

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

NÁDIA LETÍCIA DO NASCIMENTO SOARES

**RECOMENDAÇÕES PARA O ESTUDO DAS ONDAS GERADAS POR
EMBARCAÇÕES UTILIZANDO O MAXSURF RESISTANCE**

MANAUS

2023

NÁDIA LETÍCIA DO NASCIMENTO SOARES

**RECOMENDAÇÕES PARA O ESTUDO DAS ONDAS GERADAS POR
EMBARCAÇÕES UTILIZANDO O MAXSURF RESISTANCE**

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

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández
Fontes

MANAUS

2023

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.

S676rr Soares, Nádia Letícia do Nascimento
Recomendações para o estudo das ondas geradas por embarcações utilizando o Maxsurf Resistance / Nádia Letícia do Nascimento Soares. Manaus : [s.n], 2023.
68 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes

1. ondas geradas pela embarcação. 2. wave wash. 3. calado. 4. velocidade. 5. embarcação do tipo expresso. I. Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Recomendações para o estudo das ondas geradas por embarcações utilizando o Maxsurf Resistance

NÁDIA LETÍCIA DO NASCIMENTO SOARES

**RECOMENDAÇÕES PARA O ESTUDO DAS ONDAS GERADAS POR
EMBARCAÇÕES UTILIZANDO O MAXSURF RESISTANCE**

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

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Elvis Jhoarsy Osório Santander
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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais, José Soares e Marivane, pelo amor inabalável, apoio incansável e encorajamento constante durante todo o meu percurso acadêmico.

Ao meu irmão, José Henrique, pelos abraços sinceros e palavras de carinho constantes que aliviavam a minha exaustão.

Ao Gustavo, por suportar as luzes acesas durante minhas noites em claro, por todo apoio prestado e por sempre acreditar em mim.

Ao meu orientador, Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes, pela orientação, suporte e conhecimento valiosos durante toda a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e familiares que se fizeram presentes e me apoiaram nessa caminhada.

Este trabalho foi parcialmente 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 N° 14/2022 – Faixa A (405529/2022-8).

À empresa Bentley Systems pela disponibilidade da versão acadêmica do software *Maxsurf* utilizado para desenvolver o presente trabalho.

RESUMO

As embarcações que operam com velocidade de avanço tendem a gerar trens de ondas na superfície da água que se propagam em diversas direções com relação à trajetória da embarcação. A dissipação energética resultante das ondas geradas pelas embarcações pode afetar outras superfícies e causar impactos ambientais, além de impactar a segurança da navegação, principalmente em zonas de águas restritas como canais ou rios. O aumento do fluxo de embarcações nos rios da Amazônia torna o estudo desse problema relevante na região. Dentre as possíveis complicações, pode-se mencionar a erosão das margens dos rios, o que pode afetar o leito do rio e contribuir para o transporte de sedimentos, causando problemas na navegação e às comunidades ribeirinhas. Além disso, os trens de ondas gerados podem interagir com banhistas ou embarcações menores, causando riscos de acidentes. Este trabalho tem como objetivo introduzir o problema dos trens de ondas gerados pelas embarcações, analisando o uso do método do corpo esbelto disponível no software *Maxsurf Resistance*, para representar a superfície livre da água. Para isto, foi considerado o caso de estudo de uma embarcação comumente utilizada para transporte de passageiros na região amazônica, conhecida como expresso. O uso do método foi introduzido, realizando uma análise dos diversos parâmetros de entrada requeridos. Posteriormente, foi demonstrado o uso do método para verificar os efeitos da variação da velocidade e do calado da embarcação nos trens de ondas gerados. Os resultados obtidos demonstraram a necessidade de fazer análises prévias para selecionar os parâmetros de simulação adequados durante o uso do método do corpo esbelto. O aumento da velocidade de avanço e do calado estão relacionados com o aumento da altura dos trens de ondas gerados. Espera-se que o presente trabalho sirva como base para o uso do método do corpo esbelto na avaliação das ondas geradas por outras embarcações, proporcionando sugestões de uso para utilizá-lo de acordo com seus limites de aplicabilidade.

Palavras-chave: ondas geradas pela embarcação, *wave wash*, calado, velocidade, embarcação do tipo expresso.

ABSTRACT

Vessels operating at forward speed tend to generate wave trains on the water surface that propagate in different areas in relation to the vessel's trajectory. The energy dissipation resulting from waves generated by vessels can affect other surfaces and cause environmental impacts, in addition to impacting navigation safety, especially in restricted water areas such as canals or rivers. The increase in the flow of shipments on Amazon rivers makes the study of this problem relevant in the region. Among the possible complications, we can mention the erosion of river banks, which can affect the river bed and contribute to the transport of sediments, causing problems in navigation and riverside communities. Furthermore, the wave trains generated can interact with swimmers or vessels, causing lower risks of accidents. This work aims to introduce the problem of wave trains generated by vessels, analyzing the use of the slender body method available in the Maxsurf Resistance software, to represent the free surface of the water. For this, the case study of a vessel commonly used to transport passengers in the Amazon region, known as an express, was considered. The use of the method was introduced by carrying out an analysis of the various input parameters required. Subsequently, the use of the method was demonstrated to verify the effects of varying speed and boarding draft on generated wave trains. The results obtained demonstrated the need to carry out previous analyzes to select the appropriate simulation parameters when using the slender body method. The increase in forward speed and draft is related to the increase in the height of the wave trains generated. It is expected that the present work will serve as a basis for the use of the slender body method in the evaluation of waves generated by other vessels, offering suggestions for using it according to its applicability limits.

Keywords: ship-generated waves, wave wash, draft, speed, express type vessel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplos ilustrativos de erosão, que pode ser parcialmente causada pela interação constante das ondas geradas pelas embarcações com as margens dos rios. (a) Margem erosiva em trecho do rio Juma. (b) Margem erosiva em trecho do Rio Madeira. (c) Padrão de ondas produzido por uma lancha regional de transporte de passageiros conhecida como expresso. .	13
Figura 2 – Exemplos das ondas geradas por embarcações que podem afetar outras embarcações. a) Ondas atingindo embarcações ancoradas. b) Ondas prestes a atingir uma lancha pequena.	14
Figura 3 - Classificação do regime hidrodinâmico em função do número de Froude.....	21
Figura 4 – Padrões de ondas gerados por uma embarcação.	24
Figura 5 – Ângulos de propagação das ondas.	25
Figura 6 - Procedimento de análise.	28
Figura 7 - Exemplo de embarcação regional do tipo expresso.....	28
Figura 8 - Modelo do casco obtido no software <i>Maxsurf Modeler</i>	29
Figura 9 - Plano de linhas do casco padrão.	30
Figura 10 - Popa transom. a) popa de uma embarcação expresso. b) popa do casco estudado.	30
Figura 11 - Exemplo de plano de balizas de um casco de semideslocamento.	31
Figura 12 - Plano de balizas do casco estudado.	31
Figura 13 - Pontos de referência principais no software <i>Maxsurf Modeler</i>	32
Figura 14 - Tipos de cascos esbeltos utilizados na validação do método do corpo esbelto disponível no software <i>Maxsurf Resistance</i> (Bentley, 2020). Planos de linhas transversal dos cascos tipo (a) Wigley e (b) NPL (model 4a).....	33
Figura 15 - Apêndice virtual.....	34
Figura 16 - Parâmetros de cálculo da superfície livre que precisam ser configurados no software <i>Maxsurf Resistance</i>	36
Figura 17 - Efeito da forma do casco na geração de ondas usando o método do corpo esbelto no <i>Maxsurf Resistance</i> . (a) Casco esbelto gerado a partir da geometria do expresso com popa tipo transom.	45
Figura 18 – Efeitos da variação dos valores do exagero vertical na geração das ondas. (a) Trens de ondas para exagero vertical = 1. (b) Trens de ondas para exagero vertical = 4.....	47

Figura 19 - Vista lateral das ondas geradas para os diferentes valores de grade transversal e longitudinal para $FnL = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.	48
Figura 20 - Vista superior das ondas geradas para os diferentes valores de grade transversal e longitudinal para $FnL = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.	51
Figura 21 - Vista lateral das ondas geradas para os diferentes valores do parâmetro de precisão de integração para $FnL = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.	53
Figura 22 - Vista superior das ondas geradas para os diferentes valores do parâmetro de precisão de integração para $FnL = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.	56
Figura 23 - Padrões de onda considerando diferentes velocidades.	58
Figura 24 - Padrões de ondas considerando diferentes calados.....	60
Figura 25 - Representação gráfica das ondas geradas pela embarcação considerando variações no calado. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características principais da embarcação.....	29
Tabela 2 – Medidas consideradas nas análises.....	39
Tabela 3 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para análise de variação da forma.....	39
Tabela 4 – Casos analisados para a variação da forma do casco.....	40
Tabela 5 – Casos analisados para a variação do parâmetro de exagero vertical.	40
Tabela 6 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para a análise da variação da grade transversal e longitudinal.....	40
Tabela 7 – Casos analisados na variação dos parâmetros da grade transversal e longitudinal.	41
Tabela 8 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para as análises da variação do parâmetro de integração da precisão.	41
Tabela 9 - Casos analisados na variação do parâmetro de precisão da integração.....	42
Tabela 10 - Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para as análises da variação da velocidade.....	42
Tabela 11 - Casos analisados na variação da velocidade.	43
Tabela 12 - Características do casco para cada caso de variação do calado.	43
Tabela 13 - Casos analisados na variação do calado.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Descrição do problema	12
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo geral.....	15
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Classificação de embarcações por regime de operação	21
3.2	Geração de ondas por embarcações	22
3.2.1	<i>Wave wash</i> (Lavagem causada por ondas).....	22
3.2.2	Padrões de onda	23
4	METODOLOGIA	27
4.1	Diagrama de fluxo das análises	27
4.2	Descrição da embarcação	28
4.3	Descrição do método de cálculo de padrões de ondas no <i>Maxsurf Resistance</i>	32
4.3.1	Aplicabilidade do método e restrições	35
4.4	Casos de estudo	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Efeitos da forma do casco na geração das ondas	45
5.2	Efeito do exagero vertical na superfície livre	46
5.3	Efeitos da variação da grade transversal e longitudinal na geração de ondas	47
5.4	Efeitos da variação da precisão de integração na superfície livre	53
5.5	Efeitos da variação da velocidade de avanço na geração de ondas.	58

5.6	Efeitos da variação do calado na geração de ondas.....	60
6	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE A – PLANO DE LINHAS DO CASCO.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

A região amazônica apresenta uma vasta rede de vias fluviais, que desempenham um papel central na integração entre as cidades e possuem uma grande importância tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico (Oliveira, 2016; IPAAM, 2020). No entanto, o aumento do tráfego de embarcações na região tem causado preocupações quanto ao impacto ambiental produzido por essa intensificação, como por exemplo, o impacto das ondas geradas no processo de erosão das margens dos rios (Marques; Carvalho, 2019).

A erosão é um problema que pode causar impactos negativos na paisagem e no meio ambiente, incluindo a perda de terra, o desgaste de encostas, a degradação da qualidade da água e a mudança no regime hidrológico dos rios (Murphy; Morgan; Power, 2006).

Diversos fatores contribuem para o processo erosivo das margens, como o nível dos rios, o tipo de solo e o clima, mas além dos fatores naturais, o desgaste do solo é consideravelmente intensificado pelo trânsito frequente de embarcações de diversos tipos e tamanhos, causando constantes sequências de ondas conhecidas regionalmente como “banzeiros”, o que propicia o desbarrancamento da beira do rio (Lima; Freire, 2018). O fenômeno conhecido como *wave wash* (em português, “lavagem de ondas”) tem sido apontado como uma das principais causas desse impacto (Qian et al., 2022).

O problema de *wave wash*, também chamado de *wake wash*, está relacionado com a geração de ondas na superfície da água causadas pela ação de uma embarcação em movimento. Tais ondas propagam energia pela superfície de um corpo de água até encontrar um meio de liberação de energia, ao não existirem muitas praias nos rios que atenuem essa energia, as ondas podem atingir as margens e fazer a “lavagem” da superfície. Essas ondas têm uma força destrutiva que pode danificar a estrutura da margem dos rios, acelerando o processo de erosão e prejudicando a estabilidade do solo (Saha; Abdullah; Ashrafuzzaman, 2017).

A Figura 1 fornece representações visuais do impacto potencial do *wave wash* na erosão de margens de rios. Esta figura destaca duas áreas distintas na região amazônica que têm experimentado erosão significativa. A Figura 1a demonstra a margem de um trecho do rio Juma, visivelmente desgastada devido aos efeitos da erosão. De maneira similar, a Figura 1b mostra uma área da margem do rio Madeira, uma via bastante transitada que também tem sido afetada pela erosão. O fenômeno da erosão é comumente chamado de “terras caídas” por pessoas da

região (Lima; Freire, 2018). Na Figura 1c pode se observar o trem de ondas produzido por uma lancha regional do tipo expresso em um canal estreito prestes a atingir as margens.

Figura 1- Exemplos ilustrativos de erosão, que pode ser parcialmente causada pela interação constante das ondas geradas pelas embarcações com as margens dos rios. (a) Margem erosiva em trecho do rio Juma. (b) Margem erosiva em trecho do Rio Madeira. c) Padrão de ondas produzido por uma lancha regional de transporte de passageiros conhecida como expresso.

a)



b)



c)



Fonte: Elaboração própria.

Os efeitos das ondas geradas por embarcações nas margens dos rios são agravados pela falta de proteção natural, como vegetação densa, rochas e sedimentos, que atuam como barreiras contra a erosão (Lorenz; Pusch; Blaschke, 2015). Além disso, a exploração de recursos naturais,

como a extração de madeira, mineração e hidrelétricas, tem intensificado o tráfego de embarcações na região amazônica, aumentando a intensidade e a frequência dessas ondas.

Além do impacto negativo sobre o processo de erosão, os efeitos das ondas geradas por embarcações também são sentidos por embarcações ancoradas. Ao passar próximas de portos ou terminais portuários, as embarcações provocam movimentos de ondas que podem afetar a posição das embarcações atracadas, fazendo com que elas potencialmente atinjam outras embarcações ancoradas ou infraestruturas próximas (Figura 2a), causando riscos de dano estrutural e de estabilidade. As ondas geradas podem atingir ainda outras embarcações menores que estejam navegando pelo canal (Figura 2b), e até mesmo banhistas e pessoas que vivem nas proximidades, como os ribeirinhos (Saha; Abdullah; Ashrafuzzaman, 2017; Erikson, L.H., Larson, M., Hanson, H., 2003., *apud* Nascimento, 2007).

Figura 2 – Exemplos das ondas geradas por embarcações que podem afetar outras embarcações. a) Ondas atingindo embarcações ancoradas. b) Ondas prestes a atingir uma lancha pequena.



Fonte: Elaboração própria.

As ondas geradas por embarcações podem causar outros diversos impactos, como a perturbação de habitats, turbidez da água, propagação de espécies invasoras e afetar peixes e plantas (Gabel; Lorenz; Stoll, 2017). Esses impactos podem ser minimizados com práticas de navegação responsáveis e regulamentações adequadas.

