

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

KLEYPHIDE PEREIRA DA SILVA

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA FORMA DO CASCO NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E
NA GERAÇÃO DE ONDAS DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DO TIPO
EXPRESSO**

MANAUS

2024

KLEYPHIDE PEREIRA DA SILVA

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA FORMA DO CASCO NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E
NA GERAÇÃO DE ONDAS DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DO TIPO
EXPRESSO**

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

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes

MANAUS

2024

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.

K64ee da Silva, Kleyphide Pereira
Efeito da variação da forma do casco na resistência ao avanço e na geração de ondas de uma embarcação regional do tipo expresso / Kleyphide Pereira da Silva. Manaus : [s.n], 2024.
81 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024.
Inclui bibliografia
Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández

1. Engenharia Naval. 2. embarcação tipo expresso. 3. geração de ondas. I. Fontes, Jassiel Vladimir Hernández (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Efeito da variação da forma do casco na resistência ao avanço e na geração de ondas de uma embarcação regional do tipo expresso

KLEYPHIDE PEREIRA DA SILVA

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA FORMA DO CASCO NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO E
NA GERAÇÃO DE ONDAS DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL DO TIPO
EXPRESSO**

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

Aprovado em 22 de julho de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

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

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

Prof. Dr. José Ramón Hechavarría Pérez
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Edry Antonio Garcia Cisneros
Universidade do Estado do Amazonas

MANAUS

2024

Depois de algum tempo você descobre que as pessoas com quem você mais se importa na vida são tomadas de você muito depressa, por isso sempre devemos deixar as pessoas que amamos com palavras amorosas, pode ser a última vez que as vejamos. – O menestrel, adaptado de Veronica A. Shoffstall. 1971.

*Dedico este trabalho aos meus avós,
Dorvalino Roberto da Silva (in memoria), e Maria
Antônia Tenório da Silva.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de abrir a sessão de agradecimentos e considerações expressando o mais profundo agradecimento à Energia (que para este autor é o próprio Deus que em tudo habita e se transforma, sendo onipresente, onisciente e onipotente), e por conseguinte agradecer as instituições e pessoas que foram essenciais para a consumação deste trabalho:

Ao meu querido professor e amigo, Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes, por todo seu conhecimento cedido, e por ser uma inspiração como profissional e pessoa - sempre com seus conselhos e metodologias eficientes - sem suas orientações e incentivos nos momentos de turbulência acredito fortemente que este trabalho não seria possível.

Aos meus professores que me deram suporte em conhecimentos que neste trabalho emprego, também a todos os autores de trabalhos e desenvolvedores de softwares utilizei ao longo do trabalho.

Aos meus amigos e satélites emocionais, em especial aos queridos que aqui elenco: Emelly Andrade, Hélio Gama, Hiago Marinho, Matheus Rocha e Pedro Monsalve, por me acompanharem de perto nesta saga que foi a graduação, com todos os seus percalços e felicidades, agradeço a cada um por disporem de seu tempo para com seus objetivos pessoais a me ajudarem na minha estabilidade pessoal.

Ao dono da embarcação expresso A NOIVA III, Carlos Manoel Teixeira Freitas, por permitir que a embarcação fosse usada como modelo para este trabalho. E ao engenheiro naval Paulo Brilhante por sua contribuição com os planos de linha e arranjo geral os quais são base para os demais dados da embarcação.

À minha família, com ressaltos aos meus avós e minha irmã Brithany Silva, os quais sempre estiveram dispostos a me ajudarem nas mais diversas situações que seguiram nesta jornada que fora a graduação.

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq, por meio do projeto intitulado “Identificação dos desafios para prevenir acidentes com embarcações de alta velocidade na região amazônica”, chamada CNPq-FNDCT-MCTI Nº 14/2022 – Faixa A (Processo: 405529/2022-8). O autor agradece o suporte proporcionado pela bolsa de Iniciação Tecnológica e Industrial (ITI-A), bem como da licença acadêmica do software Orca3D V3, obtidos através desse projeto do CNPq (Processo: 405529/2022-8).

RESUMO

A Amazônia brasileira possui uma grande quantidade de embarcações regionais dedicadas ao transporte de cargas e passageiros. Ainda na atualidade, diversos tipos de embarcações regionais são construídos seguindo a experiência prévia, sem realizar análises que permitam caracterizar o seu comportamento hidrodinâmico e estrutural utilizando métodos de Engenharia Naval. A modelagem tridimensional e as simulações computacionais de embarcações regionais ainda são desafios a serem atendidos para desenvolver embarcações mais eficientes e seguras. Visando contribuir com este tópico, o presente trabalho apresenta um estudo dos efeitos da variação da forma do casco em algumas das características hidrodinâmicas, como resistência ao avanço e geração de ondas, de uma embarcação regional amazônica. Devido à relevância no transporte longitudinal de passageiros, foi considerada uma embarcação regional de alta velocidade do tipo expresso. Na primeira parte do estudo foram utilizadas técnicas de desenho assistido por computador para modelar a embarcação maneira tridimensional. Posteriormente, a forma do casco foi variada de maneira sistemática, mudando a posição transversal da quina, para gerar quatro cascos diferentes. Considerando as geometrias geradas e mantendo o calado de projeto constante, foram realizadas análises comparativas de resistência ao avanço e ondas geradas pela embarcação, utilizando métodos de Engenharia Naval disponíveis em software de uso acadêmico. Os resultados obtidos permitiram comparar os efeitos da variação da forma do casco no comportamento hidrodinâmico da embarcação. Considerando o calado invariável, a redução da posição transversal da quina do casco com relação à quilha, reduziu a resistência total ao avanço e a amplitude das ondas geradas. Essa redução da resistência foi de até ~30% na velocidade de operação, sob as hipóteses simplificadoras consideradas, pois os efeitos dessa mudança na estabilidade e outros parâmetros do projeto da embarcação ainda precisam ser pesquisados. A metodologia apresentada pode servir de exemplo para realizar estudos paramétricos com outras embarcações regionais, sendo possível variar outros parâmetros geométricos do casco com o software que foi utilizado.

Palavras-chave: Engenharia Naval, embarcação tipo expresso, geração de ondas, modelagem tridimensional, resistência ao avanço.

ABSTRACT

The Brazilian Amazon has many regional vessels dedicated to the transportation of cargo and passengers. Currently, various types of regional vessels are built following previous experience, without carrying out analyzes that allow them to characterize their hydrodynamic and structural behavior using Naval Engineering methods. Three-dimensional modeling and computer simulations of regional vessels still have challenges to be addressed to develop more efficient and safer vessels. Seeking to contribute to this topic, this work presents a study of the effects of hull shape variation in some of the hydrodynamic characteristics, such as resistance to advance and generation of waves, of an Amazonian regional vessel. Due to the relevance of the longitudinal transportation of passengers, it was considered a high-speed regional expresso-type vessel. In the first part of the study, computer-aided design techniques were used to model the ship three-dimensionally. Subsequently, the shape of the hull was varied systematically, changing the transversal position of the chine, to generate four different hulls. Considering the geometries generated and keeping the draft of the project constant, comparative analyzes of ship resistance, effective power, and waves generated by the ship were carried out, using Naval Engineering methods available in software for academic use. The results obtained allowed us to compare the effects of the variation in the hull shape on the hydrodynamic behavior of the vessel. Considering the invariable draft, the reduction in the transverse position of the hull chine in relation to the keel reduced the total ship resistance and the amplitude of the waves generated. This reduction in resistance was up to ~30% at the operating speed, under the simplifying assumptions considered, since the effects of this change on the stability and other parameters of the vessel design still need to be researched. The methodology presented can serve as an example to carry out parametric studies with other regional vessels, being possible to vary other geometric parameters of the hull with the software that was used.

Keywords: Naval engineering, expresso-type vessel, wave generation, three-dimensional modeling, ship resistance.

LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 1. Imagens obtidas por drone de uma cidade do interior do Estado do Amazonas (Novo Airão – AM). (a) Vista aérea da cidade e da extensão dos rios. O ponto “A” indica o porto principal da cidade. O ponto “B” indica um porto de embarcações de pequeno porte. (b) Detalhes do porto definido pela letra “B” na figura (a). Imagens obtidas durante a época da cheia no dia 23/06/2024.....</p> <p>Figura 2. Levantamento de embarcações tipo expresso no terminal do Porto de Manaus – AM. (a) Terminal de lanchas expresso conhecido como “Balsa amarela”. (b) Exemplos de embarcações tipo expresso que operam no Porto de Manaus – AM. As imagens foram obtidas em Manaus – AM no dia 7 de junho de 2024 pelo autor.</p> <p>Figura 3. Tela de trabalho principal do software <i>Rhinoceros</i>[®].....</p> <p>Figura 4. Aba principal do plugin do <i>Orca3D</i>[®] no software <i>Rhinoceros</i>[®].....</p> <p>Figura 5. Representação ilustrativa da resistência ao avanço para diferentes números de Froude de uma embarcação. São mostradas as faixas de velocidades aproximadas para distintos modos de operação: deslocamento, semi-deslocamento e planeio.</p> <p>Figura 6. Representação das interseções do casco com a linha d’água.....</p> <p>Figura 7. Distribuição de pressão em uma placa plana.</p> <p>Figura 8. Representação do diagrama genérico de forças atuante na embarcação.....</p> <p>Figura 9. Notação principal e convenção de eixos.</p> <p>Figura 10. Representação do método de subdivisão em quadriláteros, utilizando a parte submersa do casco.</p> <p>Figura 11. Opções de métodos de análise de resistência ao avanço disponíveis no software <i>Maxsurf Resistance</i>[®].....</p> <p>Figura 12. Fluxograma com as etapas principais do estudo.....</p> <p>Figura 13. Embarcação tipo expresso considerada como representativa do presente estudo, a qual pode ser encontrada no Porto de Manaus – AM e costuma realizar a rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas. (a) Fotografia da embarcação. (b) Plano de balizas. (c) Planos de linhas do alto. (d) Plano de linhas d’água.</p> <p>Figura 14. Rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas, Brasil.</p> <p>Figura 15. Vistas da embarcação gerada como caso de referência (Caso 0).</p> <p>Figura 16. Representação do efeito da variação do parâmetro da largura da quina na região da popa (L_q) no formato do casco. As figuras mostram que o maior valor (0,95) foi para o Caso</p>	<p>13</p> <p>23</p> <p>25</p> <p>26</p> <p>27</p> <p>36</p> <p>36</p> <p>39</p> <p>40</p> <p>40</p> <p>41</p> <p>42</p> <p>42</p> <p>44</p> <p>45</p> <p></p>
--	---

padrão (C0). Essa distância foi reduzida para os Casos C1, C2 e C3, os quais tiveram valores de 0,75, 0,55 e 0,35, respectivamente, de acordo com a escala do software <i>Orca3D</i> [®]	47
Figura 17. Parâmetros considerados para o cálculo da superfície livre para cada caso de estudo usando o software <i>Maxsurf Resistance</i> [®]	48
Figura 18. Resultados da modelagem tridimensional da superfície externa da embarcação considerada como caso de estudo. (a) Perspectiva pela proa e bombordo. (b) Perspectiva pela popa e bombordo. (c) Perspectiva lateral estibordo. (d) Vista transversal pela proa. (e) Vista do topo. (f) Vista de perfil longitudinal.	49
Figura 19. Representação tridimensional renderizada da embarcação do tipo expresso considerada como caso de estudo.	51
Figura 20. Planos de linhas dos quatro casos de estudo considerados no presente trabalho.	51
Figura 21. Casos de estudo, obtidos com a variação do parâmetro <i>Chine beam @Transom</i> , (posição da quina na popa com relação à linha central; <i>Lq</i>) na opção “Assistente para embarcações de planeio” do <i>Orca3D</i> [®] . (a) Casco obtido com o parâmetro <i>Lq</i> igual a 0,95 (C0 – Padrão). (b) Casco obtido com o parâmetro <i>Lq</i> igual a 0,75 (C1). (c) Casco obtido com o parâmetro <i>Lq</i> igual a 0,55 (C2). (d) Casco obtido com o parâmetro <i>Lq</i> igual a 0,35 (C3).....	53
Figura 22. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e <i>Slender body</i> para diferentes velocidades da embarcação do caso C0. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	58
Figura 23. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e <i>Slender body</i> para diferentes velocidades da embarcação do caso C1. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	59
Figura 24. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e <i>Slender body</i> para diferentes velocidades da embarcação do caso C2. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	60
Figura 25. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e <i>Slender body</i> para diferentes velocidades da embarcação do caso C3. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	61
Figura 26. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de Holtrop para os quatro casos de estudo (C0 – C4). (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	63
Figura 27. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de <i>Slender body</i> para os quatro casos de estudo (C0 – C4).	

(a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.	64
Figura 28. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de Savitsky para os quatro casos de estudo (C0 – C4). (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva. 65	65
Figura 29. Representação tridimensional da evolução da superfície livre da água para o caso C0. (a) Vista pela popa. (b) Vista pela proa. A escala da direita está dada em metros.	67
Figura 30. Evolução da elevação da superfície livre da água ao longo da coordenada longitudinal. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3. A escala da direita está dada em metros.	68
Figura 31. Visualização bidimensional dos valores absolutos de elevação da superfície da água ao longo da coordenada longitudinal. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.....	69
Figura 32. Vista de todo da evolução da superfície livre da água. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.	71
Figura 33. Contornos de elevação da água na posição da linha de calado (elevação de 0 m). (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.....	73
Figura 34. Contornos de elevação da água em uma elevação de 0,1 m a partir da linha de calado. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões principais da embarcação.	43
Tabela 2. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Dimensões).	45
Tabela 3. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Forma).	45
Tabela 4. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Ângulos).	46
Tabela 5. Comparativo entre os deslocamentos dos casos C0 – C3.	55
Tabela 6. Comparativo entre os coeficientes prismáticos (C_p) dos casos C0 – C3.	55
Tabela 7. Comparativo entre os coeficientes de bloco (C_b) dos casos C0 – C3.	56
Tabela 8. Comparativo entre os coeficientes de seção mestra (C_m) dos casos C0 – C3.	56
Tabela 9. Comparativo entre os coeficientes de área de linha d'água (C_{wp}) dos casos C0 – C3.	56
Tabela 10. Comparativo entre os pesos de imersão (TPc) dos casos C0 – C3.	57
Tabela 11. Diferença percentual de resistência ao avanço em relação aos métodos abordados.	66
Tabela 12. Diferença percentual de potência em relação aos métodos abordados.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problemática	13
1.2	Estado da arte.....	16
1.3	Justificativa.....	20
1.4	Objetivos.....	20
1.4.1	Objetivo geral	20
1.4.2	Objetivos específicos	20
1.5	Estrutura do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Embarcação regional do tipo expresso	22
2.2	Software de modelagem tridimensional (<i>Rhinoceros</i> [®])	25
2.3	O software <i>Orca3D</i> [®]	26
2.4	Regimes de operação de uma embarcação	27
2.5	Métodos disponíveis no software <i>Maxsurf Resistance</i> [®]	28
2.5.1	Método de Holtrop e Mennen.....	28
2.5.2	Método de Savitsky	35
2.5.3	Método <i>Slender body</i>	39
2.5.4	Cálculo da potência efetiva.....	41
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	Etapa 1: modelagem tridimensional da embarcação	42
3.2	Etapa 2: Variação da forma do casco e geração de casos de estudo	46
3.3	Etapas 3 e 4: Avaliação da resistência ao avanço e trens de ondas gerados	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Resultado da modelagem tridimensional da embarcação padrão	49
4.2	Resultados da modelagem dos cascos modificados	51
4.3	Resultados de resistência ao avanço e potência efetiva dos casos de estudo	57
4.4	Resultados da geração de ondas dos casos de estudo	66
4.5	Recomendações de uso da metodologia considerada	74
5	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

Na Amazônia brasileira são utilizados diversos tipos de embarcações para o transporte de cargas e pessoas. No entanto, ainda é necessário aplicar conhecimentos técnicos e científicos em Engenharia Naval para desenvolver embarcações mais eficientes e seguras.

O transporte de pessoas na região amazônica apresenta diversos desafios devido à carência de vias terrestres conectando as cidades do interior com as principais cidades dos estados. De fato, ainda existem comunidades do interior dos Estados da região cujas únicas rotas de acesso são por via fluvial e/ou aérea. Essa situação tem incentivado o desenvolvimento de embarcações regionais, cujos projetos têm sido, muitas vezes, baseados em conhecimento empírico.

A Figura 1 mostra algumas imagens obtidas por drone no Rio Negro, na cidade de Novo Airão – AM, onde se pode observar a localização da cidade com relação ao rio (Figura 1a) e alguns detalhes de embarcações típicas da região (Figura 1b).

Figura 1. Imagens obtidas por drone de uma cidade do interior do Estado do Amazonas (Novo Airão – AM). (a) Vista aérea da cidade e da extensão dos rios. O ponto “A” indica o porto principal da cidade. O ponto “B” indica um porto de embarcações de pequeno porte. (b) Detalhes do porto definido pela letra “B” na figura (a). Imagens obtidas durante a época da cheia no dia 23/06/2024.



(a)



(b)

Fonte: Jassiel Fontes, 2024.

As imagens da Figura 1, que foram obtidas durante a época de cheia dos rios no ano 2024, permitem visualizar que a cidade é localizada próxima ao Rio Negro. A Figura 1a ilustra a vastidão da floresta amazônica perto da cidade, onde é possível notar a extensão dos rios. Cabe mencionar que a cidade de Novo Airão – AM é porta de entrada ao arquipélago de Anavilhanas, um dos mais extensos do mundo. O ponto “A” na Figura 1a indica a localização do porto principal da cidade, sendo um porto flutuante articulado, utilizado principalmente por embarcações de grande porte. Por outro lado, o ponto “B” indica um porto característico para embarcações de menor porte, conhecido como Porto do Padre, cujos detalhes são mostrados na Figura 1b. Nesta figura podem ser observados diversos tipos de embarcações, algumas delas de alta velocidade, que são comumente utilizadas para atividades na região. Os galpões observados na imagem servem para manter em segurança algumas embarcações. Embora a cidade citada como exemplo tenha acesso a uma rodovia que conecta outras cidades do Estado do Amazonas, diversas atividades, incluindo as comerciais e turísticas, são desenvolvidas por navegação interior. As imagens mostradas na Figura 1, podem ser consideradas como representativas de outras cidades na região amazônica, onde existe necessidade de transporte fluvial.

Na região amazônica, o transporte de longo percurso é comumente feito por meio de embarcações conhecidas como gaiolas/recreios, ferryboats e expressos, que são as que apresentam uma maior autonomia. Fontes et al. (2023a) apresenta as definições destas embarcações, sendo as gaiolas/recreios e ferryboats embarcações de grande porte, que podem

transportar pessoas e diversos tipos de cargas mistas. Os expressos, são embarcações de médio porte, cujo objetivo é transportar apenas pessoas com suas respectivas bagagens, podendo alcançar velocidades maiores do que as gaiolas e os ferryboats.

Por outro lado, na região amazônica também existem embarcações menores que podem alcançar regimes de operação de alta velocidade, como apresentado recentemente por Neto et al. (2024). Almeida (2024) apresentou as principais embarcações de pequeno porte que podem ser encontradas no Estado do Amazonas e que podem operar em velocidades consideráveis. Dentre essas embarcações, foram apresentadas as rabetas, voadeiras, ambulanchas, viaturas, lanchas escolares e cascos de corrida. Nesse estudo, salienta-se também a característica da construção naval baseada na experiência em alguns tipos de embarcações.

É importante mencionar que, ainda na atualidade, a ocorrência de acidentes de embarcações na região amazônica é bem comum. Diversos fatores têm sido associados a esse problema, como mostrado nas pesquisas de Padovezi (2012), Fontes et al. (2023a) e Fontes et al. (2023b). Fatores como os erros humanos, problemas mecânicos, e condições ambientais, podem contribuir na ocorrência de acidentes com embarcações regionais. Como alternativa para enfrentar tais desafios, Hernandez-Fontes et al. (2021) e Fontes et al. (2023b) sugerem que sejam feitos mais estudos técnicos e científicos que permitam demonstrar procedimentos para avaliar projetos de embarcações, incluindo aspectos estruturais e hidrodinâmicos.

Hernandez-Fontes et al. (2021) sugerem que é possível melhorar as características hidrodinâmicas das embarcações fazendo modificações simples nas formas do casco. Porém, para realizar esse tipo de análises com embarcações regionais, visando conhecer as formas do casco mais adequadas, é necessário modelar a sua geometria de maneira tridimensional, possibilitando assim o uso de software de Engenharia Naval (BECHMAN, 2024) para realizar análises paramétricas. Esse tipo de estudos tem sido pouco implementado com embarcações regionais amazônicas.

Visando contribuir com esses estudos, o presente trabalho visa avaliar o efeito da variação da forma do casco no comportamento hidrodinâmico de embarcações regionais, considerando uma embarcação do tipo expreso como caso de estudo. Pretende-se instruir no uso de software para modelar embarcações regionais e variar a forma do casco de maneira paramétrica, possibilitando a análise e comparação de parâmetros hidrodinâmicos. A continuação, segue uma revisão do estado da arte de alguns estudos relevantes, relacionados com os efeitos da variação da forma do casco em características hidrodinâmicas de embarcações.

1.2 Estado da arte

Métodos para melhorar o desempenho hidrodinâmico do casco de diversos tipos de embarcações, por meio da otimização da forma do casco, têm sido propostos nas últimas décadas. Os parágrafos a seguir resumem alguns trabalhos relevantes nessa área, realizados em diversas partes do mundo.

Peri et al. (2001) propuseram a otimização dos cascos de embarcações utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). O método utilizado foi o método de otimização total, que é uma abordagem sistemática para melhorar o design do casco de um navio, variando e ajustando seus parâmetros geométricos de forma controlada e automatizada. No artigo, foi criado um modelo paramétrico total de um casco padrão, permitindo a variação sistemática de parâmetros geométricos. Utilizando algoritmos de otimização, o modelo foi ajustado para minimizar a resistência ao avanço, comparando as simulações de CFD com experimentos em tanque de provas. O estudo destacou a eficácia da otimização paramétrica na diminuição da resistência de cascos de navios, seguindo as novas normas de eficiência energética da Organização Marítima Internacional. Considerando um navio selecionado como representativo, a partir de um banco de dados, foi criado um modelo paramétrico completo do casco. Essa abordagem permitiu variações sistemáticas e controladas dos parâmetros geométricos, resultando em uma forma de casco com desempenho superior com relação à resistência ao avanço. As simulações de CFD e os testes em tanques de prova comprovaram que as formas otimizadas pelo método paramétrico tiveram um melhor desempenho em comparação ao método tradicional. Segundo os autores, esse processo não só melhorou a eficiência do casco, como também reduziu a dependência dos projetistas com experiência prévia de projetos de embarcações.

Anos depois, Grigoropoulos (2004) apresentou um método para otimizar o comportamento hidrodinâmico de embarcações em águas calmas e em mar irregular.

A pesquisa de Feng et al. (2009) explorou técnicas de otimização automáticas para cascos de navios utilizando CFD. O artigo não apresentou uma embarcação específica como caso de estudo; porém, de maneira geral as técnicas de otimização apresentadas podem ser aplicadas a uma variedade de tipos de embarcações, desde navios de carga até navios de passageiros, com o objetivo de melhorar seu desempenho hidrodinâmico. O método utilizado foi baseado em CFD, para modelar o fluxo de água ao redor do casco, definindo uma função objetivo que representa a métrica de desempenho a ser melhorada, e aplicando algoritmos de otimização (como algoritmos genéticos ou otimização por enxame de partículas) para ajustar

os parâmetros do desenho do casco. Este processo é contínuo, com alterações e reavaliações constantes do desenho até encontrar a solução ideal, seguida de uma análise final para assegurar que o desenho atendesse às necessidades de desempenho e às limitações do projeto. Os autores demonstraram que a combinação de CFD com algoritmos de otimização automática resultou em melhorias significativas no desempenho hidrodinâmico dos cascos de navios, com redução na resistência ao avanço, sugerindo um desenho mais eficiente para economias de combustível. Eles afirmaram que a utilização de CFD é essencial para fornecer dados precisos. A metodologia pode oferecer grande potencial para melhorias na eficiência e desempenho de uma ampla variedade de navios.

Han et al. (2012) realizaram um estudo baseado na otimização hidrodinâmica da forma do casco usando modelos paramétricos. Eles apresentaram o uso de curvas paramétricas geradas por curvas otimizadas do tipo *B-spline* para otimizar as formas hidrodinâmicas de cascos de embarcações. Como casos de estudos foram consideradas duas embarcações de grande porte. Para fins de análise, foram comparados os trens de ondas gerados pelos cascos otimizados usando o software *Shipflow*[®].

Chi e Huang (2016) apresentaram uma revisão de estudos relacionados com o desenho hidrodinâmico de formas de embarcações utilizando métodos de simulação. Os métodos estudados incluem ferramentas de fluidodinâmica computacional de uso prático. Também, apresentaram um caso de estudo de variação paramétrica das formas de uma embarcação do tipo Series 60.

Pechenyuk (2017) avaliou a otimização da forma do casco para reduzir a resistência ao avanço de embarcações de carga. Foi utilizado o navio porta-contêineres KCS, recomendado como padrão para testar métodos numéricos, a partir do workshop Gothenburg-2000. Foram feitas simulações de reboque por CFD para a forma inicial do casco e seis variantes modificadas, com variações na distribuição longitudinal do volume. O método utilizado nessa pesquisa foi baseado em uma abordagem de otimização baseada em ondas para o design detalhado do casco. O método permitiu a variação sistemática da forma geométrica do casco, correspondendo à alteração da distribuição longitudinal do volume do casco, enquanto a distribuição vertical de volume foi fixada ou altamente controlada. O resultado principal do estudo foi que as modificações examinadas na distribuição longitudinal do volume do casco causaram incrementos na resistência ao movimento na faixa de 1,3% a 6,5%. No entanto, o processo de otimização, baseado na nova hipótese de que os incrementos de resistência causados por segmentos longitudinais separados da forma do casco podem ser somados, sugere uma diminuição da resistência em 8,9% em relação à forma inicial do casco KCS. A

visualização dos padrões de onda também mostrou uma atenuação dos componentes de onda transversal e a intensificação dos componentes de onda divergente.

Deng et al. (2021) estudaram o efeito da otimização integrada das dimensões principais e da forma do casco no desempenho hidrodinâmico de uma embarcação graneleira. No estudo, visou-se avaliar o comportamento da embarcação com relação a sua resistência ao avanço, comportamento em ondas e manobrabilidade. Métodos empíricos, como o de Holtrop e Mennen foram considerados no estudo da resistência ao avanço.

Bagazinski e Ahmed (2023) apresentaram um modelo para geração paramétrica do casco de embarcações, nomeado como *ShipGen*. O método foi baseado na geração de cascos paramétricos de navios, por meio de um modelo de difusão. Esse modelo foi projetado para lidar com múltiplos objetivos e restrições, como a resistência ao avanço, estabilidade e capacidade de carga. A abordagem de difusão permitiu explorar eficientemente o espaço de projeto para encontrar soluções que atendessem os requisitos estabelecidos, oferecendo uma ferramenta eficaz para o design de cascos de navios otimizados. O artigo não considerou uma embarcação específica na análise, mas descreveu um modelo de geração de cascos de navios paramétricos que pode ser aplicado a diferentes tipos de embarcações, permitindo a geração automática de cascos com diferentes formas e características. Os resultados demonstraram que o *ShipGen* foi eficiente na geração automática de cascos de navios de diversas formas e características, apresentando melhorias significativas em termos de resistência ao avanço, estabilidade e capacidade de carga. Os autores concluíram que o *ShipGen* é uma ferramenta promissora para o design de cascos de navios otimizados, podendo ser útil para os projetistas de navios na criação e avaliação de opções de design durante a concepção.

