

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

RAÍSSA SAYURI FERNANDES KAMEZAKI

**USO DO SOFTWARE ANSYS FLUENT PARA AVALIAR A HIDRODINÂMICA DE
UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DE ALTA VELOCIDADE**

MANAUS

2025



RAÍSSA SAYURI FERNANDES KAMEZAKI

**USO DO SOFTWARE ANSYS FLUENT PARA AVALIAR A HIDRODINÂMICA DE
UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DE ALTA VELOCIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández
Fontes

MANAUS

2025



Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

K15u	<p>Kamezaki, Raíssa Sayuri Fernandes</p> <p>Uso do software ansys fluent para avaliar a hidrodinâmica de uma embarcação regional de alta velocidade / Raíssa Sayuri Fernandes Kamezaki. Manaus : [s.n], 2025.</p> <p>61 f.: color.; 21.0 cm.</p> <p>TCC - Graduação em Engenharia Naval- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.</p> <p>Inclui Bibliografia.</p> <p>Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández.</p> <p>1. Ansys Fluent. 2. CFD. 3. Embarcação cabinada. 4. Resistência ao avanço. 5. Região Amazônica. I. Fontes, Jassiel Vladimir Hernández (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título</p> <p>CDU(1997)629.5</p>
------	--



RAÍSSA SAYURI FERNANDES KAMEZAKI

**USO DO SOFTWARE ANSYS FLUENT PARA AVALIAR A HIDRODINÂMICA DE
UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DE ALTA VELOCIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes

Aprovado em: 28 de novembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Elvis Jhoarsy Osorio Santander
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Eduardo Rafael Barreda del Campo
Universidade do Estado do Amazonas

MANAUS

2025



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que até aqui me concedeu saúde, força e discernimento para enfrentar e superar as adversidades ao longo dos meus 24 anos.

À minha mãe, Dionne Martins, meu maior exemplo de vida e fonte de apoio, por me ensinar desde cedo o valor do estudo e mostrar que a educação tem o poder de transformar vidas.

Aos meus irmãos, Keyse Laís e Naoki Filho, pela companhia nos piores e melhores dias.

À minha avó, Lailza Alves (*in memoriam*), por todo amor, cuidado e exemplos que me acompanharam e continuam me guiando, mesmo após sua partida.

Ao meu amor, Alisson Rodrigo, por todo apoio e incentivo na reta final deste trabalho. Agradeço por acreditar em mim e caminhar ao meu lado em mais essa etapa.

A todos os meus amigos, em especial Rayrima Marques e Marcelo Cursino, pelos aprendizados compartilhados, pela parceria nos desafios acadêmicos e pelos bons momentos vividos ao longo desses anos. Cada um, à sua maneira, contribuiu para a minha evolução.

A todos os professores do curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Jassiel Fontes, pela contribuição inestimável ao curso e dedicação à pesquisa. Sua orientação foi um dos principais pilares nesta jornada acadêmica. Agradeço também a Kleyphide Pereira pelo suporte na modelagem da embarcação.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, deixo aqui meus sinceros agradecimentos.

Este trabalho recebeu suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq (Chamada CNPq-FNDCT-MCTI N° 14/2022 – Faixa A, processo 405529/2022-8) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, FAPEAM (Editais n°015/2024 – INOVATEC+/FAPEAM e n° 013/2024 – PROIN SOCIAL/FAPEAM).



RESUMO

Embarcações de alta velocidade são muito relevantes nas atividades cotidianas da região amazônica devido à extensão das hidrovias e à necessidade de atender necessidades da sociedade, incluindo transporte, educação e saúde. Por esse motivo, avaliar a hidrodinâmica dessas embarcações, incluindo parâmetros como resistência ao avanço e potência requerida, é importante para discutir aspectos operacionais. Porém, aplicações de métodos de simulação computacional são ainda necessárias para o estudo do comportamento de embarcações regionais. O presente trabalho propõe um estudo da hidrodinâmica de uma embarcação regional de alta velocidade utilizando fluidodinâmica computacional com o software Ansys Fluent. Como caso de estudo representativo foi considerada uma embarcação do tipo cabinada, comumente utilizada para atividades de transporte escolar ou atendimento emergencial de saúde em alta velocidade. Foram feitas simulações no software Ansys Fluent, considerando uma análise multifásica (ar – água) e calado constante. O objetivo principal do trabalho foi demonstrar as possibilidades uso do software para avaliar a hidrodinâmica da embarcação. Os resultados obtidos permitiram avaliar forças de arrasto e sustentação, elevação das ondas geradas, velocidades do escoamento, campo de pressão induzida no casco, e potência efetiva. Para o caso de estudo considerado, foi encontrada uma resistência ao avanço de 12,9 kN, elevações máximas de ondas geradas ao longe de até 0,45 m, aproximadamente. As pressões máximas identificadas foram entre 33 e 50 kPa na região da proa, enquanto a potência efetiva requerida foi de 242,46 hp. A abordagem proposta pode contribuir no estudo de embarcações regionais que não tenham sido caracterizadas de maneira hidrodinâmica, sendo requerida a sua validação com dados experimentais.

Palavras-chave: Ansys Fluent, CFD, embarcação cabinada, resistência ao avanço, região Amazônica.



ABSTRACT

High-speed vessels are highly relevant to the daily activities of the Amazon region due to the extensive waterways and the need to meet societal needs, including transportation, education, and healthcare. For this reason, evaluating the hydrodynamics of these vessels, including parameters such as drag and required power, is important for discussing operational aspects. However, applications of computational simulation methods are still necessary for studying the behavior of regional vessels. This work proposes a study of the hydrodynamics of a high-speed regional vessel using computational fluid dynamics with the Ansys Fluent software. As a representative case study, a cabin-type vessel, commonly used for school transportation or high-speed emergency healthcare services, was considered. Simulations were performed using the Ansys Fluent software, considering a multiphase analysis (air-water) and constant draft. The main objective of this work was to demonstrate the possibilities of using the software to evaluate the hydrodynamics of the vessel. The results obtained allowed for the evaluation of drag and lift forces, wave elevation, flow velocities, induced pressure field on the hull, and effective power. For the case study considered, a total advance resistance of 12.9 kN was found, with maximum wave elevations generated at a distance of up to approximately 0.45 m. The maximum pressures identified were between 33 and 50 kPa in the bow region, while the effective power required was 242.46 hp. The proposed approach can contribute to the study of regional vessels that have not been hydrodynamically characterized, but its validation with experimental data is required.

Keywords: Ansys Fluent, CFD, cabin boat, ship resistance, Amazon region.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Embarcação regional do tipo ambulancha operando na cidade de Manaus – AM....	12
Figura 2. Geometria da embarcação considerada como caso de estudo.....	37
Figura 3. Domínio computacional considerado para realizar as análises.....	38
Figura 4. Sequência dos módulos a serem configurados no Ansys Fluent.....	39
Figura 5. Aspecto da geometria da embarcação sendo reparada no módulo SpaceClaim.....	39
Figura 6. Etapas relevantes para definir o domínio computacional no módulo SpaceClaim...	40
Figura 7. Configuração de malha triangular de maneira automática.....	41
Figura 8. Aspecto inicial do módulo Setup do Ansys Fluent.	42
Figura 9. Aspecto da malha poliédrica.	42
Figura 10. Visualização das fases (ar e água) durante o final da simulação em regime transitório.	46
Figura 11. Resultados da força de arrasto na embarcação (<i>drag</i>) durante os 100 segundos de simulação.....	47
Figura 12. Resultados da força de sustentação na embarcação durante os 100 segundos de simulação.....	47
Figura 13. Superfície livre da água gerada com uma isosuperfície da fração de volume (<i>Volume Fraction</i>) com valor de 0,5. (a) Perspectiva. (b) Vista de perfil. (c) Vista do topo mostrando o padrão de ondas gerado.	49
Figura 14. Contornos de elevação da superfície da água (<i>Z</i>) no domínio computacional que foi considerado. (a) Vista de perspectiva. (b) Vista do topo.	50
Figura 15. Campo vetorial de velocidade resultante na superfície livre da água. (a) Vista em perspectiva com vetores 3D. (b) Vista de perfil com vetores 2D.	51
Figura 16. Contornos da magnitude da velocidade resultante no plano de simetria do domínio computacional. (a) Vista longitudinal do domínio completo no plano de simetria. (b) Detalhes dos contornos ao redor do casco da embarcação.	52
Figura 17. Contornos da componente de velocidade horizontal (<i>u</i>). O sinal negativo indica que o escoamento incide pela proa. (a) Vista longitudinal do domínio completo no plano se simetria. (b) Detalhes dos contornos ao redor do casco da embarcação.	53
Figura 18. Linhas de corrente (<i>streamlines</i>) da velocidade resultante. Parâmetros selecionadoa para a plotagem: Tipo (<i>surface streamlines</i>), Surfaces (<i>symmetry</i>), Start from (<i>face centers</i>), Reduction Factor (10).....	54



Figura 19. Energia cinética de turbulência (TKE – *Turbulence Kinetic Energy*). (a) Vista em perspectiva. (b) Vista de perfil..... 55

Figura 20. Contornos de pressão no casco causados pelo escoamento incidente. (a) Vista de perspectiva. (b) Fundo do casco. 56



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões principais da embarcação selecionada. Fonte: Autoria própria.....	37
Tabela 2. Lista de configurações feitas no módulo Setup do Ansys Fluent para realizar a análise no estado estacionário (<i>steady-state</i>). A configuração seguiu a sequência mostrada. Os parâmetros que não são mostrados na tabela foram utilizados como os definidos pelo software (<i>default</i>).	43
Tabela 3. Configurações para realizar a simulação do tipo transitória.....	45
Tabela 4. Valores médios do arrasto e sustentação obtidos durante as simulações estacionária e transiente. Valores correspondentes à metade do casco.	48



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Descrição do problema.....	12
1.2 Justificativa.....	13
1.3 Objetivos.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
1.4 Estrutura do trabalho.....	14
2 ESTADO DA ARTE.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
3.1 Equações da continuidade da massa e quantidade de movimento.....	31
3.2 escoamentos multifásicos.....	32
3.2.1 O modelo VOF (<i>Volume of Fluid</i>).....	32
3.2.2 Limitações do modelo VOF.....	33
3.2.3 Cálculos de VOF em estado estacionário e transitório.....	33
3.2.4 Equação de fração de volume.....	34
3.2.5 Propriedades dos materiais.....	35
3.2.6 Equação de quantidade de movimento.....	35
3.2.7 escoamento de canal aberto.....	35
4 METODOLOGIA.....	37
4.1 Descrição do caso de estudo.....	37
4.2 Configuração da análise numérica no Ansys Fluent.....	38
5 RESULTADOS.....	46
5.1 Resultados do arrasto e sustentação.....	46
5.2 Resultados da elevação da superfície livre da água.....	48
5.3 Resultados de velocidade do escoamento.....	51
5.4 Resultados de pressão induzida no casco.....	55
5.5 Estimativa de resistência ao avanço e potência efetiva.....	56



5.6 Limitações do presente estudo e recomendações para trabalhos futuros	57
6 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59



1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

O Brasil possui a maior parte da floresta Amazônica, contendo a maior parte da sua rede hidrográfica. Nessa rede de rios e corpos de água, são utilizadas muitas embarcações cotidianamente pois há uma limitação de rodovias, o que faz o transporte fluvial uma atividade crucial para o desenvolvimento regional. Devido a essa situação, embarcações de alta velocidade, como expressos, voadeiras, rabetas, ambulanchas (Figura 1) e outras embarcações, são necessárias devido aos grandes percursos para proporcionar serviços de relevância social, ambiental e econômica. Dentre eles, podem ser mencionados o atendimento à saúde, assistência escolar, pesca, comércio, transporte, entre outros. Assim, a estimativa de parâmetros hidrodinâmicos das embarcações regionais, como a resistência ao avanço e a potência efetiva requerida, requer de abordagens modernas, visando um maior entendimento dos efeitos do escoamento nelas. Embora existam métodos empíricos simplificados que podem ser utilizados em etapas de anteprojeto, nas fases de detalhe de projeto que buscam a sua otimização operacional, pode ser necessário avaliar diversos parâmetros, tais como elevação da superfície da água, campos de velocidade e/ou de pressão hidrodinâmica. Para isto, os métodos de fluidodinâmica computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) tornam-se alternativas para estudar o comportamento de embarcações regionais.

Figura 1. Embarcação regional do tipo ambulancha operando na cidade de Manaus – AM.



Fonte: Cortesia de Nádia Letícia do Nascimento Soares, 2023.



Devido a que a aplicação de ferramentas de fluidodinâmica computacional ainda não foi completamente explorada em embarcações regionais amazônicas, o presente estudo visa demonstrar o uso de CFD para estudar a hidrodinâmica de embarcações regionais de alta velocidade, por meio do software Ansys Fluent. Para isto, foi escolhida uma embarcação regional do tipo cabinada, conhecida como lancha ambulância ou “ambulancha” (Figura 1), devido a sua relevância social no atendimento emergencial de pessoas nas diversas cidades do Estado do Amazonas. Espera-se que os resultados obtidos para este caso de estudo sirvam como base para utilizar o software considerado com outras embarcações regionais.

1.2 Justificativa

As embarcações regionais amazônicas, incluindo as que se deslocam em altas velocidades, apresentam barreiras tecnológicas a serem superadas com a finalidade de melhorar a sua eficiência, segurança e sustentabilidade (Fontes et al., 2024, 2023, 2025). Muitas embarcações são construídas baseadas na experiência prévia, sem aplicação de métodos técnicos e científicos recentes que permitam prever o seu comportamento. No caso da estimativa de parâmetros hidrodinâmicos, dentre os quais podem ser considerados a resistência ao avanço e potência requerida, os métodos de simulação por fluidodinâmica computacional podem contribuir na inovação de embarcações regionais, pois possibilitam a análise de mais parâmetros hidrodinâmicos. Porém, eles têm sido pouco aplicados para estudar embarcações regionais. Já que o curso de Engenharia Naval é recente no Estado do Amazonas, o presente trabalho visa contribuir com um estudo dedicado a demonstrar o uso de ferramentas de fluidodinâmica computacional para avaliar o comportamento de embarcações regionais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Demonstrar a utilização do software Ansys Fluent para avaliar diversos parâmetros hidrodinâmicos de uma embarcação regional de alta velocidade do tipo cabinada, utilizada para atividades de relevância social.

1.3.2 Objetivos específicos

- Selecionar um caso de estudo de embarcação regional de alta velocidade, para realizar a sua modelagem tridimensional usando software de desenho assistido por computador.



- Demonstrar a utilização do software Ansys Fluent para simular um escoamento uniforme interagindo pela proa da embarcação, considerando um calado constante, escoamento uniforme em um canal retangular, e uma configuração bifásica (ar – água).
- Avaliar a utilização do software para analisar diversos parâmetros: arrasto e sustentação, as ondas geradas pela embarcação, as velocidades do escoamento, a pressão induzida no casco, e a resistência ao avanço total para estimar a potência efetiva.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho está dividida em cinco capítulos principais, sendo o primeiro deles a Introdução. Os Capítulos 2 e 3 descrevem o estado da arte e a fundamentação teórica mais relevante relacionada com o presente estudo, respectivamente. O Capítulo 4 apresenta a metodologia usada, quanto o Capítulo 5 mostra os resultados, com ênfase nas possibilidades de uso do software Ansys Fluent para avaliar diversos aspectos hidrodinâmicos da embarcação. Finalmente, o Capítulo 6 mostra as conclusões mais importantes do estudo realizado.



2 ESTADO DA ARTE

O trabalho de Wu et al. (2011) consistiu em uma pesquisa de computação por Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para analisar o movimento e a resistência adicionada em ondas de um modelo de trimarã de alta velocidade. Trimarãs consistem em embarcações de interesse devido à sua capacidade de adotar um casco principal mais esguio, o que reduz a resistência residual em alta velocidade e melhora o desempenho em ondas ao diminuir os movimentos de *heave* e *pitch*. O objetivo principal foi desenvolver e validar uma ferramenta numérica para o estudo do desempenho de *seakeeping* (comportamento no mar) desses navios. A metodologia empregou a solução das Equações de Navier-Stokes (RANSE, *Reynolds-averaged Navier-Stokes*) e da continuidade, discretizadas pelo Método de Volume Finito (FVM). Para simular o fluxo bifásico (água e ar), a superfície livre não linear foi tratada com o Método *Volume of Fluid* (VOF). O estudo utilizou um tanque de ondas numérico, onde as ondas incidentes eram geradas por um perfil de velocidade e as ondas de saída eram dissipadas em uma zona de amortecimento artificial. O modelo de turbulência utilizado foi o RNG k- ϵ de duas equações, e as equações de diferença foram resolvidas utilizando o algoritmo *Multigrid* e o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*). As simulações foram realizadas com o modelo de trimarã avançando em ondas de proa regulares, com o modelo livre para se mover em *heave* e *pitch*, sob números de Froude (Fr) de 0,52 e 0,70. Os resultados foram comparados com dados obtidos em experimentos de *seakeeping* realizados no tanque de reboque do CSSRC (*China Ship Scientific Research Center*). Os resultados mais interessantes demonstraram concordância muito boa entre as previsões numéricas e os dados experimentais para as funções de transferência de *pitch*. As simulações de *heave* também mostraram concordância bastante boa, apesar de uma tendência à superestimação em algumas condições de comprimento de onda. Para a resistência adicionada, os cálculos de CFD previram uma tendência similar aos dados experimentais, mas subestimaram seus valores perto dos picos das curvas de função de transferência. Os autores concluíram que o método numérico apresentado é eficaz e capaz de prever muito bem os movimentos induzidos por ondas e a resistência adicionada para trimarãs em ondas de proa regulares. A maioria das diferenças observadas entre os resultados computacionais e experimentais foi considerada aceitável. O estudo validou a metodologia como uma ferramenta numérica robusta para investigar o desempenho de *seakeeping* de trimarãs de alta velocidade. Os autores sugeriram que trabalhos futuros devem ser direcionados para o aprimoramento do método, visando aumentar a precisão das previsões, especialmente para a resistência adicionada próxima aos picos das curvas da função de transferência.



Yaakob et al. (2015) calcularam a resistência total e simularam o fluxo ao redor de formatos específicos de casco, usando a CFD. Para isso, o foco foi em dois cascos bastante conhecidos na literatura: o Wigley e o DTMB 5415. Para realizar as simulações, foi utilizado o software ANSYS CFX 14.0, que trabalha com o método de volumes finitos e usa um passo de tempo fictício para garantir que as soluções se estabilizem em regime permanente. Na simulação, aplicou-se o modelo homogêneo acoplado de VOF para lidar com a interface entre o ar e a água, e o modelo de turbulência k- ϵ foi usado nas fases iniciais. Os resultados indicaram que a simulação de CFD alcançou seu objetivo principal ao prever a resistência total com alta precisão. A concordância com os dados experimentais foi notável, sendo o erro percentual máximo de apenas 5,94% para o casco DTMB 5415 e 5,85% para o casco Wigley. No caso específico do casco Wigley, o código CFD conseguiu prever os "picos e vales" na curva de resistência, que são inerentes à interação dos sistemas de ondas do casco. Além disso, a visualização do campo de ondas também evidenciou a formação de cristas de ondas na região de vante de ambas as embarcações estudadas.