Com relação à região amazônica, poucos estudos de Engenharia Naval têm considerado esta problemática nas análises. Dentre os trabalhos feitos regionalmente, Chagas Júnior (2012) apresenta uma pesquisa que avalia o impacto das ondas provocadas por embarcações no rio Guamá, no Pará. Foram realizados 3 experimentos para analisar as ondas geradas por diferentes tipos de embarcações: lanchas, *jet-ski*, rabeta e barco com motor de centro. O resultado dos experimentos mostrou que as maiores ondas são geradas pelas lanchas e concluiu que as ondas geradas pelas embarcações podem afetar a estabilidade das margens do rio. Medidas de controle de velocidade e de distância das margens são importantes para minimizar o impacto das ondas. O estudo destaca a importância da realização de pesquisas voltadas para o tema em questão na região Norte, devido à escassez de material, e de se considerar o impacto ambiental das atividades humanas, como a navegação.

1.2 Justificativa

Introduzir um estudo sobre as ondas geradas pelas embarcações e dos possíveis efeitos na região amazônica é relevante devido à quantidade significativa de embarcações que operam na região. Este estudo pode servir de base para pesquisas futuras relacionadas com os efeitos das ondas geradas por embarcações na erosão, em outras embarcações e demais possíveis implicações. Tais informações podem ser relevantes para que sejam planejadas políticas públicas, incluindo medidas de proteção e de diminuição dos impactos negativos desse meio de transporte na Amazônia.

Vários estudos têm sido conduzidos sobre a resistência ao avanço de embarcações na região, no entanto, poucas literaturas são encontradas sobre a geração de ondas dessas embarcações. Entender esse fenômeno é importante não apenas para o projeto de cascos mais eficientes, mas também para garantir a segurança da navegação e proteção do meio ambiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa estudar as ondas geradas por embarcações, com relevância na região amazônica, e analisar o método de geração de ondas disponível no software *Maxsurf Resistance*, utilizando a teoria do corpo esbelto para avaliar a variação da superfície livre da água.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar bibliografias relacionadas com a avaliação dos possíveis problemas causados pelas ondas produzidas por embarcações.
- Gerar uma geometria semelhante à de uma embarcação regional para realizar um estudo inicial das ondas que gera durante o seu movimento.
- Estudar o método do corpo esbelto (*Slender body theory*), disponível na versão acadêmica do software *Maxsurf Resistance*, para analisar as ondas geradas pela embarcação.
- Avaliar a influência da variação de parâmetros do método do corpo esbelto disponível no *Maxsurf Resistance* no cálculo da superfície livre da água, considerando o casco da embarcação selecionada.
- Analisar os efeitos da variação do calado e da velocidade de avanço na geração de ondas com o casco selecionado.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho de conclusão de curso está organizada da seguinte maneira: no capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica, onde são apresentados estudos anteriores relacionados ao tema e que servirão como base para este trabalho. A fundamentação teórica, no capítulo 3, fornece uma base teórica e conceitual para o estudo, abordando a classificação de embarcações com base no regime de velocidade e suas características distintivas; além do conceito de *wave wash*. A metodologia é explicada no capítulo 4, onde é delineado o fluxo das análises a serem realizadas, descrevendo também a embarcação utilizada no estudo e o método de cálculo de padrões de ondas do software *Maxsurf*. No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados das análises realizadas. Por fim, as principais conclusões das análises estão resumidas no capítulo 6, onde também são dadas sugestões de pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversas pesquisas relacionadas com o estudo das ondas geradas por embarcações têm sido desenvolvidas no âmbito internacional ao longo dos anos. A seguir, são apresentadas de maneira cronológica, algumas das pesquisas mais relacionadas ao presente estudo.

Utilizando métodos experimentais e teóricos, Yang, Faltinsen e Zhao (2001) investigaram a influência da profundidade da água na resistência das ondas enfrentadas pelas embarcações. Os autores desenvolveram uma teoria linear para estimar a resistência das ondas de navios e estudar a ação das ondas próximas à costa, verificando a relação entre elas. O trabalho ressalta a importância de se considerar a profundidade da água e sugere que o método pode ser aplicado tanto para águas rasas quanto para águas profundas.

Jiang, Henn e Sharma (2002) analisaram como a topografia do fundo do canal afeta as ondas geradas pelos navios. Através de análises computacionais, baseadas nas equações de Boussinesq e na teoria do corpo esbelto, eles mostraram os efeitos de diferentes variações de formato no canal na altura e no comprimento das ondas geradas pelos navios. Além disso, o estudo aponta que a aceleração do navio também influencia a geração das ondas, principalmente as chamadas ondas primárias, que tendem a ser geradas pela proa.

Belibassakis (2003) apresenta uma técnica de métodos acoplados para prever a transformação das ondas geradas por navios em regiões com fundo irregular. A abordagem visa compreender como as ondas se comportam ao interagir com a variação de profundidade. A técnica proposta, em conjunto com códigos de Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), permite reproduzir a configuração das ondas do navio e analisar a perturbação do *wave wash* em áreas costeiras.

O estudo feito por Chen e Huang (2004) discute uma abordagem inovadora para o projeto de cascos de embarcações com o objetivo de minimizar as ondas geradas por elas. Para atingir esse objetivo, os pesquisadores propuseram uma perspectiva de projeto de casco inverso, onde o casco é projetado de acordo com a forma da onda desejada. O método foi implementado utilizando uma combinação de simulações numéricas para otimizar o desenho do casco e avaliar o seu desempenho em relação à minimização das ondas geradas. Os resultados mostraram uma redução significativa nas ondas produzidas pela embarcação.

O livro publicado por Murphy, Morgan e Power (2006), consistiu em uma revisão abrangente da literatura existente sobre os impactos das ondas produzidas por embarcações nas vias navegáveis interiores da Irlanda. Os resultados destacaram as preocupações com a erosão, degradação e perda de elementos culturais e históricos causados pelas ondas geradas pelo

tráfego aquaviário. O estudo ressaltou a necessidade de medidas de conservação e gestão adequadas para preservar o patrimônio ecológico e cultural das vias navegáveis irlandesas.

Velegrakis et al. (2007) , realizou um estudo de campo sobre as características das ondas geradas por balsas convencionais e de alta velocidade em áreas próximas à costa. Por meio da utilização de registros em formato de vídeo digital e procedimentos de análise de imagens, os pesquisadores observaram que a passagem da balsa de alta velocidade resultou em ondas maiores, mais complexas e energéticas, além de possuir maior capacidade de mover sedimentos e modificar a morfologia do litoral.

De acordo com Kucera-Hirzinger et al. (2009), as ondas causadas pelas embarcações também podem afetar negativamente os peixes fluviais. Os resultados do estudo de campo e das análises experimentais realizadas indicaram que as ondulações induzidas pela navegação podem afetar o comportamento, o crescimento e a sobrevivência dos peixes. Além disso, a pesquisa sugere que os efeitos podem variar dependendo da espécie de peixe e das condições ambientais. Os resultados deste estudo destacam a necessidade de medidas para minimizar a exposição dos peixes às ondas geradas pela navegação e para proteger as populações de peixes em ambientes fluviais.

A pesquisa de Chicherin e Pustoshny (2015) discute o problema da previsão do efeito do *wave wash* e demonstra a aplicabilidade do software criado pelo Instituto de Pesquisa de Construção Naval Krylov (KSRI) em uma abordagem inicial para a análise do escoamento estacionário de embarcações. O programa utiliza um método numérico não linear para a análise das ondas.

Uma abordagem para a simulação das ondas geradas por navios de deslocamento de alta velocidade foi apresentada por Zhou, Gao e Huijsmans (2015). Para calcular as ondas em uma área relativamente grande é difícil utilizar um único modelo de geração de ondas. Para resolver esse desafio, o artigo propõe um método acoplado que combina um modelo de geração de ondas com um modelo de propagação de ondas. As ondas calculadas pelo modelo de geração de ondas são utilizadas como entrada para o modelo de propagação de ondas, permitindo a obtenção de ondas distantes. Esse método acoplado possibilita a simulação das ondas, levando em conta a profundidade da água e a batimetria do canal. O artigo também discute os efeitos das ondas em uma embarcação ancorada, utilizando um método de teoria de difração.

A revisão literária apresentada por Gabel, Lorenz e Stoll (2017) mostrou que as ondas podem contribuir para a erosão costeira, a degradação de habitats aquáticos e a perda de biodiversidade. Os impactos das ondas de lavagem em espécies específicas, como peixes, plantas aquáticas, algas e organismos bentônicos, são discutidos em detalhes. O artigo também

apresenta possíveis soluções para mitigar esses efeitos, como a implementação de zonas de velocidade limitada nas hidrovias, aumento da largura dos canais de navegação e projetos de embarcações que visem reduzir essas perturbações. Os autores destacam a importância de compreender os efeitos das ondas geradas por embarcações em ecossistemas aquáticos para promover a conservação e gestão sustentável desses ambientes.

Saha, Abdullah e Ashrafuzzaman (2017), apresentam uma abordagem hidrodinâmica para determinar a velocidade máxima permitida em uma via navegável de Bangladesh, caracterizada por sua estreiteza e pouca profundidade, eles destacam a importância de se considerar os efeitos do *wave wash* no projeto e operação de navios. A pesquisa utiliza simulações CFD e análises hidrodinâmicas para investigar os impactos das ondas geradas pelos navios em diferentes velocidades. Os resultados indicam que a velocidade máxima deve ser restringida para evitar consequências negativas, como erosão das margens e instabilidade de embarcações. O modelo proposto pode ser uma ferramenta útil para a determinação das velocidades seguras de navegação em condições restritas, oferecendo informações valiosas para o projeto e operação adequada de navios nessas circunstâncias.

Li, Yuan e Gao (2018) desenvolveram um modelo numérico híbrido para investigar os efeitos do *wave wash* em navios atracados nos portos. As simulações computacionais utilizando a modelagem numérica evidenciaram que esse problema pode gerar forças significativas sobre as embarcações ancoradas, resultando em possíveis danos estruturais e sobrecargas nos sistemas de amarração.

Outras análises foram feitas por Zhou, Abdelwahab e Guedes Soares (2021). Utilizando modelos em escala e modelagem de fluidos computacionais eles investigaram as implicações da passagem de uma fragata em alta velocidade em um navio atracado em um porto, em diferentes condições. Seus resultados mostraram que além da velocidade, a distância entre as embarcações e a profundidade do canal de passagem também afetam a interação entre os dois, sendo a primeira o parâmetro mais expressivo observado.

Uma abordagem semelhante foi discutida por Sreedevi e Nallayarasu (2022), por meio de análises CFD eles realizaram comparações do efeito das ondas geradas por embarcações em navios ancorados, considerando variados casos e constataram que, além dos parâmetros citados anteriormente, o tamanho das embarcações, de passagem e atracada, também influencia a força das ondas que atuam sobre o navio ancorado.

Suprayogi et al. (2022) investigaram os limites de velocidade para embarcações pesqueiras em águas confinadas do Rio Mersing, na Malásia, com base na altura das ondas geradas pelas embarcações. O estudo de campo envolveu análises experimentais das

características das ondas geradas para condições controladas de maré. Os resultados mostraram que é possível estabelecer limites de velocidade específicos para evitar a amplificação excessiva das ondas em águas restritas considerando também a energia gerada por elas. Essa abordagem pode ser aplicada como uma ferramenta prática para regulamentar a velocidade das embarcações pesqueiras em áreas sensíveis, contribuindo para a mitigação de potenciais danos ambientais e à outras embarcações.

A pesquisa de Qian et al. (2022) abordou a análise da interação entre ondas geradas por embarcações e a erosão das margens na hidrovia Sabine-Neches, Texas, EUA. Foram realizadas medições de campo e utilizados modelos numéricos para simular os efeitos das ondas. Os resultados indicaram que as ondas produzidas pelas embarcações têm um papel significativo na erosão das margens fluviais e estuarinas, sendo a taxa de erosão proporcional à altura das ondas e essa altura fortemente influenciada pela velocidade e pelo calado da embarcação.

Fleit e Baranya (2022) apresentam uma análise experimental do escoamento do *wave wash* de navios em um rio de águas rasas utilizando a técnica de Velocimetria de Imagem de Partículas de Alta Resolução (LSPIV). O objetivo do trabalho foi evidenciar a aplicação da metodologia que se mostrou capaz de fornecer informações valiosas sobre as características do escoamento e velocidade das ondas geradas pelos navios. Deve ser levado em consideração que o método fornece somente velocidades de superfície.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Classificação de embarcações por regime de operação

Do ponto de vista hidrodinâmico, uma das formas de classificação das embarcações, segundo o seu regime de operação, é de acordo com o seu número de Froude, proposto originalmente por William Froude, representado pela Equação 1:

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

Sendo:

F_{nL} – número de Froude de comprimento;

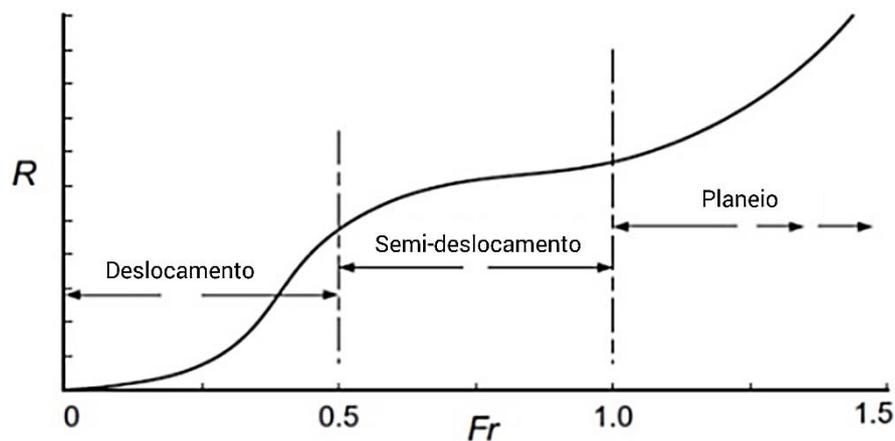
V – velocidade de serviço;

g – aceleração da gravidade;

L – comprimento da embarcação na linha d'água.

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), os variados tipos de embarcações podem ser classificados em três categorias principais: deslocamento, semideslocamento e planeio. Essas categorias são determinadas pelo seu regime hidrodinâmico em diferentes faixas de velocidade, conforme ilustrado na Figura 3. Cabe mencionar que essas faixas são aproximadas, não havendo valores de velocidade exatos para a sua definição.

Figura 3 - Classificação do regime hidrodinâmico em função do número de Froude.



Fonte: Adaptado de Molland, Turnock e Hudson (2011).

Resumidamente, Molland, Turnock e Hudson (2011) descrevem os diferentes tipos de embarcações como:

Embarcações de deslocamento: As embarcações de deslocamento são projetadas para navegar em velocidades relativamente baixas, onde o casco desloca uma quantidade significativa de água para frente à medida que avança. Nessa categoria, o número de Froude varia entre 0 e $\sim 0,5$. Essas embarcações são sustentadas principalmente por forças de flutuação, sendo desprezados os efeitos dinâmicos. A resistência ao avanço é dominada pelas forças de resistência hidrodinâmica geradas pela água ao redor do casco conforme a embarcação se desloca.

