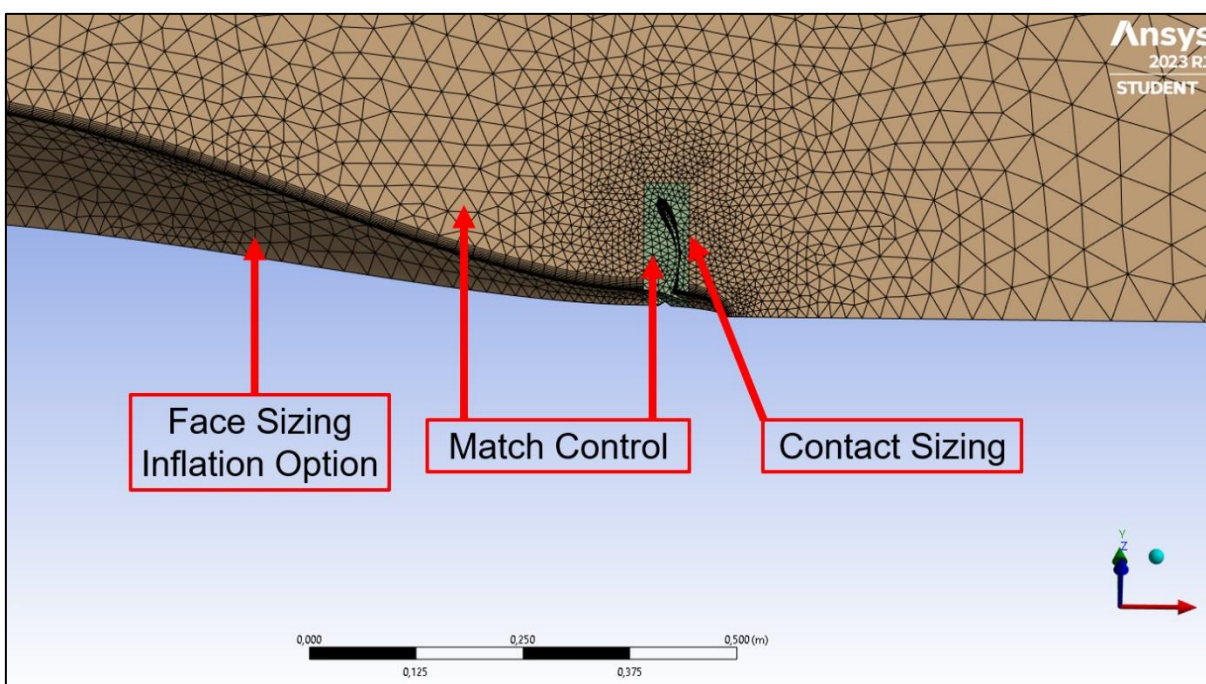
- b) Inflation Option: É selecionada a First Layer Thickness com máximo de 10 camadas e taxa de crescimento de 10%;
- c) Contact Sizing: Estabelecido um tamanho de 8 mm, a fim de deixar a fronteira entre as malhas com os elementos na região de fronteira o mesmo tamanho;
- d) Match Control: Recurso que condiciona a fronteira periódica, é cíclica e estabelecida nas paredes das malhas fixa e rotativa conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 29 - Geração da malha gerada no *Ansys Meshing*



Fonte: Autor

Figura 30 - Recursos do *Ansys Meshing*



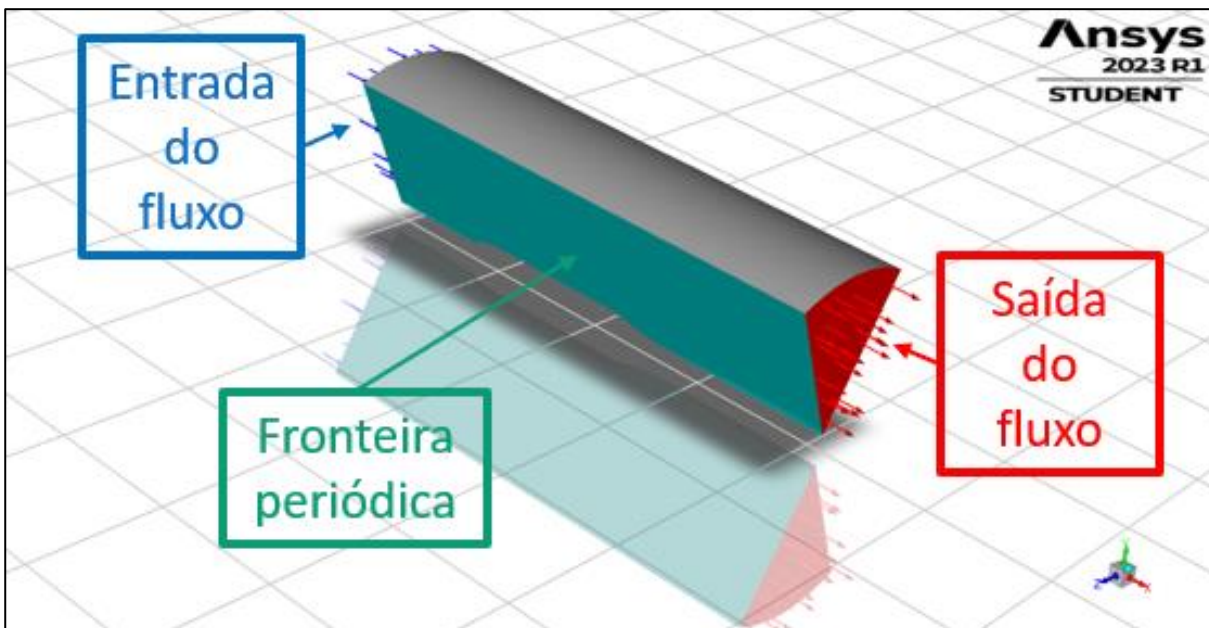
Fonte: Autor

5.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As simulações são realizadas no *Ansys Fluent* e têm como objetivo calcular a resistência ao avanço, empuxo (2ª e 3ª fases), campos de tensão de cisalhamento e pressão na superfície da popa. O regime escolhido é o permanente que visa a encontrar o estado de equilíbrio do sistema. Valores flutuantes ou comportamento transiente durante o período da simulação não são analisados nesse trabalho. Apenas o estado final é de interesse.

O modelo de turbulência empregado é descrito no subitem 2.6.2 para todas as fases. A velocidade do submarino adotada no trabalho é 6,17 m/s. A Figura 31 ilustra a dinâmica da simulação, o fluxo entra na parede da geometria representada em azul e sai pela parede representada em vermelho. Na mesma figura também é ilustrada em verde uma das paredes selecionadas como fronteira periódica.

Figura 31 - Condições de contorno 1



Fonte: Autor

Para os parâmetros de turbulência, é escolhido o método Intensity and Length Scale. Em Karim, Rahman e Alim (2011) é apresentada a equação para o cálculo da intensidade da turbulência:

$$I = 0,16(Re)^{-1/8} \quad (28)$$

Para o cálculo da escala de comprimento da turbulência, a equação é definida como:

$$\varphi = 0,4\delta \quad (29)$$

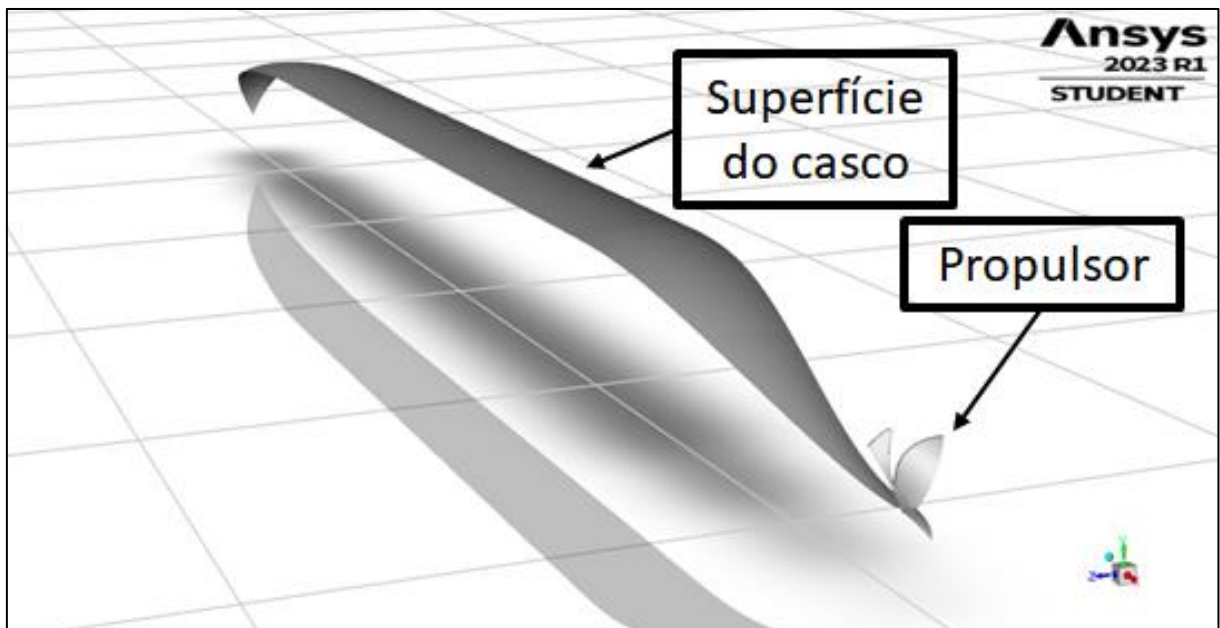
Onde δ é a espessura da camada limite turbulenta e pode ser aproximada usando a seguinte correlação:

$$0,4\delta \approx \frac{0,37x}{Re_x^{1/5}} \quad (30)$$

A Figura 32 apresenta a superfície do casco e do propulsor em uma simulação da 2ª fase. A resistência ao avanço é retirada de ambas as superfícies e o empuxo calculado sobre o propulsor que pertence à malha rotativa. Campo de pressão e de tensão de cisalhamento é analisado somente na superfície da popa.

A condição de convergência adotada na 1ª fase é o valor de *drag* menor que 10^{-4} N ou limite de 1000 iterações e nas 2ª e 3ª fases valores para *drag* e *thrust* menores que 20^{-4} N ou limite de 1000 iterações. Na 2ª e 3ª fases, os resultados da simulação são obtidos quando a velocidade de rotação do propulsor estabelecer uma diferença entre resistência ao avanço e empuxo menor que 0,2 N.

Figura 32 - Condições de contorno 2



Fonte: Autor

Em todas as fases também é analisado se há separação da camada limite na superfície da popa da geometria avaliada. Os valores negativos de tensão de

cisalhamento indicam que o fluxo apresenta mudança de direção em x, indicando separação da camada limite.

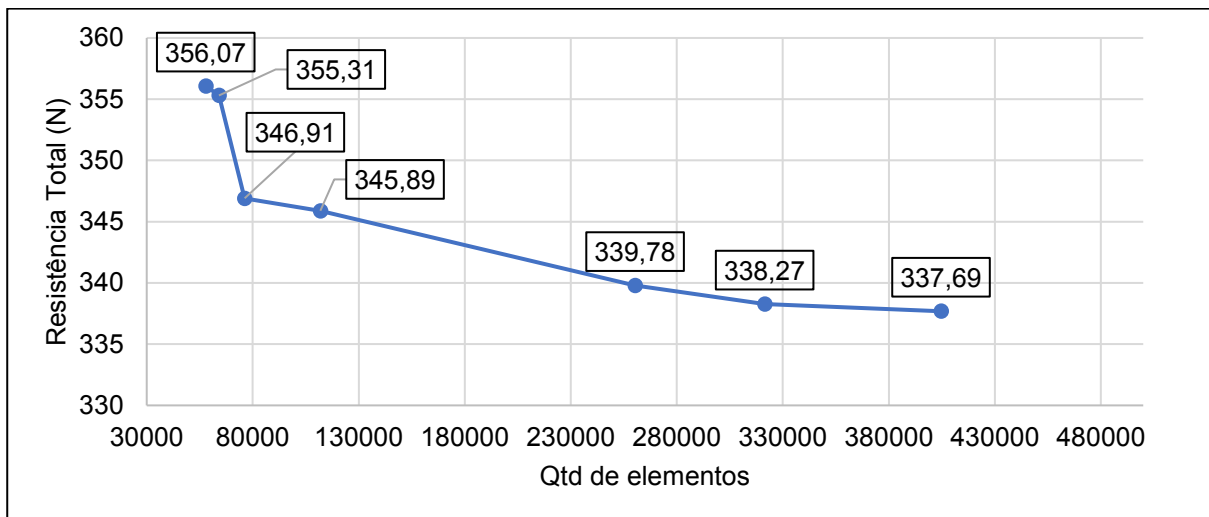
A análise de convergência de malha (Tabela 3) foi estabelecida com base no resultado da resistência ao avanço encontrada no modelo SUBOFF de casco limpo. Através da opção *mesh growth rate*, a taxa de 10% foi selecionada por apresentar o melhor resultado com o menor número de elementos, a Figura 33 apresenta os resultados obtidos no teste.

Tabela 3 - Análise de convergência de malha

| MESH GROWTH RATE | ELEMENTOS | RES DO CORPO | RESISTÊNCIA TOTAL |
|------------------|-----------|--------------|-------------------|
| 1,50 | 57838 | 50,87 | 356,07 |
| 1,40 | 64059 | 50,76 | 355,31 |
| 1,30 | 76198 | 49,56 | 346,91 |
| 1,20 | 111890 | 49,41 | 345,89 |
| 1,10 | 260340 | 48,54 | 339,78 |
| 1,09 | 321440 | 48,32 | 338,27 |
| 1,08 | 404620 | 48,24 | 337,69 |

Fonte Autor

Figura 33 - Análise de convergência de malha

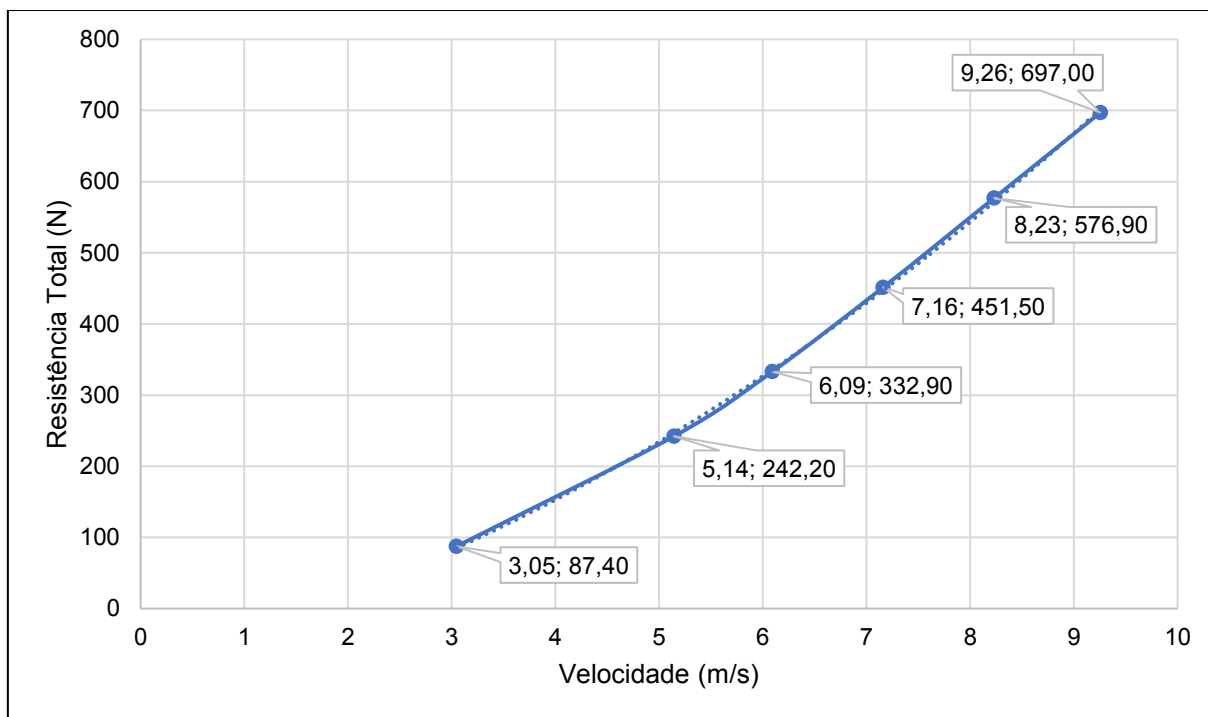


Fonte: Autor

Diante do resultado obtido no teste de convergência de malha, é possível estabelecer um comparativo com os resultados experimentais realizados com o modelo SUBOFF de casco limpo. O resultado do experimento foi divulgado no trabalho de Onur Usta (2020) e ilustrado na Figura 34.

O valor interpolado para a velocidade de 6,17 m/s, utilizada nesse estudo, é de 343,65 N. O valor encontrado na simulação é 339,78 N, ou seja, 1,13% menor.

Figura 34 - Resultados experimentais do modelo SUBOFF com casco limpo



Fonte: Numerical Analysis of Resistance Characteristics of a Submarine Form Inspired by Nature (2020)

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados pelo software *Ansys Fluent* em cada rodada das três fases do trabalho. Na 1ª fase, dois resultados de geometrias não selecionadas (de menor coeficiente de Semnan e de maior volume) e consideradas “ruins” devido às suas baixas eficiências hidro-volume foram incluídas com o objetivo de avaliar a capacidade da ferramenta quando ocorre separação da camada limite.

6.1 PRIMEIRA FASE – SIMULAÇÃO COM CASCO LIMPO

O objetivo da 1ª fase é selecionar a geometria de popa com a melhor eficiência hidro-volume sem a interferência de propulsor ou apêndices. Após a seleção, os resultados encontrados são comparados com os do modelo SUBOFF também sem propulsor e apêndices (Figura 40, Figura 42, Figura 43 e Figura 46). O valor do coeficiente de Semnan do modelo SUBOFF é 305,61.

6.1.1 Resultados da 1ª rodada de simulações com casco limpo

Foram selecionadas 7 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 6). Embora as geometrias 1 e 2 tenham alcançado coeficientes de Semnan maiores que o da geometria 3, elas apresentaram separação da camada limite na superfície da popa. Devido à separação, a geometria 3 foi a selecionada para a 2ª rodada (Figura 36) com um coeficiente de Semnan de 307,32.

6.1.2 Resultados da 2ª rodada de simulações com casco limpo

Foram selecionadas 14 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 7). A geometria 10 foi a selecionada para a 3ª rodada (Figura 37) com um coeficiente de Semnan de 312,02.

6.1.3 Resultados da 3ª rodada de simulações com casco limpo

Foram selecionadas 49 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 8). A geometria 29 foi a selecionada para a 4ª rodada (Figura 38) com um coeficiente de Semnan de 314,59.

6.1.4 Resultados da 4ª rodada de simulações com casco limpo

Foram selecionadas 54 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 9). A geometria 24 foi a selecionada para a 4ª rodada (Figura 39) com um coeficiente de Semnan de 314,82. Embora a geometria 22 apresente maior Coeficiente de Semnan, foi eliminada devido à separação da camada limite.

A geometria 24 apresentou uma variação de diâmetro mais suave em toda a geometria da popa (Figura 41) em comparação ao modelo SUBOFF (Figura 40). Em aproximadamente $x = 3,85$ m, há uma redução considerável de energia cinética e um aumento também significativo da energia de pressão até o final da popa (Figura 47), ficando próxima de perder a camada limite. A região de contato da popa com o bosso não apresentou bolha de separação (Figura 41 e Figura 47).

Apesar da geometria 24 apresentar área superficial ligeiramente maior (1,76%) que o modelo SUBOFF, esta apresentou uma resistência de forma 13,46% menor devido à geometria produzir uma pressão estática maior na popa (Figura 46 e Figura 47).

Tabela 4 - Resistência friccional x Resistência de forma – 1ª fase

| Geometria | Resistência Friccional (N) | Variação | Resistência de Forma (N) | Variação | Resistência Total (N) | Variação |
|--------------|----------------------------|----------|--------------------------|----------|-----------------------|----------|
| SUBOFF | 280,23 | - | 59,56 | - | 339,79 | - |
| geometria_24 | 285,17 | 1,76% | 51,54 | -13,46% | 336,71 | -0,91% |

Fonte: Autor

A geometria 24 apresenta uma eficiência de 3,01% maior que o modelo SUBOFF, com uma redução da resistência ao avanço em 0,91% e ganho de volume na popa de 10,25% (Tabela 5).

Tabela 5 - Principais resultados do casco sem propulsor selecionado

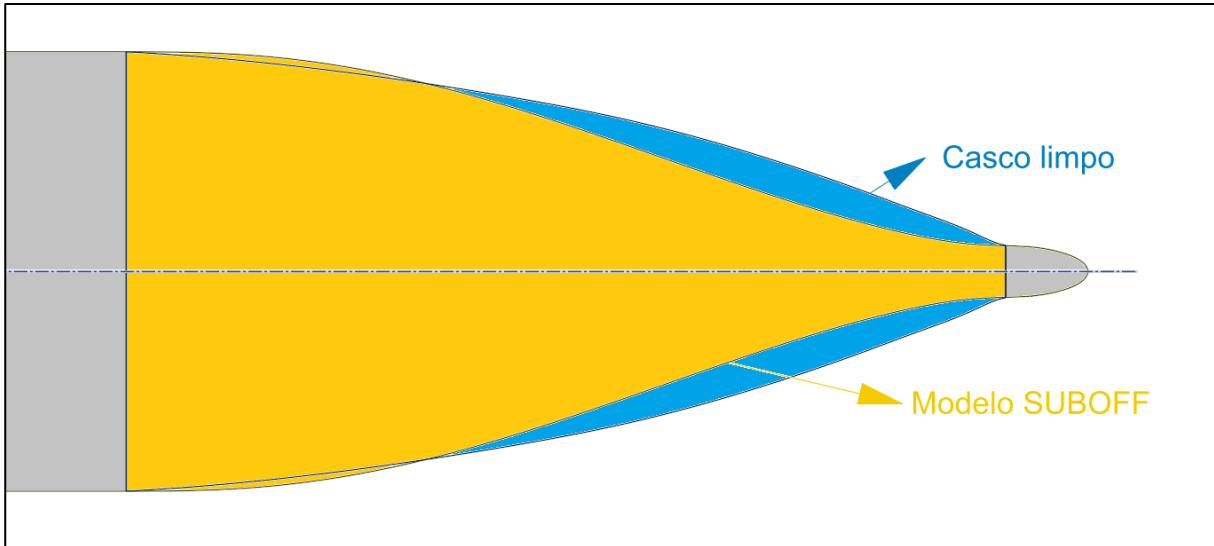
| Modelo | Resistência (N) | Δ Resistência | SEM NAN Coef (Ksn) | Δ SEM NAN Coef (Ksn) | Δ Vol. POPA |
|--------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| SUBOFF | 339,79 | - | 305,61 | - | - |
| geometria_24 | 336,71 | -0,91% | 314,82 | 3,01% | 10,25% |

Fonte: Autor

A Figura 35 ilustra a diferença geométrica entre as formas. A geometria 24 apresenta maior volume e de modo geral um perfil de popa com uma redução de diâmetro mais suave que a geometria SUBOFF sem causar separação da camada

limite. É importante observar que o perfil da geometria selecionada começa a afilar mais rápido que o perfil do modelo SUBOFF.

Figura 35 - SUBOFF x Geometria selecionada da 1ª fase



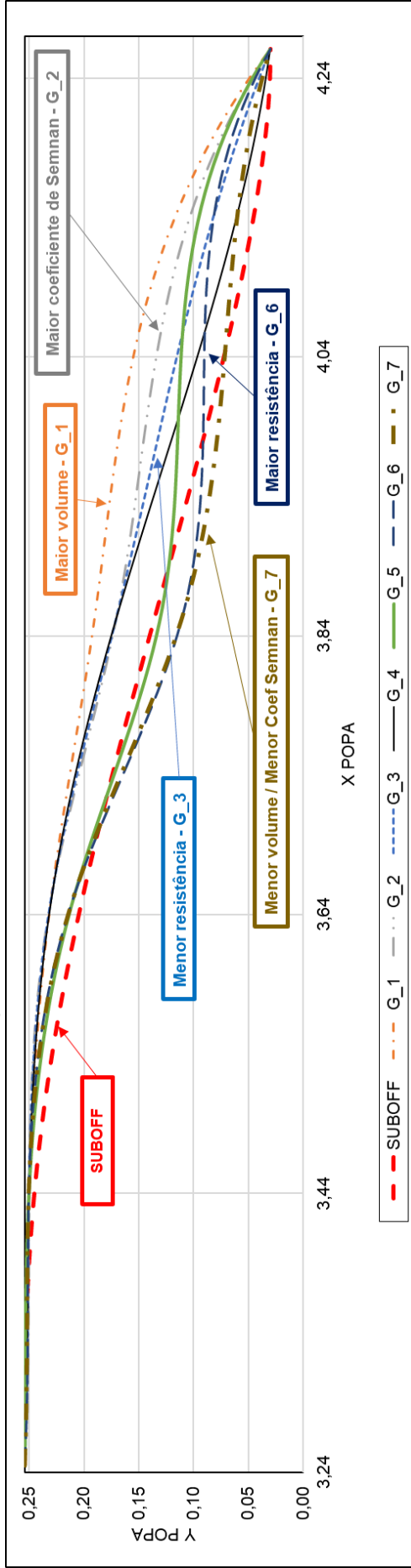
Fonte: Autor

Tabela 6 - Resultados da 1ª rodada sem propulsor

| Vel = 12 nós | Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|--------------|--------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| | | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| | SUBOFF | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 48,54 | 339,79 | 305,61 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,11 | 4,02 |
| | GEOMETRIA_1 | 4,19E-04 | 2,93E-03 | 50,98 | 356,84 | 307,51 | 6,23 | 4,04% | 0,73 | 0,64 | 33,47% | 4,75% | -4,64 | 4,25 |
| | GEOMETRIA_2 | 4,15E-04 | 2,91E-03 | 50,12 | 350,85 | 308,73 | 6,18 | 3,11% | 0,72 | 0,60 | 24,77% | 3,52% | -3,22 | 4,25 |
| | GEOMETRIA_3 | 4,17E-04 | 2,92E-03 | 50,00 | 350,01 | 307,32 | 6,14 | 2,55% | 0,72 | 0,59 | 21,44% | 3,05% | 0,46 | 4,07 |
| | GEOMETRIA_4 | 4,26E-04 | 2,98E-03 | 50,84 | 355,90 | 300,35 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 0,57 | 18,70% | 2,66% | 1,92 | 4,10 |
| | GEOMETRIA_5 | 4,44E-04 | 3,11E-03 | 52,77 | 369,38 | 286,48 | 6,08 | 1,48% | 0,71 | 0,52 | 8,71% | 1,24% | -5,50 | 4,25 |
| | GEOMETRIA_6 | 4,94E-04 | 3,46E-03 | 58,13 | 406,90 | 257,17 | 6,03 | 0,65% | 0,70 | 0,49 | 2,55% | 0,36% | -12,47 | 3,77 |
| | GEOMETRIA_7 | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 57,94 | 405,55 | 256,29 | 6,00 | 0,08% | 0,70 | 0,48 | 0,28% | 0,04% | -10,69 | 3,77 |

Fonte: Autor

Figura 36 - Resultados da 1ª rodada sem propulsor



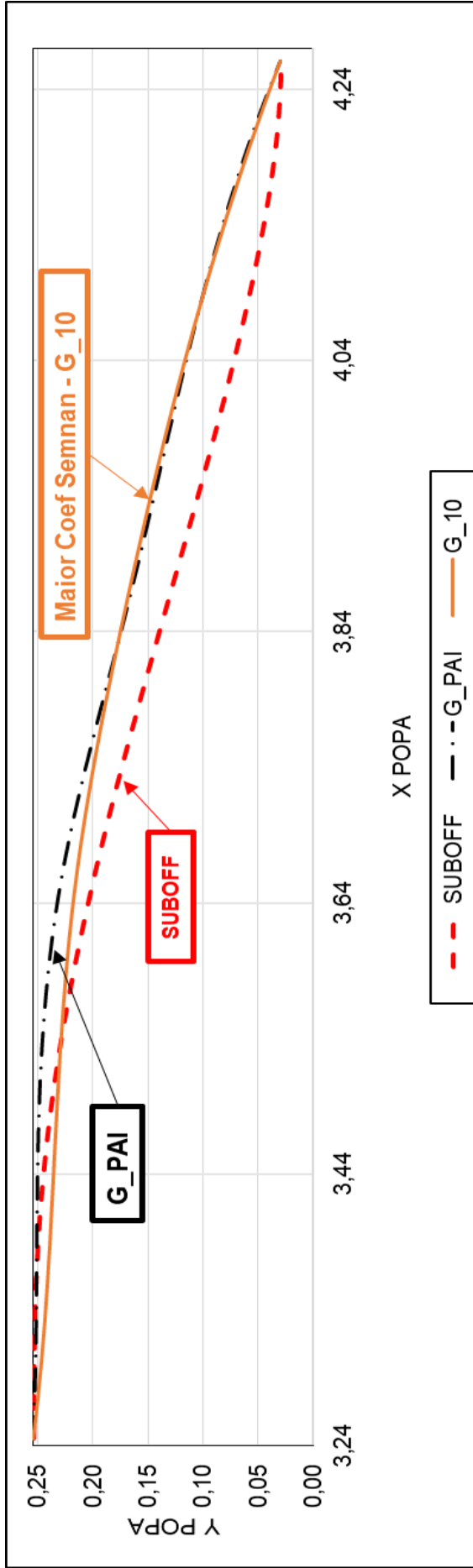
Fonte: Autor

Tabela 7 - Resultado da 2ª rodada sem propulsor

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmin popa (Pa) | Tmin em X(m) |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|----------------|--------------|
| | Sector | Total | Sector | Total | | | | | | popa | total | | |
| SUBOFF | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 48,54 | 339,79 | 305,61 | 5,99 | - | 0,70 | 0,4823 | - | - | 3,11 | 4,02 |
| GEOMETRIA_PAI | 4,17E-04 | 2,92E-03 | 50,00 | 350,01 | 307,32 | 6,14 | 2,55% | 0,72 | 0,5857 | 21,44% | 3,05% | 0,46 | 4,07 |
| GEOMETRIA_1 | 4,09E-04 | 2,87E-03 | 49,48 | 346,37 | 313,81 | 6,19 | 3,31% | 0,73 | 0,6186 | 28,25% | 4,01% | -0,40 | 4,23 |
| GEOMETRIA_2 | 4,12E-04 | 2,88E-03 | 49,56 | 346,94 | 311,76 | 6,17 | 2,92% | 0,72 | 0,6069 | 25,82% | 3,67% | -0,40 | 4,23 |
| GEOMETRIA_3 | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 49,99 | 349,96 | 309,28 | 6,17 | 3,04% | 0,72 | 0,6012 | 24,66% | 3,50% | -1,59 | 4,19 |
| GEOMETRIA_4 | 4,13E-04 | 2,89E-03 | 49,53 | 346,72 | 310,57 | 6,15 | 2,62% | 0,72 | 0,5894 | 22,20% | 3,15% | -0,17 | 4,25 |
| GEOMETRIA_5 | 4,16E-04 | 2,91E-03 | 49,81 | 348,64 | 307,40 | 6,13 | 2,24% | 0,72 | 0,5791 | 20,07% | 2,85% | 1,98 | 4,12 |
| GEOMETRIA_6 | 4,10E-04 | 2,87E-03 | 49,26 | 344,84 | 311,61 | 6,15 | 2,58% | 0,72 | 0,5725 | 18,70% | 2,66% | -0,58 | 4,23 |
| GEOMETRIA_7 | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 49,61 | 347,30 | 307,88 | 6,12 | 2,19% | 0,72 | 0,5608 | 16,28% | 2,31% | -0,67 | 4,16 |
| GEOMETRIA_8 | 4,41E-04 | 3,09E-03 | 52,55 | 367,82 | 289,39 | 6,10 | 1,82% | 0,71 | 0,5507 | 14,18% | 2,01% | -6,46 | 4,05 |
| GEOMETRIA_9 | 4,07E-04 | 2,85E-03 | 48,70 | 340,90 | 313,78 | 6,13 | 2,28% | 0,71 | 0,5552 | 15,11% | 2,15% | -1,32 | 4,26 |
| GEOMETRIA_10 | 4,09E-04 | 2,86E-03 | 48,72 | 341,05 | 312,02 | 6,10 | 1,87% | 0,71 | 0,5434 | 12,66% | 1,80% | 0,14 | 4,26 |
| GEOMETRIA_11 | 4,14E-04 | 2,90E-03 | 49,15 | 344,07 | 307,81 | 6,08 | 1,48% | 0,71 | 0,5331 | 10,54% | 1,50% | 1,35 | 4,13 |
| GEOMETRIA_12 | 4,17E-04 | 2,92E-03 | 49,80 | 348,62 | 305,64 | 6,11 | 2,04% | 0,71 | 0,5393 | 11,82% | 1,68% | -4,57 | 4,25 |
| GEOMETRIA_13 | 4,09E-04 | 2,86E-03 | 48,64 | 340,49 | 311,25 | 6,09 | 1,60% | 0,71 | 0,5274 | 9,34% | 1,33% | -0,54 | 4,24 |
| GEOMETRIA_14 | 4,18E-04 | 2,92E-03 | 49,45 | 346,14 | 304,64 | 6,06 | 1,20% | 0,71 | 0,5170 | 7,19% | 1,02% | 1,25 | 4,25 |