O estudo de Frisk e Tegehall (2015) teve como objetivo principal avaliar a precisão das simulações de CFD para prever a resistência e a atitude de corrida de cascos planadores de alta velocidade. O trabalho visou determinar se o CFD poderia substituir total ou parcialmente os testes de tanques de reboque, que são tradicionalmente utilizados, mas são caros e consomem tempo. A pesquisa utilizou dois dos softwares comerciais de CFD mais comuns, ANSYS FLUENT (desenvolvido pela ANSYS, Inc.) e STAR-CCM+ (desenvolvido pela CD-Adapco). As embarcações simuladas incluíram um casco semi-planador, o Athena hull (R/V ATHENA), e um casco planador de alta velocidade, o Swede Ship hull. A metodologia empregada envolveu a modelagem do fluxo de fluido por meio das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), utilizando o modelo de turbulência SST k- ω . A interface entre a água e o ar foi resolvida com o método VOF. Para descrever a interação fluido-estrutura, que inclui o movimento do casco, foi utilizado um resolvidor de dois graus de liberdade (DOF), restringindo o movimento ao afundamento (*heave*) e à arfagem (*pitch*). As simulações foram realizadas em duas condições principais: com afundamento e trim fixos, e com afundamento e trim livres (dinâmicos), permitindo comparações cuidadosas com dados experimentais. Os resultados das simulações com afundamento e trim fixos para o casco Swede Ship mostraram uma boa consistência geral entre os dois softwares. No entanto, foi identificada uma diferença notável na resistência de pressão, sendo o valor do FLUENT 13% superior ao do STAR-CCM+, o que resultou em uma diferença de 8,0% na resistência total prevista. Já nas simulações de



afundamento e trim livres (conduzidas principalmente no STAR-CCM+), os resultados seguiram as tendências observadas nos dados experimentais. Especificamente na região de planeio (alta velocidade), os erros nos valores de resistência, afundamento e ângulo de trim ficaram abaixo de 10%. O comprimento molhado previsto também demonstrou ótima correspondência com os dados experimentais. Em contraste, o FLUENT teve problemas para obter soluções estáveis em condições livres devido a um deslocamento não física da superfície livre durante o movimento da malha dinâmica, o que levava a oscilações crescentes no casco. Os autores concluíram que as simulações de CFD podem fornecer dados valiosos que são difíceis de obter experimentalmente, como distribuições detalhadas de forças e linhas de fluxo, auxiliando no aprimoramento do design em estágios iniciais. A precisão alcançada nas previsões de resistência está em linha com estudos anteriores de cascos planadores. Contudo, o estudo revelou limitações, como a tendência de a resistência ser subestimada na região de planejamento, e o ângulo de trim ser superestimado em até 32% na região de transição (em torno de $F_n=1$). A substituição definitiva dos testes de tanque de reboque pelo CFD dependerá não apenas da acurácia, mas também da relação custo-benefício e da velocidade das simulações.

Sukas et al. (2017) avaliaram a hidrodinâmica de cascos de planeio, superando o desafio imposto pelos grandes movimentos dessas embarcações em altas velocidades. O principal objetivo foi validar a aplicação do sistema de malha sobreposta (*overset grid*) para a solução numérica do escoamento complexo, demonstrando sua superioridade em capturar grandes deslocamentos do casco em altos números de Froude (F_n). A metodologia envolveu testes de reboque em 2DOF (*heave* e *pitch*) de um modelo em escala de 1/9 no Laboratório Ata Nutku (ITU). A simulação numérica utilizou o software comercial Star CCM+, implementando as Equações URANS com o modelo DFBI e o método VOF para rastrear o fluxo bifásico. A avaliação comparativa entre os métodos numéricos mostrou que o *overset grid* se alinhou melhor com os dados experimentais em altos números de Froude. A flexibilidade do *overset grid* em lidar com grandes movimentos é crucial, pois permite que o casco se mova com o bloco de malha sobreposto sem deformação dos elementos, mantendo a qualidade da malha e a precisão do resultado. Em contraste, o sistema de movimento de corpo rígido (*rigid body motion*), embora tenha se saído melhor em baixos F_n , tornou-se inadequado em altas velocidades, pois as grandes rotações induziram distorção da malha, refletindo negativamente na precisão. Um resultado notável foi a crítica ao método empírico tradicional. Os autores concluíram que, embora o método de Savitsky (1964) forneça valores de resistência total razoavelmente próximos em altas velocidades, ele é ineficaz para a avaliação precisa dos



componentes individuais da resistência. O método empírico superestima a resistência friccional ao longo de toda a faixa de F_n , pois utiliza a fórmula de Schoenherr (desenvolvida para placas planas). Além disso, em baixos F_n (modo de deslocamento), Savitsky (1964) superestima significativamente a resistência de pressão devido à previsão de ângulos de trim dinâmico excessivamente altos. O estudo também utilizou visualização computacional para identificar o regime de *squat* (afundamento). Foi demonstrado que, na transição para o planeio (aproximadamente $0.2 < F_n < 0.7$), uma região de alta velocidade e baixa pressão se move para a popa do casco, puxando-o para baixo. Nessa faixa de velocidade, a sustentação hidrodinâmica se torna negativa, e a embarcação afunda, elevando a resistência total. As conclusões dos autores confirmaram que o *overset grid* é uma ferramenta valiosa para cascos de planeio e que o método de Savitsky (1964) não deve ser utilizado para avaliar os componentes de resistência separadamente.

Zeng et al. (2019) investigaram a resistência viscosa de navios que navegam em águas rasas, uma necessidade crítica, pois os métodos tradicionais de previsão derivados de águas profundas, como o de Holtrop e Mennen, tornam-se menos aplicáveis em vias navegáveis interiores e portos. Como a resistência viscosa domina a resistência total em baixo número de Froude, o trabalho buscou fornecer inspiração para melhorar a previsão, estendendo pesquisas anteriores sobre placas planas para condições 3D de casco de navio. A metodologia empregou CFD utilizando cálculos de corpo duplo (*double-body calculations*) para isolar os efeitos de forma e profundidade. Três tipos de embarcações foram selecionados para a análise de forma e coeficiente de bloco: o casco matemático Wigley hull, o KCS (KRISO Container Ship), e o navio típico de vias navegáveis interiores Rhine Ship 86. As simulações numéricas foram executadas no software ANSYS Fluent (versão 18.1), utilizando o modelo de turbulência SST $k-\omega$. O estudo abrangeu doze números de Reynolds (Re), cobrindo a escala de modelo à escala real, e sete condições de águas rasas, variando a razão profundidade/calado de 1.20 a 15.06, além de um caso de águas profundas. Um resultado significativo foi que a resistência de atrito depende tanto da forma do casco quanto da profundidade da água em águas rasas, contrariando a suposição de que depende apenas do número de Reynolds. Foi observado que o aumento da resistência de atrito foi mais proeminente nos navios com maior coeficiente de bloco (KCS e Rhine Ship 86) em comparação com o Wigley Hull. Os autores chegaram à conclusão de que o impacto das águas rasas na resistência viscosa é substancial: em condições de águas muito rasas ($h/T = 1.2$), o coeficiente de resistência viscosa total pode aumentar entre 10% e 30% para os navios KCS e Rhine Ship 86. Como resultado, o método tradicional de extrapolação da



resistência do modelo para a escala real, que exclui os efeitos de águas rasas, levará a erros significativos. O estudo forneceu expressões empíricas e sugeriu um novo método de extrapolação que incorpora a linha de atrito modificada (incluindo efeitos de águas rasas) e o fator de forma, fornecendo uma abordagem fisicamente correta para a previsão da resistência de navios em águas rasas.

Kaidi et al. (2020) realizaram pesquisa numérica CFD do impacto da camada de lama no leito marinho sobre a resistência e o *squat* (afundamento e trim) de navios. O objetivo era avaliar a manobrabilidade de grandes embarcações navegando em águas restritas, muitas vezes com “folga sob a quilha” (UKC) pequena ou negativa em relação à interface água-lama, seguindo o conceito de fundo náutico (*nautical bottom*). A embarcação utilizada para as simulações foi um casco de um navio porta-contêiner. O trabalho foi realizado por meio de um modelo tridimensional CFD, utilizando o código comercial Ansys-Fluent 13.0, que emprega o método VOF para simular o fluxo multifásico (ar/água/lama) e o modelo de turbulência SST $k-\omega$. Quatro parâmetros principais foram testados para cobrir diversas configurações estuarinas: as propriedades da lama (quatro combinações de densidade e viscosidade), a velocidade do navio, a espessura da camada de lama e o valor do UKC (positivo ou negativo). Um modelo newtoniano foi selecionado para representar a lama na investigação principal, por fornecer uma estimativa aceitável da resistência. Entre os resultados mais interessantes, destacou-se que a resistência do navio aumenta com o incremento da viscosidade da lama, afetando predominantemente o componente friccional da resistência. Em contraste, a variação da densidade da lama teve um efeito insignificante na resistência total para as espessuras testadas. Observou-se que, ao navegar dentro da camada lodosa (UKC negativo) em alta velocidade, a interface superior da lama tende a se liquefazer, criando uma fina camada de fluido entre o casco e a lama, e o fundo da quilha não fica totalmente coberto. Os autores concluíram que os resultados numéricos obtidos apresentaram concordância razoável com os dados experimentais de modelos físicos. O padrão das ondas internas, que influenciam o *squat*, depende do efeito combinado de diversos fatores, como viscosidade, velocidade, espessura da lama e UKC, e o número de Froude interno não é adequado para caracterizar esses padrões. O efeito da camada de lama na resistência pode ser sentido mesmo com UKC positivo, dependendo das propriedades da lama, mas o efeito no afundamento (*sinkage*) só é significativo quando o UKC é negativo. Por fim, a capacidade do método CFD de simular o fluxo multifásico e a interação fluido-estrutura foi demonstrada.



O estudo realizado por Zhou et al. (2021) combinou investigações experimentais e simulações CFD para analisar os efeitos de um navio passante de alta velocidade sobre um navio atracado ao longo de um cais fechado. A investigação experimental utilizou o porta-contentores MOERI (KCS) como navio atracado e a fragata padrão da Marinha dos EUA, DTMB5415, como navio passante. Para a análise numérica, os autores empregaram o software comercial STAR-CCM+, aplicando um resolvidor RANS não estacionário, o método Volume of Fluid (VOF) para modelar a superfície livre e a técnica de malha sobreposta (*overset mesh*) para simular os movimentos relativos entre as duas embarcações. Os resultados revelaram que, em velocidades relativamente altas, o comportamento das forças e momentos hidrodinâmicos transientes sobre o navio atracado é distinto do observado em baixas velocidades. Neste regime, a excitação do navio atracado depende principalmente das ondas geradas pelo navio passante e da sua subsequente interação com o navio e a parede do cais. Os autores confirmaram que a profundidade da água, a velocidade de passagem e a distância de separação lateral são parâmetros importantes na interação transiente. Os resultados mais interessantes demonstraram que o aumento da velocidade de passagem tem um efeito significativamente maior do que a redução da distância lateral de separação. Por exemplo, enquanto a redução da distância de separação resulta em um aumento linear das forças e movimentos, o aumento de 30% na velocidade de passagem causou um incremento máximo de até 4,5 vezes nas forças de *sway* e momento de *yaw*, e aumentos de 15, 8 e 10 vezes nos movimentos de rolagem, arfagem e guinada, respectivamente. Diante disso, Zhou et al. (2021) concluíram que a velocidade do navio passante é o fator dominante e que a medida mais eficaz para reduzir os efeitos prejudiciais da passagem de navios é o controle rigoroso dessa velocidade.

Chiroșcă e Rusu (2021) realizaram uma simulação numérica CFD do escoamento viscoso de superfície livre em torno de um modelo de casco nu para fins de avaliação de desempenho e resistência hidrodinâmica. A embarcação utilizada como caso de estudo e benchmark foi o Duisburg Test Case (DTC), um modelo que representa um navio porta-contentores típico de 14.000 TEU. Para este fim, foram empregados três pacotes de software CFD: FINE Marine (NUMECA), ANSYS CFD (Fluent) e SHIPFLOW. As simulações, realizadas para seis velocidades correlacionadas com testes experimentais (entre 1.335 m/s e 1.668 m/s), utilizaram o resolvidor RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), o método VOF para capturar a superfície livre, e o modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Menter Shear-Stress Transport*) para a comparação primária. Além disso, o SHIPFLOW foi submetido a uma análise comparativa de modelos de turbulência ($k-\omega$ SST, $k-\omega$ BSL e EASM). Os resultados mais interessantes



indicaram um acordo satisfatório entre os testes experimentais de reboque e os resultados computacionais. De forma notável, o software SHIPFLOW gerou as soluções mais precisas em comparação com o ANSYS Fluent e o NUMECA, alcançando o mínimo erro médio percentual de 2.011% na resistência total (R_T). Outro resultado significativo foi a eficiência temporal do SHIPFLOW, que atingiu a convergência em aproximadamente 30 minutos, em contraste com as 2 horas do ANSYS e as 24 a 48 horas do NUMECA. Na comparação interna de modelos de turbulência no SHIPFLOW, o modelo EASM (*Explicit Algebraic Stress Model*) produziu os resultados mais próximos do modelo de teste, com uma diferença média de apenas 1.23%. Uma das conclusões dos autores é que, embora as técnicas de CFD estejam a melhorar e sejam frequentemente usadas para complementar ou até substituir experimentos, a precisão permanece o principal desafio. Especificamente para este caso, o SHIPFLOW provou ser a melhor solução para a análise do DTC. Os autores também notaram que a precisão dos resultados numéricos pode ser aprimorada aumentando os passos de tempo e alterando a precisão da malha.

Shi et al. (2021) utilizaram CFD para investigar a crucial interação navio - fundo marítimo quando uma embarcação opera em águas rasas com fundo irregular. O principal objetivo foi desenvolver um método de simulação numérica transiente que fosse de alta fidelidade e economicamente viável em termos de custo computacional para prever a reação de um navio ao passar por um degrau de banco, um cenário que afeta a segurança e o desempenho (como o *squat*). A embarcação utilizada como modelo de referência foi o navio KRISO Container Ship. O método em questão fez uso do pacote CFD Star-CCM+ juntamente com o modelo URANS de Navier-Stokes. Para otimizar a eficiência computacional, os autores adotaram a técnica da malha deslizante, que divide o domínio computacional em duas regiões: uma fixa, que representa o fundo do mar, e uma móvel, que acompanha o movimento da embarcação. Essa abordagem possibilitou que a região móvel capturasse de maneira dinâmica as variações do leito do mar, reduzindo consideravelmente o tamanho da malha ativa e, conseqüentemente, o custo computacional da simulação, sem comprometer a qualidade dos resultados. O modelo foi validado e verificado, mostrando alta precisão na previsão das características de força e desenvolvimento de ondas. Os resultados revelaram que o efeito de impulso gerado pela passagem do degrau de banco é o fator mais notável, impactando significativamente a elevação da onda, o desenvolvimento da esteira e o afundamento do navio (*sinkage*). A resistência total aumentou drasticamente ao passar pelo degrau, com o segundo pico sendo o mais alto, especialmente sob um número de Froude de profundidade maior. O afundamento do navio



exibiu um comportamento flutuante, e os autores definiram cinco regiões (I a V) para descrever essa variação. Os autores concluíram que o modelo numérico é um processo de benchmark eficaz, e que este achado sublinha a importância de considerar o efeito de impulso e o risco de afundamento severo tardio ao estabelecer diretrizes de segurança e operação marítima. Além disso, notou-se que um mais alto na região de águas rasas pode levar a um efeito não linear mais forte no afundamento.

Song et al. (2021) usaram CFD para prever o desempenho de resistência e propulsão de navios em escala real, abordando o efeito de escala que gera grandes erros na conversão de dados de testes de modelos. O navio de carga geral REGAL, cujos dados de ensaio marítimo foram publicados em 2016 pelo Lloyd's Register (LR), foi a embarcação utilizada para esta pesquisa. As simulações foram executadas utilizando o software CFD STAR-CCM+ (versão 14.02), aplicando a abordagem RANS com o modelo de turbulência SST $k-\omega$ e o modelo VOF para a superfície livre. A metodologia foi dividida em simulações de resistência e de autopropulsão em escala real, com foco na otimização de parâmetros numéricos cruciais. Na simulação de resistência, realizada para metade do navio, os autores analisaram a influência da contagem da malha, do passo de tempo e do valor de Y^+ na parede. Os resultados indicaram que o passo de tempo é vital para a captura da forma de onda, sendo recomendado que o Número de Courant–Friedrichs Lewy (CFL) na superfície livre não exceda 1. O valor de mostrou-se igualmente significativo, pois afeta a camada limite, a evolução do campo de pressão e, conseqüentemente, a resistência total do navio. Para a simulação de autopropulsão, o navio inteiro foi modelado (utilizando 30,22 milhões de células) e a rotação do hélice simulada via o método de malha deslizante (*sliding mesh*). Foram investigados tanto o desempenho estável em termos de empuxo e torque quanto as forças de excitação instáveis geradas pelo hélice. Foi observado que, para prever com precisão o empuxo e torque, o CFL na interface da malha deslizante deve ser mantido abaixo de 1, enquanto a obtenção correta da força de excitação exigiu um passo de tempo ainda mais restrito. Por fim, os autores apresentaram diretrizes claras para futuras simulações em escala real. A principal conclusão é que o valor apropriado de Y^+ na parede deve estar dentro do range de 200 ao simular o desempenho de propulsão. Os autores também notaram que as linhas de atrito empíricas Katsui e Grigson concordaram bem com a resistência por atrito simulada, podendo ser usadas para verificação. Devido à escassez de dados abertos, o estudo limitou-se ao navio REGAL, mas a estratégia desenvolvida serve como guia para pesquisas futuras.



Elaghbash (2021) utilizou CFD para investigar o comportamento hidrodinâmico e os efeitos de águas rasas (vias navegáveis restritas) em cascos de planeio prismáticos, calculando a força de sustentação, a resistência total e o padrão de ondas em faixas de velocidade subcrítica, crítica e supercrítica. O modelo de embarcação empregado foi um casco de planeio prismático em formato de caixa. Este modelo possuía 914 mm de comprimento e 183 mm de boca e foi simulado com um ângulo de trim fixo de 6 graus. O software central CFD de código RANS de volume finito utilizado foi o ANSYS CFX, com o ICEM CFD sendo empregado para gerar a malha de 6 milhões de elementos. Para modelar o escoamento turbulento, foi selecionado o modelo de turbulência $k-\epsilon$, enquanto a interface água-ar (superfície livre) foi tratada pelo método VOF. Embora as análises nas faixas subcrítica e supercrítica fossem em regime estacionário (*steady-state*), a simulação em regime transiente foi crucial para a faixa de velocidade crítica (número de Froude de profundidade, $F_H = 0,84$ a $1,27$) devido à propagação das ondas solitárias. Os resultados mais interessantes confirmaram a precisão do CFD, demonstrando uma boa concordância com os dados experimentais, com um erro médio total de 7% para a força de sustentação e 8% para a resistência total. Contudo, a descoberta crucial foi o pior efeito hidrodinâmico em canais rasos: a formação da onda solitária (*soliton*) na faixa de velocidade crítica. A amplitude dessa onda solitária aumenta com o incremento das velocidades críticas, causando flutuações na força de sustentação e no momento de trim. A consequência mais crítica dessa formação de ondas é o aumento significativo da resistência total, que se mostrou substancialmente maior em canais rasos do que em águas abertas. A diferença máxima observada foi de 43% na resistência total entre as condições de águas rasas e profundas, registrada especificamente na velocidade crítica de 0.9 m/s. Em conclusão, os autores enfatizam que o pior efeito no casco de planeio em canais rasos ocorre na faixa de velocidade crítica, e, portanto, os condutores de embarcações (*boat drivers*) devem evitar navegar nesta faixa de velocidade para mitigar os impactos negativos.