Pérez-Arribas (2023) apresentaram um método de geração paramétrica das linhas do casco de pequenas embarcações utilizando software CAD, especificamente *Rhinoceros* e *Grasshopper*. O processo foi baseado na definição de curvas básicas, como a linha central e a linha do convés, desenhadas manualmente como curvas *B-spline*. O método permitiu a modificação eficiente das formas do casco através de pontos de controle, simplificando a definição de parâmetros e utilizando algoritmos para otimizar curvas do casco e atingir coeficientes hidrodinâmicos específicos. O estudo focou em formas de casco simples, como cascos arredondados, as quais são normalmente utilizadas em pequenas embarcações de patrulha, algumas embarcações de pesca pequenas e barcos à vela. A modelagem paramétrica mostrou ser capaz de gerar rapidamente diferentes formas de casco, o que torna possível explorar diversas opções de design e otimização para atender a requisitos específicos de desempenho. O modelo paramétrico demonstrou a sua eficiência ao comparar seus resultados

com cascos de referência, salientando a relevância de considerar aspectos como a capacidade de construção do casco e o comportamento hidrodinâmico durante o processo de desenho. Os autores enfatizaram a necessidade de se continuar a desenvolver e aperfeiçoar técnicas de modelagem paramétrica para melhorar o projeto naval de embarcações pequenas, com o objetivo de aumentar a eficiência e a inovação.

Recentemente, Cheng et al. (2024) compararam métodos tradicionais e totalmente paramétricos de otimização de linhas de casco para economia de energia em embarcações. O estudo focou nas características hidrodinâmicas do casco que podem ser otimizadas para economia de energia, independentemente do tipo específico de embarcação. Os resultados do estudo mostraram que os métodos paramétricos de otimização de linhas de casco são mais eficientes na redução do consumo de energia do que os métodos tradicionais. A eficácia foi atribuída à capacidade dos métodos paramétricos de explorar uma grande variedade de desenhos de forma mais rápida e eficiente. Além disso, os métodos paramétricos permitem uma maior flexibilidade no processo de design, permitindo ajustes mais aprofundados para atender a diversos requisitos de desempenho. Em suma, o estudo sugere que a adoção de abordagens paramétricas pode resultar no projeto de embarcações mais eficientes e sustentáveis.

Poucos estudos têm sido feitos para estudar o efeito da variação da forma do casco o desempenho hidrodinâmico de embarcações de uso comum na Amazônia. Dentre os trabalhos feitos no Brasil, Maia e Said (2019) avaliaram a resistência ao avanço de uma embarcação regional do tipo lancha escolar usando fluidodinâmica computacional. Dando continuidade, Maia et al. (2021) apresentaram um estudo de otimização do casco da mesma embarcação regional escolar, no qual utilizaram técnicas de otimização baseada em algoritmos genéticos e fluidodinâmica computacional usando o software *Shipflow*[®]. Nesse trabalho, foi demonstrado como pequenas alterações do casco podem ajudar na redução da resistência ao avanço.

Devido à relevância que têm as atividades navais na região amazônica, o presente trabalho visa contribuir com estudos técnico-científicos, que possam ser adotados por membros da academia, indústria e comunidade em geral, para avaliar os efeitos que as variações da forma do casco podem causar no seu comportamento hidrodinâmico. O estudo pretende apresentar o processo de modelagem tridimensional e de variação dos parâmetros geométricos de um casco de embarcação regional amazônica, avaliando o seu comportamento hidrodinâmico através do uso software de Engenharia Naval. Para fins de implementação, é considerada a embarcação de transporte de passageiros do tipo expresso como caso de estudo.

1.3 Justificativa

Embora o uso de vários tipos de embarcações seja bastante comum para desenvolver atividades de transporte de pessoas e cargas na região amazônica, um dos desafios atuais para aumentar a sua eficiência e segurança consiste em realizar análises para avaliar e melhorar o seu comportamento, incluindo conhecimentos técnicos de Engenharia Naval. Uma das opções para isso consiste em avaliar os efeitos de diversas formas de casco no comportamento hidrodinâmico das embarcações, incluindo o estudo de tópicos como estabilidade, resistência ao avanço, geração de ondas e movimentos. Na atualidade, diversas embarcações regionais amazônicas ainda são construídas seguindo réplicas de outras embarcações cujo comportamento é conhecido na prática, de forma empírica, carecendo de estudos de simulação computacional. Para atender critérios de segurança no futuro, bem como para desenvolver embarcações mais eficientes, será necessário que a academia e indústria na região amazônica tenham a capacidade de modelar embarcações regionais e realizar simulações da sua estabilidade, hidrodinâmica e comportamento estrutural. Nesse contexto, o presente estudo visa demonstrar um procedimento simplificado, baseado no uso de software de desenho assistido por computador e de Engenharia Naval, para avaliar os efeitos da variação da forma do casco na resistência ao avanço e a geração de ondas de uma embarcação regional. Devido à relevância no transporte longitudinal de passageiros em alta velocidade, foi selecionada uma embarcação do tipo expresso como caso de estudo para demonstrar o procedimento proposto. Todavia, os métodos e resultados apresentados podem servir como guia para avaliar outros tipos de embarcações regionais.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da variação da forma do casco na resistência ao avanço e na geração de ondas de uma embarcação regional do tipo expresso, usando software de desenho assistido por computador e métodos de Engenharia Naval.

1.4.2 Objetivos específicos

- Utilizar o software de desenho assistido por computador *Rhinoceros*[®] para modelar a superfície externa de uma embarcação regional do tipo expresso de maneira tridimensional.

- Variar de maneira paramétrica a forma do casco, por meio da mudança da largura da quina, para gerar três casos de estudo diferentes (três cascos de embarcação) a partir de um casco padrão, utilizando o software *Orca3D*[®].
- Calcular e comparar a resistência ao avanço dos casos de estudo, utilizando os métodos de Holtrop, Savitsky, e do Corpo Esbelto (*Slender body*), disponíveis no software *Maxsurf Resistance*[®], para verificar os efeitos da variação da forma do casco na resistência total ao avanço e a potência efetiva.
- Calcular e comparar a geração de ondas devido ao movimento da embarcação usando o método do Corpo Esbelto, disponível no software *Maxsurf Resistance*[®], para verificar os efeitos da variação da forma do casco na geração de ondas.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado como segue: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde são descritos brevemente os conceitos teóricos dos métodos utilizados nas análises. O capítulo também inclui uma descrição sucinta dos softwares utilizados. Logo, é apresentado o Capítulo 3 contendo a metodologia seguida no estudo. Aqui é descrito o caso de estudo da embarcação regional tipo expresso que motivou o presente trabalho. Também, são explicadas as análises que foram feitas para realizar a modelagem dos casos de estudo (variação sistemática do casco), assim como as configurações utilizadas em cada uma das análises de hidrodinâmica que foram avaliadas: resistência ao avanço e geração de ondas. Subsequentemente, o Capítulo 4 apresenta os principais resultados e discussões. O capítulo está organizado em alguns subtópicos, correspondendo aos objetivos específicos do presente trabalho: modelagem da embarcação, estudo de resistência ao avanço e geração de ondas. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões, incluindo algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Embarcação regional do tipo expresso

No presente trabalho, foi considerada uma embarcação regional amazônica do tipo expresso como caso de estudo. Uma embarcação (ou lancha) do expresso, é uma embarcação de uso comum no Estado do Amazonas, essencial para o transporte rápido e eficiente entre cidades principais do estado e diversas comunidades ribeirinhas. Devido à vastidão da região e à presença de rios e afluentes como principais vias de transporte, as embarcações do tipo expresso desempenham um papel crucial na conexão das populações locais, facilitando o deslocamento de pessoas em uma velocidade maior do que outras embarcações regionais, como gaiolas/recreios e ferryboats (DAVID, 2010; FONTES et al., 2023a; MAIA et al., 2023). Elas são comumente equipadas com motores potentes (DAVID, 2010) e conseguem atingir regimes de operação de semi-deslocamento (FONTES et al., 2023a), sendo especialmente úteis para serviços de transporte de pessoas, onde a rapidez no deslocamento é fundamental devido às grandes distâncias e à dificuldade de acesso por terra. A combinação de motores potentes e um desenho adaptado às condições dos rios amazônicos permite que essas lanchas sejam bastante utilizadas para navegação longitudinal durante várias horas contínuas. Eventualmente, essas embarcações podem ficar expostas a mudanças ambientais durante a sua navegação, interagindo com ondas e vento durante seus trajetos.

A Figura 2 mostra algumas fotografias de embarcações tipo expresso, as quais foram obtidas no Porto de Manaus. A Figura 2a mostra o terminal principal onde é possível encontrar esse tipo de embarcações, conhecido como “Balsa amarela”. A Figura 2b mostra exemplos de vários exemplares de embarcações tipo expresso encontrados nas proximidades do Porto de Manaus. Pode-se notar a similaridade no formato do casco, o qual é alongado com uma proa fina, geralmente apresentando um casco com uma ou várias quinas longitudinais. Também, podem ser observados alguns itens de sinalização, como lâmpadas e antenas, bem como alguns equipamentos de salvatagem (na cor laranja). Finalmente, a Figura 2c ilustra algumas pessoas esperando no convés de proa para acessar à embarcação. Cabe mencionar que esse tipo de embarcação assemelha bastante um ônibus, onde as pessoas viajam sentadas (NETO et al., 2024). A maioria das embarcações conta com ar-condicionado, banheiro e cafeteria. Geralmente, as pessoas são permitidas de viajar com bagagens pessoais, as quais devem ter dimensões específicas. Maiores detalhes com relação às características destas embarcações podem ser encontrados na literatura acadêmica (DAVID, 2010; FONTES et al., 2023a; MAIA et al., 2023). David (2010) apresenta conceitos importantes das embarcações tipo expresso,

incluindo parte da história regional que contribuiu para a sua consolidação como meio de transporte fluvial.

Figura 2. Levantamento de embarcações tipo expresso no terminal do Porto de Manaus – AM. (a) Terminal de lanchas expresso conhecido como “Balsa amarela”. (b) Exemplos de embarcações tipo expresso que operam no Porto de Manaus – AM. As imagens foram obtidas em Manaus – AM no dia 7 de junho de 2024 pelo autor.



(a)





(b)



(c)

Fonte: Kleyphide Pereira da Silva, 2024.

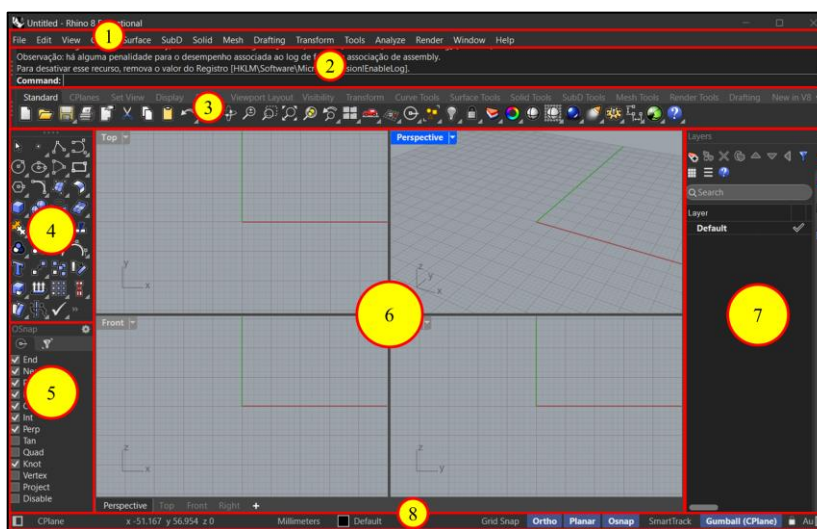
2.2 Software de modelagem tridimensional (*Rhinoceros*[®])

O presente estudo considerou o uso de software de desenho assistido por computador para modelar a geometria tridimensional de uma embarcação do tipo expresso. Foi utilizado o software *Rhinoceros*[®], também conhecido como *Rhino3D*[®], que é um programa de modelagem tridimensional (3D) amplamente utilizado em diversas indústrias, como arquitetura, design industrial e engenharia. O software foi desenvolvido pela empresa *McNeel & Associates*, e é apreciado por sua capacidade de criar modelos detalhados e precisos, incluindo formas complexas e curvas suaves usando superfícies *NURBS* (MCNEEL, 2021).

O software é conhecido por sua flexibilidade e compatibilidade com diversos sistemas operacionais, suportando uma variedade de formatos de arquivos, e sendo facilmente personalizável por meio de *scripts* e *plugins*. Desta maneira, o *Rhinoceros*[®] é uma alternativa bastante popular entre profissionais de Engenharia Naval que buscam criar modelos 3D para uma ampla gama de aplicações, incluindo a modelagem de embarcações.

A modelagem no *Rhinoceros*[®] pode ser feita através dos ícones das funções desejadas, ou escrevendo o nome da função desejada no terminal de comandos, deixando a critério do projetista a opção que melhor o atende. Também, a interface do *Rhinoceros*[®] é dividida por regiões, como ilustrado na Figura 3, onde se apresentam as propriedades visuais e ferramentas de modelagem do software.

Figura 3. Tela de trabalho principal do software *Rhinoceros*[®].



Fonte: *Rhinoceros*[®] versão 8.

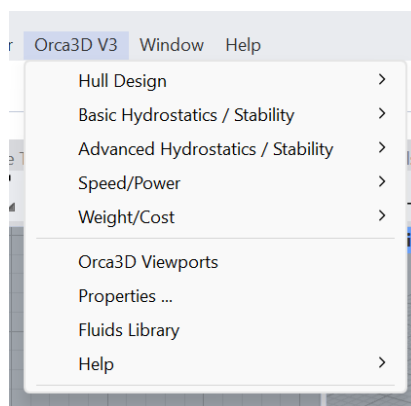
Com base na Figura 3, as principais regiões onde se concentram as ferramentas de criação e modificação são descritas como segue: (1) Menu; (2) Terminal de comandos; (3)

Grupo de abas de funções padrão de modelagem; (4) Principais ferramentas de criação de edição de superfícies; (5) Paleta de habilitação de funções do *OSnap*; (6) Ambiente de modelagem dividido em quatro quadros de visão; (7) Região de propriedades de camadas e organização das camadas; (8) Região de habilitação de auxílios de modelagem e precisão. Estas regiões, quando bem utilizadas, trazem praticidade e dinamismo para a criação de objetos tridimensionais, trazendo sobretudo economia de tempo. A disposição da interface em regiões é intuitiva, permitindo a modelagem versátil, incluindo um ambiente de renderização integrada. O software possui uma variedade de formatos para exportação de arquivos, facilitando o intercâmbio com softwares utilizados amplamente na Engenharia Naval, como *Autocad*[®], *Maxsurf*[®], *Ansys*[®], entre outros.

2.3 O software *Orca3D*[®]

O software *Orca3D*[®] (*Marine Design for Rhinoceros*) consiste em um conjunto de ferramentas, desenvolvido no formato de *plug-in*, para o software *Rhinoceros*[®], o qual oferece alguns recursos para análise e design de Engenharia Naval (Figura 4). Com o *Orca3D*[®] é possível aproveitar geometrias de cascos de embarcações feitas no *Rhinoceros*[®], para realizar diversas análises práticas. Seguindo a Figura 4, a versão acadêmica do software possui ferramentas para o desenho do casco (*hull design*), cálculos básicos de hidrostática e estabilidade (*basic hydrostatics / stability*), velocidade e potência (*speed / power*), assim como peso e custos (*weight / cost*). Tais ferramentas incluem várias opções de análise, sendo muito intuitivas para aprender em um ambiente CAD 3D. O *Orca3D*[®] pode parecer familiar para Engenharia Naval, pois foi projetado por arquitetos navais que já desenvolveram algumas das ferramentas de design comuns do setor (ORCA3D, 2024).

Figura 4. Aba principal do plugin do *Orca3D*[®] no software *Rhinoceros*[®].



Fonte: Versão acadêmica do software *Orca3D*[®] versão 3.

2.4 Regimes de operação de uma embarcação

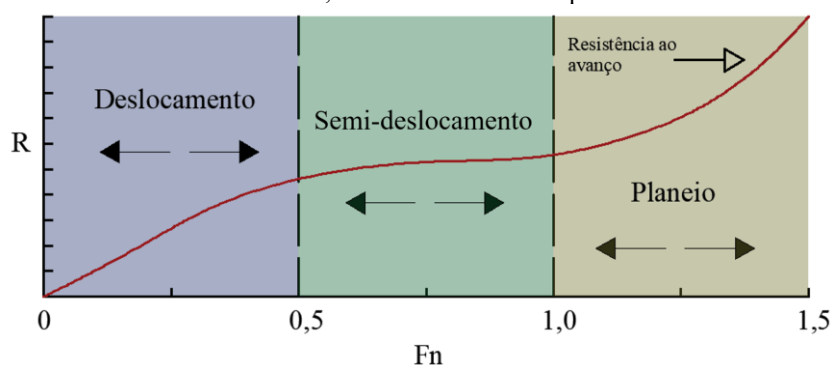
Desde o ponto de vista hidrodinâmico, o comportamento de uma embarcação com velocidade de avanço pode ser caracterizado segundo a relação entre as forças de inércia com as gravitacionais. Tendo como base experimentos de modelos em escala, William Froude (cientista inglês do século XIX), conseguiu relacionar o comportamento dinâmico entre modelos em escala e embarcações em tamanho real, dando lugar ao número adimensional de Froude, F_n (CARLTON, 2018):

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

onde V é a velocidade da embarcação, g é a aceleração devido à gravidade, e L é o comprimento característico do navio.

Em Molland et al. (2012), os autores assumem que o comportamento hidrodinâmico dos cascos ao longo da faixa total de velocidades pode ser dividido, de maneira aproximada, em três categorias de acordo com o Número de Froude (Figura 5): deslocamento, semi-deslocamento e planeio. Logo, considerando o comportamento hidrodinâmico em cada uma das categorias, embarcações do tipo deslocamento são suportadas completamente por forças de empuxo, as embarcações do tipo semi-deslocamento são suportadas por uma mistura entre forças de sustentação causadas pelo empuxo e dinâmicas, e por conseguinte, as embarcações do tipo planeio são suportadas principalmente por forças de sustentação dinâmicas. O desenvolvimento das formas básicas dos cascos poderá ser diferente para cada um desses modos de operação, o que também define categoria de embarcação (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017, 2012). Cabe mencionar que, em algumas fontes, o regime antes do planeio, também é definido como semi-planeio.

Figura 5. Representação ilustrativa da resistência ao avanço para diferentes números de Froude de uma embarcação. São mostradas as faixas de velocidades aproximadas para distintos modos de operação: deslocamento, semi-deslocamento e planeio.



Fonte. Adaptado de Molland et al. (2012).

2.5 Métodos disponíveis no software *Maxsurf Resistance*[®]

No presente estudo foi utilizado o software *Maxsurf Resistance*[®] (BENTLEY, 2020), para realizar as análises de resistência ao avanço e geração de ondas causados pelo movimento da embarcação. Com relação à resistência ao avanço, foram utilizados os métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body* (Corpo esbelto, em português). Para o cálculo da geração de ondas foi utilizado o método *Slender body*. Os métodos de Holtrop e Savitsky são métodos baseados em análise de regressão com resultados experimentais, enquanto o método *Slender body* é um modelo analítico que utiliza a teoria potencial e dados empíricos para calcular a componente de resistência devida ao atrito. Uma breve descrição de cada método é apresentada nas subseções seguintes.

2.5.1 Método de Holtrop e Mennen

Segundo Birk (2019), o método de Holtrop e Mennen é possivelmente o mais popular para calcular a resistência ao avanço e a potência requerida de embarcações de deslocamento, sendo amplamente utilizado. Ele foi desenvolvido por Holtrop e Mennen (1982) e aprimorado por Holtrop (1984), e se fundamenta em análises estatísticas e correlações dimensionais para estimar a resistência ao avanço e as características propulsivas das embarcações. Os resultados apresentados em 1982 foram baseados em um conjunto diversificado de modelos em escala e dados de embarcações em tamanho real. Embora para muitas combinações de dimensões principais os resultados tenham sido satisfatórios, algumas classes de embarcações, especialmente as rápidas com número de Froude superior a 0,5, podem apresentar resultados insuficientes (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). Em suma, é comum que as faixas de aplicação sigam os seguintes intervalos: $F_n \leq 0,45$; $0,55 \leq C_p \leq 0,85$; $3,9 \leq L/B \leq 9,5$ (HOLTROP, 1977).

De maneira geral, o cálculo da resistência ao avanço total (R_{TOTAL}) pode ser feito com a soma de diversas componentes individuais de resistência ao avanço, como mostrado na Equação 2. Na equação, R_F é a resistência friccional segundo a fórmula de atrito do ITTC-1957 (RF), $1+k_1$ corresponde ao fator de forma que descreve a resistência viscosa da forma do casco com relação a R_F , R_{APP} é a resistência dos apêndices, R_W representa a resistência devido à geração e quebra de ondas pela embarcação, R_B é uma resistência adicional causada pelo bulbo perto da superfície de água, R_{TR} é a resistência adicional devido à pressão exercida por uma popa do tipo transom, e R_A é a contribuição da resistência causada pela correlação modelo – protótipo (HOLTROP; MENNEN, 1982). Os termos da Equação 2 podem ser calculados implementando várias equações analíticas cujo procedimento de implementação pode ser

consultado nos artigos correspondentes. Uma descrição detalhada do método, em língua portuguesa, pode ser encontrada no estudo de Machado (2023).

$$R_{TOTAL} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_w + R_b + R_{TR} + R_A \quad (2)$$

Resistência causada pelo atrito (frictional resistance, R_F)

A resistência causada pelo atrito (R_F) é a resistência causada pela fricção entre a água e a superfície do casco da embarcação. Ela é calculada pela seguinte equação, considerando a fórmula de ITTC-57.

$$R_F = 0,5\rho V^2 S C_f \quad (3)$$

onde ρ é a densidade da água (aproximadamente 1000 kg/m^3 para água doce); V é a velocidade da embarcação (em metros por segundo); S é a área molhada do casco (em metros quadrados); e C_f é o coeficiente de fricção, calculado como segue:

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(\text{Re}) - 2)^2} \quad (4)$$

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional que representa a relação entre forças inerciais e viscosas no fluido:

$$\text{Re} = \frac{V L_{pp}}{\nu} \quad (5)$$

onde L_{pp} é o comprimento entre perpendiculares (em metros); em muitos casos é considerado como o comprimento de linha d'água, L_{wl} , e ν é a viscosidade cinemática da água (aproximadamente $1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para água doce).

Resistência causada pela forma da embarcação

A resistência de forma (R_{fm}) leva em consideração o aumento na resistência devido à forma do casco. É calculada como uma função da resistência causada pelo atrito:

$$R_{fm} = (1 + k_1)R_f \quad (6)$$

onde k_1 é um coeficiente de forma, determinado pela seguinte equação, que varia conforme a geometria da popa da embarcação.

$$k_1 = -0,07 + 0,487118c_{14} \left[\left(\frac{B}{L_{wl}} \right)^{1,06806} \left(\frac{T}{L_{wl}} \right)^{0,46106} \left(\frac{L_{wl}}{L_R} \right)^{0,121563} \left(\frac{L_{wl}^3}{\nabla} \right)^{0,36486} (1 - C_p)^{-0,604247} \right] \quad (7)$$

onde B é a boca moldada da embarcação, T é o caldado, L_{wl} é o comprimento da linha d'água, ∇ é o volume de água deslocada; c_{14} é um coeficiente que depende da forma e é definido por:

$$c_{14} = 1 + 0,011C_{stern} \quad (8)$$

Dependendo da forma da popa, os valores do C_{stern} são: -25 (tipo gôndola), -10 (tipo V), 0 (tipo normal) e +10 (tipo U). Em Holtrop (1984) não se tem muita informação sobre L_R , porém sabe-se que é obtido por:

$$L_R = L_{wl} \left(1 - C_p + \frac{0,06C_p lcb}{4C_p - 1} \right) \quad (9)$$

Segundo Holtrop (1984), lcb é a posição longitudinal de fluabilidade que é aproximadamente $0,5L_{wl}$ e é expresso como porcentagem de L_{wl} . E ainda C_p é calculado por:

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m L_{wl}} \quad (10)$$

sendo A_m a área de seção mestra.

Resistência causada pelos apêndices da embarcação

A resistência ao avanço por apêndices é causada por estruturas que modificam a resistência viscosa (BIRK, 2019). Holtrop e Mennen (1982) propuseram um método simplificado para calcular essa resistência:

$$R_{APP} = 0,5\rho V^2 S_{APP}(1 + k_2)_{eq} C_f + \sum R_{TH} \quad (11)$$

sendo k_2 o fator de forma do apêndice, S_{APP} é a área do apêndice (em m²), V é a velocidade da embarcação (em m/s). Assim,

$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum_i (1 + k_{2i}) S_{APP_i}}{\sum_i S_{APP_i}} \quad (12)$$

Os valores relativos ao fator de forma para lemes, eixos e quilhas (k_{2i}) são (HOLTROP, 1988): leme atrás do *skeg* (0,2 – 0,5), leme atrás da popa (0,5), leme balanceado (2,8), suporte do eixo (2,0 – 4,0), *skeg* (0,5), proteção de estabilizadores (2,0 – 3,0), proteção de casco (1,0), eixos expostos com ângulo de 10° (1,0), eixos expostos com ângulo de 20° (4,0), estabilizadores (1,8), domo (1,8), quilhas (1,7). Ainda mais uma estrutura do casco que deve ser considerada para os cálculos de resistência por apêndices, é a abertura para os *bow thrusters*. Assim, Holtrop e Mennen (1982) desenvolveram outra equação para calcular o valor do coeficiente de arrasto dos *bow thrusters*. Sugere-se ao leitor consultar essa formulação a qual não aplica na análise da embarcação do presente estudo.