Fonte: Autor

Figura 37 - Resultados da 2ª rodada sem propulsor



Fonte: Autor

Tabela 8 - Resultados da 3ª rodada sem propulsor

(continua)

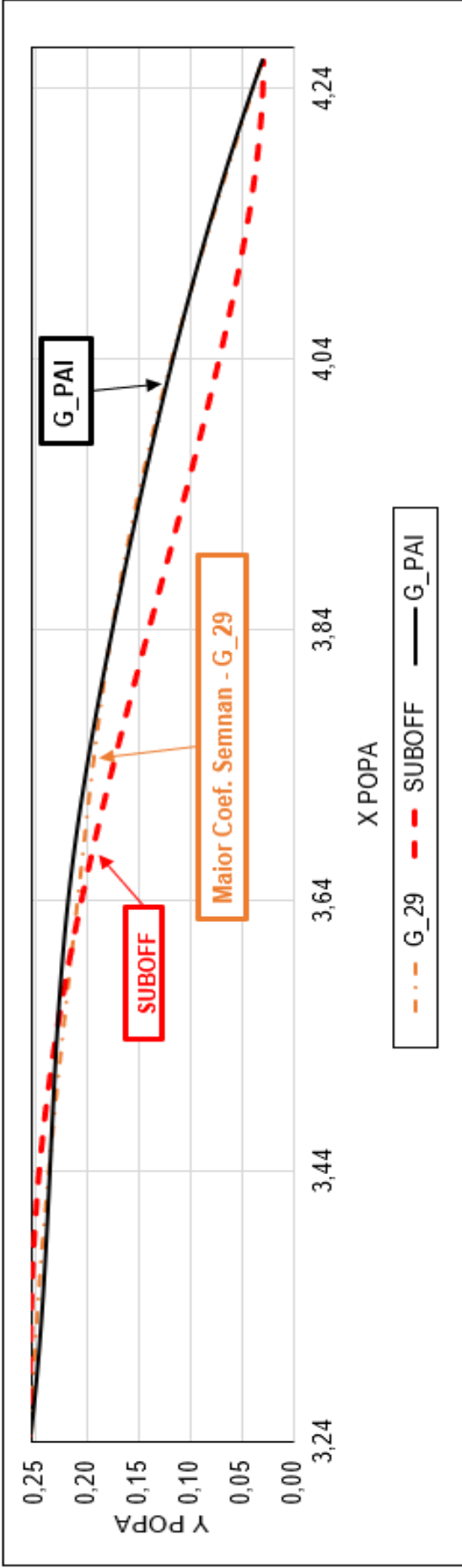
| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|---------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 48,54 | 339,79 | 305,61 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,11 | 4,02 |
| GEOMETRIA_PAI | 4,09E-04 | 2,86E-03 | 48,72 | 341,05 | 312,02 | 6,10 | 1,87% | 0,71 | 0,54 | 12,66% | 1,80% | 0,14 | 4,26 |
| GEOMETRIA_1 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 49,18 | 344,29 | 313,81 | 6,16 | 2,90% | 0,72 | 0,60 | 23,74% | 3,37% | -0,21 | 4,26 |
| GEOMETRIA_2 | 4,66E-04 | 2,87E-03 | 49,31 | 345,15 | 312,00 | 6,15 | 2,63% | 0,72 | 0,59 | 22,14% | 3,15% | 0,48 | 4,24 |
| GEOMETRIA_3 | 4,81E-04 | 2,97E-03 | 50,82 | 355,72 | 301,79 | 6,13 | 2,38% | 0,72 | 0,58 | 20,69% | 2,94% | 1,25 | 4,11 |
| GEOMETRIA_4 | 4,66E-04 | 2,88E-03 | 49,37 | 345,56 | 311,76 | 6,15 | 2,71% | 0,72 | 0,59 | 21,36% | 3,03% | -0,51 | 4,21 |
| GEOMETRIA_5 | 4,75E-04 | 2,93E-03 | 50,23 | 351,61 | 305,35 | 6,14 | 2,44% | 0,72 | 0,58 | 19,75% | 2,80% | -0,26 | 4,25 |
| GEOMETRIA_6 | 4,78E-04 | 2,95E-03 | 50,42 | 352,91 | 303,25 | 6,12 | 2,18% | 0,72 | 0,57 | 18,28% | 2,60% | 1,22 | 4,24 |
| GEOMETRIA_7 | 4,76E-04 | 2,94E-03 | 50,39 | 352,70 | 304,66 | 6,14 | 2,55% | 0,72 | 0,57 | 19,10% | 2,71% | -3,00 | 4,18 |
| GEOMETRIA_8 | 4,72E-04 | 2,91E-03 | 49,77 | 348,38 | 307,35 | 6,13 | 2,27% | 0,72 | 0,57 | 17,48% | 2,48% | -0,66 | 4,24 |
| GEOMETRIA_9 | 4,73E-04 | 2,92E-03 | 49,80 | 348,60 | 306,13 | 6,11 | 2,00% | 0,72 | 0,56 | 16,01% | 2,27% | 0,26 | 4,25 |
| GEOMETRIA_10 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 49,04 | 343,29 | 311,94 | 6,13 | 2,31% | 0,72 | 0,56 | 16,78% | 2,38% | -2,54 | 4,26 |
| GEOMETRIA_11 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,71 | 340,98 | 312,95 | 6,11 | 2,03% | 0,71 | 0,56 | 15,16% | 2,15% | -0,42 | 4,25 |
| GEOMETRIA_12 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,63 | 340,41 | 312,45 | 6,10 | 1,77% | 0,71 | 0,55 | 13,69% | 1,95% | 0,69 | 4,25 |
| GEOMETRIA_13 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 49,25 | 344,75 | 312,03 | 6,15 | 2,64% | 0,72 | 0,58 | 19,76% | 2,81% | -0,18 | 4,24 |
| GEOMETRIA_14 | 4,81E-04 | 2,97E-03 | 50,76 | 355,33 | 301,75 | 6,13 | 2,38% | 0,72 | 0,57 | 18,16% | 2,58% | 0,02 | 4,26 |
| GEOMETRIA_15 | 4,82E-04 | 2,98E-03 | 50,83 | 355,82 | 300,39 | 6,12 | 2,13% | 0,72 | 0,56 | 16,70% | 2,37% | 1,41 | 4,12 |
| GEOMETRIA_16 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 49,13 | 343,91 | 311,76 | 6,14 | 2,41% | 0,72 | 0,57 | 17,42% | 2,47% | -0,20 | 4,25 |
| GEOMETRIA_17 | 4,67E-04 | 2,88E-03 | 49,20 | 344,39 | 310,30 | 6,12 | 2,15% | 0,71 | 0,56 | 15,82% | 2,25% | 0,41 | 4,24 |
| GEOMETRIA_18 | 4,84E-04 | 2,99E-03 | 50,85 | 355,95 | 299,29 | 6,10 | 1,90% | 0,71 | 0,55 | 14,38% | 2,04% | -0,14 | 4,09 |
| GEOMETRIA_19 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,77 | 341,36 | 313,14 | 6,12 | 2,21% | 0,71 | 0,55 | 15,04% | 2,14% | -0,60 | 4,24 |
| GEOMETRIA_20 | 4,66E-04 | 2,87E-03 | 48,97 | 342,76 | 310,80 | 6,11 | 1,94% | 0,71 | 0,55 | 13,43% | 1,91% | 0,21 | 4,25 |
| GEOMETRIA_21 | 4,75E-04 | 2,93E-03 | 49,84 | 348,87 | 304,38 | 6,09 | 1,68% | 0,71 | 0,54 | 11,97% | 1,70% | 1,98 | 4,24 |
| GEOMETRIA_22 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 48,92 | 342,41 | 311,33 | 6,11 | 2,04% | 0,71 | 0,54 | 12,79% | 1,82% | -1,81 | 4,26 |
| GEOMETRIA_23 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,39 | 345,72 | 307,26 | 6,10 | 1,76% | 0,71 | 0,54 | 11,17% | 1,59% | -0,69 | 4,25 |
| GEOMETRIA_24 | 4,64E-04 | 2,87E-03 | 48,64 | 340,46 | 310,98 | 6,08 | 1,49% | 0,71 | 0,53 | 9,70% | 1,38% | 0,56 | 4,25 |
| GEOMETRIA_25 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 49,09 | 343,60 | 311,14 | 6,12 | 2,22% | 0,71 | 0,56 | 15,22% | 2,16% | -0,58 | 4,23 |
| GEOMETRIA_26 | 4,69E-04 | 2,89E-03 | 49,33 | 345,33 | 308,57 | 6,11 | 1,96% | 0,71 | 0,55 | 13,62% | 1,94% | -0,21 | 4,18 |
| GEOMETRIA_27 | 4,84E-04 | 2,99E-03 | 50,83 | 355,78 | 298,59 | 6,09 | 1,71% | 0,71 | 0,54 | 12,18% | 1,73% | -0,99 | 4,09 |
| GEOMETRIA_28 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,44 | 339,08 | 314,28 | 6,11 | 2,00% | 0,71 | 0,54 | 12,84% | 1,82% | -0,50 | 4,23 |
| GEOMETRIA_29 | 4,59E-04 | 2,84E-03 | 48,23 | 337,60 | 314,59 | 6,09 | 1,74% | 0,71 | 0,54 | 11,23% | 1,60% | 0,36 | 4,25 |

Tabela 8 - Resultados da 3ª rodada sem propulsor

| Vel = 12 nós | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) | (conclusão) |
|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|-------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| GEOMETRIA_30 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,52 | 339,63 | 311,71 | 6,08 | 1,48% | 0,53 | 9,78% | 1,39% | 0,91 | 4,13 | |
| GEOMETRIA_31 | 4,61E-04 | 2,85E-03 | 48,45 | 339,17 | 313,29 | 6,10 | 1,82% | 0,53 | 10,59% | 1,50% | -1,62 | 4,21 | |
| GEOMETRIA_32 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,24 | 337,68 | 313,57 | 6,08 | 1,54% | 0,53 | 8,97% | 1,27% | 0,77 | 4,23 | |
| GEOMETRIA_33 | 4,61E-04 | 2,84E-03 | 48,12 | 336,83 | 313,32 | 6,07 | 1,27% | 0,52 | 7,51% | 1,07% | 0,84 | 4,26 | |
| GEOMETRIA_34 | 4,67E-04 | 2,88E-03 | 49,22 | 344,57 | 309,87 | 6,12 | 2,17% | 0,55 | 13,57% | 1,93% | -0,11 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_35 | 4,78E-04 | 2,95E-03 | 50,29 | 352,00 | 302,33 | 6,11 | 1,90% | 0,54 | 11,97% | 1,70% | 0,79 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_36 | 4,85E-04 | 2,99E-03 | 50,84 | 355,89 | 298,09 | 6,09 | 1,66% | 0,53 | 10,52% | 1,49% | 1,19 | 4,12 | |
| GEOMETRIA_37 | 4,67E-04 | 2,88E-03 | 49,14 | 344,01 | 309,45 | 6,11 | 1,98% | 0,54 | 11,20% | 1,59% | -0,70 | 4,23 | |
| GEOMETRIA_38 | 4,76E-04 | 2,94E-03 | 49,92 | 349,43 | 303,61 | 6,09 | 1,70% | 0,53 | 9,59% | 1,36% | 0,05 | 4,26 | |
| GEOMETRIA_39 | 4,78E-04 | 2,95E-03 | 50,08 | 350,55 | 301,66 | 6,08 | 1,44% | 0,52 | 8,12% | 1,15% | 2,25 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_40 | 4,79E-04 | 2,96E-03 | 50,07 | 350,47 | 300,86 | 6,07 | 1,26% | 0,51 | 5,86% | 0,83% | 0,79 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_41 | 4,72E-04 | 2,91E-03 | 49,66 | 347,61 | 306,20 | 6,11 | 1,95% | 0,54 | 11,35% | 1,61% | -0,45 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_42 | 4,81E-04 | 2,97E-03 | 50,50 | 353,50 | 300,10 | 6,09 | 1,69% | 0,53 | 9,76% | 1,39% | 0,10 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_43 | 4,87E-04 | 3,01E-03 | 50,97 | 356,82 | 296,38 | 6,08 | 1,44% | 0,52 | 8,32% | 1,18% | -0,43 | 4,15 | |
| GEOMETRIA_44 | 4,61E-04 | 2,84E-03 | 48,34 | 338,40 | 313,53 | 6,10 | 1,74% | 0,53 | 8,98% | 1,28% | -0,44 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_45 | 4,69E-04 | 2,89E-03 | 49,10 | 343,68 | 307,67 | 6,08 | 1,47% | 0,52 | 7,37% | 1,05% | 0,42 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_46 | 4,74E-04 | 2,93E-03 | 49,53 | 346,69 | 304,01 | 6,06 | 1,21% | 0,51 | 5,92% | 0,84% | 2,38 | 4,14 | |
| GEOMETRIA_47 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,44 | 339,09 | 312,00 | 6,08 | 1,56% | 0,51 | 6,74% | 0,96% | -1,25 | 4,26 | |
| GEOMETRIA_48 | 4,61E-04 | 2,84E-03 | 48,15 | 337,07 | 312,77 | 6,07 | 1,28% | 0,51 | 5,12% | 0,73% | -0,25 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_49 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,23 | 337,61 | 311,23 | 6,05 | 1,01% | 0,50 | 3,65% | 0,52% | 0,82 | 4,24 | |

Fonte: Autor

Figura 38 - Resultados da 3ª rodada sem propulsor



Fonte: Autor

Tabela 9 - Resultados da 4ª rodada sem propulsor

(continua)

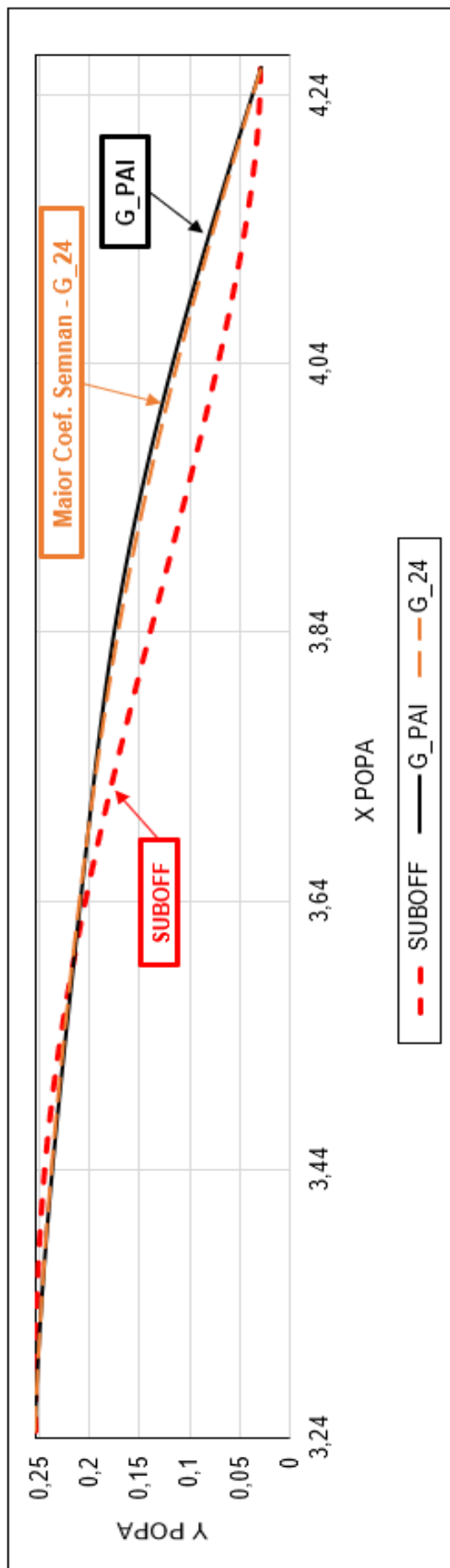
| Vel = 12 nós | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | popa | total | | |
| SUBOFF | 4,15E-04 | 2,90E-03 | 48,54 | 339,79 | 305,61 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,11 | 4,02 |
| GEOMETRIA_PAI | 4,59E-04 | 2,84E-03 | 48,23 | 337,60 | 314,59 | 6,09 | 1,74% | 0,71 | 0,54 | 11,23% | 1,60% | 0,36 | 4,25 |
| GEOMETRIA_1 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,55 | 339,86 | 314,61 | 6,12 | 2,19% | 0,72 | 0,56 | 16,02% | 2,28% | -0,03 | 4,25 |
| GEOMETRIA_2 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,62 | 340,35 | 313,64 | 6,11 | 2,06% | 0,71 | 0,56 | 15,23% | 2,16% | 0,30 | 4,25 |
| GEOMETRIA_3 | 4,71E-04 | 2,91E-03 | 49,54 | 346,77 | 307,33 | 6,11 | 1,93% | 0,71 | 0,55 | 14,48% | 2,06% | 0,88 | 4,25 |
| GEOMETRIA_4 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,44 | 339,08 | 314,86 | 6,12 | 2,10% | 0,71 | 0,55 | 14,87% | 2,11% | -0,54 | 4,24 |
| GEOMETRIA_5 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,41 | 338,86 | 314,54 | 6,11 | 1,96% | 0,71 | 0,55 | 14,08% | 2,00% | -0,02 | 4,26 |
| GEOMETRIA_6 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 48,86 | 342,02 | 311,11 | 6,10 | 1,83% | 0,71 | 0,55 | 13,33% | 1,89% | 0,54 | 4,25 |
| GEOMETRIA_7 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,74 | 341,15 | 313,18 | 6,12 | 2,15% | 0,71 | 0,56 | 15,22% | 2,16% | 0,09 | 4,25 |
| GEOMETRIA_8 | 4,71E-04 | 2,91E-03 | 49,58 | 347,06 | 307,34 | 6,11 | 2,02% | 0,71 | 0,55 | 14,43% | 2,05% | 0,41 | 4,24 |
| GEOMETRIA_9 | 4,75E-04 | 2,93E-03 | 49,98 | 349,84 | 304,41 | 6,10 | 1,90% | 0,71 | 0,55 | 13,68% | 1,94% | 0,84 | 4,24 |
| GEOMETRIA_10 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,66 | 340,62 | 313,18 | 6,11 | 2,05% | 0,71 | 0,55 | 14,03% | 1,99% | -0,07 | 4,25 |
| GEOMETRIA_11 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,59 | 340,14 | 313,09 | 6,11 | 1,92% | 0,71 | 0,55 | 13,24% | 1,88% | 0,32 | 4,25 |
| GEOMETRIA_12 | 4,71E-04 | 2,91E-03 | 49,47 | 346,28 | 307,04 | 6,10 | 1,79% | 0,71 | 0,54 | 12,49% | 1,77% | 0,83 | 4,25 |
| GEOMETRIA_13 | 4,61E-04 | 2,84E-03 | 48,46 | 339,24 | 313,99 | 6,11 | 1,96% | 0,71 | 0,54 | 12,88% | 1,83% | -0,27 | 4,25 |
| GEOMETRIA_14 | 4,61E-04 | 2,85E-03 | 48,43 | 339,00 | 313,68 | 6,10 | 1,82% | 0,71 | 0,54 | 12,09% | 1,72% | -0,10 | 4,25 |
| GEOMETRIA_15 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,54 | 339,79 | 312,43 | 6,09 | 1,69% | 0,71 | 0,54 | 11,34% | 1,61% | 0,37 | 4,25 |
| GEOMETRIA_16 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,69 | 340,84 | 313,02 | 6,11 | 2,06% | 0,71 | 0,55 | 14,13% | 2,01% | 0,08 | 4,25 |
| GEOMETRIA_17 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,72 | 341,05 | 312,31 | 6,11 | 1,93% | 0,71 | 0,55 | 13,34% | 1,89% | 0,27 | 4,24 |
| GEOMETRIA_18 | 4,75E-04 | 2,93E-03 | 49,91 | 349,36 | 304,40 | 6,10 | 1,80% | 0,71 | 0,54 | 12,59% | 1,79% | 1,00 | 4,26 |
| GEOMETRIA_19 | 4,69E-04 | 2,89E-03 | 49,31 | 345,14 | 308,63 | 6,11 | 1,95% | 0,71 | 0,54 | 12,94% | 1,84% | -0,30 | 4,25 |
| GEOMETRIA_20 | 4,61E-04 | 2,84E-03 | 48,39 | 338,75 | 313,92 | 6,10 | 1,82% | 0,71 | 0,54 | 12,16% | 1,73% | 0,39 | 4,25 |
| GEOMETRIA_21 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,33 | 345,33 | 307,44 | 6,09 | 1,69% | 0,71 | 0,54 | 11,40% | 1,62% | 0,78 | 4,24 |
| GEOMETRIA_22 | 4,59E-04 | 2,83E-03 | 48,25 | 337,75 | 314,90 | 6,10 | 1,85% | 0,71 | 0,54 | 11,79% | 1,68% | -0,27 | 4,25 |
| GEOMETRIA_23 | 4,59E-04 | 2,83E-03 | 48,18 | 337,27 | 314,81 | 6,09 | 1,72% | 0,71 | 0,54 | 11,00% | 1,56% | 0,18 | 4,25 |
| GEOMETRIA_24 | 4,59E-04 | 2,83E-03 | 48,10 | 336,71 | 314,82 | 6,09 | 1,59% | 0,71 | 0,53 | 10,25% | 1,46% | 0,60 | 4,24 |
| GEOMETRIA_25 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,35 | 338,42 | 313,84 | 6,10 | 1,76% | 0,71 | 0,53 | 10,74% | 1,53% | -0,21 | 4,25 |
| GEOMETRIA_26 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,24 | 337,67 | 314,00 | 6,09 | 1,62% | 0,71 | 0,53 | 9,95% | 1,41% | 0,08 | 4,25 |
| GEOMETRIA_27 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,39 | 338,70 | 312,52 | 6,08 | 1,49% | 0,71 | 0,53 | 9,19% | 1,31% | 0,38 | 4,24 |
| GEOMETRIA_28 | 4,61E-04 | 2,85E-03 | 48,55 | 339,85 | 313,68 | 6,11 | 2,02% | 0,71 | 0,55 | 13,26% | 1,88% | 0,11 | 4,25 |
| GEOMETRIA_29 | 4,74E-04 | 2,93E-03 | 49,84 | 348,85 | 305,08 | 6,10 | 1,89% | 0,71 | 0,54 | 12,48% | 1,77% | 0,24 | 4,26 |

Tabela 9 - Resultados da 4ª rodada sem propulsor

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) | (conclusão) |
|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-------|----------------|---------------|-------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | popa | total | | | |
| GEOMETRIA_30 | 4,77E-04 | 2,95E-03 | 50,11 | 350,80 | 302,90 | 6,10 | 1,76% | 0,71 | 0,54 | 11,73% | 1,67% | 0,81 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_31 | 4,68E-04 | 2,89E-03 | 49,26 | 344,83 | 308,68 | 6,11 | 1,92% | 0,71 | 0,54 | 12,08% | 1,72% | -0,40 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_32 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,36 | 345,54 | 307,52 | 6,10 | 1,79% | 0,71 | 0,54 | 11,29% | 1,60% | 0,24 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_33 | 4,72E-04 | 2,91E-03 | 49,49 | 346,44 | 306,23 | 6,09 | 1,66% | 0,71 | 0,53 | 10,54% | 1,50% | 0,72 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_34 | 4,68E-04 | 2,89E-03 | 49,17 | 344,21 | 308,78 | 6,10 | 1,83% | 0,71 | 0,54 | 10,93% | 1,55% | -0,82 | 4,23 | |
| GEOMETRIA_35 | 4,68E-04 | 2,89E-03 | 49,09 | 343,64 | 308,77 | 6,09 | 1,69% | 0,71 | 0,53 | 10,14% | 1,44% | -0,24 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_36 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,24 | 344,71 | 307,30 | 6,08 | 1,56% | 0,71 | 0,53 | 9,39% | 1,33% | 0,51 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_37 | 4,65E-04 | 2,87E-03 | 48,85 | 341,96 | 311,28 | 6,11 | 1,92% | 0,71 | 0,54 | 12,17% | 1,73% | -0,13 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_38 | 4,74E-04 | 2,93E-03 | 49,82 | 348,73 | 304,73 | 6,10 | 1,79% | 0,71 | 0,54 | 11,39% | 1,62% | 0,52 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_39 | 4,76E-04 | 2,94E-03 | 49,88 | 349,17 | 303,86 | 6,09 | 1,66% | 0,71 | 0,53 | 10,64% | 1,51% | 0,77 | 4,23 | |
| GEOMETRIA_40 | 4,63E-04 | 2,86E-03 | 48,68 | 340,74 | 311,90 | 6,10 | 1,81% | 0,71 | 0,54 | 10,99% | 1,56% | -0,14 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_41 | 4,64E-04 | 2,87E-03 | 48,73 | 341,08 | 311,07 | 6,09 | 1,68% | 0,71 | 0,53 | 10,20% | 1,45% | 0,22 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_42 | 4,73E-04 | 2,92E-03 | 49,57 | 347,01 | 305,25 | 6,08 | 1,55% | 0,71 | 0,53 | 9,45% | 1,34% | 0,77 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_43 | 4,61E-04 | 2,85E-03 | 48,42 | 338,93 | 313,09 | 6,09 | 1,72% | 0,71 | 0,53 | 9,84% | 1,40% | -0,24 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_44 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,46 | 339,24 | 312,27 | 6,09 | 1,58% | 0,71 | 0,53 | 9,05% | 1,29% | 0,17 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_45 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,16 | 344,15 | 307,31 | 6,08 | 1,45% | 0,71 | 0,52 | 8,30% | 1,18% | 0,58 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_46 | 4,73E-04 | 2,92E-03 | 49,67 | 347,72 | 305,70 | 6,10 | 1,83% | 0,71 | 0,54 | 11,11% | 1,58% | 0,02 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_47 | 4,74E-04 | 2,92E-03 | 49,71 | 348,00 | 304,95 | 6,09 | 1,70% | 0,71 | 0,53 | 10,33% | 1,47% | 0,32 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_48 | 4,76E-04 | 2,94E-03 | 49,92 | 349,43 | 303,22 | 6,09 | 1,57% | 0,71 | 0,53 | 9,58% | 1,36% | 0,82 | 4,13 | |
| GEOMETRIA_49 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,48 | 339,37 | 312,71 | 6,09 | 1,72% | 0,71 | 0,53 | 9,93% | 1,41% | -0,03 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_50 | 4,62E-04 | 2,85E-03 | 48,38 | 338,68 | 312,82 | 6,09 | 1,59% | 0,71 | 0,53 | 9,14% | 1,30% | 0,26 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_51 | 4,72E-04 | 2,92E-03 | 49,45 | 346,14 | 305,58 | 6,08 | 1,46% | 0,71 | 0,52 | 8,39% | 1,19% | 0,91 | 4,24 | |
| GEOMETRIA_52 | 4,60E-04 | 2,84E-03 | 48,20 | 337,41 | 314,03 | 6,09 | 1,62% | 0,71 | 0,52 | 8,78% | 1,25% | -0,15 | 4,25 | |
| GEOMETRIA_53 | 4,70E-04 | 2,90E-03 | 49,21 | 344,46 | 307,09 | 6,08 | 1,48% | 0,71 | 0,52 | 7,99% | 1,14% | 1,22 | 4,21 | |
| GEOMETRIA_54 | 4,73E-04 | 2,92E-03 | 49,50 | 346,51 | 304,76 | 6,07 | 1,35% | 0,71 | 0,52 | 7,24% | 1,03% | -1,41 | 4,17 | |

