

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

JOÃO VICTOR BRUNKEN FLORES

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESTEIRA DE UM NAVIO PATRULHA
FLUVIAL UTILIZANDO CFD

Joinville

2025

JOÃO VICTOR BRUNKEN FLORES

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESTEIRA DE UM NAVIO PATRULHA
FLUVIAL UTILIZANDO SIMULAÇÕES CFD

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

Orientador(a): Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2025

JOÃO VICTOR BRUNKEN FLORES

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESTEIRA DE UM NAVIO PATRULHA FLUVIAL
UTILIZANDO CFD

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville - SC, 28 de novembro de 2025.

Banca examinadora

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Lucas Weihmann
Membro
UFSC

Prof. Dr. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro
UFSC

**Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela
BU/UFSC.**

Dados inseridos pelo próprio autor.

Flores, João Victor Brunken

Determinação do coeficiente de esteira de um navio
patrulha fluvial utilizando CFD / João Victor Brunken
Flores ; orientadora, Thiago Pontin Tancredi, 2025.
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Hidrodinâmica. 3. Coeficiente
de esteira. 4. CFD. I. Tancredi, Thiago Pontin. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Naval. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Ademir Flores e Karen Flores, por serem, sempre, a motivação do meu esforço e a razão das minhas conquistas. Obrigado por todo apoio que sempre me deram, por terem me ensinado os valores que carrego hoje e por sempre acreditarem em mim. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

Ao meu irmão, Pedro Flores, por ser o meu melhor amigo, conselheiro e por estar sempre presente. A vida não poderia ter me proporcionado melhor irmão mais velho. Agradeço a todos os meus familiares, incluindo aqueles que hoje vivem apenas em memórias.

A minha namorada, Lilian Weiss, que me acompanhou durante todo o período da graduação, que esteve comigo durante todos os momentos, bons e ruins, desta caminhada e que sempre me motivou a terminar o que comecei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi, por todos os ensinamentos ao longo desses anos, por ter aberto as portas do seu laboratório e confiado no meu potencial para participação em diversos projetos. Obrigado pela paciência e pelos conselhos que me fizeram enxergar qual é, de fato, o significado de ser um engenheiro naval.

A todos os meus amigos de Mafra – SC, por todas as conversas, risadas, conselhos e churrascos. Obrigado por terem me acompanhado e tornado essa jornada muito mais leve. Obrigado a todos os amigos que fiz durante a graduação, especialmente ao pessoal do LaSiN, por me lembrarem que nunca estive sozinho nessa caminhada.

A Marinha do Brasil e a Petrobras S.A, por terem incentivado e financiado toda minha pesquisa durante a graduação e este trabalho de conclusão de curso. Foi uma honra poder, de alguma forma, contribuir nesses projetos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão dessa jornada, a todos os professores e servidores da Universidade Federal de Santa Catarina, a qual tenho orgulho de chamar *alma mater*.

RESUMO

Embora existam diversos aspectos que influenciem o projeto de um navio, a performance do sistema propulsivo é, sem dúvidas, uma das variáveis mais importantes quando se trata da eficiência operacional da embarcação. Entre as várias etapas do processo de seleção de hélice do navio, a estimativa do coeficiente de esteira é de suma importância para que os engenheiros navais consigam realizar a escolha correta do propulsor e otimizar sua eficiência. No entanto, em muitos casos, equações empíricas que permitam a estimativa desse coeficiente não estão disponíveis na literatura, ou as séries existentes não contemplam as características geométricas e de operação do navio projetado, cenário comum no caso de embarcações militares com três propulsores. Dessa forma, a dinâmica dos fluidos computacional apresenta-se como uma ferramenta para estimativa do coeficiente de esteira, pois apresenta mais flexibilidade em relação às características do casco. Assim, tem-se como objetivo com este trabalho apresentar a utilização de uma simulação CFD para determinação do coeficiente de esteira de um navio patrulha fluvial da Marinha do Brasil (NAPA), de regime deslocante. Para o estudo, um modelo do navio patrulha de coeficiente de bloco 0.75 será utilizado, onde, a partir da definição de planos paralelos ao propulsor, discretizados da popa até a quilha, serão coletadas as velocidades ortogonais ao hélice, visando a determinação de uma velocidade de avanço média. Para simulação numérica, o programa utilizado foi o OpenFoam, que contém diversos módulos para solução de problemas de mecânica dos fluidos. Para este estudo, utilizou-se o módulo SimpleFoam, indicado para solução de escoamentos monofásicos, incompressíveis, viscosos, turbulentos e isotérmicos, que utiliza o algoritmo SIMPLE (*Semi-implicit method for pressure linked equations*) para o acoplamento pressão-velocidade. A modelagem da turbulência foi realizada com o método RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) e o modelo k- ω SST com utilização de funções parede na região logarítmica para resolução da camada-limite. Para o estudo do perfil de velocidades e determinação do coeficiente de esteira, a velocidade do modelo foi setada em 1.88 m/s, correspondente a um regime de operação de Froude 0.30. O processo de validação dos resultados foi obtido com a simulação de três diferentes velocidades, correspondentes a números de Froude 0.20; 0.25; e 0.30, seguida da comparação do coeficiente de arrasto friccional de acordo com a equação proposta pela International Towing Tank Conference (ITTC), 1957. Os resultados possibilitaram a estimativa do coeficiente de esteira e a constatação de que alguns dos modelos empíricos existentes diferem significativamente entre si e do resultado numérico encontrado, enquanto algumas equações mostraram-se bastante próximas do resultado gerado pela simulação.

Palavras-chave: Navio patrulha, coeficiente de esteira, CFD, OpenFoam.

ABSTRACT

Although there are several aspects that influence the design of a ship, the performance of the propulsion system is undoubtedly one of the most important variables when it comes to the operational efficiency of the vessel. Among the various stages of the ship propeller selection process, estimating the wake coefficient is of great importance for naval engineers to select the propeller properly and optimize its efficiency. However, in many cases, empirical equations that allow the estimation of this coefficient are not available in the literature, or the existing series do not contemplate the geometric and operating characteristics of the designed ship, a common scenario in the case of military vessels with three propellers. Thus, computational fluid dynamics is a valuable tool for estimating the wake coefficient, as it offers greater flexibility in relation to the characteristics of the hull. Therefore, the objective of this work is to present the use of a CFD simulation to determine the wake coefficient of a Brazilian Navy river patrol vessel (NAPA). For the study, a model of the patrol vessel with a block coefficient of 0.75 will be used, where, based on the definition of planes parallel to the propeller, discretized from the stern to the keel, the velocities orthogonal to the propeller will be collected, aiming to determine an average forward speed. For numerical simulation, the program used was OpenFoam, which contains several modules for solving fluid mechanics problems. For this study, the SimpleFoam module was used, which is suitable for single-phase, incompressible, viscous, turbulent, and isothermal flows, and which uses the SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations) algorithm for pressure-velocity coupling. Turbulence modeling was performed using the RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) method and the $k-\omega$ SST model with wall functions in the logarithmic region to resolve the boundary layer. To study the velocity profile and determine the wake coefficient, the model velocity was set at 1.88 m/s, corresponding to a Froude number of 0.30. The validation process of the results was obtained by simulating three different speeds, corresponding to Froude 0.20, 0.25, and 0.30, and comparing the friction drag coefficient according to the equation proposed by the International Towing Tank Conference (ITTC), 1957. The results enabled the estimation of the wake coefficient and the finding that some of the existing empirical models differ significantly from the numerical result found, while some of the equations are very close to the result found with the simulation.

Keywords: Patrol vessel; wake coefficient; CFD; OpenFoam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das três parcelas principais do arrasto de um navio.	19
Figura 2 – Padrão das ondas de Kelvin	21
Figura 3 - Campo de velocidades simplificado no propulsor	24
Figura 4 - Esteira formada pelo deslocamento do navio	25
Figura 5 - NapaFlu Pedro Teixeira	28
Figura 6 - Modelo de navio NAPA pela interface do MaxSurf Modeler	29
Figura 7 - Domínio computacional gerado pelo utilitário BlockMesh	32
Figura 8 - Processo de divisão dos volumes de controlo realizado pelo blockMesh .	33
Figura 9 - Formação da Camada limite ao longo do escoamento.	34
Figura 10 - Discretização através da função parede.	35
Figura 11 - malha finalizada através da interface do programa Paraview	37
Figura 12 - Oscilações velocidade do escoamento no decorrer do tempo.	38
Figura 13 – Canais reservados aos propulsores	44
Figura 14 – Planos paralelos aos propulsores	48
Figura 15 - Razão entre velocidades de serviço e de avanço no propulsor	50
Figura 16 - Convergência numérica durante o processamento.....	51
Figura 17 - Pós-processamento do campo de velocidades.....	52
Figura 18 - Variação da velocidade de avanço média ao longo da popa	54
Figura 19 - Coeficiente de esteira ao longo do corpo de popa	49
Figura 20 - Linhas de corrente e recirculação do escoamento	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos empíricos para estimativa do coeficiente de esteira	27
Tabela 2 - Características e dimensões do NapaFlu Pedro Teixeira	29
Tabela 3 - Dimensões principais do modelo de navio NAPA	30
Tabela 4 - Dimensões do domínio computacional.....	31
Tabela 5 - Parâmetros utilizados para geração das <i>layers</i>	36
Tabela 6 - valores de k e ω utilizados para o processamento da simulação.....	40
Tabela 7 - Condições de contorno utilizadas para simulação	41
Tabela 8 - Condição de operação para simulação de validação	41
Tabela 9 - Comparação entre CF numérico (OpenFoam) e experimental (ITTC)	47
Tabela 10 - Velocidade média de avanço para o plano central e de bombordo.....	49
Tabela 11 - Coeficiente de esteira ao longo da popa do navio	52
Tabela 12 - Comparação entre resultados numérico e empírico.....	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD - mecânica dos fluidos computacional
ITTC - International Towing Tank Conference
LPP - comprimento entre perpendiculares
NAPA - navio patrulha militar
w - coeficiente de esteira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	16
2.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO	19
2.2.1. Resistência friccional	20
2.2.2. Resistência Viscosa de Pressão	20
2.2.2. Resistência de ondas	21
2.2.3. Determinação da Resistência	22
2.3 HÉLICE PROPULSOR	23
2.3.1. Teoria do disco atuador	23
2.3.2. Coeficiente de esteira de Taylor	25
2.3.3. Modelos empíricos	26
3. METODOLOGIA	28
3.1 NAVIO PATRULHA FLUVIAL (NAPA)	28
3.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	30
3.2.1. Geometria e domínio computacional	30
3.2.2 Integração do modelo ao domínio computacional	32
3.2.4 Geração das camadas adjacentes à superfície	36
3.2.5 Turbulência	37
3.2.6 Modelos de turbulência	39
3.2.7 Condições de contorno	40
3.2.7 Validação de resultados	41
3.2 PLANOS PARALELOS AO PROPULSOR	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS	46
4.2 VELOCIDADES ORTOGONAIS AO PROPULSOR	48
4.3 COEFICIENTE DE ESTEIRA	51
4.4 MODELOS EMPÍRICOS	55
5. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A correta seleção de propulsor é uma das etapas mais importantes para garantir a eficiência energética de uma embarcação, pois é o que permite com que o navio atinja a velocidade de projeto de modo economicamente viável. Dessa forma, o coeficiente de esteira (w) é um parâmetro fundamental para o projeto propulsivo de um navio, pois esse coeficiente relaciona a influência do casco na velocidade do escoamento entregue ao hélice e, portanto, no seu desempenho hidrodinâmico (Molland et al., 2011).

A presença do casco influencia consideravelmente no funcionamento do propulsor, pois induz a formação de uma esteira não uniforme responsável por diminuir a velocidade do escoamento que atinge o hélice e, conseqüentemente, afetar a distribuição do empuxo aplicado nas pás (Trindade, 2012).

Comumente, a estimativa do coeficiente de esteira é realizada através de equações oriundas de ensaios experimentais. Essas equações, no entanto, possuem restrição de aplicabilidade e são válidas apenas para modelos de embarcações específicas, tratando-se de embarcações mercantes na maioria dos casos.

De acordo com Molland (2011), a esteira tem diversas origens, mas a friccional, resultado do atrito da água com o casco é a mais relevante, o que evidencia a importância das características do casco no desempenho hidrodinâmico da embarcação. Nesse contexto, é fundamental quantificar essa influência tendo como base a geometria e condições de operação específicas da embarcação projetada, obtendo um valor realista de coeficiente de esteira que permita a otimização do sistema propulsivo.

Assim, o desafio surge na medida que novos modelos de embarcação, especialmente militares, são projetadas, pois esses modelos, comumente, não estão englobados nas séries experimentais tradicionalmente utilizadas. Logo, torna-se razoável a busca por novas abordagens que permitam a estimativa desse parâmetro sem a necessidade de novos ensaios experimentais, pois esses demandam infraestrutura complexa, elevado custo e tempo de engenharia (Bertram, 2012).

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD), apesar de possuir desvantagens em relação ao custo computacional e resultados aproximados por se tratar de uma abordagem numérica, progrediu muito nos últimos anos e possibilita a análise de fenômenos complexos relacionados a hidrodinâmica do navio (Bertram, 2012). A abordagem torna-se ainda mais interessante pois é mais flexível em relação aos limites de aplicação, possibilitando a otimização propulsiva de mais modelos de casco.

Tendo em vista que os resultados numéricos têm, cada vez mais, se aproximado dos resultados experimentais, mostrando o amadurecimento do método e a aplicabilidade dentro da engenharia (Carlton, 2007), e a necessidade da busca por novas abordagens para o estudo da integração casco-hélice, Mikkelsen; Shao e Walther (2022) realizaram simulações para estudo da esteira nominal gerada por um navio porta-contêiner, ao passo que Yang (2010) analisou a diferença no padrão de esteira gerada entre casco e modelo. Ambos os trabalhos, no entanto, não abordam embarcações militares.