O estudo realizado por Hosseini et al. (2021) teve como objetivo principal avaliar a performance de diferentes modelos de CFD na previsão do desempenho de um casco planador com quina (o modelo deep-VC1) em condições de águas calmas. A pesquisa utilizou o pacote comercial STAR-CCM+ para simular o movimento dinâmico da embarcação em dois graus de liberdade. Foram comparados quatro modelos distintos (MKE, OKE, MDE, ODE), formados pela combinação de dois modelos de turbulência ($k-\epsilon$, e DES – *Detached Eddy Simulation*) e duas técnicas de movimento de malha (*Morphing* e *Overset*). Os resultados apontaram que o modelo de turbulência DES oferece maior exatidão na previsão do ângulo de trim e da resistência em



comparação com o $k-\epsilon$, especialmente em altas velocidades. Essa superioridade se deve à capacidade do DES de calcular os vórtices turbulentos de grande escala (*eddies*) que emergem na esteira da embarcação, os quais induzem uma força extra de resistência que o modelo $k-\epsilon$, não consegue capturar. O modelo DES também demonstrou ser mais eficaz ao resultar em um amortecimento extra das cristas das ondas de popa (*transom waves*), refletindo uma maior capacidade de calcular a dissipação de energia. Em relação à simulação do movimento da embarcação, a técnica *Morphing* resultou em erros menores na previsão do ângulo de trim em altas velocidades, enquanto a técnica *Overset* tendeu a superestimar a força de resistência em todas as velocidades. A superestimação da resistência pelo método *Overset* foi atribuída ao cálculo de maior vorticidade e comprimentos de *eddies* mais longos na zona de *overset* e na esteira da embarcação, indicando a geração de maiores tensões de cisalhamento (*shear stresses*) na superfície livre. Embora o *Overset* fosse marginalmente mais rápido por passo de tempo do que o *Morphing* (que exige tempo para distorcer a malha), o modelo $k-\epsilon$, sempre foi mais rápido que o DES. A conclusão dos autores é que a combinação da técnica de malha *Morphing* com o modelo de turbulência DES (MDE) é a mais recomendada para modelagem CFD de cascos planadores em alta velocidade. Apesar de o MDE exigir um tempo computacional mais longo, ele fornece um nível de acurácia superior na previsão do desempenho hidrodinâmico. Para que o método *Overset* atinja um desempenho satisfatório, os autores sugerem que futuras pesquisas foquem na modificação da estrutura da malha para evitar a superestimação da vorticidade e dos comprimentos dos *eddies* na região de interpolação.

O estudo de Maia et al. (2021), que estende a pesquisa de Maia e Said (2019), focou na otimização hidrodinâmica da lancha escolar média LE-M, uma embarcação usada no transporte de crianças em comunidades ribeirinhas. O processo de otimização buscou reduzir a resistência ao avanço modificando a região da proa do casco. A metodologia empregada combinou algoritmos genéricos (NSGA-II) e simulações de CFD. O software CAESES foi utilizado para o ambiente de CAD e otimização, enquanto o solver SHIPFLOW foi utilizado para os testes hidrodinâmicos. O objetivo principal consistiu em minimizar os coeficientes de resistência da onda para reduzir o coeficiente de resistência total e a amplitude da onda gerada. As modificações geométricas foram implementadas na proa utilizando a variação delta de uma superfície B-spline. Foram realizadas duas simulações principais, OP4 e OP6, para analisar as variações, sob a restrição de que o deslocamento não fosse reduzido em mais de 0,2 m³ para manter a estabilidade da embarcação. O resultado mais interessante foi obtido pelo modelo des0371 (oriundo da OP6), que alcançou uma redução máxima de 5,00% no coeficiente de



resistência total passando de 0,03497 para 0,03257). Uma tendência geométrica fundamental observada nos cascos otimizados foi a concavidade no fundo da proa, que ajuda a facilitar o fluxo de fluido, atenuando as linhas "cheias" do casco de deslocamento original e reduzindo a resistência residual. As conclusões dos autores indicam que a metodologia pode ser eficaz para otimizar pequenas embarcações fluviais. Os autores destacam que a melhoria no desempenho hidrodinâmico contribuirá diretamente para a redução do consumo de combustível e a promoção de um transporte mais limpo e eficiente, gerando impactos socioeconômicos e ambientais positivos para as comunidades ribeirinhas, onde o transporte fluvial é vital. A redução da resistência e, conseqüentemente, das amplitudes das ondas geradas, também é crucial para a preservação das margens dos rios na Amazônia.

Pacuraru et al. (2022) investigaram o impacto da modificação de características geométricas (como túneis, *spray rails* e *whiskers*) no desempenho hidrodinâmico de um casco planador de alta velocidade. A metodologia central empregada foi baseada em CFD, utilizando o solver ISIS-CFD do pacote FINETM/Marine. O processo começou com a validação do método CFD com dados experimentais para garantir a precisão na previsão do arrasto total e do ângulo de trim. Em seguida, os autores realizaram um estudo comparativo com sete variações geométricas (V1 a V7) de um casco principal (com comprimento total de 12,28 m e deslocamento de 14,288 t), simulando a navegação em oito velocidades diferentes, de 12 a 40 nós. As modificações geométricas resultaram em variações significativas nos parâmetros hidrodinâmicos. Melhorias na forma do túnel (V6) não trouxeram ganhos globais notáveis no arrasto (diferença inferior a 1%), embora tenham mitigado problemas localizados de baixa pressão. Contudo, o aumento da largura do *spray rail* (V4) foi benéfico, pois promoveu uma redução do ângulo de trim em até 17% na faixa de alta velocidade (16 a 40 nós), o que é considerado uma melhoria importante para a eficiência propulsiva. Adicionalmente, o deslocamento do Centro de Gravidade Longitudinal (LCG) para a popa (V5) melhorou a resistência em altas velocidades (redução de 0,5% a 3,7%), mas elevou significativamente o ângulo de trim em baixas velocidades, um trade-off que deve ser avaliado no projeto. A versão V7 (casco V4 com dois pares de *whisker rails* otimizados) foi considerada a mais eficiente, alcançando uma redução máxima no arrasto total de 9,7% na velocidade mais alta (40 nós) e 5,9% a 36 nós. Pacuraru et al. (2022) atribuíram essa redução expressiva principalmente à diminuição da resistência viscosa (até 17,6%), causada pelo efeito de aeração proporcionado pelos *whisker rails*. Os autores concluíram que a metodologia CFD é confiável para a avaliação do desempenho de cascos planadores e que a



otimização de características como os *whisker rails* é crucial para maximizar a eficiência hidrodinâmica, especialmente em regimes de alta velocidade.

Shen et al. (2022) concentraram-se no projeto de um hidrofólio para otimizar o desempenho do barco planador USV01 (com 2,75 m de comprimento total e 125,4 kg de deslocamento), visando a redução de resistência ao avanço. O projeto do hidrofólio, que utilizou o perfil NACA0012, envolveu a análise de doze casos, variando quatro parâmetros principais: posição longitudinal, envergadura, ângulo de ataque e altura de instalação. A metodologia utilizada foi baseada em CFD, empregando o software comercial STAR-CCM+ para resolver as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds não estacionárias (URANS). O modelo de turbulência SST $k-\omega$ foi adotado, e a validação do método, feita com base nos dados experimentais do USV01, confirmou sua adequação com um erro máximo de resistência de 3,6%. Os resultados mais notáveis indicaram que o hidrofólio, com parâmetros adequados, pode reduzir significativamente a resistência total. A máxima redução registrada foi de 30,74% da resistência da embarcação nua na velocidade de projeto de 8 m/s (31,1 nós). Essa otimização dependeu criticamente da posição: a instalação próxima à proa (7/8L) foi a mais eficaz (27,49% de redução), pois gerou sustentação que levantou a proa e aumentou o ângulo de trim. O aumento da envergadura (até 0.6B) e da altura de instalação (até 0.95d) também melhorou o desempenho de redução de resistência. Em contraste, a fixação do hidrofólio próxima à popa aumentou a resistência total em 12,5%. As conclusões dos autores confirmam que o hidrofólio funciona gerando sustentação e um momento de trim que aumenta o ângulo de “arfagem” da popa, diminuindo a área molhada do casco e resultando em uma poça de esteira (*tail hole*) mais longa e rasa. No entanto, eles enfatizam que o efeito de redução de resistência é limitado à faixa de velocidades médias (23,33 a 38,87 nós). Em velocidades mais baixas (abaixo de 15,55 nós) ou muito altas (acima de 46,65 nós, como 58,32 nós), o hidrofólio, na verdade, adiciona resistência, podendo aumentar a resistência total em 19,09%. Por questões de estabilidade em alta velocidade, os autores sugerem a seleção de ângulos de ataque negativos, mesmo que ângulos positivos possam oferecer uma redução de resistência ligeiramente maior em velocidade de cruzeiro.

Wang et al. (2022) tiveram como objetivo desenvolver e validar métodos numéricos para prever a onda estacionária em navios de alta velocidade ($F_n > 0.5$) equipados com popa do tipo transom. O trabalho se baseou em duas metodologias principais: o *Rankine Panel Method* (RPM), fundamentado no Método de Elementos de Contorno de Alta Ordem (HOBEM) e implementado em um código Fortran desenvolvido *in-house*, e CFD, empregando o software



comercial Star-CCM+ para simulações de fluxo viscoso (RANS/VOF). A validação envolveu cascos matemáticos (Wigley) e modelos de navios práticos de popa de travesseira, como a série NPL (e.g., NPL 3b) e o navio R/V Athena (DTMB 5365). Para modelar o fenômeno complexo da separação do fluxo na popa, crucial para altas velocidades, o RPM incorporou dois tratamentos numéricos. O primeiro foi o Modelo de Corpo Falso (FB), que utiliza um apêndice virtual para fechar a geometria do casco e simular a cavidade oca formada pelo fluxo separado. O segundo consistiu nas Condições de Popa de Travesseira (TS), com três formas distintas (A, B e C), aplicadas na superfície livre próxima à popa para garantir o desprendimento suave da onda. Os resultados de resistência e perfis de onda calculados pelo RPM, utilizando tanto o tratamento FB quanto o TS-C, mostraram boa concordância com os dados experimentais disponíveis. Como conclusão, Wang et al. (2022) confirmaram que o RPM é um método preciso e robusto para resolver problemas de ondas de navios tanto com popa fechada quanto com popa transom. Notavelmente, verificou-se que em altas velocidades ($Fn > 0.5$), os perfis de onda calculados pelas diferentes formas de condições TS demonstram excelente concordância entre si e com os resultados de CFD. O método CFD, ao considerar os efeitos não lineares e viscosos, foi validado como capaz de obter a resistência total do navio com alta precisão. Os autores observaram que o fluxo atrás da popa transom forma uma cavidade oca seguida por uma cauda de galo (*rooster tail*), e a extensão longitudinal da cavidade oca e a largura da cauda de galo aumentam com a velocidade do navio.

Tran et al. (2022) apresentaram uma estratégia de otimização para cascos planadores, buscando superar a dificuldade imposta pela complexidade das interações hidrodinâmicas e das mudanças de trim em altas velocidades. A metodologia iniciou-se com a análise dimensional (Teorema Pi de Buckingham) para estabelecer uma função objetivo de resistência que dependia de apenas três parâmetros adimensionais cruciais: o coeficiente de carregamento estático (Cs), a razão da posição longitudinal do centro de gravidade em relação à boca e o ângulo de declive. Esta estratégia foi aplicada ao navio de passageiros de alta velocidade K88, projetado pela SESCO, que havia sido testado em modelo, mas não havia atingido o desempenho esperado. Para prever a resistência das variantes do casco, os autores utilizaram o método de Savitsky modificado e o CFD. O método de Savitsky modificado foi aplicado para melhorar a precisão da previsão, mantendo os desvios dentro de $\pm 5\%$ em relação aos dados de teste de modelo. O software XFlow (CFD baseado em Lattice Boltzmann) foi empregado, sendo a precisão das simulações assegurada pela seleção de inputs adequados, como o modelo de turbulência Smagorinsky dinâmico (LES) com $C_{sm} = 0.22$. O problema de otimização para encontrar a variante de casco



com resistência mínima foi resolvido combinando o modelo *surrogate Kriging* com o algoritmo de otimização Nelder-Mead. Essa combinação demonstrou ser altamente eficaz para otimizar problemas que utilizam métodos computacionais caros (como o CFD), pois permitiu definir a solução ótima com alta precisão (menos de 1%) após apenas duas iterações. O resultado mais interessante e significativo foi a capacidade de reduzir drasticamente a resistência total do K88. A redução máxima de resistência total alcançada foi de cerca de 19,4%, obtida pela correção simultânea do ângulo de declive e da altura do ressalto de proa (*chine height at the bow*, h). Outras otimizações também resultaram em ganhos notáveis, como a redução de 11,3% pela correção simultânea do ângulo de declive e da boca. Tran, Huynh e Kim (2022) concluíram que a estratégia proposta é eficiente e que os parâmetros ótimos encontrados (como ângulos de declive entre 19.79° e 20.13° e ângulos de trim de equilíbrio entre 3° e 4°) são consistentes com as recomendações teóricas para embarcações de alta velocidade que operam em mar aberto.

O trabalho de Huang et al. (2023a) visou estabelecer diretrizes de CFD em escala real para simular o avanço de navios em águas abertas. A motivação reside no fato de que a maioria das simulações de navios é feita em escala de modelo, o que introduz discrepâncias físicas devido às diferenças no número de Reynolds (Re) e exige o uso de procedimentos empíricos de extrapolação (como o ITTC), que podem ser imprecisos. A simulação direta em escala real evita esses problemas de escala. O estudo utilizou como objeto o *Regal*, um navio de carga geral com 138 metros de comprimento (L_{pp}), e o software STAR-CCM+. O modelo computacional foi baseado nas equações de Navier-Stokes com o modelo de turbulência *Shear Stress Transport* (SST) e o método VOF para a superfície livre entre a água e o ar. A validação inicial contra dados de testes de mar (*sea trials*) de 2016, usando o torque do propulsor como benchmark, mostrou uma divergência inferior a 5%, confirmando a precisão do modelo base. A metodologia consistiu em uma investigação sistemática de 34 casos, variando setups computacionais essenciais, como a densidade total da malha (células), o refinamento da malha na superfície livre e na camada limite, o tamanho do passo de tempo (número de Courant) e as ordens de discretização. Os resultados mais interessantes demonstraram que os setups ideais para escala real diferem evidentemente daqueles prescritos pelas diretrizes de CFD em escala de modelo. Por exemplo, enquanto a diretriz RANS em escala de modelo sugere que o parâmetro de malha próximo ao casco seja menor que 100, resultados precisos em escala real foram obtidos em torno de 1000. Em relação à resistência do navio, o CFD em escala real previu que o coeficiente de resistência por fricção (C_F) é cerca de 5% a 10% maior do que o previsto pela fórmula empírica ITTC'57. Esse achado reforça a ideia de que a fórmula ITTC contemporânea pode



subestimar em escala real. Quanto aos esquemas numéricos, a utilização de 2ª ordem para discretização espacial foi crucial para modelar corretamente a resistência por pressão e as ondas geradas, enquanto a 1ª ordem induziu uma superestimativa significativa na resistência. A discretização temporal (1ª ou 2ª ordem) se mostrou igualmente aplicável. A abordagem otimizada permitiu a redução do custo computacional, diminuindo o número de células de 15,2 milhões (caso base validado) para aproximadamente 11 milhões, mantendo a precisão. Em suma, os autores chegaram à conclusão de que as simulações CFD em escala real trazem vantagens importantes para prever o desempenho dos navios, já que esse método reproduz a hidrodinâmica na dimensão correta a fim de eliminar a necessidade de recorrer a procedimentos empíricos. Porém, o ponto principal é que é fundamental criar uma diretriz específica para CFD em escala real. Seguir as regras que já existem e são usadas para modelos em escala reduzida nas simulações em escala real desperdiça muitos recursos computacionais. Com base nas 35 simulações apresentadas nessa pesquisa, o estudo apresentou um conjunto de recomendações que equilibram precisão e custo para simulações de navios cargueiros em águas abertas, abrindo caminho para futuras análises mais eficientes e acessíveis no setor naval.

Tripathi e Vijayakumar (2024) analisaram as interações hidrodinâmicas de *stern flaps* (abas de popa) em um navio de deslocamento de alta velocidade, visando quantificar seu potencial de economia de energia e aprimoramento da eficiência. A metodologia empregou uma abordagem híbrida, combinando testes experimentais em um modelo físico (escala 1:35) construído em plástico reforçado com fibra (FRP, *Reinforced Fiber Plastic*) e simulações avançadas de CFD. Foram investigadas dezesseis configurações distintas de flaps. O modelo numérico utilizou o software comercial Star CCM+ para realizar simulações RANS, empregando o modelo de turbulência SST k-omega para capturar com precisão as características do fluxo de esteira. O resultado mais significativo do estudo foi a confirmação de que os *stern flaps* reduziram consistentemente a resistência e a potência efetiva, com uma redução máxima na potência efetiva de cerca de 6%. Esta eficácia foi otimizada para o regime de alta velocidade, com o desempenho máximo ocorrendo no intervalo de Número de Froude (F_n) entre 0,3 e 0,4, e a maior redução de resistência observada em $F_n = 0,367$. Tripathi e Vijayakumar (2024) notaram, contudo, que os benefícios são limitados em velocidades mais baixas ($F_n < 0,198$), onde o aumento dos ângulos dos flaps pode resultar em penalidades de resistência, chegando a um aumento de até +15% em certos casos. As conclusões dos autores apontaram que o mecanismo principal de redução de resistência é hidrodinâmico, sendo impulsionado pela recuperação de pressão na popa (reduzindo a resistência de pressão viscosa) e pela supressão de ondas. Este



efeito também estende o comprimento hidrodinâmico efetivo do navio, diminuindo a resistência de formação de ondas. Além disso, os *stern flaps* melhoraram a eficiência propulsiva ao aumentar a fração de esteira e reduzir a dedução de impulso. Os autores concluíram que esta é uma solução de economia de energia convincente para navios de deslocamento no regime F_n 0,3–0,4, recomendando um design base com comprimento de corda de aproximadamente 1% LWL, envergadura total e ângulo de 10 graus.



3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As informações seguintes foram obtidas do manual do software Ansys Fluent (Ansys, 2024), considerando as características das simulações realizadas. Informações adicionais podem ser consultadas no manual do software ou na literatura científica que tenha utilizado abordagem multifásica água-ar, modelo VOF (Volume of Fluid), e condições de contorno de canal aberto, para avaliar a hidrodinâmica de embarcações.

3.1 Equações da continuidade da massa e quantidade de movimento

Para todos os escoamentos, o Ansys Fluent resolve equações de conservação para massa e quantidade de movimento. Equações de transporte adicionais também são resolvidas quando o escoamento é turbulento. A equação para conservação de massa, ou equação de continuidade, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

A Equação 1 é a forma geral da equação de conservação de massa e é válida tanto para escoamentos incompressíveis quanto compressíveis. A fonte S_m é a massa adicionada à fase contínua a partir da segunda fase dispersa (por exemplo, devido à vaporização de gotículas líquidas) e quaisquer fontes definidas pelo usuário. Neste estudo é considerada nula.

A conservação da quantidade de movimento em um referencial inercial (não acelerado) é descrita por (Batchelor, 2000):

$$\frac{\partial y}{\partial x} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

sendo p a pressão estática, $\bar{\tau}$ o tensor de tensão (descrito abaixo), $\rho \vec{g}$ e \vec{F} a força gravitacional do corpo e as forças externas do corpo (por exemplo, que surgem da interação com a fase dispersa), respectivamente. O tensor de tensão $\bar{\tau}$ é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

sendo μ a viscosidade molecular, I o tensor unitário e o segundo termo do lado direito é o efeito da dilatação do volume.