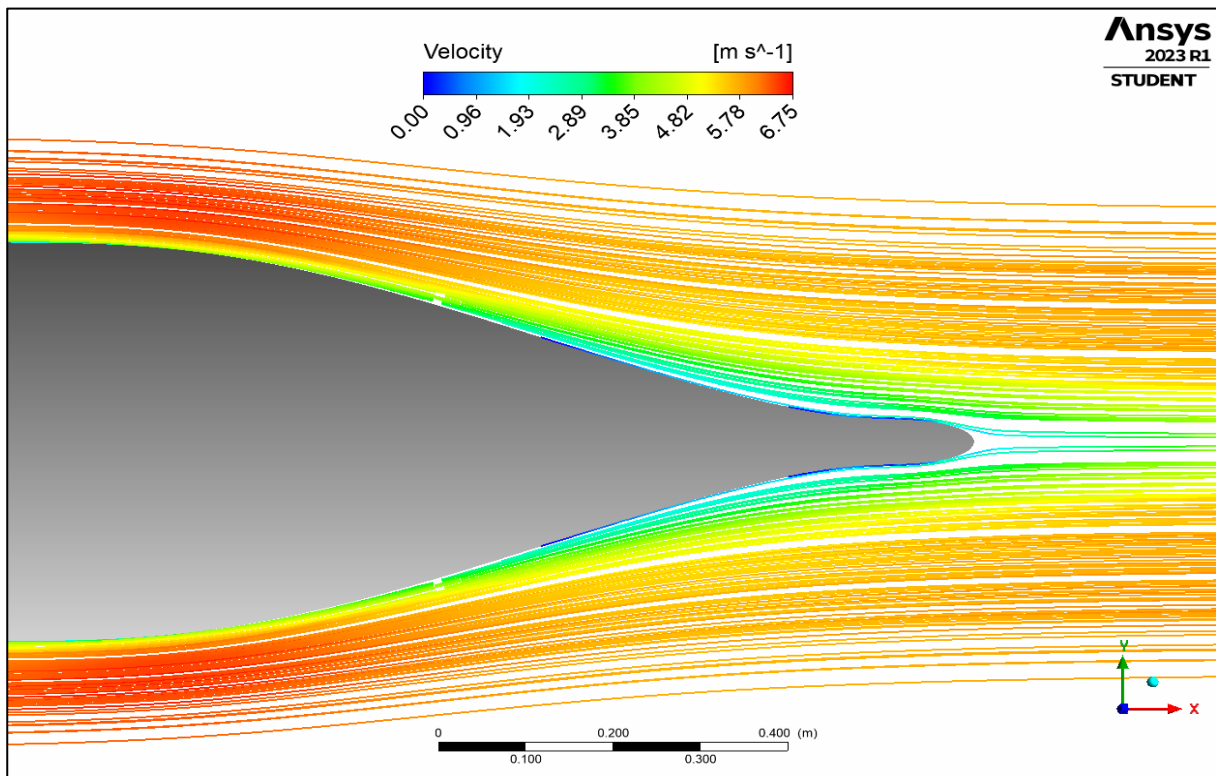
Fonte: Autor

Figura 39 - Resultados da 4ª rodada sem propulsor



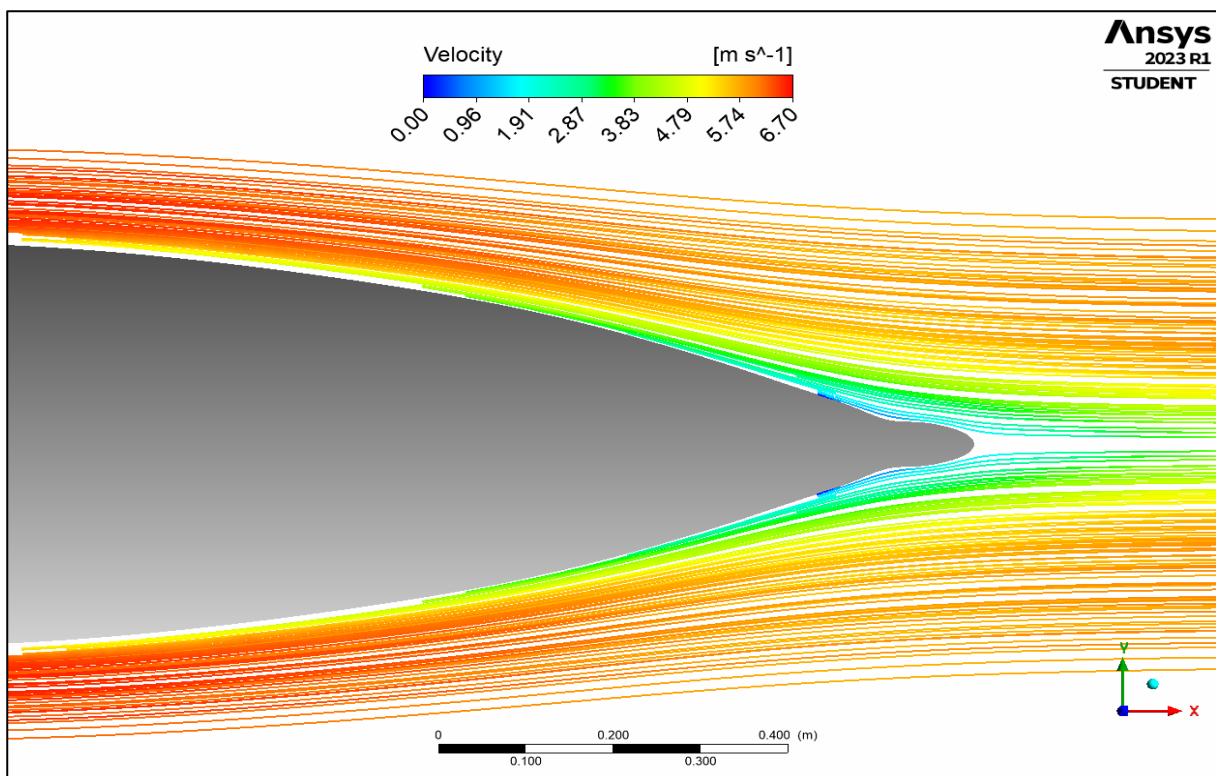
Fonte: Autor

Figura 40 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF com casco limpo



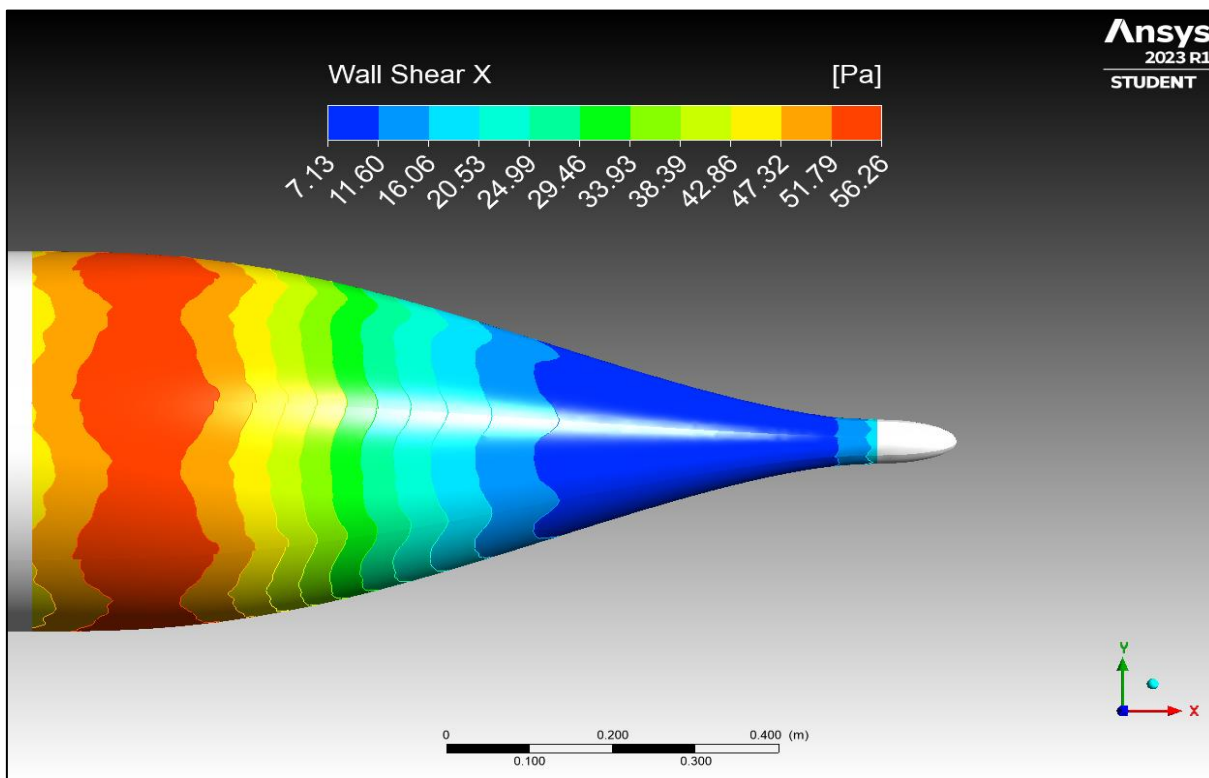
Fonte: Autor

Figura 41 - Linhas de corrente - Geometria selecionada da 1ª fase



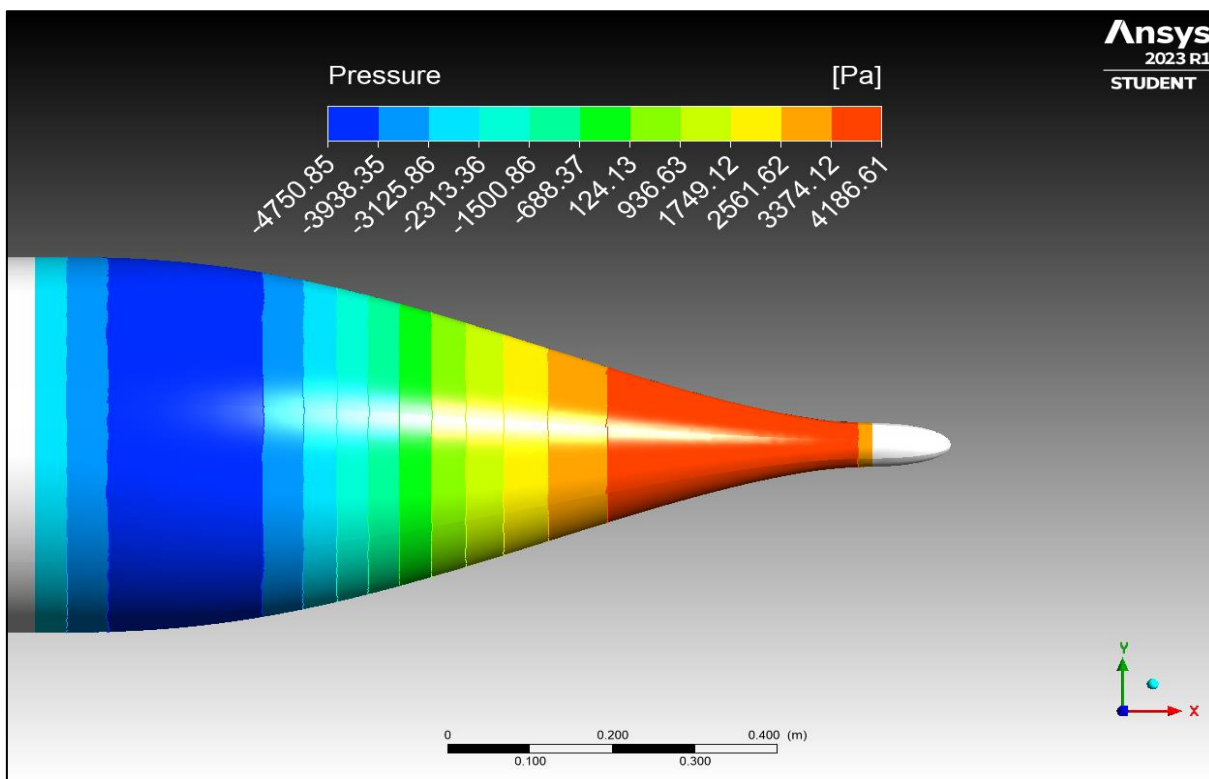
Fonte: Autor

Figura 42 - Tensões de cisalhamento – Modelo SUBOFF casco limpo



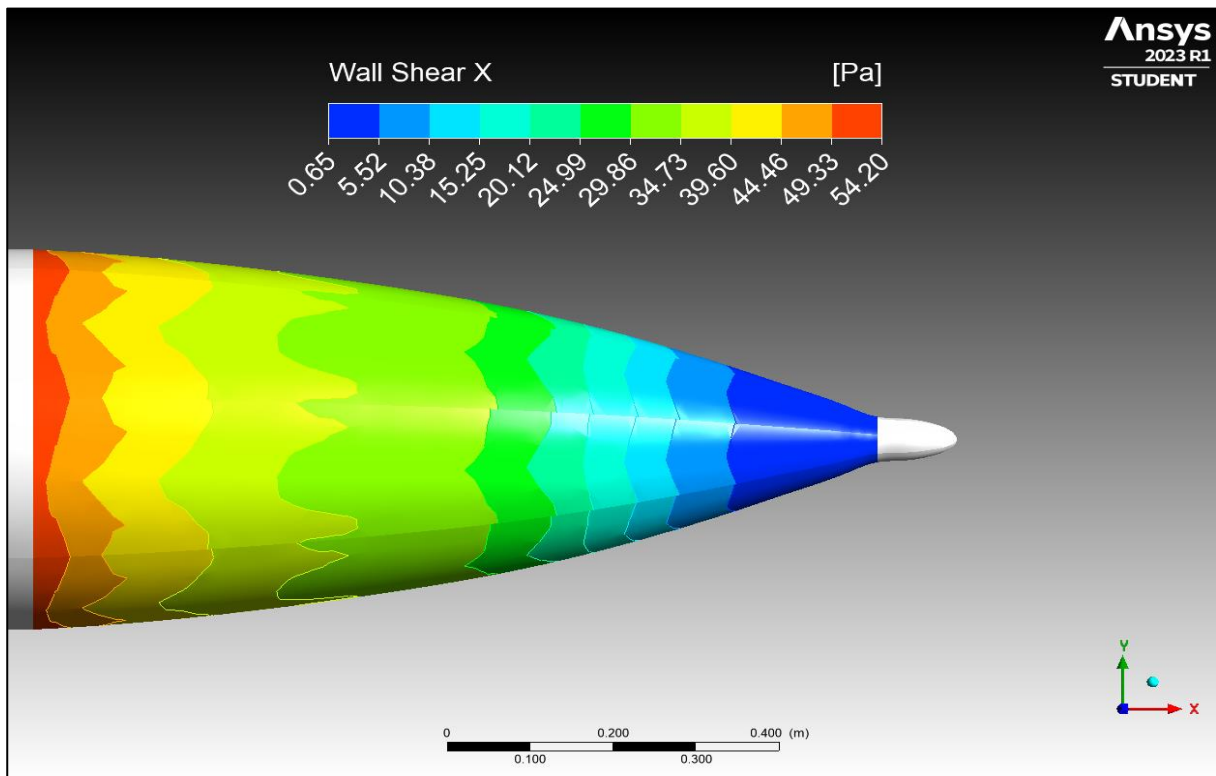
Fonte: Autor

Figura 43 - Campo de pressão – Modelo SUBOFF com casco limpo



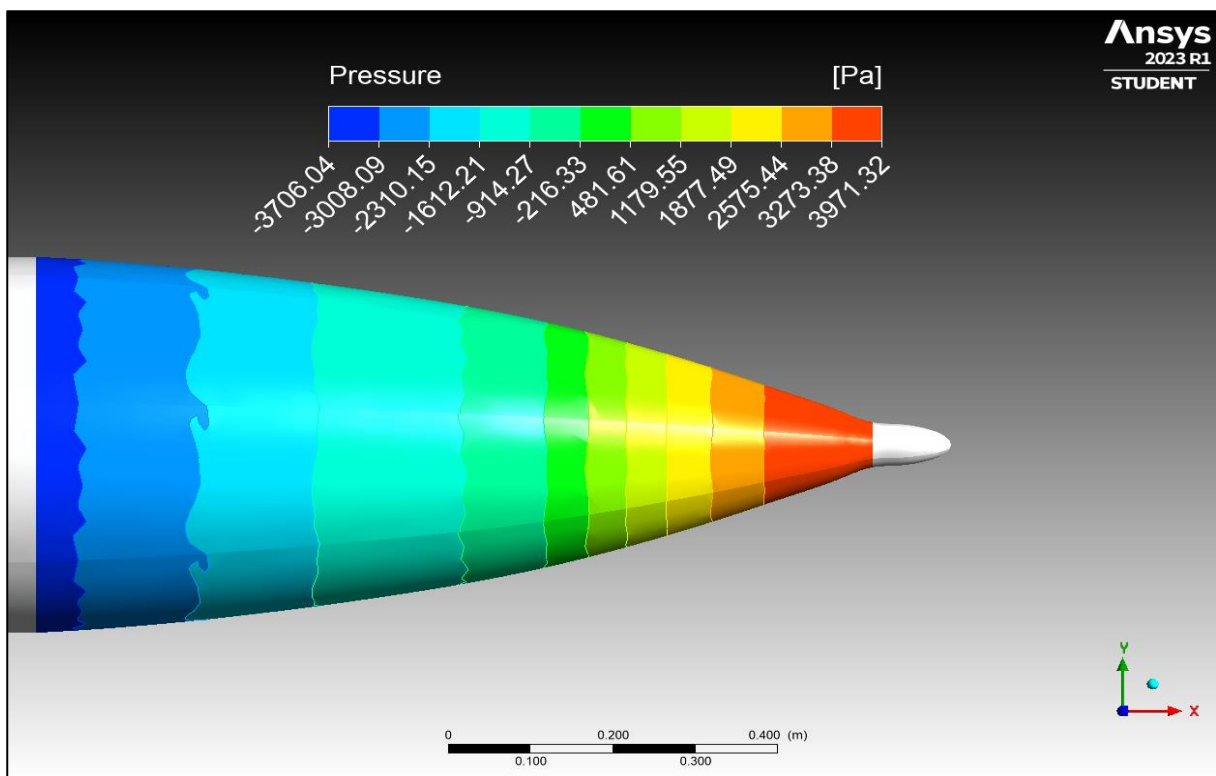
Fonte: Autor

Figura 44 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 1ª fase



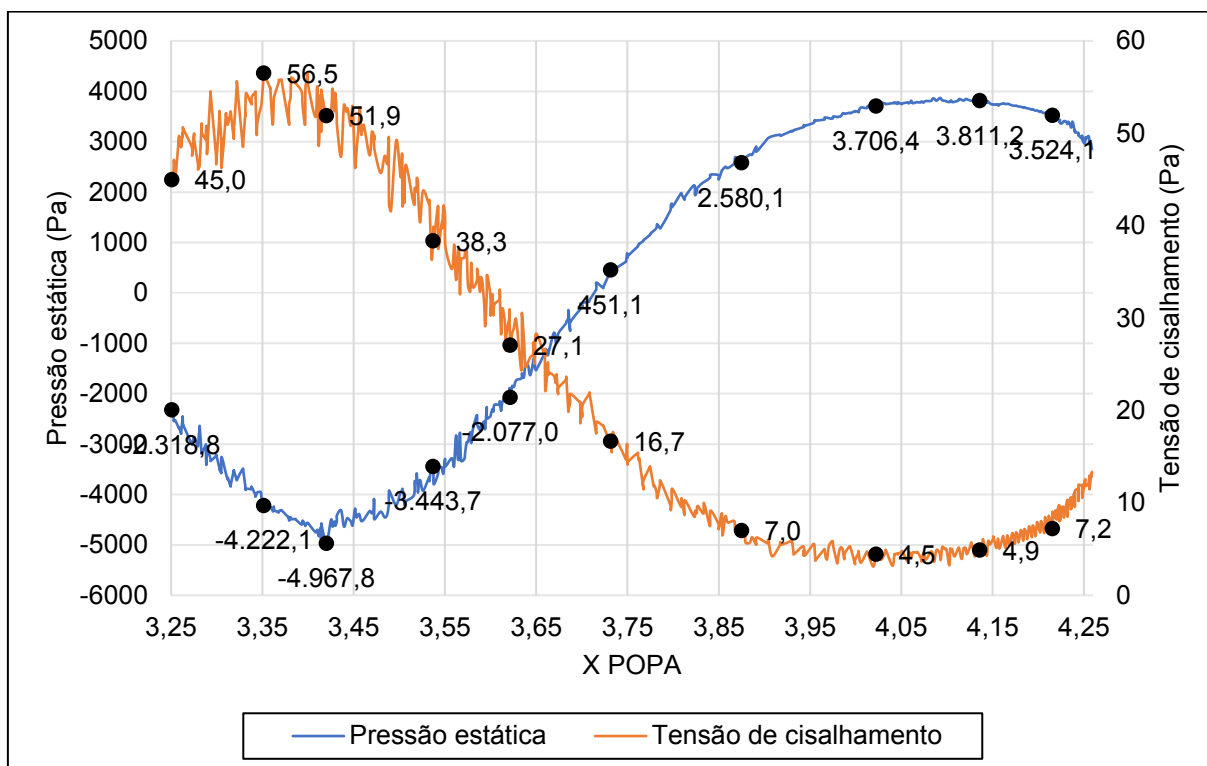
Fonte: Autor

Figura 45 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 1ª fase



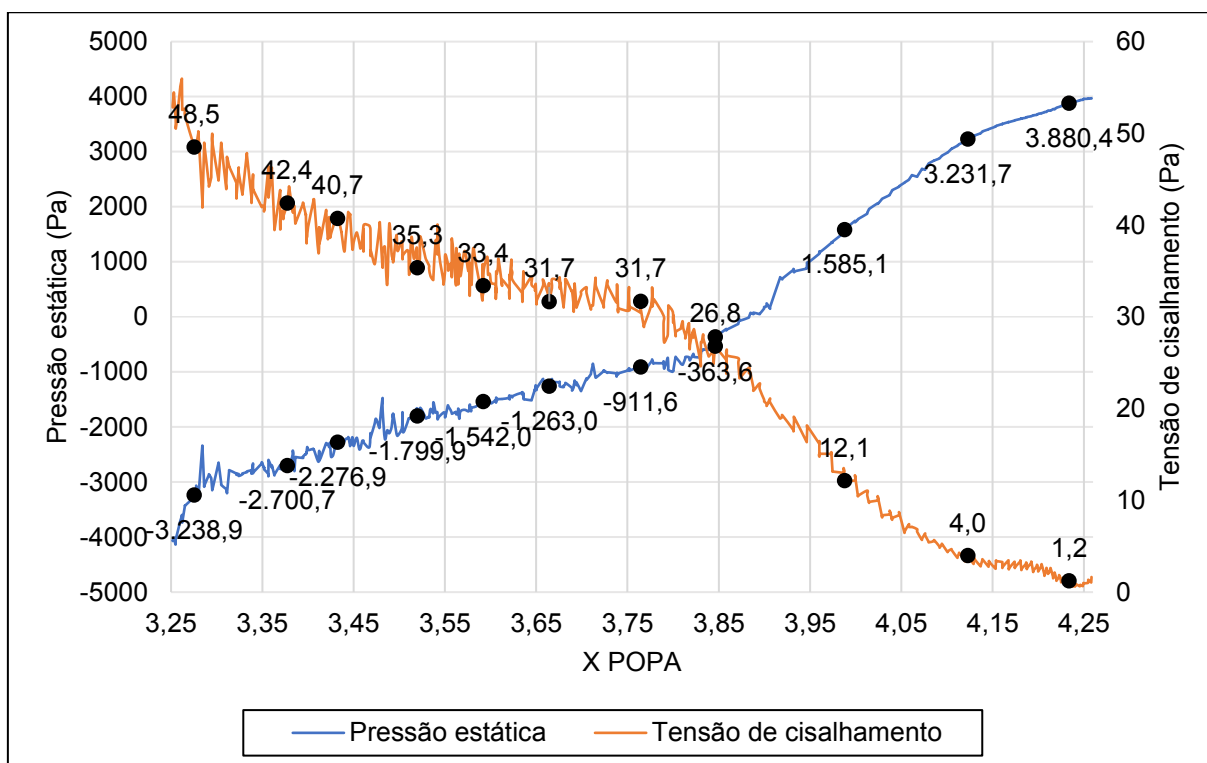
Fonte: Autor

Figura 46 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF casco limpo



Fonte: Autor

Figura 47 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 1ª fase



Fonte: Autor

6.2 ANÁLISE DAS GEOMETRIAS NÃO SELECIONADAS

A fim de possibilitar nesse estudo uma investigação do comportamento do escoamento em geometrias não selecionadas e consideradas “ruins” devido ao coeficiente de Semnan ou ao comportamento da camada limite, são apresentados os resultados das geometrias de menor coeficiente de Semnan e a de maior volume da 1ª rodada. Unicamente com o objetivo de avaliar os resultados apresentados pela ferramenta do trabalho e avaliação da camada limite, não sendo apresentado nas próximas fases.

6.2.1 Análise da geometria de menor eficiência hidro-volume

A geometria de menor Coeficiente de Semnan ou eficiência hidro-volume da 1ª rodada é a geometria 7 com o valor de 256,29. Ela apresenta próximo à região de $x = 3,69$ m a separação da camada limite devida ao gradiente adverso de pressão, fazendo surgir uma bolha de separação (Figura 48). Após a reconexão, a camada limite adquire energia cinética, perdendo energia de pressão (Figura 49 e Figura 50). Ao final da popa, há um ganho de energia de pressão devido à geometria (Figura 51).

Ela apresenta uma área superficial 0,78% maior devido à área superficial ser ligeiramente maior que a do modelo SUBOFF e uma resistência de forma 106,73% maior devido à bolha de separação gerada na região da popa.

Tabela 10 - Resistência friccional x Resistência de forma – Menor eficiência

| Geometria | Resistência Friccional (N) | Variação | Resistência de Forma (N) | Variação | Resistência Total (N) | Variação |
|-------------|----------------------------|----------|--------------------------|----------|-----------------------|----------|
| SUBOFF | 280,23 | - | 59,56 | - | 339,79 | - |
| geometria_7 | 282,42 | 0,78% | 123,13 | 106,73% | 405,55 | 19,35% |

Fonte: Autor

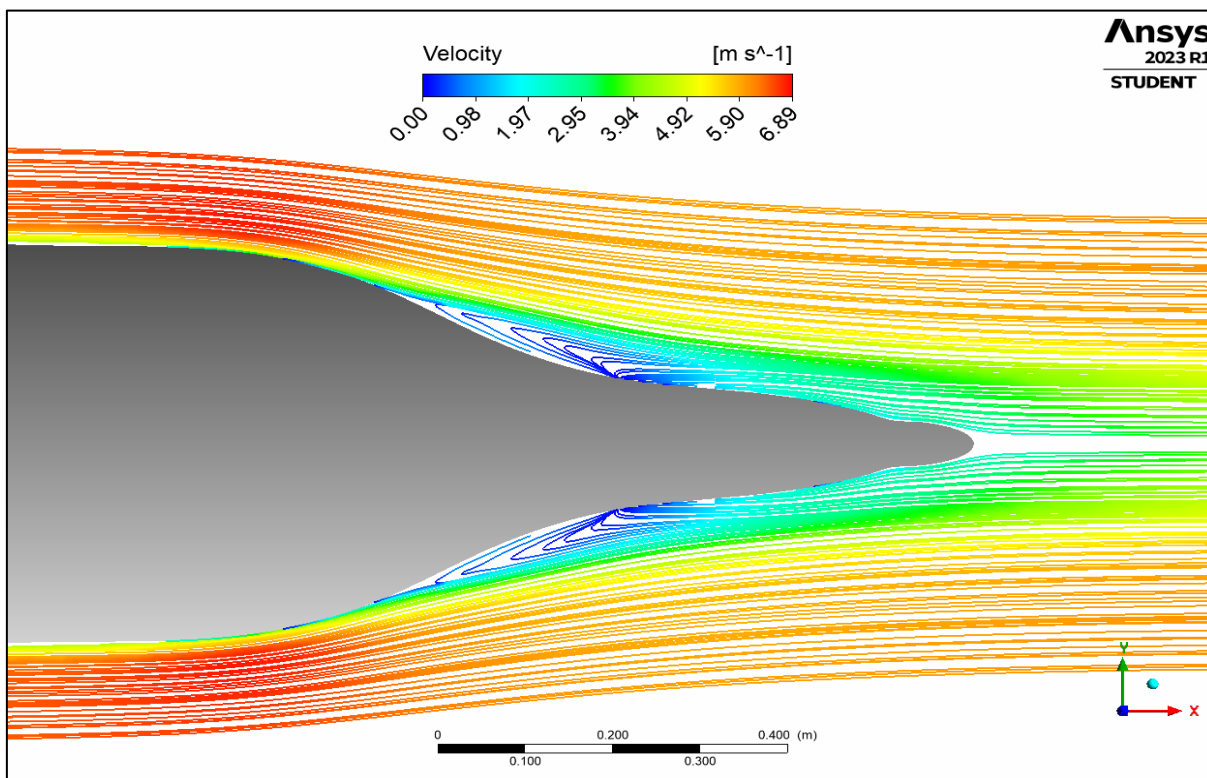
É importante mencionar que ela apresenta uma eficiência 16,14% menor que o modelo SUBOFF, com um aumento da resistência ao avanço de 19,35% e ganho de volume na popa de 0,28% (Tabela 11).

Tabela 11 - Principais resultados do casco sem propulsor de menor eficiência

| Modelo | Resistência (N) | Δ Resistência | SEM NAN Coef (Ksn) | Δ SEM NAN Coef (Ksn) | Δ Vol. POPA |
|-------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| SUBOFF | 339,79 | - | 305,61 | - | - |
| geometria_7 | 405,55 | 19,35% | 256,29 | -16,14% | 0,28% |

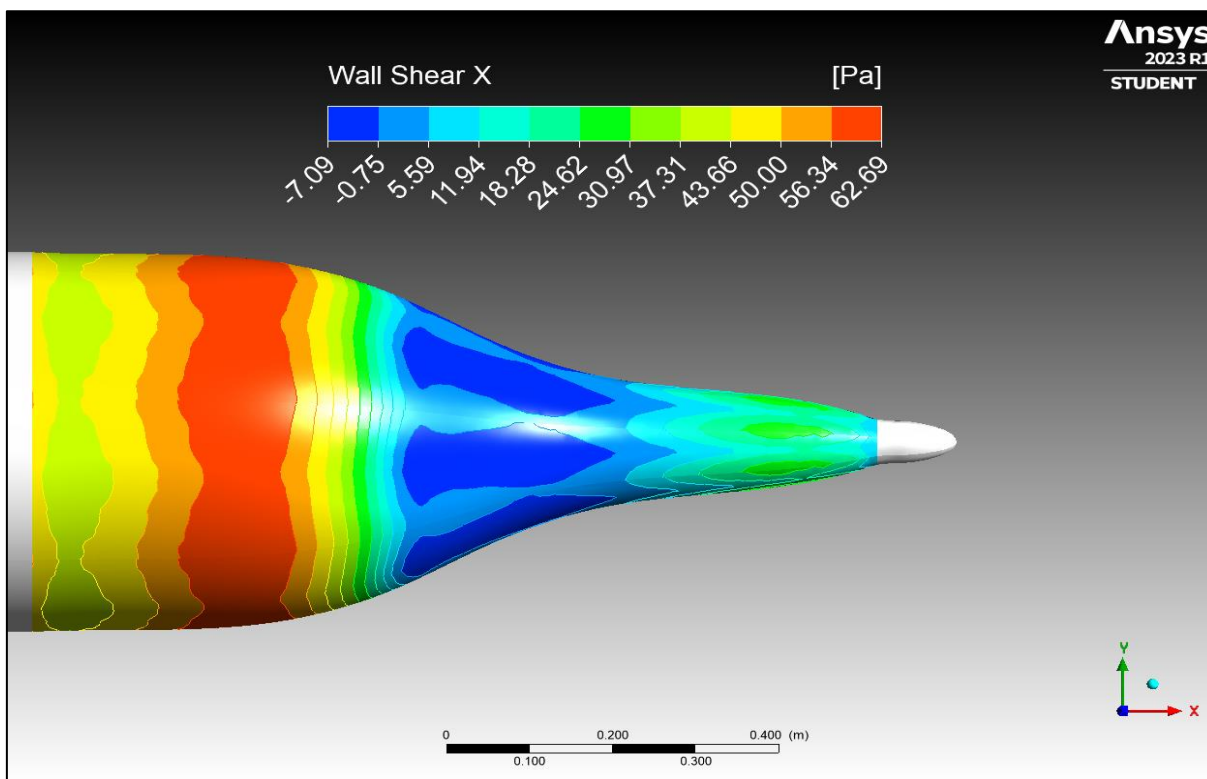
Fonte: Autor

Figura 48 - Linhas de corrente - Menor Coef. de Semnan



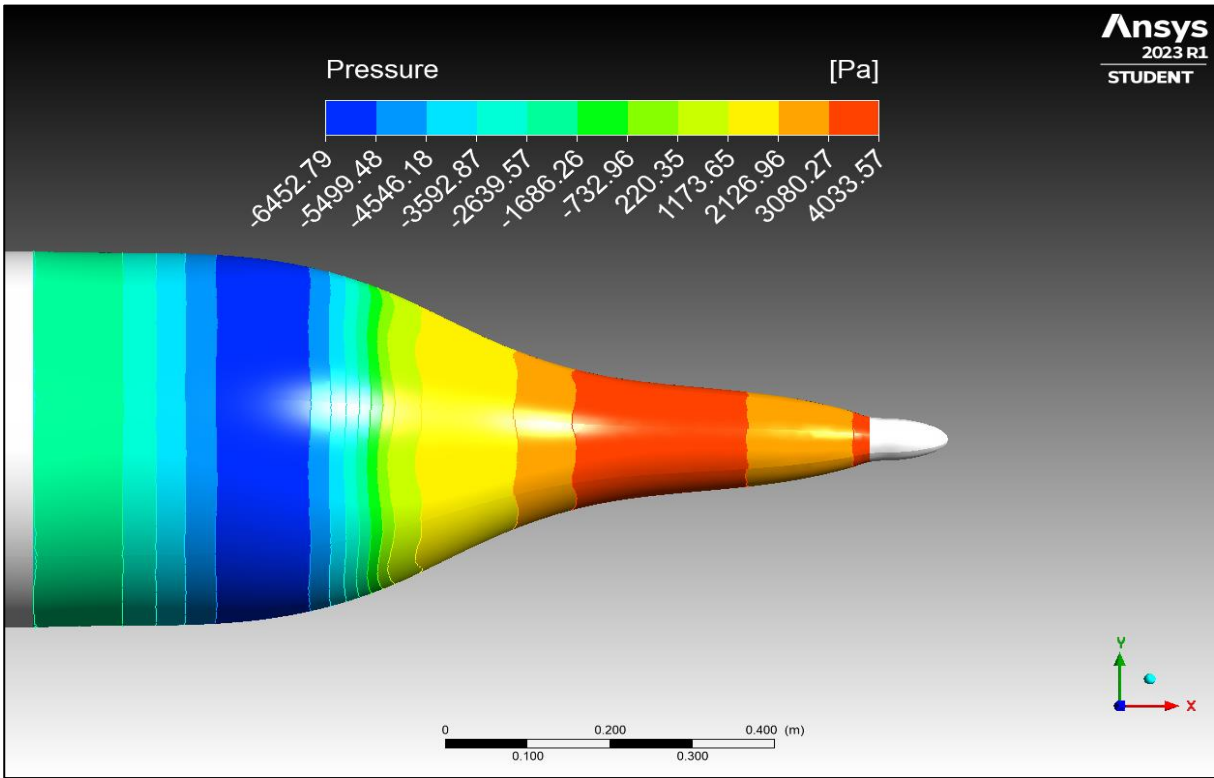
Fonte: Autor

Figura 49 - Tensões de cisalhamento – Menor Coef. de Semnan



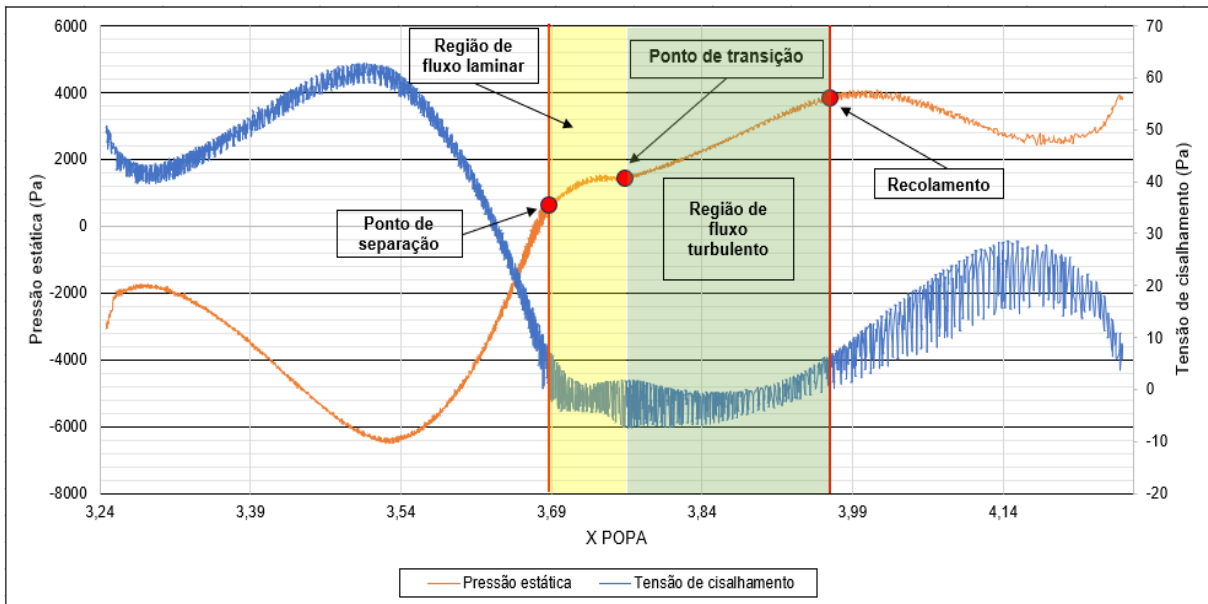
Fonte: Autor

Figura 50 - Campo de pressão - Menor Coef. de Semnan



Fonte: Autor

Figura 51 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Menor Coef. de Semnan



Fonte: Autor

6.2.2 Análise da geometria de maior volume

A geometria de maior volume da 1ª rodada é a geometria 1 com o valor de 0,73 m³. Ela apresenta próximo à região de $x = 4,12$ m (Figura 55) a separação da camada limite devida ao gradiente adverso de pressão e não há reconexão dela na superfície da popa (Figura 52). A camada cisalhante livre torna-se turbulenta em $x = 4,24$ m (Figura 55).