Assim, considerando o desafio existente no projeto propulsivo de embarcações militares, tem-se como objetivo com este trabalho apresentar a utilização de uma simulação numérica de dinâmica dos fluidos computacional para determinação do coeficiente de esteira de um navio patrulha militar (NAPA) da Marinha do Brasil, equipado com três propulsores.

O estudo será conduzido a partir da utilização de uma embarcação NAPA de coeficiente de bloco 0.75 operando num regime de Froude 0.30; correspondente a uma velocidade de 1.88 m/s para o modelo. A simulação numérica será realizada com o programa *OpenFoam*, utilizando como módulo de resolução do problema o *simpleFoam*, indicado para solução de escoamentos monofásicos, incompressíveis e em regime permanente.

Para o processo de validação dos resultados, três regimes de operação serão simulados, e os resultados do coeficiente de resistência friccional serão comparados com os valores obtidos através da equação proposta pela *International Towing Tank Conference* (ITTC), de 1957.

A metodologia do trabalho segue as orientações propostas pela ITTC no que tange a definição do domínio computacional, modelagem da turbulência, condições de contorno e validação de resultados, aspectos fundamentais para garantir a qualidade dos resultados obtidos pela simulação numérica (ITTC, 2011). Busca-se,

também, através da comparação do arrasto, a validação do campo de velocidades do escoamento em torno do casco, uma vez que a resistência ao avanço depende fortemente dessa característica do escoamento.

Para determinação do coeficiente de esteira, serão definidos planos paralelos aos hélices discretizados da popa até a quilha, onde, em cada plano, serão coletadas as velocidades ortogonais as pás do propulsor. Na sequência, a média das velocidades ortogonais será calculada e definida como velocidade de avanço média, possibilitando o cálculo do coeficiente de esteira.

Os resultados obtidos serão então comparados com os valores do coeficiente disponibilizados em Molland (2011). Tem-se como intenção com o presente trabalho apresentar uma abordagem alternativa para determinação desse parâmetro propulsivo e mostrar tanto a diferença quanto a semelhança encontrada em relação aos resultados provenientes de séries sistemáticas, mostrando que as séries, ainda que indicadas para o modelo de embarcação estudado, diferem consideravelmente entre si.

1.1. OBJETIVOS

Com intuito de apresentar uma abordagem numérica para determinação do coeficiente de esteira de uma embarcação militar, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Determinar o coeficiente de esteira de um navio patrulha militar da Marinha do Brasil, utilizando uma abordagem numérica de mecânica dos fluidos computacional e comparar os resultados com equações oriundas de séries sistemáticas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Gerar o domínio computacional em torno do casco NAPA para estudo do escoamento na região do hélice;

- Comparar os resultados de coeficiente de arrasto friccional utilizando a equação da ITTC (1957), buscando a validação do perfil de velocidades em torno do casco.
- Definir planos paralelos as pás dos hélices para obtenção das velocidades ortogonais ao propulsor que serão utilizadas para o cálculo da velocidade de avanço média e do coeficiente de esteira.
- Comparar o resultado de coeficiente de esteira encontrado numericamente com os obtidos através de equações experimentais.
- Compreender a influência do casco estudado no desempenho propulsivo da embarcação e analisar as diferenças encontradas entre os métodos numérico e experimental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Busca-se com este capítulo apresentar os principais conceitos utilizados para determinação do coeficiente de esteira do navio patrulha, utilizando a abordagem numérica proposta. Para isso, serão abordados conceitos básicos da mecânica dos fluidos computacional, resistência ao avanço, propulsão e integração casco-hélice; conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, serão apresentadas as equações experimentais utilizadas para validação e comparação dos resultados obtidos.

2.1 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamentos, transferência de calor e demais fenômenos associados utilizando simulações numérico-computacionais. Trata-se de uma técnica poderosa que abrange uma variedade de problemas de engenharia, como a aerodinâmica de aviões e a hidrodinâmica de navios (Malalasekera; Versteeg, 2007).

A demanda por resultados consistentes e otimização do tempo empregado para solução de problemas reais de engenharia, aliada ao aumento da capacidade de processamento dos computadores, fez com que o interesse pelos métodos numéricos aumentasse, em especial pelos fenômenos que podem ser modelados pela mecânica dos fluidos (Ferziger; Peric, 2002).

A abordagem CFD consiste na resolução de equações diferenciais que governam o escoamento de um fluido. Nessa abordagem, é definida uma região de interesse que será discretizada em volumes de controle infinitesimais, permitindo a aplicação da formulação diferencial para resolução do modelo matemático (Malalasekera; Versteeg, 2007).

No caso dos problemas envolvendo a hidrodinâmica de navios, de acordo com Molland (2011), a água pode ser considerada um fluido incompressível, e são necessárias duas equações do transporte para modelagem do problema, a equação da conservação da massa e da conservação da quantidade de movimento, esta conhecida como equação de Navier-Stokes.

A equação da continuidade, Equação (1), estabelece que, em um fluido real, massa não pode ser criada nem destruída, a massa é conservada. No contexto da simulação numérica, significa que a variação da massa dentro do volume de controle infinitesimal deve ser igual ao balanço de entrada e saída de massa pelas superfícies do volume.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Onde $\vec{V}$ representa o vetor do campo de velocidade do escoamento [m/s] e ρ refere-se a massa específica do fluido [kg/m³].

As Equações de Navier-Stokes derivam da Segunda Lei de Newton, reiterando que, para um sistema de coordenadas inerciais, a variação da quantidade de movimento do sistema é igual a soma das forças agindo sobre ele.

Analogamente a equação da continuidade, as equações estabelecem que a a variação da quantidade de movimento linear dentro do volume deve ser igual a taxa de entrada e saída pelas superfícies de contorno somadas às forças externas atuantes no volume. As equações (2), (3) e (4) descrevem a conservação do momento linear em coordenadas cartesianas tridimensionais para um fluido Newtoniano.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u)) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}(v)) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}(w)) + S_{Mz} \quad (4)$$

Onde:

x, y, z – Coordenadas cartesianas de referência [m]

p – Campo de pressão [Pa]

u, v e w – Componentes do campo de velocidade em cada eixo [m/s]

S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} – Termos fonte de momento linear [N.s]

μ – Viscosidade dinâmica [Pa.s]

As formulações apresentadas acima para a conservação da quantidade de movimento representam equações diferenciais de segunda ordem não-lineares, limitando sua resolução apenas para casos de geometrias e condições de contorno relativamente simples (Fox; McDonald, 2011).

Este caso é oposto ao fenômeno hidrodinâmico associado ao navio, sendo necessárias abordagens alternativas para sua compreensão. De acordo com Molland (2011), para simulação CFD do arrasto de um navio navegando à velocidade constante, as seguintes considerações a respeito do escoamento podem ser adotadas:

- Escoamento viscoso e incompressível
- Escoamento turbulento
- Escoamento em regime permanente
- Escoamento isotérmico
- Escoamento monofásico

Ressalta-se que a condição de contorno referente a superfície-livre (escoamento monofásico) foi adotada tendo em vista o contexto estudado neste trabalho. Porém, para uma simulação com foco na resistência ao avanço, é necessária a modelagem da interface ar-água para incorporação da resistência de ondas no cálculo do arrasto.

De maneira geral, uma simulação CFD possui três etapas principais: pré-processamento, solver e pós-processamento.

A fase de pré-processamento contempla a geração da geometria, da malha computacional e a aplicação das condições de contorno. É nesta fase que se deve garantir a boa adequação da geometria do casco a malha, o refino das regiões de interesse e a definição dos parâmetros representativos da física do problema.

Posteriormente, a simulação é iniciada e o solver gera a solução a partir da resolução do sistema de equações referentes ao conjunto dos elementos que discretizam a geometria (volumes de controle). Por fim, o pós-processamento é a fase em que os resultados são avaliados e comparados com dados experimentais.

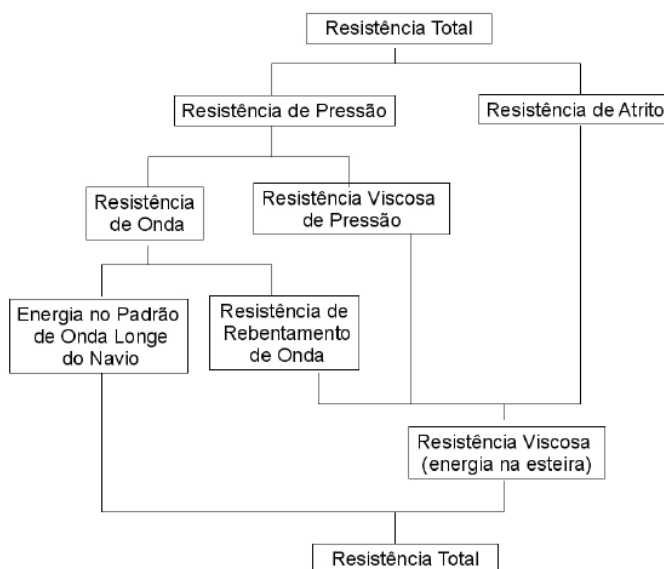
2.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

De acordo com Trindade (2015), a resistência ao avanço de um navio, a uma velocidade constante, é a força necessária para rebocar o navio a essa velocidade em águas tranquilas. Determinar essa força com precisão é crucial para seleção e otimização do hélice da embarcação, visando melhoras na sua eficiência propulsiva.

A resistência ao avanço, também chamada de arrasto, têm relação com o atrito da água, a geometria do casco e sua influência no campo de pressão do escoamento, e com as ondas geradas pelo deslocamento do navio (Bertram, 2012). Esse fenômeno possui origem complexa e, comumente, para facilidade de análise, é dividida em diferentes termos (Trindade, 2012).

De maneira geral, o arrasto de um navio pode ser dividido em três parcelas principais: resistência friccional, resistência viscosa de pressão e resistência de ondas. A Figura 1 mostra um fluxograma dessa divisão, exibindo a natureza de cada uma dessas parcelas.

Figura 1 – Fluxograma das três parcelas principais do arrasto de um navio.



Fonte: Trindade (2012)

2.2.1. Resistência friccional

A resistência friccional é resultado do atrito da água com o casco, e corresponde ao somatório das tensões de cisalhamento ao longo da superfície molhada da embarcação e seus apêndices. Essas tensões surgem devido aos efeitos viscosos do fluido, responsáveis por impor resistência a taxa de deformação do escoamento ao longo da superfície do navio.

Durante o escoamento, a interação do casco com o fluido gera uma região conhecida como camada-limite, onde as partículas de fluido, devido a condição de não-eskorregamento, tendem a igualar a velocidade da embarcação, produzindo um gradiente de velocidade conforme as linhas de corrente se afastam da superfície. É nessa região que os efeitos viscosos são predominantes e a resistência friccional é observada.

De acordo com a *International Towing Tank Conference* (ITTC), uma estimativa para o coeficiente de resistência friccional pode ser obtido a partir da Equação (5), oriunda de ensaios experimentais realizados em tanques de prova. Esta equação será utilizada na fase de pós-processamento da simulação CFD, visando a validação dos resultados obtidos.

$$C_f = \frac{0,075}{(\log R_e - 2)^2} \quad (5)$$

2.2.2. Resistência Viscosa de Pressão

A resistência viscosa de pressão é resultado do gradiente de pressão existente entre a proa e a popa do navio, gerada durante a navegação. Essa diferença é gerada devido a viscosidade do fluido e tem relação direta com a geometria do casco (Bertram, 2012).

Conforme o fluido escoar ao longo da superfície do casco, ocorre o aumento da espessura da camada-limite, favorecendo seu desprendimento e a geração de vórtices próximos a região da popa. Tais vórtices alteram o campo de velocidade do escoamento que, conseqüentemente, interferem na distribuição da pressão ao longo do navio, fazendo com que a pressão verificada na popa seja menor que a verificada na proa (Trindade, 2012).

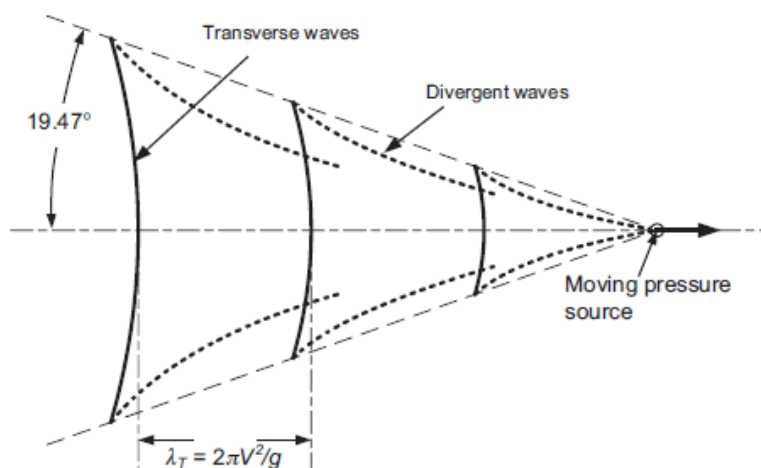
A resistência viscosa de pressão também é conhecida como resistência de forma, pois a presença de discontinuidades e mudanças abruptas de geometrias no casco, favorecem a separação da camada-limite, podendo aumentar a resistência.

2.2.2. Resistência de ondas

Conforme o navio se desloca, é possível observar um sistema de ondas característico em torno da embarcação. Este sistema é gerado pela necessidade do navio deslocar o fluido a sua frente que, ao absorver energia na forma de pressão oriunda do casco, compõe uma das parcelas de força contrária ao deslocamento do navio.

De acordo com Molland (2011), o sistema de ondas pode ser definido a partir do padrão de ondas de Kelvin, que descreve o navio como um ponto de pressão avançando no meio fluido. Seguindo a hipótese de águas profundas, o padrão é composto por dois sistemas de ondas, denominados sistemas de ondas divergentes e transversais e limitados por duas retas que formam um ângulo de $19,47^\circ$ com o ponto de pressão, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Padrão das ondas de Kelvin



Fonte: Molland (2014)

A resistência de ondas compõe uma parcela significativa da resistência ao avanço do navio, especialmente para regimes de operação, números de Froude, mais elevados.