Embarcações de semideslocamento: Essas embarcações combinam características das embarcações de deslocamento e das de planeio. Elas são projetadas para operar em velocidades intermediárias e possuem um casco que permite que a embarcação alcance velocidades mais altas do que as de deslocamento, mas sem alcançar o regime de planeio completo. As embarcações são sustentadas por uma combinação de forças de flutuação e forças de sustentação dinâmica. No regime de semideslocamento, as velocidades estão na faixa de Froude entre $\sim 0,5$ e $\sim 1,0$. A resistência ao avanço é influenciada tanto pelas forças de resistência hidrodinâmica quanto pelas forças de sustentação dinâmicas à medida que o barco começa a se elevar parcialmente sobre a água.

Embarcações de planeio: Essas embarcações são projetadas para atingir velocidades muito elevadas, onde a força de sustentação gerada pelo casco é maior do que o peso da embarcação, ou seja, a sustentação é feita principalmente por forças dinâmicas. À medida que a embarcação acelera, a forma do casco e a configuração do sistema de planeio permitem que ele se eleve totalmente da água, resultando em uma redução significativa no atrito hidrodinâmico e, conseqüentemente, alcançando uma maior velocidade. Nessa categoria as embarcações possuem um número de Froude geralmente maior do que $\sim 1,0$.

3.2 Geração de ondas por embarcações

3.2.1 *Wave wash* (Lavagem causada por ondas)

O termo *wave wash* é frequentemente usado para descrever as ondas criadas por embarcações em movimento que atingem e interagem com outras embarcações, embarcadouros, margens ou objetos próximos. Isso geralmente acontece com mais intensidade em águas mais calmas e abrigadas, como portos, rios e canais, onde a propagação das ondas é

menos afetada por condições externas, como vento e ondas oceânicas (Saha; Abdullah; Ashrafuzzaman, 2017).

Quando uma embarcação se move em alta velocidade, ela pode gerar um "rastro" de ondas que se propaga para além da embarcação, e ao alcançar áreas com obstáculos, elas podem causar um efeito de inundação temporária ou agitação das águas. Esse fenômeno pode ser problemático para embarcações menores ou instalações próximas às margens ou costa, pois a força das ondas pode causar instabilidade ou danos.

Os eventos de *wave wash* podem ter impactos negativos, especialmente em áreas onde há outras embarcações ancoradas ou áreas costeiras frágeis (Li; Yuan; Gao, 2018). As ondas podem balançar outras embarcações e causar danos à elas ou aos equipamentos. Nos rios amazônicos, a ação das ondas pode contribuir para o processo de erosão das margens, afetando a paisagem e representando uma ameaça às estruturas próximas, como habitações e construções ribeirinhas.

3.2.2 Padrões de onda

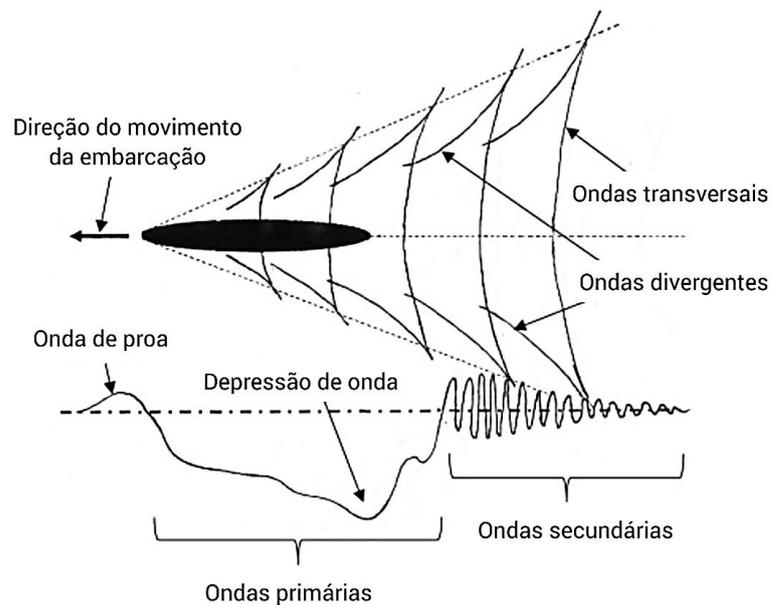
A esteira de ondas deixadas por uma embarcação em movimento se configura em um conjunto de ondas complexo que pode ser dividido em dois tipos: ondas primárias e ondas secundárias (Qian et al., 2022).

As ondas primárias referem-se as ondas formadas pela variação de pressão ao longo do casco. A embarcação se move deslocando a água à sua frente para trás, esse movimento cria uma região de maior pressão na proa que resulta na elevação da superfície da água, formando as denominadas ondas de proa. Ao longo do casco essa pressão reduz e a velocidade do fluido aumenta, causando uma depressão marcante do nível da água, de longo período e que se movimenta no sentido contrário ao movimento da embarcação. Essa região onde ocorre a diminuição no nível da água é chamado de sistema de ondas primário. Na região posterior, a pressão se eleva novamente e nivela com o nível da água, gerando as ondas de popa (Sorensen, 1997 apud Gabel; Lorenz; Stoll, 2017).

De acordo com Jiang, Henn e Sharma (2002), a altura da depressão de onda é diretamente proporcional à velocidade da embarcação. Esse fenômeno da diminuição do nível da água, como apontam Larson et al. (2017), é mais significativo em vias aquáticas restritas e é fortemente influenciada pelo comprimento, largura e boca da embarcação. Quanto maior for a embarcação, e mais estreita for a hidrovia, maior será o rebaixamento da água causado por ela.

As ondas secundárias foram definidas primeiramente por Kelvin (1824-1907), quem introduziu os estudos sobre padrão de ondas geradas por uma embarcação. Em sua teoria, ele determinou que essas ondas podem ser divididas em dois conjuntos: sistema de ondas divergentes, que se origina da curvatura do barco, movendo-se obliquamente para fora da direção da embarcação, e o “sistema transversal”, que se propaga em ângulos quase retos ao curso do navio (Nascimento, 2007; Saha; Abdullah; Ashrafuzzaman, 2017; Qian Et Al., 2022). Nessa teoria, não são considerados os efeitos viscosos (Molland; Turnock; Hudson, 2011). A Figura 4 demonstra o sistema de ondas criado pelo movimento de uma embarcação.

Figura 4 – Padrões de ondas gerados por uma embarcação.

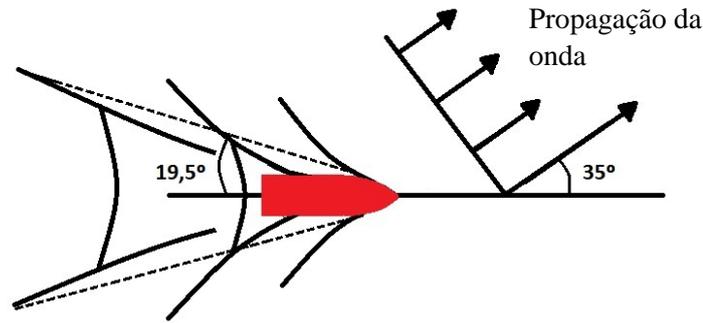


Fonte: Adaptado de Qian et al. (2022).

Segundo Nascimento (2007) as ondas produzidas por uma embarcação também podem ser classificadas como em ondas de águas profundas (quando $h/\lambda > 0,5$) ou ondas de águas rasas (quando $h/\lambda < 0,04$), sendo “h” a profundidade da lâmina d’água e “ λ ” o comprimento da onda.

Kelvin estabeleceu que um objeto em movimento constante, como um navio, sempre gera ondas em águas profundas. Essas ondas, intrigantemente, mantêm-se confinadas numa região de formato semelhante a um ‘V’, diretamente atrás do objeto, configurando-se em um semiângulo de $19,5^\circ$ em relação à referência imaginária do percurso da embarcação e com um ângulo de propagação igual a 35° em relação à essa mesma referência (Nascimento, 2007), conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Ângulos de propagação das ondas.



Fonte: Elaboração Própria, com dados extraídos de Nascimento (2007).

O parâmetro que melhor descreve o comportamento das ondas em águas profundas é o número de Froude de comprimento, definido na seção 3.1 pela Equação 1. A partir desse parâmetro adimensional é estudado o comportamento das ondas em diferentes regimes de velocidades. O comprimento e a forma das ondas secundárias dependem diretamente do número de Froude, à medida que o valor do parâmetro aumenta, o comprimento das ondas transversais se torna cada vez maior até ficarem praticamente imperceptíveis, restando apenas o sistema de ondas divergentes para números de Froude iguais ou maiores que 1 (Nascimento, 2007).

Para águas rasas, Havelock (1908 apud Nascimento, 2007) demonstrou que podem aparecer três diferentes padrões de ondas que, nesse caso, vão depender do número de Froude de profundidade, determinado pela Equação 2:

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

Onde:

F_{nh} - é o número de Froude de profundidade;

V - a velocidade de serviço da embarcação;

g - corresponde à aceleração da gravidade;

h - a profundidade da hidrovia.

Em seus resultados, Havelock demonstrou que quando a velocidade da embarcação e a profundidade do local obedecem a relação $F_{nh} < 1$, caracterizado como faixa de velocidade subcrítica, o padrão de ondas se assemelha ao de águas profundas, sendo idênticos para números de Froude de até 0,7 e alterando apenas o ângulo que dá início a forma em V, que no caso será maior, para valores de Froude mais próximos de 1. Quando $F_{nh} = 1$, na faixa de velocidade crítica, as ondas transversais e divergentes se unificam e foram uma só, as ondas transversais já

não são observáveis e formam ondas divergentes com um ângulo maior. Em velocidade supercrítica, quando $F_{nh} > 1$, apenas o sistema de ondas divergente é produzido pelo movimento da embarcação e o ângulo que forma o V é menor (Havelock, 1908 apud Nascimento, 2007).

4 METODOLOGIA

4.1 Diagrama de fluxo das análises

O procedimento de análise seguido no presente trabalho é resumido na Figura 6 e consiste, inicialmente, na escolha do modelo da embarcação e a definição de suas características principais do casco. Em seguida, o modelo do casco é criado no software *Maxsurf Modeler*, uma ferramenta de modelagem naval da Bentley Systems[®]. Com o modelo pronto, é gerado o Plano de Linhas, que representa a geometria detalhada do casco em diferentes seções longitudinais e transversais.

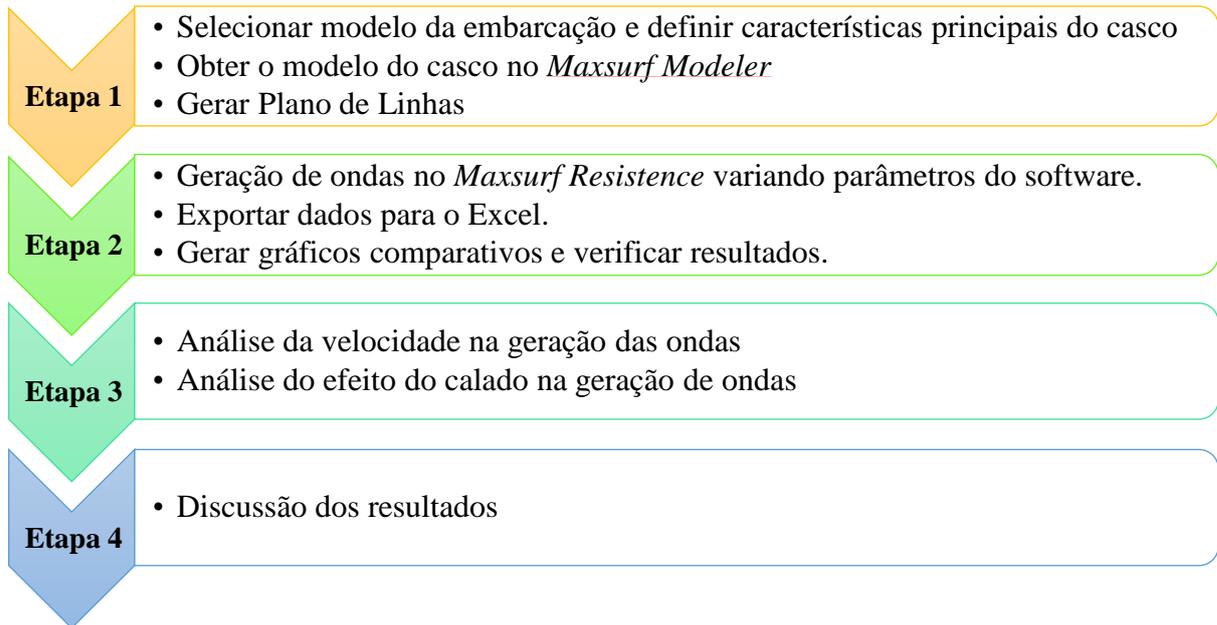
O passo seguinte envolve a análise da geração de ondas utilizando o software *Maxsurf Resistance*. A abordagem utilizada está baseada no método do corpo esbelto, disponível no software como *Slender body method/theory*.

A primeira análise consiste em avaliar os efeitos dos parâmetros de entrada do software, de maneira a propor um procedimento de estudo confiável. A geometria do casco é importada para o software, onde são variados parâmetros relevantes para o estudo, como forma do caso, e os parâmetros de entrada para o cálculo de superfície livre: exagero vertical (*vertical exaggeration*), grade transversal e longitudinal (*transversal and longitudinal grid*), e precisão da integração (*integration precision*). Os resultados são exportados para o Excel para melhor organização e análise dos dados. A partir disso, gráficos comparativos são gerados para visualizar e compreender as diferenças entre os resultados obtidos para diferentes parâmetros do software.

Posteriormente, utilizando o *Maxsurf Resistance*, são analisados os efeitos da velocidade da embarcação na geração de ondas, uma vez que o padrão de ondas é diretamente influenciado pela velocidade de avanço da embarcação. Outro fator examinado é a influência da variação do calado (ou seja, a profundidade do casco abaixo da linha d'água) na geração das ondas, avaliando como diferentes níveis de imersão afetam a superfície livre da água modificada pela embarcação.

Por fim, os resultados são discutidos, interpretados e possíveis conclusões são extraídas, com indicações para o correto uso do software e proporcionando um embasamento preliminar para pesquisas futuras.

Figura 6 - Procedimento de análise.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Descrição da embarcação

O presente estudo considera em suas análises uma embarcação de alta velocidade, conhecida na região amazônica como “expresso”, cujo modelo é representado na Figura 7. Embarcações desse tipo são conhecidas por sua capacidade de alcançar velocidades significativamente altas em relação à outras embarcações da região, sendo geralmente classificadas no regime de velocidade de semideslocamento.

Figura 7 - Exemplo de embarcação regional do tipo expresso.



Fonte: Elaboração própria.

Para a obtenção do modelo de casco a ser estudado, uma embarcação existente foi selecionada como referência. Foram utilizadas características principais de uma lancha tipo expresse que faz o transporte de passageiros de Manaus/AM para Parintins/AM. Essas características podem ser visualizadas na Tabela 1.