A geometria 1 apresenta uma área superficial 3,39% maior devido à maior área superficial que a do modelo SUBOFF e uma resistência de forma 12,65% maior em sua maior parte devido à separação da camada limite na região da popa (Tabela 12). A Figura 53 e a Figura 54 ilustram o comportamento da tensão de cisalhamento e da pressão respectivamente.

Tabela 12 - Resistência friccional x Resistência de forma – Maior volume

| Geometria | Resistência Friccional (N) | Variação | Resistência de Forma (N) | Variação | Resistência Total (N) | Variação |
|-------------|----------------------------|----------|--------------------------|----------|-----------------------|----------|
| SUBOFF | 280,23 | - | 59,56 | - | 339,79 | - |
| geometria_1 | 289,74 | 3,39% | 67,10 | 12,65% | 356,84 | 5,02% |

Fonte: Autor

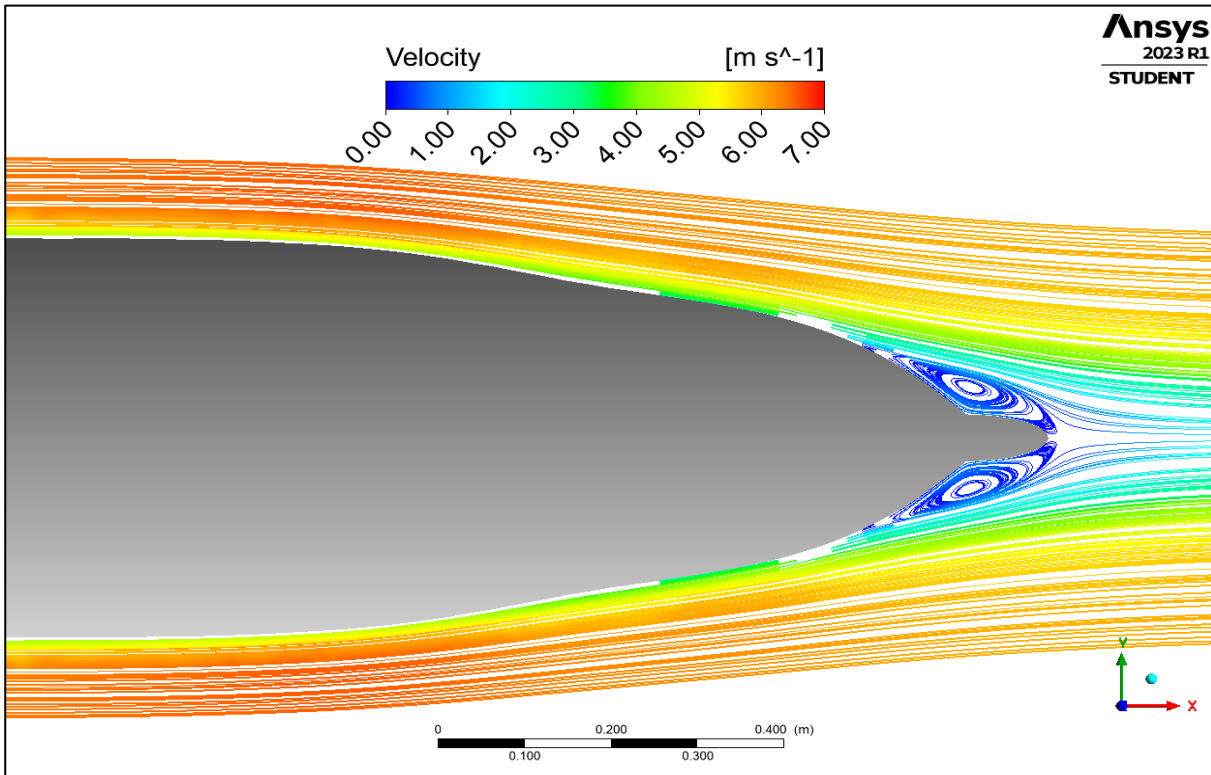
Ela também apresenta uma eficiência de 0,62% maior que o modelo SUBOFF, com um aumento da resistência ao avanço de 5,02% e ganho de volume na popa de 33,47% (Tabela 13). Apesar de possuir maior coeficiente de Semnan que o modelo SUBOFF, a geometria apresenta separação da camada limite na superfície da popa.

Tabela 13 - Principais resultados do casco sem propulsor de maior volume

| Modelo | Resistência (N) | Δ Resistência | SEM NAN Coef (Ksn) | Δ SEM NAN Coef (Ksn) | Δ Vol. POPA |
|-------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| SUBOFF | 339,79 | - | 305,61 | - | - |
| geometria_1 | 356,84 | 5,02% | 307,51 | 0,62% | 33,47% |

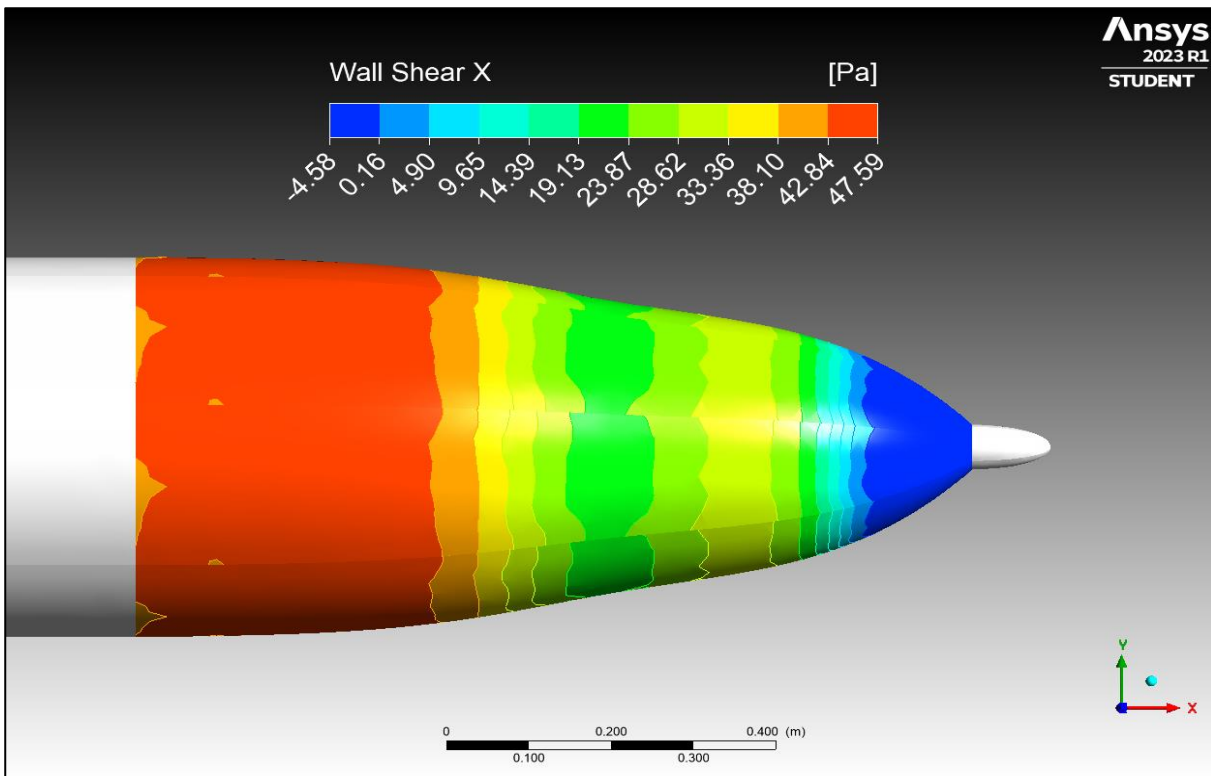
Fonte: Autor

Figura 52 - Linhas de corrente - Maior volume da 1ª rodada



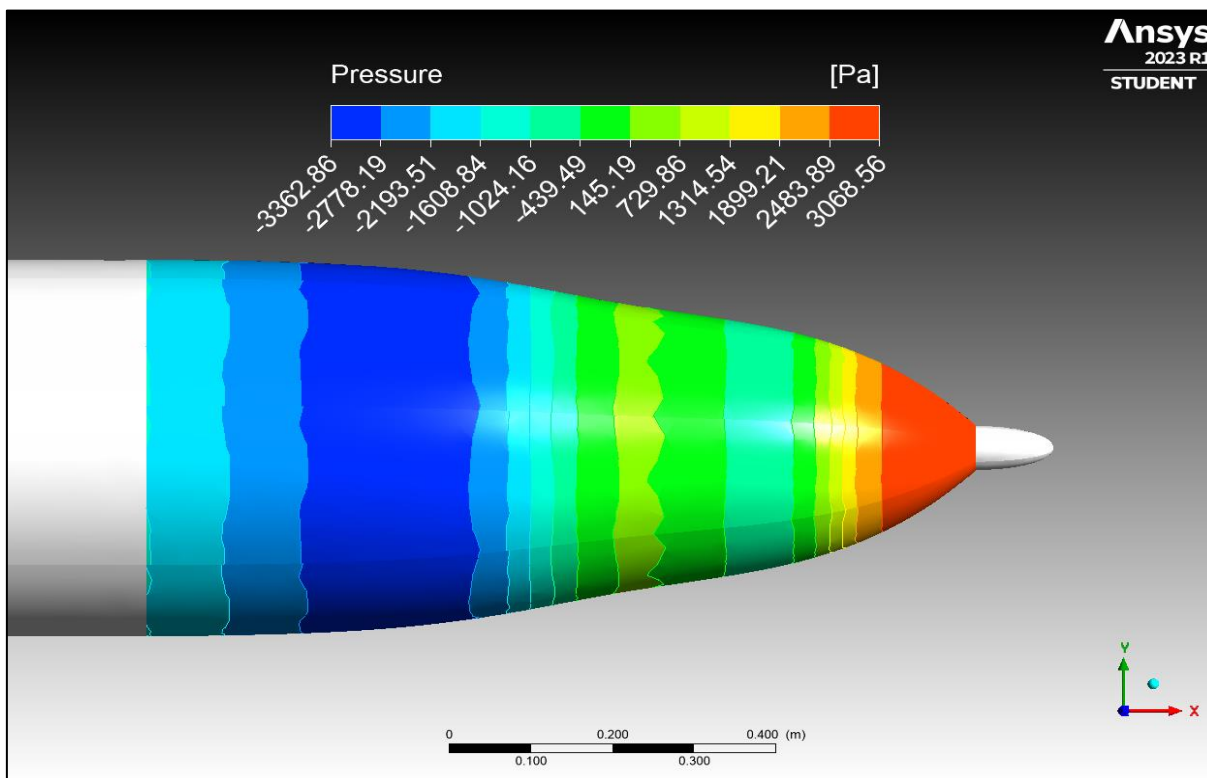
Fonte: Autor

Figura 53 - Tensões de cisalhamento – Maior volume da 1ª rodada



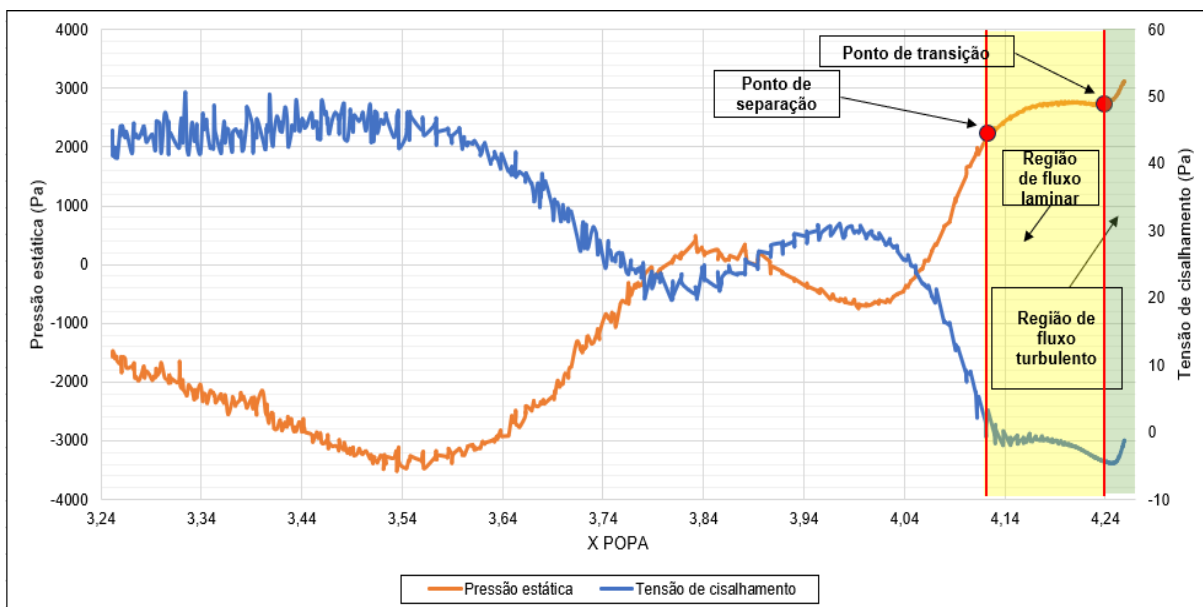
Fonte: Autor

Figura 54 - Campo de pressão - Maior volume da 1ª roda



Fonte: Autor

Figura 55 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Maior volume da 1ª roda



Fonte: Autor

6.3 SEGUNDA FASE – SIMULAÇÕES COM PROPULSOR

O objetivo da 2ª fase é apresentar a geometria de popa com a melhor eficiência hidro-volume com uso do propulsor MOD5a para uma velocidade de 6,17 m/s. O

propulsor foi projetado usando a esteira nominal do modelo SUBOFF e um dos principais requisitos é atingir a máxima eficiência, operando com ótima distribuição de circulação na pá e baixo nível de cavitação (ESTEVEES, GOMES, *et al.*, 2018). O valor do coeficiente de Semnan do modelo SUBOFF é 269,30.

6.3.1 Aplicação do propulsor

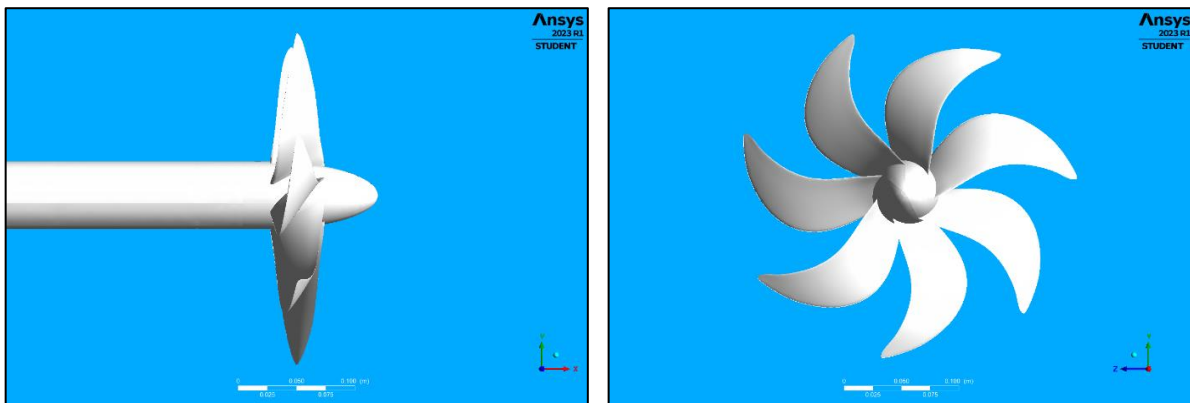
O propulsor MOD5a (Figura 56) foi projetado para modelo SUBOFF em escala 1:1,588. Para esse estudo, o MOD5a foi redimensionado para uso no modelo SUBOFF em escala 1:1 para se adequar com os valores utilizados no código e com as informações contidas no relatório da DARPA. A Tabela 14 apresenta os parâmetros originais do MOD5a.

Tabela 14 - Características do propulsor MOD5a

| Característica | Valor |
|---------------------------|-------------|
| Número de pás | 7 |
| Diâmetro do propulsor | 0,1889 (m) |
| Diâmetro do bosso | 0,0378 (m) |
| Razão P/D | 1,216 |
| Comprimento da corda 0,7R | 0,03658 (m) |

Fonte: Autor

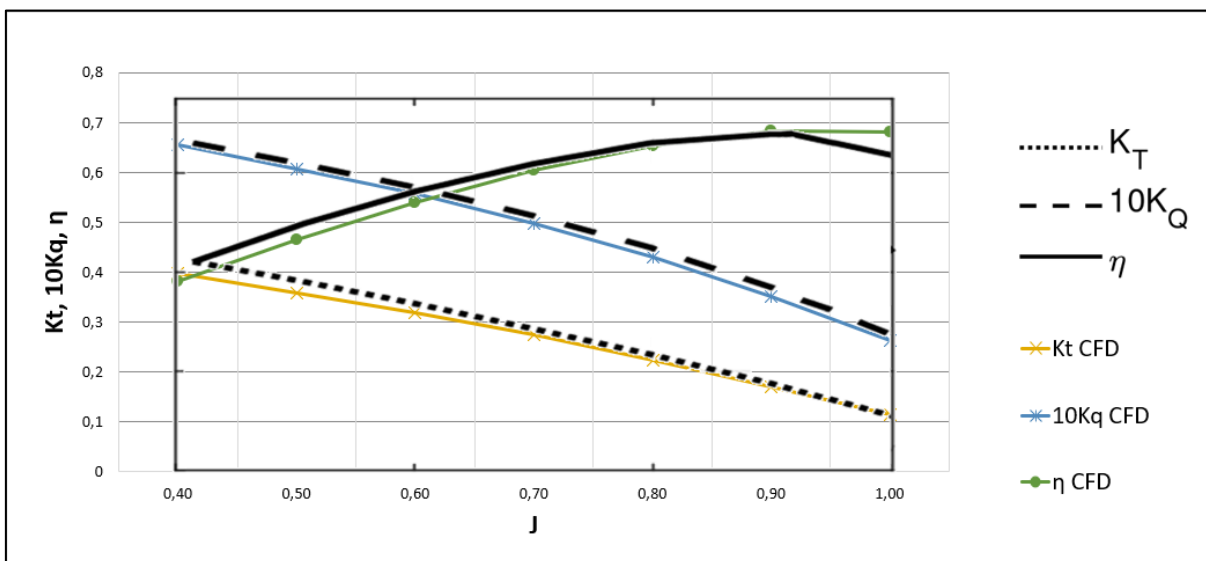
Figura 56 - Propulsor MOD5a



Fonte: Autor

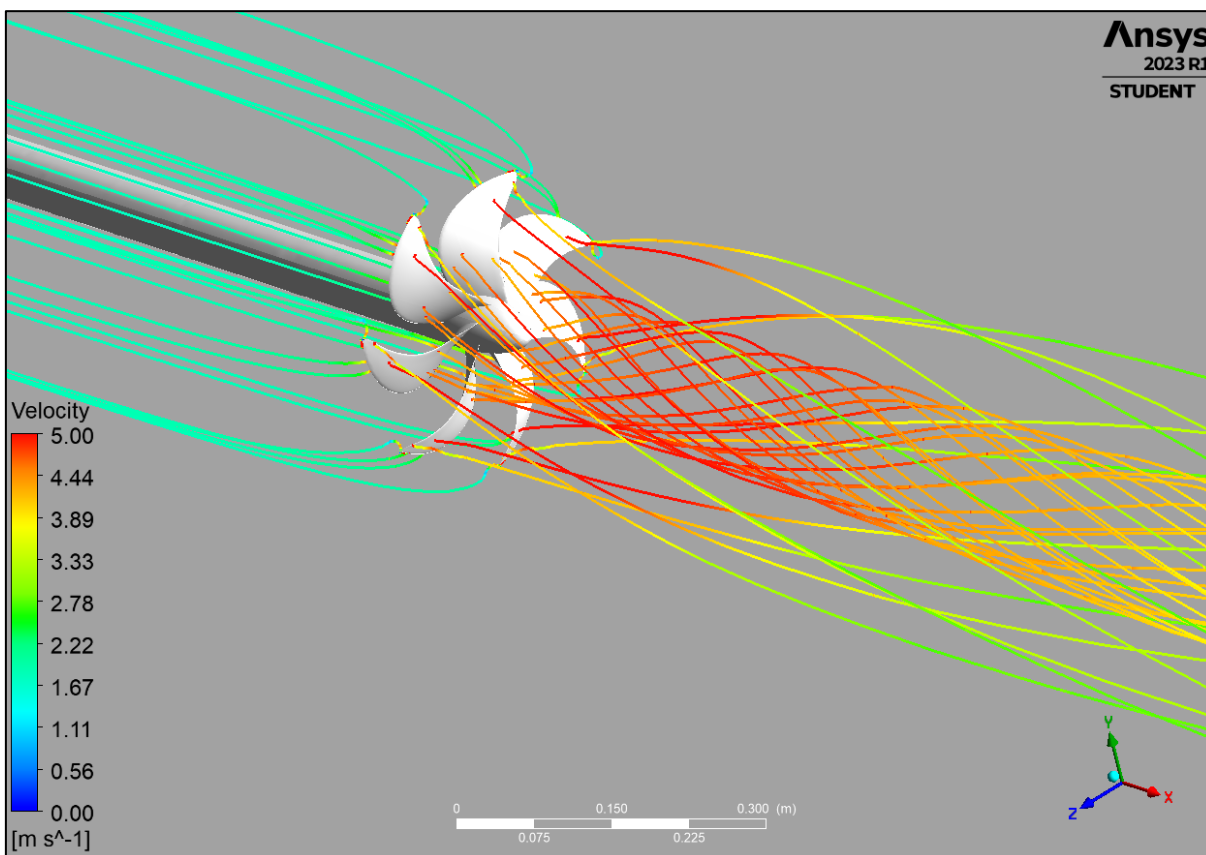
Silva (2021) apresentou os resultados experimentais obtidos em ensaios no túnel de cavitação do Laboratório de Arquitetura Naval e Engenharia Oceânica do IPT (Figura 57). Estes resultados experimentais são comparados com os resultados obtidos na avaliação numérica do MOD5a no *Ansys Fluent* com o objetivo de avaliar se as condições de contorno utilizadas e a própria modelagem da geometria do propulsor estão apropriadas para a continuidade do estudo. A velocidade de rotação estabelecida no teste foi de 15 *rps*. A Figura 58 ilustra uma imagem da avaliação.

Figura 57 - Comparativo método numérico x experimental



Fonte: Autor

Figura 58 - Avaliação numérica do propulsor



Fonte: Autor

6.3.2 Resultados da 1ª rodada de simulações com propulsor

Foram selecionadas 7 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 17). A geometria 4 foi a selecionada para a 2ª rodada (Figura 60) com um coeficiente de Semnan de 253,69.

6.3.3 Resultados da 2ª rodada de simulações com propulsor

Foram selecionadas 8 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 18). A geometria 7 foi a selecionada para a 3ª rodada (Figura 61) com um coeficiente de Semnan de 257,11.

6.3.4 Resultados da 3ª rodada de simulações com propulsor

Foram selecionadas 39 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 19). A geometria 29 foi a selecionada para a 4ª rodada (Figura 62) com um coeficiente de Semnan de 265,07.

6.3.5 Resultados da 4ª rodada de simulações com propulsor

Foram selecionadas 64 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 20). A geometria 21 foi a selecionada da 2ª fase com um coeficiente de Semnan de 268,14. Ela apresenta uma taxa de variação de pressão e de tensão de cisalhamento na superfície da popa ao longo de x com valores próximos dos encontrados para o modelo SUBOFF (Figura 70 e Figura 71).

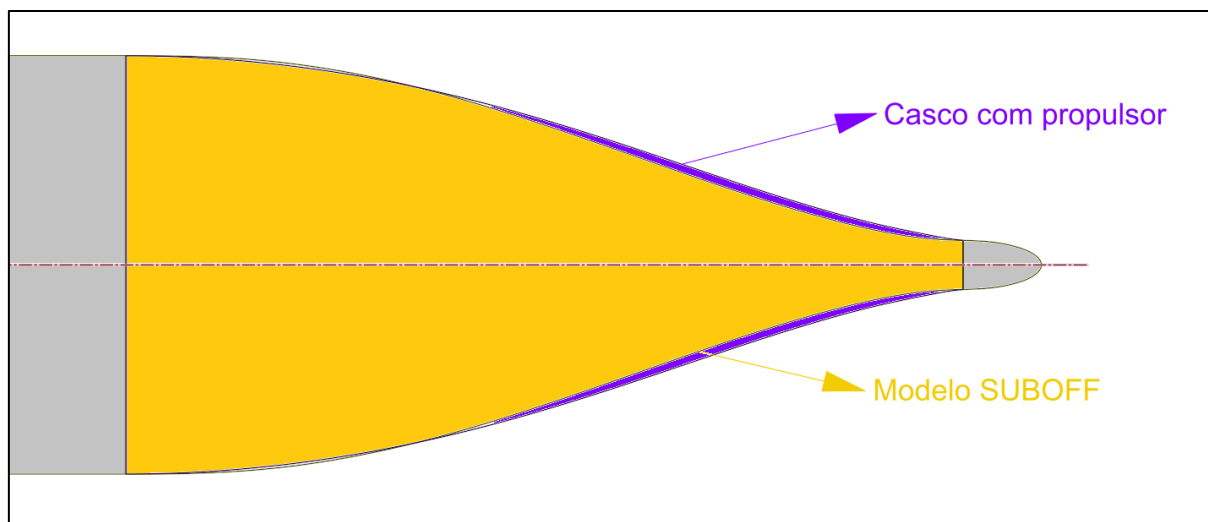
Em ambas as geometrias, de $x = 3,40$ m até $x = 4,00$ m é observada uma redução significativa da tensão de cisalhamento na superfície da popa com decréscimo da velocidade do fluxo (Figura 66 e Figura 68), pois há um aumento de mesmas proporções da energia de pressão (Figura 67 e Figura 69). Entretanto, não há separação da camada limite.

A partir de $x = 4,00$ m, o escoamento passa a sofrer uma pequena aceleração devida à influência do propulsor (Figura 64 e Figura 65), ganhando energia cinética e reduzindo a energia de pressão, valores suficientes para que seja evitada a separação da camada limite (Figura 70 e Figura 71).

A geometria selecionada apresentou valores de resistência friccional e de forma ligeiramente maiores que o modelo SUBOFF (Tabela 15). A resistência total da geometria selecionada é 0,94% maior. Apesar de apresentar um volume de popa 2,23% maior, o coeficiente de Semnan ficou 0,43% menor em comparação ao modelo

SUBOFF (Tabela 16). A Figura 59 apresenta a diferença entre as geometrias SUBOFF e selecionada.