Contudo, maiores detalhes a respeito desse fenômeno fogem ao escopo deste trabalho, uma vez que a simulação foi realizada a partir da consideração de baixo Froude de operação, desprezando, portanto, os efeitos da superfície-livre.

2.2.3. Determinação da Resistência

Uma vez que foram determinadas cada uma das parcelas da resistência ao avanço, é possível obter o arrasto total da embarcação. De maneira simplificada, e desconsiderando efeitos aerodinâmicos e de apêndices, pode-se determinar a resistência como a soma das três componentes definidas anteriormente, exemplificada pela Equação (6).

$$R_t = R_f + R_{vp} + R_w \quad (6)$$

Onde, R_f , R_{vp} e R_w representam as resistências friccional, viscosa de pressão e de onda, respectivamente, em Newtons.

Uma outra maneira de descrever o fenômeno total é através do uso do coeficiente de resistência, C_d que, de acordo com a ITTC, pode ser calculado através da Equação (7).

$$C_d = \frac{R_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (7)$$

Onde ρ , V e A representam a densidade do fluido [kg/m^3], a velocidade do navio [m/s] e a área molhada [m^2], respectivamente.

A Equação (7) demonstra a relação da resistência ao avanço com o quadrado da velocidade da embarcação, deixando claro que o campo de velocidades em torno do casco influencia diretamente no arrasto.

Na utilização de método numéricos para determinação do arrasto, ressalta-se que softwares como o OpenFoam utilizam os resultados obtidos dos campos de pressão e velocidade para calcular a força de arrasto exercida sobre a geometria.

Dessa forma, tendo em vista que para determinação do coeficiente de esteira, W , é necessário conhecer o campo de velocidades ao redor da embarcação, foi utilizada a resistência ao avanço como referência para validação do campo de velocidades.

Uma vez que a força encontrada através da simulação é suficientemente próxima do resultado experimental, considerou-se razoável inferir que as velocidades calculadas numericamente são próximas das velocidades do escoamento real.

2.3 HÉLICE PROPULSOR

A função do hélice é gerar uma força suficientemente grande para rebocar o navio na velocidade de serviço desejada. De acordo com Trindade (2012), o projeto propulsivo deve ser capaz de sanar dúvidas relativas à eficiência, capacidade de gerar empuxo, cavitação e as vibrações induzidas pela rotação do propulsor.

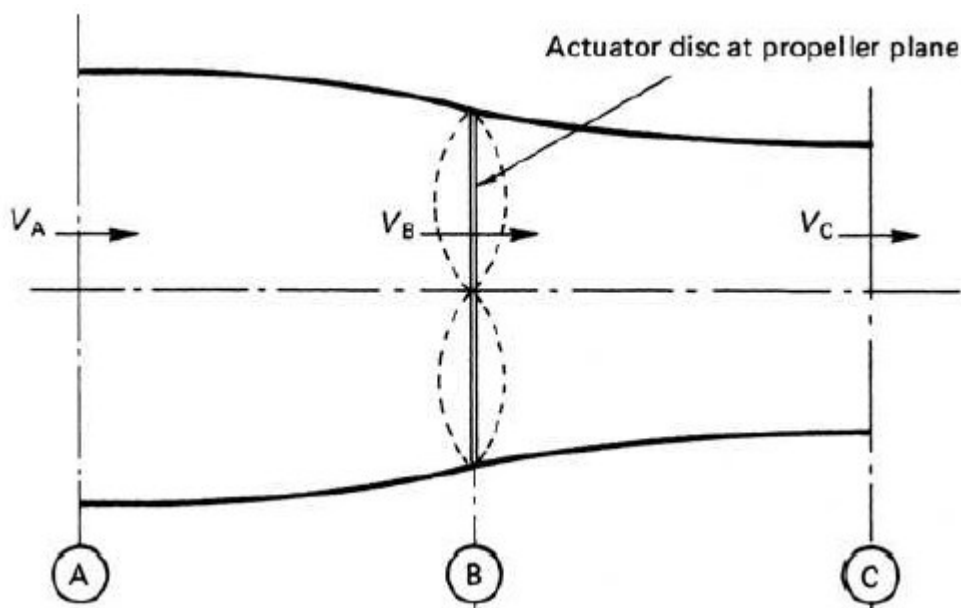
De maneira geral, a força de empuxo é gerada a partir de dois princípios físicos: ação e reação e variação da quantidade de movimento. Conforme as pás giram, o propulsor acelera o fluido ao seu redor, causando mudanças no campo de velocidades que, respeitando a Segunda Lei de Newton, gera uma força no sentido de avanço do navio (Molland, 2012).

2.3.1. Teoria do disco atuador

A maneira mais simples de representar o funcionamento do propulsor é, como citado anteriormente, através da análise da variação da quantidade movimento. A teoria do disco atuador relaciona a força propulsiva com as velocidades induzidas pela rotação do hélice, de modo que a força requerida para produzir essa variação de momento linear aparece, no propulsor, como força de reação do fluido, empurrando o navio na direção do deslocamento (Carlton, 2007).

A Figura 3 apresenta um modelo simplificado do campo de velocidades na região de atuação do disco, onde a “A” e “C” representam o escoamento a jusante e a montante do propulsor, respectivamente:

Figura 3 - Campo de velocidades simplificado no propulsor



Fonte: Carlton (2007)

Se considerarmos que o escoamento, ao passar pelo propulsor, tem sua velocidade aumentada de V_A para V_C devido a rotação do hélice, e que o fluxo de massa por unidade de tempo pode ser definido como $\dot{m}$, então o empuxo (T) pode ser escrito de acordo com a Equação (8) (Molland, 2012).

$$T = \dot{m}(V_C - V_A) \quad (8)$$

Assim, torna-se evidente que o empuxo gerado pelo propulsor tem relação direta com a velocidade com que o hélice é atingido pelo escoamento. De modo geral, é desejável um escoamento o mais uniforme possível nessa região, possibilitando o propulsor a induzir velocidades mais elevadas e, conseqüentemente, gerar mais empuxo.

A determinação da velocidade desse escoamento, no entanto, não é trivial. A localização do propulsor, próxima ao casco, faz com que o escoamento seja influenciado pelo deslocamento do navio, afetando sua eficiência e interferindo no projeto do sistema propulsivo (Molland, 2012).

Comumente, os ensaios de propulsores em águas abertas são realizados desconsiderando a presença do casco, tornando necessário quantificar a influência

do navio no rendimento propulsivo através de um coeficiente que relacione as diferenças de velocidade na região do hélice (Trindade, 2012). Essa relação é determinada pelo coeficiente de esteira de Taylor (W).

2.3.2. Coeficiente de esteira de Taylor

Conforme o navio se desloca, é possível observar sua interação com o fluido a partir de duas características: um padrão de ondas movimentando-se ao longo do casco e uma região de escoamento turbulento que cresce ao longo do comprimento da embarcação, prolongando-se atrás do casco na forma de esteira (Holtrop, Mennen, 1982).

A Figura 4 mostra um exemplo desta interação identificada no entorno da embarcação.

Figura 4 - Esteira formada pelo deslocamento do navio



Fonte: Wikipedia (2010)

A presença da esteira faz com que exista uma discrepância entre a velocidade de avanço do propulsor e a velocidade de serviço do navio, implicando que, na região do hélice, seja verificada uma velocidade relativa, conhecida como velocidade média de avanço (V_A).

O coeficiente de esteira, portanto, é utilizado a fim de corrigir a modificação do escoamento no propulsor, e pode ser determinado através da Equação 9 (Padovezi, 1997).

$$V_A = V_S(1 - W) \quad (9)$$

Onde V_A , V_S e W representam a velocidade média de avanço [m/s], a velocidade de serviço do navio [m/s] e o coeficiente de esteira de Taylor, respectivamente.

De acordo com Carlton (2007), a magnitude da esteira é fortemente influenciada pela geometria do casco, de modo que navios com coeficiente prismático mais elevados tendem a aumentar a intensidade da esteira e, conseqüentemente, reduzir a velocidade efetiva do fluxo que atinge o propulsor.

Essa dependência ocorre pois o campo de velocidades a ré é determinado pela forma como o casco desvia e acelera o fluido ao seu redor, de modo que cada geometria de casco produz distribuições distintas de velocidades médias na região do propulsor.

O coeficiente W pode ser obtido através medições experimentais da velocidade da esteira na ausência do propulsor, situação denominada casco-nú. Comumente, utiliza-se equações empíricas oriundas desses ensaios para estimativa deste parâmetro durante o projeto propulsivo.

2.3.3. Modelos empíricos

Devido à complexidade do escoamento na região do hélice, a determinação direta do coeficiente de esteira por métodos analíticos é, muitas vezes, inviável. Dessa forma, foram desenvolvidos, ao longo dos anos, modelos empíricos baseados em resultados experimentais de séries sistemáticas para estimativa de W .

Apesar de fornecerem estimativas práticas empregando baixo tempo de engenharia, é necessário ressaltar que os modelos empíricos apresentam faixas de aplicabilidade baseadas das características geométricas e de operação de cada casco, evidenciando suas limitações para determinados tipos de navio.

Para comparação dos resultados numéricos apresentados neste trabalho, serão utilizadas equações disponíveis em Molland (2011). As equações selecionadas foram as mais próximas das condições reais de operação do navio patrulha estudado, e representam valores do coeficiente para dois propulsores. A Tabela 1 relaciona os valores de W as suas respectivas séries sistemáticas.

Tabela 1 - Modelos empíricos para estimativa do coeficiente de esteira

Modelo empírico	"W"
Harvald	0.3230
Taylor	0.2125
Flikkema	0.2269
NPL	0.1200
Holtrop	-0.2060

Fonte: Autor (2025).

3. METODOLOGIA

Busca-se com este capítulo detalhar os métodos e ferramentas utilizadas para elaboração do presente trabalho. Assim, visando uma melhor compreensão, este capítulo será dividido em tópicos relativos ao modelo de casco utilizado, preparação e aplicação da técnica CFD, determinação do campo de velocidade próximo ao propulsor e cálculo do coeficiente de esteira.

3.1 NAVIO PATRULHA FLUVIAL (NAPA)

Os Navios Patrulha Fluviais da Marinha do Brasil, também conhecidos como NAPA, são embarcações de médio porte especializadas para operações em rios e ações de apoio a populações ribeirinhas na bacia Amazônica.

São embarcações deslocantes de aproximadamente 60 metros de comprimento que operam em velocidades próximas aos 15 nós. A Figura 5 mostra a embarcação NAPAFlu Pedro Teixeira em operação no Rio Amazonas, e a Tabela 2 algumas das suas principais características.

Figura 5 - NapaFlu Pedro Teixeira



Fonte: Wikipédia (2010)

Sequencialmente, na Tabela 2, mostra-se algumas das suas principais características.

Tabela 2 - Características e dimensões do NapaFlu Pedro Teixeira

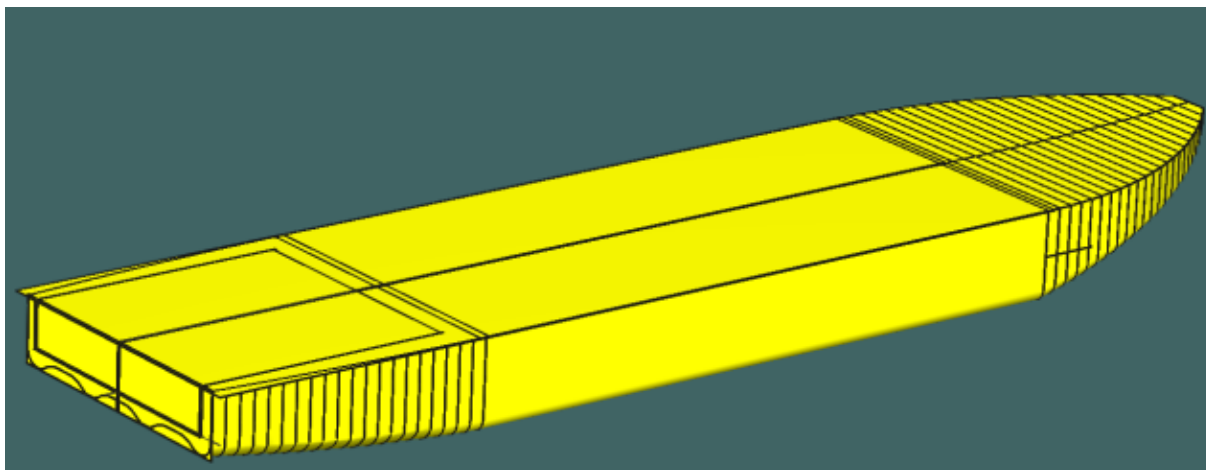
Comprimento	63.74	m
Boca	9.35	m
Calado	2.40	m
Deslocamento leve	582	ton
Velocidade máxima	16	nós

Fonte: Autor (2025).

Para elaboração deste trabalho, um modelo em fase de projeto conceitual elaborado pelo departamento de Engenharia Naval da Universidade de São Paulo foi utilizado como objeto de estudo.

O modelo traz como principal característica um arranjo geométrico visando a utilização de três propulsores, localizados na popa da embarcação. A Figura 6 mostra o casco utilizado através da interface da ferramenta MaxSurf Modeler.

Figura 6 - Modelo de navio NAPA pela interface do MaxSurf Modeler



Fonte: Autor (2025).

As dimensões principais do modelo e navio em escala real são mostradas na Tabela 3. Para determinação do coeficiente de esteira, buscou-se retratar o regime de operação real das embarcações através do número de Froude, quantificado em 0.30.