Resistência causada por ondas

A resistência causada por ondas (R_w) é a resistência causada pelas ondas que são geradas quando a embarcação se move na água, considerando águas calmas. É determinada usando uma série de equações empíricas que levam em conta a geometria do casco, como comprimento, largura, calado e coeficientes de forma.

$$\begin{cases} R_{W-A} = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g e^{m_1 F_n^d + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2})}; F_n \leq 0,4 \\ R_{W-B} = c_{17} c_2 c_5 \Delta \rho g e^{m_3 F_n^d + m_4 \cos(\lambda F_n^{-2})}; F_n \geq 0,55 \\ R_w = R_{W-A_{0,4}} + \frac{10F_n - 4}{1,5} (R_{W-B_{0,55}} - R_{W-A_{0,4}}); 0,4 < F_n < 0,55 \end{cases} \quad (13)$$

onde:

$$c_{17} = 6919,3C_M^{-1,3346} \left(\frac{\nabla}{L_{wl}^3} \right)^{2,00977} \left(\frac{L_{wl}}{B} - 2 \right)^{1,40692} \quad (14)$$

$$m_3 = -7,2035 \left(\frac{B}{L_{wl}} \right)^{0,326869} \left(\frac{T}{B} \right)^{0,605375} \quad (15)$$

e os coeficientes c_2 , c_5 , d e λ definidos;

$$c_2 = e^{(-1,89\sqrt{c_3})} \quad (16)$$

$$c_5 = 1 - \frac{0,8A_T}{BTC_M} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \lambda = 1,446C_p - 0,03 \frac{L}{B}; \text{ quando } \frac{L}{B} < 12 \\ \lambda = 1,446C_p - 0,36; \text{ quando } \frac{L}{B} > 12 \end{cases} \quad (18)$$

$$d = -0,9 \quad (19)$$

$$c_3 = 0,56 \frac{A_{BT}^{1,5}}{BT(0,31\sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)} \quad (20)$$

$$m_4 = c_{15} 0,4e^{-0,034F_n^{-3,29}} \quad (21)$$

$$\begin{cases} c_{15} = -1,69385; \text{ quando } \frac{L^3}{\nabla} < 512 \\ c_{15} = -1,69385 + \frac{\frac{L}{\sqrt[3]{\nabla}} - 8}{2,36}; \text{ quando } 512 < \frac{L^3}{\nabla} < 1726,91 \\ c_{15} = 0; \text{ quando } \frac{L^3}{\nabla} > 1726,91 \end{cases} \quad (22)$$

sendo que C_M é o coeficiente de seção mestra;

$$C_M = \frac{A_m}{BT} \quad (23)$$

onde A_T é a área da popa submersa com a embarcação em repouso, A_{BT} é a área do bulbo, T_F é o calado dianteiro da embarcação, h_b é a posição do centro de A_{BT} abaixo do plano da quilha, o valor não pode ser superior a $0,6T_F$.

$$c_1 = 2223105c_7^{3,78613} \left(\frac{T}{B}\right)^{1,07961} (90 - i_e)^{-1,37565} \quad (24)$$

$$\begin{cases} c_7 = 0,229577 \left(\frac{B}{L}\right)^{0,33333} & ; \text{quando } \frac{B}{L} < 0,11 \\ c_7 = \frac{B}{L} & ; \text{quando } 0,11 < \frac{B}{L} < 0,25 \\ c_7 = 0,5 - 0,0625 \frac{B}{L} & ; \text{quando } \frac{B}{L} > 0,25 \end{cases} \quad (25)$$

$$m_1 = 0,0140407 \frac{L}{T} - 1,75254 \frac{\sqrt[3]{V}}{L} - 4,79323 \frac{B}{L} - c_{16} \quad (26)$$

$$\begin{cases} c_{16} = 8,07981C_p - 13,8673C_p^2 + 6,984388C_p^3; & \text{quando } C_p < 0,8 \\ c_{16} = 1,73014 - 0,7067C_p; & \text{quando } C_p > 0,8 \end{cases} \quad (27)$$

e por fim, m_4 é o coeficiente na fórmula para altas velocidades.

Resistência causada pelo bulbo

A resistência adicional causada pelo bulbo de uma embarcação pode ser obtida pela seguinte equação (HOLTROP, 1984), sendo PB o parâmetro que quantifica a saída do bulbo na linha de água parada.

$$R_B = \frac{0,11e^{-3PB^2} F_{ni}^3 A_{BT}^{1,5} \rho g}{1 + F_{ni}^2} \quad (28)$$

$$P_B = 0,56 \frac{\sqrt{A_{BT}}}{T_F - 1,5h_B} \quad (29)$$

Resistência da popa

A popa da embarcação durante o movimento cria uma zona de pressão adicional à resistência ao avanço, assim Holtrop e Mennen (1982) propuseram a seguinte equação, levando em consideração o número de Froude de profundidade, F_{nT} . O coeficiente c_6 . É definido pela terceira equação a seguir:

$$R_{TR} = 0,5\rho V^2 A_T c_6 \quad (30)$$

$$F_{nT} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2gA_T}{B + BC_w}}} \quad (31)$$

$$\begin{cases} 0,2(1 - 0,2F_{nT}); & \text{caso } F_{nT} < 5 \\ 0; & \text{caso } F_{nT} > 5 \end{cases} \quad (32)$$

Resistência da correlação modelo-navio

O método de Holtrop e Mennen se baseia em testes com modelos em tanques de reboque. No entanto, os efeitos de rugosidade e outros fenômenos adicionais nas parcelas de resistência apresentadas anteriormente devem ser considerados, pois, em escala real, podem ser significativos. A seguinte equação para R_A foi proposta para ajustar a correção entre o modelo e a embarcação (HOLTROP, 1988), onde os coeficientes c_4 e C_A podem ser obtidos como segue.

$$R_A = 0,5\rho V^2 S C_A \quad (33)$$

$$\begin{cases} c_4 = \frac{T_F}{L_{wl}}; & \text{se } \frac{T_F}{L_{wl}} \leq 0,04 \\ 0,04; & \text{se } \frac{T_F}{L_{wl}} \geq 0,04 \end{cases} \quad (34)$$

$$C_A = 0,00546(L_{wl} + 100)^{-0,16} - 0,002 + 0,003 \sqrt{\frac{L_{wl}}{7,5}} C_B^4 c_2 (0,04 - c_4) \quad (35)$$

onde C_A é o coeficiente de correlação.

Resistência causada pelo ar

Para calcular a resistência adicional do ar devido à área do navio acima da linha d'água, Holtrop e Mennen (1982) propuseram a seguinte equação, considerando $\rho_A = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e $C_{DA} = 0,8$.

$$R_{AA} = 0,5\rho_A V^2 C_{DA} A_V \quad (36)$$

onde C_{DA} é o coeficiente de resistência do ar, ρ_A é densidade do ar em kg/m^3 , A_V é a área projetada longitudinal acima da linha d'água em m^2 .

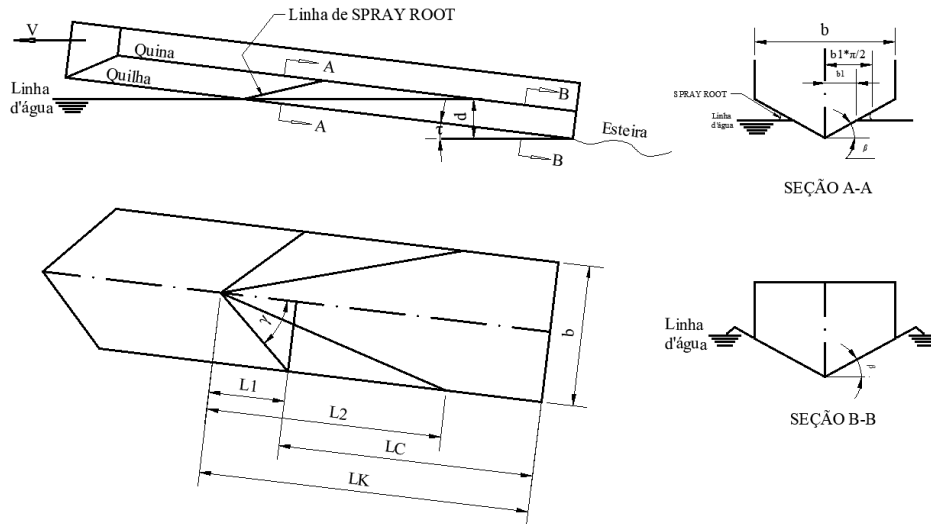
É importante mencionar que foram apresentados os conceitos mais relevantes do método empírico de Holtrop para calcular a resistência ao avanço, o qual está programado dentro do software *Maxsurf Resistance*. Por esse motivo, o próprio software mostra as faixas de aplicabilidade do método para a embarcação utilizada. Assim, as análises foram feitas considerando as restrições impostas pelo software.

2.5.2 Método de Savitsky

O método de Savitsky, publicado em 1964 (SAVITSKY, 1964), é um dos principais métodos de avaliação de resistência ao avanço de uso prático, quando se trata de embarcações que navegam nas faixas de operação semi-deslocamento (termo comumente considerado também como semi-planeio) e planeio. Nesse trabalho, são apresentadas equações empíricas para calcular a sustentação, arrasto, área molhada, centro de pressão, e limites da instabilidade de *porpoising* (instabilidade nos movimentos de avanço com cabeceio e arfagem), de embarcações de planeio, são apresentadas. Tais variáveis foram propostas como função de velocidade, ângulo de *trim*, ângulo de *deadrise* e carregamento, para predizer, de maneira prática, a potência requerida de cascos de planeio prismáticos. No trabalho de Savitsky são incluídos alguns exemplos para demonstrar a aplicação do procedimento proposto. Na metodologia apresentada, assume-se uma lancha como um casco com ângulo de pé de caverna constante com comprimento semi-

infinito, e supõe-se uma força de pressão atuante no casco (Figura 6), interpretando esse casco como uma placa plana (Figura 7).

Figura 6. Representação das interseções do casco com a linha d'água.



Fonte: Adaptado de Savitsky (1964).

Os parâmetros geométricos mostrados na Figura 6 são descritos a seguir:

L_K : comprimento molhado da quilha;

L_C : comprimento molhado da quina;

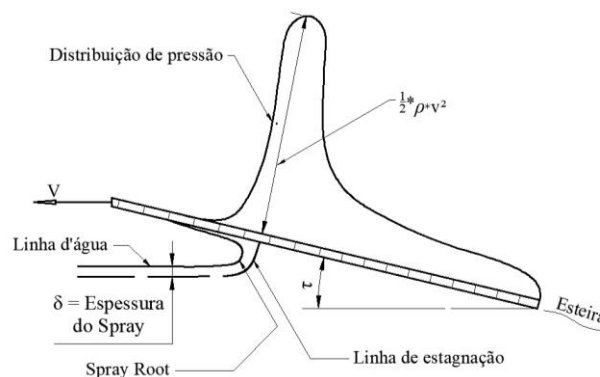
τ : ângulo de trim;

d : afundamento do casco medido do ponto de vista mais baixo no espelho de popa até a linha d'água;

Raiz de pulverização (*spray root*): ponto onde o jato inverte de direção com relação ao fluxo da água;

β : ângulo de pé de caverna.

Figura 7. Distribuição de pressão em uma placa plana.



Fonte: Modificado de Savitsky (1964).

Os parâmetros apresentados na Figura 7 são descritos a seguir:

Linha de estagnação (*stagnation line*): linha de corrente que atinge velocidade nula ao se aproximar do casco;

δ : espessura da pulverização: espessura do jato; distância medida da linha d'água para linha de estagnação, associada a quantidade de fluxo que irá inverter de sentido;

$\frac{1}{2}\rho V^2$: considerando um fluido não viscoso, segundo o teorema de *Bernoulli*, o pico de pressão acontece no ponto de estagnação, assim a pressão máxima tem seu valor igual ao valor máximo da energia cinética, já que não há velocidade no ponto.

Primeiro, são elaboradas as expressões de sustentação para placas planas, seguidas por uma relação para formas com *deadrise* (ângulo de entrada do casco com a superfície livre da água) constante. É sabido que o escoamento possui componentes longitudinais e transversais. A partir de aspectos aerodinâmicos, sabe-se que superfícies com alta razão de aspecto terão um fluxo predominante na direção transversal da placa, por tanto a sustentação seria proporcional ao quadrado do trim. Logo pode-se expressar uma relação inicial entre o coeficiente de sustentação, C_L , e o *trim*, τ , dado pela seguinte equação:

$$C_L = A\tau + B\tau^2 \quad (37)$$

Geralmente, as embarcações possuem uma relação L/B alta; o segundo termo da Equação 3 se transforma em uma pequena correção do primeiro. Daí descobriu-se que a força de sustentação (*lift*) pode ser descrita em função de $\tau^{1,1}$. Foram divididos os termos estáticos e dinâmicos; para o primeiro, fez-se o uso de uma formulação proposta por Sottoft em 1934 (SAVITSKY, 1964). Para o segundo componente (B), utilizou-se uma formulação analítica. Com isso foram obtidos os valores das constantes desconhecidas empiricamente, usando a seguinte equação:

$$C_L = \tau^{1,1} \left(0,012\lambda^{\frac{1}{2}} + \frac{0,0055\lambda^{\frac{5}{2}}}{C_V^2} \right) \quad (38)$$

onde:

λ : razão entre o comprimento médio e a boca, L/B ;

C_V : coeficiente de velocidade, $\frac{V}{\sqrt{gb}}$.

O aumento do ângulo do pé de caverna faz com que a sustentação se reduza. Logo, Savitsky e Neidinger (1954) e Korvin-Kroukovsky et al. (1949) coincidem que o coeficiente de sustentação de uma superfície com *deadrise* não nulo por ser obtido pela seguinte equação:

$$C_{L\beta} = C_{LD} - 0,0065\beta C_{LD}^{0,6} \quad (39)$$

No método de Savitsky, o arrasto em águas calmas é descrito utilizando dois termos: pressão e arrasto viscoso. Em uma superfície, a pressão normal pode ser decomposta em força de sustentação (*lift*) e força de arrasto (*drag*). No equilíbrio, a primeira componente é igual ao deslocamento, e através de relações geométricas, pode-se chegar à Equação 6. A componente viscosa pode ser determinada usando o coeficiente de fricção de Schoenherr (SAVITSKY, 1964), resultando na obtenção da equação a seguir:

$$D_p = \Delta \tan(\tau) \quad (40)$$

$$D = \Delta \tan(\tau) + \frac{C_f V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (41)$$

onde:

D_p é a componente de pressão de arrasto, D é a força de arrasto ou resistência ao avanço, C_f é o coeficiente friccional turbulento de Schoenherr, V_1 é a velocidade no fundo do casco, e $\lambda b^2 / \cos(\beta)$ representa a área molhada.

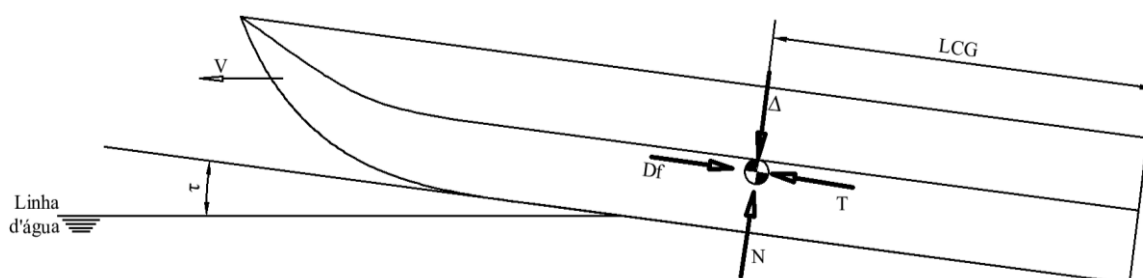
Para calcular o equilíbrio dinâmico, é imprescindível ter conhecimento do ponto central de pressão. Foi demonstrado que o centro de pressão dinâmica pode ser considerado a 75% do comprimento molhado a partir da popa, enquanto o centro de pressão hidrostático é a 33% da popa (SAVITSKY; NEIDINGER, 1954). Ao ponderar essas duas considerações, é assumida a seguinte equação:

$$C_p = \frac{l_p}{\lambda b} = 0,75 - \frac{1}{5,2 \frac{C_v^2}{\lambda^2} + 2,39} \quad (42)$$

sendo C_p o centro de pressão adimensional em função do comprimento molhado médio.

Depois de estimar essas forças e determinar seu ponto de aplicação, bem como compreender a configuração da propulsão e a distribuição da carga no casco, é viável elaborar equações de equilíbrio de força e momento (SAVITSKY, 1964). Uma representação gráfica típica das forças que atuam em uma embarcação de planeio pode ser visto na Figura 8.

Figura 8. Representação do diagrama genérico de forças atuante na embarcação.



Fonte: Adaptado de Savitsky (1964).

Em seu trabalho, Savitsky (1964) afirma que as equações empíricas formuladas não aplicáveis a embarcações que atendam as condições, $0,6 \leq C_v \leq 13$; $2^\circ \leq \tau \leq 15^\circ$; e $\lambda \leq 4$.

2.5.3 Método *Slender body*

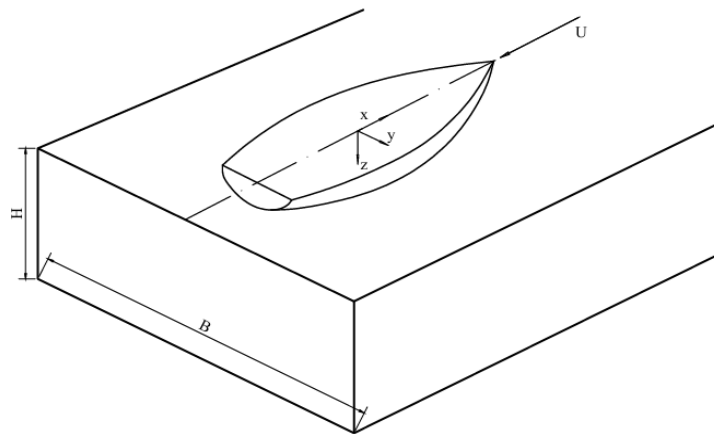
O software *Maxsurf Resistance*[®] utilizado no presente trabalho, possui um método analítico para calcular a resistência ao avanço conhecido como método *Slender body*, (método do corpo esbelto). Segundo o manual do software, o método *Slender body* é baseado nos trabalhos de Couser (1996) e Tuck et al. (1999), e utiliza a metodologia de Michell (1898) para calcular a resistência de onda de um monocasco simétrico de bombordo/estibordo (BENTLEY, 2020).

O método *Slender body* pode ser aplicado a diversos cascos; contudo, os cascos individuais devem ser finos e simétricos em relação à linha central local. O método negligencia as forças de planeio, o que limita a aplicabilidade da faixa de velocidade para este método. Em geral, são alcançados resultados satisfatórios para uma grande variedade de navios mono e multicascos operando com números normais de Froude antes do planeio (BENTLEY, 2020).

Vale destacar que o método apenas considera a componente de resistência devido à geração de ondas causadas pelo movimento da embarcação (componente devida à pressão), pois está baseado na teoria potencial de hidrodinâmica. Assim, o *Maxsurf Resistance*[®] permite simular, de maneira simplificada, o padrão das ondas (elevações) causadas por embarcações com velocidade de avanço. Um exemplo de aplicação, incluindo recomendações para uso do método, foi apresentado por Soares (2023) e Soares et al. (2023).

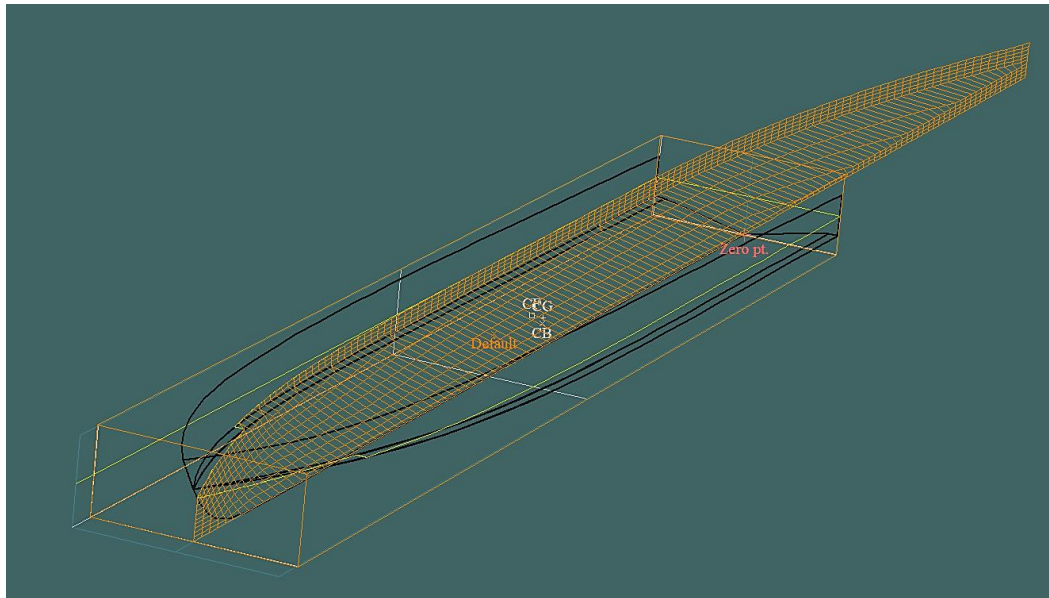
A Figura 9 apresenta o sistema de eixos utilizado no desenvolvimento do método, que consiste em um canal finito com profundidade de água H e largura B . O casco é dividido em vários painéis quadriláteros (Figura 10). As características de um termo fonte são colocadas próximas ao centro de cada painel num plano onde y é igual a 0, formando uma matriz ao longo da linha central do casco. As fontes são calculadas de forma independente, de acordo com a inclinação local do painel (COUSER; WELLICOME; MOLLAND, 1998).

Figura 9. Notação principal e convenção de eixos.



Fonte: Modificado de Couser et al. (1998).

Figura 10. Representação do método de subdivisão em quadriláteros, utilizando a parte submersa do casco.



Fonte: Elaborado pelo autor com o auxílio do software *Maxsurf Resistance*®.

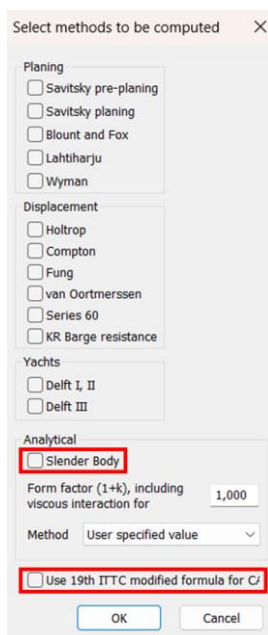
Para calcular a resistência total, o software *Maxsurf Resistance*® permite calcular e adicionar a componente de resistência viscosa usando o coeficiente de atrito por meio da curva proposta pelo ITTC de 1957 (BENTLEY, 2020). A utilização direta do método *Slender body*

disponível no *Maxsurf Resistance*[®] determina a resistência ao avanço causado pela geração de ondas, mas não a resistência total, uma vez que não considera a viscosidade. A resistência viscosa é calculada de forma empírica, geralmente através do cálculo do coeficiente de atrito ITTC'57 (C_F , na equação a seguir), e do fator específico.

$$C_F = \frac{0,075}{[\log(R_n) - 2]^2} \quad (43)$$

A Figura 11 ilustra as opções existentes para calcular a resistência total ao avanço no software *Maxsurf Resistance*[®], incluindo a opção para calcular a componente de atrito no método *Slender body*.

Figura 11. Opções de métodos de análise de resistência ao avanço disponíveis no software *Maxsurf Resistance*[®].



Fonte: Versão de estudante do software *Maxsurf Resistance*[®].

2.5.4 Cálculo da potência efetiva

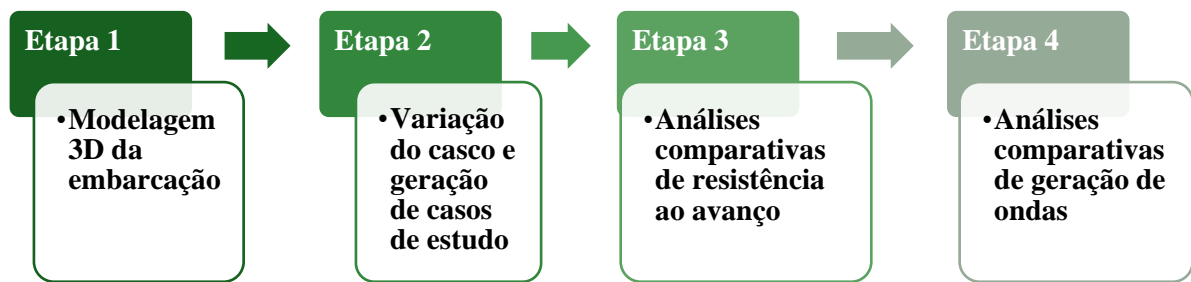
Com a resistência total obtida (R_T), o software *Maxsurf Resistance*[®] permite calcular a potência efetiva (P_E) da embarcação para determinadas velocidades de avanço (V), por meio da equação a seguir. As unidades consideradas são resistência ao avanço em Newtons, velocidades em m/s, e potência efetiva em Watts. Contudo, o software facilita a visualização de dados em unidades inglesas.

$$P_E = R_T V \quad (44)$$

3 METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado por meio de quatro etapas principais, como mostrado no fluxograma da Figura 12. Tais etapas incluem a modelagem tridimensional (3D) da embarcação tipo expresse, a variação paramétrica do casco, análises comparativas de resistência ao avanço e da geração das ondas por parte da embarcação. Cada uma das etapas é descrita nos subtópicos a seguir.

Figura 12. Fluxograma com as etapas principais do estudo.



Fonte: Elaboração própria.

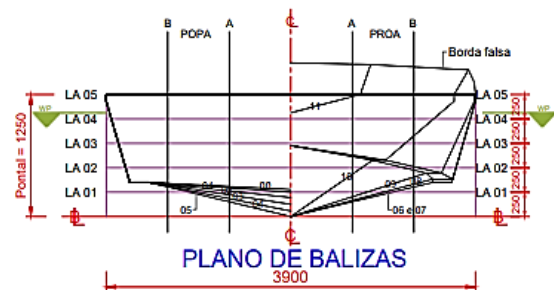
3.1 Etapa 1: modelagem tridimensional da embarcação

Para realizar o estudo, considerou-se uma embarcação amazônica típica, de alta velocidade, do tipo lancha expresse. A embarcação que motivou o presente estudo é mostrada na Figura 13a, enquanto as Figuras 13b, 13c, e 13d mostram os planos de linhas transversal, longitudinal e do topo, respectivamente. As características principais da embarcação são mostradas na Tabela 1.

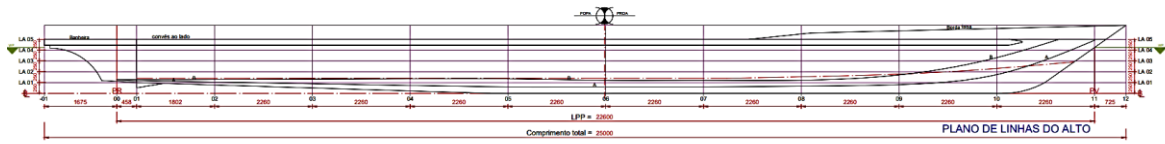
Figura 13. Embarcação tipo expresse considerada como representativa do presente estudo, a qual pode ser encontrada no Porto de Manaus – AM e costuma realizar a rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas. (a) Fotografia da embarcação. (b) Plano de balizas. (c) Planos de linhas do alto. (d) Plano de linhas d'água.



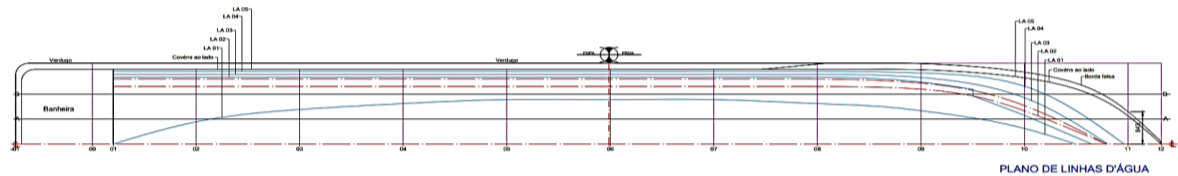
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Cortesia da Empresa Netuno Engenharia Naval.