3.2 Escoamentos multifásicos

Segundo o manual do Ansys Fluent (Ansys, 2024), muitos escoamentos encontrados na natureza e na tecnologia são uma mistura de fases. As fases físicas da matéria são gás, líquido e sólido, mas o conceito de fase em um sistema de escoamento multifásico é aplicado em um sentido mais amplo. Em um escoamento multifásico, uma fase pode ser definida como uma classe identificável de material que possui uma resposta inercial específica e interação com o escoamento e o campo potencial no qual está imerso. Por exemplo, partículas sólidas de tamanhos diferentes do mesmo material podem ser tratadas como fases diferentes, pois cada conjunto de partículas com o mesmo tamanho terá uma resposta dinâmica semelhante ao campo do escoamento. Os regimes de escoamento multifásico podem ser agrupados em quatro categorias: escoamentos gás-líquido ou líquido-líquido; escoamentos gás-sólido; escoamentos líquido-sólido; e escoamentos trifásicos. No presente estudo será considerado um escoamento gás-líquido (ar-água).

Atualmente, existem duas abordagens para o cálculo numérico de escoamentos multifásicos: a abordagem de Euler-Lagrange e a abordagem de Euler-Euler. Esta última será considerada neste estudo. Na abordagem Euler-Euler, as diferentes fases são tratadas matematicamente como contínuos interpenetrantes. Como o volume de uma fase não pode ser ocupado pelas outras fases, o conceito de fração de volume física é introduzido. Essas frações de volume são consideradas funções contínuas de espaço e tempo e sua soma é igual a um. Equações de conservação para cada fase são derivadas para obter um conjunto de equações com estrutura semelhante para todas as fases. Essas equações são fechadas fornecendo relações constitutivas obtidas a partir de informações empíricas ou, no caso de escoamentos granulares, pela aplicação da teoria cinética.

No Ansys Fluent, três modelos multifásicos Euler-Euler diferentes estão disponíveis: o modelo de volume de fluido VOF, o modelo de mistura e o modelo Euleriano. Neste estudo será considerado o modelo VOF.

3.2.1 O modelo VOF (*Volume of Fluid*)

De acordo com o manual do software Ansys Fluent (Ansys, 2024), o modelo VOF é uma técnica de rastreamento de superfície aplicada a uma malha euleriana fixa, que é projetado para dois ou mais fluidos imiscíveis onde a posição da interface entre os fluidos é de interesse. No modelo VOF, um único conjunto de equações de momento é compartilhado pelos fluidos, e a fração de



volume de cada um dos fluidos em cada célula computacional é rastreada em todo o domínio. As aplicações do modelo VOF incluem escoamentos de superfície livre, escoamentos estratificados, enchimento, sloshing, o movimento de grandes bolhas em um líquido, a previsão da ruptura de jatos (tensão superficial), o movimento do líquido após o rompimento de uma barragem, e o rastreamento constante ou transiente de qualquer interface líquido-gás.

O modelo VOF pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de momento e rastreando a fração de volume de cada um dos fluidos em todo o domínio. Aplicações típicas incluem o movimento de um líquido após a ruptura de uma barragem, a previsão da ruptura de jatos, o movimento de grandes bolhas em um líquido, e o rastreamento constante ou transiente de qualquer interface líquido-gás.

3.2.2 Limitações do modelo VOF

As seguintes restrições se aplicam ao modelo VOF no Ansys Fluent (Ansys, 2024):

- É necessário usar o solucionador baseado em pressão. O modelo VOF não está disponível com o solucionador baseado em densidade.
- Todos os volumes de controle devem ser preenchidos com uma única fase fluida ou uma combinação de fases. O modelo VOF não permite regiões vazias onde nenhum tipo de fluido esteja presente.
- Escoamentos periódicos em sentido horário com vazão mássica especificada não podem ser modelados quando o modelo VOF é utilizado.
- A formulação implícita de segunda ordem para o avanço no tempo não pode ser usada com o esquema explícito VOF.

3.2.3 Cálculos de VOF em estado estacionário e transitório

Seguindo as informações do software (Ansys, 2024), a formulação VOF no Ansys Fluent é geralmente usada para calcular uma solução dependente do tempo, mas para problemas nos quais é de interesse apenas com uma solução em estado estacionário, é possível realizar um cálculo em estado estacionário. Um cálculo de VOF em estado estacionário só é sensato quando sua solução é independente das condições iniciais e há contornos de entrada distintos para as fases individuais.



A formulação VOF baseia-se no fato de que dois ou mais fluidos (ou fases) não se interpenetram. Para cada fase adicional adicionada ao seu modelo, uma variável é introduzida: a fração volumétrica da fase na célula computacional. Em cada volume de controle, as frações volumétricas de todas as fases somam a unidade. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume, desde que a fração de volume de cada uma das fases seja conhecida em cada local. Assim, as variáveis e propriedades em qualquer célula são puramente representativas de uma das fases ou representativas de uma mistura de fases, dependendo dos valores da fração de volume. Em outras palavras, se a fração de volume do fluido q^{th} na célula for denotada como α_q , então as três condições a seguir são possíveis:

- $\alpha_q = 0$: A célula está vazia (do fluido q^{th}).
- $\alpha_q = 1$: A célula está cheia (do fluido q^{th}).
- $0 < \alpha_q < 1$: A célula contém a interface entre o fluido q^{th} e um ou mais outros fluidos.

Com base no valor local de α_q , as propriedades e variáveis apropriadas serão atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio.

3.2.4 Equação de fração de volume

O rastreamento da(s) interface(s) entre as fases é realizado pela solução de uma equação de continuidade para a fração de volume de uma (ou mais) das fases. Para a fase, essa equação tem a seguinte forma (Ansys, 2024):

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (4)$$

onde \dot{m}_{qp} é a transferência de massa de fase q para fase p e \dot{m}_{pq} é a transferência de massa de fase p para fase q . Por padrão, o termo fonte no lado direito da equação, S_{α_q} , é zero, mas é possível especificar uma fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase. A equação da fração de volume não será resolvida para a fase primária. A fração de volume da fase primária será calculada com base na seguinte restrição:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (5)$$



A equação da fração de volume pode ser resolvida por meio de formulação de tempo implícita ou explícita.

3.2.5 Propriedades dos materiais

As propriedades que aparecem nas equações de transporte são determinadas pela presença das fases componentes em cada volume de controle (Ansys, 2024). Em um sistema bifásico, por exemplo, se as fases forem representadas pelos subscritos 1 e 2, e se a fração de volume da segunda fase estiver sendo rastreada, a densidade em cada célula é dada por

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (6)$$

Geralmente, para um sistema de fase β , a densidade média da fração de volume assume a seguinte forma:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (7)$$

Todas as outras propriedades (por exemplo, viscosidade) são calculadas dessa maneira.

3.2.6 Equação de quantidade de movimento

Uma única equação de conservação da quantidade de movimento é resolvida em todo o domínio, sendo o campo de velocidade resultante compartilhado entre as fases (Ansys, 2024). A equação de momento seguinte depende das frações de volume de todas as fases através das propriedades ρ e μ .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

3.2.7 escoamento de canal aberto

O Ansys Fluent permite modelar os efeitos do escoamento em canal aberto usando a formulação VOF e a condição de contorno de canal aberto (Ansys, 2024). Exemplos de aplicação incluem rios, represas e estruturas de perfuração de superfície em cursos d'água sem limites. Esses escoamentos envolvem a existência de uma superfície livre entre o fluido que flui e o fluido acima dele (geralmente a atmosfera). Nesses casos, a propagação das ondas e o comportamento da superfície livre tornam-se importantes. Geralmente, o escoamento nesses casos é governado pelas forças de inércia e da gravidade. Esse recurso é principalmente útil em aplicações marítimas e à análise de escoamentos em sistemas de drenagem. Os escoamentos em canal



aberto são caracterizados pelo Número de Froude adimensional de profundidade, que é definido como a razão entre a força de inércia e a força hidrostática.

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (9)$$

sendo V a magnitude da velocidade, g a gravidade e y uma escala de comprimento (neste caso, a distância do fundo do canal à superfície livre). O denominador na equação é a velocidade de propagação da onda. Com base no número de Froude, os escoamentos de canais abertos podem ser classificados nas três categorias a seguir:

- Escoamento subcrítico: quando $Fr_h < 1$, isto é, $V < \sqrt{gy}$ (portanto $V_w < 0$ ou $V_w > 0$). As perturbações podem se propagar tanto a montante quanto a jusante. Nesse caso, as condições a jusante podem afetar o escoamento a montante.
- Escoamento crítico: quando $Fr_h = 1$ (portanto $V_w = 0$). As ondas que se propagam a montante permanecem estacionárias. Nesse caso, o caráter do escoamento muda.
- Escoamento supercrítico: quando $Fr_h > 1$, isto é, $V > \sqrt{gy}$ (portanto $V_w > 0$). As perturbações não podem se propagar a montante. Nesse caso, as condições a jusante não afetam o escoamento a montante.



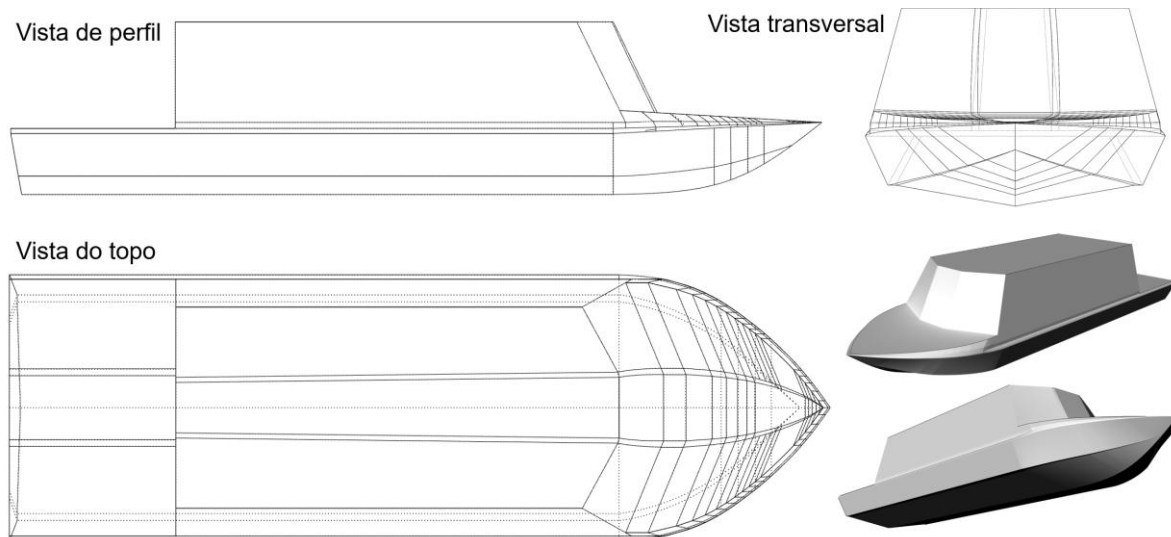
4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho inclui o desenho do casco da embarcação regional de alta velocidade, do tipo embarcação cabinada, cujo caso de estudo é descrito na subseção 4.1, e no uso do software Ansys Fluent para realizar as análises de fluidodinâmica computacional, cuja configuração é descrita na subseção 4.2.

4.1 Descrição do caso de estudo

A embarcação selecionada como caso de estudo foi modelada na versão acadêmica do software Rhinoceros 3D versão 8 (Mcneel, 2021). As vistas da geometria da embarcação são mostradas na Figura 2, enquanto as suas dimensões principais são listadas na Tabela 1. A embarcação foi idealizada a partir de informações de dimensões principais de embarcações do tipo ambulância (chamadas regionalmente como “ambulanchas”) existentes na cidade de Manaus – AM, coletadas por meio de algumas entrevistas. A geometria foi inspirada no desenho de ambulancha apresentado em Samuel (2020).

Figura 2. Geometria da embarcação considerada como caso de estudo.



Fonte: Kleyphide Pereira da Silva, 2024.

Tabela 1. Dimensões principais da embarcação selecionada. Fonte: Autoria própria.

Descrição	Valor
Comprimento total	8 m
Boca máxima	2,6 m
Pontal na proa	0,7 m



Calado considerado (sem trim)	0,2 m
Velocidade de avanço considerada	14 m/s
Profundidade de operação considerada	~10 m

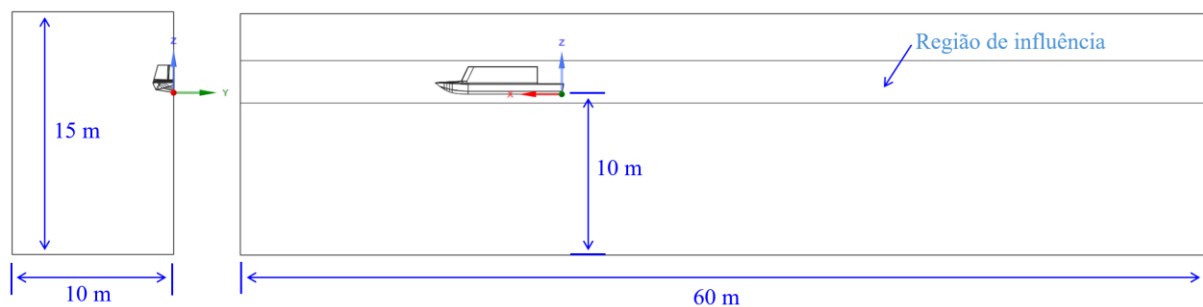
Fonte: Autoria própria.

4.2 Configuração da análise numérica no Ansys Fluent

No presente estudo, foi considerado o tutorial disponível em The-Engineering-Guide (2024) como base para entender o uso do software e realizar a configuração da simulação. No entanto, foram utilizados geometria e parâmetros diferentes relacionados com o caso de estudo da embarcação regional. Seguindo as recomendações do tutorial, a análise desenvolvida no Ansys Fluent (Ansys, 2024) permitiu realizar as seguintes atividades: utilização do módulo SpaceClaim para plotar e reparar a geometria; definição de uma malha refinada na região da superfície livre da água utilizando um corpo de influência; inicialização e uso de modelos de simulação; uso de condições de contorno; plotagem e avaliação de forças de arrasto e sustentação; pós-processamento de dados para visualizar variáveis hidrodinâmicas no módulo CFD-Post. Foi utilizada a licença *ANSYS Academic Research Mechanical & CFD 2024-R1*.

O domínio computacional para realizar as simulações é definido como mostrado na Figura 3, considerando um calado de 0,2 m. É considerada uma região de influência para realizar uma maior discretização da malha, pois nessa região existe a interface da água com o ar.

Figura 3. Domínio computacional considerado para realizar as análises.

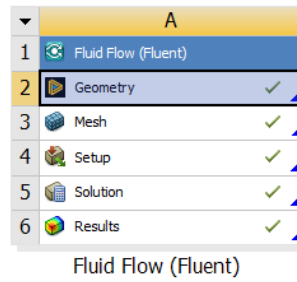


Fonte: Autoria própria.

A Figura 4 mostra a sequência de etapas que precisam ser atendidas durante a simulação utilizando o software Ansys Fluent.



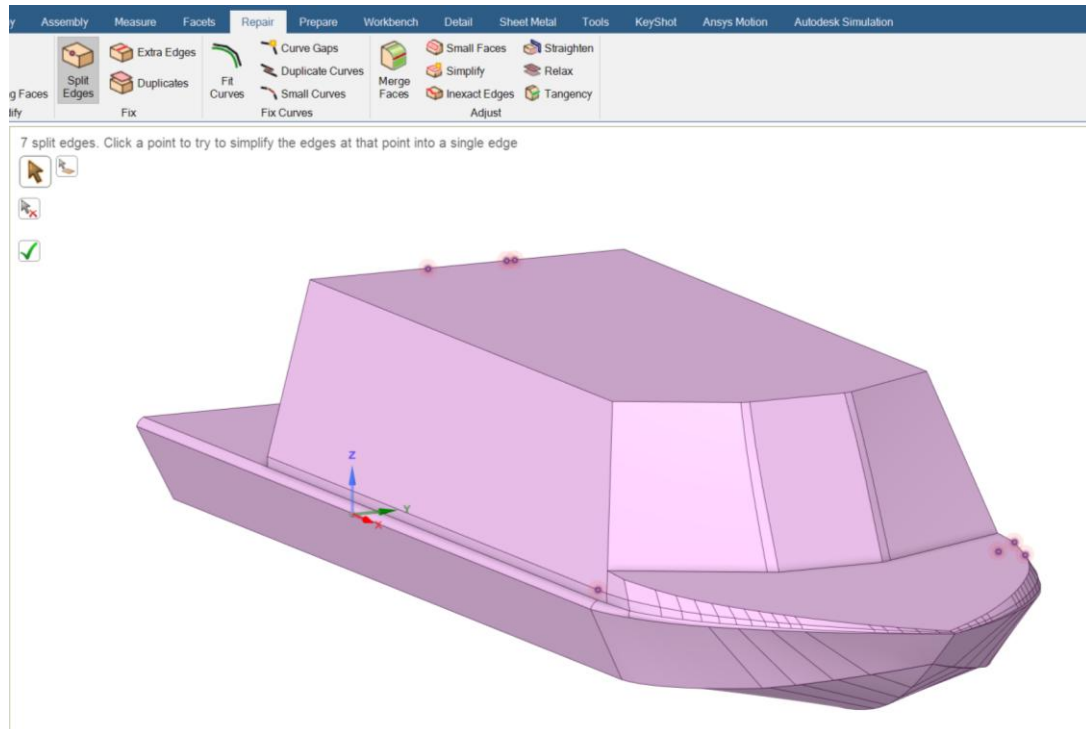
Figura 4. Sequência dos módulos a serem configurados no Ansys Fluent.



Fonte: Ansys 2024 R1.

O primeiro passo consistiu em abrir a geometria da embarcação no módulo SpaceClaim. Deve ser considerado que a geometria precisa estar completamente fechada. Dentro do módulo, é possível fazer reparos para remover contornos adicionais, fechar superfícies, dentre outras necessidades (Figura 5). Assim que a geometria estiver reparada, deverá ser criado um sólido fechado. Logo, pode-se proceder com a definição do volume de controle.

Figura 5. Aspecto da geometria da embarcação sendo reparada no módulo SpaceClaim.