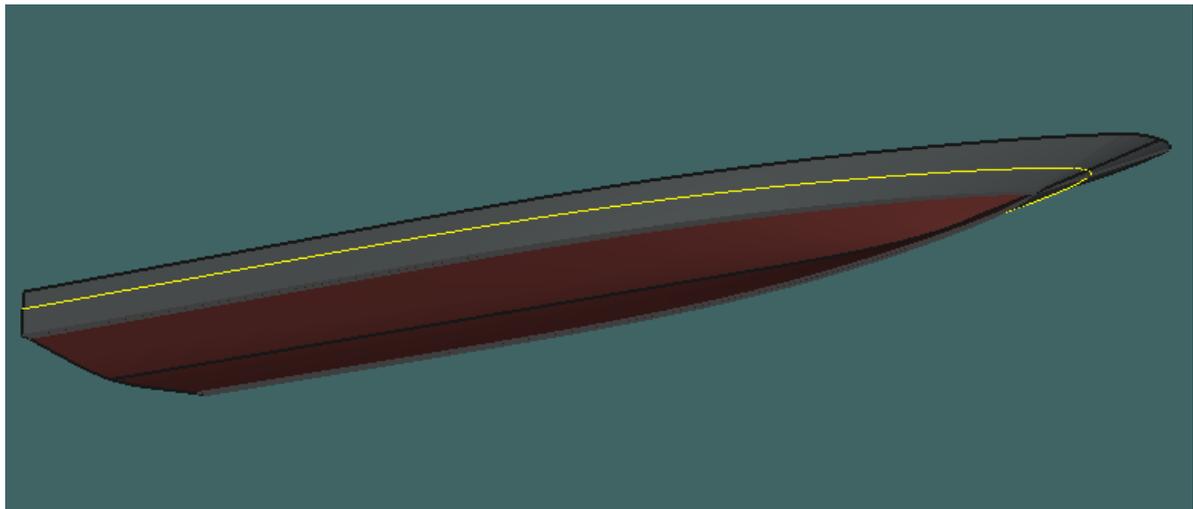
Tabela 1 - Características principais da embarcação.

Características principais		
Comprimento total (LOA)	24,850	m
Comprimento na linha d'água (LWL)	23,378	m
Boca moldada	3,650	m
Pontal moldado	0,900	m
Calado de projeto	0,765	m
Calado máximo carregado	0,634	m

Fonte: Elaboração própria.

Com as dimensões de uma embarcação tipo expresse real, foi obtido um modelo similar no *Maxsurf Modeler* (Figura 8), o qual foi nomeado casco padrão. O casco foi feito adaptando um modelo pré-pronto do software às características da embarcação de referência. A linha amarela reproduz a linha de flutuação da embarcação.

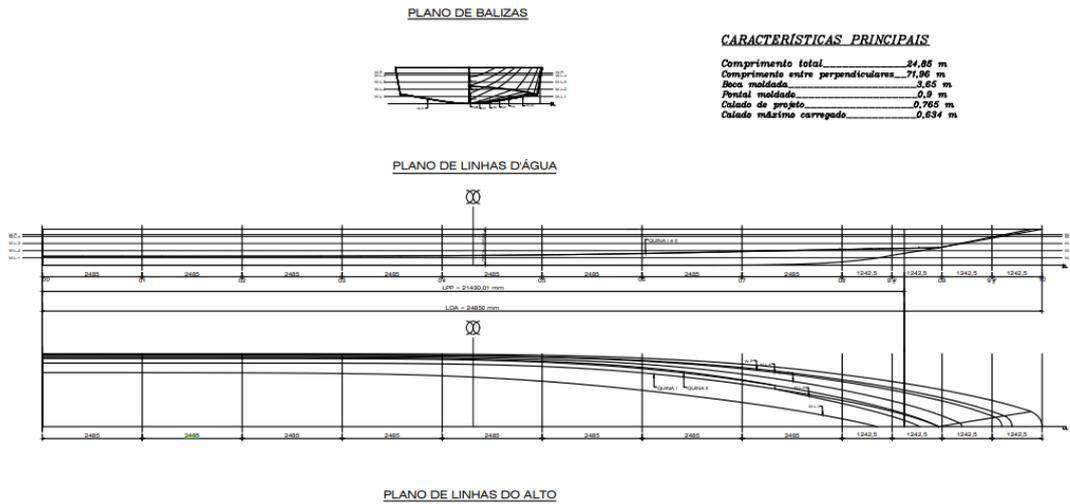
Figura 8 - Modelo do casco obtido no software *Maxsurf Modeler*.



Fonte: *Maxsurf Resistance* (2023)

O plano de linhas do casco foi elaborado a partir da geometria do casco gerada no *Maxsurf Modeler* e está apresentado na Figura 9, onde podem ser visualizadas as representações 2D da forma do casco. O plano de linhas pode ser mais bem visualizado no Apêndice A.

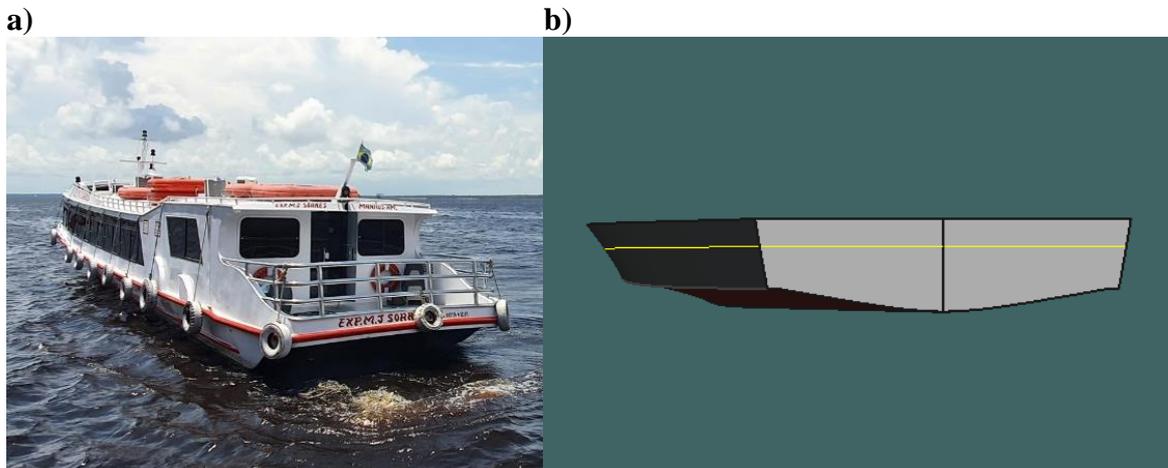
Figura 9 - Plano de linhas do casco padrão.



Fonte: Elaboração própria.

Embarcações de semideslocamento apresentam algumas características específicas em seu casco. De acordo com Alonso (2016), eles são projetados para reduzir a pressão negativa que se forma na região da popa, e por isso possuem um formato de popa larga e plana, chamada de popa transom. Essa característica é comum em embarcações expresso (Figura 10a) e pode ser observada no modelo do casco utilizado (Figura 10b).

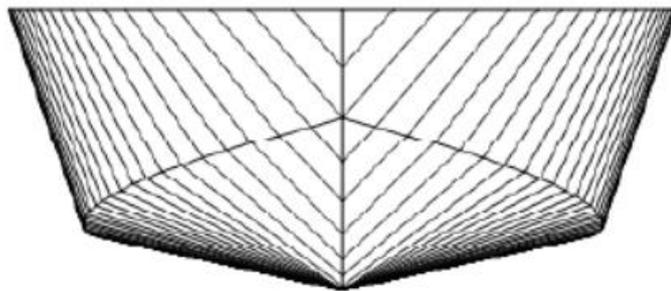
Figura 10 - Popa transom. a) popa de uma embarcação expresso. b) popa do casco estudado.



Fonte: a) Elaboração própria; b) *Maxsurf Resistance* (2023).

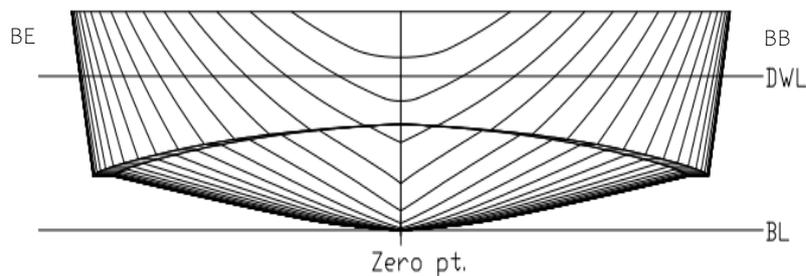
Outra característica importante, é que geralmente o formato do casco começa em V na proa e gradualmente vai adquirindo um formato de "U" na popa (Alonso, 2016). A Figura 11 apresenta um modelo de plano de balizas de um casco do tipo semideslocamento e a Figura 12 o plano de balizas do casco considerado nas análises deste trabalho. Nota-se que a embarcação estudada parece mais achatada pois em sua modelagem não foi considerada a superestrutura e seu formato de proa parece mais arredondado pois o modelo de embarcação existente utilizado como referência possui a mesma característica.

Figura 11 - Exemplo de plano de balizas de um casco de semideslocamento.



Fonte: Ribeiro (2009) *apud* Afonso (2016).

Figura 12 - Plano de balizas do casco estudado.

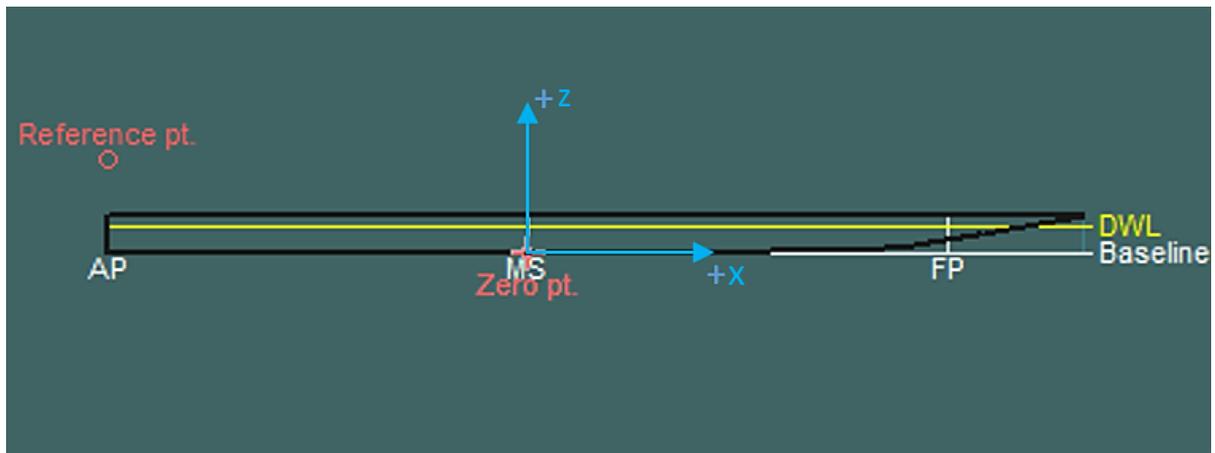


Fonte: Elaboração própria.

Além da análise comparativa entre os cascos, para confirmar o regime hidrodinâmico da embarcação, foi realizada uma análise do seu número de Froude utilizando a Equação 1. De acordo com Amazonastour [202-?], a distância fluvial entre Manaus/Am e Parintins/Am é de 420 km e o tempo médio de viagem das lanchas expresso saindo de Manaus é de 8h, levando em consideração que nesse percurso a embarcação viaja a favor da correnteza. A partir desses dados e do comprimento da embarcação da linha d'água, sabendo que $g = 9,81\text{m/s}^2$, o número de Froude da embarcação para essas condições seria igual a 0,9, atendendo, portanto, o regime de semideslocamento.

Para a verificação dos resultados deste estudo, é importante conhecer o sistema de referência do casco considerado no *Maxsurf Modeler*. A Figura 13 mostra os principais pontos de referência do casco, onde é possível observar que a origem do sistema de coordenadas, representada por “zero pt” (*zero point*), se localiza na seção mestra (MS). Os valores na direção à vante e acima da linha de base (*Baseline*) são tidos como positivos, e os valores à ré e abaixo da linha de base como negativos. A linha de base do projeto é posicionada na direção da quilha. A linha d’água no calado máximo carregado é simbolizada por DWL. FP e AP indicam, respectivamente, a perpendicular de vante e a perpendicular de ré. Na Figura 12, mencionada anteriormente, é possível ver o centro do sistema na seção transversal, sendo positivos os valores no sentido de boreste (BE), e negativos os de bombordo (BB).

Figura 13 - Pontos de referência principais no software *Maxsurf Modeler*.



Fonte: Adaptado de *Maxsurf Modeler*.

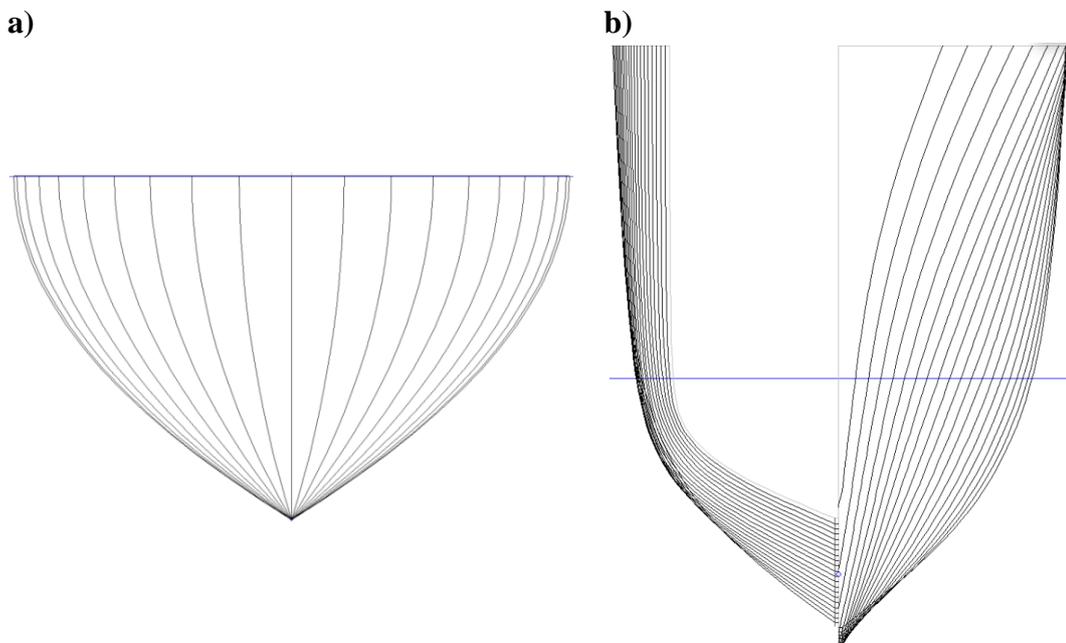
4.3 Descrição do método de cálculo de padrões de ondas no *Maxsurf Resistance*

No presente trabalho, será utilizado um método disponível no *Maxsurf Resistance* para avaliar as ondas de superfície geradas pela embarcação em movimento. O método está baseado na Teoria do Corpo Esbelto. *Maxsurf Resistance* é um software tipicamente usado na área de Hidrodinâmica para prever a resistência ao avanço de uma embarcação, pois possui diversos modelos de uso prático. Os métodos disponíveis consideram diversas técnicas, incluindo modelos baseados em regressão e um método analítico, para prever essa resistência. Além do cálculo da resistência ao avanço, o software também nos permite realizar cálculos de superfície livre, permitindo prever o padrão de ondas gerado pelo casco analisado.