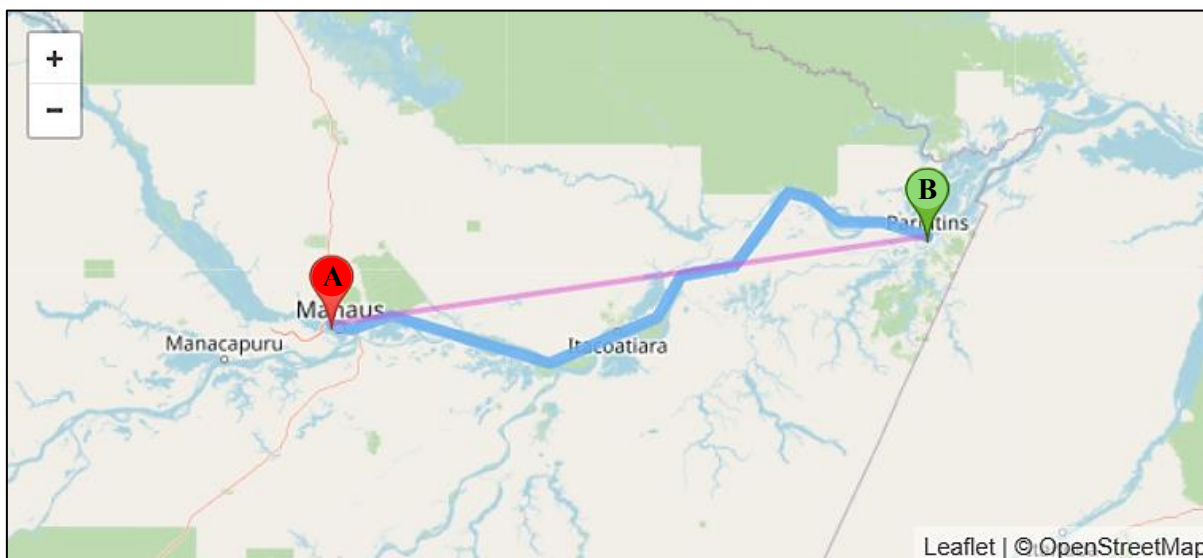
Tabela 1. Dimensões principais da embarcação.

Comprimento total	25,00 m
Comprimento entre perpendiculares	22,60 m
Boca	3,90 m
Pontal	1,25 m
Calado carregado	0,77 m

Fonte: Netuno Engenharia Naval.

Em seu itinerário, a embarcação faz o transporte de passageiros seguindo a rota Manaus – Parintins (pontos A – B), no Estado do Amazonas (Figura 14). O trajeto Manaus – Parintins em linha reta tem uma distância aproximada de 369 km (não existem rodovias para realizar esse trajeto), mas pelo rio, a distância é em torno de 437 km. A viagem de lancha expresso dura em média de 9h até 12h, dependendo da época do ano e da velocidade da correnteza. Cabe mencionar que de barco convencional (ex.: embarcação tipo recreio), a viagem descendo o rio dura aproximadamente de 18 a 20h, e subindo o rio dura de 22 a 26h, dependendo da potência do motor da embarcação. Durante a rota, podem ser observados troncos de árvores, e capim que ficam flutuando no meio do rio. Por meio de uma viagem feita na embarcação considerada como caso de estudo, Cursino (2024) verificou que a velocidade média de viagem foi de 24 nós, oscilando entre 20 e 30 nós. Para isto, foi utilizado o aplicativo de celular *Speedometer*, seguindo um procedimento similar ao apresentado no estudo de Bitencourt (2024), que mediu a velocidade de uma embarcação do tipo rabeta. A medição do aplicativo feita por Bitencourt (2024) foi comparada com medições feitas por drone, demonstrando a sua confiabilidade para medir a velocidade de avanço por meio do uso do GPS.

Figura 14. Rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas, Brasil.

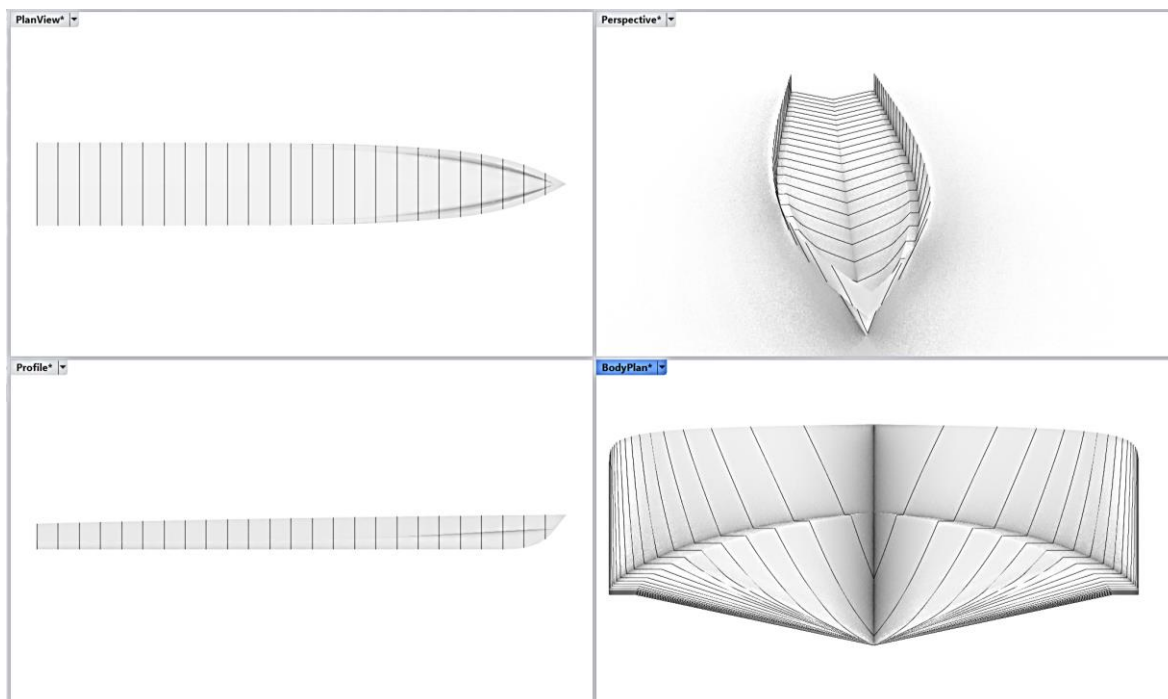


Fonte: Elaboração própria no sítio web *OpenStreetMap*.

No presente estudo foi avaliado o efeito da variação da forma do casco da embarcação com relação ao desempenho hidrodinâmico, especificamente na resistência ao avanço e a geração de ondas pela embarcação em movimento. Para isto, foi gerada a superfície de um casco padrão que fosse similar ao da embarcação considerada como caso de estudo. O casco de referência foi gerado mantendo as principais dimensões, porém com menos detalhes. Foram utilizadas versões acadêmicas do software *Rhinoceros*[®] versão 8 com o software complementar *Orca3D*[®] versão 3.1.2.

A superfície tridimensional do casco de referência foi gerada através da ferramenta *Planning hull assistant* do software *Orca3D*[®]. O casco foi criado a partir de uma forma de casco de planeio predefinida no *Orca3D*[®]; porém, sendo atualizada com os parâmetros inseridos. Assim, para gerar a geometria de referência (Figura 15), foi definido um comprimento do convés de 25 m, boca do convés de 3,9 m, altura do convés na proa de 1,25 m, altura da quina com relação à linha base de 0,6 m, altura da quina na popa de -0,38 m (considerando o sistema de coordenadas adotado no *Rhinoceros*[®]), e largura da quina de 0.1 m. Os parâmetros definidos no software *Orca3D*[®] para geração da geometria padrão, com relação às suas dimensões, forma e ângulos, são definidos nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 15. Vistas da embarcação gerada como caso de referência (Caso 0).



Fonte: Elaboração própria usando os softwares *Rhinoceros*[®] e *Orca3D*[®].

Tabela 2. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Dimensões).

Parâmetro (inglês)	Parâmetro (português)	Valor
<i>Length on deck</i>	Comprimento no convés	25 m
<i>Beam on deck</i>	Boca no convés	3,9 m
<i>Deck height @bow</i>	Altura do convés @proa	1,25 m
<i>Deck height @transom</i>	Altura do convés @popa	0,832 m
<i>Chine height @bow</i>	Altura da quina @proa	0,6 m
<i>Keel height @transom</i>	Altura da quilha @popa	-0.38 m
<i>Chine width</i>	Largura da quina	0,1 m

Fonte: Elaboração própria baseado no software *Orca3D*[®].

Tabela 3. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Forma).

Parâmetro (inglês)	Parâmetro (português)	Valor
<i>Sheer height</i>	Altura absoluta	0,9
<i>Sheer height position</i>	Posição da altura total	0,43

<i>Deck beam @transom</i>	Largura do convés @popa	1
<i>Chine beam @transom</i>	Largura da quina @popa	0,95
<i>Max beam position</i>	Posição da boca máxima	0,4
<i>Forefoot shape</i>	Forma do ante pé	0,9
<i>Bow rounding</i>	Arredondamento da proa	0,0
<i>Bow fullness</i>	Plenitude da proa	0,4
<i>Bow twist</i>	Torção da proa	0,9

Fonte: Elaboração própria baseado no software *Orca3D*[®].

Tabela 4. Parâmetros do caso de referência, Caso 0 (Ângulos).

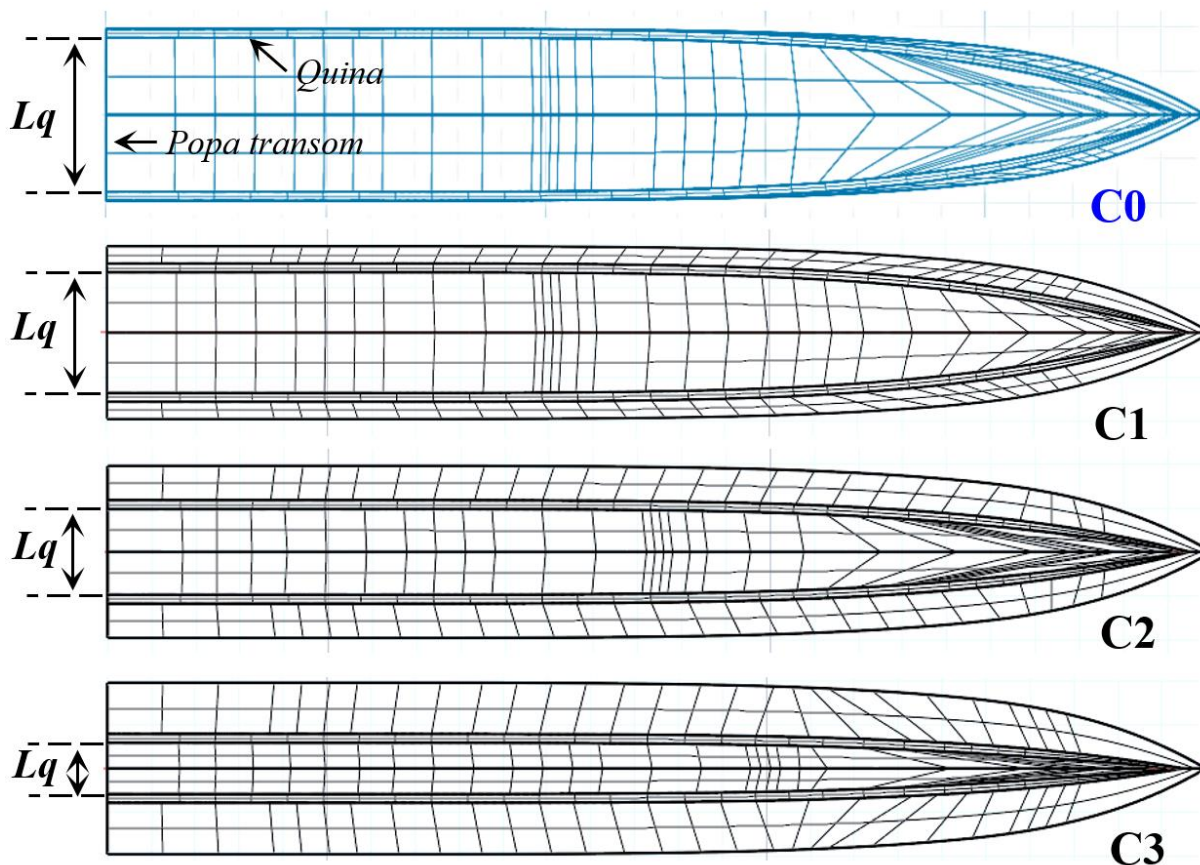
Parâmetro (inglês)	Parâmetro (português)	Valor
<i>Bow rake angle</i>	Ângulo de inclinação na proa	38°
<i>Bottom rocker</i>	Balanço no fundo	0°
<i>Transom rake angle</i>	Ângulo de inclinação na popa	0°
<i>Transom deadrise</i>	Ângulo de entrada na água na popa	12°
<i>Mid deadrise</i>	Ângulo de entrada na água na posição média	14°
<i>Adjust chine transversely</i>	Ajustar a quina transversalmente	Desativado
<i>Adjust chine vertically</i>	Ajustar a quina verticalmente	Ativado

Fonte: Elaboração própria baseado no software *Orca3D*[®].

3.2 Etapa 2: Variação da forma do casco e geração de casos de estudo

A partir do casco padrão foram gerados três cascos adicionais cuja forma foi variada de maneira sistemática. Ou seja, foram mantidos todos os parâmetros das Tabelas 2, 3 e 4 como constantes, variando apenas o parâmetro *Chine beam @Transom* (largura da quina na popa) de 0,95 (Caso 0 – padrão; **C0**), para 0,75 (Caso 1; **C1**), 0,55 (Caso 2; **C2**) e 0,35 (Caso 3; **C3**), como mostrado na Figura 16. A figura mostra a vista do topo dos casos de estudo gerados com a variação da largura entre os bordos da quina na região da popa (Lq). Cabe ressaltar que uma simples variação desse parâmetro mudou significativamente o formato do casco. Informações adicionais sobre o método do software para realizar a mudança paramétrica da forma do casco podem ser encontradas no próprio manual do software (ORCA3D, 2024).

Figura 16. Representação do efeito da variação do parâmetro da largura da quina na região da popa (Lq) no formato do casco. As figuras mostram que o maior valor (0,95) foi para o Caso padrão (C0). Essa distância foi reduzida para os Casos C1, C2 e C3, os quais tiveram valores de 0,75, 0,55 e 0,35, respectivamente, de acordo com a escala do software *Orca3D*[®].



Fonte: Elaboração própria com dados do software *Orca3D*[®].

3.3 Etapas 3 e 4: Avaliação da resistência ao avanço e trens de ondas gerados

Para demonstrar a aplicação de análises hidrodinâmicas com os cascos obtidos, foram utilizados três métodos de uso prático, disponíveis na versão acadêmica do software *Maxsurf Resistance*[®], da empresa *Bentley Systems*[®] (BENTLEY, 2020), como descrito no Capítulo 2. Os métodos utilizados consistem em dois modelos de regressão que foram obtidos por meio de análise de séries sistemáticas de resistência ao avanço e um método analítico. O primeiro modelo de regressão é o Método de Holtrop, que pode ser utilizado para embarcações que operam no regime de deslocamento. Neste trabalho, o regime de deslocamento foi definido para $F_n < 0,4$, sendo F_n o número de Froude de comprimento. O segundo modelo consiste no Método de Savitsky, concebido para avaliar embarcações que operam em semi-planeio ($0,5 < F_n < 1,0$) e planeio ($F_n > 1,0$). O terceiro modelo (modelo analítico) corresponde ao Método *Slender body*, que consiste em um modelo baseado na teoria potencial de hidrodinâmica para calcular a resistência ao avanço causada pela geração de ondas. Para calcular a componente devido ao

atrito, o modelo disponível no software considera a curva de ITTC (ver Capítulo 2). Com os dados da resistência ao avanço total, foi calculada a potência efetiva (P_E), para diferentes velocidades de operação.

Os resultados para cada caso de estudo (C1-C4) foram comparados para a resistência ao avanço total e potência efetiva, considerando o calado de operação da embarcação (definido como 0,77 m para fins do presente estudo). A comparação dos dados referentes à resistência ao avanço foi feita no software *Microsoft Excel*[®].

Subsequentemente, considerando o mesmo calado de operação, foram simulados e comparados os possíveis trens de ondas gerados pelos quatro casos de estudo de embarcação, considerando a velocidade de 20 nós. Foi utilizado o Método do Corpo Esbelto disponível no software *Maxsurf Resistance*[®]. A análise foi feita seguindo as recomendações de Soares (2023). A Figura 17 mostra os parâmetros que foram considerados como entrada da análise, a qual foi feita com uma precisão de integração de 90001. A análise e a comparação dos dados relacionados com as ondas geradas pela embarcação foram feitas no software *Matlab*[®].

Figura 17. Parâmetros considerados para o cálculo da superfície livre para cada caso de estudo usando o software *Maxsurf Resistance*[®].

Parâmetros de cálculo da superfície livre			
Velocidade	20 kn	Nº de Froude	0,667
Grade na superfície livre			
<input checked="" type="checkbox"/> Mirror	Bombordo	Pontos da grade transversal	
	2		
Popa	5	Nº de comprimentos da embarcação	1
		Proa	200
		Estibordo	2
	Pontos da grade longitudinal	500	
Precisão da integração	90001		
Exagero vertical	1		

Fonte: Adaptado de *Maxsurf Resistance*[®].

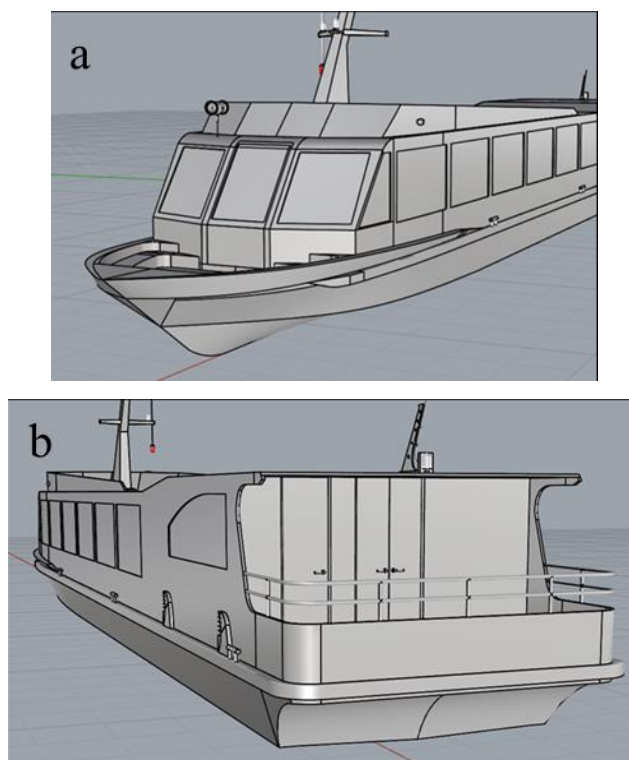
Cabe ressaltar que nas análises de resistência ao avanço e geração de ondas, foi assumido um calado constante, desconsiderando os efeitos de *trim* que podem ser observados em embarcações de semi-planeio.

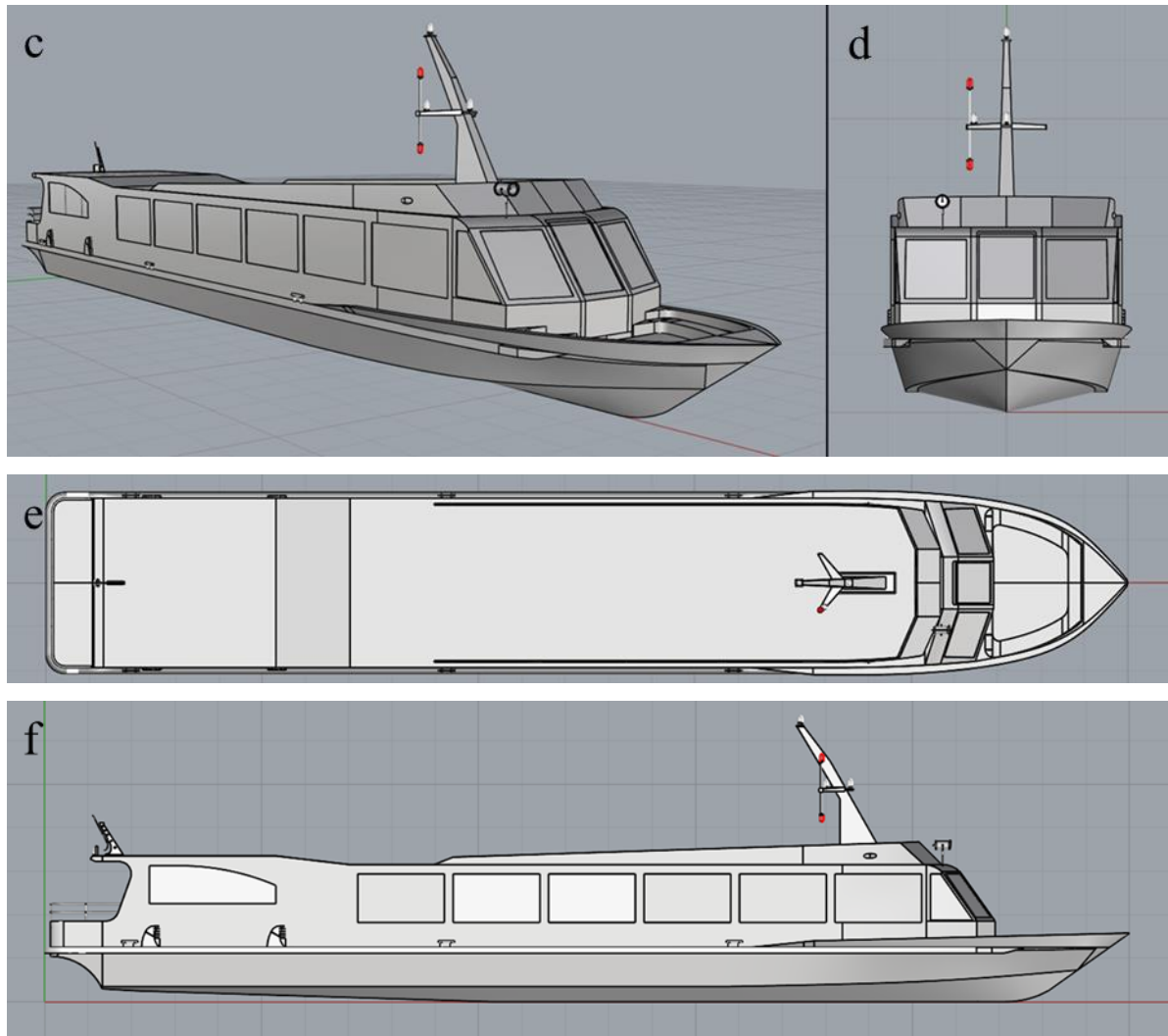
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultado da modelagem tridimensional da embarcação padrão

A presente subseção mostra os principais resultados da modelagem tridimensional que foi feita da embarcação do tipo expresso considerada como motivação do estudo. A embarcação foi modelada no software *Rhinoceros*[®], seguindo as imagens disponíveis no plano de linhas, tendo como resultado a geometria da Figura 17. Cabe mencionar que a modelagem tridimensional foi feita apenas da superfície externa da embarcação. As Figuras 18a e 18b mostram vistas de perspectiva pela proa e popa, respectivamente. A Figura 18c mostra uma perspectiva lateral pelo estibordo e a Figura 18d mostra uma vista transversal pela proa, podendo apreciar a antena e umas luzes de navegação. Finalmente, as Figuras 18e e 18f mostram, respectivamente, as vistas do topo e de perfil da embarcação. Vale a pena ressaltar que esse tipo de modelagem apresentou desafios, já que houve alguns detalhes que não foram totalmente entendíveis pelo software, tendo que se buscar alternativas para a representação tridimensional, subdividindo o arranjo da embarcação em camadas e subcamadas para englobar o máximo de detalhes possíveis.

Figura 18. Resultados da modelagem tridimensional da superfície externa da embarcação considerada como caso de estudo. (a) Perspectiva pela proa e bombordo. (b) Perspectiva pela popa e bombordo. (c) Perspectiva lateral estibordo. (d) Vista transversal pela proa. (e) Vista do topo. (f) Vista de perfil longitudinal.

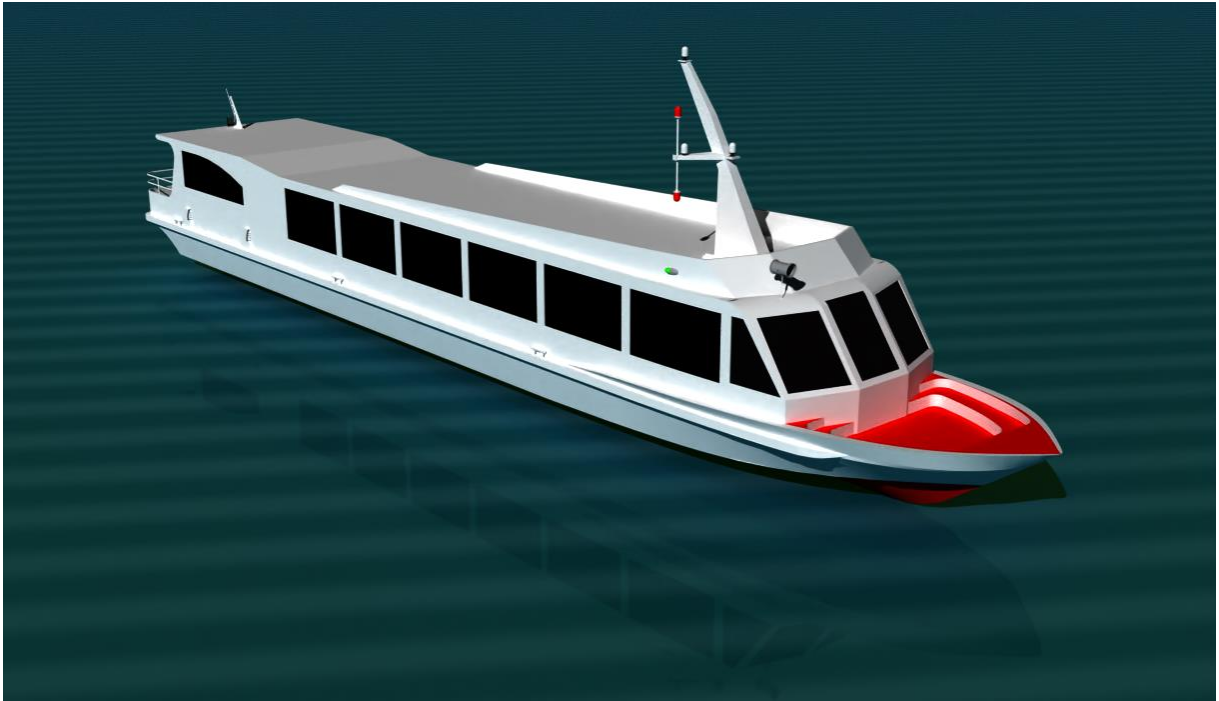




Fonte: Elaboração própria.