Figura 59 - SUBOFF x Geometria selecionada da 2ª fase



Fonte: Autor

Tabela 15 - Resistência friccional x Resistência de forma – 2ª fase

| Geometria | Resistência Friccional (N) | Varição | Resistência de Forma (N) | Varição | Resistência Total (N) | Varição |
|--------------|----------------------------|---------|--------------------------|---------|-----------------------|---------|
| SUBOFF | 281,41 | - | 104,22 | - | 385,61 | - |
| geometria_21 | 283,92 | 0,89% | 105,31 | 1,04% | 389,22 | 0,94% |

Fonte: Autor

Tabela 16 - Principais resultados do casco selecionado com propulsor

| Modelo | Resistência (N) | Δ Resistência | SEMNaN Coef (Ksn) | Δ SEMNaN Coef (Ksn) | Δ Vol POPA |
|--------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| SUBOFF | 385,61 | - | 269,30 | - | - |
| geometria_21 | 389,22 | 0,94% | 268,14 | -0,43% | 2,23% |

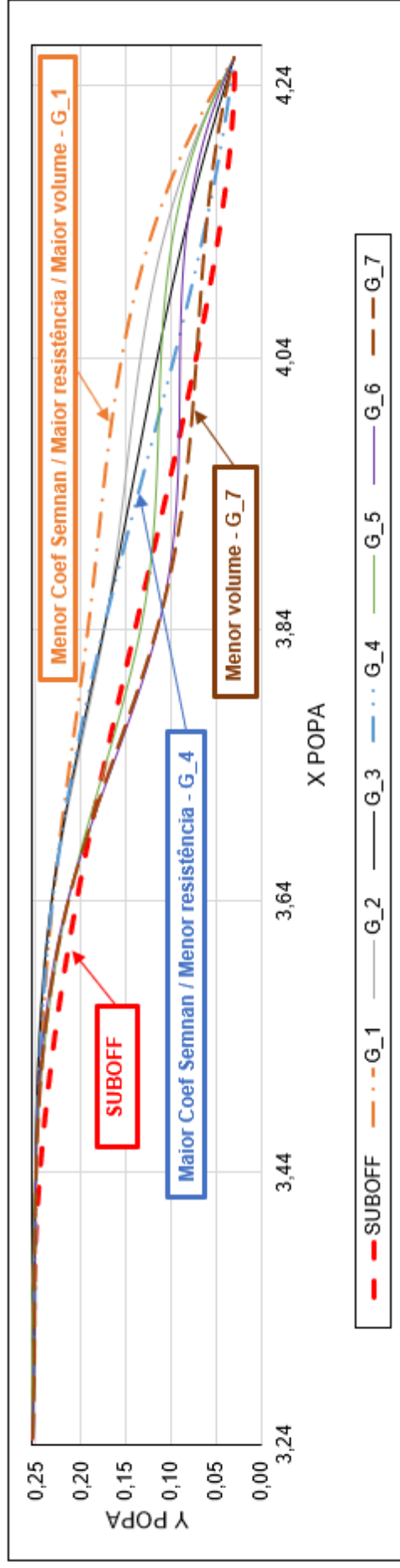
Fonte: Autor

Tabela 17 - Resultados 1ª rodada com propulsor

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|--------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| | Sector | Total | Sector | Total | | | | | | popa | total | | |
| SUBOFF | 4,71E-04 | 3,30E-03 | 55,09 | 385,61 | 269,30 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 5,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_1 | 6,16E-04 | 4,32E-03 | 75,05 | 525,32 | 208,88 | 6,23 | 4,04% | 0,73 | 0,64 | 33,47% | 4,75% | -2,47 | 4,25 |
| GEOMETRIA_2 | 5,70E-04 | 3,99E-03 | 68,70 | 480,93 | 225,23 | 6,18 | 3,11% | 0,72 | 0,60 | 24,77% | 3,52% | -3,10 | 4,25 |
| GEOMETRIA_3 | 5,24E-04 | 3,67E-03 | 62,92 | 440,41 | 244,23 | 6,14 | 2,55% | 0,72 | 0,59 | 21,44% | 3,05% | -1,53 | 4,26 |
| GEOMETRIA_4 | 5,04E-04 | 3,53E-03 | 60,20 | 421,37 | 253,69 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 0,57 | 18,70% | 2,66% | 3,40 | 4,02 |
| GEOMETRIA_5 | 5,53E-04 | 3,87E-03 | 65,64 | 459,50 | 230,29 | 6,08 | 1,48% | 0,71 | 0,52 | 8,71% | 1,24% | -5,77 | 4,25 |
| GEOMETRIA_6 | 6,06E-04 | 4,24E-03 | 71,32 | 499,21 | 209,62 | 6,03 | 0,65% | 0,70 | 0,49 | 2,55% | 0,36% | -14,85 | 3,77 |
| GEOMETRIA_7 | 6,01E-04 | 4,21E-03 | 70,38 | 492,63 | 210,99 | 6,00 | 0,08% | 0,70 | 0,48 | 0,28% | 0,04% | -12,77 | 3,76 |

Fonte: Autor

Figura 60 - Resultados da 1ª rodada com propulsor



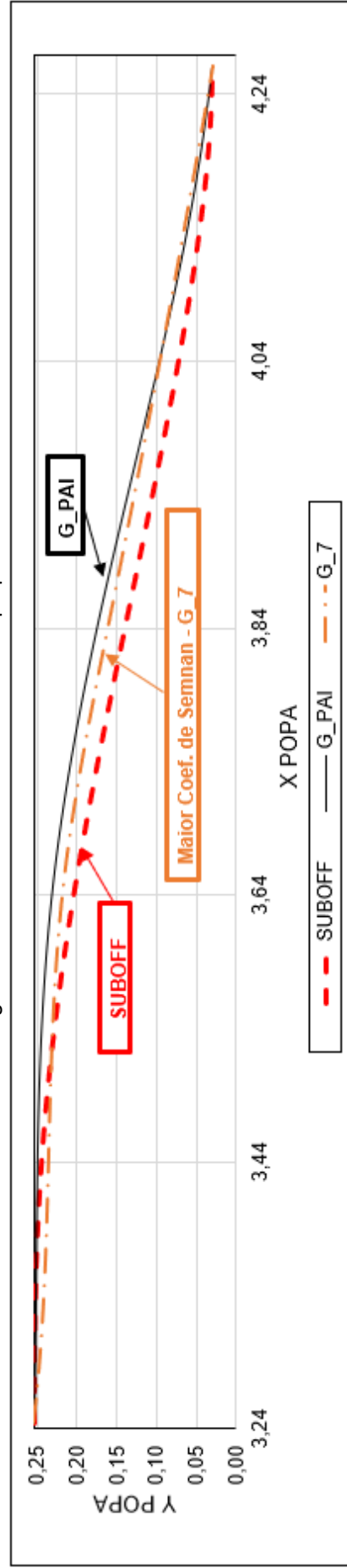
Fonte: Autor

Tabela 18 - Resultados 2ª rodada com propulsor

| Vel = 12 nós | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área (m²) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|--------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | popa | total | | |
| SUBOFF | 4,71E-04 | 3,30E-03 | 55,09 | 385,61 | 269,30 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 5,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_PAI | 5,04E-04 | 3,53E-03 | 60,20 | 421,37 | 253,69 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 0,57 | 18,70% | 2,66% | 3,40 | 4,02 |
| GEOMETRIA_1 | 5,18E-04 | 3,63E-03 | 62,15 | 435,04 | 247,15 | 6,14 | 2,50% | 0,72 | 0,59 | 21,55% | 3,06% | -3,03 | 4,26 |
| GEOMETRIA_2 | 5,07E-04 | 3,55E-03 | 60,55 | 423,88 | 252,49 | 6,12 | 2,12% | 0,72 | 0,58 | 19,53% | 2,77% | 2,86 | 4,05 |
| GEOMETRIA_3 | 5,22E-04 | 3,65E-03 | 62,29 | 436,04 | 244,88 | 6,12 | 2,07% | 0,71 | 0,56 | 15,64% | 2,22% | 1,72 | 4,07 |
| GEOMETRIA_4 | 5,11E-04 | 3,58E-03 | 60,82 | 425,73 | 249,58 | 6,10 | 1,75% | 0,71 | 0,54 | 12,02% | 1,71% | 0,81 | 4,26 |
| GEOMETRIA_5 | 4,99E-04 | 3,49E-03 | 59,13 | 413,92 | 255,52 | 6,07 | 1,37% | 0,71 | 0,53 | 10,00% | 1,42% | 2,22 | 4,02 |
| GEOMETRIA_6 | 5,15E-04 | 3,60E-03 | 61,11 | 427,74 | 247,37 | 6,08 | 1,47% | 0,71 | 0,52 | 8,68% | 1,23% | -7,43 | 4,26 |
| GEOMETRIA_7 | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 58,50 | 409,53 | 257,11 | 6,06 | 1,08% | 0,71 | 0,51 | 6,64% | 0,94% | 2,07 | 4,26 |
| GEOMETRIA_8 | 5,13E-04 | 3,59E-03 | 60,48 | 423,35 | 247,60 | 6,03 | 0,70% | 0,70 | 0,51 | 4,93% | 0,70% | 3,48 | 4,02 |

Fonte: Autor

Figura 61 - Resultados da 2ª rodada com propulsor



Fonte: Autor

Tabela 19 - Resultados da 3ª rodada com propulsor

(continua)

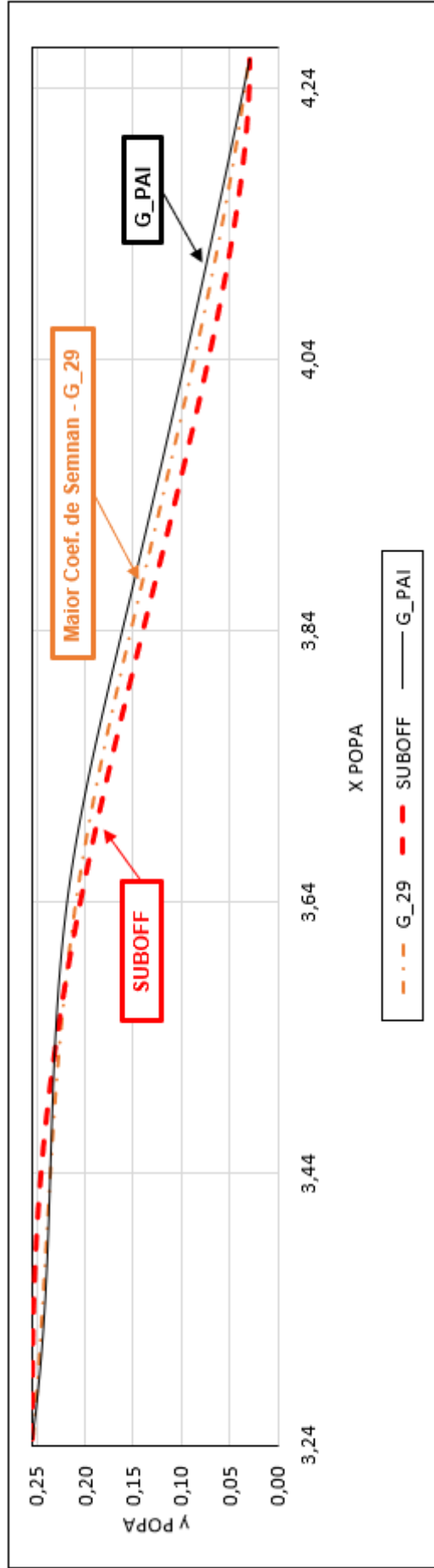
| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 4,71E-04 | 3,30E-03 | 55,09 | 385,61 | 269,30 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 5,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_PAI | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 58,50 | 409,53 | 257,11 | 6,06 | 1,08% | 0,71 | 0,51 | 6,64% | 0,94% | 2,07 | 4,26 |
| GEOMETRIA_1 | 5,09E-04 | 3,56E-03 | 60,75 | 425,26 | 251,35 | 6,1168 | 2,10% | 0,72 | 0,57 | 17,28% | 2,45% | 2,48 | 4,26 |
| GEOMETRIA_2 | 5,01E-04 | 3,50E-03 | 59,66 | 417,62 | 255,16 | 6,1017 | 1,85% | 0,72 | 0,56 | 15,95% | 2,27% | 4,77 | 4,04 |
| GEOMETRIA_3 | 5,00E-04 | 3,50E-03 | 59,40 | 415,83 | 255,50 | 6,0871 | 1,61% | 0,71 | 0,55 | 14,78% | 2,10% | 1,36 | 3,99 |
| GEOMETRIA_4 | 5,20E-04 | 3,64E-03 | 62,00 | 434,02 | 245,61 | 6,1066 | 1,93% | 0,71 | 0,55 | 15,06% | 2,14% | -0,31 | 4,26 |
| GEOMETRIA_5 | 5,07E-04 | 3,55E-03 | 60,35 | 422,45 | 251,53 | 6,0909 | 1,67% | 0,71 | 0,55 | 13,73% | 1,95% | 3,70 | 4,26 |
| GEOMETRIA_6 | 5,00E-04 | 3,50E-03 | 59,28 | 414,96 | 255,30 | 6,0759 | 1,42% | 0,71 | 0,54 | 12,54% | 1,78% | 3,30 | 3,98 |
| GEOMETRIA_7 | 5,01E-04 | 3,51E-03 | 59,61 | 417,27 | 254,59 | 6,0922 | 1,69% | 0,71 | 0,54 | 12,74% | 1,81% | 0,44 | 4,26 |
| GEOMETRIA_8 | 4,91E-04 | 3,44E-03 | 58,31 | 408,17 | 259,44 | 6,0766 | 1,43% | 0,71 | 0,54 | 11,41% | 1,62% | 4,16 | 4,26 |
| GEOMETRIA_9 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 57,33 | 401,31 | 263,08 | 6,0617 | 1,18% | 0,71 | 0,53 | 10,23% | 1,45% | 4,21 | 4,01 |
| GEOMETRIA_10 | 5,10E-04 | 3,57E-03 | 60,58 | 424,06 | 249,86 | 6,0823 | 1,52% | 0,71 | 0,53 | 10,66% | 1,51% | -4,48 | 4,26 |
| GEOMETRIA_11 | 4,97E-04 | 3,48E-03 | 58,86 | 412,02 | 256,32 | 6,0661 | 1,25% | 0,71 | 0,53 | 9,31% | 1,32% | 2,74 | 4,26 |
| GEOMETRIA_12 | 4,88E-04 | 3,42E-03 | 57,66 | 403,62 | 260,84 | 6,0506 | 1,00% | 0,71 | 0,52 | 8,12% | 1,15% | 5,43 | 3,95 |
| GEOMETRIA_13 | 5,03E-04 | 3,52E-03 | 59,82 | 418,74 | 253,26 | 6,0867 | 1,60% | 0,71 | 0,54 | 10,97% | 1,56% | 2,59 | 4,26 |
| GEOMETRIA_14 | 4,95E-04 | 3,47E-03 | 58,75 | 411,25 | 257,08 | 6,0717 | 1,35% | 0,71 | 0,53 | 9,65% | 1,37% | 4,50 | 4,04 |
| GEOMETRIA_15 | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 58,53 | 409,71 | 257,29 | 6,0572 | 1,11% | 0,71 | 0,52 | 8,47% | 1,20% | 1,10 | 4,03 |
| GEOMETRIA_16 | 5,03E-04 | 3,52E-03 | 59,71 | 417,97 | 253,01 | 6,0758 | 1,42% | 0,71 | 0,52 | 8,75% | 1,24% | 0,35 | 4,26 |
| GEOMETRIA_17 | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 58,53 | 409,71 | 257,29 | 6,0602 | 1,16% | 0,71 | 0,52 | 7,42% | 1,05% | 4,00 | 4,26 |
| GEOMETRIA_18 | 4,87E-04 | 3,41E-03 | 57,55 | 402,85 | 260,88 | 6,0452 | 0,91% | 0,71 | 0,51 | 6,24% | 0,89% | 4,06 | 4,03 |
| GEOMETRIA_19 | 5,14E-04 | 3,60E-03 | 60,92 | 426,44 | 247,35 | 6,0663 | 1,26% | 0,71 | 0,51 | 6,67% | 0,95% | -5,37 | 4,26 |
| GEOMETRIA_20 | 4,99E-04 | 3,49E-03 | 58,97 | 412,79 | 254,69 | 6,0501 | 0,99% | 0,70 | 0,51 | 5,33% | 0,76% | 2,06 | 4,26 |
| GEOMETRIA_21 | 4,90E-04 | 3,43E-03 | 57,78 | 404,46 | 259,12 | 6,0345 | 0,73% | 0,70 | 0,50 | 4,13% | 0,59% | 4,91 | 3,87 |
| GEOMETRIA_22 | 4,97E-04 | 3,48E-03 | 58,92 | 412,44 | 256,33 | 6,0740 | 1,39% | 0,71 | 0,52 | 8,77% | 1,25% | 3,37 | 4,26 |
| GEOMETRIA_23 | 4,89E-04 | 3,42E-03 | 57,83 | 404,81 | 260,36 | 6,0590 | 1,14% | 0,71 | 0,52 | 7,45% | 1,06% | 3,33 | 4,06 |
| GEOMETRIA_24 | 4,96E-04 | 3,47E-03 | 58,72 | 411,04 | 256,43 | 6,0621 | 1,19% | 0,71 | 0,51 | 6,55% | 0,93% | 0,46 | 4,26 |
| GEOMETRIA_25 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 57,19 | 400,33 | 262,45 | 6,0466 | 0,93% | 0,70 | 0,51 | 5,23% | 0,74% | 4,47 | 4,26 |
| GEOMETRIA_26 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,52 | 395,64 | 264,76 | 6,0317 | 0,68% | 0,70 | 0,50 | 4,05% | 0,57% | 4,16 | 4,05 |
| GEOMETRIA_27 | 5,01E-04 | 3,51E-03 | 59,19 | 414,33 | 253,70 | 6,0515 | 1,01% | 0,70 | 0,50 | 4,47% | 0,64% | -4,22 | 4,26 |
| GEOMETRIA_28 | 4,88E-04 | 3,42E-03 | 57,54 | 402,78 | 260,12 | 6,0354 | 0,74% | 0,70 | 0,50 | 3,13% | 0,45% | 2,69 | 4,26 |
| GEOMETRIA_29 | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,29 | 394,03 | 265,07 | 6,0200 | 0,49% | 0,70 | 0,49 | 1,94% | 0,28% | 7,08 | 4,01 |

Tabela 19 - Resultados da 3ª rodada com propulsor

| Vel = 12 nós | Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) | (conclusão) |
|--------------|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-------|----------------|---------------|-------------|
| | | Sector | Total | Sector | Total | | | | | | popa | total | | | |
| | GEOMETRIA_30 | 5,10E-04 | 3,57E-03 | 60,45 | 423,15 | 249,59 | 6,0726 | 1,36% | 0,71 | 0,52 | 7,12% | 1,01% | 4,29 | 4,06 | |
| | GEOMETRIA_31 | 5,02E-04 | 3,52E-03 | 59,44 | 416,08 | 253,04 | 6,0575 | 1,11% | 0,70 | 0,51 | 5,80% | 0,82% | 4,29 | 4,06 | |
| | GEOMETRIA_32 | 5,01E-04 | 3,50E-03 | 59,08 | 413,56 | 253,83 | 6,0429 | 0,87% | 0,70 | 0,50 | 4,63% | 0,66% | 0,61 | 4,03 | |
| | GEOMETRIA_33 | 4,97E-04 | 3,48E-03 | 58,82 | 411,74 | 255,63 | 6,0582 | 1,12% | 0,70 | 0,51 | 4,91% | 0,70% | 2,75 | 4,26 | |
| | GEOMETRIA_34 | 4,92E-04 | 3,45E-03 | 58,12 | 406,84 | 257,91 | 6,0432 | 0,87% | 0,70 | 0,50 | 3,59% | 0,51% | 3,23 | 4,07 | |
| | GEOMETRIA_35 | 4,93E-04 | 3,45E-03 | 58,07 | 406,49 | 257,37 | 6,0288 | 0,63% | 0,70 | 0,49 | 2,42% | 0,34% | -0,05 | 4,03 | |
| | GEOMETRIA_36 | 4,99E-04 | 3,49E-03 | 58,89 | 412,23 | 254,58 | 6,0466 | 0,93% | 0,70 | 0,50 | 2,70% | 0,38% | 0,92 | 4,26 | |
| | GEOMETRIA_37 | 4,89E-04 | 3,42E-03 | 57,58 | 403,06 | 259,54 | 6,0311 | 0,67% | 0,70 | 0,49 | 1,37% | 0,20% | 4,31 | 4,26 | |
| | GEOMETRIA_38 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,80 | 397,60 | 262,30 | 6,0161 | 0,42% | 0,70 | 0,48 | 0,19% | 0,03% | 3,74 | 4,00 | |
| | GEOMETRIA_39 | 5,05E-04 | 3,54E-03 | 59,54 | 416,78 | 251,13 | 6,0364 | 0,76% | 0,70 | 0,49 | 0,62% | 0,09% | -4,86 | 4,26 | |

Fonte: Autor

Figura 62 - Resultados da 3ª rodada com propulsor



Fonte: Autor

Tabela 20 - Resultados da 4ª rodada com propulsor

(continua)

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área (m²) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|---------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 4,71E-04 | 3,30E-03 | 55,09 | 385,61 | 269,30 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 5,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_PAI | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,29 | 394,03 | 265,07 | 6,02 | 0,49% | 0,70 | 0,49 | 1,94% | 0,28% | 7,08 | 4,01 |
| GEOMETRIA_1 | 4,86E-04 | 3,40E-03 | 57,51 | 402,54 | 261,60 | 6,05 | 1,05% | 0,71 | 0,52 | 7,55% | 1,07% | 6,29 | 4,26 |
| GEOMETRIA_2 | 4,82E-04 | 3,38E-03 | 56,95 | 398,62 | 263,77 | 6,05 | 0,92% | 0,71 | 0,52 | 6,97% | 0,99% | 5,11 | 4,00 |
| GEOMETRIA_3 | 4,81E-04 | 3,37E-03 | 56,76 | 397,32 | 264,25 | 6,04 | 0,80% | 0,71 | 0,51 | 6,43% | 0,91% | 3,30 | 4,00 |
| GEOMETRIA_4 | 4,86E-04 | 3,41E-03 | 57,46 | 402,20 | 261,46 | 6,05 | 0,96% | 0,71 | 0,51 | 6,51% | 0,92% | 4,86 | 4,26 |
| GEOMETRIA_5 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,95 | 398,67 | 263,37 | 6,04 | 0,83% | 0,71 | 0,51 | 5,93% | 0,84% | 6,88 | 3,96 |
| GEOMETRIA_6 | 4,81E-04 | 3,36E-03 | 56,62 | 396,33 | 264,53 | 6,03 | 0,70% | 0,70 | 0,51 | 5,38% | 0,76% | 4,37 | 3,98 |
| GEOMETRIA_7 | 4,90E-04 | 3,43E-03 | 57,87 | 405,10 | 259,25 | 6,04 | 0,87% | 0,70 | 0,51 | 5,50% | 0,78% | 3,31 | 4,26 |
| GEOMETRIA_8 | 5,20E-04 | 3,64E-03 | 61,23 | 428,62 | 244,64 | 6,04 | 0,74% | 0,70 | 0,51 | 4,91% | 0,70% | 5,84 | 3,89 |
| GEOMETRIA_9 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,87 | 398,10 | 262,99 | 6,03 | 0,61% | 0,70 | 0,50 | 4,36% | 0,62% | 4,13 | 4,26 |
| GEOMETRIA_10 | 4,82E-04 | 3,37E-03 | 56,89 | 398,25 | 264,00 | 6,05 | 0,94% | 0,71 | 0,51 | 6,47% | 0,92% | 4,12 | 4,26 |
| GEOMETRIA_11 | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,53 | 395,69 | 265,31 | 6,04 | 0,81% | 0,71 | 0,51 | 5,89% | 0,84% | 4,90 | 4,05 |
| GEOMETRIA_12 | 4,78E-04 | 3,34E-03 | 56,27 | 393,87 | 266,15 | 6,03 | 0,69% | 0,70 | 0,51 | 5,35% | 0,76% | 3,23 | 4,04 |
| GEOMETRIA_13 | 4,82E-04 | 3,37E-03 | 56,82 | 397,74 | 263,97 | 6,04 | 0,85% | 0,70 | 0,51 | 5,42% | 0,77% | 5,29 | 4,26 |
| GEOMETRIA_14 | 4,78E-04 | 3,35E-03 | 56,32 | 394,22 | 265,92 | 6,03 | 0,72% | 0,70 | 0,51 | 4,84% | 0,69% | 6,91 | 4,04 |
| GEOMETRIA_15 | 4,76E-04 | 3,33E-03 | 56,07 | 392,49 | 266,69 | 6,03 | 0,59% | 0,70 | 0,50 | 4,30% | 0,61% | 5,11 | 4,02 |
| GEOMETRIA_16 | 4,85E-04 | 3,40E-03 | 57,22 | 400,57 | 261,75 | 6,04 | 0,76% | 0,70 | 0,50 | 4,41% | 0,63% | 3,80 | 4,26 |
| GEOMETRIA_17 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,56 | 395,92 | 264,41 | 6,03 | 0,63% | 0,70 | 0,50 | 3,83% | 0,54% | 6,40 | 4,26 |
| GEOMETRIA_18 | 4,77E-04 | 3,34E-03 | 56,09 | 392,62 | 266,23 | 6,02 | 0,50% | 0,70 | 0,50 | 3,28% | 0,47% | 5,93 | 3,94 |
| GEOMETRIA_19 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,53 | 395,71 | 264,56 | 6,03 | 0,65% | 0,70 | 0,50 | 3,36% | 0,48% | 4,35 | 4,26 |
| GEOMETRIA_20 | 4,76E-04 | 3,33E-03 | 55,99 | 391,92 | 266,70 | 6,02 | 0,52% | 0,70 | 0,50 | 2,78% | 0,39% | 7,75 | 4,26 |
| GEOMETRIA_21 | 4,73E-04 | 3,31E-03 | 55,60 | 389,22 | 268,14 | 6,01 | 0,40% | 0,70 | 0,49 | 2,23% | 0,32% | 6,38 | 4,02 |
| GEOMETRIA_22 | 4,86E-04 | 3,40E-03 | 57,42 | 401,92 | 261,41 | 6,05 | 0,91% | 0,70 | 0,51 | 5,57% | 0,79% | 5,93 | 4,26 |
| GEOMETRIA_23 | 4,87E-04 | 3,41E-03 | 57,41 | 401,87 | 261,04 | 6,04 | 0,78% | 0,70 | 0,51 | 4,99% | 0,71% | 4,88 | 4,00 |
| GEOMETRIA_24 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 57,00 | 399,01 | 262,52 | 6,03 | 0,66% | 0,70 | 0,50 | 4,44% | 0,63% | 2,98 | 4,01 |
| GEOMETRIA_25 | 4,89E-04 | 3,42E-03 | 57,63 | 403,44 | 260,06 | 6,04 | 0,82% | 0,70 | 0,50 | 4,52% | 0,64% | 4,54 | 4,26 |
| GEOMETRIA_26 | 4,85E-04 | 3,40E-03 | 57,19 | 400,34 | 261,67 | 6,03 | 0,69% | 0,70 | 0,50 | 3,94% | 0,56% | 6,00 | 3,97 |
| GEOMETRIA_27 | 4,82E-04 | 3,38E-03 | 56,77 | 397,36 | 263,24 | 6,02 | 0,57% | 0,70 | 0,50 | 3,40% | 0,48% | 4,47 | 3,98 |
| GEOMETRIA_28 | 4,92E-04 | 3,44E-03 | 57,98 | 405,89 | 258,16 | 6,04 | 0,74% | 0,70 | 0,50 | 3,52% | 0,50% | 3,39 | 4,26 |
| GEOMETRIA_29 | 4,88E-04 | 3,41E-03 | 57,38 | 401,69 | 260,45 | 6,03 | 0,61% | 0,70 | 0,50 | 2,93% | 0,42% | 0,89 | 4,26 |

Tabela 20 - Resultados da 4ª rodada com propulsor

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X(m) |
|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|----------------|--------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | popa | total | | |
| GEOMETRIA_30 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,80 | 397,60 | 262,73 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 2,38% | 0,34% | 4,65 | 3,86 |
| GEOMETRIA_31 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,97 | 398,79 | 263,03 | 6,04 | 0,70 | 0,50 | 4,48% | 0,64% | 6,70 | 4,26 |
| GEOMETRIA_32 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,54 | 395,77 | 264,63 | 6,03 | 0,70 | 0,50 | 3,90% | 0,55% | 5,17 | 4,06 |
| GEOMETRIA_33 | 4,77E-04 | 3,34E-03 | 56,07 | 392,48 | 266,46 | 6,02 | 0,70 | 0,50 | 3,36% | 0,48% | 3,58 | 4,03 |
| GEOMETRIA_34 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 56,98 | 398,86 | 262,61 | 6,03 | 0,70 | 0,50 | 3,44% | 0,49% | 4,48 | 4,26 |
| GEOMETRIA_35 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,45 | 395,12 | 264,69 | 6,03 | 0,70 | 0,50 | 2,86% | 0,41% | 6,76 | 4,00 |
| GEOMETRIA_36 | 4,78E-04 | 3,35E-03 | 56,19 | 393,32 | 265,50 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 2,31% | 0,33% | 4,96 | 4,00 |
| GEOMETRIA_37 | 4,86E-04 | 3,40E-03 | 57,20 | 400,40 | 261,25 | 6,03 | 0,70 | 0,49 | 2,43% | 0,34% | 3,66 | 4,26 |
| GEOMETRIA_38 | 4,81E-04 | 3,37E-03 | 56,61 | 396,26 | 263,57 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 1,84% | 0,26% | 4,95 | 4,26 |
| GEOMETRIA_39 | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,23 | 393,61 | 264,94 | 6,01 | 0,70 | 0,49 | 1,30% | 0,18% | 5,88 | 4,02 |
| GEOMETRIA_40 | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,39 | 394,73 | 265,32 | 6,03 | 0,70 | 0,50 | 3,42% | 0,49% | 6,62 | 4,08 |
| GEOMETRIA_41 | 4,76E-04 | 3,33E-03 | 55,97 | 391,80 | 266,91 | 6,02 | 0,70 | 0,50 | 2,85% | 0,40% | 4,97 | 4,04 |
| GEOMETRIA_42 | 4,74E-04 | 3,32E-03 | 55,68 | 389,79 | 267,89 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 2,31% | 0,33% | 3,19 | 4,04 |
| GEOMETRIA_43 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,48 | 395,37 | 264,51 | 6,03 | 0,70 | 0,49 | 2,38% | 0,34% | 4,84 | 4,26 |
| GEOMETRIA_44 | 4,76E-04 | 3,33E-03 | 56,00 | 392,01 | 266,37 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 1,80% | 0,26% | 6,95 | 4,05 |
| GEOMETRIA_45 | 4,74E-04 | 3,31E-03 | 55,60 | 389,17 | 267,91 | 6,01 | 0,70 | 0,49 | 1,26% | 0,18% | 4,94 | 4,04 |
| GEOMETRIA_46 | 4,81E-04 | 3,36E-03 | 56,52 | 395,62 | 263,98 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 1,37% | 0,19% | 4,30 | 4,26 |
| GEOMETRIA_47 | 4,76E-04 | 3,33E-03 | 55,93 | 391,52 | 266,33 | 6,01 | 0,70 | 0,49 | 0,79% | 0,11% | 6,29 | 4,26 |
| GEOMETRIA_48 | 4,73E-04 | 3,31E-03 | 55,49 | 388,42 | 268,05 | 6,01 | 0,70 | 0,48 | 0,24% | 0,03% | 6,60 | 4,02 |
| GEOMETRIA_49 | 4,89E-04 | 3,42E-03 | 57,67 | 403,69 | 259,69 | 6,04 | 0,70 | 0,50 | 3,62% | 0,51% | 6,07 | 4,26 |
| GEOMETRIA_50 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 56,99 | 398,92 | 262,40 | 6,03 | 0,70 | 0,50 | 3,04% | 0,43% | 3,33 | 4,04 |
| GEOMETRIA_51 | 4,85E-04 | 3,39E-03 | 56,99 | 398,93 | 262,01 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 2,50% | 0,35% | 3,47 | 4,03 |
| GEOMETRIA_52 | 4,91E-04 | 3,44E-03 | 57,88 | 405,17 | 258,40 | 6,03 | 0,70 | 0,49 | 2,58% | 0,37% | 4,73 | 4,26 |
| GEOMETRIA_53 | 4,86E-04 | 3,41E-03 | 57,24 | 400,66 | 260,90 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 2,00% | 0,28% | 6,09 | 3,97 |
| GEOMETRIA_54 | 4,85E-04 | 3,39E-03 | 56,99 | 398,90 | 261,66 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 1,45% | 0,21% | 4,26 | 3,99 |
| GEOMETRIA_55 | 4,95E-04 | 3,46E-03 | 58,25 | 407,77 | 256,41 | 6,03 | 0,70 | 0,49 | 1,57% | 0,22% | 3,62 | 4,26 |
| GEOMETRIA_56 | 4,90E-04 | 3,43E-03 | 57,59 | 403,13 | 258,96 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 0,99% | 0,14% | 4,70 | 3,89 |
| GEOMETRIA_57 | 4,87E-04 | 3,41E-03 | 57,16 | 400,15 | 260,49 | 6,01 | 0,70 | 0,48 | 0,44% | 0,06% | 4,14 | 3,93 |
| GEOMETRIA_58 | 4,83E-04 | 3,38E-03 | 56,86 | 398,02 | 262,95 | 6,03 | 0,70 | 0,49 | 2,53% | 0,36% | 6,49 | 4,26 |
| GEOMETRIA_59 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,42 | 394,95 | 264,59 | 6,02 | 0,70 | 0,49 | 1,95% | 0,28% | 5,56 | 4,04 |

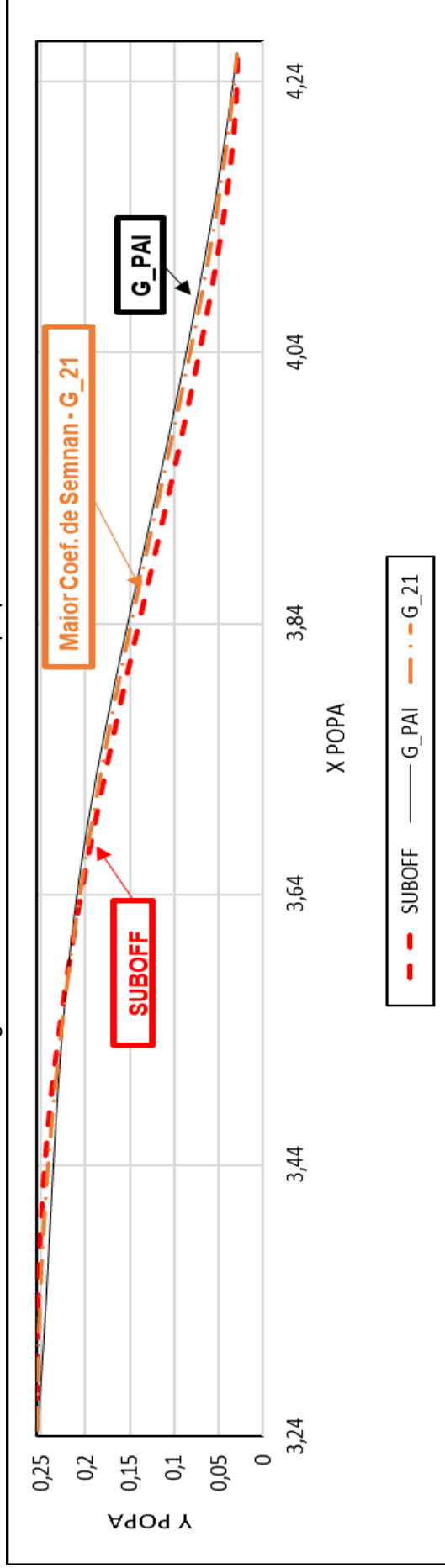
Tabela 20 - Resultados da 4ª rodada com propulsor