A Teoria do Corpo Esbelto é um método analítico utilizado no campo da hidrodinâmica naval para calcular a resistência ao avanço de um navio e analisar a formação de ondas de embarcações em movimento. Ela é uma aplicação da teoria do escoamento potencial, que é um modelo matemático que descreve o escoamento de fluidos de maneira simplificada, onde o fluido é considerado invíscido, eliminando a influência dos efeitos de atrito. Além disso, o método também não considera os efeitos de quebra de onda (Bentley, 2020). Essa teoria é particularmente aplicável em embarcações com geometrias alongadas, onde o comprimento do casco é muito maior em relação à boca e ao calado da embarcação (Vossers, 1962).

O software *Maxsurf Resistance* possui um solver integrado do método do corpo esbelto para calcular a resistência ao avanço ou o trem de ondas gerado por uma embarcação esbelta. É importante mencionar que o método para calcular a resistência ao avanço usando a teoria do corpo esbelto é um método analítico que, no caso do software *Maxsurf Resistance*, apenas foi validado para uma embarcação do tipo Wigley (Figura 14a) e NPL round-bilge (Figura 14b), comumente usados em embarcações multicasco, como mostrado no apêndice C do Manual do Software (Bentley, 2020).

Figura 14 - Tipos de cascos esbeltos utilizados na validação do método do corpo esbelto disponível no software *Maxsurf Resistance* (Bentley, 2020). Planos de linhas transversal dos cascos tipo (a) Wigley e (b) NPL (model 4a).



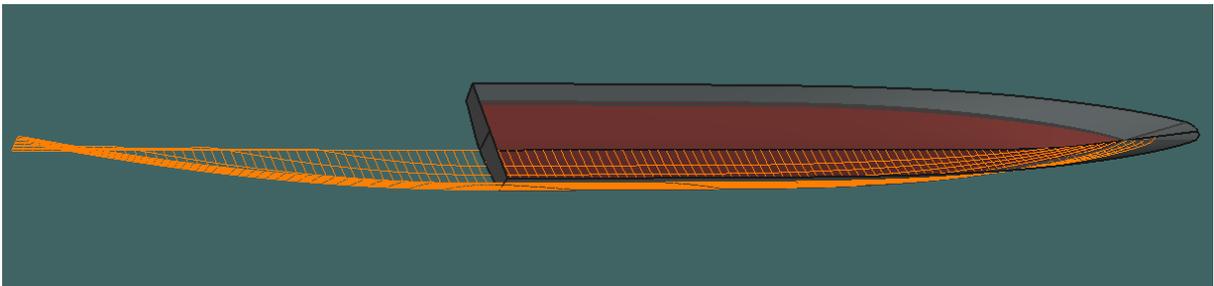
Fonte: Bentley (2020).

Para usar esse método no *Maxsurf*, uma malha de superfície é calculada. Essa malha é na verdade um conjunto de seções transversais e linhas d'água que formam uma grade no formato da embarcação. O refinamento da malha depende da quantidade de seções adicionadas. Dessa forma, quanto maior o número de seções mais exato será o resultado (Bentley, 2020).

A fim de atender à teoria do método do corpo esbelto, é necessário que a malha comece e termine com linhas d'água que se conectem à linha de centro. Portanto, tanto a proa quanto a popa devem conter seções com valores de ponto igual a zero (Bentley, 2020).

No caso de embarcações com popa transom, uma malha que se ajuste completamente à forma da embarcação estaria desatendendo o requisito mencionado anteriormente. Sendo assim, o software considera a geometria base da embarcação e aproxima a malha como um corpo esbelto (fino e alongado). Ou seja, caso a embarcação tenha popa transom, o software vai considerar um corpo com popa afilada, adicionando um “apêndice virtual” nessa região (Bentley, 2020), como demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Apêndice virtual.



Fonte: *Maxsurf Resistance* (2023).

A implementação desse apêndice virtual foi discutida por Couser, Wellicome e Molland (1998). Em seus estudos os autores concluíram que, ao incluir o apêndice, os resultados apresentados são mais compatíveis com a realidade para embarcações com popa transom.

O apêndice tem como consequência a ligação de todas as linhas d'água à linha central da embarcação. Vale destacar que o apêndice não faz parte do cálculo da área molhada; a sua função está restrita a atender ao modelo numérico empregado no cálculo da resistência das ondas (Bentley, 2020).

Através da Teoria do Corpo Esbelto, o software é capaz de determinar a energia presente no padrão de ondas formado na superfície livre devido ao deslocamento da embarcação. Essencialmente, isso permite estimar a resistência associada à geração dessas ondas. No entanto, para chegar a uma estimativa da resistência total, o *Maxsurf Resistance* incorpora

também o cálculo da componente de resistência viscosa. Isso é realizado através do uso do método do coeficiente de atrito ITTC'57, e do fator de forma designado (Bentley, 2020).

Tanto o cálculo de resistências das ondas quanto o cálculo de padrão de ondas, utilizam a mesma teoria. Detalhes do desenvolvimento do método do corpo esbelto disponível no software podem ser encontrados nas seguintes referências, pois foi baseado nelas: Tuck et al. (1999) e Courser et al. (1996). Para o caso de monocascos simétricos, o cálculo de resistência das ondas foi fundamentado no estudo de Michell (1898).

4.3.1 Aplicabilidade do método e restrições

O uso do método disponível no software está sujeito a restrições de uso, as quais podem ser encontradas no manual. De maneira geral, ele pode ser utilizado em uma variedade de formatos de casco, incluindo os monocascos, desde que eles apresentem características esbeltas e sejam simétricos em relação à sua linha central. Além disso, o método do corpo esbelto também pode ser aplicado para formas de casco que possuam porão redondo ou quinas (Bentley, 2020). Para a correta utilização, algumas considerações da **forma do casco**, **velocidade** e **dimensões** devem ser levadas em conta.

Forma do casco: deve ser esbelta (o mais fina e alongada possível). O método do corpo esbelto pressupõe que a embarcação possui uma forma esguia, caracterizada por uma alta relação entre o comprimento e a boca, ou seja, uma alta razão de esbeltez (L/B). Essa razão de esbeltez deve ser maximizada; porém, resultados satisfatórios podem ser alcançados com razões de esbeltez na faixa de 5,0 a 6,0 (Bentley, 2020). No presente trabalho a razão de esbeltez do caso de estudo padrão é $L/B = 6,56$, considerando um comprimento na linha d'água de 23,378 m e uma boca de 3,56 m.

Velocidade: O limite inferior de velocidade para o uso do método do corpo esbelto está definido no manual como 0. Por outro lado, o limite superior é até $F_{nL} \approx 1,0$, dependendo no raio de esbeltez (L/B). F_{nL} corresponde ao número de Froude de comprimento, definido pela Equação 1 (Vide Seção 3.1).

A faixa máxima de números de Froude que permite a obtenção de resultados coerentes está sujeita ao raio de esbeltez da embarcação. No caso de cascos extremamente esbeltos, possuindo razões de esbeltez acima de 7,0, é possível que o método do corpo esbelto forneça resultados plausíveis mesmo quando lidando com números de Froude tão elevados quanto 1,0 (Bentley, 2020).

Não são consideradas as forças resultantes do modo de operação de planeio. Como resultado, sua aplicabilidade está restrita a uma faixa específica de velocidades, antes do início do planeio (Bentley, 2020).

Dimensões: para usar a teoria do corpo esbelto disponível no *Maxsurf Resistance*, a relação $L/V^{1/3}$ deve estar na seguinte faixa:

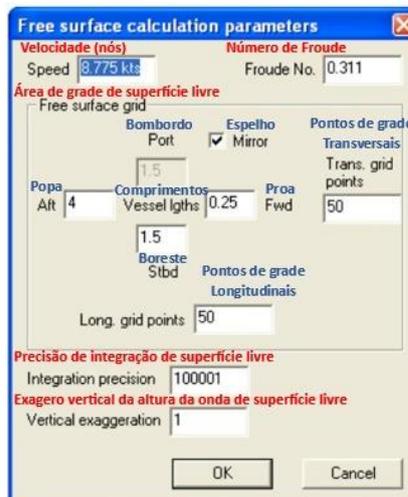
$$\approx 4 \text{ ou } 5 < L/V^{1/3} < \text{sem limite}$$

Sendo L o comprimento da linha d'água e V o volume deslocado. No caso padrão da embarcação considerada no presente estudo, com um calado de operação de 0,634 m, e um comprimento na linha d'água de 23,378 m, o volume deslocado corresponde a 33,034 m³. Portanto $L/V^{1/3} = 7,29$.

É importante ressaltar que a adequação do método do corpo esbelto depende da relação entre o raio de esbelteza do casco e a faixa de velocidade na qual ele está sendo analisado. Conforme o número de Froude diminui, a razão mínima de esbelteza em que o método é válido também diminui. Por exemplo, para um número de Froude igual a um, a razão de esbelteza mínima seria em torno de 7,5 a 8,0. Mas caso o número de Froude aplicado na análise seja reduzido para 0,2, o método pode ser utilizado mesmo com relações de esbelteza tão baixas quanto 4,0. Em essência, a relação entre o número de Froude e a esbelteza estabelece os limites práticos nos quais o método do corpo esbelto pode ser confiável (Bentley, 2020).

Para aplicar o método do corpo esbelto no *Maxsurf*, alguns parâmetros precisam ser definidos (Figura 16). A seguir, são apresentadas as definições dos parâmetros de acordo com o manual do *Maxsurf Resistance* (Bentley, 2020).

Figura 16 - Parâmetros de cálculo da superfície livre que precisam ser configurados no software *Maxsurf Resistance*.



Fonte: Adaptado de Bentley (2020).

Velocidade de superfície livre (*Speed or Froude No.*):

Dentro da caixa de diálogo dos Parâmetros de Cálculo da Superfície Livre (Figura 16), tem-se a opção de definir a velocidade de operação na qual o cálculo do padrão de ondas na superfície livre será realizado. Essa velocidade pode ser inserida de duas formas: diretamente como um valor de velocidade (*Speed*) ou expresso como um Número de Froude (*Froude No.*).

Essa velocidade é geralmente expressa em unidades como nós (milha náutica por hora) ou metros por segundo, dependendo da conveniência do usuário. O Número de Froude é uma quantidade adimensional amplamente utilizada em hidrodinâmica para relacionar a velocidade de um objeto em movimento na superfície da água com o comprimento característico do mesmo, definido pela Equação 1, conforme seção 3.1. Ao definir o valor de um desses parâmetros, a conversão é feita automaticamente.

Área de grade de superfície livre (*Free surface grid*):

Essa opção é utilizada para especificar a extensão da área sobre a qual o software irá calcular a superfície livre. A área é determinada em termos de comprimentos da embarcação. O usuário pode definir o número de comprimentos da embarcação à vante (*Fwd*), à ré (*Aft*), a bombordo (*Port*) e a boreste (*Stdb*) que serão considerados para o cálculo da superfície livre. É importante selecionar uma área adequada da grade da superfície livre que cubra a região de interesse da análise e forneça informações relevantes para o projeto da embarcação. Também é possível definir o número de pontos da grade a serem usados nas direções transversal e longitudinal (Pontos de grade transversais e longitudinais) dentro dessa área delimitada.

Para casos em que a embarcação é simétrica em relação à linha de centro, o *Maxsurf Resistance* oferece a opção de calcular uma superfície livre simétrica, na qual apenas o lado a boreste é calculado e, em seguida, é automaticamente espelhado para gerar o lado a bombordo. Isso pode economizar tempo de cálculo e recursos computacionais quando aplicável.

Por outro lado, em modelos assimétricos a opção de espelhamento não estará disponível, pois a superfície livre de água apresentará diferenças entre o lado a bombordo e o lado a boreste, exigindo cálculos distintos para cada lado.

Precisão de integração de superfície livre:

Esta configuração permite ajustar a precisão do cálculo da superfície livre. A precisão de integração é um fator importante na determinação da exatidão dos resultados obtidos no cálculo das superfícies livres. Quanto maior o valor selecionado para essa opção, maior será a precisão numérica do cálculo. No entanto, é necessário observar que o método de integração

requer que esse valor seja ímpar e, caso necessário, o software fará o ajuste automático para atender a essa condição.

É essencial encontrar um equilíbrio entre a precisão do cálculo e o tempo de processamento necessário para realizar as análises. Valores mais altos de precisão podem resultar em cálculos mais detalhados, mas também podem demandar mais tempo para serem concluídos. Por outro lado, valores mais baixos podem gerar resultados aceitáveis para determinados tipos de visualização, mas podem não ser suficientes para obter gráficos de contorno suaves e precisos em outras situações.

É recomendado ajustar a precisão de integração de acordo com a complexidade do projeto da embarcação e o tipo de resultados desejados. Para visualizações em 3D ou para obter informações mais detalhadas sobre a superfície livre da água, valores mais altos de precisão podem ser necessários (na ordem de ~ 30.000). Por outro lado, para análises mais rápidas ou projetos menos complexos, valores mais baixos podem ser suficientes. Tais valores também dependem Número de Froude.

Exagero vertical da altura da onda de superfície livre:

Esse parâmetro permite ao usuário aumentar ou diminuir a exibição visual do padrão de ondas na superfície livre, sem a necessidade de recalculá-la. Após o cálculo do padrão de ondas, o usuário pode aplicar esse fator de exagero vertical para ampliar ou reduzir a altura aparente das ondas na representação do software.

Ao alterar o exagero vertical, o padrão de ondas exibido na superfície livre será distorcido proporcionalmente de acordo com o valor selecionado. Um fator de exagero maior aumentará a altura aparente das ondas, tornando-as mais visíveis e destacadas, enquanto um fator menor reduzirá a altura aparente das ondas, proporcionando uma visualização mais suave e menos pronunciada do padrão de ondas.

4.4 Casos de estudo

Neste estudo, consideram-se como padrões as características da embarcação definidas na Tabela 2. Todos os casos de análise, com exceção dos resultados gerados para a análise da variação do calado, serão gerados utilizando as medidas dispostas nessa tabela. Os cálculos serão realizados considerando o calado máximo carregado da embarcação modelo (0,634 metros), estabelecido como calado padrão.

Tabela 2 – Medidas consideradas nas análises.

Características principais do modelo padrão		
Comprimento total (LOA)	24,850	m
Comprimento na linha d'água (LWL)	23,378	m
Boca moldada (B)	3,650	m
Boca na linha d'água	3,56	m
Pontal moldado (D)	0,900	m
Calado (d)	0,634	m
Volume deslocado	33,034	m ³
Área na linha d'água	84,036	m ²
L/B	6,56	-

Fonte: Elaboração própria.

Na primeira fase de estudo, foram analisados os efeitos na geração do padrão de ondas utilizando o software *Maxsurf Resistance* para 6 diferentes parâmetros: forma do casco; exagero vertical; grade transversal e longitudinal; precisão da integração; velocidade e calado da embarcação.

Para analisar os efeitos da forma do casco, foi utilizado o casco modelado com as características dispostas na Tabela 2, diferindo apenas a maneira como a popa do casco é apresentada no software. Os parâmetros de cálculo de superfície livre considerados podem ser vistos na Tabela 3. A partir disso, foram calculados padrões de ondas para duas diferentes formas de casco, um com a região da popa transom aberta e outro com a região da popa fechada (Tabela 4).