A Figura 19 mostra uma representação tridimensional da embarcação, feita com a ferramenta de renderização no software *Rhinceros*[®]. Esse tipo de visualização permite a identificação das características da embarcação, proporcionando um realismo no desenho assistido por computador. No presente estudo, a geração da imagem mostrada demorou vários minutos, utilizando um computador com 16 gigabytes de memória RAM e um processador i7 de 12^a geração.

Figura 19. Representação tridimensional renderizada da embarcação do tipo expresso considerada como caso de estudo.



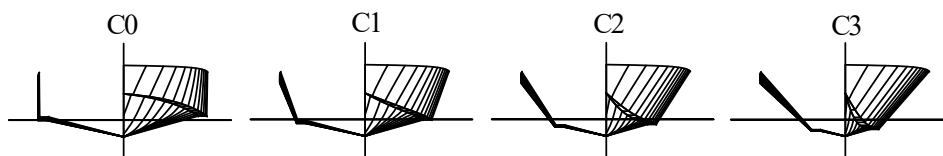
Fonte: Elaboração própria.

4.2 Resultados da modelagem dos cascos modificados

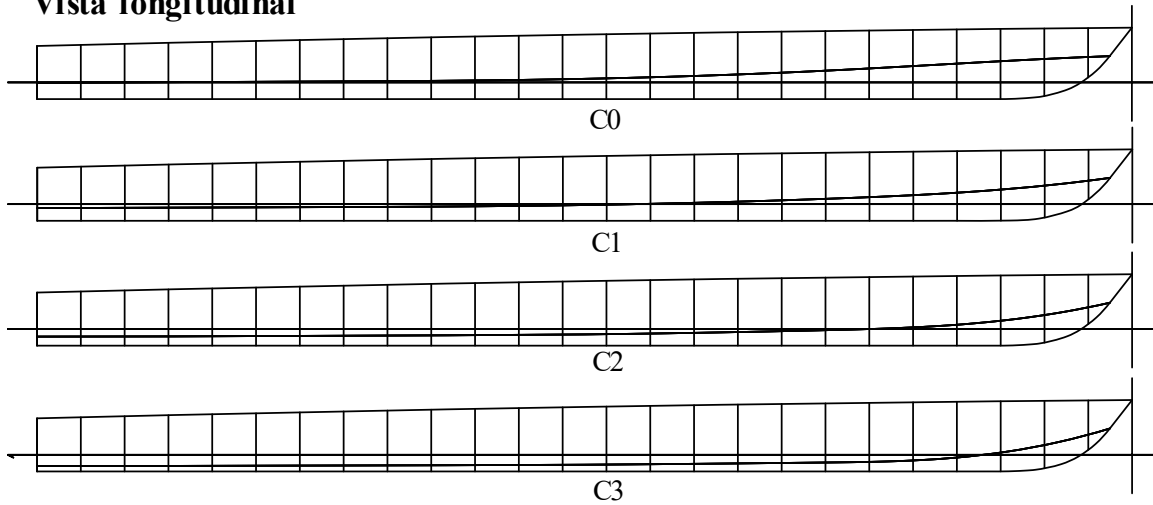
Como descrito na metodologia, a partir do casco padrão (C0), foram obtidas 3 geometrias de casco adicionais, variando a distância da quina principal do casco com relação à linha central, utilizando o assistente de desenho do plug-in *Orca3D*[®]. A Figura 20 mostra os planos de linhas de todos os casos de estudo, C0 – C4, incluindo as vistas transversais, longitudinais e do topo, para 26 balizas (estações) separadas por 1 m de distância. Nota-se que o Caso 0 corresponde à geometria de referência, que é similar à geometria modelada do caso real na subseção anterior.

Figura 20. Planos de linhas dos quatro casos de estudo considerados no presente trabalho.

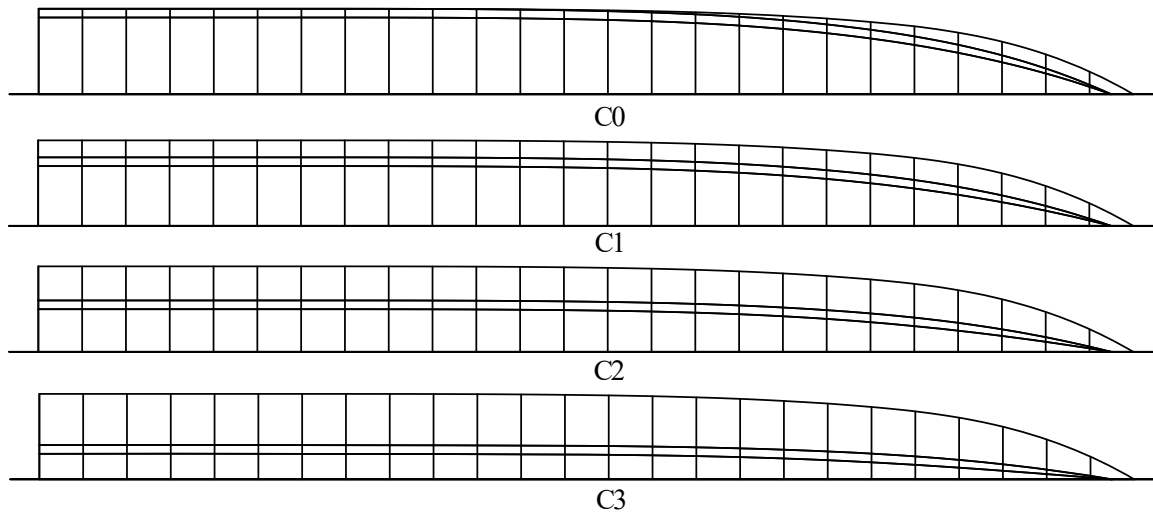
Vista transversal



Vista longitudinal



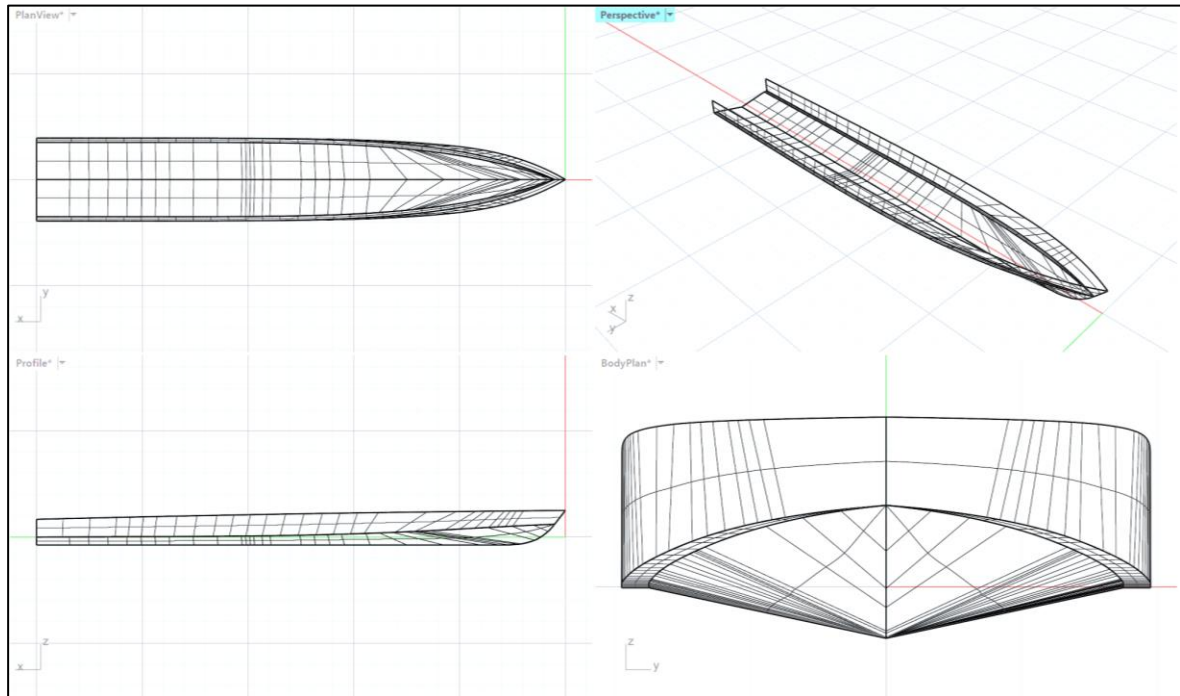
Vista do topo



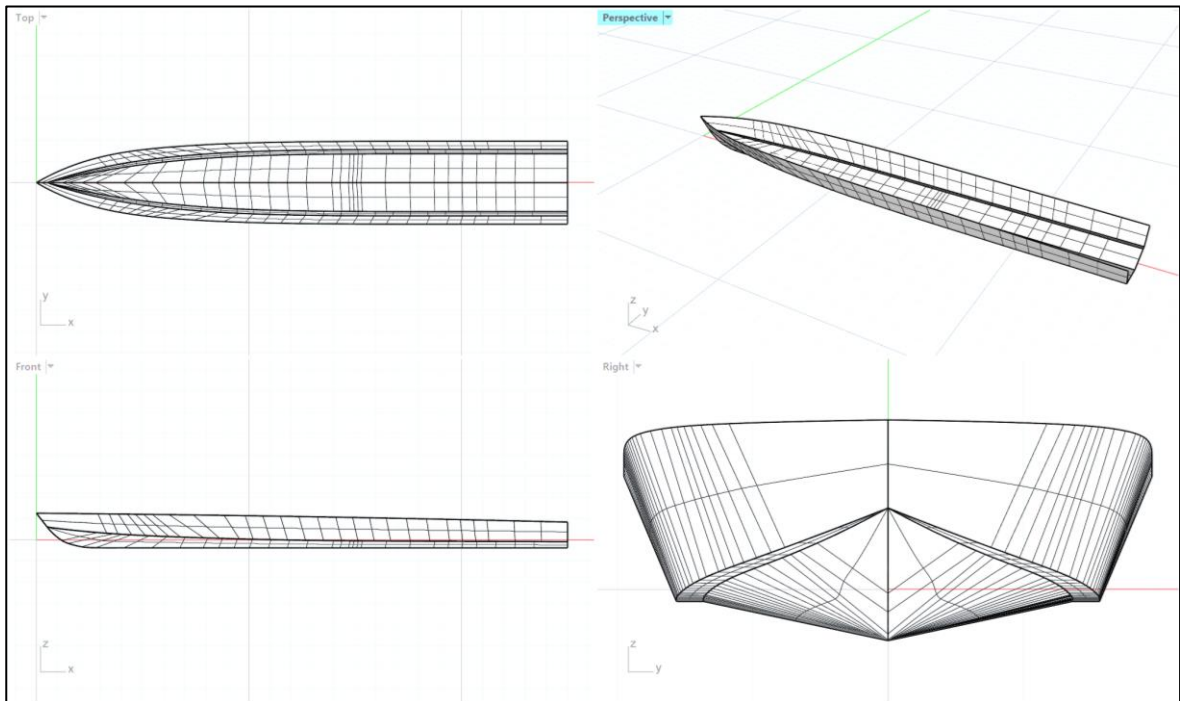
Fonte: Elaboração própria.

De maneira alternativa, as geometrias correspondentes aos casos de estudo C0, C1, C2 e C4 são mostrados nas Figuras 21a, 21b, 21c e 21d, respectivamente. Nas figuras é possível comparar as vistas em perspectiva dos casos de estudo considerados para realizar as análises comparativas. Nota-se que as dimensões principais dos cascos se mantêm, sendo variada a geometria apenas com a mudança da posição da quina principal do casco com relação à quilha. Detalhes da abordagem utilizada no software para realizar a modificação da forma do casco podem ser encontrados no próprio manual do *Orca3D*[®].

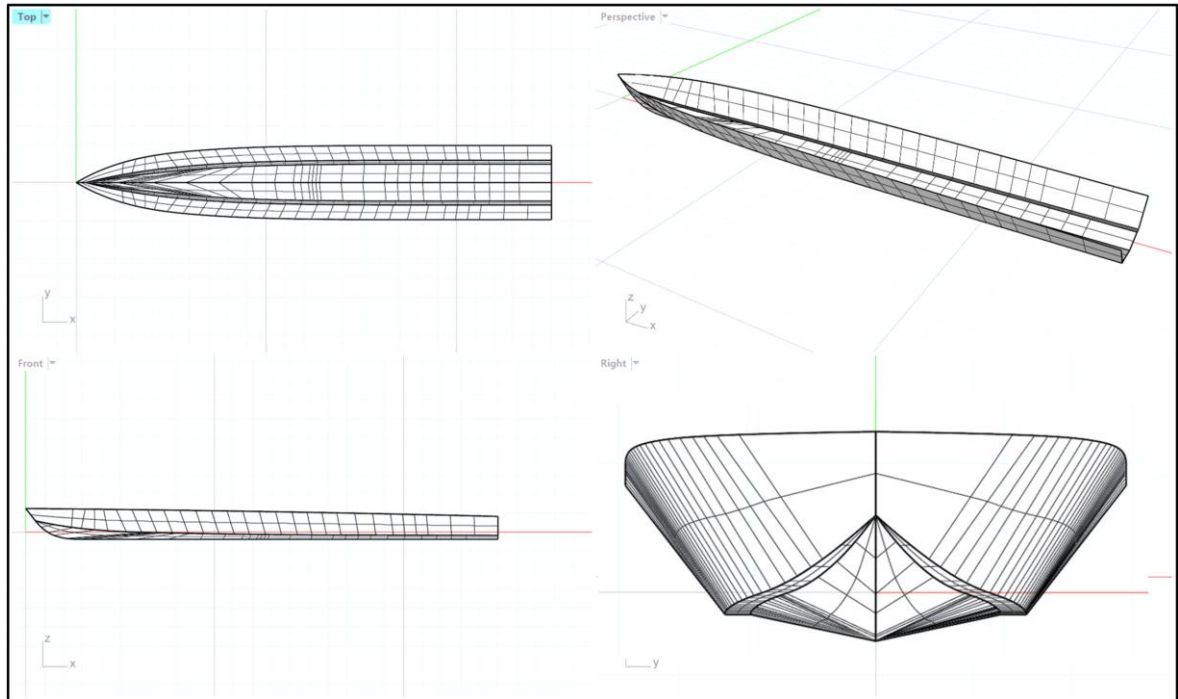
Figura 21. Casos de estudo, obtidos com a variação do parâmetro *Chine beam @Transom*, (posição da quina na popa com relação à linha central; Lq) na opção “Assistente para embarcações de planeio” do *Orca3D*[®]. (a) Casco obtido com o parâmetro Lq igual a 0,95 (C0 – Padrão). (b) Casco obtido com o parâmetro Lq igual a 0,75 (C1). (c) Casco obtido com o parâmetro Lq igual a 0,55 (C2). (d) Casco obtido com o parâmetro Lq igual a 0,35 (C3).



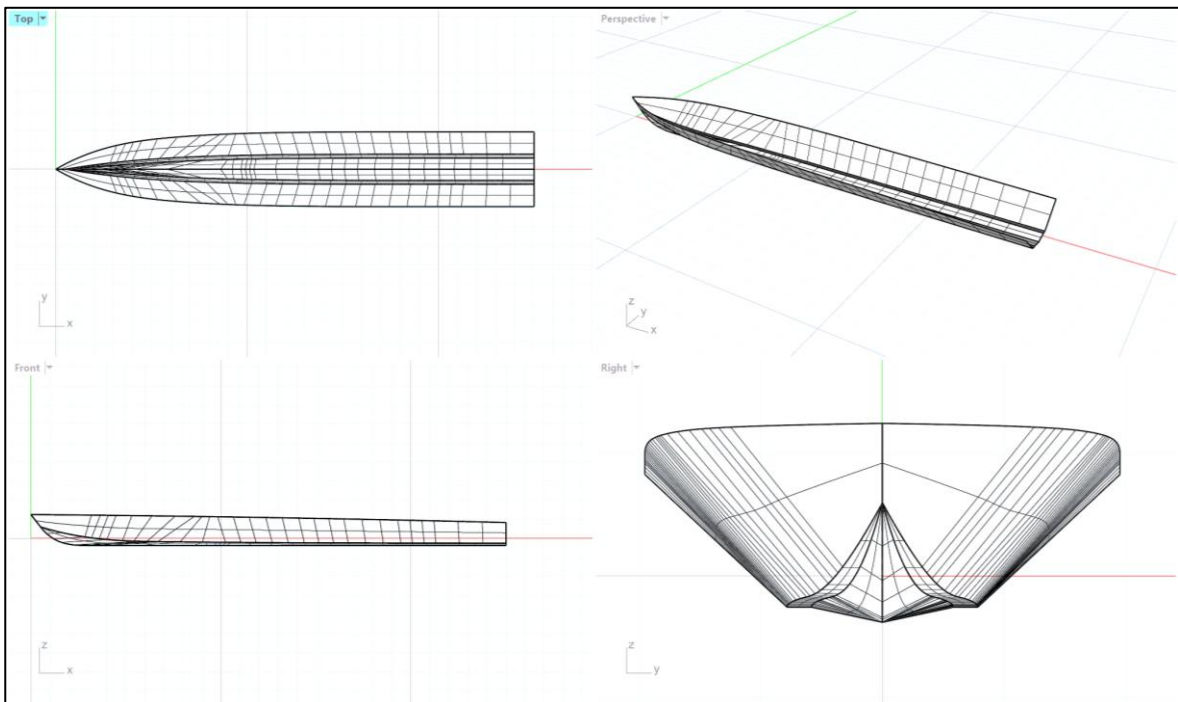
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria com o software *Orca3D*[®].

A partir das imagens anteriores, pode-se verificar que a forma da parte submersa do casco varia com relação ao caso padrão. É evidente que essas mudanças terão efeito nas características hidrostáticas da embarcação. Porém, é importante salientar que o presente estudo visa comparações de aspectos hidrodinâmicos, assumindo o calado de projeto fixo, que foi considerado como 0,77 m, e desprezando os efeitos de um possível ângulo de *trim* pela proa,

característico de embarcações no regime de semi-deslocamento. Assim, o estudo dos efeitos da variação da forma do casco nos parâmetros hidrostáticos está fora do escopo do presente trabalho. No entanto, as Tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10, mostram algumas comparações de parâmetros hidrostáticos relevantes para os quatro casos de estudo, considerando vários calados. Esses dados foram obtidos ao importar as geometrias geradas pelo *Rhinoceros*[®] e definindo os calados no *Maxsurf Modeler*[®], como sugerido por Bechman (2024). Verifica-se nas comparações que o C0 possui o maior deslocamento, mas não necessariamente o mesmo coeficiente prismático (C_p). Também, o caso padrão, mantém maiores valores com relação aos pesos de imersão (TPc). Embora a ordem de grandeza de alguns coeficientes de forma esteja muito próxima do padrão, pequenas mudanças de calado podem superar os valores do C0 para os casos C1 – C3.

Tabela 5. Comparativo entre os deslocamentos dos casos C0 – C3.

Deslocamento [t]				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0	0
0,086	0,6137	0,5821	0,6064	0,5981
0,171	2,451	2,339	2,408	2,492
0,257	5,495	5,266	5,477	5,333
0,342	9,727	9,444	9,457	8,554
0,428	15,2	14,54	13,83	12,1
0,513	21,54	20,02	18,49	15,96
0,599	28,2	25,77	23,41	20,14
0,684	35,04	31,73	28,57	24,64
0,77	42	37,86	33,99	29,46

Fonte. Elaboração própria.

Tabela 6. Comparativo entre os coeficientes prismáticos (C_p) dos casos C0 – C3.

Coefficiente prismáticos (C_p)				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0,01	0
0,086	0,754	0,722	0,745	0,735
0,171	0,742	0,712	0,729	0,7
0,257	0,732	0,704	0,707	0,737
0,342	0,724	0,693	0,728	0,755
0,428	0,714	0,712	0,745	0,763
0,513	0,727	0,73	0,756	0,767
0,599	0,742	0,744	0,763	0,77
0,684	0,754	0,755	0,768	0,771
0,77	0,764	0,763	0,772	0,772

Fonte. Elaboração própria.

Tabela 7. Comparativo entre os coeficientes de bloco (C_b) dos casos C0 – C3.

Coeficiente de bloco (C_b)				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0	0
0,086	0,754	0,359	0,372	0,367
0,171	0,742	0,355	0,365	0,364
0,257	0,732	0,351	0,364	0,464
0,342	0,724	0,357	0,444	0,504
0,428	0,714	0,428	0,491	0,52
0,513	0,727	0,478	0,519	0,526
0,599	0,742	0,514	0,535	0,526
0,684	0,754	0,54	0,545	0,524
0,77	0,764	0,559	0,551	0,52

Fonte. Elaboração própria.

Tabela 8. Comparativo entre os coeficientes de seção mestra (C_m) dos casos C0 – C3.

Coeficiente de seção mestra (C_m)				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0	0
0,086	0,5	0,5	0,5	0,5
0,171	0,5	0,5	0,5	0,521
0,257	0,5	0,5	0,515	0,63
0,342	0,5	0,516	0,61	0,668
0,428	0,52	0,602	0,659	0,682
0,513	0,6	0,655	0,686	0,685
0,599	0,657	0,691	0,701	0,683
0,684	0,7	0,716	0,71	0,679
0,77	0,734	0,733	0,714	0,674

Fonte. Elaboração própria.

Tabela 9. Comparativo entre os coeficientes de área de linha d'água (C_{wp}) dos casos C0 – C3.

Coeficiente de área de linha d'água (C_{wp})				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0	0
0,086	0,754	0,722	0,743	0,73
0,171	0,74	0,711	0,723	0,748
0,257	0,728	0,702	0,739	0,797
0,342	0,717	0,727	0,789	0,798
0,428	0,742	0,783	0,803	0,796
0,513	0,795	0,806	0,806	0,795

0,599	0,819	0,818	0,807	0,793
0,684	0,832	0,824	0,808	0,792
0,77	0,842	0,827	0,808	0,791

Fonte. Elaboração própria, 2024.

Tabela 10. Comparativo entre os pesos de imersão (TPc) dos casos C0 – C3.

TPc [t/cm]				
Calado	C0	C1	C2	C3
0	0	0	0	0
0,086	0,144	0,137	0,141	0,139
0,171	0,286	0,274	0,279	0,299
0,257	0,426	0,41	0,433	0,357
0,342	0,563	0,562	0,491	0,396
0,428	0,71	0,622	0,529	0,433
0,513	0,764	0,658	0,56	0,47
0,599	0,791	0,685	0,59	0,507
0,684	0,807	0,707	0,619	0,544
0,77	0,819	0,727	0,647	0,581

Fonte. Elaboração própria.

4.3 Resultados de resistência ao avanço e potência efetiva dos casos de estudo

Nesta seção são apresentados os resultados das avaliações de resistência ao avanço e potência efetiva, obtidos pelos métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body*. As comparações em todos os casos foram feitas considerando um calado de operação constante de 0,77 m.

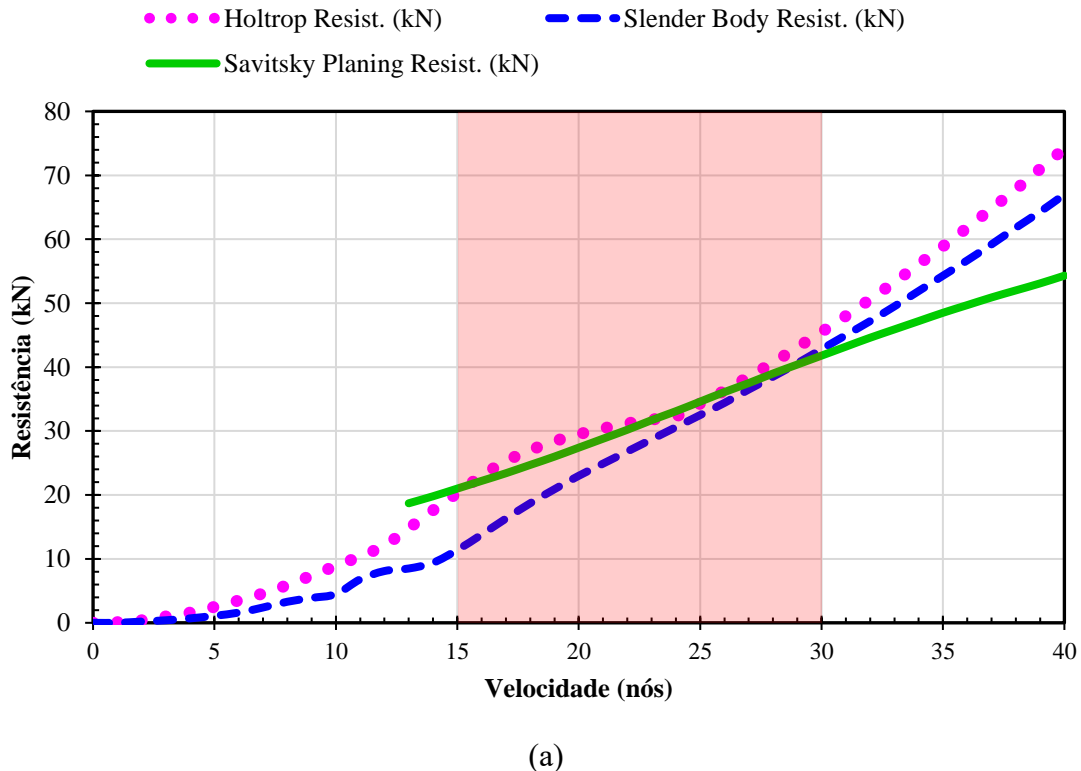
A primeira análise, cujos resultados são apresentados nas Figuras 22, 23, 24 e 25, mostram as comparações dos três métodos para os casos C0, C1, C2 e C3, respectivamente. Cada figura contém dois gráficos, mostrando a resistência ao avanço em kN (Figura a) bem como a potência efetiva em hp (Figura b). Em cada um dos gráficos das Figuras 22 – 25, é mostrada uma região que denota a faixa de velocidades de operação possível dessa embarcação, assumida neste trabalho como 15 – 30 nós, segundo informações dos operários de embarcações tipo expresso. Lembrando que, por meio de medições feitas durante um percurso na embarcação de estudo, Cursino (2024) mediu uma velocidade média de operação de 24 nós aproximadamente.