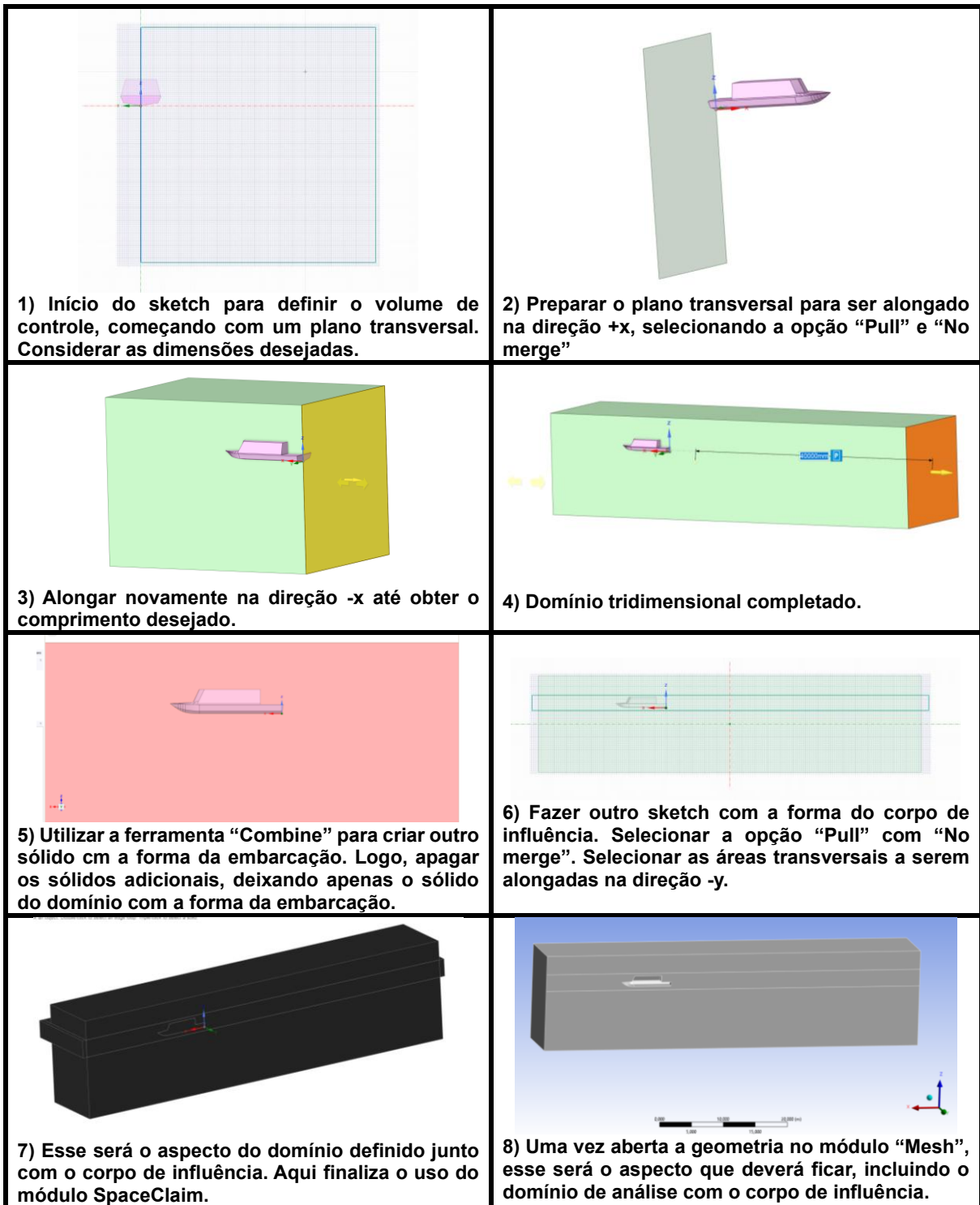


Fonte: Ansys 2024 R1.

Com a geometria na forma de sólido completamente fechado, o domínio de controle foi definido. A Figura 6 mostra as etapas mais relevantes utilizadas para criar o volume de controle, incluindo a adição do corpo de influência. Esse corpo é uma região que passa pela linha de água e inclui a embarcação, pois nela haverá um maior refinamento da malha.



Figura 6. Etapas relevantes para definir o domínio computacional no módulo SpaceClaim.



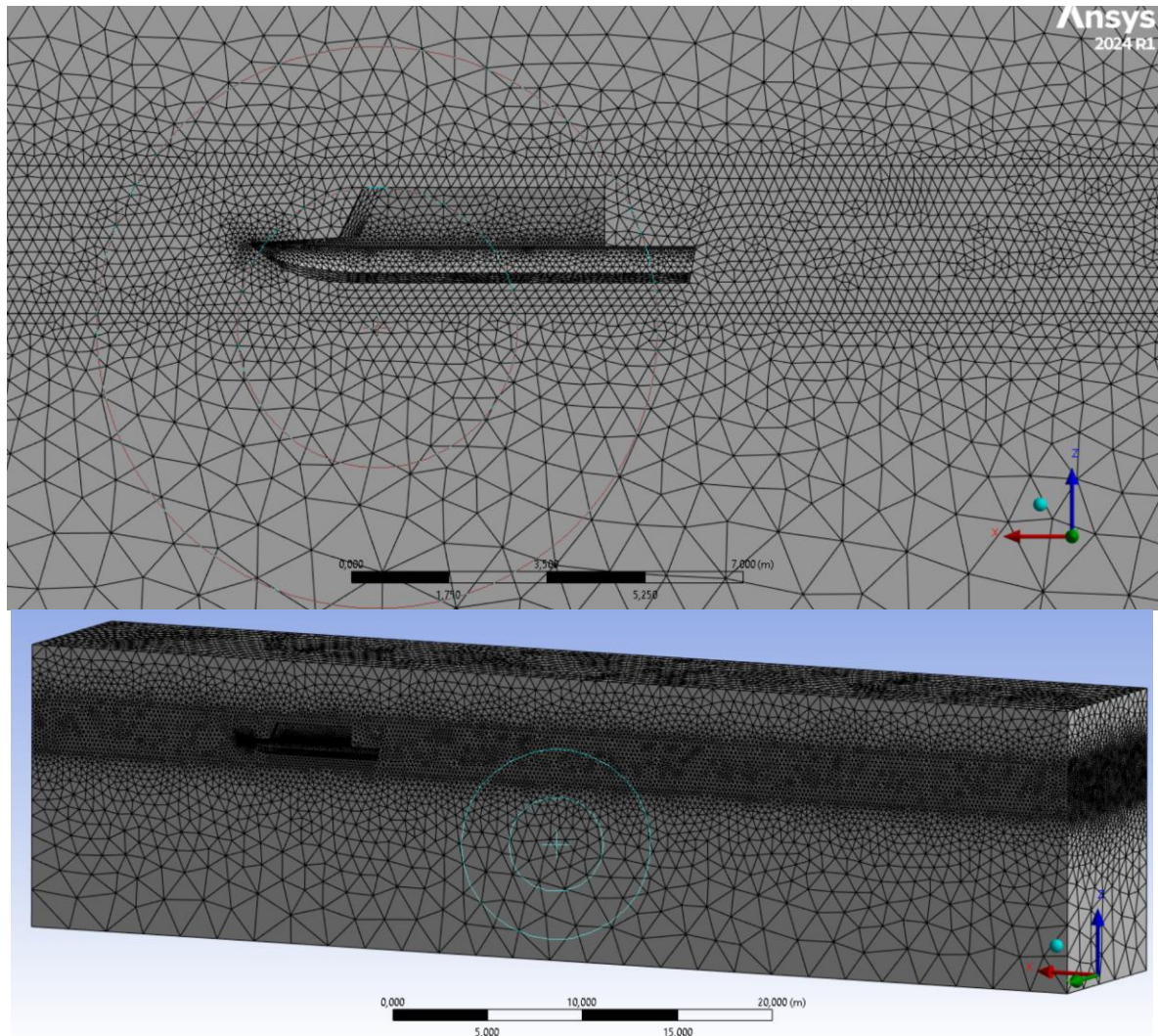
Fonte: Ansys 2024 R1.

Uma vez aberta a geometria no módulo Mesh, é importante que durante a geração da malha exista um número adequado de tamanho dos elementos. A malha mostrada na Figura 7 foi gerada com a opção Mesh > Body Sizing, com um tamanho de elemento de 5. Cabe mencionar que análises de convergência de malha estão fora do escopo do presente estudo, que tem como



finalidade demonstrar o procedimento de uso. Porém, este tipo de análises são altamente sugeridos em análises numéricas envolvendo CFD (Eça; Hoekstra, 2014; Stern et al., 1999). Uma guia prática para considerar o possível erro devido a discretização da malha pode ser encontrado em Celik et al. (2008).

Figura 7. Configuração de malha triangular de maneira automática.

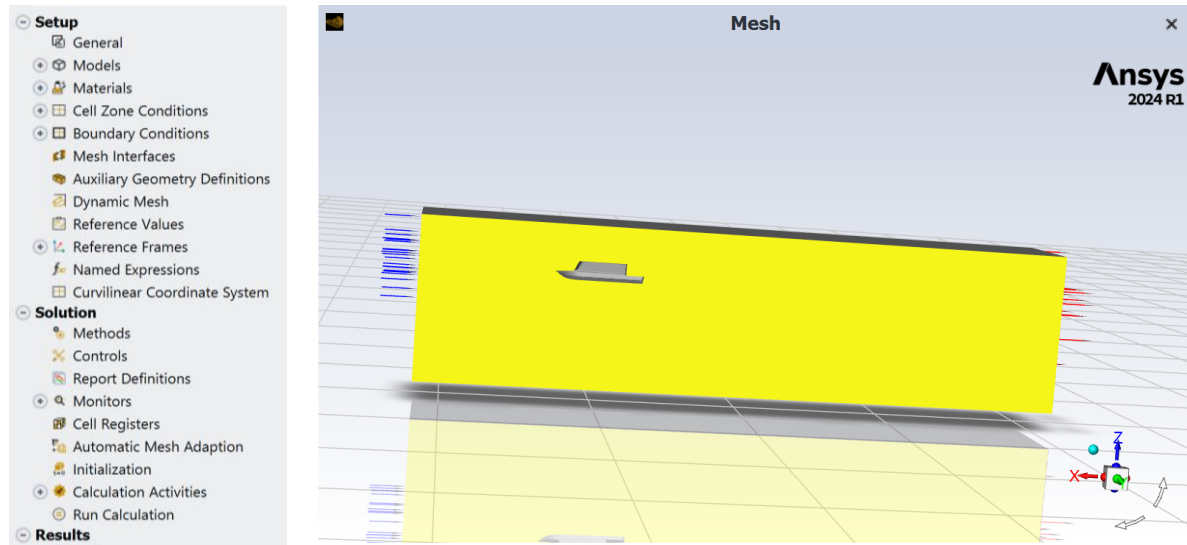


Fonte: Ansys 2024 R1.

Uma vez definida a malha, é necessário nomear as superfícies do volume de controle (*Named selections*), sendo elas: *inlet* (entrada), *outlet* (saída), *symmetry* (plano longitudinal), *hull* (casco). Posteriormente, foi aberto o módulo Setup, no Ansys Workbench. Na configuração inicial foi selecionada simulação 3D, *Solver Processes* = 2, *Parallel settings* (*Solver GPU* = 1). A Figura 8 mostra o aspecto do módulo Setup do Ansys Fluent, onde pode ser visualizada a lista de opções que deverão de ser configuradas antes de rodar a análise: “Setup”, “Solution”, e “Results”.



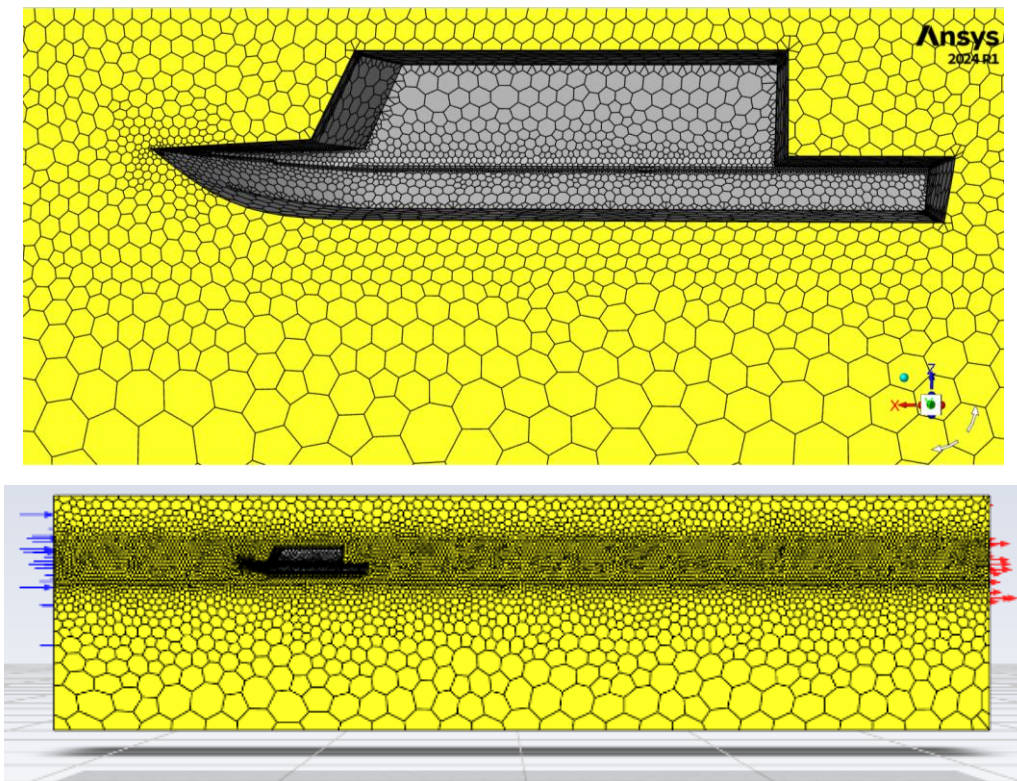
Figura 8. Aspecto inicial do módulo Setup do Ansys Fluent.



Fonte: Ansys 2024 R1.

No módulo Setup foi convertida a malha triangular para poliédrica (hexagonal) com a opção “Make polyhedra”, como mostrado na Figura 9, pois devido ao número de lados dos elementos pode ser obtida uma melhor aproximação da solução. Também, os elementos ocupam mais volume e são menos, o que pode economizar tempo computacional.

Figura 9. Aspecto da malha poliédrica.



Fonte: Ansys 2024 R1.



O seguinte passo consiste em configurar as opções de Setup, Solution e Results, antes de rodar a simulação. A seguir, na Tabela 2, são listadas as configurações de cada uma das opções que foram atualizadas no módulo Setup do Ansys Fluent, de acordo com o tutorial que foi seguido. As opções do Fluent que não são listadas foram consideradas com os parâmetros padrão do software.

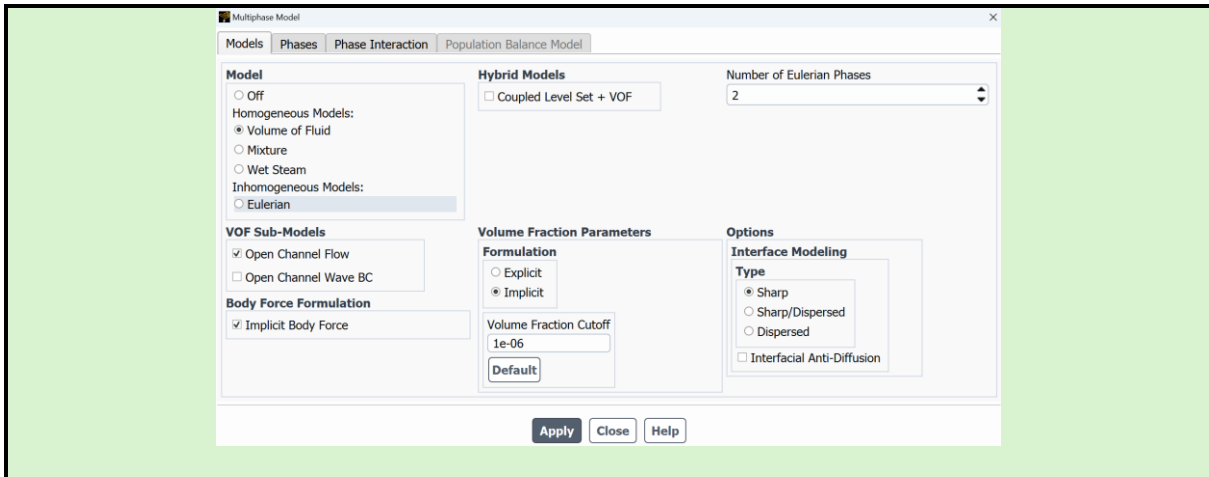
De maneira geral, foi utilizado o método VOF (*Volume of Fluid*) para avaliar o escoamento multifásico. Assim, foi monitorada a interação das duas fases (ar e água) por meio da análise da fração de volume (*Volume fraction*). Foi considerada uma análise baseada em pressão, empregando condições de contorno do tipo canal aberto (*open-channel flow*).

O método VOF permite realizar dois tipos de simulações: estado estacionário (*steady-state*) e transitório (*transiente*, ou seja, dependente do tempo) do escoamento. Então, para fins comparativos, foram realizados esses dois tipos de simulações, com a finalidade de analisar os resultados globais de arrasto e sustentação. A simulação feita no tutorial seguido no The-Engineering-Guide (2024) corresponde a uma análise de estado estacionário, correspondendo aos dados da Tabela 2. Os resultados do presente trabalho correspondem a uma simulação do tipo transiente, visando avaliar os seguintes parâmetros: evolução das forças e coeficientes de arrasto e sustentação ao longo de 100 segundos de simulação, assim como contornos de elevação da superfície da água, velocidade de escoamento e pressão induzida no casco.

Tabela 2. Lista de configurações feitas no módulo Setup do Ansys Fluent para realizar a análise no estado estacionário (*steady-state*). A configuração seguiu a sequência mostrada. Os parâmetros que não são mostrados na tabela foram utilizados como os definidos pelo software (*default*).

SETUP / General / Solver / Type (Pressure-Based); SETUP / General / Solver / Velocity Formulation (Absolute) SETUP / General / Time / Steady SETUP / General / Gravitational Acceleration / -9.81 m/s ² (em Z)
SETUP / Models / Multiphase / Edit / Volume of Fluid (On) Abrir SETUP / Models / Multiphase (Volume of Fluid) / Models / VOF Sub-Models (Open Channel Flow - On) / Volume Fraction Parameters Formulation (Implicit) / Courant number (0.25) / Interface modelling (sharp) / Apply





SETUP / Materials / Fluid (air) / Density (1.225 kg/m³) / Viscosity (1.7894e-05 kg/(m s))
 SETUP / Materials / Fluid (water-liquid) / Density (998.2 kg/m³) / Viscosity (0.001003 kg/(m s))

SETUP / Models / Multiphase Model / Phases / Phase-2 – Secondary Phase (water-liquid)

SETUP / Boundary Conditions / hull (type: wall)
 SETUP / Boundary Conditions / inlet (type: pressure-inlet) / Edit Pressure inlet / Multiphase / Open Channel (On) / Secondary Phase for Inlet (phase-2) / Flow Specification Method (Free Surface Level and Velocity) / Free Surface level (0.2 m) / Velocity Magnitude (14 m/s) / Bottom level (-10 m) / Density Interpolation Method (From Neighboring Cell)
 SETUP / Boundary Conditions / outlet (type: pressure-outlet) / Edit Pressure outlet / Multiphase / Open Channel (On) / Pressure Specification Method (Free Surface Level) / Free Surface level (0.2 m) / Bottom level (-10 m) / Density Interpolation Method (From Neighboring Cell)
 SETUP / Boundary Conditions / Symmetry (type: symmetry)
 SETUP / Boundary Conditions / Reference Values / Compute from (inlet)

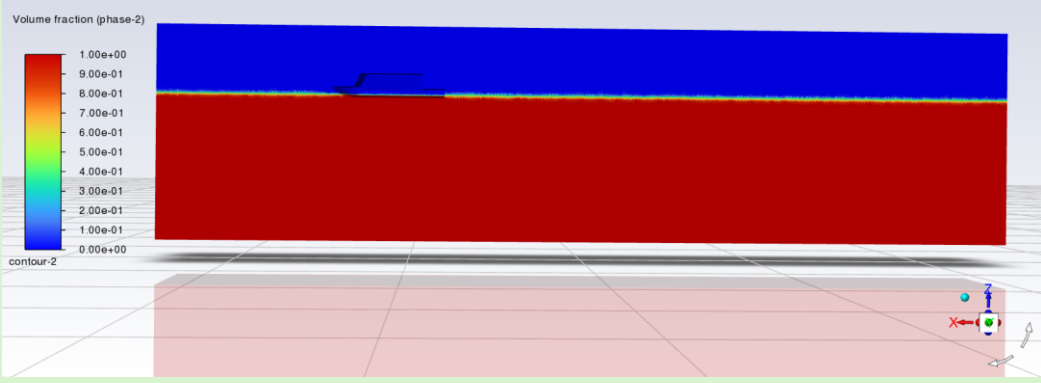
SOLUTION / Methods / Pressure-Velocity Coupling / Scheme (Coupled)
 SOLUTION / Methods / Spatial Discretization / Gradient (Least Squares Cell Based) / Pressure (PRESTO!) / Momentum (Second Order Upwind) / Volume Fraction (Compressive) / Turbulent Kinetic Energy (Second Order Upwind) / Pseudo Time Method (Global Time Step) / Warped-Face Gradient Correction (On)

SOLUTION / Monitors / Residuals / Default / Ok
 SOLUTION / Monitors / Report Plots / Definir gráficos de arrasto e sustentação no casco

SOLUTION / Initialization / Solution Initialization / Initialization Methods / Standard Initialization / Compute from (inlet)
 SOLUTION / Initialization / Solution Initialization / Reference Frame (Relative to Cell Zone) / Open channel Initialization Method (Flat)
 SOLUTION / Initialization / Solution Initialization / Initial Values / Gauge Pressure (0 Pa) / X Velocity (-13.999m/s) / Y Velocity (0 m/s) / Z Velocity (0 m/s) / Turbulent Kinetic Energy (0.7349 m²/s²) / Specific Dissipation Rate (2790011 s⁻¹).
 SOLUTION / Initialization / Solution Initialization / Initialize



RESULTS / Graphics / Contours / Create graphic to Visualize Phases / Contours of (Phases) / Phase (phase-2: water) / Surfaces (select hull, inlet, outlet, symmetry and wall) / Save-Display



SOLUTION / Run Calculation / Pseudo Time Settings / Fluid Time Scale / Time Step Method (Automatic) / Time Scale Factor (0.5) / Length Scale Method (Conservative) / Verbosity (0)
 SOLUTION / Run Calculation / Pseudo Time Settings / Parameters / Number of iterations (1000) / Reporting Interval (1) / Profile Update Interval(1)
 SOLUTION / Run Calculation / Calculate

Fonte: Autoria própria baseado em The-Engineering-Guide (2024).