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-------|----------------|---------------|
| | Sector | Total | Sector | Total | | | | | | popa | total | | |
| GEOMETRIA_60 | 4,79E-04 | 3,35E-03 | 56,29 | 394,01 | 264,83 | 6,02 | 0,41% | 0,70 | 0,49 | 1,41% | 0,20% | 3,55 | 4,00 |
| GEOMETRIA_61 | 4,84E-04 | 3,39E-03 | 56,94 | 398,58 | 262,21 | 6,03 | 0,57% | 0,70 | 0,49 | 1,49% | 0,21% | 4,99 | 4,26 |
| GEOMETRIA_62 | 4,80E-04 | 3,36E-03 | 56,44 | 395,08 | 264,12 | 6,02 | 0,44% | 0,70 | 0,49 | 0,91% | 0,13% | 6,96 | 4,03 |
| GEOMETRIA_63 | 4,77E-04 | 3,34E-03 | 55,99 | 391,95 | 265,83 | 6,01 | 0,32% | 0,70 | 0,48 | 0,36% | 0,05% | 4,95 | 4,00 |
| GEOMETRIA_64 | 4,87E-04 | 3,41E-03 | 57,30 | 401,09 | 260,22 | 6,02 | 0,48% | 0,70 | 0,48 | 0,48% | 0,07% | 3,50 | 4,26 |

(conclusão)

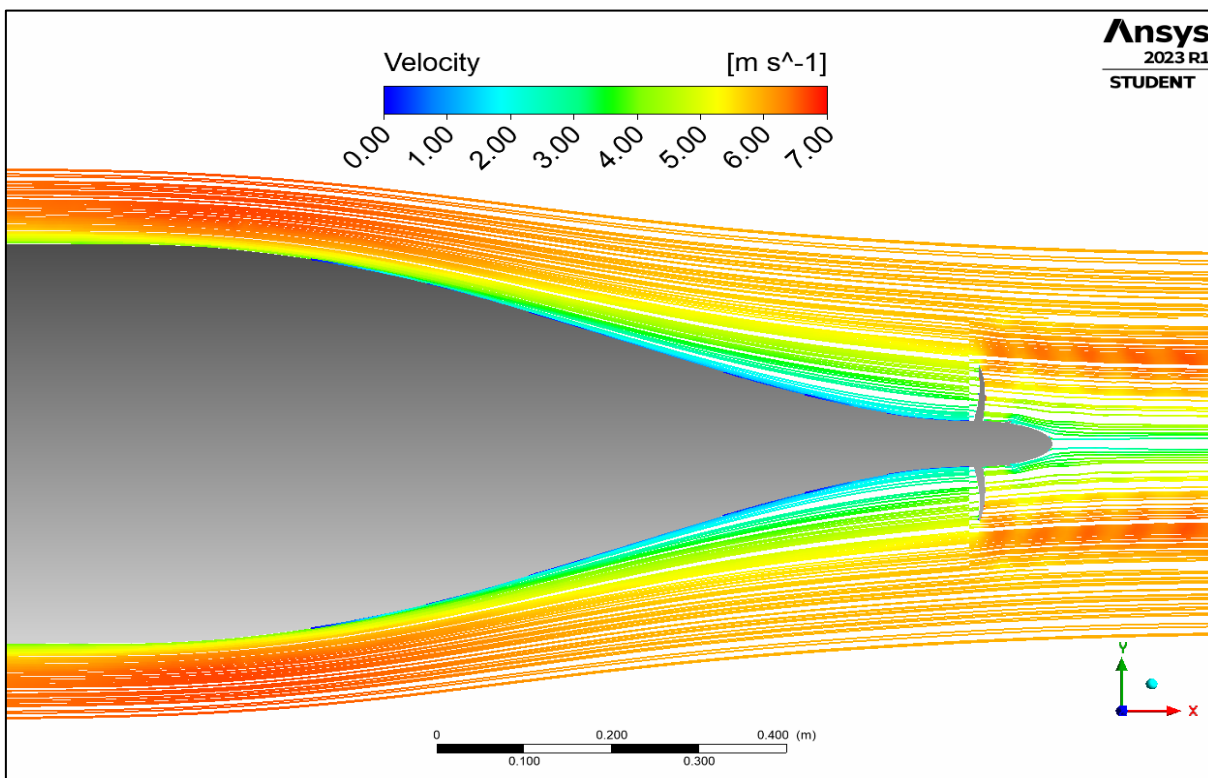
Fonte: Autor

Figura 63 - Resultados da 4ª rodada com propulsor



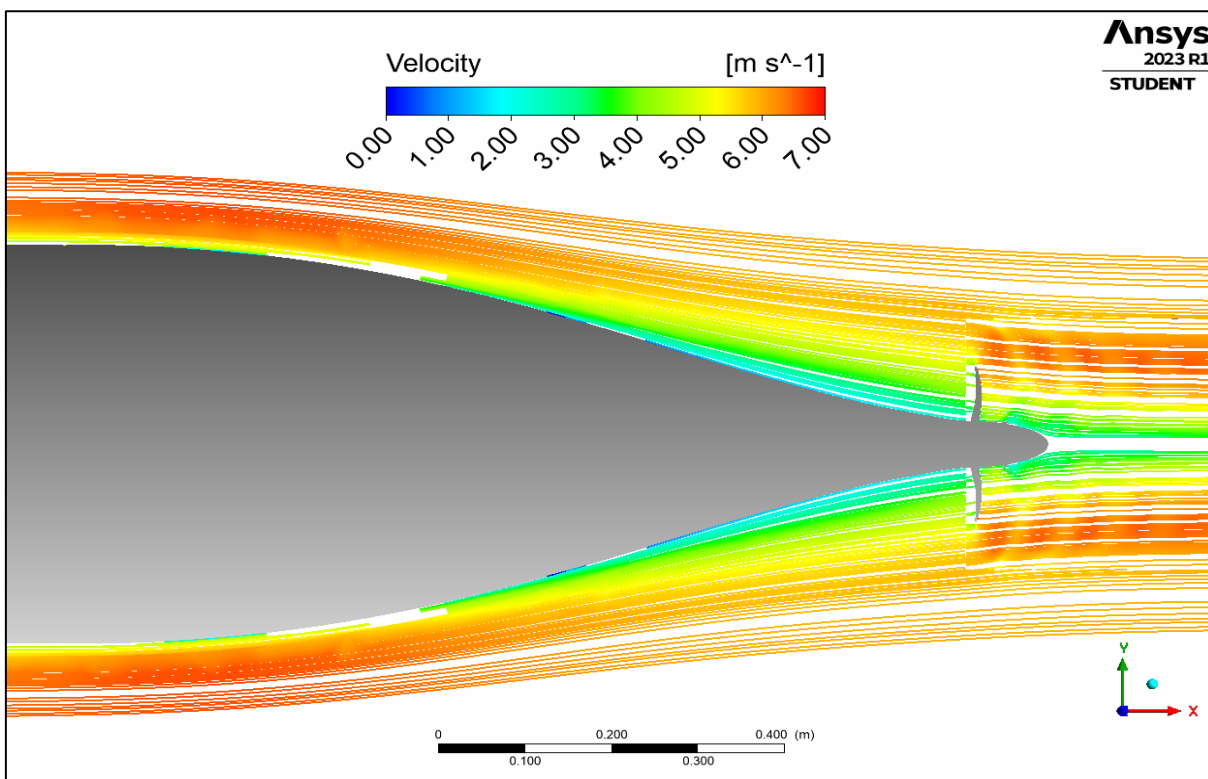
Fonte: Autor

Figura 64 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF



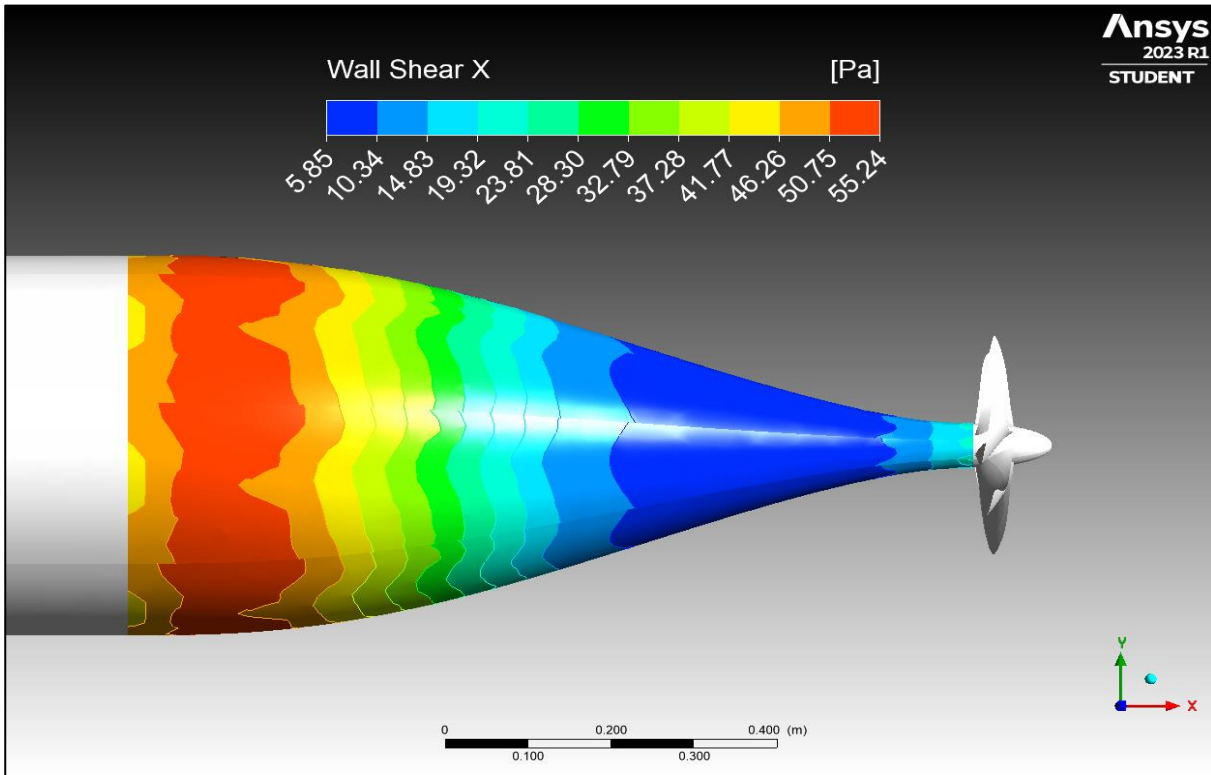
Fonte: Autor

Figura 65 - Linhas de corrente - Geometria selecionada da 2ª fase



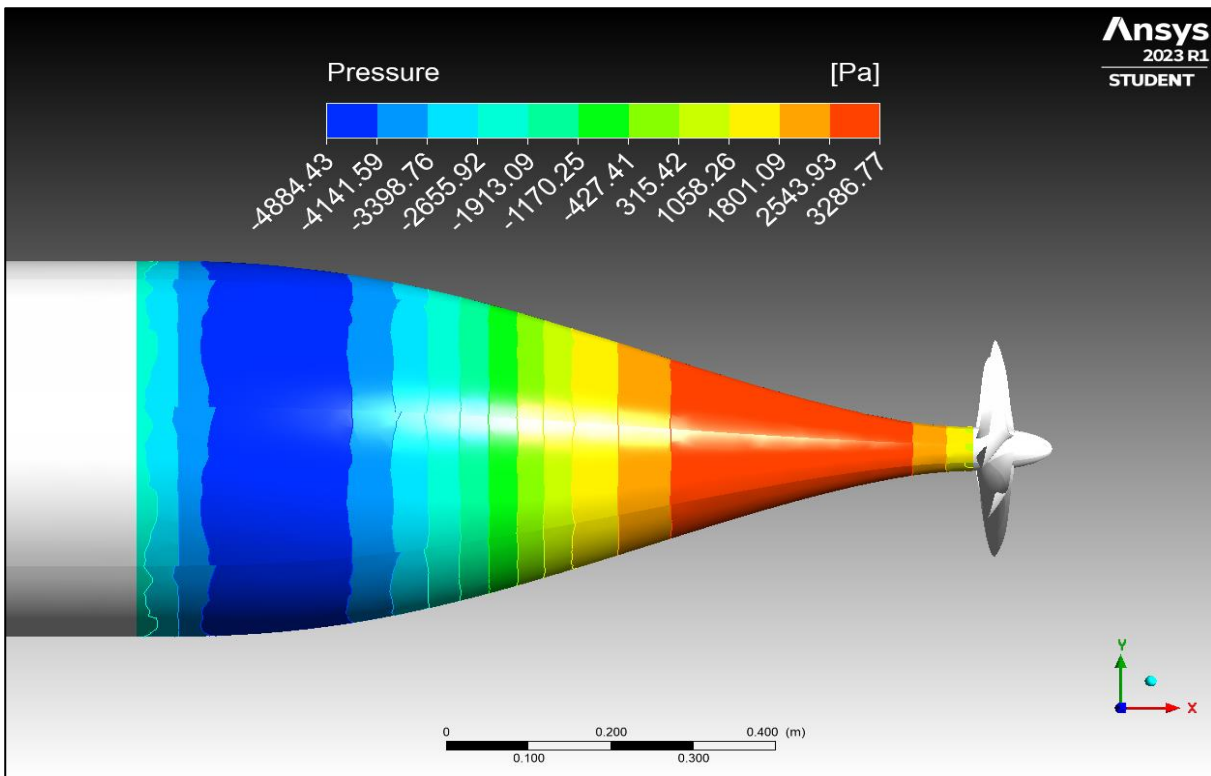
Fonte: Autor

Figura 66 - Tensões de cisalhamento - SUBOFF



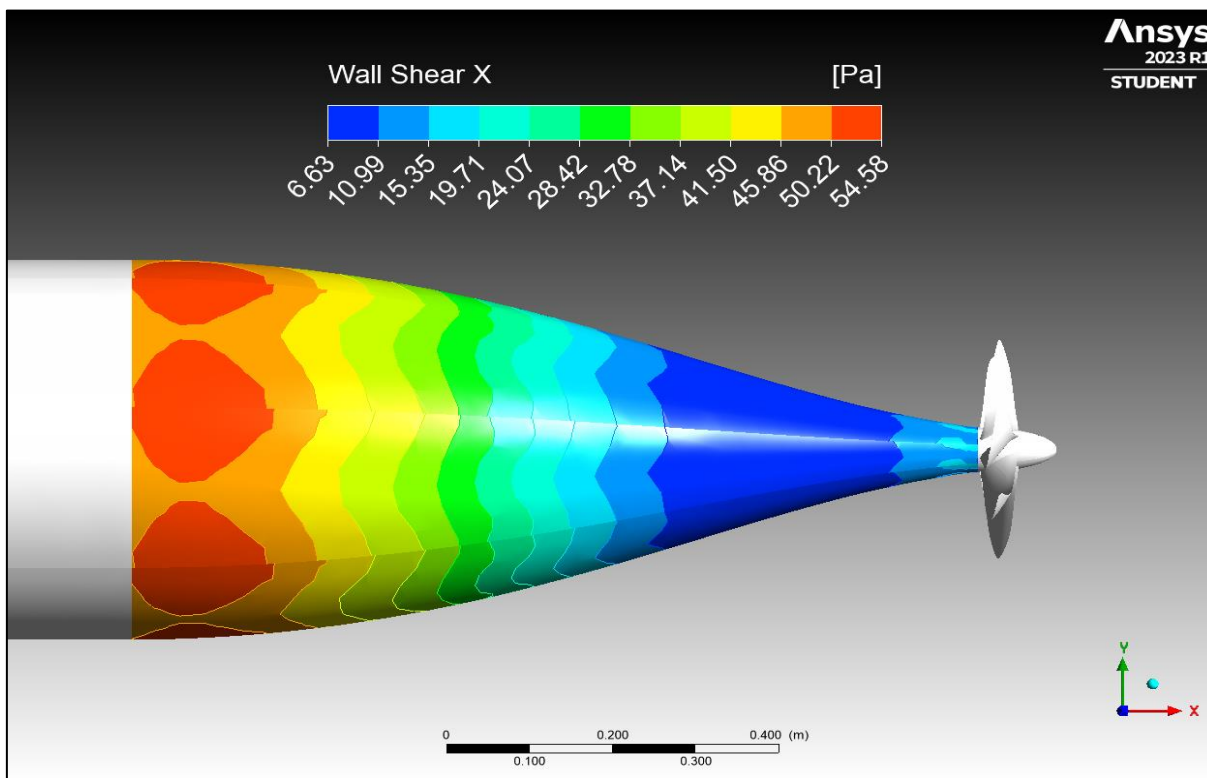
Fonte: Autor

Figura 67 - Campo de pressão – SUBOFF



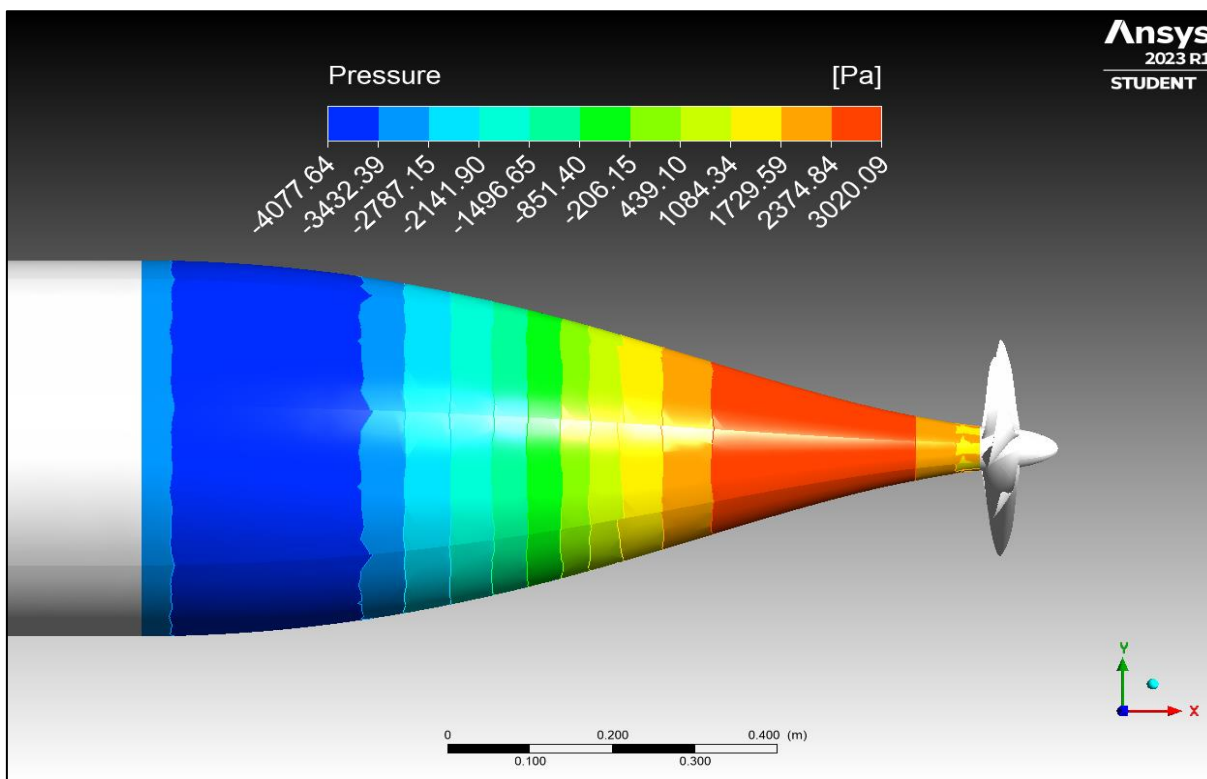
Fonte: Autor

Figura 68 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 2ª fase



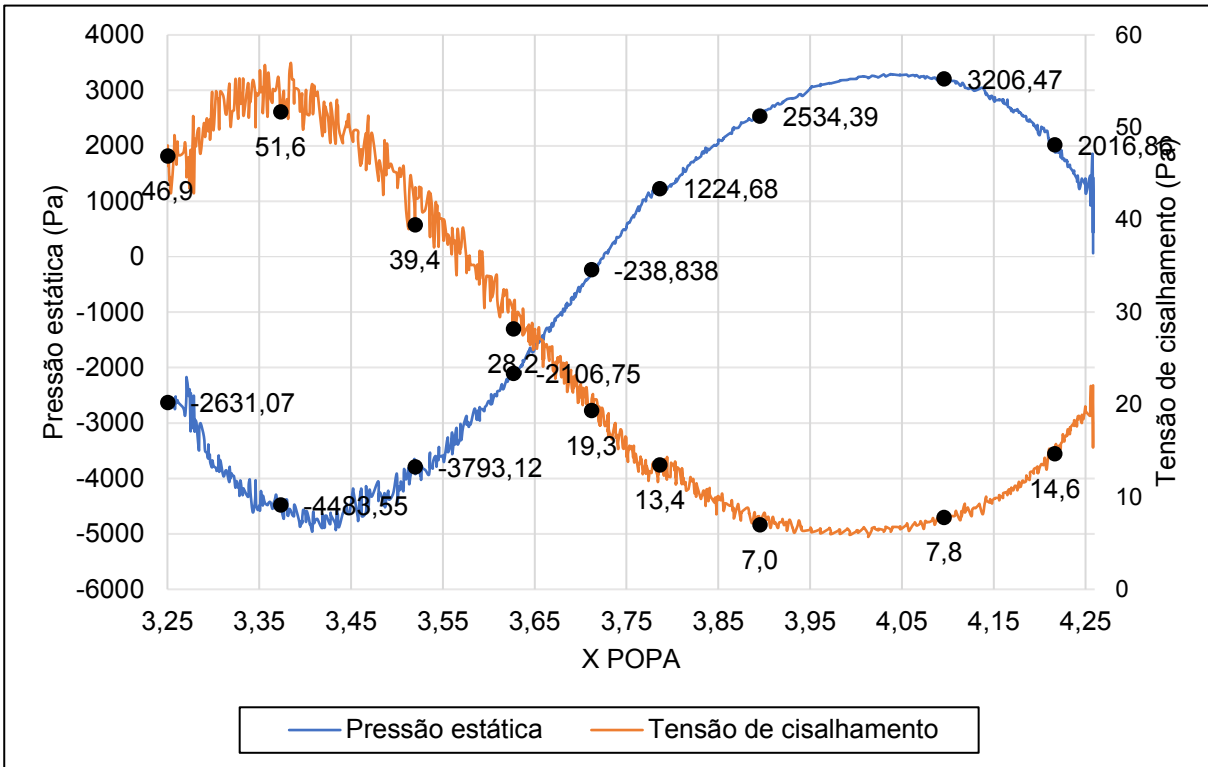
Fonte: Autor

Figura 69 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 2ª fase



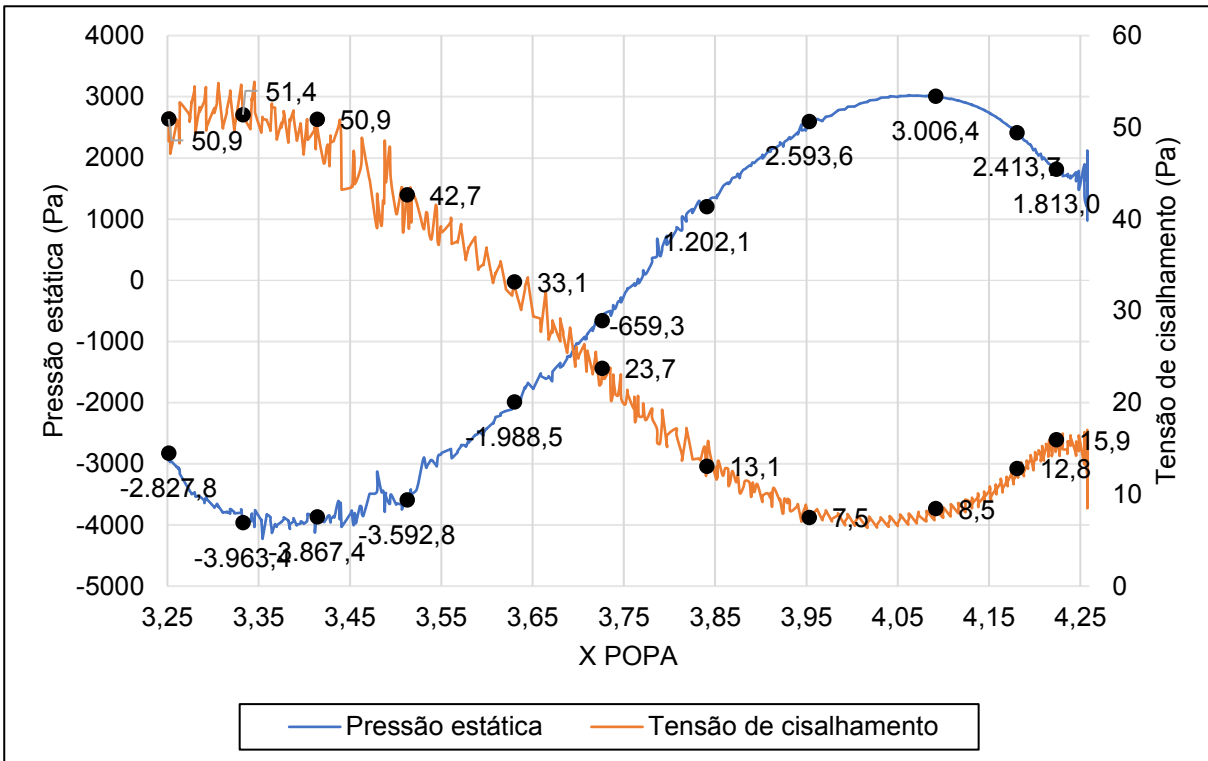
Fonte: Autor

Figura 70 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF - MOD5a



Fonte: Autor

Figura 71 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 2ª fase



Fonte: Autor

6.4 TERCEIRA FASE – SIMULAÇÕES COM PROPULSOR E DUTO

O objetivo da 3ª fase é apresentar a geometria de popa com a melhor eficiência hidro-volume com uso do conjunto MOD10 sem o estator e para velocidade de 6,17 m/s. O propulsor foi projetado para um AUV que usa o casco baseado no modelo SUBOFF (SBRAGIO, MOURA e SILVA, 2020). As características do AUV estão listadas na tabela abaixo. O valor do coeficiente de Semnan do modelo SUBOFF é 268,96.

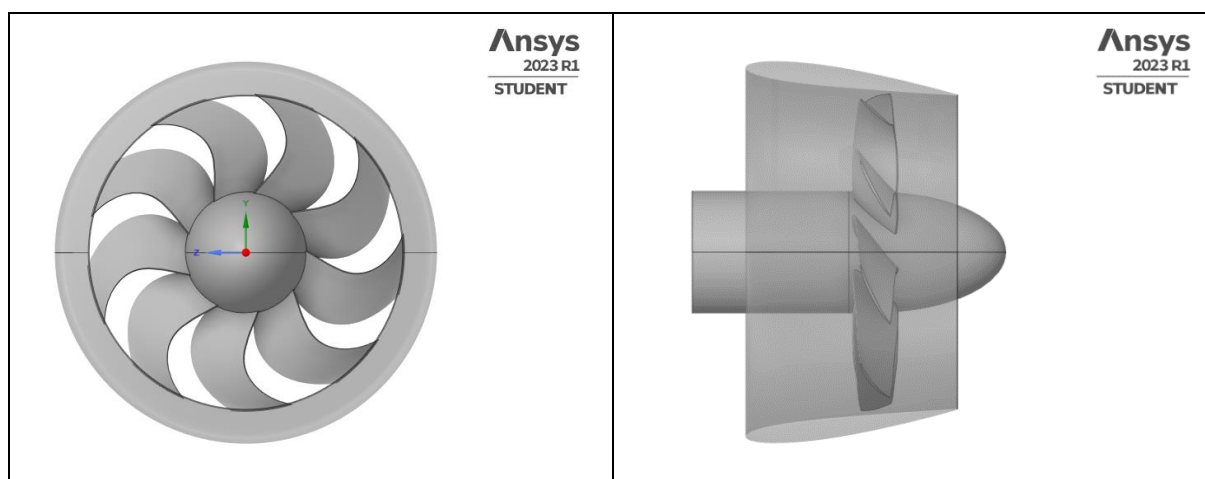
Tabela 21 - Características da popa do AUV baseado no modelo SUBOFF

| Característica | AUV baseado no SUBOFF Valor | SUBOFF Valor | Razão |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------|---------|
| Comprimento da popa | 0,660 (m) | 1,016 (m) | 1:1,539 |
| Diâmetro máximo | 0,320 (m) | 0,508 (m) | 1:1,588 |
| Diâmetro do bosso | 0,058 (m) | 0,058 (m) | 1:1,000 |
| Volume da popa | 0,022 (m³) | 0,099 (m³) | 1:4,515 |
| Volume total do casco | 0,177 (m³) | 0,699 (m³) | 1:3,949 |

Fonte: Autor

O conjunto MOD10 não chegou a ser fabricado para testes em tanque de provas até a data de publicação desse estudo. O diâmetro do rotor possui 0,19 m. A Figura 72 ilustra o MOD10 sem o estator que é usado nessa fase.

Figura 72 - Conjunto Propulsor/Duto MOD10



Fonte: Autor

6.4.1 Resultados da 1ª rodada de simulações com propulsor e duto

Foram selecionadas 5 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 24). A geometria 2 foi a selecionada para a 2ª rodada (Figura 75) com um coeficiente de Semnan de 268,25.

6.4.2 Resultados da 2ª rodada de simulações com propulsor e duto

Foram selecionadas 7 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 25). Não houve geometria com melhor eficiência hidro-volume que a geometria “pai”. Portanto, a geometria 2 da 1ª rodada é selecionada para a 3ª rodada.

6.4.3 Resultados da 3ª rodada de simulações com propulsor e duto

Foram selecionadas 15 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 26). A geometria 2 foi a selecionada para a 4ª rodada (Figura 76) com um coeficiente de Semnan de 269,50.

6.4.4 Resultados da 4ª rodada de simulações com propulsor e duto

Foram selecionadas 26 geometrias através do código criado no MATLAB (Tabela 27). A geometria 22 foi a selecionada da 3ª fase (Figura 77) com um coeficiente de Semnan de 270,53.

A geometria do modelo SUBOFF apresenta um aumento significativo da pressão estática acompanhado de uma também forte redução da tensão de cisalhamento na superfície da popa, diminuindo a velocidade do fluxo de forma considerável entre $x = 3,30$ m e $x = 4,00$ m (Figura 84). Para $x > 4,00$ m até a seção do propulsor, ocorre uma forte aceleração do escoamento próximo ao casco do submarino devido à influência do propulsor e do duto (Figura 78 e Figura 79), aumentando a tensão de cisalhamento e reduzindo a pressão estática (Figura 80 e Figura 81).

A geometria selecionada da 3ª fase apresenta uma suave redução da tensão de cisalhamento na superfície da popa, trazendo uma leve diminuição da velocidade do fluxo até $x = 3,75$ (Figura 85). Para $3,75 < x < 4,05$ m o afunilamento da popa provoca um grande aumento da pressão estática, reduzindo a velocidade do escoamento de forma mais rápida. Logo em seguida, para $x > 4,05$ m até a seção do propulsor, ocorre uma forte aceleração do escoamento devido à influência do propulsor e do duto (Figura 79), com aumentando rapidamente a tensão de cisalhamento e reduzindo a pressão estática (Figura 82 e Figura 83).