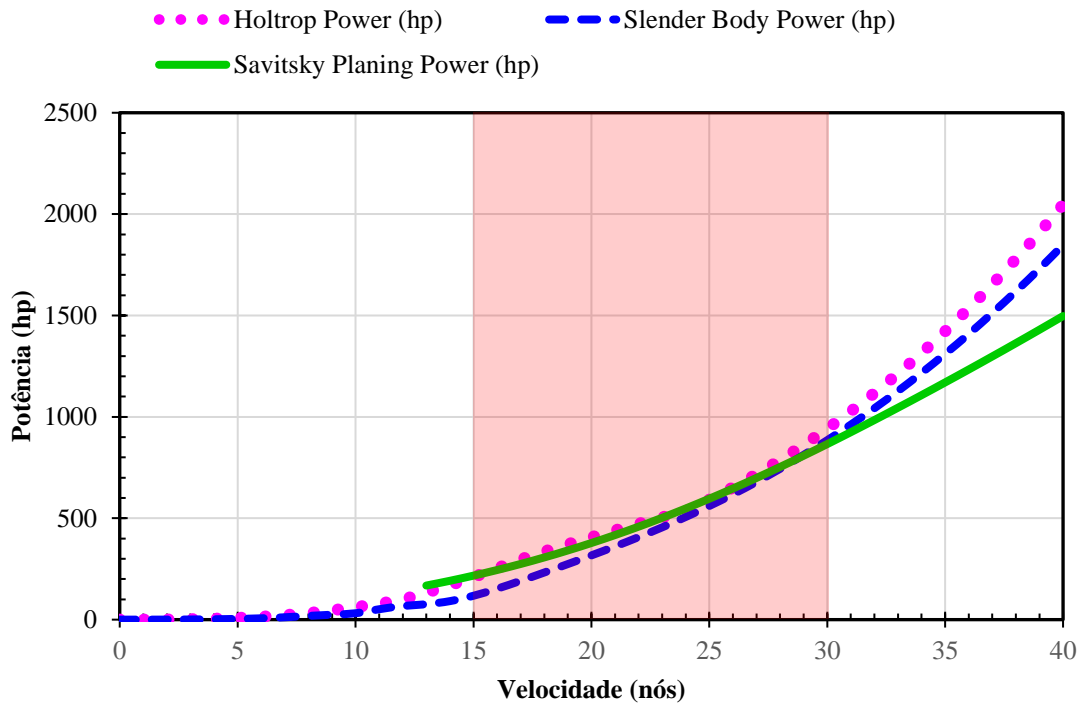
Nas comparações feitas, temos que considerar que cada um dos métodos abordados possui condições de aplicabilidade diferentes. O método de Holtrop, por exemplo, é recomendado para velocidades nas quais o regime de operação da embarcação corresponde ao deslocamento, pois ele foi desenvolvido considerando experimentos de embarcações nesse

regime de operação. Com relação ao método *Slender body*, ele é um método analítico, pelo que pode ser aplicado em diversas faixas de operação, sendo necessária sua comparação com outros métodos, pois não possui uma base completamente experimental. Já o método de Savitsky é aplicável para modos de operação fora da faixa de deslocamento, como semi-planeio e planeio, pois ele foi baseado em resultados experimentais nesses regimes operacionais.

Em todos os casos, os métodos de Savitsky e *Slender body* foram os que proporcionaram os valores mais próximos perto da faixa de operação definida. Essa proximidade foi ainda maior para os dados de potência efetiva nos casos C3 e C4. Considerando o método de Savitsky como referência, pode-se verificar que houve uma redução na resistência ao avanço dos casos C1, C2 e C3 com relação ao caso padrão C0. Por exemplo, considerando a velocidade de 20 nós, houve uma redução da resistência ao avanço de aproximadamente 40% do C4 com relação ao C0, tendo influência na redução da potência efetiva.

Figura 22. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body* para diferentes velocidades da embarcação do caso C0. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.

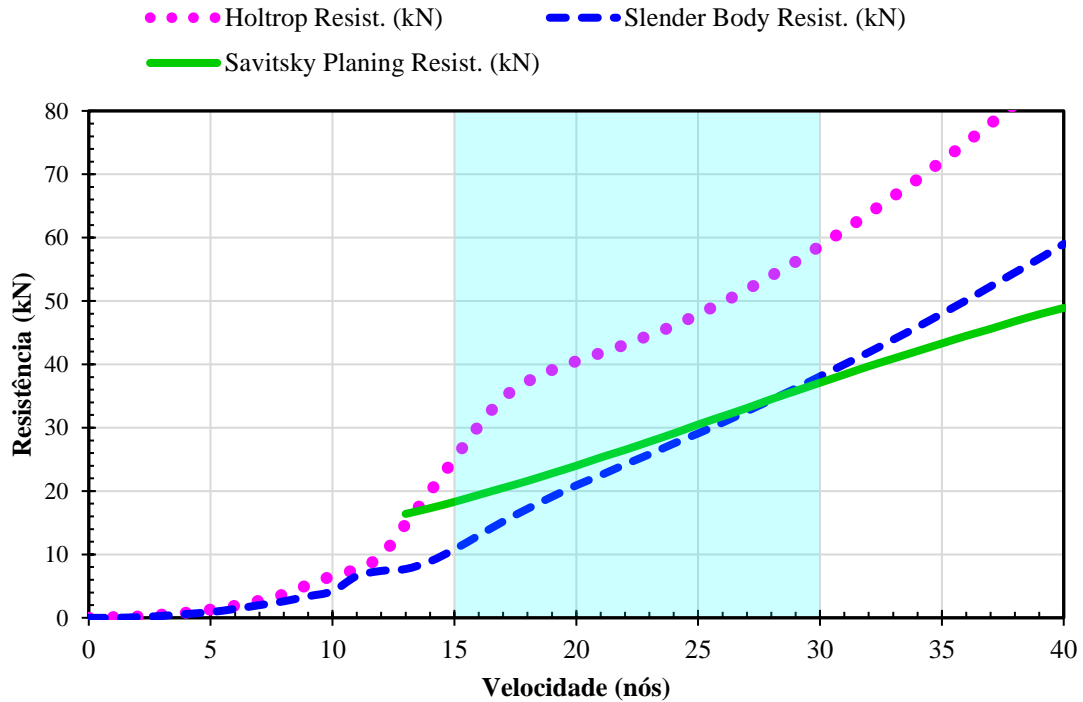




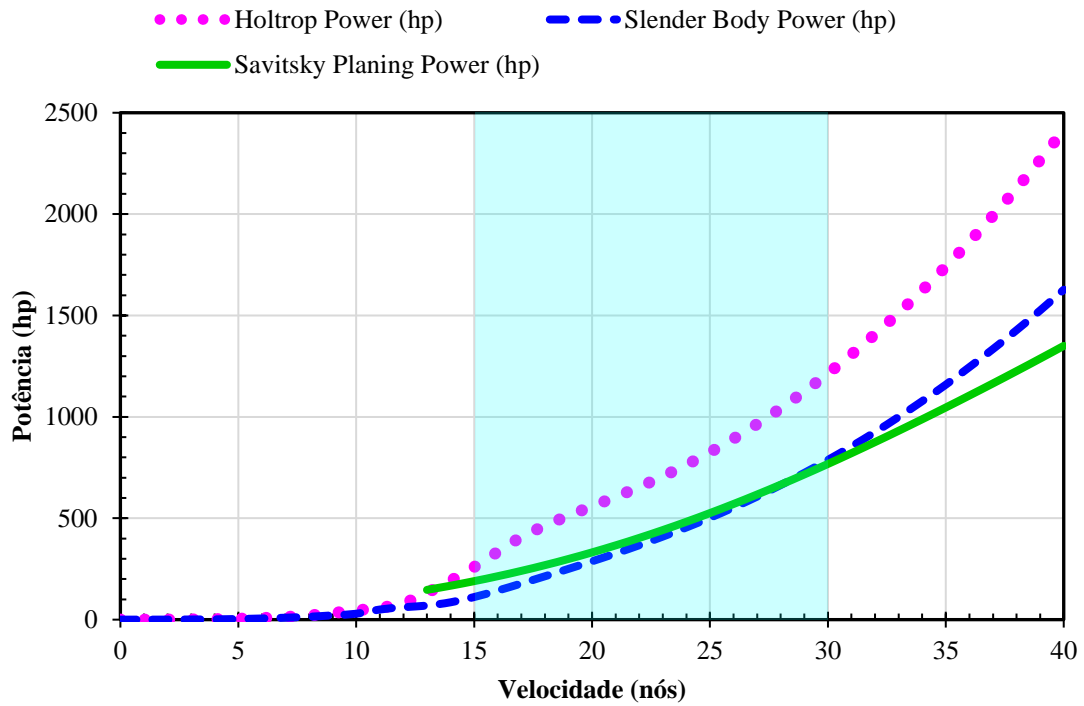
(b)

Fonte. Elaboração própria.

Figura 23. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body* para diferentes velocidades da embarcação do caso C1. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



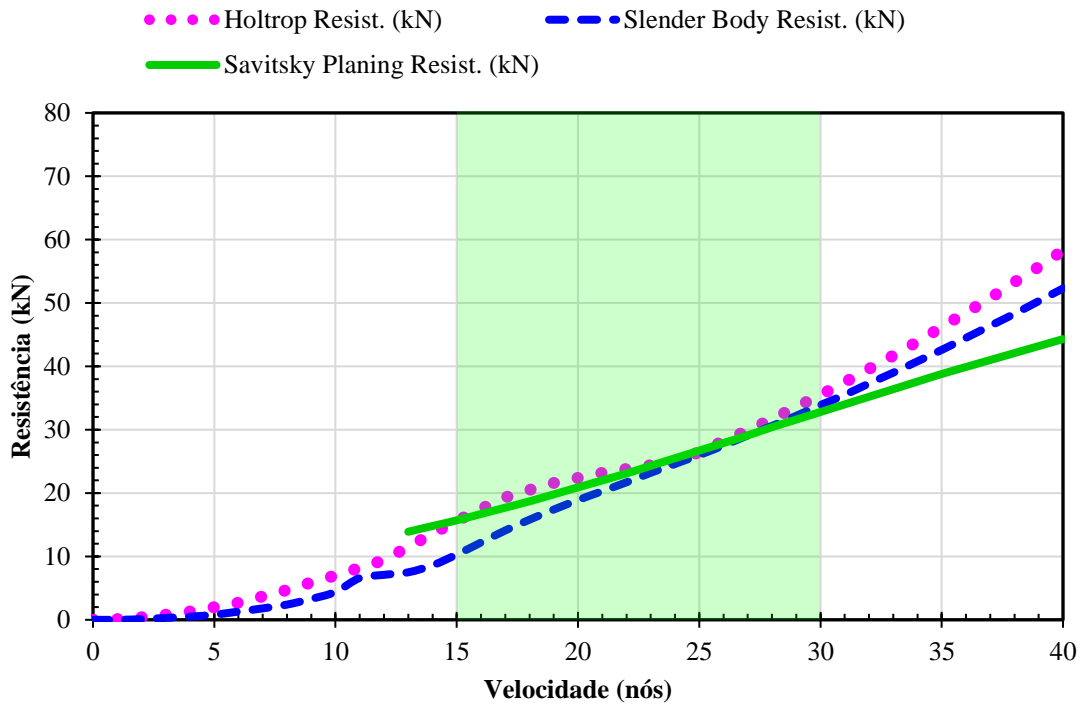
(a)



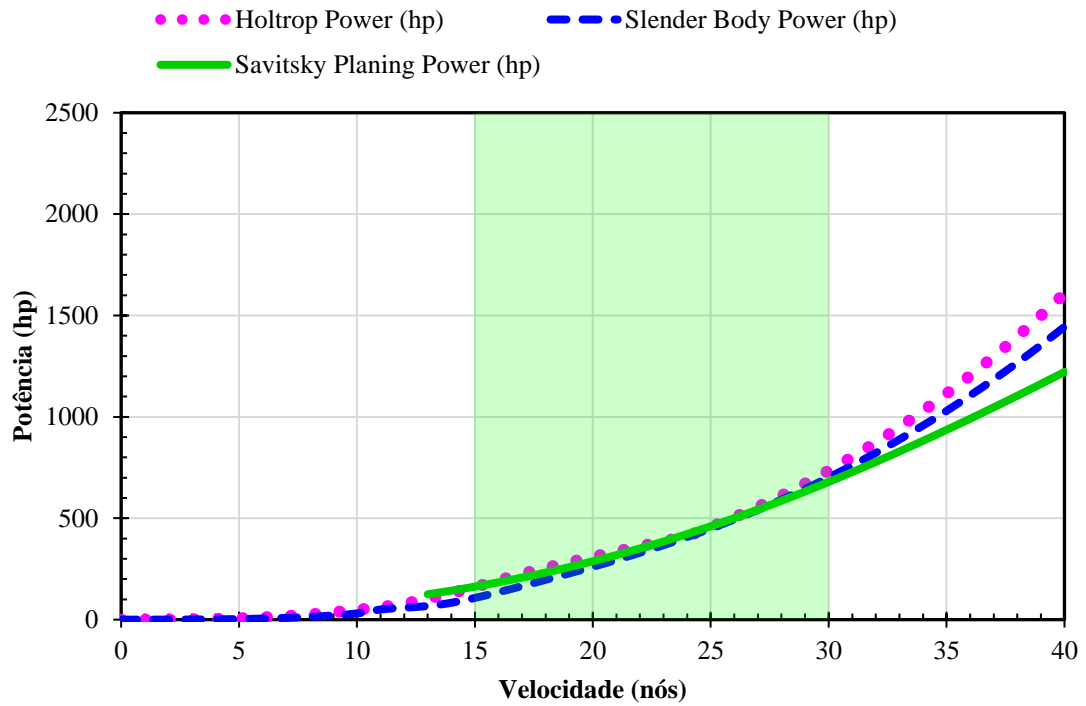
(b)

Fonte. Elaboração própria.

Figura 24. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body* para diferentes velocidades da embarcação do caso C2. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



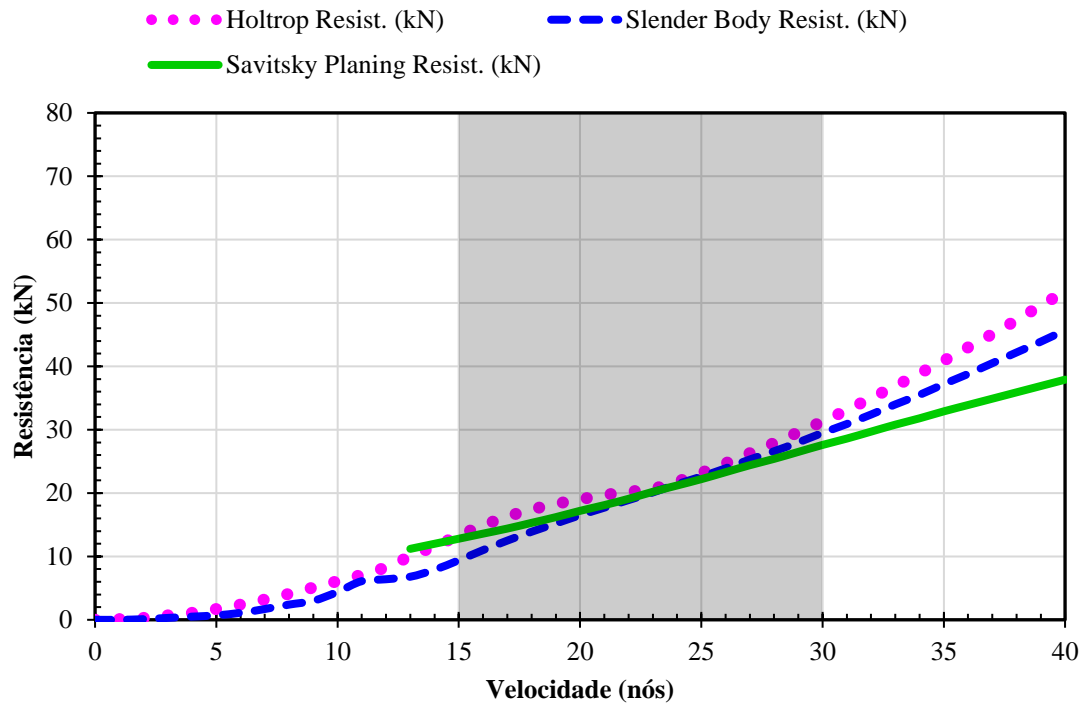
(a)



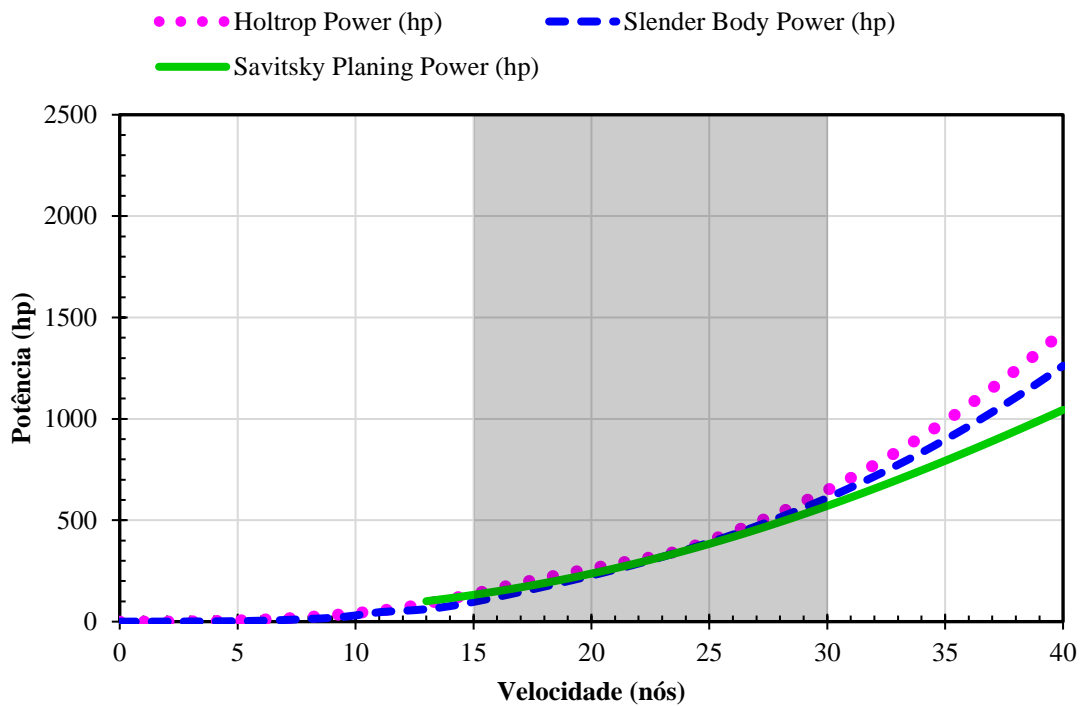
(b)

Fonte. Elaboração própria.

Figura 25. Comparação dos resultados dos métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body* para diferentes velocidades da embarcação do caso C3. (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



(a)



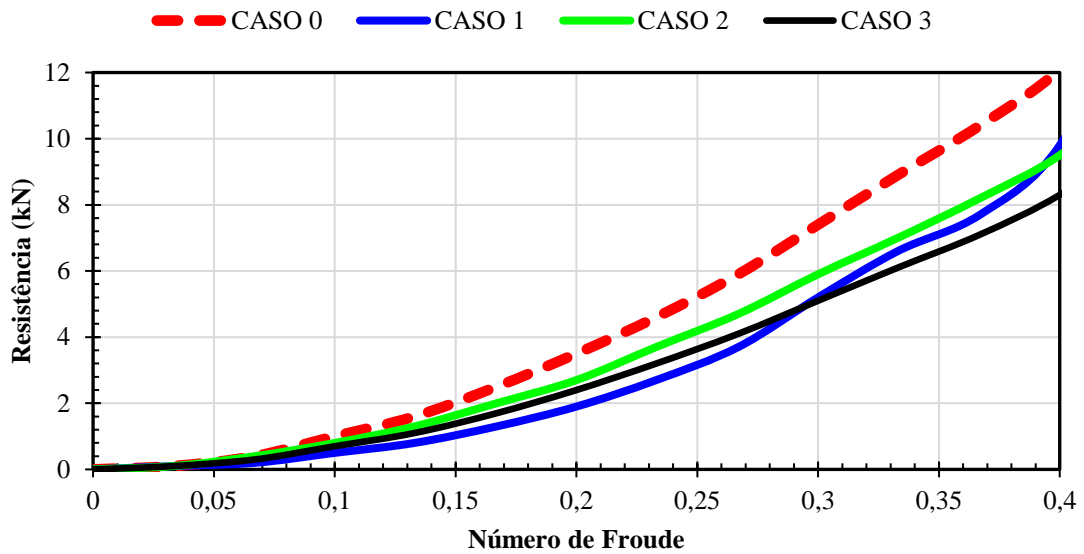
(b)

Fonte. Elaboração própria.

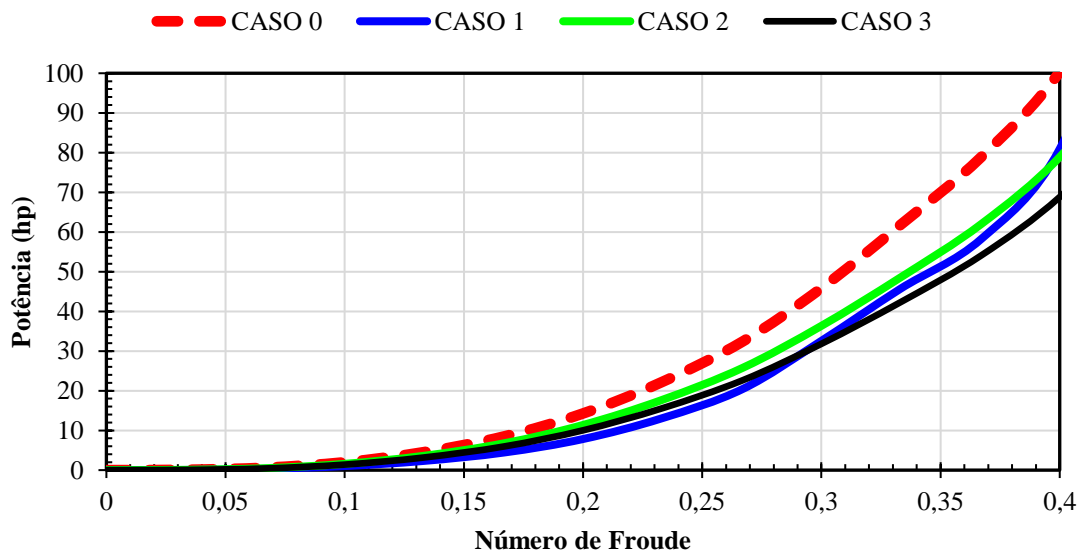
A segunda análise de resistência ao avanço consistiu em comparar os resultados de cada um os três métodos para todos os casos de estudo. As Figuras 26, 27, e 28, mostram as comparações de resistência ao avanço (Figura a) e potência efetiva (Figura b) para os métodos de Holtrop, Savitsky e *Slender body*, respectivamente.

Na Figura 26, os gráficos comparativos da resistência ao avanço e potência obtidos com o método de Holtrop são mostrados para o regime de deslocamento da embarcação, definido neste estudo para embarcações que navegam na faixa entre 0 e 0,4. Embora seja um método baseado em regressão, a sua aplicabilidade está restrita a esse modo de operação. Nas comparações, pode-se observar que os Casos 0 e 2 superestimam os valores de resistência ao avanço e potência efetiva dos demais casos, no regime de operação de deslocamento para a maioria dos números de Froude. Um comportamento interessante acontece para o Caso 3, que apresenta os menores valores entre $0,3 < Fn < 0,4$.

Figura 26. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de Holtrop para os quatro casos de estudo (C0 – C4). (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



(a)



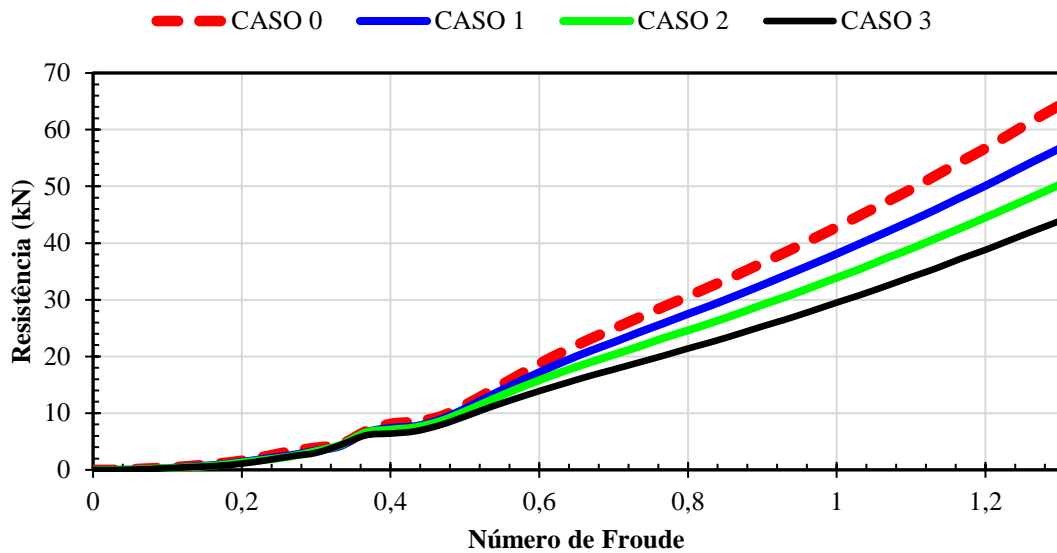
(b)

Fonte. Elaboração própria.

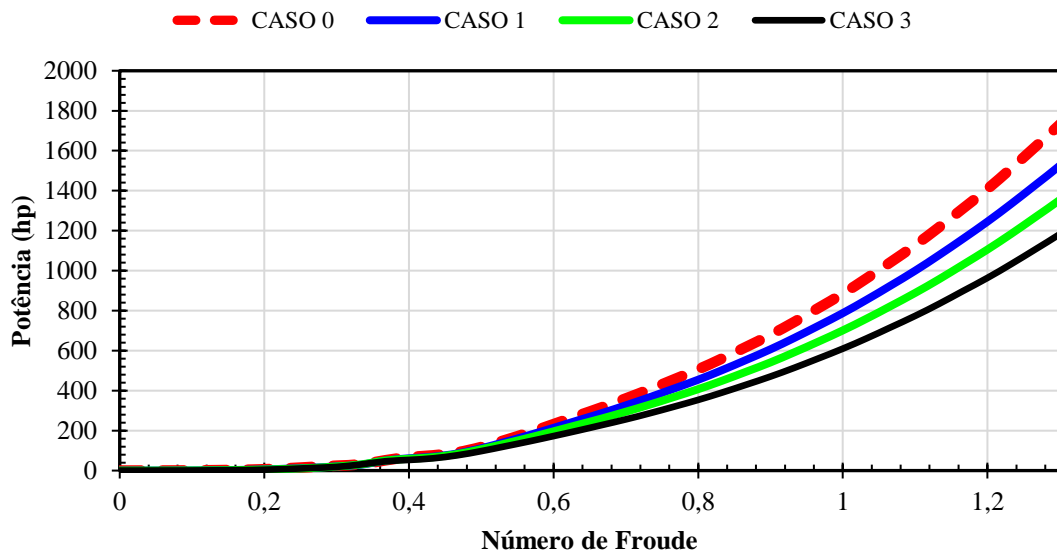
Com relação aos resultados do método *Slender body*, mostrados na Figura 27, estes são comparados para os quatro casos de estudo, para diferentes regimes de operação: deslocamento, semi-deslocamento e planeio ($0 < Fn < 1,3$). É perceptível a variação de resistência ao avanço gradual entre os casos, sendo maior para o Caso 0 e menor para o Caso 3, o que se dá por conta da redução da seção transversal gradativa de C0 a C3. Pode-se apontar após essa análise que o Caso 3 apresenta um melhor desempenho hidrodinâmico; porém, são necessárias mais análises

para verificar o impacto da variação da forma do casco em outros aspectos de desenho da embarcação, como a estabilidade.