Para a análise transitória, foram atualizados alguns parâmetros da Tabela 2, como sugerido pelo software. O número de *time steps* foi definido antes de rodar. A diferença principal encontrada entre ambas as abordagens (estacionária e transitória) foi que no estado estacionário, na opção “Run Calculation”, precisa ser definido o número de iterações, enquanto a análise transitória requer a definição da duração da simulação, quantidade passos de tempo (*time steps*), e número de iterações dentro de cada passo (Tabela 3).

Tabela 3. Configurações para realizar a simulação do tipo transitória.

<i>Pseudo transient for steady state VOF</i>	De: <i>enabled</i> Para: <i>disabled</i>
<i>P-V coupling method:</i>	De: <i>Coupled</i> Para: <i>SIMPLE</i>
Observação:	O esquema de acoplamento Pressão-Velocidade (<i>Pressure-Velocity Coupling scheme</i>) foi definido como <i>SIMPLE</i>
Número de <i>time steps</i> : (Definir informações de análise no tempo antes de rodar)	100

Fonte: Autoria própria baseado em The-Engineering-Guide (2024).



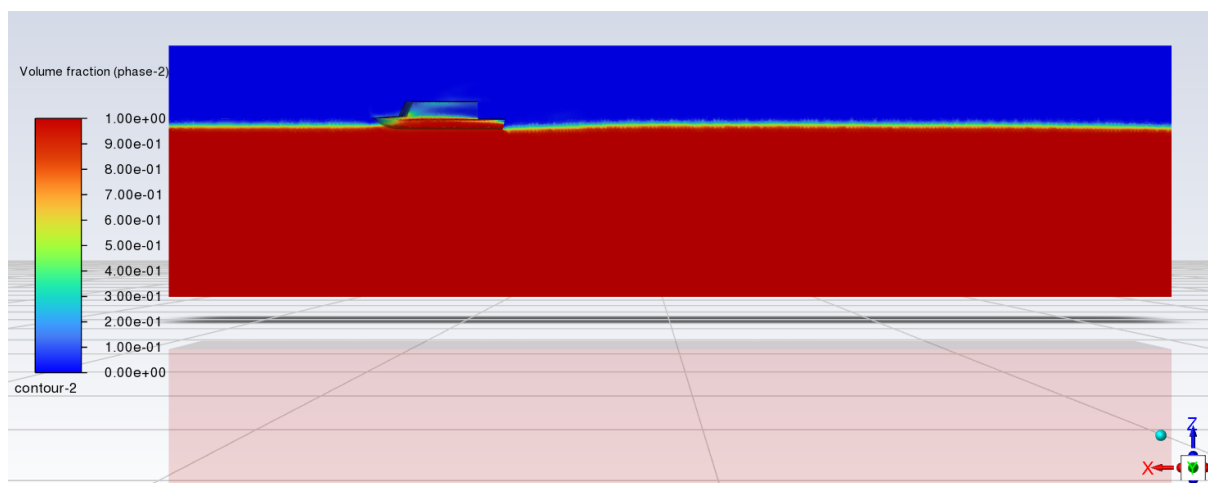
5 RESULTADOS

O presente capítulo mostra os resultados das simulações feitas no software Ansys Fluent. As subseções 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os resultados das forças de arrasto e sustentação exercidas na embarcação, da elevação da superfície da água, e da cinemática do escoamento, respectivamente. Logo, a subseção 5.4 mostra os resultados do campo de pressão induzido pelo escoamento no casco. Finalmente, a subseção 5.5 mostra a estimativa simplificada da potência efetiva requerida pela embarcação utilizando dados de arrasto total. A maioria dos resultados correspondem à simulação do estado transitório. Somente o final da subseção 5.1 mostra uma comparação com resultados da simulação do estado estacionário, para fins comparativos. É importante salientar que os resultados de arrasto e sustentação obtidos e apresentados correspondem à metade da embarcação, pois as simulações foram realizadas com a condição de contorno *Symmetry*.

5.1 Resultados do arrasto e sustentação

A Figura 10 mostra o resultado da distribuição da fração de volume do método VOF (*volume fraction*) assim que foi finalizada a simulação. Nota-se que as fases do ar e a água são definidas nas cores azul e vermelha, respectivamente, sendo definidas por valores da fração de volume 0 ou 1. A parte intermediária é a região de transição entre as fases, sendo que o valor da fração de volume 0,5 corresponderia à definição da superfície livre da água (Ansys, 2024).

Figura 10. Visualização das fases (ar e água) durante o final da simulação em regime transitório.

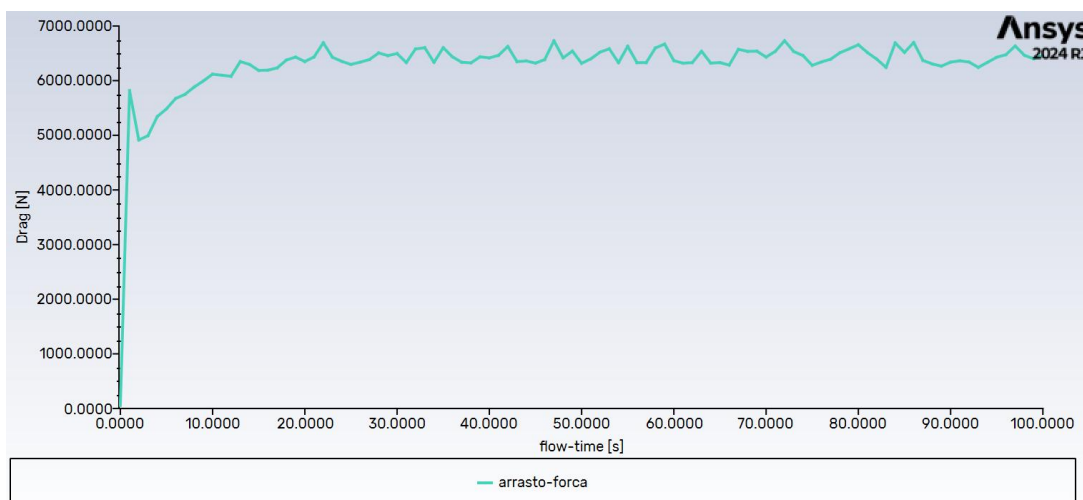


Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.



A Figura 11 mostra os resultados do arrasto total (*drag*) causado pelo escoamento na embarcação, na direção -X, respectivamente. Os resultados mostram a evolução do cálculo desses parâmetros ao longo dos 100 segundos definidos na simulação, podendo ser observadas pequenas variações, mas mantendo uma tendência estável. Nota-se que a força de arrasto (em Newtons) oscilou entre 6 e 7 kN (Figura 11). Essa força de arrasto total pode ser considerada como a resistência ao avanço total da embarcação.

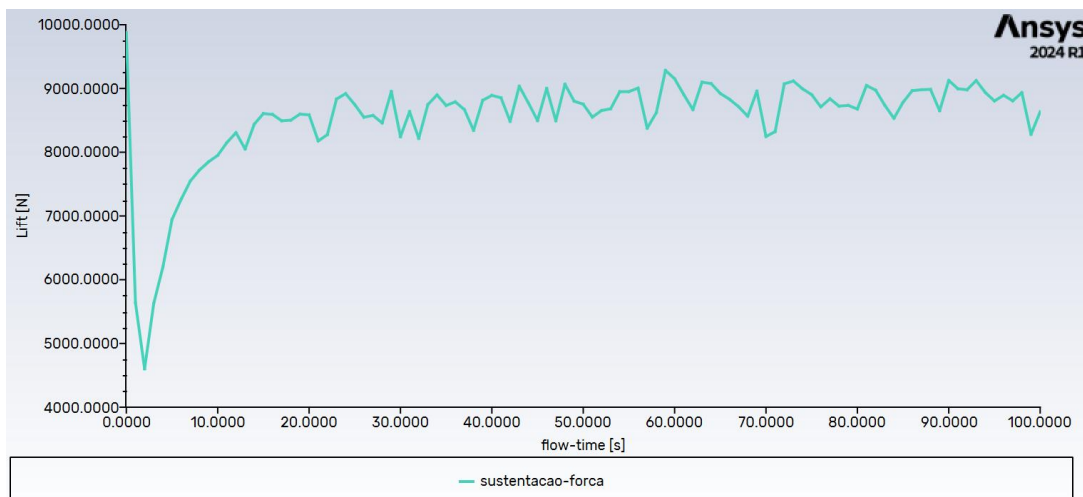
Figura 11. Resultados da força de arrasto na embarcação (*drag*) durante os 100 segundos de simulação.



Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

De maneira similar à figura anterior, a Figuras 12 mostra os resultados ao longo do tempo da força de sustentação (*lift*), na direção Y, cujo valor oscilou entre 8 e 9 kN.

Figura 12. Resultados da força de sustentação na embarcação durante os 100 segundos de simulação.



Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.



A Tabela 4 mostra uma comparação dos coeficientes e forças de arrasto e sustentação, considerando as simulações estacionária (*steady-state*) e transitória (*transient*) que foram feitas. Esses valores correspondem aos valores médios proporcionados pelo software. Observam-se pequenas diferenças entre ambas as abordagens. Neste estudo foram considerados os resultados da simulação do tipo transitória, sendo a força de arrasto média de 6457,65 N e a força de sustentação média de 8634,97 N.

Tabela 4. Valores médios do arrasto e sustentação obtidos durante as simulações estacionária e transiente. Valores correspondentes à metade do casco.

Parâmetro	Estado Estacionário	Estado Transitório
Força de arrasto	6379,48 N	6457,65 N
Força de sustentação	8611,69 N	8634,97 N

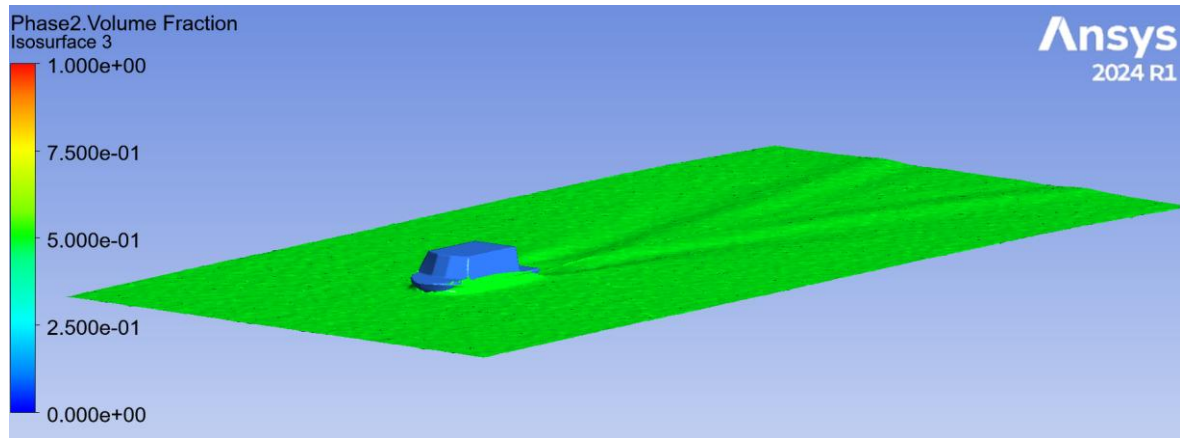
Fonte: Autoria própria.

5.2 Resultados da elevação da superfície livre da água

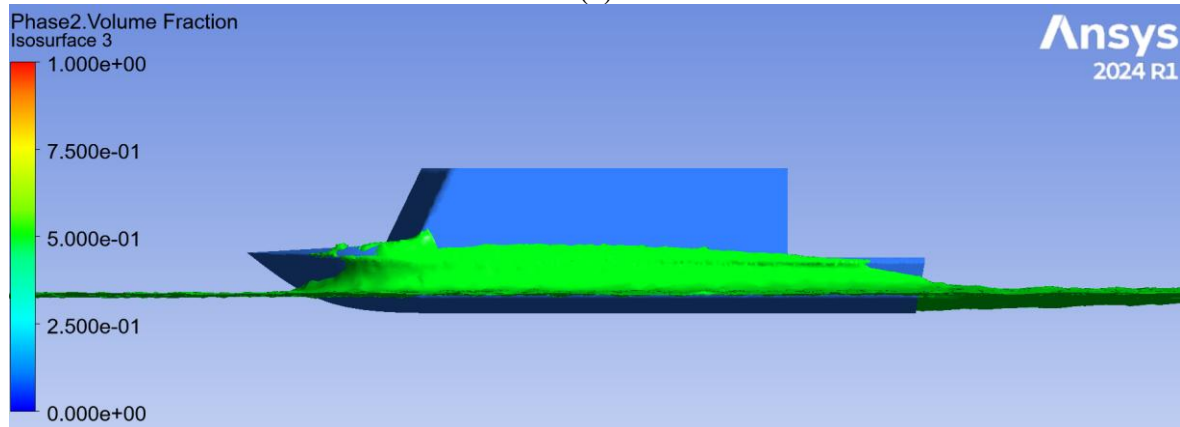
Um parâmetro importante no estudo de embarcações de alta velocidade é o trem de ondas que é gerado ao longo devido ao seu movimento. Tais ondas podem se propagar ao longe, podendo afetar outras embarcações ou contribuir com processos erosivos (Molland; Turnock; Hudson, 2017), sendo relevante conhecer a distribuição de alturas. A Figura 13 mostra várias vistas da elevação da superfície livre gerada pela embarcação, a qual foi definida com uma isosuperfície com valor da fração de volume = 0,5. São mostradas uma vista de perspectiva (Figura 13a), uma vista de perfil com aproximação da embarcação (Figura 13b), e uma vista do topo, onde pode se visualizar o ângulo formado pelas ondas (Figura 13c).



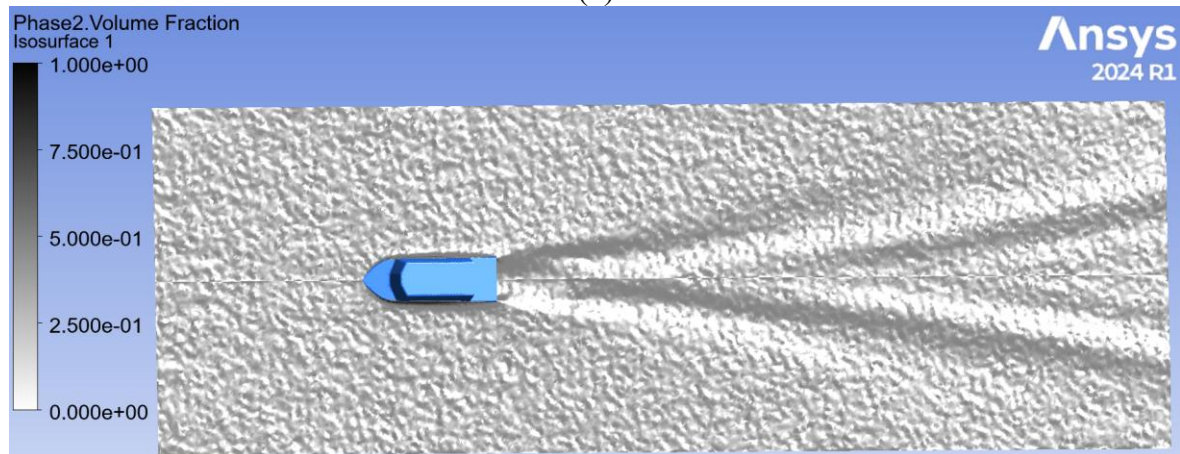
Figura 13. Superfície livre da água gerada com uma isosuperfície da fração de volume (*Volume Fraction*) com valor de 0,5. (a) Perspectiva. (b) Vista de perfil. (c) Vista do topo mostrando o padrão de ondas gerado.