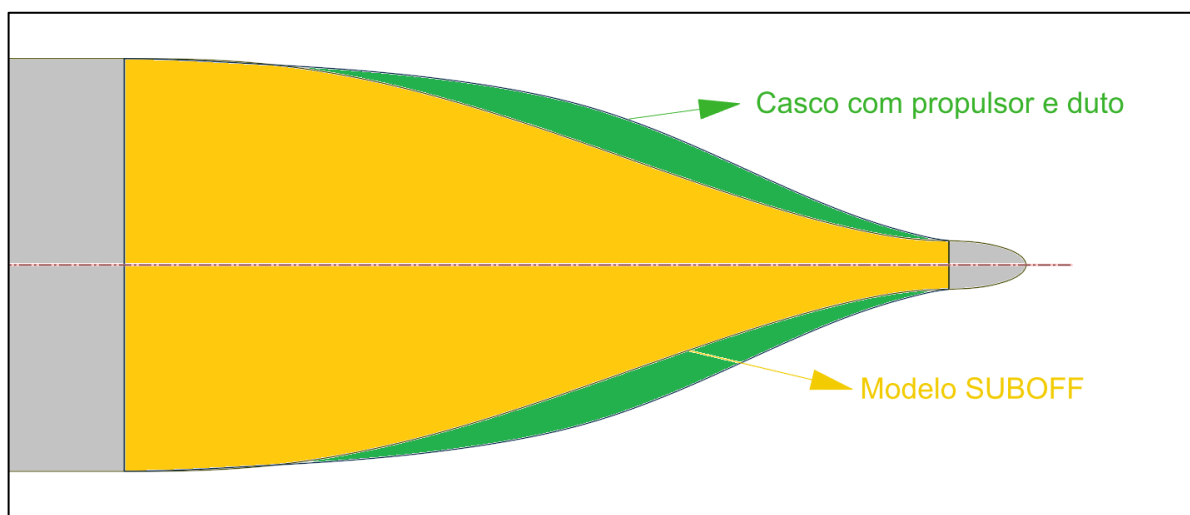
A geometria selecionada apresentou valores de resistência friccional e de forma maiores que o modelo SUBOFF (Tabela 22). A resistência total da geometria selecionada é 2,66% maior. O volume de popa é 20,19% maior e o coeficiente de Semnan ficou 0,58% maior que os respectivos valores do modelo SUBOFF (Tabela 23). A Figura 73 apresenta a diferença de volume entre as geometrias. É possível

notar um perfil de popa mais cheio da geometria selecionada que a do modelo SUBOFF.

Na Figura 74 é apresentado o comportamento do fluxo na região entre a popa e o duto até a seção do propulsor. No caso do modelo SUBOFF, o duto é convergente, ou seja, sempre afunila o escoamento com aumento da velocidade do fluxo e redução da pressão até a seção do propulsor.

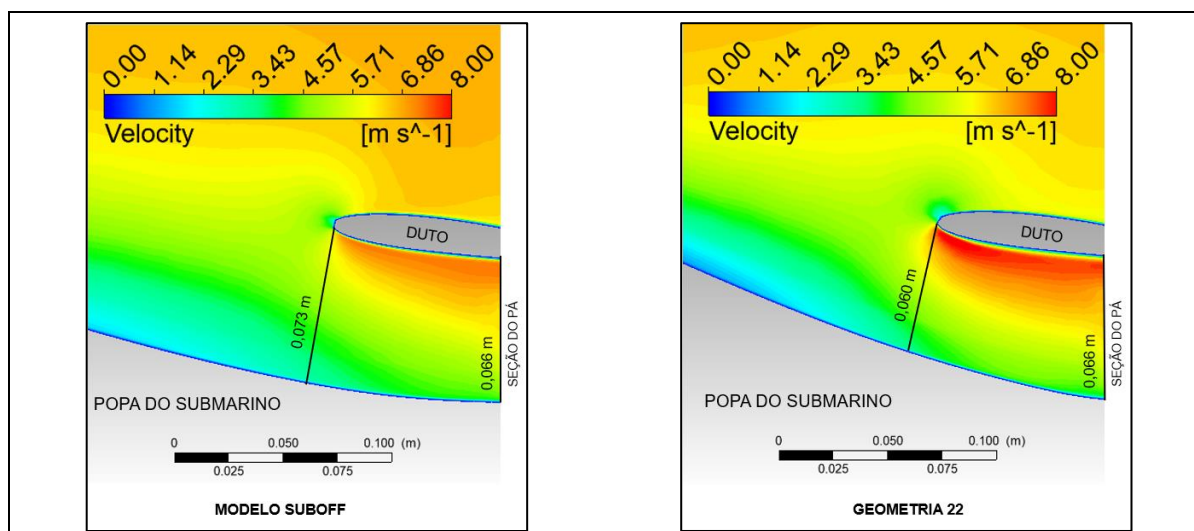
Na geometria 22, o duto é divergente devido à seção de entrada ser menor que a seção do propulsor. Durante o percurso, o fluxo sofre um afunilamento e depois em seguida sofre expansão antes da chegada no propulsor. Essa condição traz um aumento da pressão e redução da velocidade dentro da região analisada.

Figura 73 - SUBOFF x Geometria selecionada da 3ª fase



Fonte: Autor

Figura 74 - Condições do fluxo entre popa e duto



Fonte: Autor

Tabela 22 - Resistência friccional x Resistência de forma – 3ª fase

| Geometria | Resistência Friccional (N) | Variação | Resistência de Forma (N) | Variação | Resistência Total (N) | Variação |
|--------------|----------------------------|----------|--------------------------|----------|-----------------------|----------|
| SUBOFF | 301,65 | - | 84,43 | - | 386,08 | - |
| geometria_22 | 307,29 | 1,87% | 89,05 | 5,47% | 396,34 | 2,66% |

Fonte: Autor

Tabela 23 - Principais resultados do casco selecionado com propulsor e duto

| Modelo | Resistência (N) | Δ Resistência | SEMNaN Coef (Ksn) | Δ SEMNaN Coef (Ksn) | Δ Vol POPA |
|--------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| SUBOFF | 386,10 | - | 268,96 | - | - |
| geometria_22 | 396,34 | 2,65% | 270,53 | 0,58% | 20,19% |

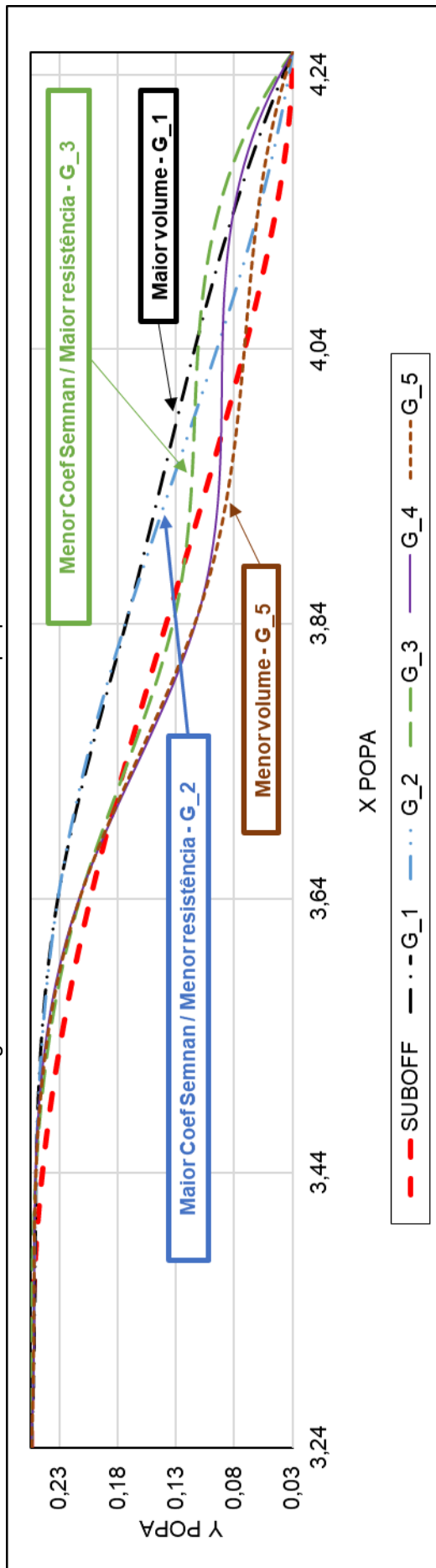
Fonte: Autor

Tabela 24 - Resultados da 1ª rodada com propulsor e duto

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área (m²) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|--------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | popa | total | | |
| SUBOFF | 3,67E-04 | 3,30E-03 | 42,90 | 386,10 | 268,96 | 5,99 | - | 0,70 | 0,4823 | - | - | 3,60 | 3,99 |
| GEOMETRIA_1 | 3,95E-04 | 3,55E-03 | 47,35 | 426,18 | 252,39 | 6,14 | 2,55% | 0,72 | 0,586 | 21,44% | 3,05% | -3,28 | 4,26 |
| GEOMETRIA_2 | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,28 | 398,48 | 268,25 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 0,572 | 18,70% | 2,66% | 5,51 | 4,02 |
| GEOMETRIA_3 | 6,27E-04 | 5,64E-03 | 74,46 | 670,12 | 157,91 | 6,08 | 1,48% | 0,71 | 0,524 | 8,71% | 1,24% | -14,20 | 4,26 |
| GEOMETRIA_4 | 4,38E-04 | 3,94E-03 | 51,59 | 464,31 | 225,37 | 6,03 | 0,65% | 0,70 | 0,495 | 2,55% | 0,36% | -9,53 | 4,26 |
| GEOMETRIA_5 | 4,14E-04 | 3,73E-03 | 48,48 | 436,29 | 238,23 | 6,00 | 0,08% | 0,70 | 0,484 | 0,28% | 0,04% | -10,59 | 3,76 |

Fonte: Autor

Figura 75 - Resultados da 1ª rodada com propulsor e duto



Fonte: Autor

Tabela 25 - Resultados da 2ª rodada com propulsor e duto

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|---------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 3,67E-04 | 3,30E-03 | 42,90 | 386,10 | - | 268,96 | 5,99 | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,60 | 3,99 |
| GEOMETRIA_PAI | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,28 | 398,48 | 3,21% | 268,25 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 18,70% | 2,66% | 5,51 | 4,02 |
| GEOMETRIA_1 | 3,81E-04 | 3,43E-03 | 45,65 | 410,81 | 6,40% | 261,73 | 6,14 | 2,50% | 0,72 | 21,55% | 3,06% | 2,62 | 4,01 |
| GEOMETRIA_2 | 3,72E-04 | 3,35E-03 | 44,47 | 400,19 | 3,65% | 267,43 | 6,12 | 2,12% | 0,72 | 19,53% | 2,77% | 0,78 | 4,01 |
| GEOMETRIA_3 | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 44,24 | 398,20 | 3,13% | 268,15 | 6,12 | 2,07% | 0,71 | 15,64% | 2,22% | 3,99 | 4,02 |
| GEOMETRIA_4 | 3,79E-04 | 3,41E-03 | 45,09 | 405,81 | 5,10% | 261,84 | 6,10 | 1,75% | 0,71 | 12,02% | 1,71% | 2,17 | 4,01 |
| GEOMETRIA_5 | 3,69E-04 | 3,33E-03 | 43,82 | 394,38 | 2,14% | 268,18 | 6,07 | 1,37% | 0,71 | 10,00% | 1,42% | 0,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_6 | 3,83E-04 | 3,45E-03 | 45,46 | 409,14 | 5,97% | 258,61 | 6,08 | 1,47% | 0,71 | 8,68% | 1,23% | 3,86 | 4,03 |
| GEOMETRIA_7 | 3,69E-04 | 3,32E-03 | 43,62 | 392,58 | 1,68% | 268,21 | 6,06 | 1,08% | 0,71 | 6,64% | 0,94% | 5,74 | 4,02 |

Fonte: Autor

Tabela 26 - Resultados da 3ª rodada com propulsor e duto

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmín popa (Pa) | Tmín em X (m) |
|---------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 3,67E-04 | 3,30E-03 | 42,90 | 386,10 | - | 268,96 | 5,99 | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,60 | 3,99 |
| GEOMETRIA_PAI | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,28 | 398,48 | 3,21% | 268,25 | 6,11 | 2,04% | 0,72 | 18,70% | 2,66% | 5,56 | 3,83 |
| GEOMETRIA_1 | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,53 | 400,74 | 3,79% | 268,69 | 6,14 | 2,57% | 0,72 | 23,24% | 3,30% | 5,38 | 4,02 |
| GEOMETRIA_2 | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 44,26 | 398,37 | 3,18% | 269,50 | 6,13 | 2,33% | 0,72 | 21,94% | 3,12% | 1,73 | 4,01 |
| GEOMETRIA_3 | 3,73E-04 | 3,35E-03 | 44,63 | 401,63 | 4,02% | 267,28 | 6,13 | 2,37% | 0,72 | 20,84% | 2,96% | 5,28 | 4,26 |
| GEOMETRIA_4 | 3,73E-04 | 3,36E-03 | 44,56 | 401,02 | 3,86% | 266,88 | 6,12 | 2,12% | 0,72 | 19,53% | 2,77% | 4,98 | 4,02 |
| GEOMETRIA_5 | 3,77E-04 | 3,39E-03 | 44,92 | 404,24 | 4,70% | 263,99 | 6,10 | 1,88% | 0,72 | 18,37% | 2,61% | 1,75 | 4,01 |
| GEOMETRIA_6 | 3,75E-04 | 3,37E-03 | 44,57 | 401,11 | 3,89% | 265,26 | 6,09 | 1,69% | 0,72 | 16,08% | 2,28% | 3,26 | 3,98 |
| GEOMETRIA_7 | 3,77E-04 | 3,39E-03 | 45,09 | 405,83 | 5,11% | 264,14 | 6,13 | 2,30% | 0,72 | 19,19% | 2,73% | 5,55 | 4,02 |
| GEOMETRIA_8 | 3,78E-04 | 3,40E-03 | 45,16 | 406,44 | 5,27% | 262,96 | 6,11 | 2,06% | 0,72 | 17,89% | 2,54% | 2,32 | 4,01 |
| GEOMETRIA_9 | 3,76E-04 | 3,38E-03 | 44,87 | 403,84 | 4,59% | 264,55 | 6,12 | 2,07% | 0,72 | 16,82% | 2,39% | 4,41 | 4,26 |
| GEOMETRIA_10 | 3,75E-04 | 3,38E-03 | 44,71 | 402,39 | 4,22% | 264,72 | 6,10 | 1,83% | 0,71 | 15,52% | 2,20% | 1,40 | 4,02 |
| GEOMETRIA_11 | 3,76E-04 | 3,38E-03 | 44,81 | 403,31 | 4,46% | 264,06 | 6,10 | 1,86% | 0,71 | 14,42% | 2,05% | 0,78 | 4,26 |
| GEOMETRIA_12 | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,14 | 397,27 | 2,89% | 267,26 | 6,09 | 1,62% | 0,71 | 13,12% | 1,86% | 4,88 | 4,04 |

(continua)

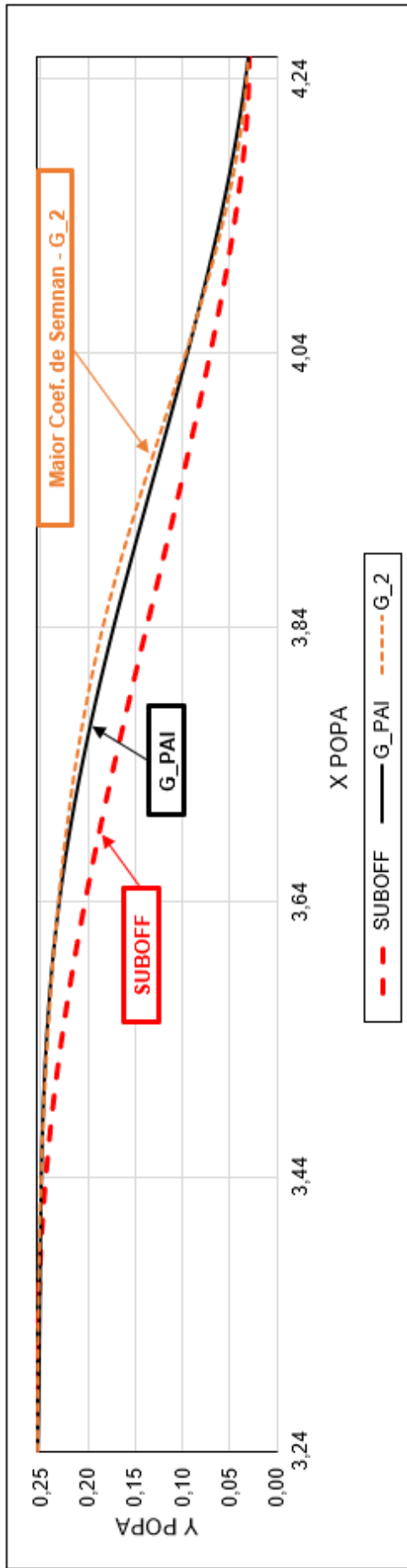
Tabela 26 - Resultados da 3ª rodada com propulsor e duto

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área (%) | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. | | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|--------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------|---------------|
| | Setor | Total | Setor | Total | | | | | | popa | total | | |
| GEOMETRIA_13 | 3,78E-04 | 3,40E-03 | 44,94 | 404,42 | 262,58 | 6,09 | 1,68% | 0,71 | 0,54 | 12,16% | 1,73% | 3,11 | 4,26 |
| GEOMETRIA_14 | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 43,88 | 394,95 | 268,03 | 6,08 | 1,42% | 0,71 | 0,53 | 10,84% | 1,54% | 1,68 | 4,26 |
| GEOMETRIA_15 | 3,72E-04 | 3,35E-03 | 44,06 | 396,57 | 266,14 | 6,06 | 1,17% | 0,71 | 0,53 | 9,67% | 1,37% | 4,00 | 4,02 |

(conclusão)

Fonte: Autor

Figura 76 - Resultados da 3ª rodada com propulsor e duto



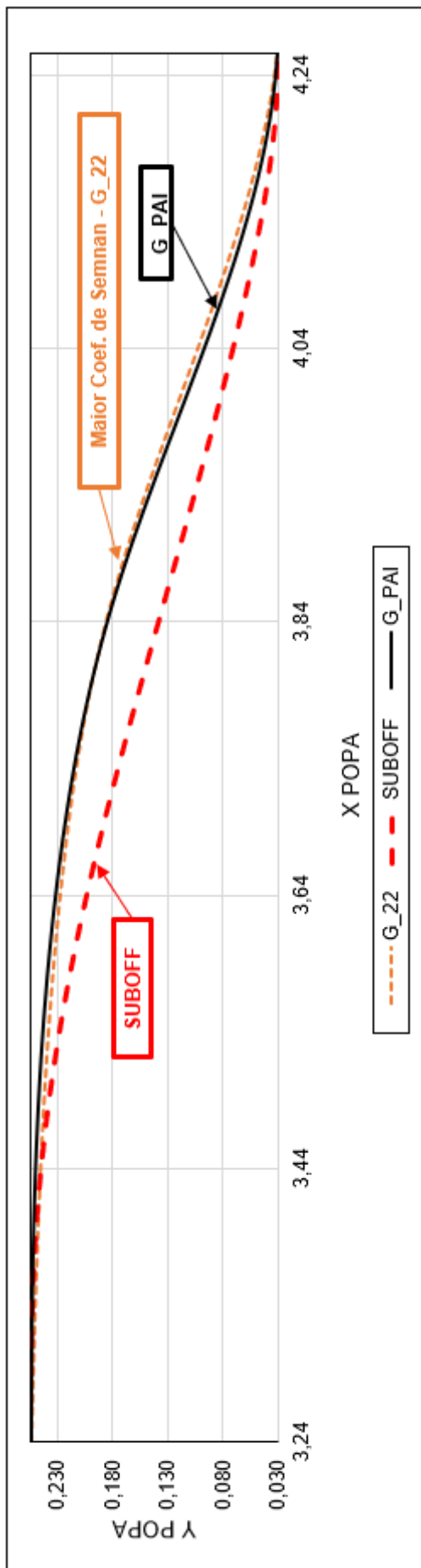
Fonte: Autor

Tabela 27 - Resultados da 4ª rodada com propulsor e duto

| Modelo | Coef. De Resistência | | Resistência (N) | | Semnan Coef (Ksn) | Área (m²) | Δ Área | Vol. (m³) | Coef. Cil | Δ Vol. popa | Δ Vol. total | Tmin popa (Pa) | Tmin em X (m) |
|---------------|----------------------|----------|-----------------|--------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| | Sector | Total | Sector | Total | | | | | | | | | |
| SUBOFF | 3,67E-04 | 3,30E-03 | 42,90 | 386,10 | 268,96 | 5,99 | - | 0,70 | 0,48 | - | - | 3,60 | 3,99 |
| GEOMETRIA_PAI | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 44,26 | 398,37 | 269,50 | 6,13 | 2,33% | 0,72 | 0,59 | 21,94% | 3,12% | 1,73 | 4,01 |
| GEOMETRIA_1 | 3,78E-04 | 3,40E-03 | 45,44 | 408,96 | 264,09 | 6,1562 | 2,76% | 0,72 | 0,61 | 25,94% | 3,68% | 2,62 | 4,01 |
| GEOMETRIA_2 | 3,77E-04 | 3,40E-03 | 45,31 | 407,79 | 264,47 | 6,1492 | 2,64% | 0,72 | 0,60 | 25,30% | 3,59% | 0,78 | 4,01 |
| GEOMETRIA_3 | 3,76E-04 | 3,38E-03 | 45,16 | 406,42 | 265,32 | 6,1498 | 2,65% | 0,72 | 0,60 | 24,68% | 3,51% | 3,99 | 4,02 |
| GEOMETRIA_4 | 3,76E-04 | 3,38E-03 | 45,11 | 406,01 | 265,20 | 6,1427 | 2,53% | 0,72 | 0,60 | 24,04% | 3,41% | 2,17 | 4,01 |
| GEOMETRIA_5 | 3,77E-04 | 3,39E-03 | 45,20 | 406,79 | 264,31 | 6,1356 | 2,42% | 0,72 | 0,60 | 23,44% | 3,33% | 0,68 | 4,01 |
| GEOMETRIA_6 | 3,72E-04 | 3,35E-03 | 44,62 | 401,54 | 268,09 | 6,1429 | 2,54% | 0,72 | 0,60 | 23,44% | 3,33% | 3,86 | 4,03 |
| GEOMETRIA_7 | 3,72E-04 | 3,35E-03 | 44,60 | 401,44 | 267,73 | 6,1366 | 2,43% | 0,72 | 0,59 | 22,21% | 3,16% | 5,74 | 4,02 |
| GEOMETRIA_8 | 3,73E-04 | 3,36E-03 | 44,64 | 401,76 | 267,12 | 6,1293 | 2,31% | 0,72 | 0,59 | 21,58% | 3,06% | 3,52 | 4,00 |
| GEOMETRIA_9 | 3,73E-04 | 3,35E-03 | 44,56 | 401,05 | 267,21 | 6,1222 | 2,19% | 0,72 | 0,58 | 20,97% | 2,98% | 2,08 | 4,01 |
| GEOMETRIA_10 | 3,78E-04 | 3,40E-03 | 45,38 | 408,41 | 263,86 | 6,1482 | 2,62% | 0,72 | 0,60 | 23,89% | 3,39% | 2,35 | 4,01 |
| GEOMETRIA_11 | 3,78E-04 | 3,41E-03 | 45,39 | 408,49 | 263,43 | 6,1412 | 2,51% | 0,72 | 0,59 | 23,26% | 3,30% | 0,53 | 3,98 |
| GEOMETRIA_12 | 3,69E-04 | 3,32E-03 | 44,20 | 397,79 | 270,44 | 6,1411 | 2,51% | 0,72 | 0,59 | 22,66% | 3,22% | 2,31 | 4,03 |
| GEOMETRIA_13 | 3,79E-04 | 3,41E-03 | 45,36 | 408,21 | 263,16 | 6,1341 | 2,39% | 0,72 | 0,59 | 22,02% | 3,13% | 0,49 | 4,01 |
| GEOMETRIA_14 | 3,74E-04 | 3,37E-03 | 44,86 | 403,70 | 266,04 | 6,1345 | 2,40% | 0,72 | 0,59 | 21,40% | 3,04% | 3,68 | 4,02 |
| GEOMETRIA_15 | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 44,29 | 398,57 | 269,07 | 6,1274 | 2,28% | 0,72 | 0,58 | 20,76% | 2,95% | 1,80 | 4,01 |
| GEOMETRIA_16 | 3,77E-04 | 3,40E-03 | 45,10 | 405,93 | 263,82 | 6,1204 | 2,16% | 0,72 | 0,58 | 20,16% | 2,86% | 0,79 | 3,99 |
| GEOMETRIA_17 | 3,71E-04 | 3,34E-03 | 44,45 | 400,02 | 268,06 | 6,1283 | 2,29% | 0,72 | 0,58 | 20,17% | 2,86% | 5,29 | 4,02 |
| GEOMETRIA_18 | 3,73E-04 | 3,36E-03 | 44,59 | 401,27 | 266,83 | 6,1211 | 2,17% | 0,72 | 0,58 | 19,53% | 2,77% | 3,29 | 4,00 |
| GEOMETRIA_19 | 3,77E-04 | 3,39E-03 | 44,98 | 404,78 | 264,14 | 6,1139 | 2,05% | 0,72 | 0,57 | 18,93% | 2,69% | 1,78 | 4,00 |
| GEOMETRIA_20 | 3,73E-04 | 3,36E-03 | 44,74 | 402,68 | 266,73 | 6,1346 | 2,40% | 0,72 | 0,59 | 21,45% | 3,05% | 1,53 | 4,03 |
| GEOMETRIA_21 | 3,77E-04 | 3,39E-03 | 45,08 | 405,76 | 264,32 | 6,1276 | 2,28% | 0,72 | 0,58 | 20,82% | 2,96% | -0,74 | 4,01 |
| GEOMETRIA_22 | 3,68E-04 | 3,31E-03 | 44,04 | 396,34 | 270,53 | 6,1278 | 2,28% | 0,72 | 0,58 | 20,19% | 2,87% | 3,43 | 4,03 |
| GEOMETRIA_23 | 3,72E-04 | 3,35E-03 | 44,50 | 400,53 | 267,32 | 6,1207 | 2,17% | 0,72 | 0,58 | 19,55% | 2,78% | 1,46 | 4,00 |
| GEOMETRIA_24 | 3,73E-04 | 3,35E-03 | 44,54 | 400,88 | 267,04 | 6,1213 | 2,18% | 0,72 | 0,57 | 18,96% | 2,69% | 5,05 | 4,03 |
| GEOMETRIA_25 | 3,70E-04 | 3,33E-03 | 44,18 | 397,64 | 268,81 | 6,1141 | 2,06% | 0,72 | 0,57 | 18,33% | 2,60% | 3,10 | 4,02 |
| GEOMETRIA_26 | 3,73E-04 | 3,36E-03 | 44,49 | 400,37 | 266,60 | 6,1070 | 1,94% | 0,72 | 0,57 | 17,72% | 2,52% | 1,71 | 4,02 |