Tabela 3 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para análise de variação da forma.

Parâmetros de entrada	
F_{nL}	0,497
v	14,627 nós
Grade Transversal	100
Grade Longitudinal	200
Integral de Precisão	90.001
Exagero Vertical	1
À ré	4
À vante	1
Bombordo	2
Boreste	2

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 – Casos analisados para a variação da forma do casco.

Casos	Parâmetro
	Forma do casco
Caso 1A	Popa aberta
Caso 2A	Popa fechada

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, é verificado o efeito do parâmetro de exagero vertical, variando o valor do parâmetro conforme a Tabela 5. Os parâmetros de cálculo de superfície livre foram os mesmos da análise anterior (Tabela 3).

Tabela 5 – Casos analisados para a variação do parâmetro de exagero vertical.

Exagero Vertical	
Casos	Valor do Parâmetro
Caso 1B	1
Caso 2B	4
Caso 3B	8

Fonte: Elaboração própria.

Nas análises da variação da grade transversal e longitudinal, as superfícies livres foram calculadas variando os dois parâmetros igualmente, enquanto os demais parâmetros de entrada permanecem invariáveis (Tabela 6). A faixa de velocidade para a qual os resultados foram gerados foi a sugerida pelo software ao abrir a caixa de diálogo para o cálculo da superfície livre ($F_{nL1} = 0,331$). Mesmo sendo uma velocidade relativamente baixa para a embarcação estudada, esse valor não foi alterado, uma vez que para analisar os efeitos da variação do parâmetro em questão, a velocidade não é um fator determinante.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para a análise da variação da grade transversal e longitudinal.

Parâmetros de entrada	
v	9,75 nós
F_{nL}	0,331
Integral de Precisão	100.001
Exagero Vertical	1
À ré	4

À vante	1
Bombordo	2
Boreste	2

Fonte: Elaboração própria.

Foram rodados cinco casos diferentes, considerando os mesmos valores tanto para a grade transversal, quanto para a grade longitudinal. Os valores dos parâmetros considerados em cada caso estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Casos analisados na variação dos parâmetros da grade transversal e longitudinal.

Grade Transversal e Longitudinal	
Casos	Valor dos parâmetros
Caso 1C	50
Caso 2C	100
Caso 3C	150
Caso 4C	200
Caso 5C	250

Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, foram calculados padrões de onda para diferentes valores da precisão de integração. Assim como na análise anterior, foram gerados resultados para o valor sugerido $F_{nL1} = 0,331$, já que nesse caso ele também não influencia nos resultados. Os demais parâmetros utilizados podem ser visualizados na Tabela 8, estes valores permanecem constantes em todos os casos da análise.

Tabela 8 – Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para as análises da variação do parâmetro de integração da precisão.

Parâmetros de entrada	
v	9,75 nós
F_{nL}	0,331
Grade Transversal	100
Grade Longitudinal	200
Exagero Vertical	1
À ré	4

À vante	1
Bombordo	2
Boreste	2

Fonte: Elaboração própria.

Para a verificação dos efeitos da variação do parâmetro no cálculo de superfície livre, foram calculados seis padrões de ondas para cada número de Froude; a Tabela 7 apresenta os valores para cada caso de estudo considerado.

Tabela 9 - Casos analisados na variação do parâmetro de precisão da integração.

Integral de Precisão	
Casos	Valor do Parâmetro
Caso 1D	2.001
Caso 2D	5.001
Caso 3D	10.001
Caso 4D	50.001
Caso 5D	100.001
Caso 6D	500.001

Fonte: Elaboração própria.

Também, foram verificadas as implicações da variação da velocidade na geração das ondas do casco. Para esta análise, com o objetivo de obter resultados mais acurados, foi empregado o maior valor, com relação às análises anteriores, para um dos parâmetros de entrada que determinam a precisão dos resultados: grade transversal. O valor desse e dos demais parâmetros encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de entrada do cálculo de superfície livre para as análises da variação da velocidade.

Parâmetros de entrada	
Grade Transversal	200
Grade Longitudinal	200
Integral de Precisão	100.001
Exagero Vertical	1
À ré	4

À vante	1
Bombordo	2
Boreste	2

Fonte: Elaboração própria.

O padrão de ondas foi gerado para 5 velocidades diferentes (Tabela 11), considerando velocidades de deslocamento e semideslocamento para análises comparativas.

Tabela 11 - Casos analisados na variação da velocidade.

Velocidade de avanço		
Casos	Valor do parâmetro	F_{nL}
Caso 1E	11,773 nós	0,4
Caso 2E	14,716 nós	0,5
Caso 3E	20,603 nós	0,7
Caso 4E	26,489 nós	0,9
Caso 5E	29,432 nós	1

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, foram calculados padrões de ondas para três diferentes calados, considerando o mesmo comprimento total, boca moldada e pontal definidos como padrão. As demais medidas aplicadas em cada caso podem ser vistas na Tabela 12. Observe que, para o calado padrão (0,634), as medidas são as mesmas da Tabela 2 exibida no início da seção. Os parâmetros de entrada para cálculo de superfície livre foram os idênticos aos aplicados para a análise da variação da velocidade (Tabela 10).

Tabela 12 - Características do casco para cada caso de variação do calado.

Características principais	$d = 0,503$	$d = 0,634$	$d = 0,765$	Unidades
Comprimento na linha d'água (LWL)	22,655	23,378	24,102	m
Boca na linha d'água	3,514	3,56	3,605	m
Volume deslocado	24,045	33,034	42,497	m ³
Área na linha d'água	76,517	84,036	91,857	m ²
L/B	6,45	6,56	6,68	-

Fonte: Elaboração própria.

A velocidade foi a mesma para todos os casos; no entanto, o número de Froude varia devido ao comprimento da linha d'água que é diferente para cada calado. As análises foram feitas levando em conta o calado de projeto e o calado máximo carregado do expresso utilizado como modelo (vide seção 4.2). O calado mínimo considerado foi de 0,503 m. Os casos analisados são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Casos analisados na variação do calado.

Calado de operação				
Casos	Valor do parâmetro	Velocidade	F_{nL}	Nome
Caso 1F	0,503	20,603 nós	0,711	P6C1
Caso 2F	0,634	20,603 nós	0,7	P6C2
Caso 3F	0,765	20,603 nós	0,689	P6C3

Fonte: Elaboração própria.

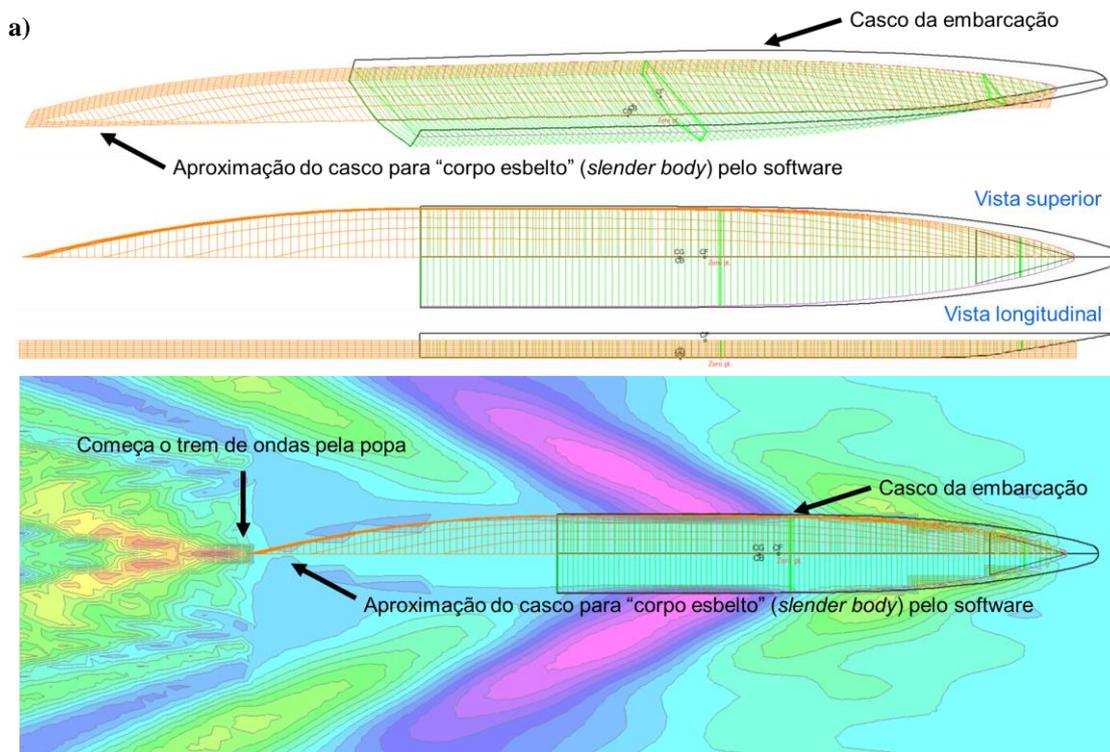
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

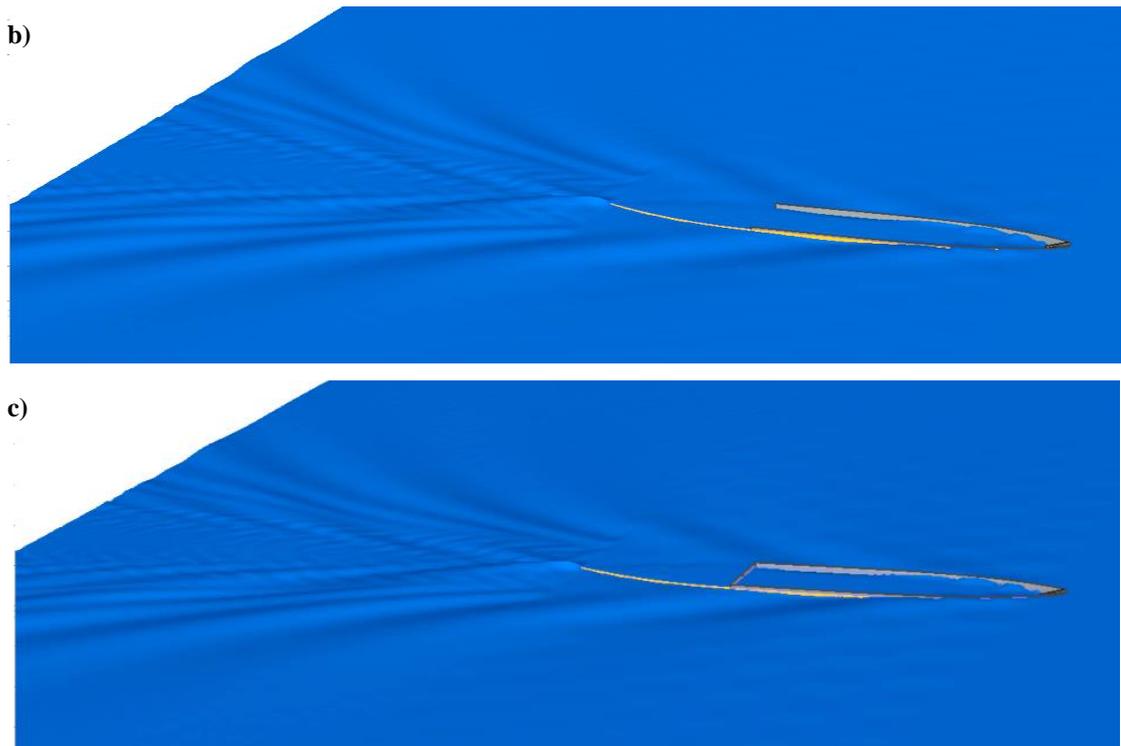
5.1 Efeitos da forma do casco na geração das ondas

O cálculo da superfície livre com o método de corpo esbelto, disponível no *Maxsurf Resistance*, considera uma embarcação alongada e simétrica, sem importar a forma da geometria da embarcação analisada. Por exemplo, no presente estudo foi considerada uma embarcação similar à uma do tipo expresso, comum na região amazônica (vide Seção 4.2), a qual apresenta uma popa descontínua, do tipo transom (Figura 17a). No entanto, o software utiliza um algoritmo que completa a forma do casco até obter uma forma esbelta e alongada.

As Figuras 17b e 17c apresentam uma comparação do trem de ondas gerada pela embarcação, considerando o casco aberto (sem a popa transom) e o casco fechado (com a geometria da popa transom completa), nessa ordem. Os padrões de ondas gerados em ambos os casos são iguais, podendo-se demonstrar que o software considera apenas a geometria externa do casco para gerar o casco esbelto considerado nas análises.

Figura 17 - Efeito da forma do casco na geração de ondas usando o método do corpo esbelto no *Maxsurf Resistance*. (a) Casco esbelto gerado a partir da geometria do expresso com popa tipo transom. (b) Comparação da superfície gerada pela embarcação considerando popa tipo transom aberta. (c) Comparação da superfície gerada pela embarcação considerando popa tipo transom fechada.





Fonte: Adaptado de *Maxsurf Resistance* (2023).

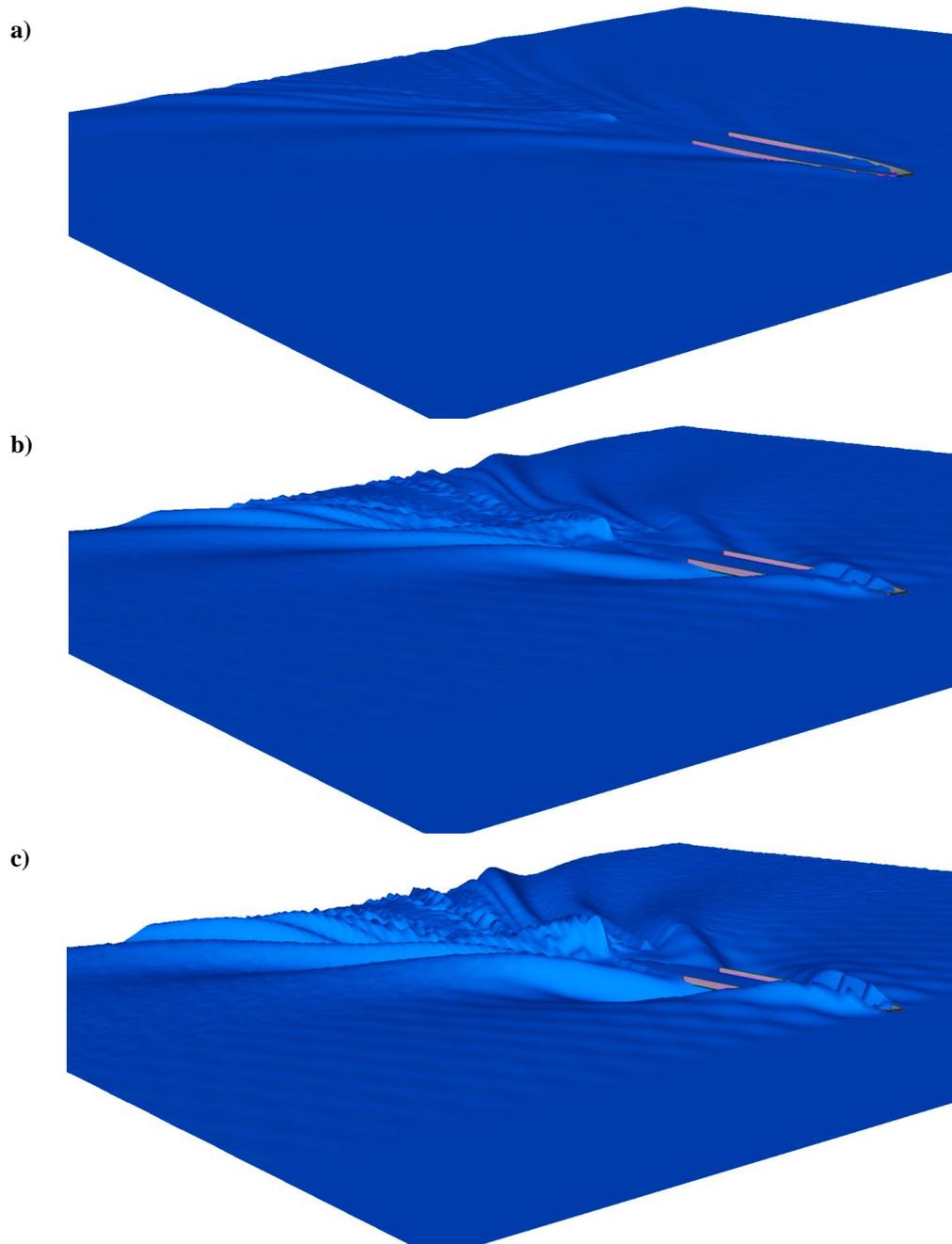
5.2 Efeito do exagero vertical na superfície livre

Na definição dos parâmetros do cálculo da superfície livre no *Maxsurf Resistance*, há o efeito do exagero vertical. Foi verificado por meio de análises sistemáticas, que esse fator apenas ajuda na visualização dentro do software, como mostrado na Figura 18.