Figura 27. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de *Slender body* para os quatro casos de estudo (C0 – C4). (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



(a)



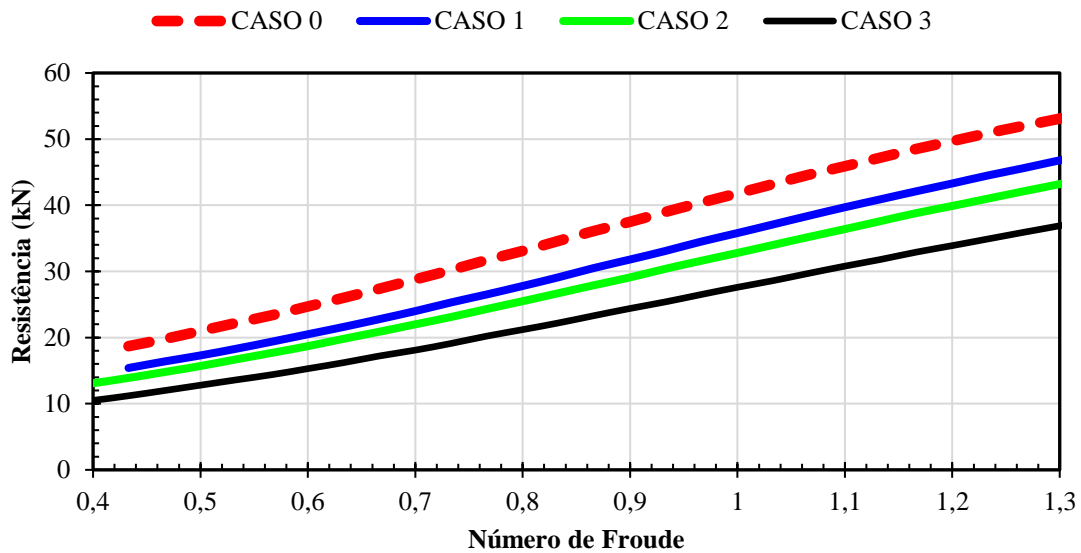
(b)

Fonte. Elaboração própria.

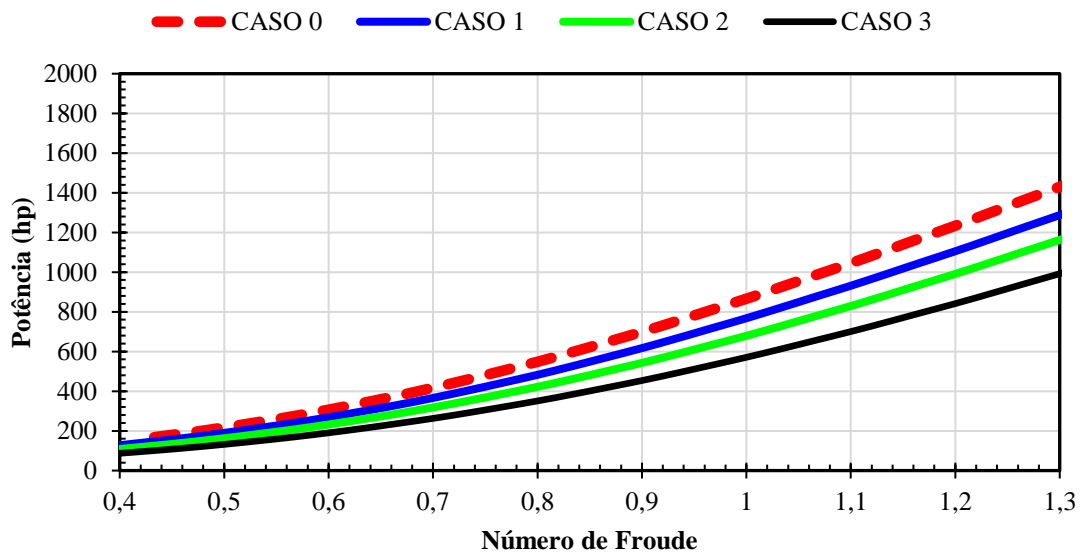
A Figura 28 mostra os gráficos comparativos de resistência ao avanço dados pelo método de Savitsky. As comparações são feitas apenas para os regimes de operação de semi-deslocamento, semi-planeio e planeio ($0,4 < Fn < 1,3$), pois o método não foi proposto para o regime de deslocamento. De maneira similar ao método do corpo esbelto, os resultados seguem

uma diminuição na resistência ao avanço e potência de forma gradual, do Caso 0 ao Caso 3, tanto para a resistência total quanto de potência efetiva.

Figura 28. Comparações de resistência ao avanço e potência efetiva para diferentes velocidades de avanço, considerando o método de Savitsky para os quatro casos de estudo (C0 – C4). (a) Gráfico comparativo de resistência ao avanço. (b) Gráfico comparativo de potência efetiva.



(a)



(b)

Fonte. Elaboração própria.

A partir dos dados dos gráficos comparativos de cada método é possível avaliar algumas diferenças de forma percentual, por meio da Equação 45. Para isto, foram considerados os valores tanto de resistência quanto de potência levando em consideração a velocidade média de 25 nós, que é próxima à velocidade de operação medida por Cursino (2024). As Tabelas 11 e

12 mostram as diferenças percentuais entre os três métodos de resistência ao avanço estudados, para os Casos 1, 2 e 3, levando em consideração o Caso 0 como referência. Cabe mencionar que embora tenha sido calculado nas tabelas, o método de Holtrop não aplica no modo de operação da embarcação nessa velocidade, por se tratar do regime de semi-planeio.

$$DP(\text{em } \%) = 100 \left| \frac{VR - VC}{VR} \right| \quad (45)$$

sendo DP a diferença percentual (em %), e VR e VC o valor de referência e o valor calculado na velocidade selecionada, respectivamente.

Interpretando os dados apresentados nas Tabelas 11 e 12, pode se verificar que o Caso 3 é o que apresenta os maiores percentuais de diferença em resistência ao avanço e potência com relação ao caso de referência (Caso 0), sugerindo, de maneira geral, um casco com menor resistência ao avanço na velocidade de operação avaliada. É

Tabela 11. Diferença percentual de resistência ao avanço em relação aos métodos abordados.

Resistência ao avanço [kN]			
	Holtrop*	Savitsky	<i>Slender body</i>
Caso 1	40%	12%	10%
Caso 2	23%	23%	20%
Caso 3	32%	36%	30%
*O método de Holtrop não é aplicável na velocidade de operação considerada.			

Fonte. Elaboração própria.

Tabela 12. Diferença percentual de potência em relação aos métodos abordados.

Potência [hp]			
	Holtrop	Savitsky	<i>Slender body</i>
Caso 1	40%	12%	10%
Caso 2	23%	23%	20%
Caso 3	32%	36%	30%
*O método de Holtrop não é aplicável na velocidade de operação considerada.			

Fonte. Elaboração própria.

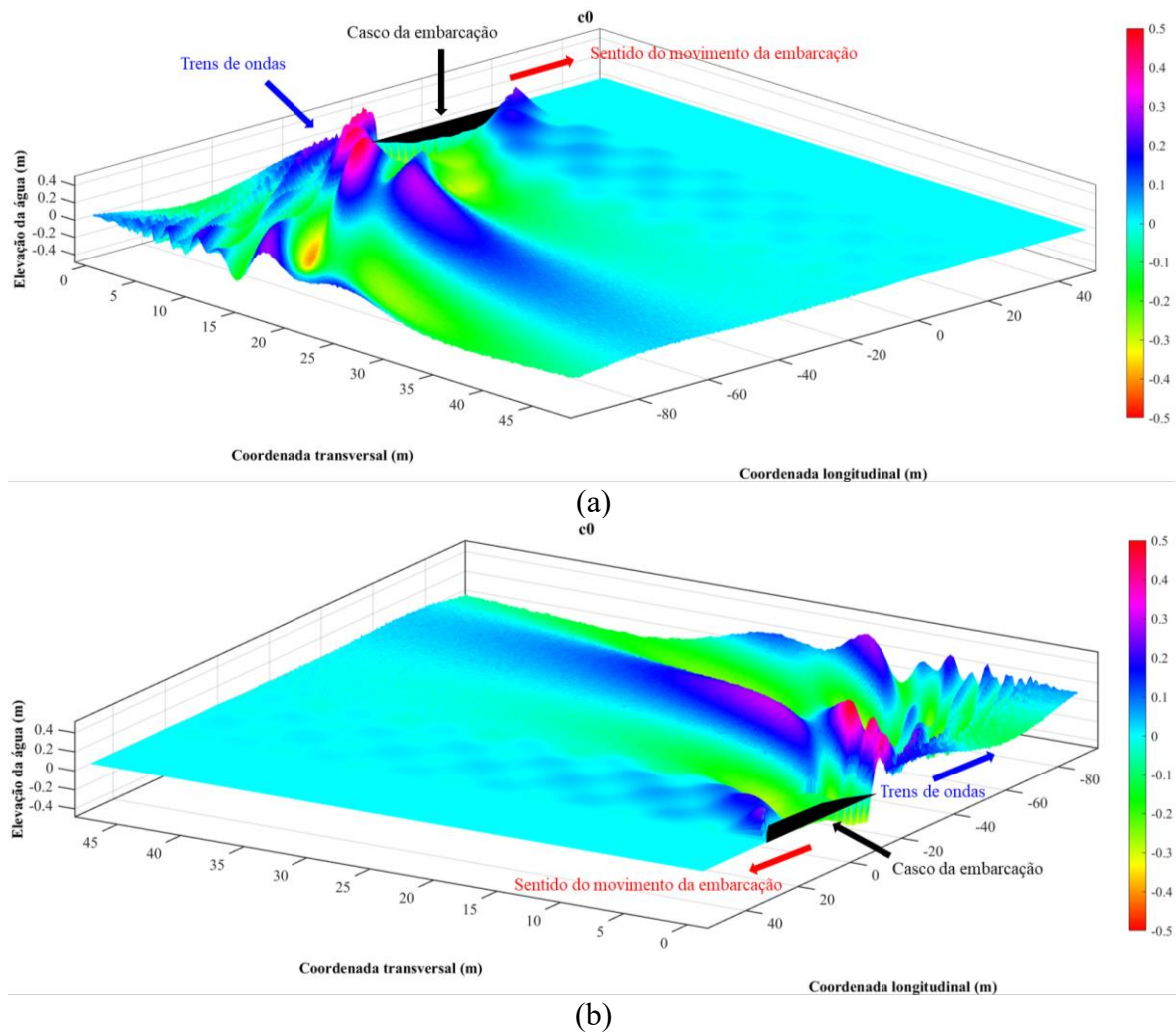
4.4 Resultados da geração de ondas dos casos de estudo

A seguir, são apresentados os resultados do método *Slender body* para representar as elevações da superfície da água de cada um dos casos de estudo. Os resultados apresentados foram obtidos com um calado de 0,77 m e uma velocidade de avanço de 20 nós. A evolução das ondas mostradas foi restrita a 100 m devido às limitações da versão acadêmica do software durante a exportação dos dados para pós-processamento em outro software. Nos dados mostrados nesta seção, a origem na coordenada longitudinal corresponde ao ponto de referência definido na

embarcação. A origem na coordenada de elevação de água (coordenada vertical) define a posição do calado da embarcação.

A Figura 29 mostra vistas tridimensionais das ondas geradas pela embarcação do Caso 0. A Figura 29a mostra uma vista pela popa, com uma escala de -5 m até 5 m, para visualizar a deformação da superfície livre da água devido ao movimento da embarcação. De maneira complementar, a Figura 29b mostra a evolução dos trens de ondas a partir da proa.

Figura 29. Representação tridimensional da evolução da superfície livre da água para o caso C0. (a) Vista pela popa. (b) Vista pela proa. A escala da direita está dada em metros.

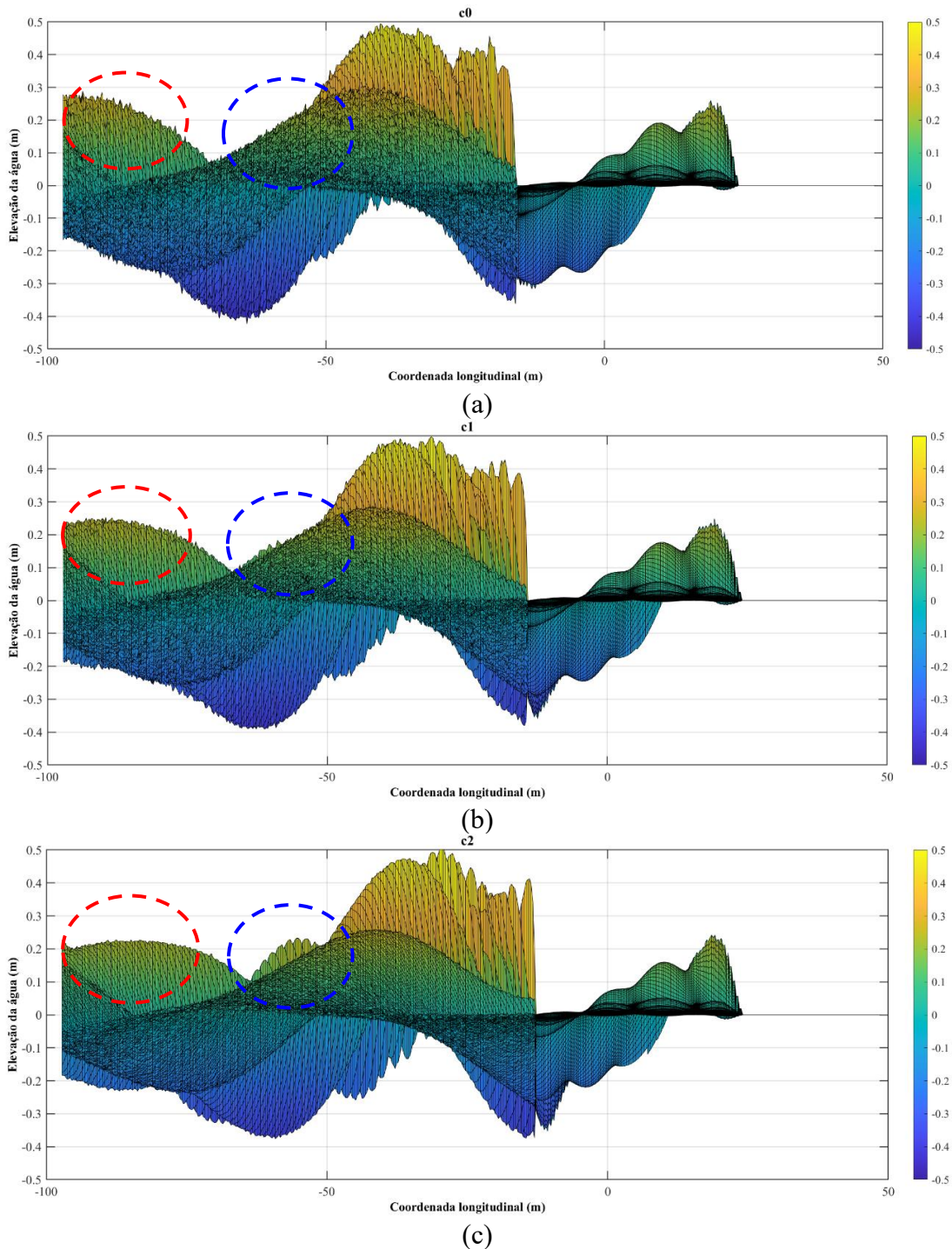


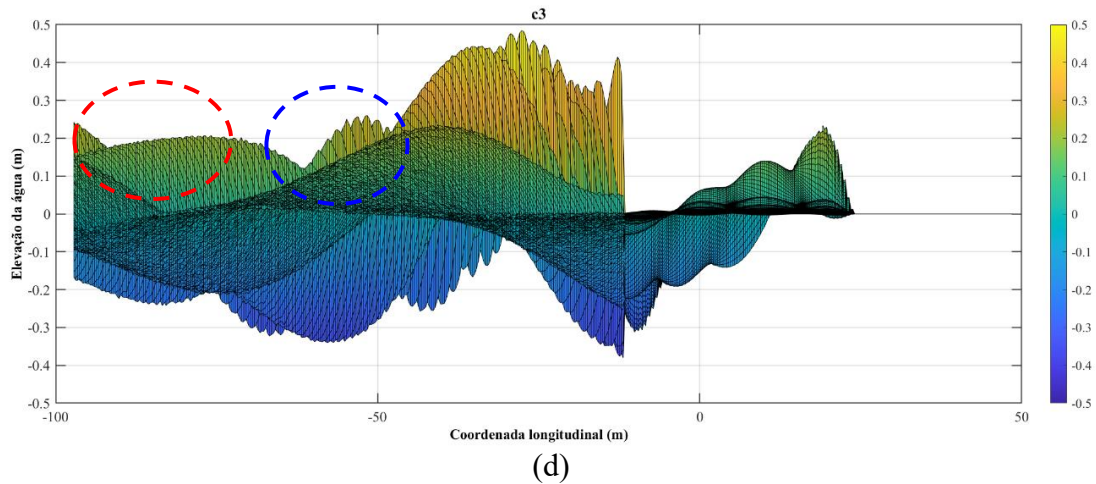
Fonte: Elaboração própria.

Os resultados tridimensionais da figura anterior são interessantes para ter uma visão geral da evolução do escoamento. No entanto, para compreender melhor a evolução da superfície livre gerada, as Figuras 30a, 30b, 30c e 30d mostram os resultados ao longo da coordenada longitudinal para os casos C0, C1, C2 e C3, respectivamente. Qualitativamente, pode-se verificar que existem poucas variações da superfície livre dos casos C1 – C3 com

relação ao C0, considerando as máximas elevações encontradas, que alcançam quase 0,5 m a partir da linha de calado da embarcação. No entanto, podem ser verificadas variações mais significantes em relação às cavas das ondas geradas com relação ao caso C0. Os círculos na cor azul mostram que, do C0 até o C3, tende a aparecer uma crista logo depois das primeiras ondas formadas. No entanto, a elevação definida nos círculos na cor vermelha tende a reduzir.

Figura 30. Evolução da elevação da superfície livre da água ao longo da coordenada longitudinal. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3. A escala da direita está dada em metros.

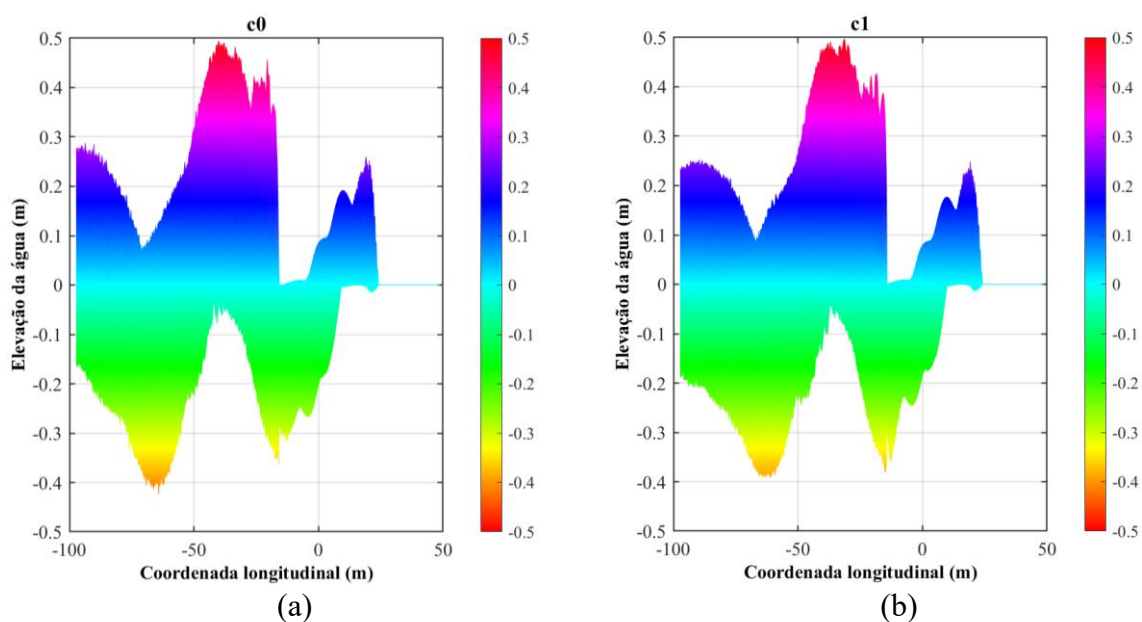


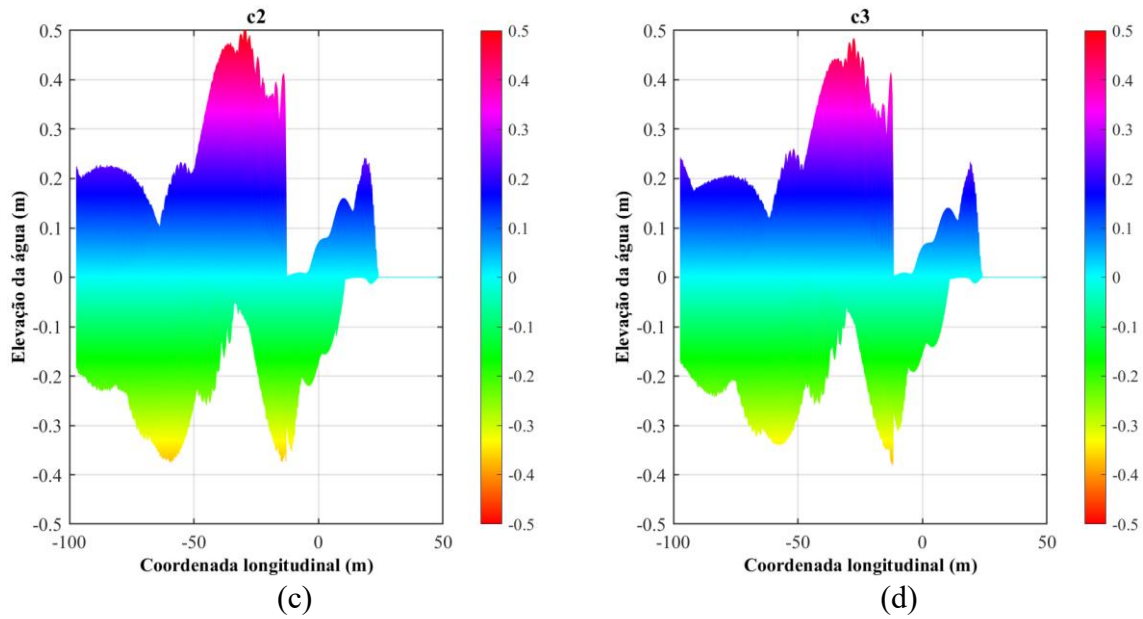


Fonte: Elaboração própria.

De maneira complementar à visualização da figura anterior, que mostra uma vista geral da elevação da superfície da água ao longo da coordenada longitudinal, a Figura 31 mostra os valores absolutos das elevações de onda geradas ao longo dela, incluindo uma escala de cores diferente. As Figuras 31a, 31b, 31c e 31d mostram os resultados para os casos C0, C1, C2 e C3, respectivamente. Este tipo de informação permite identificar as mudanças que tiveram as ondas geradas em cada caso de estudo considerando elevações absolutas. Verifica-se que no C3, teve-se uma redução da segunda crista da onda de proa (~ 10 m), com relação ao C0. Também, houve mudanças significantes nas cavas formadas (~ -20 , -60 m). Nos casos C2 e C3 apareceu uma segunda crista em ~ -55 m. Por outro lado, em todos os casos, a máxima elevação da água observada foi próxima de 0,5 m.

Figura 31. Visualização bidimensional dos valores absolutos de elevação da superfície da água ao longo da coordenada longitudinal. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.