Esse regime de operação corresponde a uma velocidade de serviço de 1.88 m/s para o modelo.

Tabela 3 - Dimensões principais do modelo de navio NAPA

		NAPA (Escala real)	NAPA (Modelo)
Comprimento entre perpendiculares	Lpp [m]	44	4.00
Boca	B [m]	11	1.00
Pontal	D [m]	3	0.27
Calado	T [m]	1.40	0.13
Área molhada	S [m ²]	519.40	4.32
Volume deslocado	V [m ³]	470.90	0.35

Fonte: Autor (2025).

3.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Nesta seção, serão apresentados os principais parâmetros utilizados na preparação e execução da simulação numérica. Tendo em vista os elevados custos relativos aos softwares comerciais para análises CFD, para o processamento do método numérico o programa utilizado foi o OpenFoam, uma ferramenta de código aberto e disponível para toda comunidade de engenheiros.

Ressalta-se que, embora o CFD seja uma técnica capaz de gerar bons resultados em projetos navais, seus resultados exigem sempre calibração e validação cuidadosa contra dados experimentais ou de campo, de modo a quantificar e reduzir as incertezas presentes no processo numérico.

3.2.1. Geometria e domínio computacional

O processo de geração da malha computacional no OpenFoam consiste, basicamente, em duas etapas: a geração do domínio computacional e a integração da superfície estudada, neste caso o modelo de navio NAPA, ao domínio.

A geração do domínio computacional é feita através do utilitário do OpenFoam denominado *blockMesh*. Essa função permite a criação da malha através da definição de blocos hexaédricos orientados dentro de um sistema cartesiano, que a partir da determinação das dimensões de cada bloco, possibilita o processo de refino do domínio.

A determinação das dimensões do domínio computacional deve levar em consideração as condições de contorno adotadas para modelagem física do

problema. De maneira geral, é desejável que os limites da malha estejam o mais longe possível do casco, garantindo que eventuais restrições geométricas não interfiram no resultado numérico.

No entanto, quanto maiores as dimensões do domínio, maior será o custo computacional e maior o tempo de engenharia empregado. Dessa forma, buscando o equilíbrio entre estes dois fatores, utilizou-se as recomendações feitas pela ITTC em “*Practical Guidelines for Ship Resistance CFD*”, de 2014.

Nesse guia, a *International Towing Tank Conference* recomenda que para simulações CFD que buscam retratar a hidrodinâmica de navios, o domínio computacional seja definido como função do comprimento entre perpendiculares (L_{pp}) da embarcação.

A região denominada *inlet*, referente a entrada do escoamento, foi definida em dois comprimentos entre perpendiculares da proa do modelo, enquanto o *outlet*, saída, foi estabelecido a uma distância de três L_{pp} da popa da embarcação.

Para fronteira lateral utilizou-se um comprimento entre perpendiculares para bombordo do modelo e a altura (profundidade) do domínio também foi definida em um L_{pp} . A Figura 8 mostra a geometria gerada a partir do utilitário *blockMesh*.

Tendo em vista a integração da geometria do modelo através do *snappyHexMesh*, é desejável que os volumes de controle, blocos, possuam uma razão de aspecto próxima de 1, representando um hexaedro perfeito.

A Tabela 4 sintetiza as dimensões do domínio computacional, bem como as características dos volumes de controle (células) responsáveis pela discretização da malha.

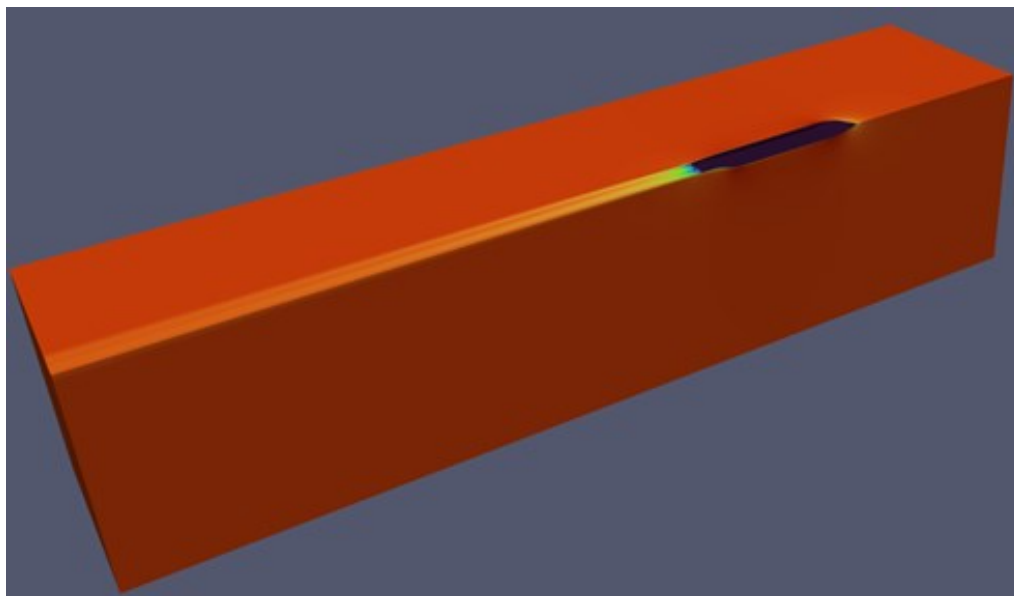
Tabela 4 - Dimensões do domínio computacional

Eixo	Dimensão [m]	Quantidade de células	Dimensão das células [m]
X	20	57	0.35
Y	4	11	0.35
Z	4.13	11	0.35

Fonte: Autor (2025)

A seguir, a Figura 7 mostra a geometria gerada a partir do utilitário *blockMesh*, pela interface do programa Paraview.

Figura 7 - Domínio computacional gerado pelo utilitário BlockMesh



Fonte: Autor (2025)

3.2.2 Integração do modelo ao domínio computacional

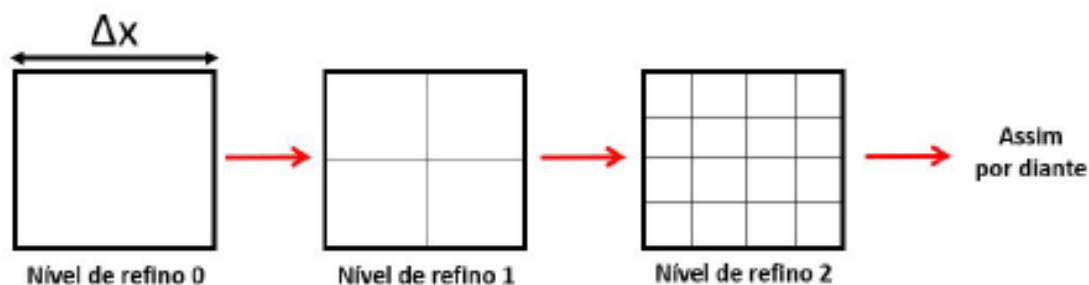
Para continuação da preparação da simulação, é necessária a integração do modelo ao domínio gerado anteriormente. Como já discutido, essa integração será realizada com o utilitário *snappyHexMesh*.

O diretório do *snappyHexMesh* apresenta uma quantidade elevada de dados de entrada que fogem o escopo deste trabalho. Dessa forma, na sequência, serão descritas apenas as etapas principais do processo de geração, tendo como foco o resultado obtido para determinação do coeficiente de esteira.

De maneira geral, a técnica utilizada para geração da malha consiste, inicialmente, num processo de refino dos elementos gerados pelo *blockMesh*, onde cada volume de controle é dividido, em suas três dimensões, por um fator 2^n , em que n representa o nível de refino desejado para célula.

A Figura 8 mostra o processo de divisão dos volumes de controle realizado pela ferramenta.

Figura 8 - Processo de divisão dos volumes de controlo realizado pelo blockMesh



Fonte: Farah (2021)

Posteriormente, o refino é realizado a partir da identificação dos contornos da geometria analisada, utilizando o recurso denominado *featureAngle*. Este recurso usa como base um ângulo definido pelo usuário como parâmetro para o mapeamento das arestas da superfície que serão refinadas.

De maneira simplificada, se o ângulo formado entre os vetores normais de duas superfícies adjacentes for menor que o valor definido, a aresta comum às superfícies será utilizada.

Analogamente a etapa inicial, também se define os níveis de refino na superfície mapeada bem como em regiões de interesse da simulação. No desenvolvimento deste trabalho, a região da esteira, adotada do corpo de popa até a região de *Outlet*, foi submetida a um processo de refino de nível 4, aumentando a discretização do campo de velocidades próximo ao propulsor.

Por fim, são adicionadas as camadas adjacentes a superfície de interesse, chamadas *layers*. Essas camadas são de extrema importância para simulação, pois é nessa região que será solucionada a camada limite. Este trabalho utiliza funções parede para modelagem da camada limite.

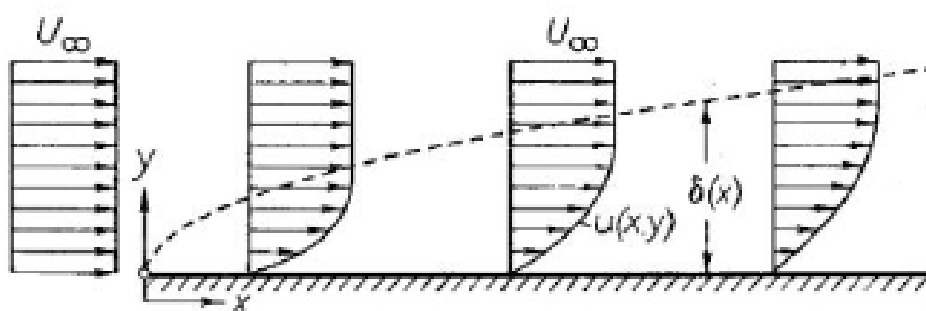
3.2.3 Camada limite e Funções parede

De acordo com Vesseteeg e Malalasekera (2007), quando um fluido escoar sobre uma superfície, a velocidade do escoamento na parede, devido aos efeitos viscosos, é igual a zero. Essa condição é conhecida como condição de não-eskorregamento.

No caso do escoamento em torno de um navio, a velocidade tangencial do fluido aumenta a medida que o escoamento se distancia da superfície, fazendo com que nessa região seja verificado um gradiente de velocidade, pois conforme as linhas de corrente se afastam do casco, os efeitos viscosos tendem a diminuir.

A Figura 9 esboça o comportamento das linhas de corrente do escoamento em contato com uma superfície.

Figura 9 - Formação da Camada limite ao longo do escoamento.



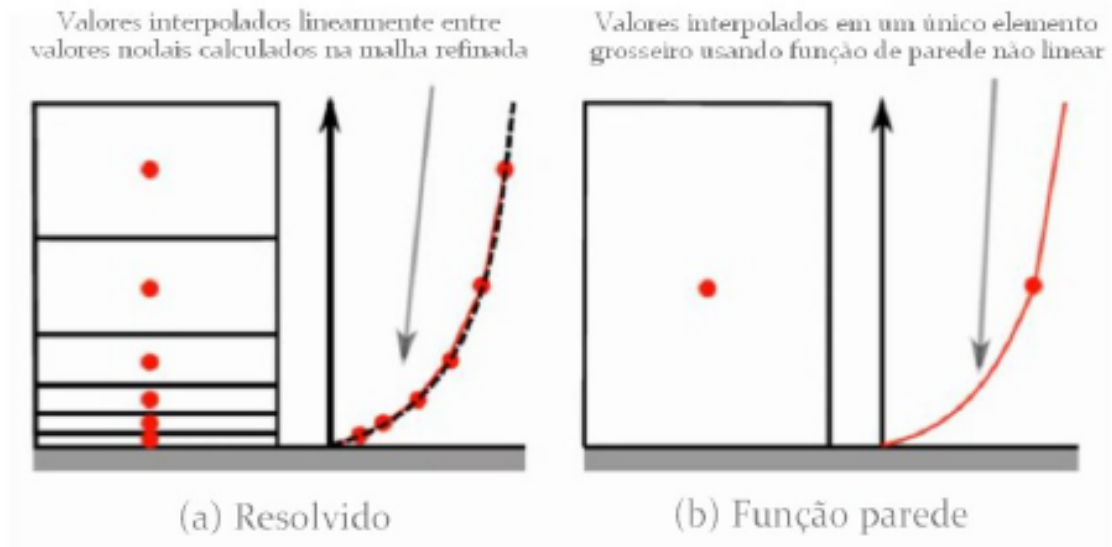
Fonte: Schlichting e Gersten (2017).

O gradiente verificado na camada limite implica que, para solução acurada dos campos de pressão e velocidade nessa região, é necessário maior nível de refino e discretização da malha computacional. Essa prática, no entanto, pode elevar significativamente o custo computacional da simulação.

Dessa forma, as funções parede apresentam-se como ferramentas alternativas para modelagem da camada limite. De acordo com Liu (2017), funções paredes podem ser definidas como equações semiempíricas que descrevem o comportamento do escoamento junto a superfície.

A vantagem da utilização de funções parede é que se torna possível eliminar a necessidade de malhas computacionais muito refinadas nessa região, sendo possível a solução da simulação através da adição de poucas células próximas a superfície do casco (Figura 10).

Figura 10 - Discretização através da função parede.



Fonte: Farah (2021)

De acordo com Bredberg (2000), para garantir que as funções parede entreguem resultados precisos, é necessário que o primeiro elemento (camada) adjacente à superfície esteja localizado a uma distância adequada da geometria. Essa localização é determinada utilizando o conceito de distância adimensional normal a superfície (y^+), descrito através da Equação (10).

$$y^+ = \frac{y x u_\tau}{\nu} \quad (10)$$

Onde y representa a distância do ponto considerado até a superfície do corpo [m], u_τ , Equação 11, é a velocidade friccional [m/s], e ν a viscosidade cinemática do fluido [m²/s]

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (11)$$

Sendo ρ a densidade do fluido [kg/m³] e τ_w a tensão de cisalhamento local atuante no fluido [Pa], a qual será discutida posteriormente.