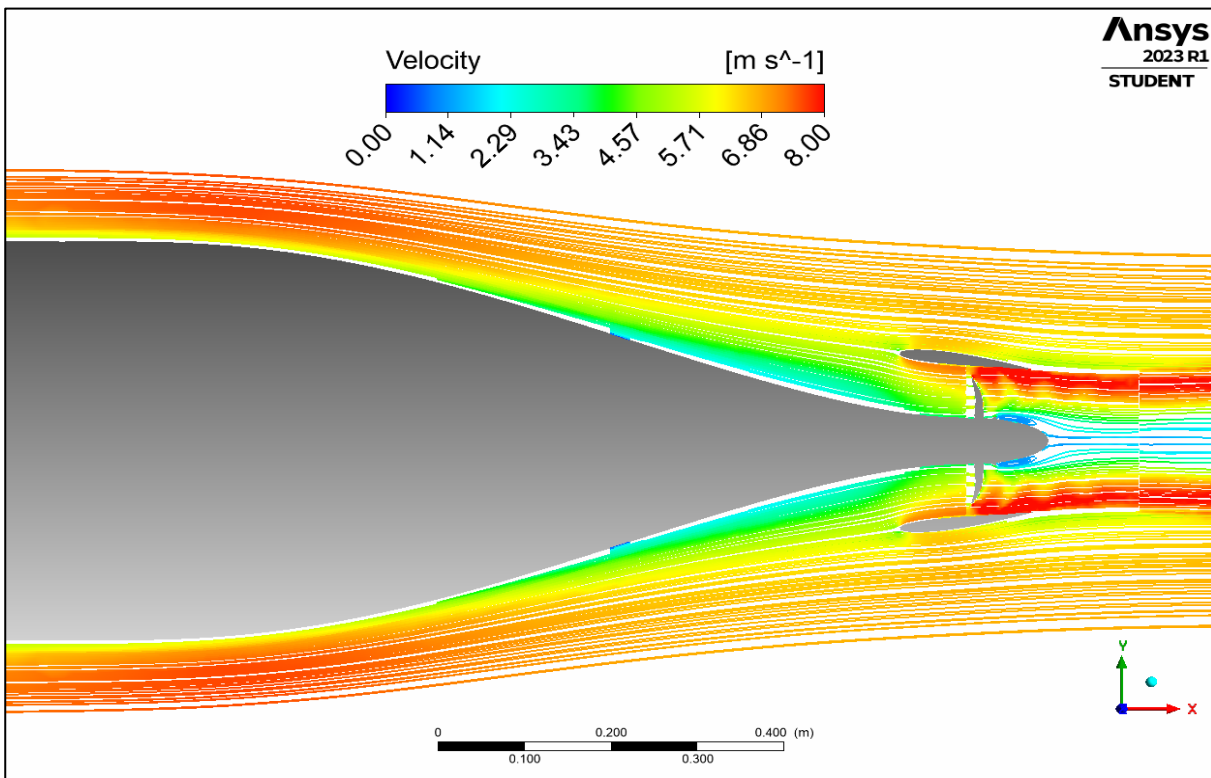
Fonte: Autor

Figura 77 - Resultados da 4ª rodada com propulsor e duto



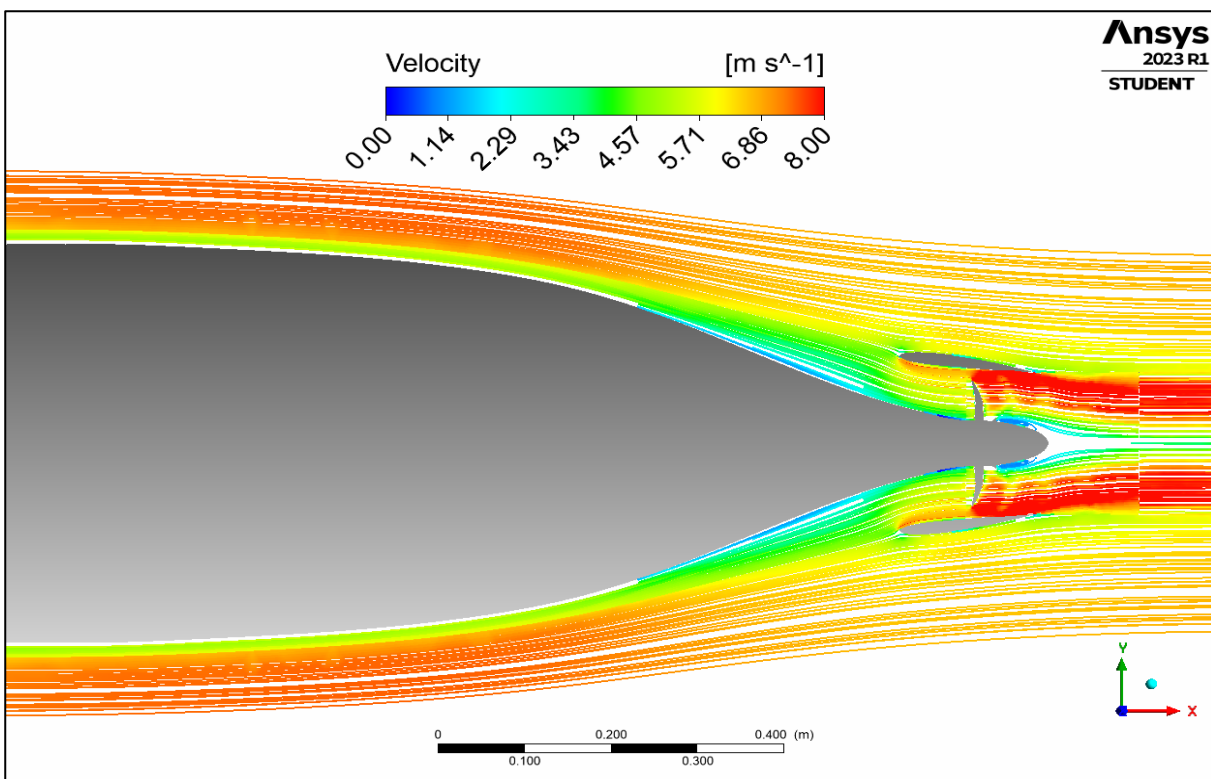
Fonte: Autor

Figura 78 - Linhas de corrente - Modelo SUBOFF



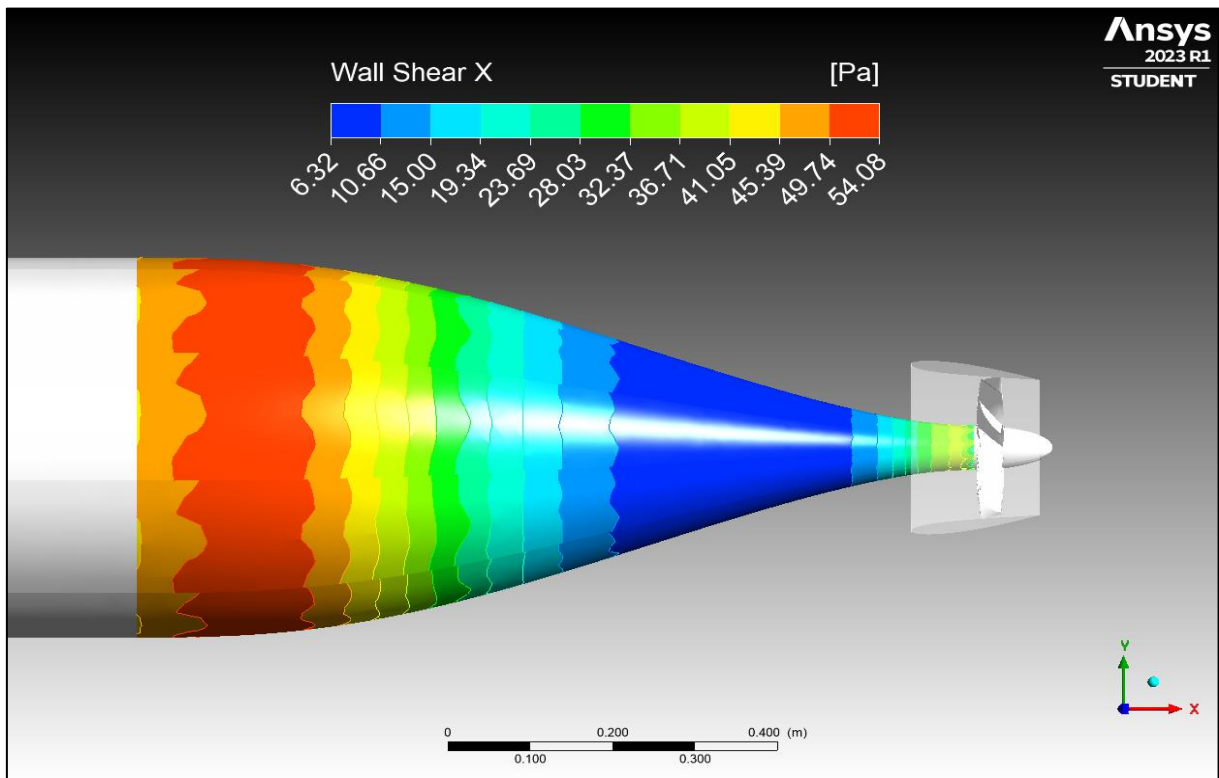
Fonte: Autor

Figura 79 - Campo de velocidades do fluxo - Geometria selecionada da 3ª fase



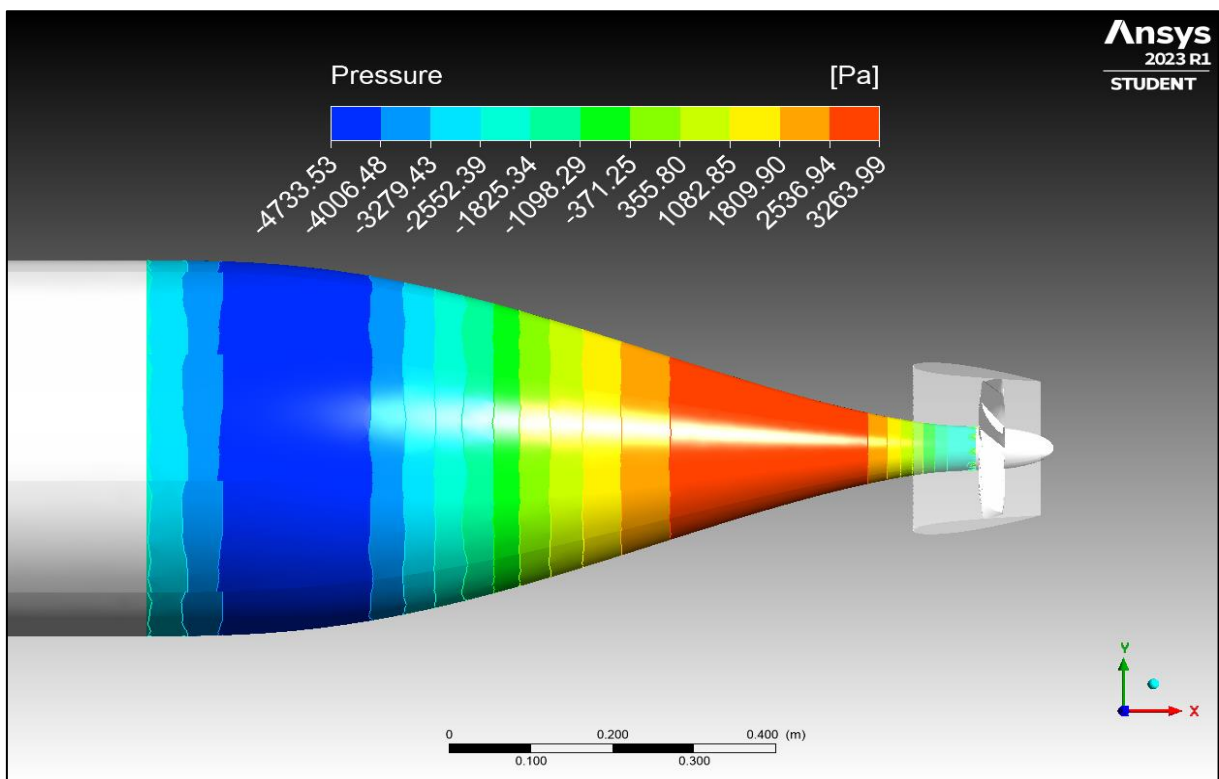
Fonte: Autor

Figura 80 - Tensões de cisalhamento - SUBOFF



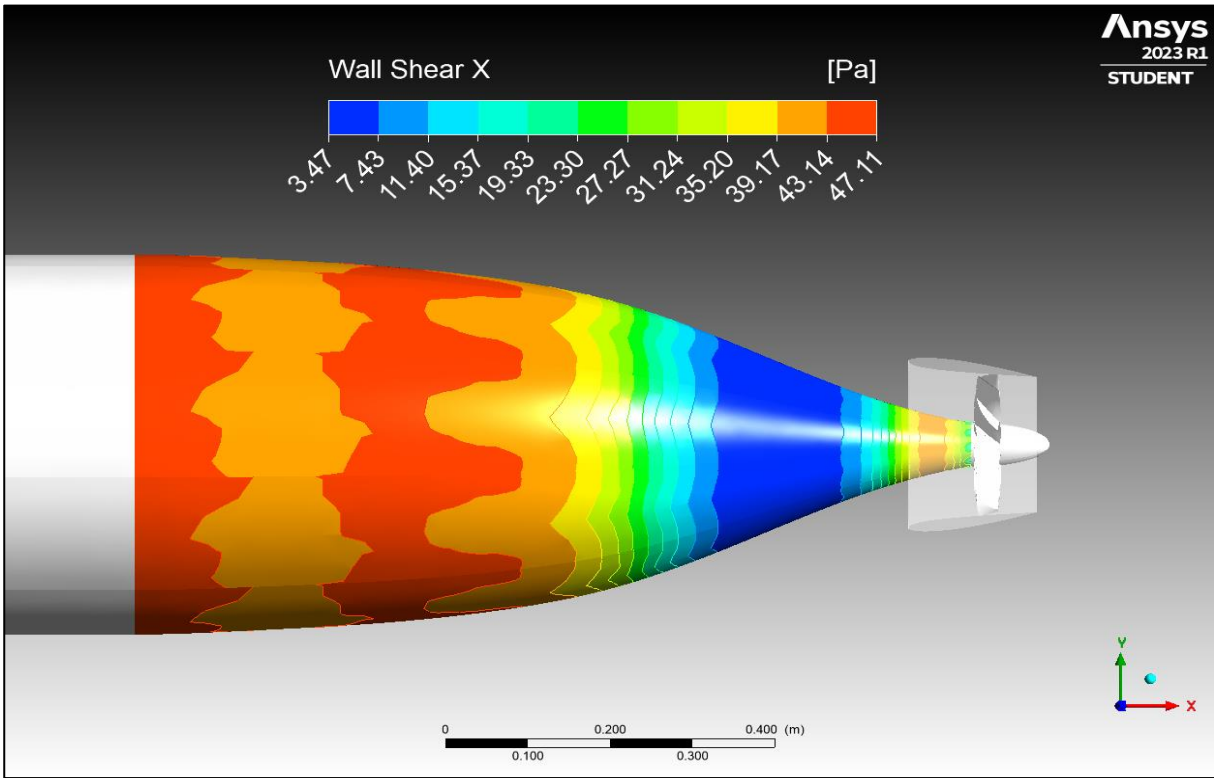
Fonte: Autor

Figura 81 - Campo de pressão – SUBOFF



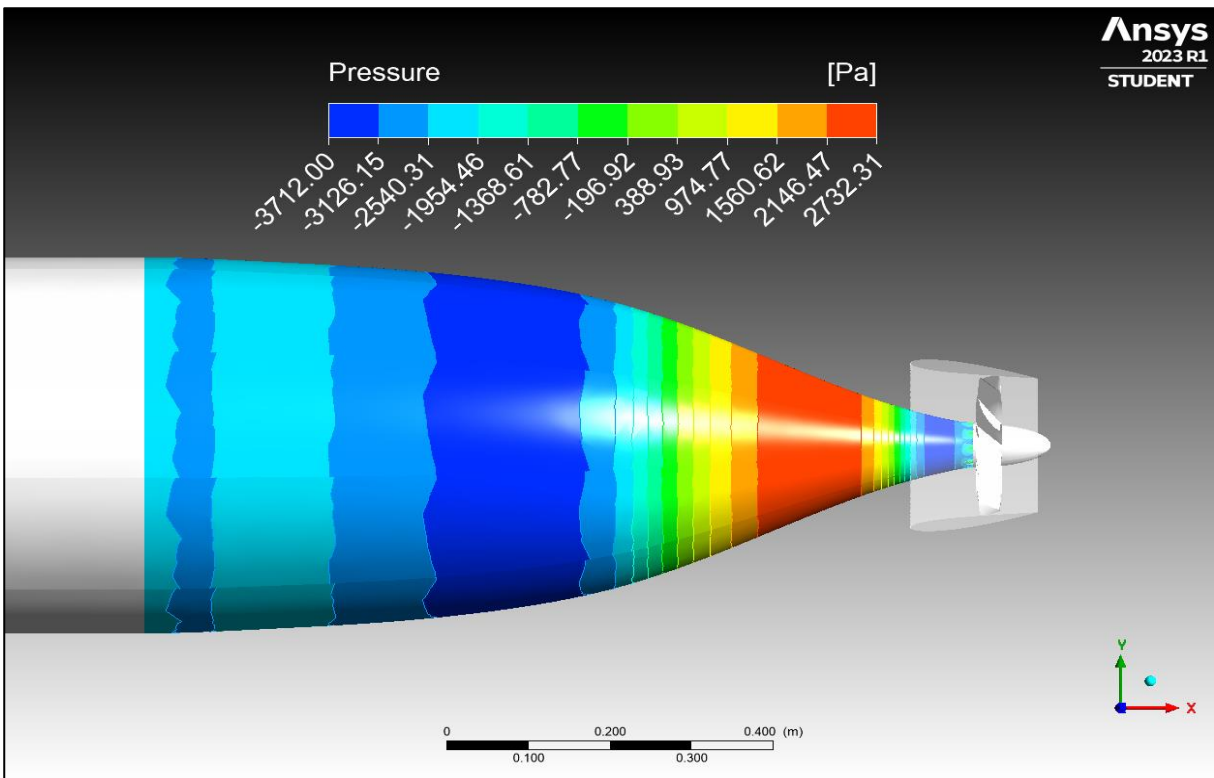
Fonte: Autor

Figura 82 - Tensões de cisalhamento - Geometria selecionada da 3ª fase



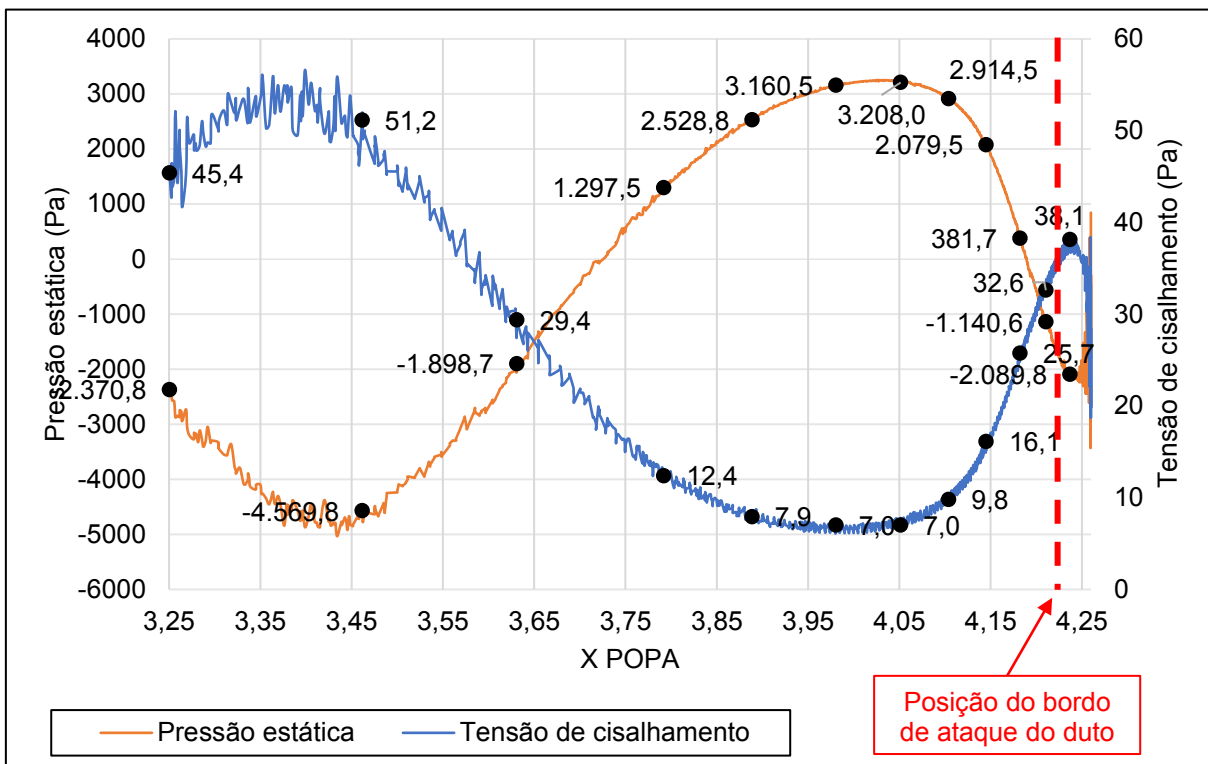
Fonte: Autor

Figura 83 - Campo de pressão - Geometria selecionada da 3ª fase



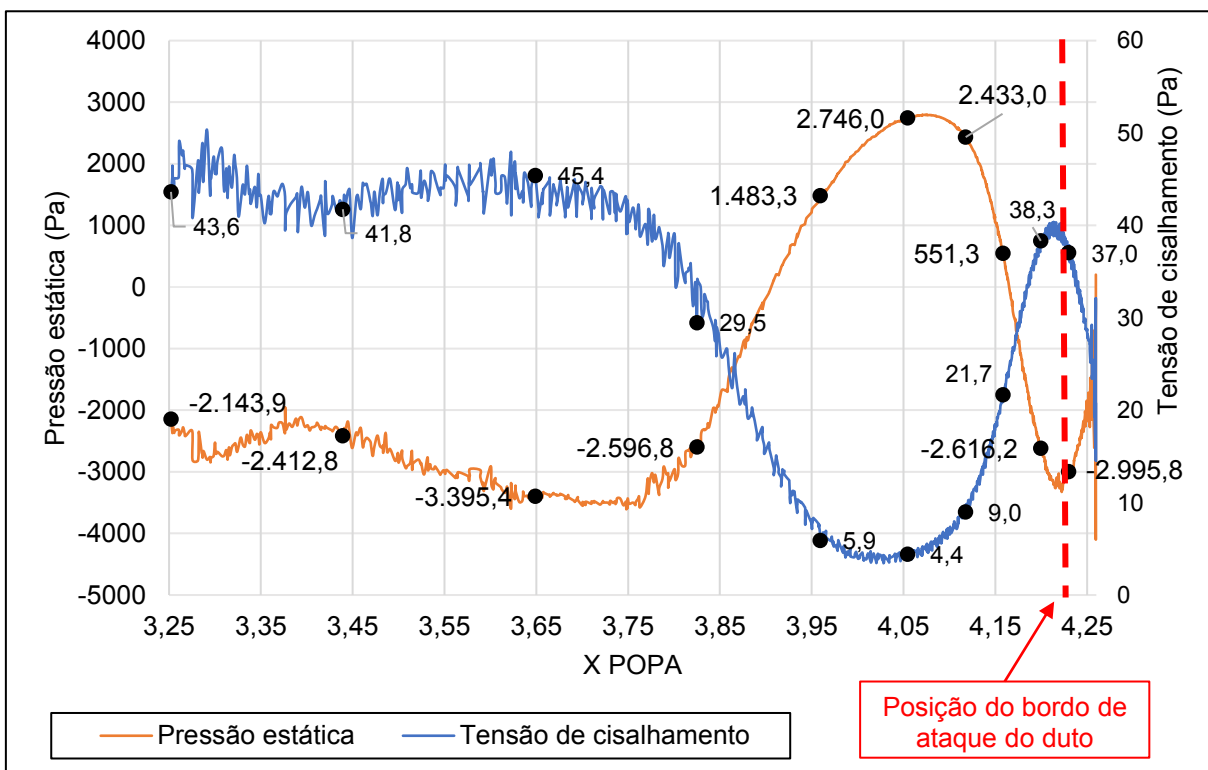
Fonte: Autor

Figura 84 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Modelo SUBOFF - MOD10



Fonte: Autor

Figura 85 - Pressão x Tensão de cisalhamento - Geometria 3ª fase



Fonte: Autor

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

No decorrer dos anos, as formas geométricas que os submarinos militares adquiriram, tiveram como propósito alcançar os seus objetivos em combate. Em vista disso, o submarino precisa ser o mais adequado para que possa exercer o seu papel dentro do teatro de operações navais.

Diante de um cenário pós-guerra fria, busca-se um maior equilíbrio com os gastos em defesa, o que atribuiu ao critério eficiência importância significativa em projetos militares. A abordagem do uso da popa cheia recebeu visibilidade recente em projetos de submarinos por possibilitar o ganho de volume na seção de popa, trazendo maior funcionalidade para o arranjo interno. Essa abordagem aumenta a chance de separação da camada limite na popa, o que aumentaria muito a resistência de forma. No entanto, a camada limite pode ser controlada com a utilização de um duto para acelerar o escoamento, reduzindo a pressão estática. Essa teoria foi investigada nesse estudo e provou-se verdadeira, aumentando a eficiência hidro-volume da embarcação.

O estudo apresentou uma ferramenta para a solução do problema apresentado no subitem 1.3 e entregou resultados satisfatórios na busca por formas geométricas de popa eficientes quando comparados ao modelo de referência.

7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS POR MEIO DE CFD

A Figura 86 apresenta o comparativo entre as formas geométricas encontradas em cada fase do trabalho. Na 1ª fase com casco limpo, conclui-se que a ferramenta buscou um perfil com uma redução de diâmetro mais suave. Após o PMB, o perfil já iniciou um afunilamento maior que o do modelo SUBOFF devido à falta de algum complemento no casco que aplique energia cinética ao escoamento. Há uma busca por uma geometria com perfil mais cônico.

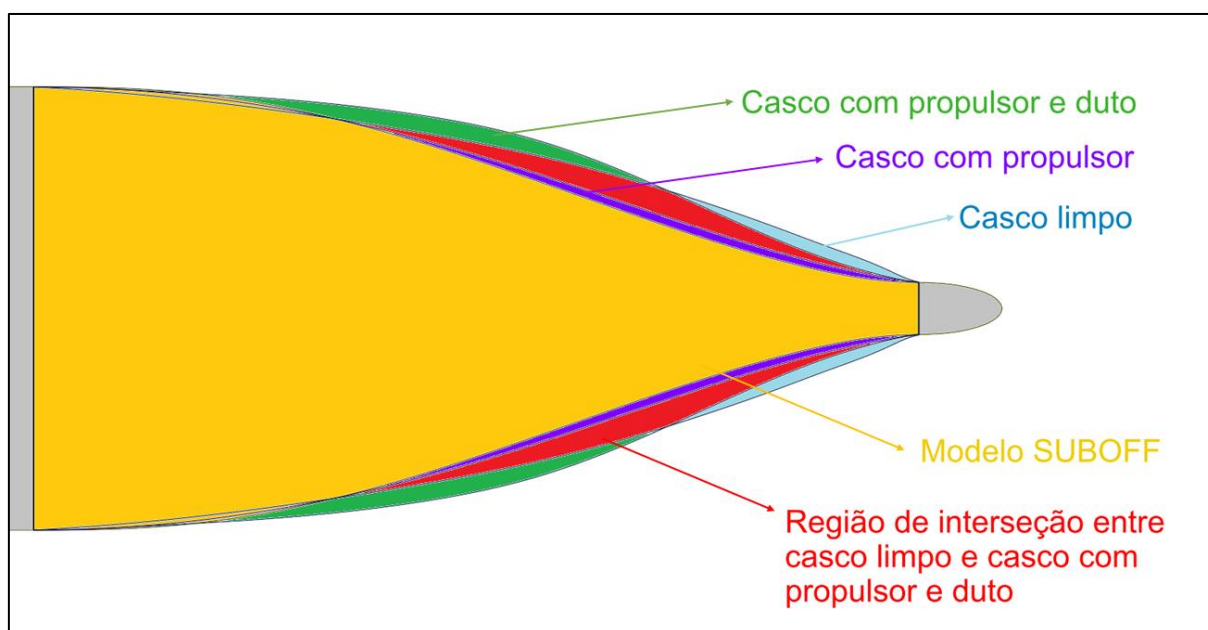
Na 2ª fase foi inserido o propulsor MOD5 nas geometrias. Além de se avaliar o comportamento do perfil de popa selecionado e o escoamento incidente, essa fase permitiu avaliar a precisão do processo de busca, uma vez que esse propulsor foi projetado para a máxima eficiência no modelo SUBOFF. A geometria selecionada ficou 0,43% menos eficiente que o modelo de referência. Além do mais, conclui-se que devido à influência do propulsor no escoamento, a região da popa a montante é

mais cheia quando comparada à geometria selecionada da 1ª fase, com uma redução de diâmetro mais abrupta sem separar a camada limite.

Na 3ª fase, a aplicação do conjunto MOD10 sem o estator, teve como objetivo avaliar o efeito de um propulsor com duto no escoamento e os efeitos no casco. A eficiência hidro-volume foi a maior encontrada no estudo e a maior aceleração do escoamento proporcionada pelo duto possibilitou encontrar a popa com o maior volume e sem separar a camada limite, resultando o maior coeficiente de Semnan quando comparado com as popas selecionadas das fases anteriores (Figura 86).

O ganho de pressão do escoamento na geometria selecionada antes de cruzar a seção do propulsor indica que é possível obter maior eficiência com modificações geométricas no duto (Figura 74).

Figura 86 - Comparativo entre as popas selecionadas



Fonte: Autor

A ferramenta apresentada nesse trabalho mostrou-se eficiente com a meta-heurística aplicada no processo de busca. A 2ª fase alcançou um resultado próximo ao modelo de referência com apenas 3 valores de entrada no código de geração das linhas. A 3ª fase mostrou que a aplicação do duto pode ser utilizada para aumento da eficiência hidro-volume.

7.2 PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS

O trabalho abre uma série de possíveis implementações para melhoria do processo e até mesmo propostas para novos trabalhos. Dentre elas é possível citar:

- a) Na disponibilidade de maior poder computacional, pode-se aumentar os pontos de controle em x no código MATLAB a fim de ampliar o conjunto de linhas de popa no processo;
- b) A geração de mais pontos interpolados por splines cúbicas tornam os resultados em CFD mais precisos devido ao maior detalhe do traçado das linhas de popa;
- c) A inserção de requisitos e restrições com maior riqueza de detalhes aproximam mais o estudo de casos reais de projetos de submarinos;
- d) Na disponibilidade de maior poder computacional, um número maior de rodadas em cada fase possibilitará reduzir a distância entre os pontos em y na meta-heurística aplicada, aumentando a precisão do processo;
- e) O trabalho abre margem para que o submarino possa ser avaliado em diferentes modelos de turbulência, como por exemplo o modelo Sparlat-Allmaras;
- f) Obtenção do valor da velocidade de cruzeiro a qual fará o submarino apresentar a maior eficiência possível;
- g) A inserção de apêndices (lemes e hidroplanos) na popa do submarino atribui um grau mais realístico ao problema;
- h) Realização de uma nova investigação substituindo o modelo de referência do trabalho apresentado pelo AUV utilizado no projeto de desenvolvimento do MOD10 com uso do estator; e
- i) Para ganho de complexidade, há possibilidade de uma otimização multiobjetivo com a inclusão da geometria do duto no processo;
- j) Introdução de análises de cavitação e eficiência dos propulsores selecionados para o trabalho; e
- k) Realização de simulações em regime transiente para uma análise mais detalhada das geometrias selecionadas possibilitaria compreender também o comportamento ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ARANHA, J. A. P. **Notas de aula – Mecânica dos fluidos**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.
- BARBOSA, R. **Cartas de Inglaterra**. Rio de Janeiro: Typ. Leuzinger, 1896. 207 p.
- BRANLEY, J. M. **Post-cold war submarine force changes**. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia. 2010.
- BRASIL, A. N. **Máquinas Termohidráulicas de Fluxo**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BURCHER, R.; RYDILL, L. **Concepts of Submarine Design**. [S.I.]: Cambridge University Press, 1994.
- CORTEZ, G. G. **Determinação do regime de escoamento: Experiência de Reynolds**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2020.
- COVERT SHORES. Covert Shores. **Covert Shores**, 2020. Disponível em: <<http://www.hisutton.com/German-WW1-Type-UC-1-U-Boat.html>>. Acesso em: 12 junho 2023.
- DELGADO, J.; CUSSLER, C. **Silent Killers: Submarines and Underwater Warfare**. Oxford, Reino Unido: Osprey Publishing, 2011.
- EDUREV. EduRev. **EduRev**, 2023. Disponível em: <<https://edurev.in/t/85649/Chapter-9-Boundary-Layer-Theory-Fluid-Mechanics--H>>. Acesso em: 08 agosto 2023.
- ENCYCLOPEDIA OF ALABAMA. **Encyclopedia of Alabama**, 2022. Disponível em: <<http://www.encyclopediaofalabama.org/article/m-3887>>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- ESTEVEES, F. R. L. et al. **Simulation of DARPA Suboff model propeller-hull interaction**. Rio de Janeiro. 2018.
- EVANS, M. L. **Naval History and Heritage Command**, 2021. Disponível em: <https://www.history.navy.mil/research/histories/ship-histories/confederate_ships/h-l-hunley.html>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- FRIEDMAN, N. **Submarine Design and Development**. Liverpool: Conway Maritime Press, 1984.
- GENÇ, M. S. et al. **Low Reynolds Number Flows and Transition**. [S.I.]. 2012.

- GROVES, N. C.; HUANG, T. T.; CHANG, M. S. **Geometric Characteristics of DARPA Suboff Models**. David Taylor Research Center. Bethesda, Maryland. 1989.
- HARVALD, S. A. **Resistance and Propulsion of ships**. University of Denmark. Lyngby. 1983.
- HISTORY.COM. **Naval History and Heritage Command**, 2020. Disponível em: <<https://www.history.com/this-day-in-history/css-hunley-sinks-during-tests>>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- JACKSON, H. A. **Fundamentals of Submarine Concept Design**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. 1992.
- JOUBERT, P. N. **Some Aspects of Submarine Design Part1. Hydrodynamics**. Department of Defence - Australian Government. Melbourne. 2004.
- KARIM, M.; RAHMAN, M.; ALIM, M. A. Performance of SST k- ω turbulence model for computation of viscous drag of axisymmetric underwater bodies. **International Journal of Engineering**, 01 jul. 2011.
- KATZ, J.; PLOTKIN, A. **Low-speed aerodynamics**. Cambridge university press. [S.l.]. 2001.
- KORMILITSIN, Y. N.; KHALIZEV, O. A. **Theory of Submarine Design**. [S.l.]: Riviera Maritime Media, 2001.
- LUKE, S. **Essentials of Metaheuristics**. George Mason University. [S.l.]. 2016.
- MARINHO, F. Guia da Engenharia. **Guia da Engenharia**, 2020. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/propriedade-fluidos-viscosidade/>>. Acesso em: 12 junho 2023.
- MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. **AIAA Journal**, 8 agosto 1994. 1598-1605.
- MOONESUN, M. et al. Optimization on submarine stern. **Journal of Engineering for the Maritime Environment**, 2017.
- NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND. **Naval History and Heritage Command**, 2017. Disponível em: <<https://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/s/submarine-turtle-naval-documents.html>>. Acesso em: 10 maio 2023.
- NUCLEAR-POWER. Nuclear-power. **Nuclear-power**, 2023. Disponível em: <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/external-flow/>>. Acesso em: 18 junho 2023.
- OOSTERVELD, M. W. C. **Wake adapted ducted propellers**. [S.l.]. 1970.

- PSALLIDAS, K.; WHITCOMB, C. A.; HOOTMAN, J. C. Design of Conventional Submarines with Advanced Air Independent Propulsion Systems and Determination of Corresponding Theater-Level Impacts. **Naval Engineers Journal**, Março 2010.
- RAWSON, K. J.; TUPPER, E. C. **Basic Ship Theory**. Quinta edição. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- RENILSON, M. **Submarine Hydrodynamics**. Launceston: Springer, 2015.
- ROBLIN, S. **Insider**, 2021. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/how-swedish-sub-ran-rings-around-us-aircraft-carrier-escorts-2021-7>>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- SALATTA, V. A.; SANTOS, S. R. D. Otimização Estocástica por meio de dois problemas de programação linear com coeficientes aleatórios. **Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, v. 10, n. Ermac, dez 2017.
- SBRAGIO, R.; MOURA, A. J. D. S.; SILVA, R. C. D. Design and CFD Self-Propulsion Analysis of a ducted propeller for a DARPA SUBOFF hull autonomous underwater vehicle. **Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, São Paulo, 3-7 agosto 2020.
- SHARKEY, E. R. **Air Independent Power Source for Submarines**. [S.I.]. 2001.
- SILVA, R. C. D. **Numerical Evaluation on the Effect of Boss Cap Geometries on AUV Propeller Noise**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2021.
- SUBBRIEF. SubBrief. **SubBrief**, 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=TucR9ziw2fE&t=585s>>. Acesso em: 12 junho 2023.
- SUTTON, H. I. **Covert Shores**, 2020. Disponível em: <<http://www.hisutton.com/Nordenfelt-submarines.html>>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- SUTTON, H. I. Forbes. **Forbes**, 2020. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/hisutton/2020/08/23/last-typhoon-can-the-worlds-largest-submarine-still-destroy-the-world/?sh=47d47f2e6ec2>>. Acesso em: 12 junho 2023.
- SUTTON, H. I. Navalnews. **Navalnews**, 2020. Disponível em: <<https://www.navalnews.com/naval-news/2020/12/u-s-navys-ohio-class-submarine-to-get-new-hypersonic-weapons/>>. Acesso em: 12 junho 2023.
- SVERDRUPIAN. Reddit. **Reddit**, 2018. Disponível em: <https://www.reddit.com/r/submarines/comments/8ivro6/y%C5%ABshioclass_dieselectric_submarine_jmsdf/>. Acesso em: 12 maio 2023.
- TAKAHASHI, K.; GARGAN-SHINGLES, C. **Wake-adapted ducted propeller for full-scale generic underwater vehicle**: parametric study on blade skew for unsteady

propeller thrust. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. [S.l.]: [s.n.]. 2023. p. 5545-5552.

THOMAS B. GATSKI, J.-P. B. In: THOMAS B. GATSKI, J.-P. B. **Compressibility, Turbulence and High Speed Flow**. [S.l.]: Elsevier, 2009. p. 161-210.

WARREN, C. L. **Submarine Design Optimization Using Boundary Layer Control**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. 1997.