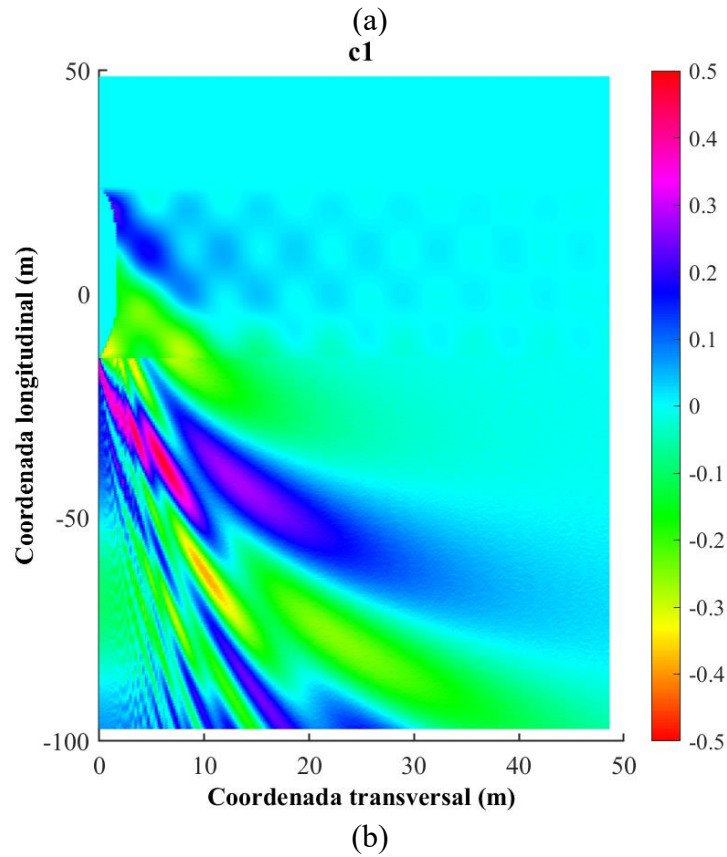
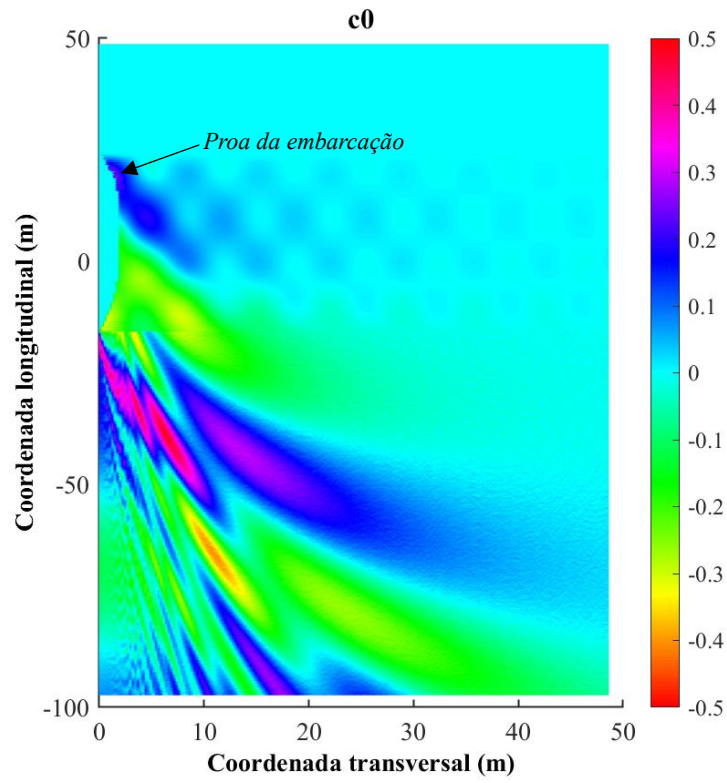


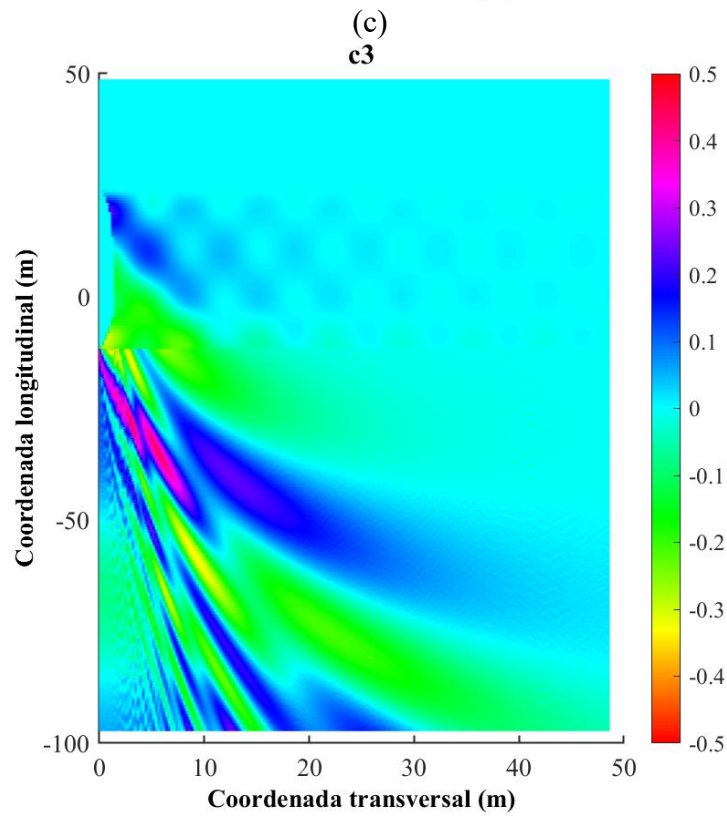
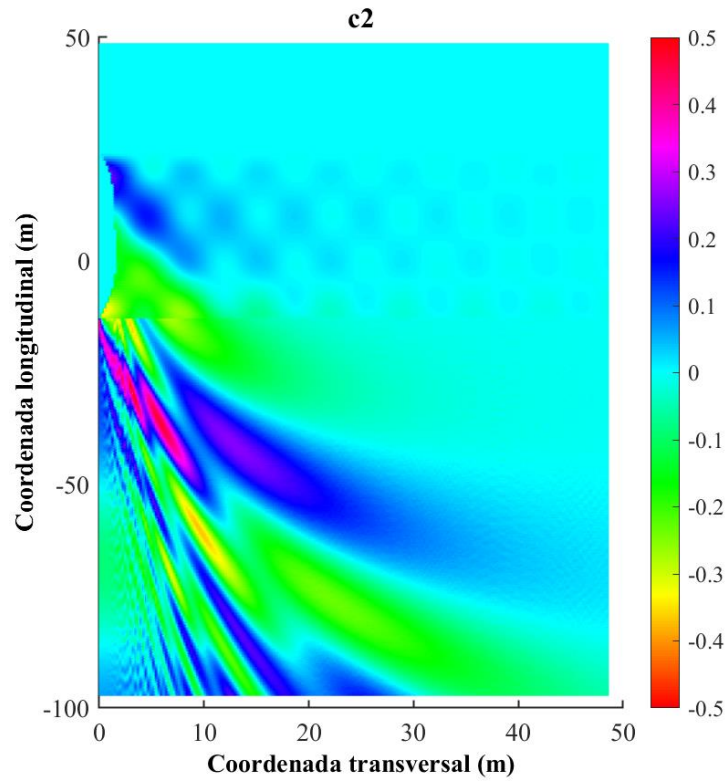


Fonte: Elaboração própria.

Outra forma de visualizar a evolução das ondas geradas é por meio de uma vista de topo, considerando as coordenadas transversal e longitudinal, como mostrado nas Figuras 32a, 32b, 32c e 32d para os casos C0, C1, C2 e C3, respectivamente. Nos gráficos apresentados, apenas são mostrados os resultados do estibordo, nos quais a embarcação se encontra na coordenada longitudinal (origem em 0 m). A escala mostrada permite identificar facilmente as regiões nas quais acontecem as cristas (cores rosa e vermelho) e as cavas (cores amarelo e laranja) das ondas. Percebe-se, de maneira qualitativa que houve diminuição da elevação de algumas cavas e cristas nos casos C2 e C3 com relação aos casos C0 e C1, o que sugere a propagação de ondas com menos energia.

Figura 32. Vista de todo da evolução da superfície livre da água. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.



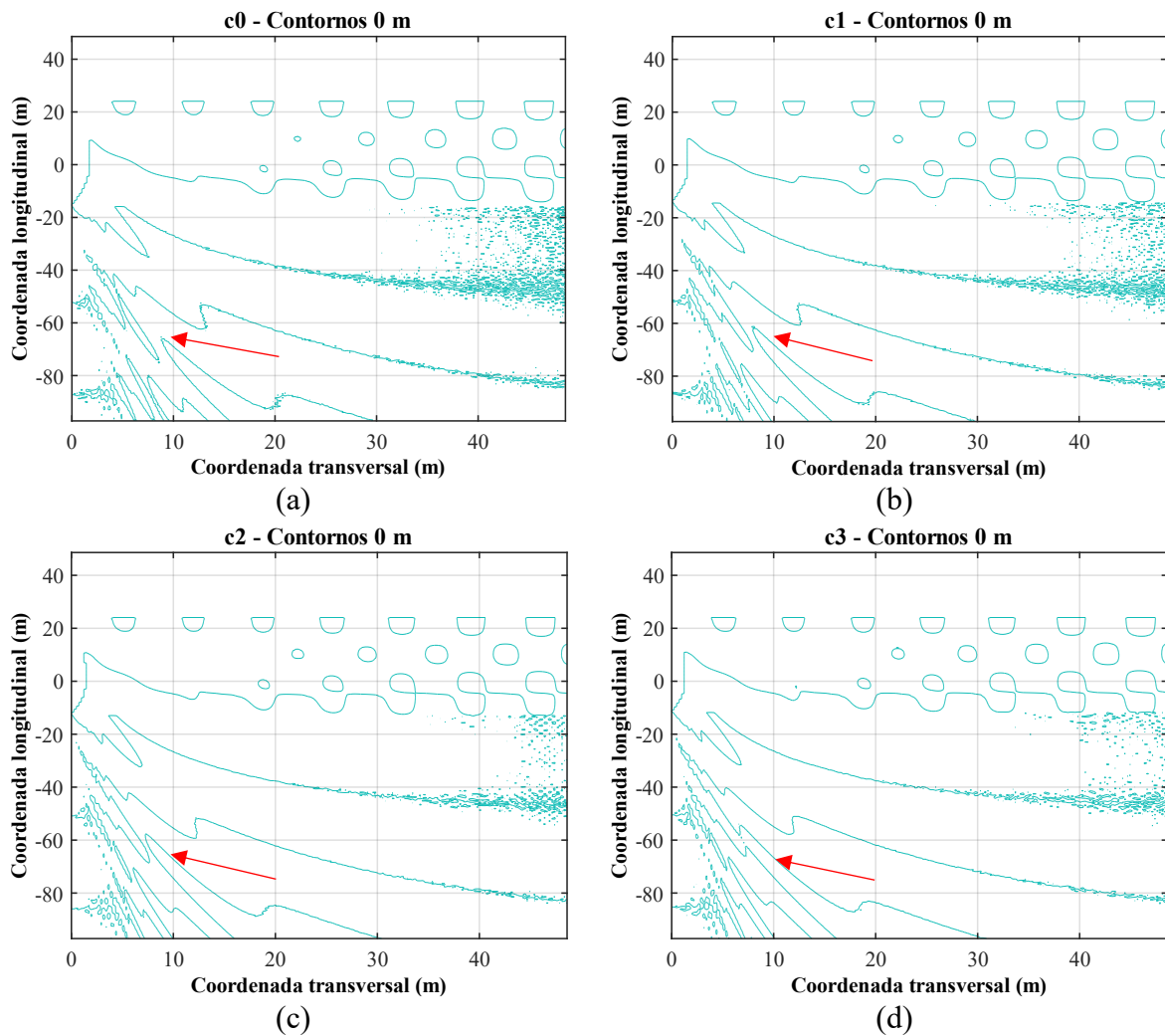


Fonte: Elaboração própria.

A partir do tipo de visualização mostrada na figura anterior, é possível observar contornos de elevação em posições específicas, permitindo uma comparação mais detalhada entre os casos de estudo avaliados.

Para fins ilustrativos, as Figuras 33a, 33b, 33c e 33d mostram os contornos de elevação na posição da linha de calado (elevação de 0 m), para os casos C0, C1, C2 e C3. Com esses gráficos é possível realizar comparações mais detalhadas das diferenças encontradas entre os casos de estudo. Verificam-se algumas diferenças nos padrões dos contornos gerados nos cascos modificados com relação ao casco padrão, como mostrado pelas setas vermelhas nos gráficos.

Figura 33. Contornos de elevação da água na posição da linha de calado (elevação de 0 m). (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.

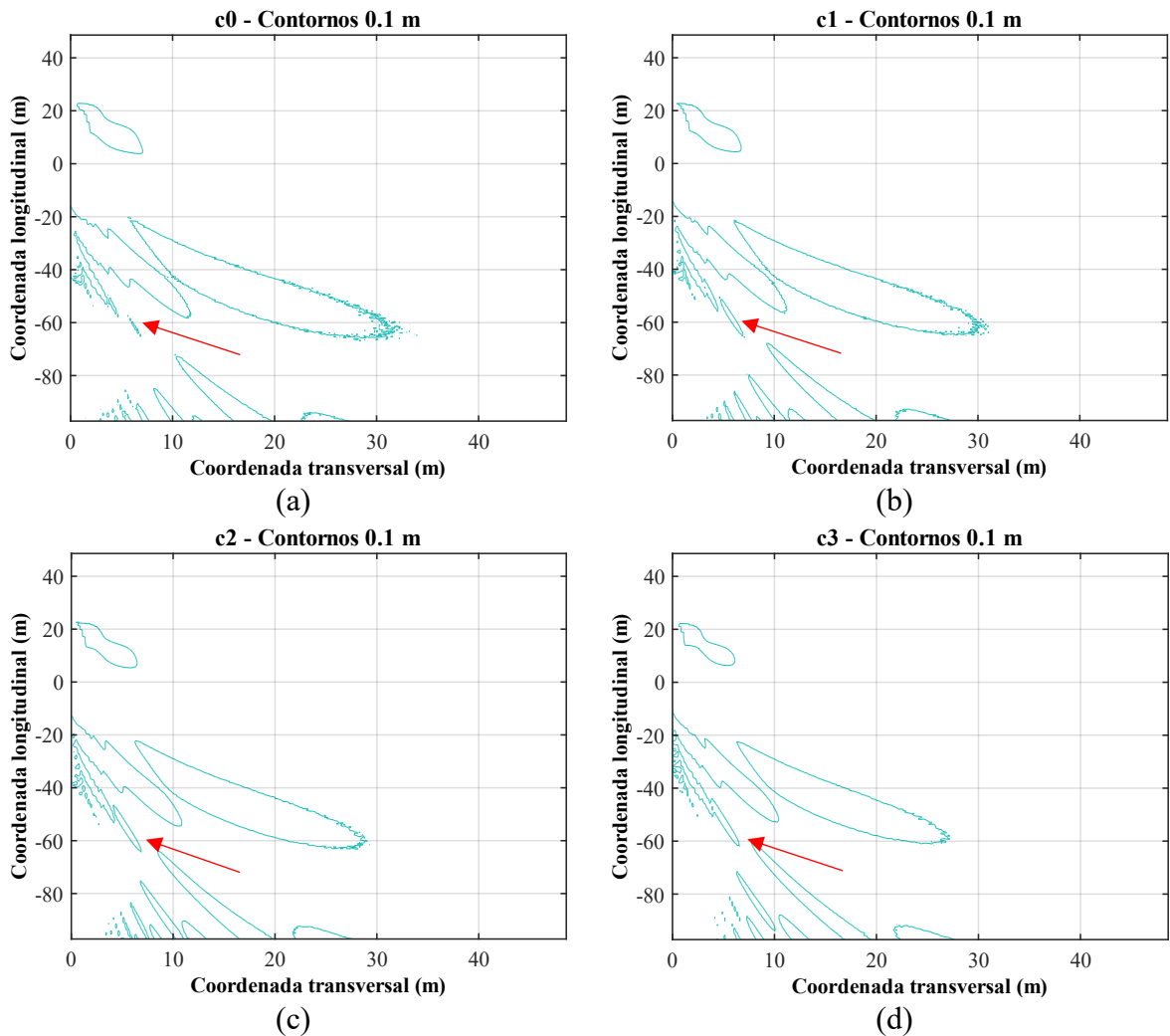


Fonte: Elaboração própria.

De maneira similar, as Figuras 34a, 34b, 34c e 34d mostram os contornos em uma elevação de 0,1 m, a partir da linha de calado, para os casos C0, C1, C2 e C3, respectivamente. Pequenas mudanças no padrão dos contornos são observadas conforme à variação da forma dos cascos com relação ao caso padrão. É importante ressaltar que o método utilizado considera a teoria de escoamento potencial, pelo que as análises não consideram os efeitos da viscosidade da água. Por tanto, futuras comparações dos padrões observados poderão ser feitas incluindo os

efeitos de viscosidade da água e de rotacionalidade do escoamento, o que pode mudar os padrões observados.

Figura 34. Contornos de elevação da água em uma elevação de 0,1 m a partir da linha de calado. (a) C0. (b) C1. (c) C2. (d) C3.



Fonte: Elaboração própria.

4.5 Recomendações de uso da metodologia considerada

É importante salientar que o presente estudo considerou uma metodologia de análise simplificada, baseado no uso de software, para avaliar os efeitos da variação da forma do casco no desempenho hidrodinâmico de uma embarcação regional amazônica. Tentou-se instruir no uso de software para realizar análises paramétricas da forma do casco e fazer comparações de parâmetros hidrodinâmicos. Foram desconsiderados os efeitos em outros aspectos de desenho, como estabilidade e análise estrutural, mantendo o foco no estudo da resistência ao avanço e a geração de ondas por parte da embarcação, mantendo um calado constante. Para poder aplicar

a metodologia seguida no presente trabalho, para o estudo de outras embarcações, podem ser consideradas algumas recomendações:

- Selecionar uma embarcação de referência que possua planos de linhas, conhecendo as suas velocidades e calados típicos de operação. Esta etapa é muito importante, pois será a partir desses dados serão consideradas as características principais e o formato do casco.

- Caso seja necessário que a embarcação seja reproduzida de forma similar à embarcação original, será necessário possuir o plano de linhas (cedidas por uma empresa de projetos ou feita pelo executor), ou imagens da embarcação em que seja possível deduzir as formas gerais da superfície externa. Esta última alternativa apresentará desafios para desenhar a embarcação, dependendo da habilidade do projetista na modelagem. Recomenda-se que, para implementar a variação paramétrica do casco, este seja modelado diretamente com o software *Orca3D*[®]. Caso contrário, poderá ser modelada apenas uma geometria similar utilizando as ferramentas de modelagem do *Orca3D*[®].

- Para reproduzir cascos modificados a partir do casco de referência, é necessário o preparo do ambiente e suas escalas, dando atenção aos requisitos do plugin *Orca3D*[®] e, necessariamente, tomando o cuidado de colocar os dados principais da embarcação selecionada como referência.

- Para realizar análises paramétricas, recomenda-se manter parâmetros fixos, variando somente um parâmetro por vez, para criar famílias de cascos com variação sistemática de parâmetros.

- Em se tratando do preparo dos cascos para as análises, atentar para a localização da origem do sistema de coordenadas quando modelado no software *Rhinoceros*[®], de maneira a considerar sempre a origem do sistema referencial da embarcação em outros softwares, como *Maxsurf*[®], *Ansys*[®], entre outros. Em algumas ocasiões será necessário transladar a origem do sistema coordenado utilizado na modelagem no *Rhinoceros*[®], para o centro de gravidade ou linha de água, dependendo do software utilizado.

- Para as análises no software *Maxsurf*[®], é necessário que o modelo seja salvo no *Rhinoceros*[®] com todas as suas superfícies “descoladas”, ou seja, não usar a função *join* para juntar as superfícies. Garantir que não existem diversas superfícies no modelo. Para isso, deve-se selecionar tudo e digitar *explode*. Assim, para reduzir a quantidade de superfícies (caso houver), usar a função *merge surfaces* (esta função une de maneira indissociável superfícies que compartilham as mesmas bordas).

- Para uso das geometrias geradas no software *Rhinoceros*[®], em análises no software *Ansys*[®] *Aqwa*, por exemplo, é necessário selecionar tudo do modelo e digitar *Join*. Além disso,

é necessário o arquivo seja salvo no formato de arquivo “.igs”, ou seja, seja salvo como objeto único sólido. Cabe mencionar que *Ansys*[®] possui módulos onde é possível consertar e adaptar as geometrias importadas.

- O software *Orca3D*[®] permite uma variedade de opções para variar de forma paramétrica os cascos de diversos tipos de embarcações. No presente estudo, apenas foi variada a posição transversal da quina para gerar os casos de estudo e demonstrar o procedimento de comparação de variáveis hidrodinâmicas. No entanto, podem ser avaliados outros parâmetros de forma sistemática, permitindo a análise e comparação de grupos de cascos similares.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a influência da variação da forma do casco em alguns aspectos hidrodinâmicos, como resistência ao avanço e a geração de ondas, de uma embarcação regional amazônica do tipo expresso. As análises foram feitas variando de forma sistemática a posição transversal da quina principal de um casco padrão, gerando três cascos adicionais com o uso do software *Orca3D*[®]. O trabalho foi motivado devido à necessidade que existe na região amazônica de realizar estudos técnicos para conhecer mais do comportamento das embarcações. As principais conclusões do estudo são listadas a seguir:

O processo de modelagem tridimensional e geração paramétrica dos casos de estudo foi baseado nos softwares *Rhinoceros*[®] e *Orca3D*[®], sendo apresentadas algumas recomendações de uso baseadas na experiência do autor. Foi possível obter um renderizado da embarcação considerada como caso de estudo e preparar geometrias para o uso no software de Engenharia Naval *Maxsurf Resistance*[®]. Com esse software, foram realizados estudos comparativos com os cascos gerados, implementando os métodos de resistência avanço de Holtrop (para o regime de deslocamento), Savinsky (para os regimes de semi-planeio e planeio) e *Slender body* (modelo analítico para todos os regimes). Para as análises comparativas das ondas geradas pelas embarcações foi usado o método *Slender body*.

Os resultados comparativos demonstraram que a redução da distância transversal da quina gera cascos com menor resistência ao avanço, proporcionando maior menor potência requerida para propulsar a embarcação. Por exemplo, na condição na qual a quina ficou mais próxima da quilha do casco, houve uma redução de até 30% da resistência ao avanço, no regime de operação da embarcação (semi-planeio: velocidade = 25 nós; $F_n = 0,82$). Com relação à geração das ondas, a redução na posição transversal da quina do casco com relação à quilha contribuiu na redução das elevações das ondas geradas, particularmente depois da primeira crista observada. Os resultados obtidos consideram apenas aspectos hidrodinâmicos, assumindo a aplicabilidade dos métodos com um calado invariável, e desconsiderando efeitos do ângulo de *trim* pela proa, que pode ser comum em embarcações de semi-planeio. Os efeitos da variação paramétrica do casco em outros aspectos do projeto da embarcação, como estabilidade e estrutura, podem ser abordados em pesquisas futuras.

O procedimento de análise paramétrico que foi considerado pode servir, como alternativa de uso prático, para realizar estudos comparativos com outros softwares de Engenharia Naval, incluindo métodos mais robustos de fluidodinâmica computacional.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. R. Levantamento de embarcações de pequeno porte comuns na região amazônica e estudo da resposta em ondas de uma embarcação do tipo voadeira. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- BAGAZINSKI, N. J.; AHMED, F. ShipGen: A Diffusion Model for Parametric Ship Hull Generation with Multiple Objectives and Constraints. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 12, p. 2215, 2023.
- BECHMAN, V. S. Metodologia para caracterizar a geometria do casco e o comportamento hidrodinâmico de uma embarcação regional amazônica do tipo expresso. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- BENTLEY. Maxsurf Resistance: User Manual. Bentley Systems. , 2020. Disponível em: <https://communities.bentley.com/cfs-filesystemfile/_key/communityserver-discussions-components-files/343374/ResistanceManual.pdf?_=637588050297240853>. Acesso em: 10 jun. 2023
- BIRK, L. Fundamentals of ship hydrodynamics: Fluid mechanics, ship resistance and propulsion. [s.l.] John Wiley & Sons, 2019.
- BITENCOURTT, D. S. Estudo experimental da velocidade de avanço e das ondas geradas por uma embarcação regional do tipo rabeta. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- CARLTON, J. Marine propellers and propulsion. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2018.
- CHENG, X. et al. Comparative investigations on hull line optimization based on traditional and fully parametric methods for saving energy. *Frontiers in Energy Research*, v. 12, p. 1359957, 2024.
- CHI, Y.; HUANG, F. An overview of simulation-based hydrodynamic design of ship hull forms. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, v. 28, n. 6, p. 947–960, 2016.
- COUSER, P. R. An investigation into the performance of high-speed catamarans in calm water and waves. PhD Thesis—[s.l.] University of Southampton, 1996.
- COUSER, P.; WELLCOME, J.; MOLLAND, A. An improved method for the theoretical prediction of the wave resistance of transom-stem hulls using a slender body approach. *International Shipbuilding Progress*, v. 45, p. 331–350, 1998.
- CURSINO, M. W. DE J. Descrição de embarcações regionais rápidas comuns em Parintins (AM) e estudo da dinâmica de uma embarcação tipo expresso usando Ansys Aqwa. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- DAVID, R. C. DE A. A dinâmica do transporte fluvial de passageiros no Estado do Amazonas (in portuguese). Master Dissertation—Amazonas, Brazil: Federal University of Amazonas, 2010.
- DENG, R. et al. The effect of hull form parameters on the hydrodynamic performance of a bulk carrier. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 4, p. 373, 2021.

- FENG, B. et al. Ship hull automatic optimization techniques research based on CFD. 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Anais...IEEE, 2009.
- FONTES, J. V. 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, 2023a.
- FONTES, J. V. H. et al. Marine Accidents in the Brazilian Amazon: Potential Risks to the Aquatic Environment. *Sustainability*, v. 15, n. 14, 2023b.
- GRIGOROPOULOS, G. J. Hull form optimization for hydrodynamic performance. *Marine Technology*, v. 41, n. 4, p. 167–182, 2004.
- HAN, S.; LEE, Y.-S.; CHOI, Y. B. Hydrodynamic hull form optimization using parametric models. *Journal of marine science and technology*, v. 17, n. 1, p. 1–17, 2012.
- HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Toward More Sustainable River Transportation in Remote Regions of the Amazon, Brazil. *Applied Sciences*, v. 11, n. 5, p. 2077, 2021.
- HOLTROP, J. Statistical analysis of performance test results. *International Shipbuilding Progress*, v. 24, n. 270, 1977.
- HOLTROP, J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. Published in *International Shipbuilding Progress*, ISP, Volume 31, Number 363, 1984.
- HOLTROP, J. A statistical resistance prediction method with a speed dependent form factor. *Proceedings of the 17th Session BSHC*, Varna, v. 1, n. 3.1, 1988.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. An approximate power prediction method. *International shipbuilding progress*, v. 29, n. 335, p. 166–170, 1982.
- KORVIN-KROUKOVSKY, B.; SAVITSKY, D.; LEHMAN, W. F. Wetted area and center of pressure of planing surfaces. Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report, v. 360, 1949.
- MACHADO, K. L. Influência da profundidade e das margens dos rios da região amazônica na otimização da seleção do sistema propulsor de embarcações: estudo de caso do rio Solimões. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2023.
- MAIA, H. W. et al. Computational Fluid Dynamics Applied to River Boat Hull Optimization. *Marine Technology Society Journal*, v. 55, n. 5, p. 94–108, 2021.
- MAIA, H. W. et al. COVID Pandemics and Inland Transportation in the Brazilian Amazon: A Note on the Risks of Infection in Typical Passenger Vessels. *COVID*, v. 3, n. 8, p. 1052–1062, 2023.
- MAIA, H. W.; SAID, M. 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.
- MICHELL, J. H. XI. The wave-resistance of a ship. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 45, n. 272, p. 106–123, 1898.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. Ship resistance and propulsion. [s.l.] Cambridge university press, 2017.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. [s.l.] Cambridge University Press, 2012.
- NETO, P. F. DE S. et al. Rumo à classificação de embarcações regionais de alta velocidade comuns na Amazônia brasileira. Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal), 2024.
- NETUNO ENGENHARIA NAVAL. Netuno Engenharia Naval | Compra de Embarcações em Manaus | Venda de Embarcações em Manaus | Aluguel de Embarcações em Manaus | Projetos de Embarcações. Disponível em: <<https://netunoeng.com.br/>>. Acesso em: 1 maio. 2024.
- ORCA3D. Orca3D Marine design for Rhinoceros. Naval architecture in Rhino. Software written and supported by naval architects, for naval architects. Disponível em: <<https://orca3d.com/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- PADOVEZI, C. Avaliação de riscos do transporte fluvial de passageiros na Região Amazônica. Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore-2012, SOBENA, Rio de Janeiro, RJ. Anais...2012.
- PECHENYUK, A. V. Optimization of a hull form for decrease ship resistance to movement. Computer research and modeling, v. 9, n. 1, p. 57–65, 2017.
- PÉREZ-ARRIBAS, F. Parametric Generation of Small Ship Hulls with CAD Software. Journal of Marine Science and Engineering, v. 11, n. 5, p. 976, 2023.
- PERI, D.; ROSSETTI, M.; CAMPANA, E. F. Design optimization of ship hulls via CFD techniques. Journal of ship research, v. 45, n. 02, p. 140–149, 2001.
- SAVITSKY, D. Hydrodynamic design of planing hulls. Marine Technology and SNAME News, v. 1, n. 04, p. 71–95, 1964.
- SAVITSKY, D.; NEIDINGER, J. W. Wetted area and center of pressure of planing surfaces at very low speed coefficients. [s.l.] Institute of the Aeronautical Sciences, 1954.
- SOARES, N. L. DO N. Recomendações para o estudo das ondas geradas por embarcações utilizando o Maxsurf Resistance. Trabalho de Conclusão de Curso. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2023.
- SOARES, N. L. DO N. et al. Estudo das ondas geradas por uma embarcação regional do tipo Expresso utilizando o software Maxsurf Resistance. Revista Foco, v. 16, n. 12, p. e3861–e3861, 2023.
- TUCK, E. O.; LUZAUSKAS, L.; SCULLEN, D. C. Sea Wave Pattern Evaluation. Part 1 Report: Primary Code and Test Results (Surface Vessels). Applied Mathematics Department,

The University of Adelaide. 30 April 1999. , 1999. Disponível em:
<<http://www.cyberiad.net/library/pdf/tls99.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2023