Para atingir resultados precisos, é necessário que o primeiro elemento esteja compreendido na região denominada subcamada logarítmica, onde o valor de y^+ deve manter-se dentro do intervalo: $30 < y^+ < 300$.

3.2.4 Geração das camadas adjacentes à superfície

Para implementação das *layers* da malha computacional, o parâmetro definido é o *firstLayerThickness*. Esse parâmetro define a espessura do primeiro elemento adjacente a superfície, e pode ser calculado pelo uso de equações empíricas disponíveis na literatura.

Primeiramente, realiza-se a estimativa do coeficiente friccional, dado pela Equação 12, considerando um escoamento viscoso e turbulento sobre uma placa plana (Schlichting; Gersten, 2017).

$$C_f = 0.37(\log R_e)^{-2.584} \quad (12)$$

Em seguida, estima-se a tensão de cisalhamento na parede da superfície, descrita anteriormente, pela Equação 13.

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (13)$$

Por fim, calcula-se a distância nodal do volume de controle mais próximo a parede Equação (14), y , através da combinação das Equações (12) e (13) e do valor de y^+ adotado para simulação.

$$y = \frac{y^+ \nu}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}} \quad (14)$$

Buscando atender os critérios estabelecidos para o bom uso das funções parede, estabeleceu-se um valor de y^+ de 50 para cálculo da espessura da primeira camada, garantindo a localização do elemento na subcamada logarítmica. A Tabela (5) sintetiza os valores dos parâmetros utilizados para geração da malha.

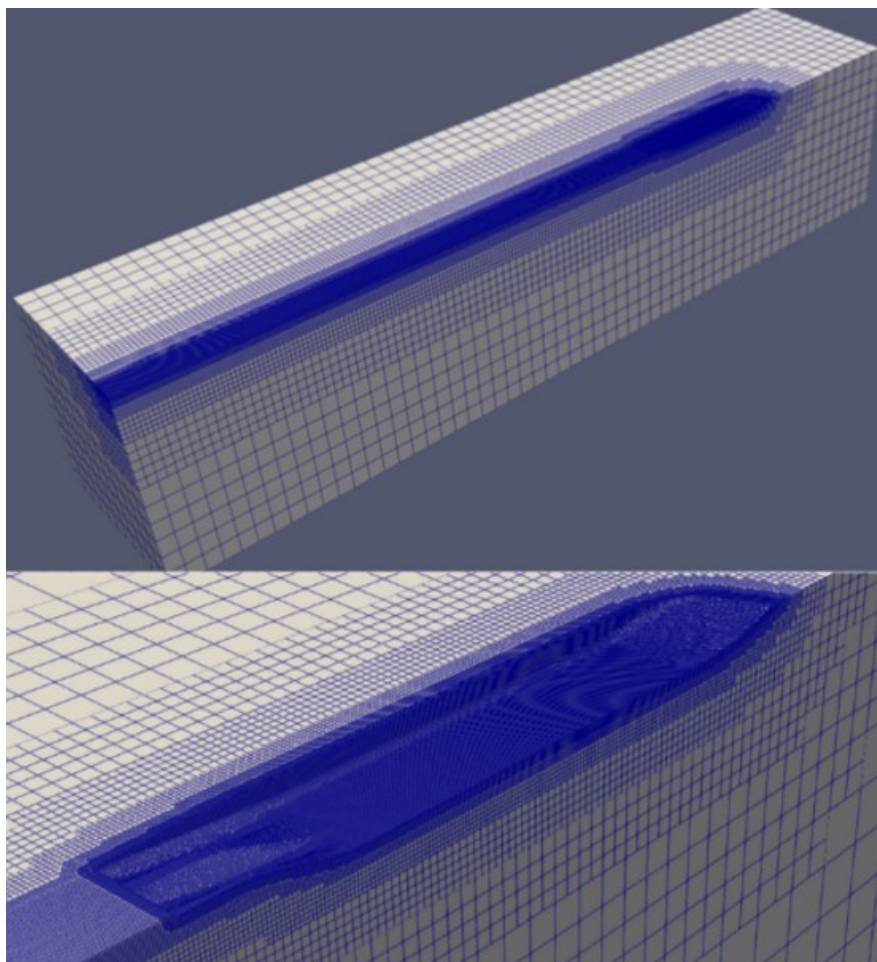
Tabela 5 - Parâmetros utilizados para geração das *layers*

C_f	2.49E-03
τ_w	4.39
y^+	50
$\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$	6.63E-02
y	1.34E-03

Fonte: Autor (2025)

A Figura 11 mostra a malha finalizada através da interface do programa Paraview.

Figura 11 - malha finalizada através da interface do programa Paraview



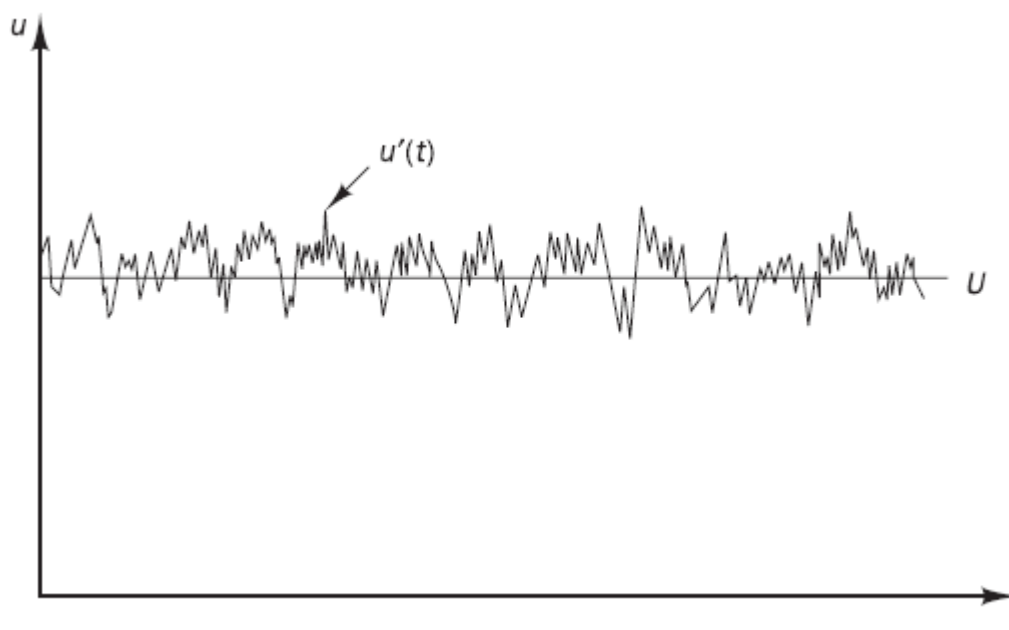
Fonte: Autor (2025)

Ao final da adição das *layers*, o comando *checkMesh* é utilizado para uma avaliação da qualidade de malha, buscando identificar eventuais defeitos que podem comprometer o processamento da simulação e os resultados gerados.

3.2.5 Turbulência

Um escoamento é definido como turbulento quando as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo da trajetória das linhas de corrente, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades (Fox; McDonald, 2011). A Figura 12 mostra as oscilações características da velocidade de um escoamento turbulento no decorrer do tempo.

Figura 12 - Oscilações velocidade do escoamento no decorrer do tempo.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

Nesse tipo de escoamento, é possível observar a presença de diferentes escalas turbulentas, responsáveis por produzir as chamadas cascatas de energia. As maiores escalas surgem devido a instabilidades inerciais do escoamento, munidas de maior energia cinética, e tendem a rapidamente ser separadas em escalas menores onde a energia será dissipada pelos efeitos viscosos (Araújo, 2014).

Assim, a turbulência ocorre quando os efeitos viscosos são inferiores aos efeitos de inerciais, de modo que as forças viscosas não são capazes de dissipar a energia cinética das partículas fluidas.

A caracterização de um escoamento como laminar ou turbulento é determinada através do número de Reynolds (Equação 15), um adimensional que relaciona a intensidade das forças de inércia do escoamento e das forças viscosas (Versteeg; Malalasekera, 2007).

$$Re = \frac{\rho \times U \times L}{\mu} \quad (15)$$

Onde ρ e μ representam, respectivamente, a massa específica [kg/m^3] e a viscosidade dinâmica [Pa.s] do fluido, U é a velocidade média do escoamento [m/s] e

L é um comprimento linear característico, comumente adotado como o comprimento entre perpendiculares para simulações de navios.

De acordo com Bertram (2012), o escoamento em torno de uma embarcação sofre a transição para o regime turbulento logo no início do contato com o casco, onde o número de Reynolds assume valores superiores a 10^6 , conhecido como Reynolds crítico.

Dessa forma, é fundamental considerar os efeitos gerados pela turbulência ao longo do escoamento, pois influenciam diretamente nos campos de pressão e velocidade em torno do casco e, portanto, na determinação da resistência ao avanço.

3.2.6 Modelos de turbulência

O fenômeno da turbulência pode ser modelado de diferentes maneiras, as quais variam de acordo com o custo computacional empregado para representação dos efeitos turbulentos.

De maneira geral, métodos mais robustos como LES ou DNS capturam melhor as escalas de energia turbulenta e provém resultados mais acurados. No entanto, esses métodos demandam grande esforço computacional, e, a depender do problema simulado, é possível obter bons resultados com métodos menos custosos.

A abordagem RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), utilizada neste trabalho, tem como objetivo quantificar as propriedades médias do escoamento através da modelagem matemática das equações de Navier-Stokes. É o modelo mais utilizado pelos softwares devido ao menor custo computacional.

Por se tratar de uma abordagem que trabalha com valores médios para solução da simulação, a abordagem RANS não descreve variações temporais do escoamento, mas, de acordo com Wilcox (2006) é um método que apresenta bons resultados para obtenção da resistência viscosa de corpos sujeitos a escoamentos turbulentos.

A utilização do modelo RANS demanda a definição de alguns parâmetros turbulentos, utilizados para introdução da turbulência dentro das equações de Navier-Stokes. Neste trabalho, o modelo utilizado foi o $k - \omega$ SST, em que k representa a energia cinética turbulenta e ω corresponde a taxa de dissipação dessa energia.

Esses parâmetros compõem o Tensor de Reynolds, este tensor é, então, introduzido nas equações do transporte do escoamento. O modelo $k - \omega$ SST, de modo geral, possui melhor performance em escoamentos com gradientes adversos de pressão, comum em no caso de navios, além de apresentar melhores resultados nas regiões próximas a parede.

Para o cálculo dos parâmetros turbulentos, foram utilizadas equações disponíveis na literatura. As equações, caso seja de interesse do leitor, podem ser encontradas em Islam e Soares (2018). A Tabela 6 sintetiza os valores de k e ω utilizados para o processamento da simulação para cada regime de operação, junto dos parâmetros ambientais necessários para o processamento.

Tabela 6 - valores de k e ω utilizados para o processamento da simulação

Froude		0.20	0.25	0.30
Velocidade	m/s	1.25	1.57	1.88
Densidade da água	kg/m ³	998	998	998
Viscosidade cinemática	m ² /s	8.92E-07	8.92E-07	8.92E-07
k	m ² /s ²	1.24E-03	1.83E-03	2.52E-03
Ω	1/s	82.31	122.78	170.27

Fonte: Autor (2025)

3.2.7 Condições de contorno

Para fase de processamento da simulação numérica é necessária a definição de condições de contorno para o problema estudado. Para cada fronteira do domínio computacional deve-se atribuir uma condição.

A região de *inlet* é definida como entrada de velocidade, ou seja, a região onde ocorre a entrada de fluido para os volumes de controle. As laterais, o fundo e o topo do domínio foram definidos como planos de simetria, enquanto o fundo, *outlet*, foi setado como região da saída de pressão.

Por fim, a superfície do casco é caracterizada como *wall*, que se refere a uma condição de não escorregamento do fluido junto a superfície. A Tabela 7 mostra de forma sintetizada as condições de contorno utilizadas para simulação.

Caso seja de interesse do leitor, maiores informações a respeito das condições de contorno para simulações CFD podem ser encontradas em Greenshields (2024).

Tabela 7 - Condições de contorno utilizadas para simulação

	Entrada	Saída	Topo	NAPA
U	Valor fixo	Gradiente Zero	Simetria	Parede
k	Valor fixo	Gradiente Zero	Simetria	KqR Função parede
Ω	Valor Fixo	Gradiente Zero	Simetria	Omega Função parede
Viscosidade Turbulenta	Calculado	calculado	Simetria	Nutk Função Parede
P	Gradiente Zero	Valor fixo	Simetria	Gradiente Zero

Fonte: Autor (2025)

3.2.7 Validação de resultados

Para o processo de validação dos resultados numéricos, como mencionado anteriormente no capítulo de Fundamentação Teórica, será utilizada a Equação (5), proposta pela *International Towing Tank Conference* (ITTC), em 1957. Essa equação fornece uma estimativa para o coeficiente de resistência friccional da embarcação.

Assim, foram testadas três simulações em três diferentes regimes de operação. Os regimes foram definidos pelo número de Froude, setados em 0.20, 0.25 e 0.30. Ressalta-se que para determinação do coeficiente de esteira a condição de Froude 0.30 foi utilizada.

A Tabela 8 sintetiza os parâmetros de cada uma das simulações. Os parâmetros ambientais foram mantidos constantes para os três casos.

Tabela 8 - Condição de operação para simulação de validação

Froude	Velocidade [m/s]	Reynolds
0.20	1.25	5.62E06
0.25	1.57	7.02E06
0.30	1.88	8.43E06

Fonte: Autor (2025)

3.2 PLANOS PARALELOS AO PROPULSOR

Para determinação do coeficiente de esteira é necessário conhecer a velocidade com que o escoamento atinge o propulsor. Essa grandeza, ressalta-se, é uma velocidade relativa entre as velocidades de avanço da embarcação e da esteira gerada durante a navegação.