A modificação da exageração vertical é apenas uma alteração visual e não afeta os resultados do cálculo da superfície livre. Ou seja, caso os dados sejam exportados como dados numéricos para uso em outro software de processamento, como o Excel ou o Matlab, os valores não são afetados, sendo correspondentes a um exagero vertical. Esse recurso é especialmente útil para fins de visualização e análise, permitindo avaliar de forma mais clara e compreensível o comportamento das ondas ao redor da embarcação.

A Figura 18a mostra o trem de ondas gerado com dados padrão e uma exagero vertical de 1, enquanto as Figuras 18b e 18c mostram os resultados com exagero vertical de 4 e 8, respectivamente. Confere-se que o uso desse parâmetro é meramente para fins ilustrativos, facilitando a visualização do trem de ondas gerado dentro do *Maxsurf Resistance*.

Figura 18 – Efeitos da variação dos valores do exagero vertical na geração das ondas. (a) Trens de ondas para exagero vertical = 1. (b) Trens de ondas para exagero vertical = 4. (c) Trens de ondas para exagero vertical = 8.



Fonte: *Maxsurf Resistance* (2023).

5.3 Efeitos da variação da grade transversal e longitudinal na geração de ondas

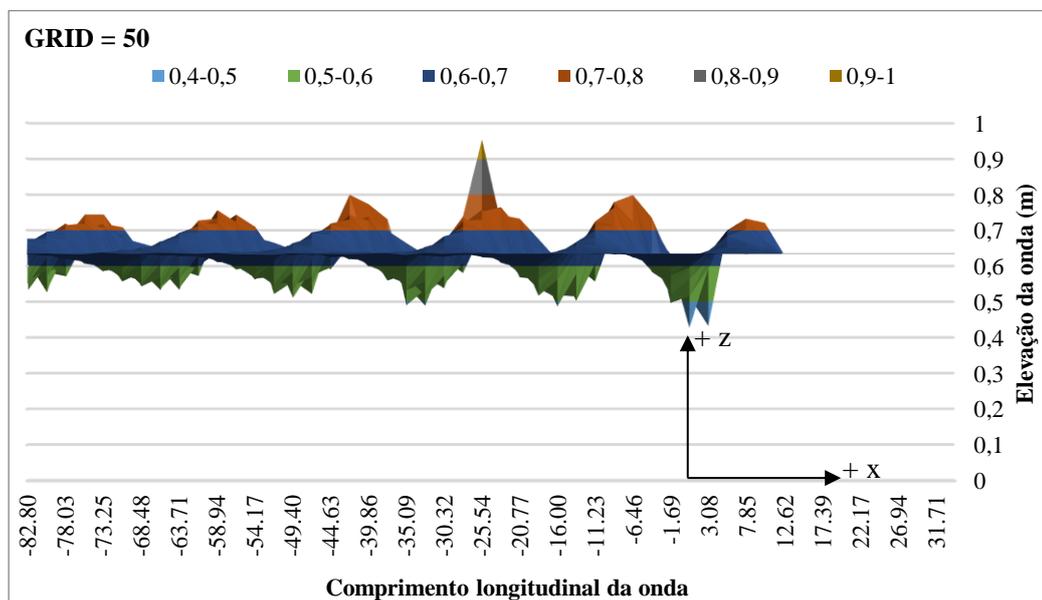
O objetivo desta análise é avaliar os possíveis efeitos da variação dos parâmetros de entrada para o cálculo da superfície livre chamados: grade transversal e grade longitudinal.

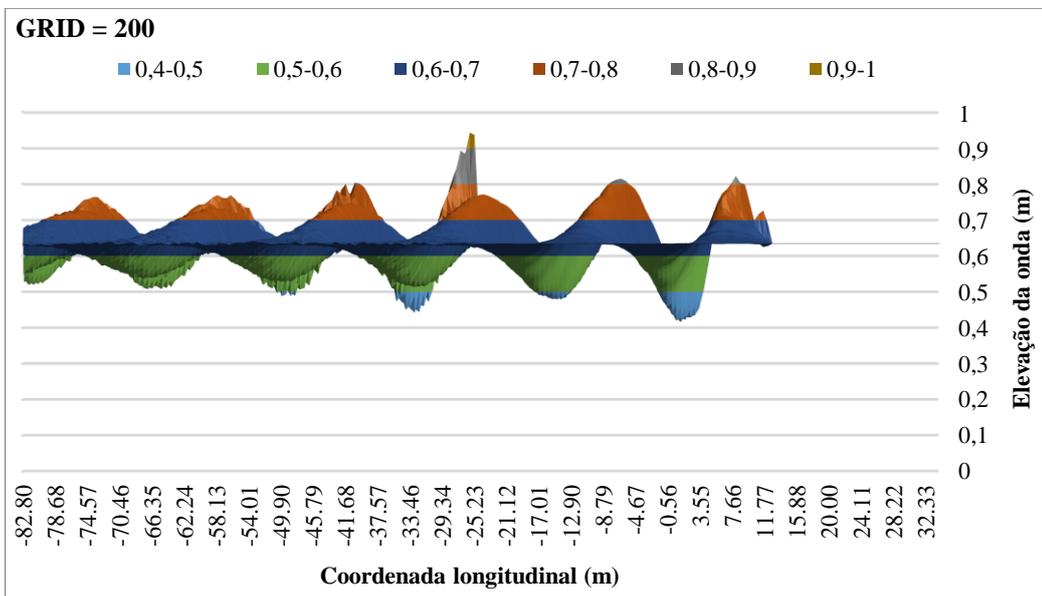
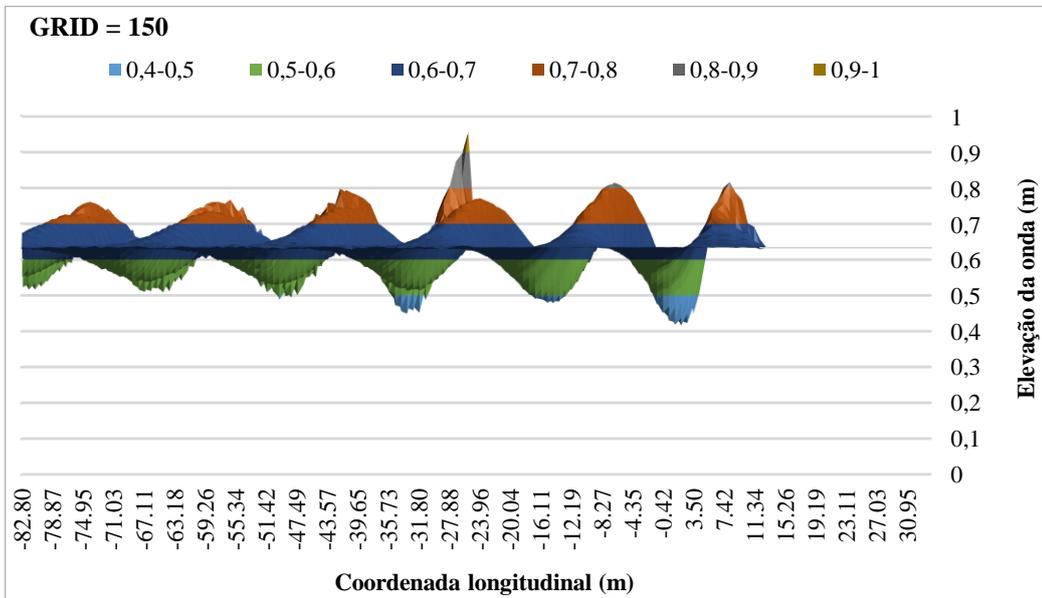
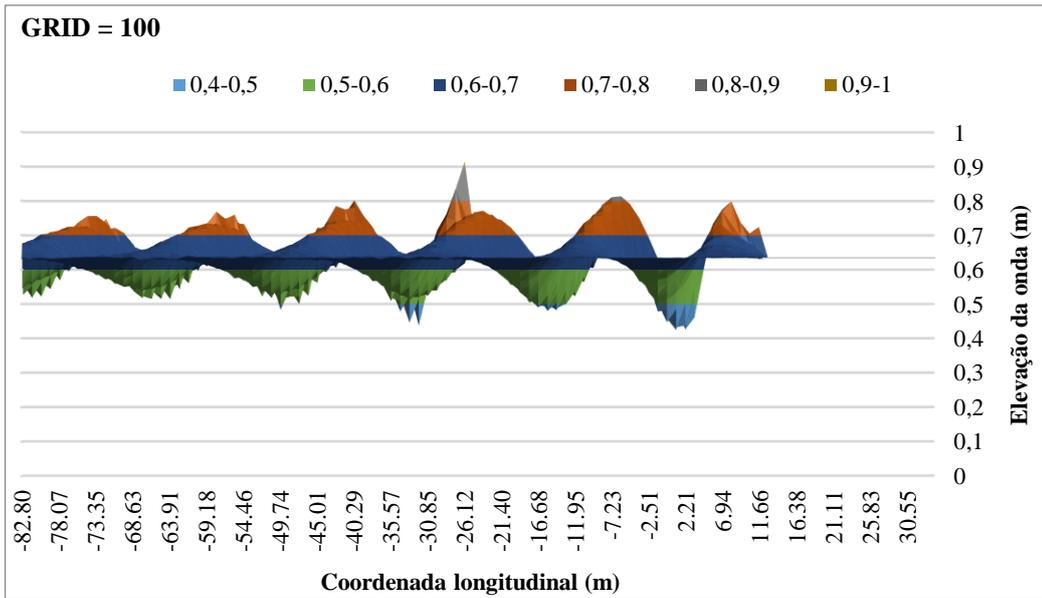
Esses parâmetros determinam o número de pontos que serão considerados nos cálculos nas distâncias longitudinal e transversal.

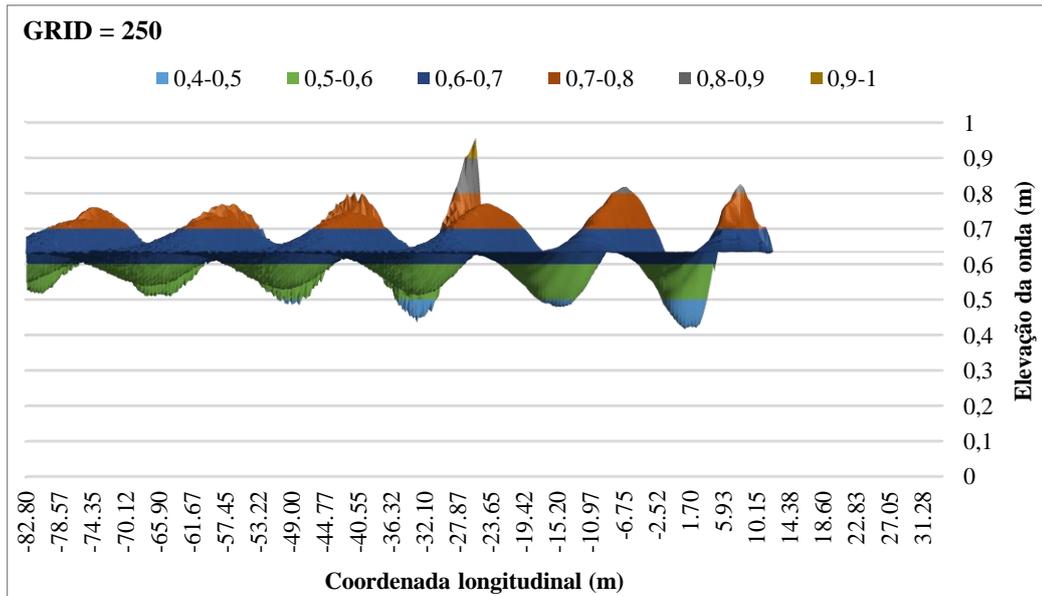
Na Figura 19 constam os gráficos gerados para os 5 diferentes casos, descritos na seção 4.4, com o número de Froude = 0,331. Eles representam a vista lateral das ondas, onde o eixo vertical indica a elevação da onda e o eixo horizontal apresenta o comprimento longitudinal da onda, a linha um pouco acima do 0.6 representa o calado da embarcação, que é 0.634.

É possível perceber pequenas alterações na elevação das ondas, que variam de acordo com o valor utilizado para o parâmetro. Os gráficos que representam as ondas geradas para a grade transversal e longitudinal iguais a 50 e 100, são os que apresentam maiores diferenças, possuindo menores elevações de onda se comparados aos casos posteriores. Para os demais casos, a representação das ondas parece bem semelhante. Por outro lado, percebe-se que maiores valores de grades transversal e longitudinal permitem uma melhor representação das ondas.

Figura 19 - Vista lateral das ondas geradas para os diferentes valores de grade transversal e longitudinal para $F_{nL} = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.