(a)



(b)



(c)

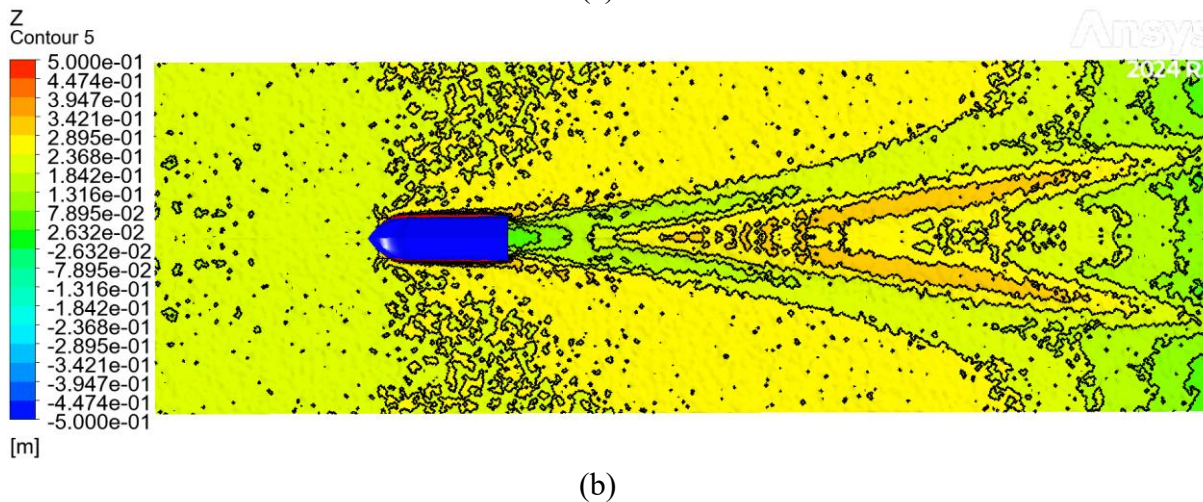
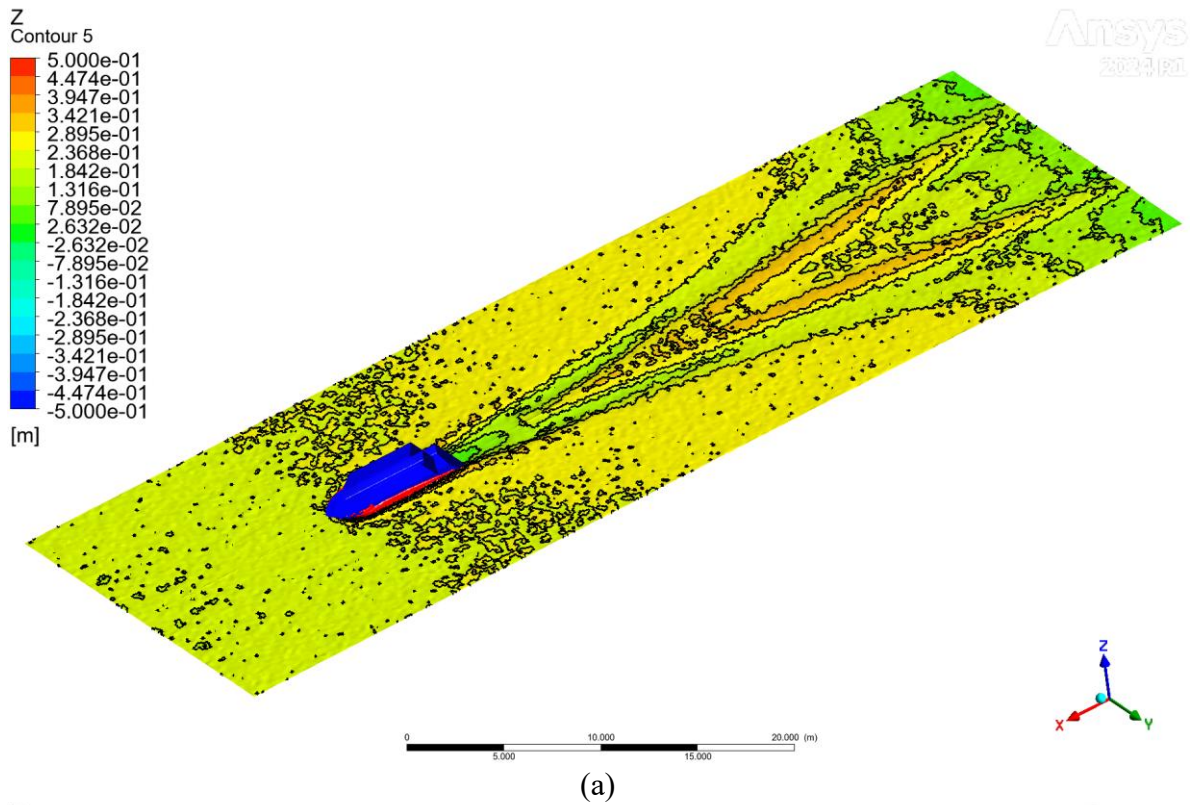
Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

Para conhecer as elevações da água na isosuperfície da figura anterior, foi necessário aplicar uma visualização de contornos de elevação (coordenada Z), como mostrado na Figura 14. A Figura 14a mostra uma vista tridimensional em perspectiva, enquanto a Figura 14b mostra uma vista do topo. Nota-se que as maiores elevações aconteceram nos costados da embarcação,



como definido pela cor vermelha, com valores em torno a meio metro. Por outro lado, as elevações máximas ao longe são mostradas na cor laranja, oscilando entre 0,34 e 0,45 metros, aproximadamente.

Figura 14. Contornos de elevação da superfície da água (Z) no domínio computacional que foi considerado. (a) Vista de perspectiva. (b) Vista do topo.



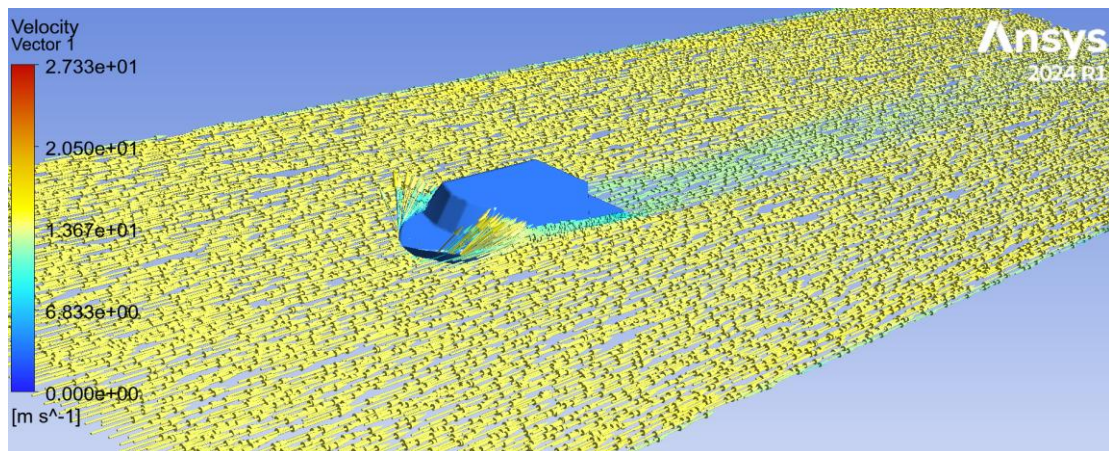
Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.



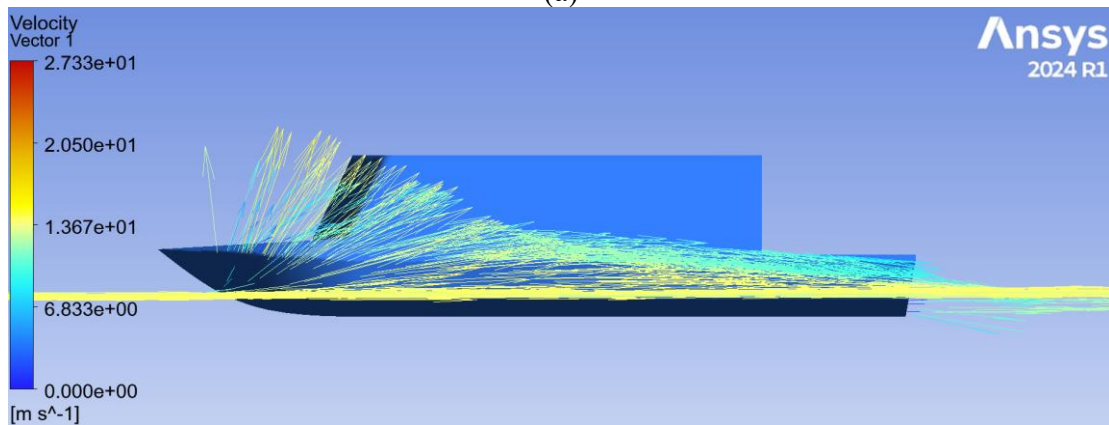
5.3 Resultados de velocidade do escoamento

Com estudos de fluidodinâmica computacional também é possível avaliar a cinemática do escoamento, permitindo conhecer as variações que este teve antes e depois da interação com a embarcação. A Figura 15 mostra um campo de vetores de velocidade resultantes obtidos na superfície livre da água definida na subseção anterior. Esses dados mostram a magnitude da velocidade de acordo com o comprimento das setas, assim como a sua direção, permitindo conhecer a direção do escoamento. A Figura 15a mostra uma vista de perspectiva com vetores tridimensionais, podendo ser observada uma perda de velocidade na parte traseira do casco, com relação à velocidade incidente, que foi definida como 14 m/s. Por outro lado, a Figura 15b mostra detalhes de uma vista de perfil, com vetores de velocidade resultante em formato bidimensional, onde pode se inferir que houve espalhamento da água nos costados da embarcação.

Figura 15. Campo vetorial de velocidade resultante na superfície livre da água. (a) Vista em perspectiva com vetores 3D. (b) Vista de perfil com vetores 2D.



(a)



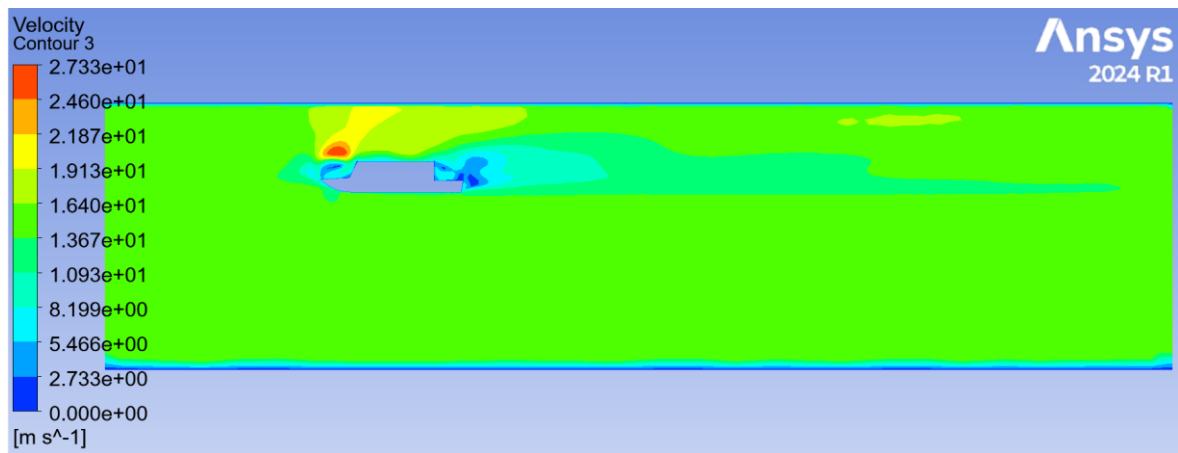
(b)

Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

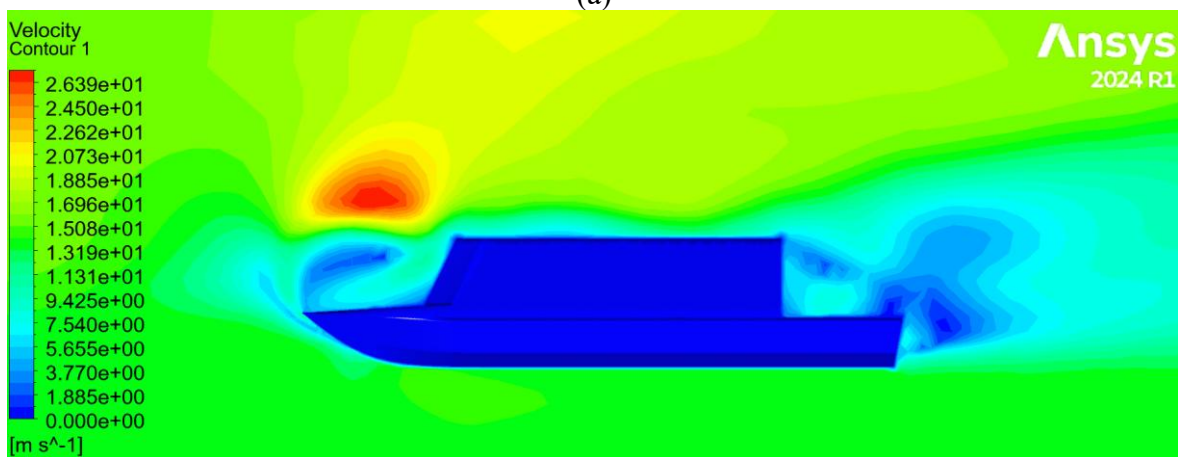


Nas simulações realizadas também foi possível obter informações das velocidades do fluido (ar e água) no domínio computacional. Na Figura 16 foi utilizada a técnica de contornos de velocidade resultante considerando o plano de simetria no domínio computacional. Em outras palavras, a figura apresenta um campo escalar da magnitude da velocidade resultante, incluindo a visualização do domínio computacional completo (Figura 16a) e uma aproximação da embarcação (Figura 16b). Pode-se observar que ambas, a fase do ar e da água tinham velocidade uniforme de 14 m/s durante a simulação e que as maiores velocidades do fluido aconteceram no ar (região vermelha), alcançando velocidades de até 27,3 m/s. Por outro lado, na proa e na popa da embarcação houve queda de velocidade, sugerindo aumento da pressão nessas regiões.

Figura 16. Contornos da magnitude da velocidade resultante no plano de simetria do domínio computacional. (a) Vista longitudinal do domínio completo no plano de simetria. (b) Detalhes dos contornos ao redor do casco da embarcação.



(a)



(b)

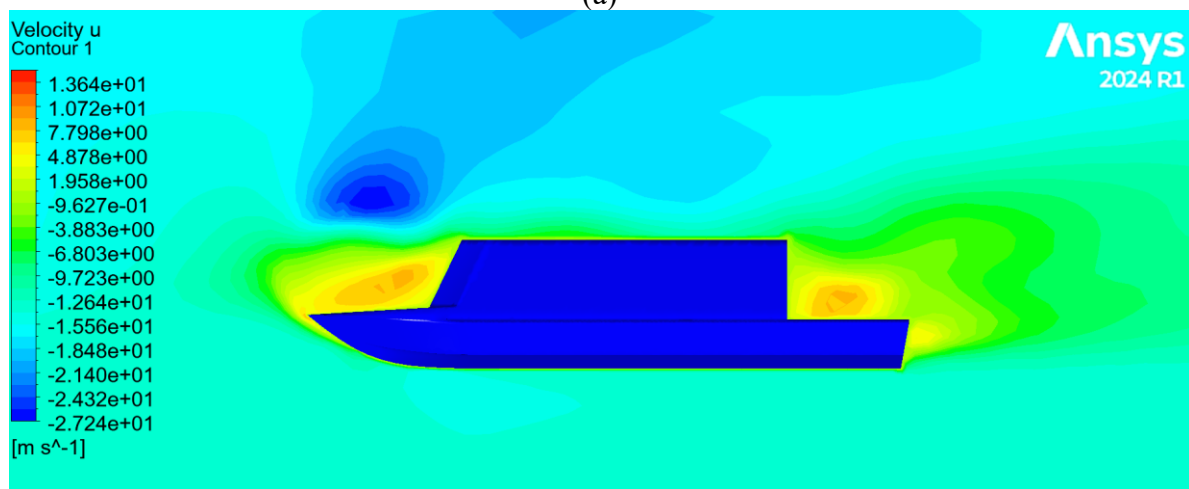
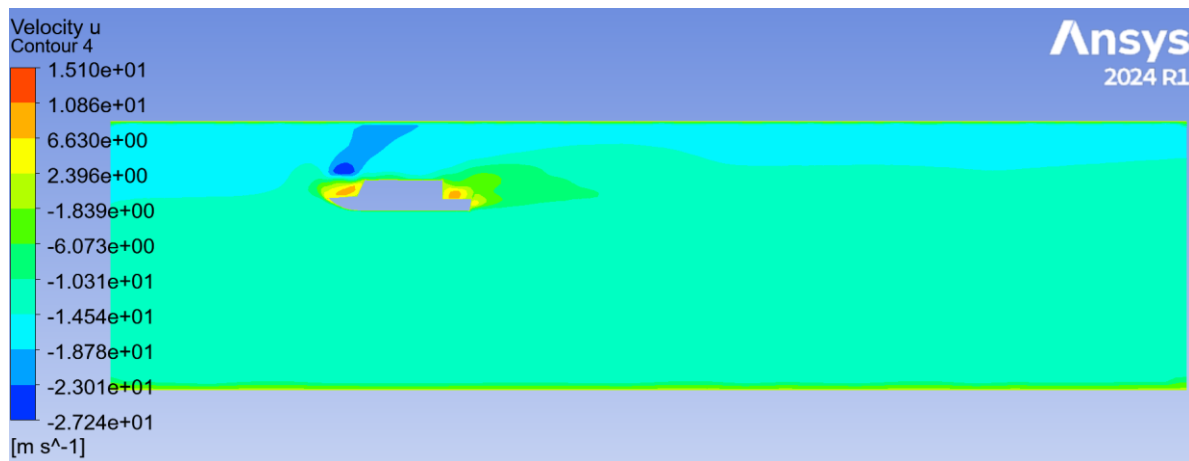
Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

De maneira similar à figura anterior, a Figura 17 mostra os campos de magnitude da velocidade horizontal do escoamento, no domínio computacional completo (Figura 17a) e próximo à



embarcação (Figura 17b). Neste caso, as velocidades horizontais do fluido (u) seguem a direção X positiva, pelo que o sinal negativo da velocidade indica que o escoamento incide pela proa da embarcação. Nestes gráficos pode se observar que existe redução de velocidades no convés de proa e popa da embarcação, podendo originar regiões onde existe aumento da pressão.

Figura 17. Contornos da componente de velocidade horizontal (u). O sinal negativo indica que o escoamento incide pela proa. (a) Vista longitudinal do domínio completo no plano de simetria. (b) Detalhes dos contornos ao redor do casco da embarcação.



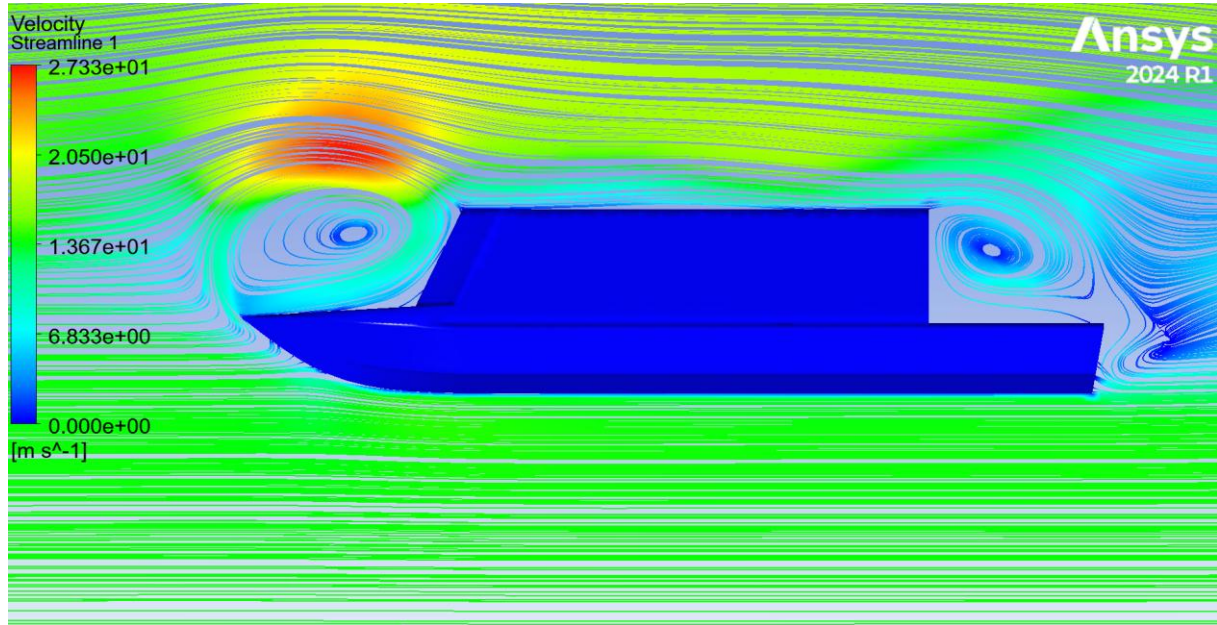
Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

Outra técnica que ajuda a compreender o movimento do fluido consiste na visualização das linhas de corrente (*streamlines*), as quais são mostradas na vista de perfil na Figura 18. Existem várias opções para visualizar as linhas de corrente no software utilizado, sendo possível aumentar ou diminuir a sua quantidade e origem. Com as informações da figura pode se inferir que existe a formação de vórtices na região da proa e da popa da embarcação, podendo ser os contribuintes da queda de velocidade horizontal visualizada na figura anterior. A forma do casco



então pode estar contribuindo ao aumento da resistência ao avanço devido à pressão na superestrutura.