Dessa forma, a estratégia adotada foi a definição de planos orientados paralelamente as pás dos propulsores, onde, utilizando a função *probes* disponível no OpenFoam, calculou-se as velocidades ortogonais aos planos, direcionadas no sentido do avanço do navio patrulha.

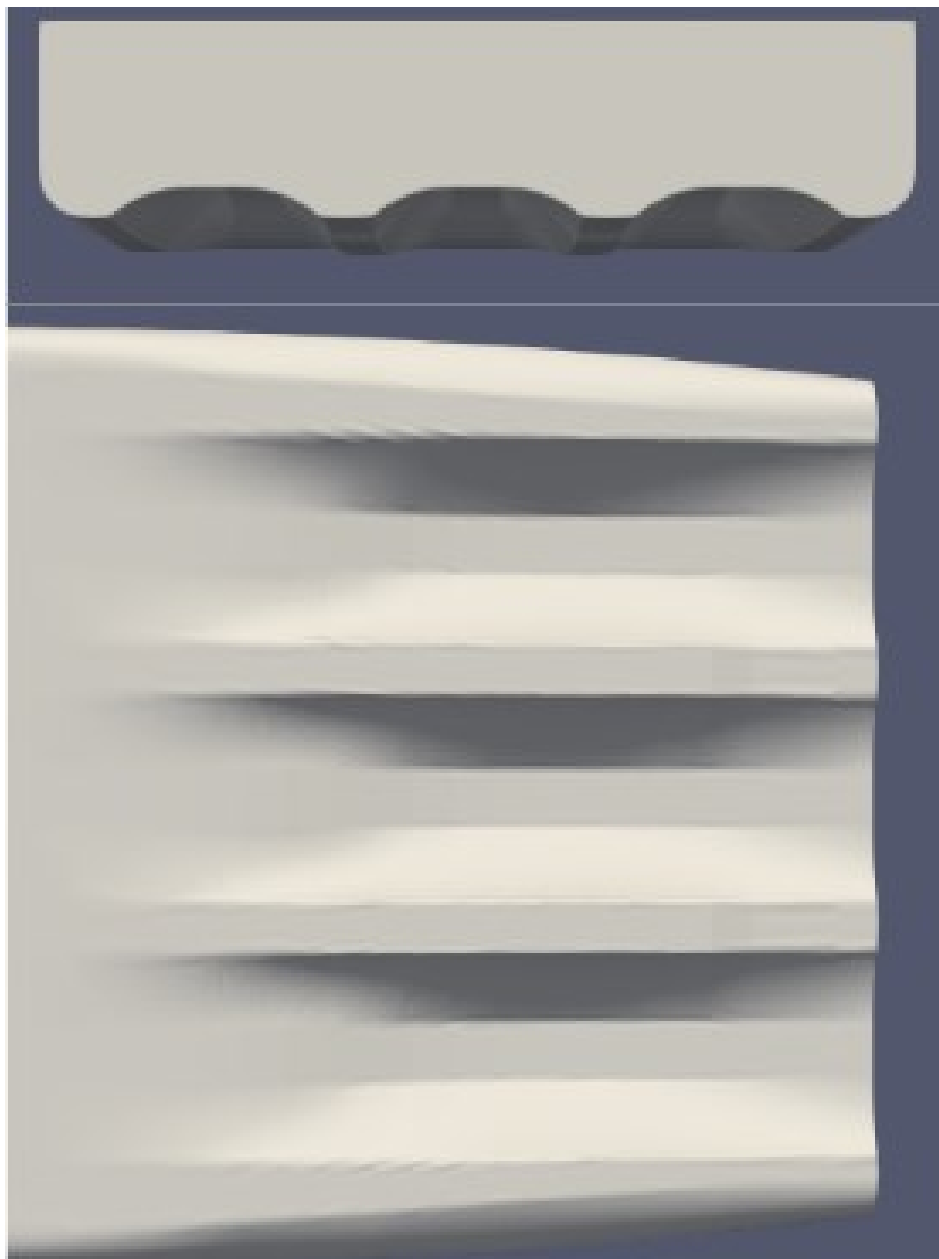
A função *probes* permite o monitoramento e a coleta de dados de campo, como pressão e velocidade, em locais específicos dentro do domínio computacional. Estes locais são definidos como pontos dentro de um sistema cartesiano tridimensional.

O processo consistiu, de maneira geral, na discretização da região de operação do propulsor da embarcação estudada. Ao todo foram definidos oito planos paralelos ao propulsor, discretizados do ponto mais extremo do casco, definido como a popa do modelo, até o início da quilha, região em que, mesmo por questões físicas, não é possível a instalação do propulsor.

Ao longo dos planos, os pontos foram definidos de forma a delimitar uma região retangular no plano do propulsor. É necessário ressaltar que, na fase atual do projeto de navio patrulha, ainda não há definição do diâmetro do hélice, de modo que o contorno da região retangular foi definido com base nos limites impostos pela geometria do canal do propulsor.

A Figura 13 mostra a popa do navio através da interface do software Paraview, onde é possível observar os dutos reservados a alocação do sistema propulsivo.

Figura 13 – Canais reservados aos propulsores

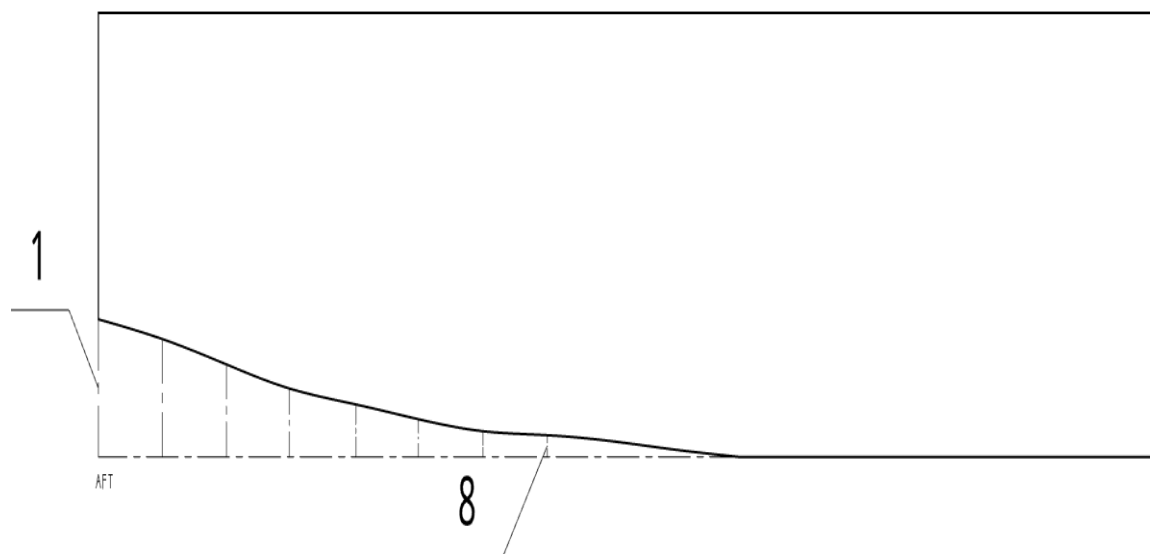


Fonte: Autor (2025)

Assim, as coordenadas definidas para o mapeamento do campo de velocidades foram definidas considerando a largura do duto como espaço máximo disponível para o diâmetro do propulsor e a altura relativa entre a extremidade da popa e o início da quilha.

Ao todo, considerando os pontos em cada plano, foram definidos 207 pontos para coleta das velocidades ortogonais. A Figura 14 mostra um esboço da vista lateral do modelo, bem como a distribuição das coordenadas de popa a quilha.

Figura 14 - Planos paralelos ao propulsor



Fonte: Autor (2025)

A Figura mostra o plano 1, definido como plano da popa, até o plano 8, definido como plano do início da quilha, a partir de uma vista lateral para bombordo do modelo de NAPA. É válido ressaltar que, conforme a região analisada se aproxima da quilha, a altura dos planos diminui devido a restrições físicas do casco.

A partir da coleta das 207 velocidades ortogonais, uma velocidade ortogonal média foi calculada. Esta velocidade, então, foi definida como a velocidade de avanço média, V_A , para cada um dos planos. Dessa forma, o coeficiente de esteira pode ser calculado a partir da Equação 16.

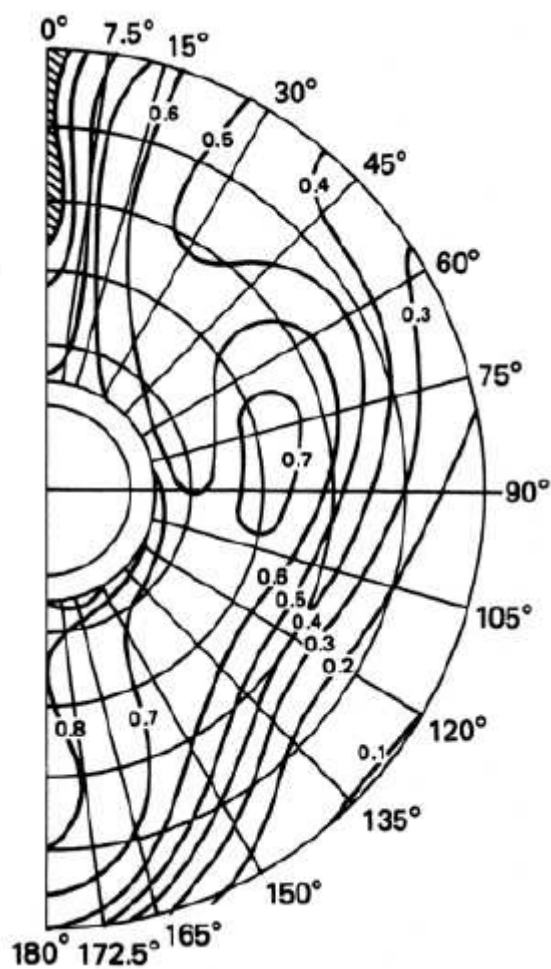
$$W = 1 - \frac{V_A}{V_S} \quad (16)$$

Onde V_A e V_S representam a velocidade de avanço média e a velocidade de serviço da embarcação [m/s].

A velocidade de avanço foi calculado a partir da média das velocidades mapeadas uma vez que, de acordo com Carlton (2007), a distribuição e magnitude das velocidades no propulsor ao longo dos pás varia conforme a região é analisada, ou seja, o campo de velocidades não é uniforme.

A Figura 15 mostra a distribuição da razão entre as velocidades de serviço do navio e de avanço ao longo do propulsor, evidenciando a não uniformidade da sua magnitude.

Figura 15 – Razão entre velocidades de serviço e de avanço no propulsor



Fonte: Carlton (2006)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a fundamentação teórica e a metodologia apresentadas nas seções anteriores, busca-se com este capítulo apresentar os resultados obtidos a partir dos métodos propostos e a discussão a respeito do coeficiente de esteira obtido e sua comparação com os modelos empíricos.

4.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Após a fase de processamento, realiza-se a validação dos resultados numéricos obtidos, através da comparação com resultados oriundos de ensaios experimentais. Conforme descrito na etapa de fundamentação teórica, a resistência ao avanço do navio patrulha foi utilizada como critério de validação da simulação.

Ressalta-se que códigos CFD utilizam os resultados relativos aos campos de pressão e velocidade em torno da superfície para determinação das forças agindo sobre o casco. Dessa forma, para o presente estudo, inferiu-se que resultados numéricos próximos aos obtidos por séries experimentais representam um escoamento similar ao fenômeno real.

Assim, três diferentes condições foram simuladas e os resultados comparados com a Equação 5, que, como já discutido, fornece uma estimativa para o coeficiente de resistência friccional do modelo. A Equação proposta pela ITTC (1957) foi utilizada uma vez que, por se tratar de uma simulação ausente de superfície livre, os efeitos potenciais da resistência ao avanço são desprezados.

Assim, a resistência ao avanço obtida corresponde apenas ao fenômeno viscoso, predominante para situações de baixo Froude de operação. De acordo com Molland (2011), na ausência de superfície livre, o coeficiente de arrasto total pode ser escrito de acordo com a Equação 17.

$$C_T = (1 + k) * C_F \quad (17)$$

Onde C_T representa o coeficiente de arrasto total, C_F o coeficiente de resistência friccional e $(1 + k)$ representa o fator de forma da embarcação.

Logo, a Equação 17 evidencia que o coeficiente de resistência friccional, dentro das considerações feitas neste trabalho, é de grande influência na quantificação da resistência ao avanço do navio.

A seguir, a Tabela 9 mostra os resultados das simulações para cada condição de operação. São apresentados o coeficiente de resistência friccional obtido com o OpenFoam, ITTC e a diferença entre os resultados.

Tabela 9 - Comparação entre C_f numérico (OpenFoam) e experimental (ITTC)

Froude	Velocidade [m/s]	C_f Simulação	C_f ITTC (1957)	Diferença [%]
0.20	1.25	3.10E-03	3.32E-03	6.71%
0.25	1.57	3.01E-03	3.19E-03	5.76%
0.30	1.88	2.92E-03	3.09E-03	5.51%

Fonte: Autor (2025)

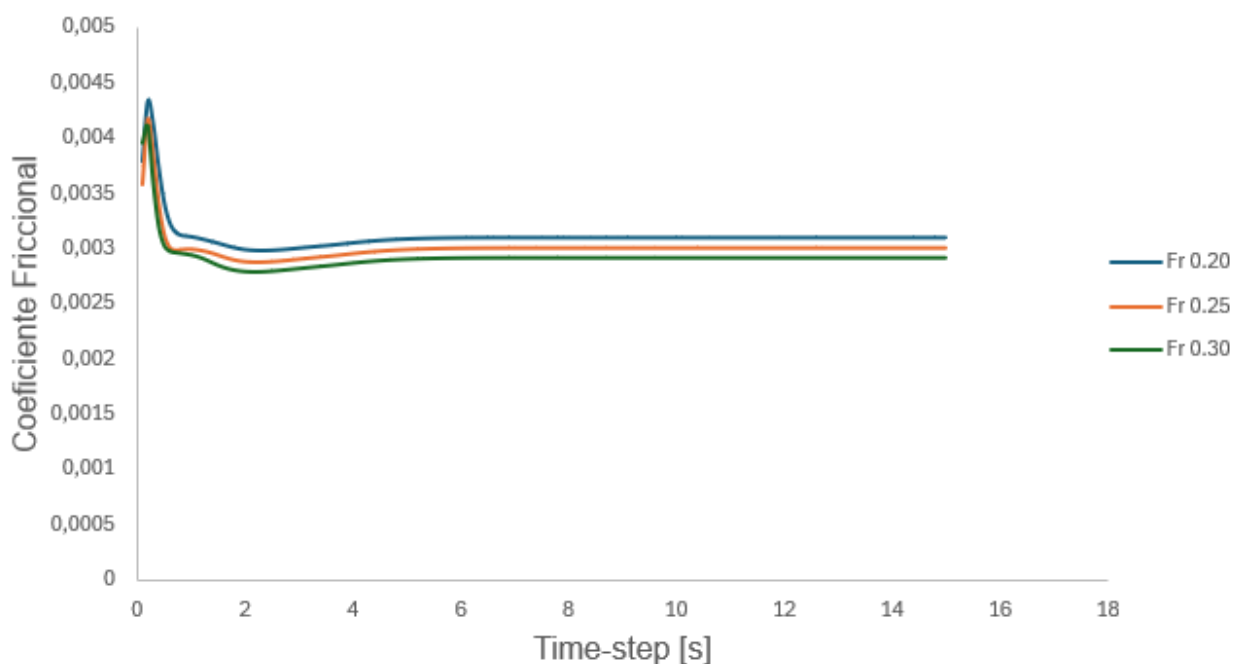
A solução da simulação foi realizada utilizando métodos numéricos de segunda ordem, discretizados em um *time-step* de 0.10 segundos. O *time-step* é escolhido buscando-se manter o número de Courant, Equação 18, o mais próximo de 1.

$$C_o = \frac{V * \Delta x}{\Delta t} \quad (18)$$

O número de Courant representa a distância com que a informação viaja dentro dos volumes de controle dentro de um *time-step*, de modo que, ao mantê-lo próximo de 1, garante-se que não há informações perdidas durante o processo iterativo.

Por fim, a Figura 14 mostra o processo de convergência do processamento das três simulações, ao longo de quinze segundos, através do coeficiente de resistência Friccional em função do *time-step* [s]. A partir da Figura, é possível verificar que o processo de convergência foi atingido próximo aos seis segundos de processamento.

Figura 16 - Convergência numérica durante o processamento



Fonte: Autor (2025)

A análise dos resultados mostra que conforme a velocidade de operação do navio aumenta, a diferença entre os resultados numérico e experimental diminui. Essa redução da diferença pode ser explicada devido ao regime de operação de baixo Froude, onde os efeitos das forças viscosas são dominantes e o transporte das propriedades do escoamento tornam-se predominantemente difusivas.

Escoamentos em que o transporte por difusão é dominante demandam malhas com maior número de elementos e, conseqüentemente, maior grau de refino. Esta consideração deve ser levada em consideração em estudos futuros.

4.2 VELOCIDADES ORTOGONAIS AO PROPULSOR

A determinação do campo de velocidades na região do hélice, de acordo com a metodologia apresentada, foi obtida a partir da definição de planos paralelos ao propulsor e com o mapeamento das velocidades calculadas durante a simulação, utilizando a função *probes*.

O modelo de navio patrulha possui arranjo para três propulsores localizados na popa da embarcação. O projeto propõe que um dos propulsores ocupe a região

central do corpo de popa, ao passo que os outros dois sejam alocados um em cada bordo do navio.

Como nesta fase de projeto conceitual a localização exata do hélice não é conhecida, os planos foram distribuídos de acordo com regiões da popa onde considera-se possível a instalação do sistema propulsivo. Assim, oito planos foram definidos e, ao todo, 207 pontos foram definidos no dicionário *probes* para o mapeamento do campo de velocidades.

Visando a redução do custo computacional para processamento da simulação CFD, foi estabelecida uma condição de simetria para o escoamento, de modo que a geometria do modelo foi dividida no plano diametral.

Dessa forma, foram simulados os dutos referentes aos propulsores central e de bombordo do navio patrulha. A região do propulsor de boreste foi adotada como simétrica ao de bombordo.

Tendo em vista que para determinação do coeficiente de esteira é necessário o conhecimento de uma velocidade relativa entre as velocidades de avanço do navio e da esteira, denominada velocidade de avanço, V_A , em cada um dos planos foi calculada a média das velocidades ortogonais. Estas velocidades foram utilizadas para determinar o coeficiente de esteira de cada uma das possíveis regiões de alocação do propulsor.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos com a simulação, onde o plano 1 refere-se a região localizada no extremo da popa. Para cada plano, é mostrada a velocidade ortogonal média para os propulsores central e de bombordo.

Tabela 10 - Velocidade média de avanço para o plano central e de bombordo

	Propulsor central	Propulsor de bombordo
Plano	Velocidade de avanço média [m/s]	Velocidade de avanço média [m/s]
1	1.71	1.69
2	1.70	1.69
3	1.69	1.67
4	1.68	1.66
5	1.67	1.65
6	1.64	1.61
7	1.60	1.57
8	1.56	1.53

Fonte: Autor (2025)

É válido notar que as diferenças encontradas na magnitude das velocidades, apesar de pequenas, indicam mudanças no escoamento de acordo com a região do propulsor, de modo que na região mais próxima da popa, são verificadas maiores velocidades de avanço.

A Figura 15 mostra o pós-processamento da simulação pela interface do programa *Paraview*. Na imagem, é mostrado o campo de velocidades obtido pela simulação numérica, a partir da vista do plano de linha d'água para o calado de 0.13 metros.

Figura 17 - Pós-processamento do campo de velocidades



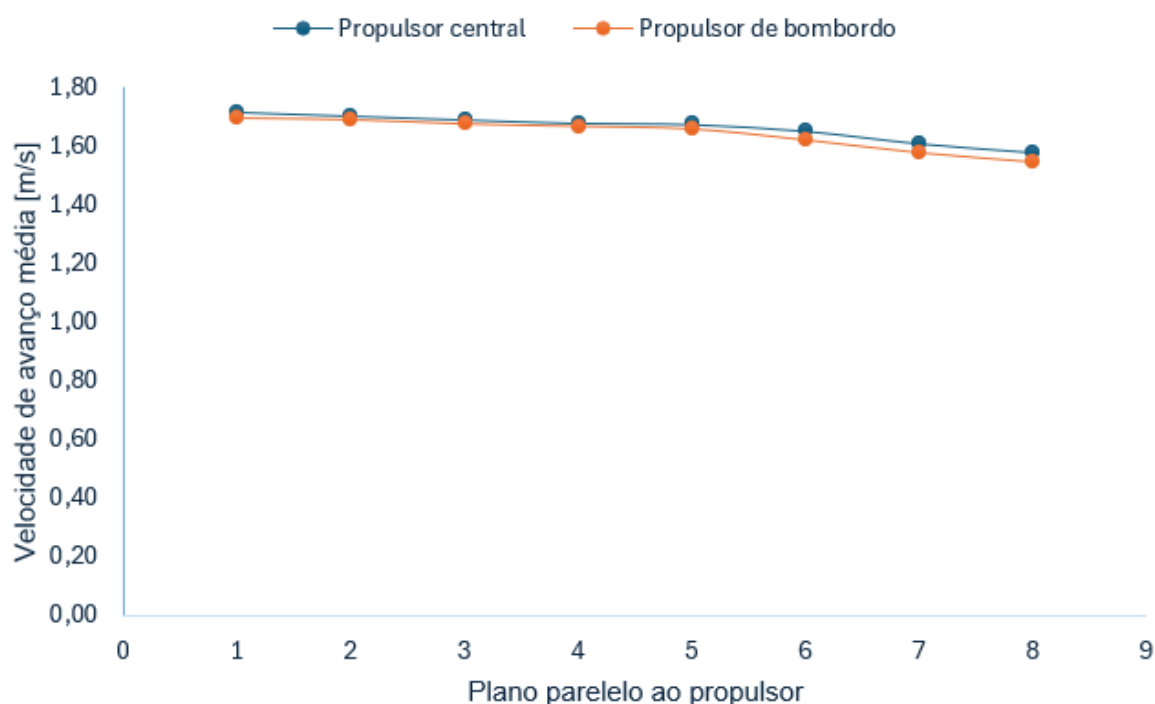
Fonte: Autor (2025)

Uma primeira interpretação permite inferir que há um melhor aproveitamento do escoamento nesta região, de modo que, de acordo com a teoria do disco atuador, discutida na etapa de fundamentação teórica, a geração de empuxo é favorecida. A Figura 16 mostra, de forma gráfica, a variação da velocidade de avanço média em função da discretização do corpo de popa.

A partir da Figura 16, também é possível observar que, conforme a localização do plano avaliado distancia-se da popa e aproxima-se de quilha, há uma redução da velocidade média de avanço.

Essa redução pode ser interpretada com um indicativo de que nessas regiões o escoamento torna-se cada vez mais bloqueado pelas barreiras físicas do casco, indicando menor aproveitamento do escoamento.

Figura 18 - Variação da velocidade de avanço média ao longo da popa



Fonte: Autor (2025).

4.3 COEFICIENTE DE ESTEIRA

Uma vez determinada a velocidade de avanço média, a Equação 16 foi utilizada para calcular o coeficiente de esteira. De acordo com Bertram (2012), é desejável que o escoamento atinja o propulsor da maneira mais uniforme possível, evitando as perturbações impostas pelo casco, fazendo melhor aproveitamento do escoamento.

O coeficiente de esteira relaciona o nível de perturbação que o casco impõe no escoamento ao seu redor, de modo que quanto maior a magnitude de W , menor será a uniformidade do escoamento verificado no propulsor e menor a capacidade do disco atuador induzir velocidades, gerando menor variação de quantidade de movimento.

De maneira mais simplificada, como mostrado pela Equação 9, quanto maior a perturbação gerada pelo casco, menos uniforme e próxima da velocidade de serviço do navio será a velocidade de avanço, resultando numa menor geração de empuxo.

A Tabela 11 sintetiza os valores de coeficiente de esteira obtidos. De forma análoga à Tabela 10, mostra os valores de W para os propulsores central e de bombordo, da popa ao início da quilha do navio patrulha.

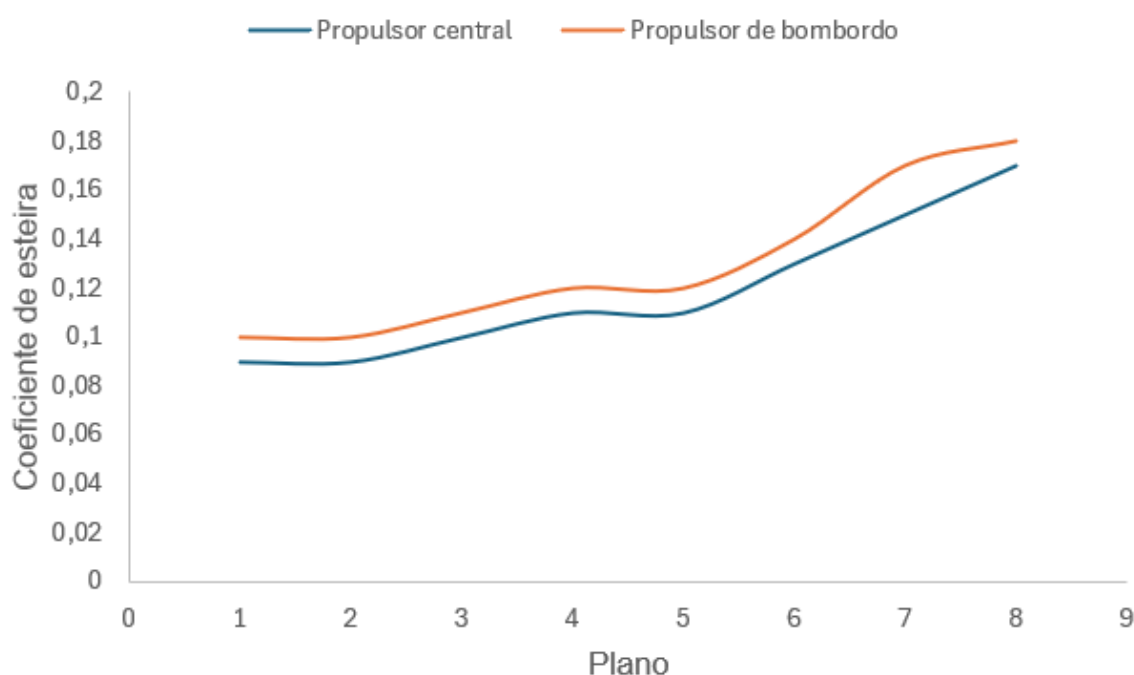
Tabela 11 - Coeficiente de esteira ao longo da popa do navio

Plano	Propulsor central Coeficiente de esteira	Propulsor de bombordo Coeficiente de esteira
1	0.09	0.10
2	0.09	0.10
3	0.10	0.11
4	0.11	0.12
5	0.11	0.12
6	0.13	0.14
7	0.15	0.17
8	0.17	0.18

Fonte: Autor (2025)

De forma gráfica, a Figura 17 mostra a variação do coeficiente de esteira ao longo da popa tomando, analogamente à representação das velocidades ortogonais, o plano da popa (1) como origem do gráfico.