Figura 18. Linhas de corrente (streamlines) da velocidade resultante. Parâmetros selecionados para a plotagem: Tipo (surface streamlines), Surfaces (symmetry), Start from (face centers), Reduction Factor (10).



Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

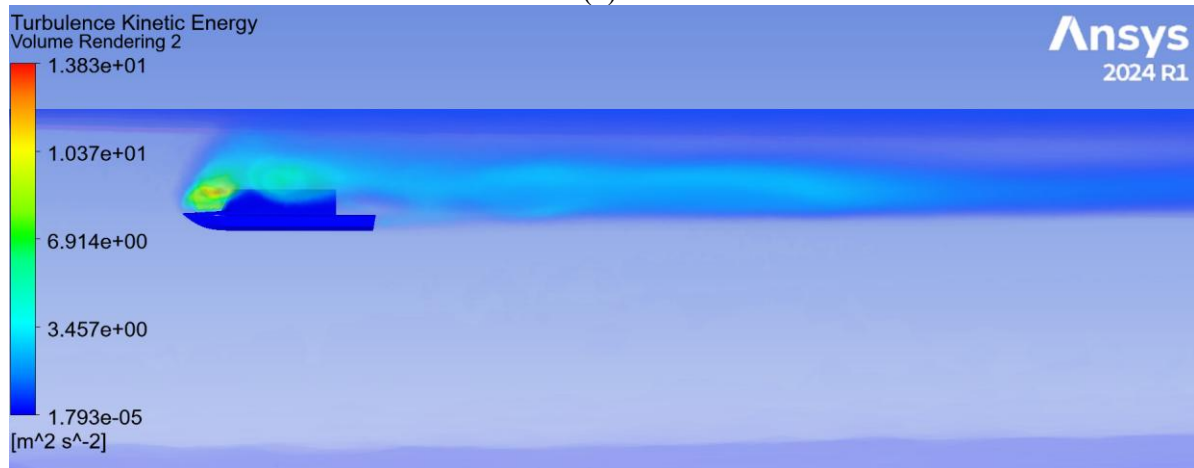
Com o método de simulação utilizado, é possível plotar, por meio de uma técnica de renderizado de volume tridimensional, a energia cinética de turbulência, que é uma opção para visualizar os efeitos de turbulência no escoamento, como mostrado nas vistas de perspectiva e de perfil das Figuras 19a e 19b, respectivamente. Esta energia é considerada como é a energia cinética média por unidade de massa associada ao movimento caótico e irregular de partículas de fluido em um fluxo turbulento. Ela quantifica a intensidade da turbulência e é caracterizada pela raiz quadrada média (RMS) das flutuações de velocidade no fluido (CFD-Online, 2013). Na Figura 19 podemos observar que a maior intensidade de turbulência acontece na região do ar, principalmente devido à superestrutura pela proa, alcançando valores de até $13,83 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Na parte da popa da embarcação podem ser visualizados valores baixos de turbulência próximo à interface água-ar; porém, os efeitos turbulentos são maiores na fase do ar devido à diferença nas densidades de ambos os fluidos. Vale ressaltar que mudanças nas escalas dos gráficos permitem diversos tipos de visualizações desse parâmetro.



Figura 19. Energia cinética de turbulência (TKE – *Turbulence Kinetic Energy*). (a) Vista em perspectiva. (b) Vista de perfil.



(a)



(b)

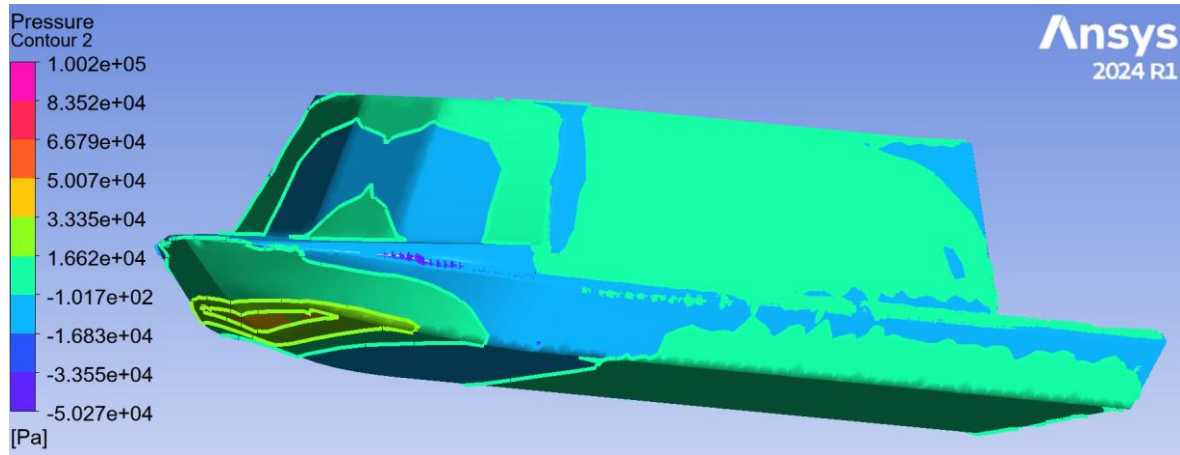
Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

5.4 Resultados de pressão induzida no casco

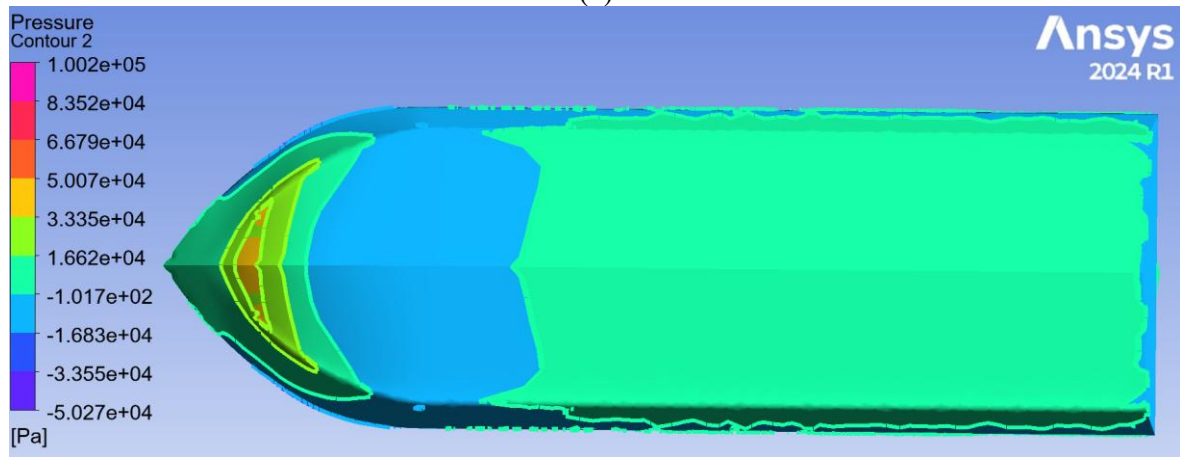
As simulações de fluidodinâmica computacional também permitem calcular a distribuição da pressão no escoamento e, conseqüentemente, no exterior da estrutura que está sendo considerada. Assim, a Figura 20 mostra os campos escalares de pressão hidrodinâmica obtidos no exterior da embarcação, por meio de dez contornos. A Figura 20a mostra a vista de perspectiva que permite visualizar os contornos da pressão na proa e no costado, enquanto a Figura 20b mostra os contornos no fundo do casco. A maior pressão aconteceu no fundo do casco na proa, atingindo valores acima de 33,35 kPa. As informações de pressão proporcionadas podem ser de utilidade para cálculos estruturais ou de otimização da forma do casco, visando projetar uma embarcação mais eficiente.



Figura 20. Contornos de pressão no casco causados pelo escoamento incidente. (a) Vista de perspectiva. (b) Fundo do casco.



(a)



(b)

Fonte: Ansys Fluent 2024 R1.

5.5 Estimativa de resistência ao avanço e potência efetiva

No presente estudo, a resistência total ao avanço (R_T) pode ser considerada como a força de arrasto total (*drag*) que foi causada na direção $-X$ no casco (escoamento incidindo pela proa), considerando os efeitos combinados do escoamento do ar e da água. A força de arrasto resultante para a metade do casco foi de 6457,65 N. Considerando que a potência efetiva requerida para movimentar a embarcação com uma velocidade de avanço $V = 14$ m/s pode ser calculada como $P_E = R_T V$ (Molland; Turnock; Hudson, 2017), temos uma potência de 90407,1 Watts, que corresponde a 121,23 hp (para a metade da embarcação que foi simulada). Cabe ressaltar que essa potência não considera possíveis perdas devido à inclinação do motor, interação casco-hélice, variação do ângulo de trim, nem interação com ondas, fatores os quais se sugere que sejam avaliados em estudos posteriores. Com a potência efetiva de 242,46 hp para a embarcação



completa, podem ser consideradas algumas opções de motores fora de borda de alta performance como os disponibilizados por alguns fabricantes (Yamaha, 2024).

5.6 Limitações do presente estudo e recomendações para trabalhos futuros

O presente trabalho tem objetivo instrucional, visando a demonstração do software Ansys Fluent para avaliar a hidrodinâmica de uma embarcação regional de alta velocidade. As principais limitações e trabalhos futuros são descritos como segue:

- Análises mais detalhadas devem ser feitas nas abordagens estacionária e transitória do escoamento, visando atingir a convergência das equações de movimento e de continuidade da massa.
- Testes de convergência da malha devem ser feitos antes de implementar casos finais com o software para avaliar a influência de diversos parâmetros e estimar o erro devido à discretização, como sugerido, por exemplo, por Celik (2008).
- Além do teste de convergência de malha, sugere-se a verificação e a validação (ou comparação com dados experimentais), seguindo procedimentos estabelecidos na literatura científica (Eça; Hoekstra, 2014; Stern et al., 1999).
- A configuração do domínio computacional e da malha pode requerer pré-análises, visando otimizar o processamento computacional. Recomendações proporcionadas pela International Towing Tank Conference (ITTC) podem ser consideradas (ITTC, 2011).
- Para realizar estudos comparativos de embarcações regionais amazônicas, como a considerada no presente trabalho, sugere-se que sejam feitas análises comparativas, variando parâmetros como calado, trim, velocidade e profundidade.
- Outros modelos de turbulência podem ser utilizados, visando a comparação dos dados de arrasto e sustentação resultantes.
- Efeitos de escala entra modelo e protótipo devem ser avaliados. No presente estudo, a análise foi feita na escala do protótipo, no entanto, comparações com testes experimentais devem ser feitas para determinar níveis de incerteza. Uma guia para análises CFD em escala real tem sido publicada por Huang et al. (2023b) e pode ser de utilidade para trabalhos futuros.



6 CONCLUSÕES

O presente trabalho visou demonstrar a utilização do software Ansys Fluent para avaliar a hidrodinâmica de uma embarcação regional amazônica de alta velocidade, incluindo parâmetros como: arrasto e sustentação, elevação da superfície da água, cinemática do escoamento, pressão induzida no casco, e potência efetiva requerida para propulsar a embarcação.

Foi realizada uma análise multifásica, considerando o caso de estudo de uma embarcação regional amazônica do tipo ambulancha. A geometria foi modelada usando software de desenho assistido por computador Rhino8 e, posteriormente, utilizada no Ansys SpaceClaim e Fluent. Foi considerado um calado constante de 0,2 m sem trim, com uma velocidade de avanço de 14 m/s.

Os resultados demonstraram o potencial do software de fluidodinâmica computacional para avaliar o comportamento hidrodinâmico de embarcações de alta velocidade utilizadas na região amazônica. Tais embarcações enfrentam desafios tecnológicos devido à falta de estudos com CFD na região.

Com relação aos resultados preliminares obtidos para o caso de estudo, observou-se uma elevação das ondas geradas pela embarcação, ao longe, menor do que 0,5 m. Com relação à cinemática do escoamento, é sugerida a formação de vórtices de ar entre a superestrutura e os conveses de proa e popa. A região da embarcação que mais sofreu pressão foi o fundo da proa, com valores acima de 33,35 kPa.

Para fins práticos em fases de anteprojeto, a força de arrasto resultante, considerando as contribuições das fases do ar e a água, pode ser considerado como a resistência total ao avanço, que foi de 12915,3 N para a embarcação completa (as simulações foram feitas para a metade do casco, resultando em 6457,65 N). Assim, uma potência efetiva de 180.814,2 Watts (ou 242,46 hp) seria necessária para movimentar a embarcação na velocidade de operação considerada. Isso poderia ser proporcionado por algum motor fora de borda de alta performance disponível no mercado (Yamaha, 2024). Porém, deve ser considerado que o presente estudo considerou a embarcação numa condição horizontal, sem trim. Possíveis perdas de eficiência devido ao acoplamento, orientação do motor, e ângulo de trim da embarcação durante a operação devem ser considerados em projetos futuros para estimativas mais precisas da potência requerida.



REFERÊNCIAS

ANSYS. **Ansys Fluent Theory Guide Release 2024 R2**. Disponível em: <www.ansys.com>. Acesso em: 23 jun. 2024.

BATCHELOR, George Keith. **An introduction to fluid dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2000.

CELIK, Ishmail B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME**, v. 130, n. 7, 2008.

CFD-ONLINE. **Introduction to turbulence / Turbulence kinetic energy**. Disponível em: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_turbulence/Turbulence_kinetic_energy>. Acesso em: 13 out. 2024.

CHIROȘCĂ, Ana-Maria; RUSU, Liliana. Comparison between model test and three CFD studies for a benchmark container ship. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 1, p. 62, 2021.

EÇA, Luis; HOEKSTRA, Martin. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. **Journal of Computational Physics**, v. 262, p. 104–130, 2014.

ELAGHBASH, Ahmed O. A CFD study of the resistance behavior of a planing hull in restricted waterways. **Sustainable Marine Structures**, v. 3, n. 1, p. 32–55, 2021.

FONTES, Jassiel V. H. *et al.* Challenges to Accident Prevention for High-Speed Vessels Used in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 16, n. 23, p. 10743, 2024.

FONTES, Jassiel VH *et al.* Marine Accidents in the Brazilian Amazon: The Problems and Challenges in the Initiatives for Their Prevention Focused on Passenger Ships. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 328, 2023.

FONTES, Jassiel VH *et al.* Operational Challenges and Potential Environmental Impacts of High-Speed Vessels in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 17, n. 23, p. 10673, 2025.

FRISK, David; TEGEHALL, Linda. Prediction of high-speed planing hull resistance and running attitude-A numerical study using computational fluid dynamics. 2015.

HOSSEINI, Azim *et al.* Performance prediction of a hard-chine planing hull by employing different CFD models. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 5, p. 481, 2021.

HUANG, Luofeng; PENA, Blanca; THOMAS, Giles. Towards a full-scale CFD guideline for simulating a ship advancing in open water. **Ship Technology Research**, v. 70, n. 3, p. 222–238, 2023a.

HUANG, Luofeng; PENA, Blanca; THOMAS, Giles. Towards a full-scale CFD guideline for simulating a ship advancing in open water. **Ship Technology Research**, v. 70, n. 3, p. 222–238, 2023b.



ITTC. **ITTC – Recommended Procedures and Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications**. Disponível em: <<https://www.ittc.info/media/8165/75-03-02-03.pdf>>. Acesso em: 6 jul. 2025.

KAIDI, Sami; LEFRANÇOIS, Emmanuel; SMAOUI, Hassan. Numerical modelling of the muddy layer effect on Ship's resistance and squat. **Ocean Engineering**, v. 199, p. 106939, 2020.

MAIA, Harlysson WS *et al.* Computational Fluid Dynamics Applied to River Boat Hull Optimization. **Marine Technology Society Journal**, v. 55, n. 5, p. 94–108, 2021.

MAIA, Harlysson WS; SAID, Mounsif. Analysis for Resistance Reduction of an Amazon School Boat Through Hull Shape Modification Utilizing a CFD Tool. **Marine Technology Society Journal**, v. 53, n. 4, p. 57–67, 2019.

MCNEEL. **Rhino user's guide for Windows**. Disponível em: <<https://docs.mcneel.com/rhino/8/usersguide/en-us/index.htm>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, Dominic A. **Ship resistance and propulsion**. [S.l.]: Cambridge university press, 2017.

PACURARU, Florin; MANDRU, Andreea; BEKHIT, Adham. Cfd study on hydrodynamic performances of a planing hull. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 10, p. 1523, 2022.

SAMUEL, Pond de Medeiros. **SAMU fluvial: Procedimento de elaboração do projeto as-built da embarcação USAF - 02**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2020.

SHEN, Hailong *et al.* Design of hydrofoil for the resistance improvement of planing boat based on CFD technology. **Ocean Engineering**, v. 255, p. 111413, 2022.

SHI, Weichao; LI, Mingxin; YUAN, Zhiming. Investigation of the ship–seabed interaction with a high-fidelity CFD approach. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 26, n. 3, p. 931–946, 2021.

SONG, Kewei *et al.* Simulation strategy of the full-scale ship resistance and propulsion performance. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 15, n. 1, p. 1321–1342, 2021.

STERN, Fred *et al.* **Verification and validation of CFD simulations**. [S.l.]: IOWA INST OF HYDRAULIC RESEARCH IOWA CITY, 1999.

SUKAS, Omer Faruk *et al.* Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. **Applied Ocean Research**, v. 65, p. 35–46, 2017.

THE-ENGINEERING-GUIDE. **ANSYS CFD Tutorial: Multi-phase flow - drag on hull of a boat (Youtube vídeo)**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=k5vjpU_JaAE&t=407s>. Acesso em: 12 maio. 2024.

TRAN, Thai Gia; VAN HUYNH, Quang; KIM, Hyun Cheol. Optimization strategy for planing hull design. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 14, p. 100471, 2022.



TRIPATHI, Saurabh; VIJAYAKUMAR, R. Numerical and experimental study of stern flaps impact on resistance and propulsion of high-speed displacement ships. **Ocean Engineering**, v. 292, p. 116483, 2024.

WANG, Hui *et al.* Numerical investigation on steady wave of high-speed ship with transom stern by potential flow and CFD methods. **Ocean engineering**, v. 247, p. 110714, 2022.

WU, Cheng-sheng *et al.* CFD computation of ship motions and added resistance for a high speed trimaran in regular head waves. **International journal of naval architecture and ocean engineering**, v. 3, n. 1, p. 105–110, 2011.

YAAKOB, Omar *et al.* Determining ship resistance using computational fluid dynamics (CFD). **Journal of Transport System Engineering**, v. 2, n. 1, p. 20–25, 2015.

YAMAHA. **Motores fora de borda - Alta performance (200 - 90 hp)**. Disponível em: <<https://www.yamaha-motor.eu/pt/pt/marine-engines/high-power/>>. Acesso em: 13 out. 2024.

ZENG, Qingsong; HEKKENBERG, Robert; THILL, Cornel. On the viscous resistance of ships sailing in shallow water. **Ocean Engineering**, v. 190, p. 106434, 2019.

ZHOU, Lilan; ABDELWAHAB, HS; SOARES, C. Guedes. Experimental and CFD investigation of the effects of a high-speed passing ship on a moored container ship. **Ocean Engineering**, v. 228, p. 108914, 2021.