Figura 19 - Coeficiente de esteira ao longo do corpo de popa



Fonte: Autor (2025)

A Figura 17 reforça a interpretação realizada a partir da coleta das velocidades ortogonais, uma vez que os resultados numéricos mostraram que o coeficiente de esteira do propulsor central apresentou valor inferior aos verificados nos propulsores laterais.

Da mesma forma, é possível visualizar o aumento da magnitude do coeficiente a medida que a região de interesse aproxima-se da quilha. Uma vez que o coeficiente de esteira quantifica a perturbação gerada pelo casco no escoamento, esse aumento pode ser interpretado como uma indicação do bloqueio do escoamento nessa região, traduzido em menor geração de empuxo.

A diferença na magnitude do coeficiente de esteira central e de bombordo pode ser explicado analisando a geometria da popa do navio patrulha. O navio possui popa do tipo *transom*, caracterizada por uma mudança abrupta de geometria na extremidade do corpo de popa.

Em cascos equipados com popa *transom*, a geometria de popa influencia fortemente na distribuição do escoamento, intensificando o desprendimento da camada-limite, responsável pela geração de uma região de recirculação e baixa pressão.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a separação da camada-limite intensifica-se com: mudanças abruptas de geometria e gradientes adversos de pressão. No caso do escoamento em torno de um navio com popa *transom*, essas duas características se fazem presentes.

Os propulsores laterais, posicionados próximos as bordas da popa *transom*, recebem um escoamento proveniente de regiões com maior curvatura do casco, e são nessas regiões que o escoamento é mais afetado pela separação do fluxo, identificando-se o desprendimento das linhas de corrente.

É válido ressaltar que, tradicionalmente, espera-se que o coeficiente de esteira seja menor na região dos bordos, oposto ao resultado encontrado neste trabalho. No entanto, há referências que buscaram analisar o comportamento do escoamento em popas do tipo *transom*.

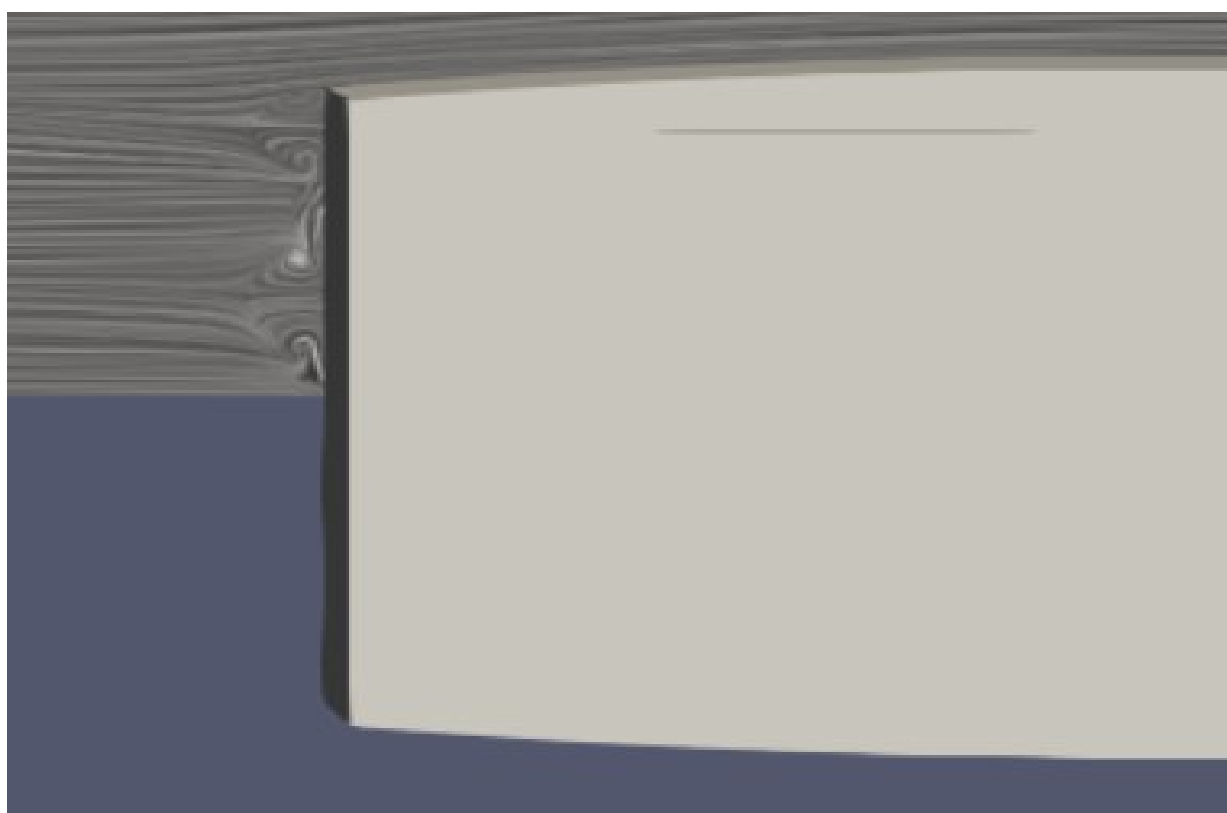
Hendrickson (2019) realizou simulações CFD que buscaram avaliar o escoamento em popas do tipo *transom* para diversos números de Froude. Em seus resultados, os autores mostram que, de fato, a região dos bordos possui um

escoamento mais turbulento e perturbado pela presença do casco, que pode ser traduzido em um maior coeficiente de esteira

De acordo com os pesquisadores, as regiões de bordo sofrem adicional influência de vórtices de canto, separação tridimensional e deflexões laterais impostas pela geometria da popa

A Figura 18 mostra a trajetória das linhas de corrente na popa do navio patrulha.

Figura 20 - Linhas de corrente e recirculação do escoamento



Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 mostra que na região do propulsor de boreste, a presença de vorticidade é maior e o escoamento é, portanto, menos uniforme, fazendo com o que os propulsores laterais sejam alimentados por um escoamento de menor velocidade média, traduzido em valores maiores de coeficiente de esteira.

Já na entrada do duto do propulsor central verifica-se menor intensidade da separação da camada limite e maior uniformidade do escoamento. Essa uniformidade

pode ser compreendida como menor interferência do casco, de modo que a velocidade média do fluxo é mais próxima da velocidade da embarcação.

A proximidade entre as velocidades média de avanço e de serviço do navio patrulha, refletida na menor magnitude do coeficiente de esteira, é um indicativo de que essa região é comparada aos bordos da popa, preferível para atuação do hélice que, de acordo com a teoria do disco atuador, tende a induzir maiores variações de velocidade do escoamento e mais empuxo. Assim, os resultados numéricos mostraram que conforme o propulsor distancia-se da popa, o coeficiente de esteira tende a aumentar, de modo que para otimizar a eficiência propulsiva, é preferível que o hélice seja alocado próximo a extremidade da popa.

Da mesma forma, buscando-se a melhor posição para alocação do hélice, o pós-processamento dos resultados numéricos mostrou que o propulsor central recebe um escoamento mais uniforme e de maior velocidade média, o que pode indicar melhor aproveitamento propulsivo.

4.4 MODELOS EMPÍRICOS

Para comparação dos resultados obtidos, como discutido durante a fundamentação teórica, foram coletados coeficientes de esteira oriundos de séries sistemáticas disponíveis em Molland (2011).

A comparação mostrou que apenas um dos valores propostos pelas séries aproxima-se do resultado encontrado numericamente. Essa variação mostrou também que os valores de W variam fortemente de uma série para outra, evidenciando a dificuldade da determinação do coeficiente de esteira a partir de equações empíricas.

Os modelos empíricos fornecem equações genéricas e, muitas vezes, limitados a geometrias e condições de operação específicas, distintas da realidade de embarcações militares equipadas com três propulsores.

A Tabela 12 mostra a comparação entre os resultados numérico e empírico. Para comparação dos valores obtidos de W para os propulsores central e de bombordo, foi calculado um coeficiente de esteira médio a partir do resultado encontrado para cada um dos planos, referido como W médio.

Tabela 12 - Comparação entre resultados numérico e empírico

Equação empírica		Propulsor Central		Propulsor lateral	
Método	W empírico	W médio	Diferença	W médio	Diferença
Harvald	0.3230	0.11875	63.24%	0.13	59.76%
Taylor	0.2125	0.11875	44.12%	0.13	38.82%
Flikkema	0.2269	0.11875	47.66%	0.13	42.71%
NPL	0.1200	0.11875	1.04%	0.13	-8.33%
Holtrop	-0.2060	0.11875	157.65%	0.13	163.11%

Fonte: Autor (2025)

É interessante notar que, para o tipo de barco estudado, os valores “ W ”, apesar de apresentarem uma grande variação, são pequenos e até negativos. Isso pode ser explicado pela própria popa do tipo *transom*, o que favorece a formação de turbulências e vórtices no fluxo na região da hélice. A turbulência pode então ser responsável pela geração de refluxo, que intensifica a magnitude da velocidade média de avanço.

Assim, ressalta-se que a interferência da popa *transom* impacta no comportamento do escoamento nas regiões central e lateral, mas não indica, necessariamente, uma piora do rendimento propulsivo de embarcações, de modo que a presença de vorticidade pode, comparado a outros modelos de popa, contribuir para um aumento da velocidade média do fluxo.

A Tabela 12 também mostra que os coeficientes médios de esteira das hélices central e de bombordo apresentaram menos erro quando comparados ao método empírico proposto pela Série de Casco de Deslocamento de Casco Redondo de Alta Velocidade (NPL), que abrange navios de deslocamento de alta velocidade, como o navio patrulha da Marinha Brasileira.

Além disso, como essa série se destina a navios com velocidades consideradas altas para navios de deslocamento, pode-se inferir que o método possivelmente considera a existência de duas ou mais hélices.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desta pesquisa teve como objetivo a determinação do coeficiente de esteira de um navio patrulha através de um método numérico computacional. Nesse sentido, buscou-se propor um método alternativo as equações empíricas para estimativa do coeficiente.

O estudo levou a conclusão de que as equações empíricas, em sua maioria, não representam a realidade hidrodinâmica do navio estudado, uma embarcação militar equipada com três propulsores de popa.

A forte variância encontrada com a comparação dos resultados indica que as séries sistemáticas são, de fato, limitadas, de modo que não é recomendado sua utilização para projetos de embarcações militares.

Os resultados em relação ao escoamento em torno casco são indicativos da alocação do propulsor em relação a popa. A instalação do hélice mais próxima a extremidade da popa são beneficiadas por menor perturbação e maior refluxo do escoamento, resultando em velocidades de avanço média mais próximas da velocidade de serviço e, portanto, maior geração de empuxo.

Também foi concluído que o propulsor alocado na região central é atingido por um escoamento menos bloqueado, podendo também ser beneficiado pelo refluxo resultante da separação da camada-limite. Na parte central, foram verificados valores de coeficiente de esteira menores em relação aos bordos, indicando melhor utilização da turbulência nessa região.

No que tange a simulação numérica, pode-se concluir que a mecânica dos fluidos computacional apresenta-se como um método eficiente para estimativa do coeficiente de esteira independente do modelo de casco estudado, uma vez que os resultados numéricos foram satisfatórios em relação ao campo de velocidades em torno do navio.

Por fim, estudos futuros devem considerar a influência do diâmetro do hélice na quantificação de W , assim como estudar a influência da rotação dos propulsores de bombordo e boreste no campo de velocidades do propulsor central.

REFERÊNCIAS

- Bertram, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. Elsevier: Waltham (USA), 2012.
- Bredberg, J. **On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models**. Goteborg, Sweden: Elsevier, 2000.
- Carlton, J. **Marine propellers and propulsion**. Elsevier: Burlington (USA), 2007.
- CFD DIRECT. OpenFOAM. **User Guide**: Version 12. Open Foam. 9h July 2024. Available from: <https://openfoam.org>. Accessed on 28 May 2025.
- FERZIGER, J.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2002.
- Fujarra, A. **Hidrodinâmica das Ondas de Gravidade**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, 2020.
- HENDRICKSON, K.; WEYMOUTH, G. D.; YU, X.; YUE, D. K.-P. **Wake behind a three-dimensional dry transom stern. Part 1: Flow structure and large-scale air entrainment**. Journal of Fluid Mechanics, v. 875, p. 854–883, 2019. DOI: 10.1017/jfm.2019.505.
- Holtrop, J., Mennen, G.G.J. An Approximate Power Prediction Method. **International Shipbuilding Progress**, v. 29, n. 335, 1982.
- International Towing Tank Conference (ITTC). Practical Guidelines for Ship Resistance CFD. **ITTC - Recommended Procedures and Guidelines**: 2014. Available from: <https://itcc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf>. Accessed on 27 May 2025.
- International Towing Tank Conference (ITTC). **Resistance Test. ITTC - Recommended Pro-cedures and Guidelines**: 2011. Available from: <https://itcc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf>. Accessed on 27 May 2025.
- Islam, H.; Soares, C. G. Prediction of ship resistance in head waves using OpenFOAM. In book: **Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources** (pp.527-533) Chapter: Hydrodynamics - CFD. Publisher: Taylor & Francis Group, London Editors: Guedes Soares & Teixeira, 2017.
- Liu, F. **A Thorough Description of How Wall Functions are Implemented in OpenFOAM**. Chalmers university of technology: [s.n.], 2017.
- Molland, A. F.; Turnock, S. R.; Hudson, D.A. **Ship Resistance and Propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. Cambridge University Press, United Kingdom: 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>. Accessed on 28 May 2025.

Padovezi, C. D. **Avaliação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. 1997.

Schlichting, H.; Gersten, K. **Boundary Layer Theory**. 9. ed. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2016.

Trindade, J. **Hidrodinâmica e propulsão: engenharia de máquinas marítimas**. ENIDH. 2012.

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. Na introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method. **Longman Scientific & Technical**: England, 1995.

Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD. [S.l.]: DCW Industries, 2006.7.