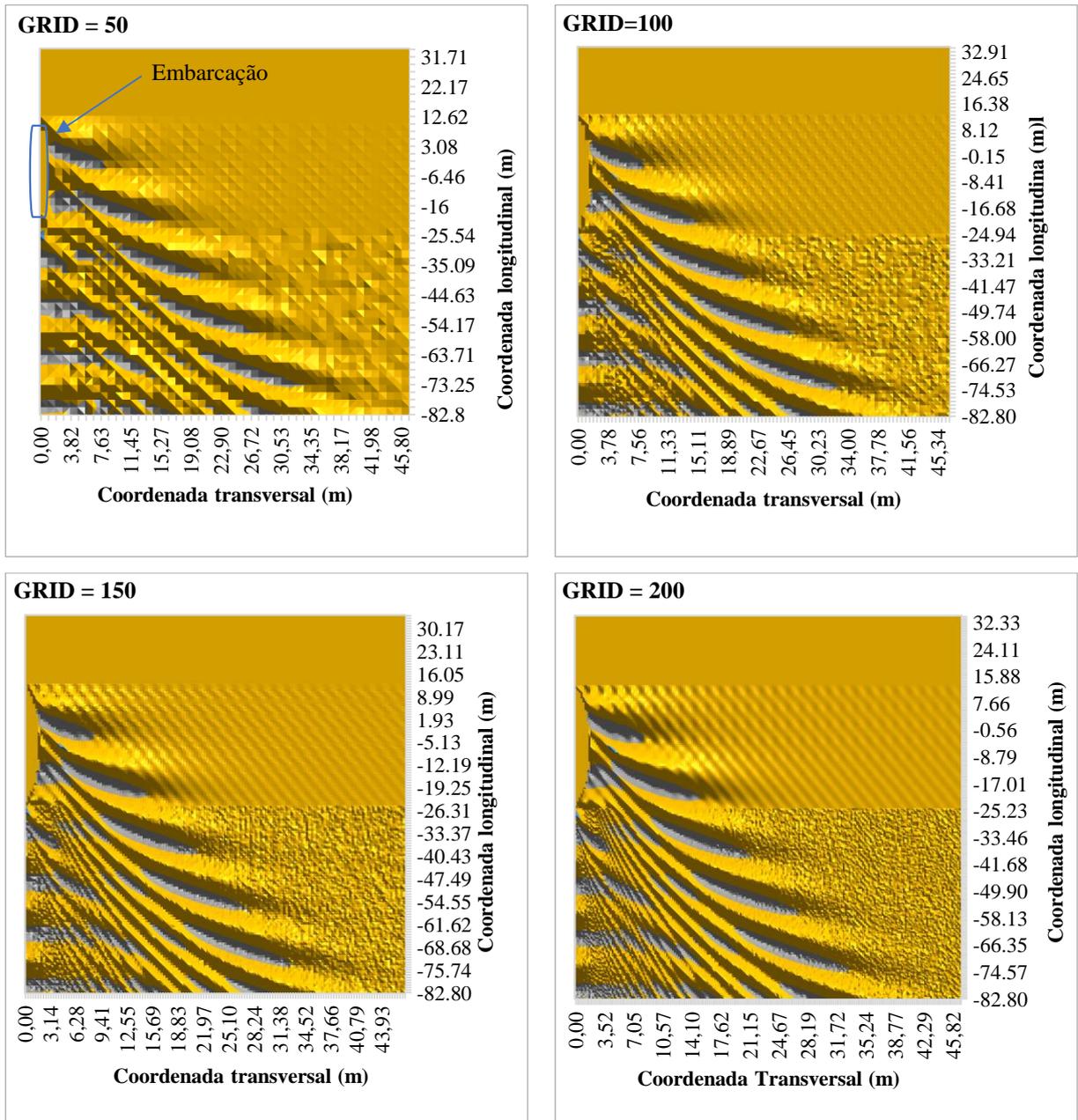


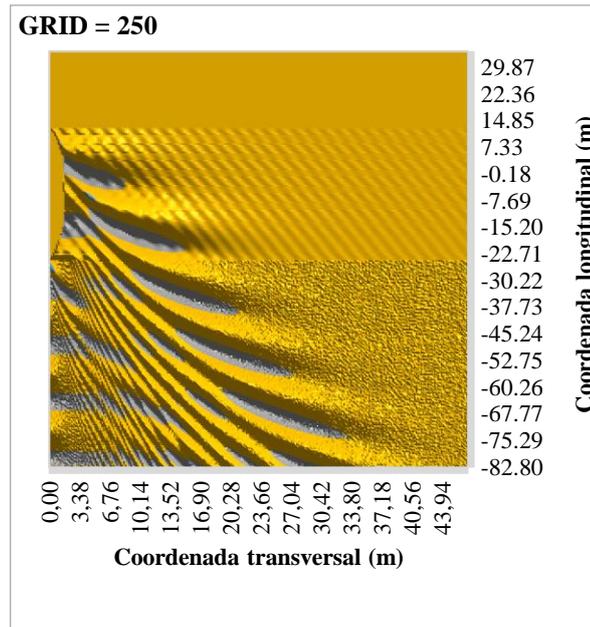


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 20 mostra os gráficos que representam a vista superior dos efeitos da variação da grade na superfície livre da água (vista de cima das ondas geradas), também para o caso de $F_{nL} = 0,331$. Nessa forma de visualização, é claramente observado o padrão de ondas secundárias (transversais e divergentes) descrito por Kelvin. O eixo horizontal representa o comprimento transversal da onda e o eixo vertical o comprimento longitudinal da onda. A forma alongada no canto superior esquerdo é o corpo da embarcação alongado por conta do apêndice virtual adicionado devido à popa transom. É representado apenas um bordo da embarcação, ou seja, apenas um lado. Percebe-se que existe uma diferença significativa na resolução dos gráficos apresentados, sendo as grades mais finas (maior número) as que apresentam um gráfico de melhor qualidade.

Figura 20 - Vista superior das ondas geradas para os diferentes valores de grade transversal e longitudinal para $F_{nL} = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.





Fonte: Elaboração própria.

Ao realizar o cálculo de superfície livre no software *Maxsurf Resistance* com diferentes valores para os parâmetros de grade transversal e longitudinal, é possível observar algumas diferenças nas ondas geradas. Uma das principais é com relação aos detalhes das ondas, pois o tamanho da grade transversal e longitudinal influencia diretamente o detalhamento das ondas geradas.

Com grades mais finas, as ondas são representadas de uma forma menos grosseira e mais precisa, permitindo uma melhor visualização do contorno das ondas. Por outro lado, grades mais grossas podem resultar em ondas mais amenas e menos detalhadas. Isso pode ser útil para análises rápidas ou para situações em que a avaliação detalhada não é necessária.

O tamanho da grade também afeta diretamente o tempo de cálculo necessário para simular a superfície livre. Grades mais finas geralmente exigem mais cálculos e, portanto, demandam mais tempo para a conclusão do processo de simulação.

O ajuste da densidade da grade influencia a aparência visual das ondas, tornando-as mais realistas ou mais simplificadas, dependendo das configurações utilizadas. Portanto, a escolha adequada dos parâmetros de grade transversal e longitudinal dependerá do objetivo da análise, do nível de detalhamento desejado e dos recursos disponíveis para a execução do cálculo. É importante realizar testes e análises comparativas prévias para identificar a configuração que melhor se adequa às necessidades específicas de cada projeto ou estudo.

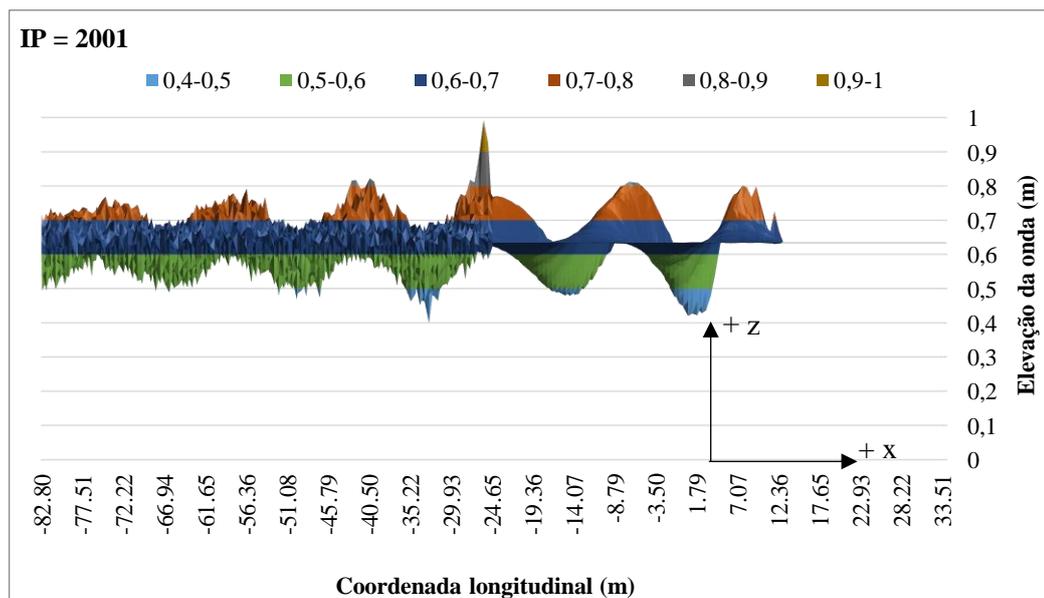
5.4 Efeitos da variação da precisão de integração na superfície livre

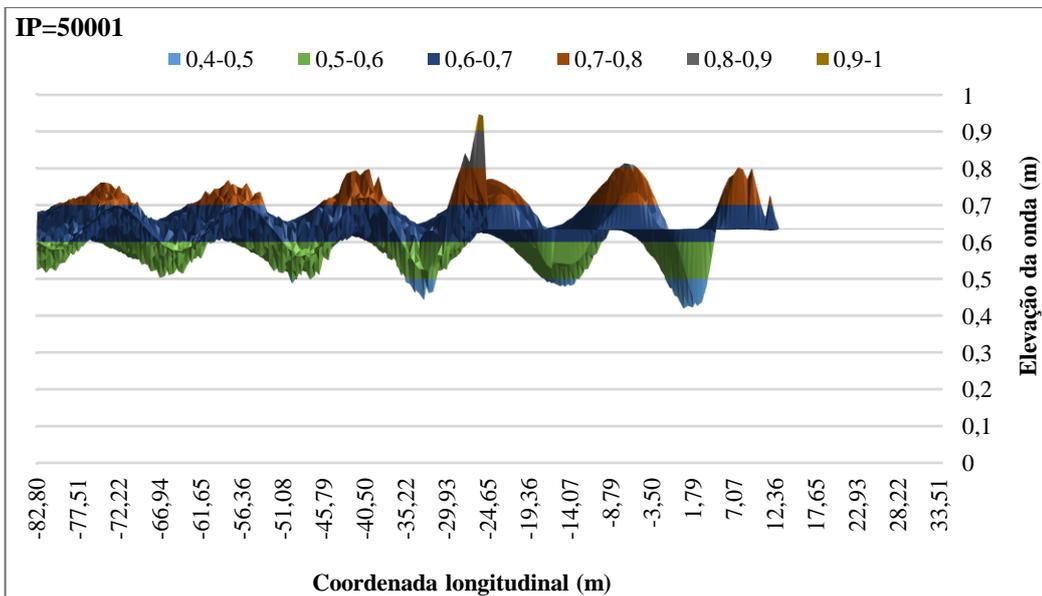
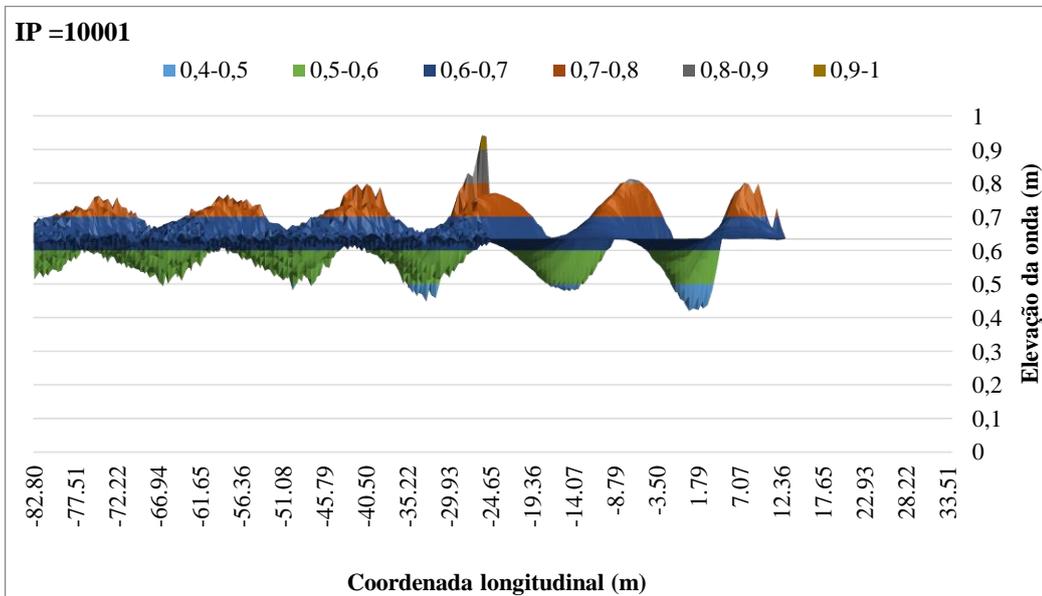
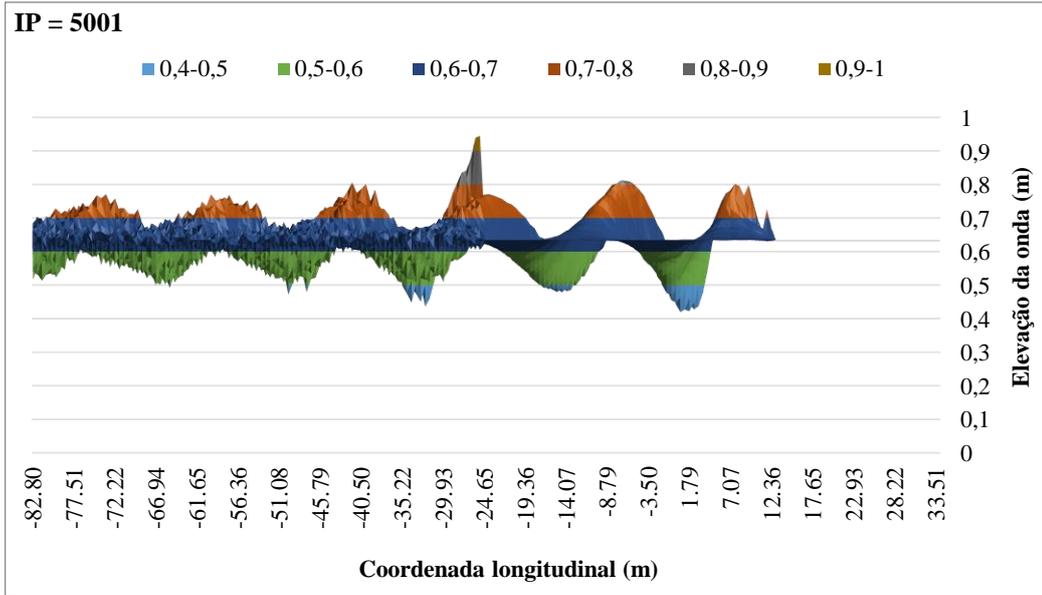
A precisão de integração é um dos parâmetros encontrados no *Maxsurf Resistance* para o cálculo de superfície livre. Esse parâmetro refere-se ao nível de detalhe ou precisão usado durante o processo de integração numérica para calcular o volume submerso e outras propriedades hidrostáticas. Ele determina com que precisão o software irá amostrar a superfície do casco e realizar os cálculos. Para efeitos de verificação, nessa seção foi avaliada a influência da alteração desse parâmetro nos padrões de onda gerados pelo software.

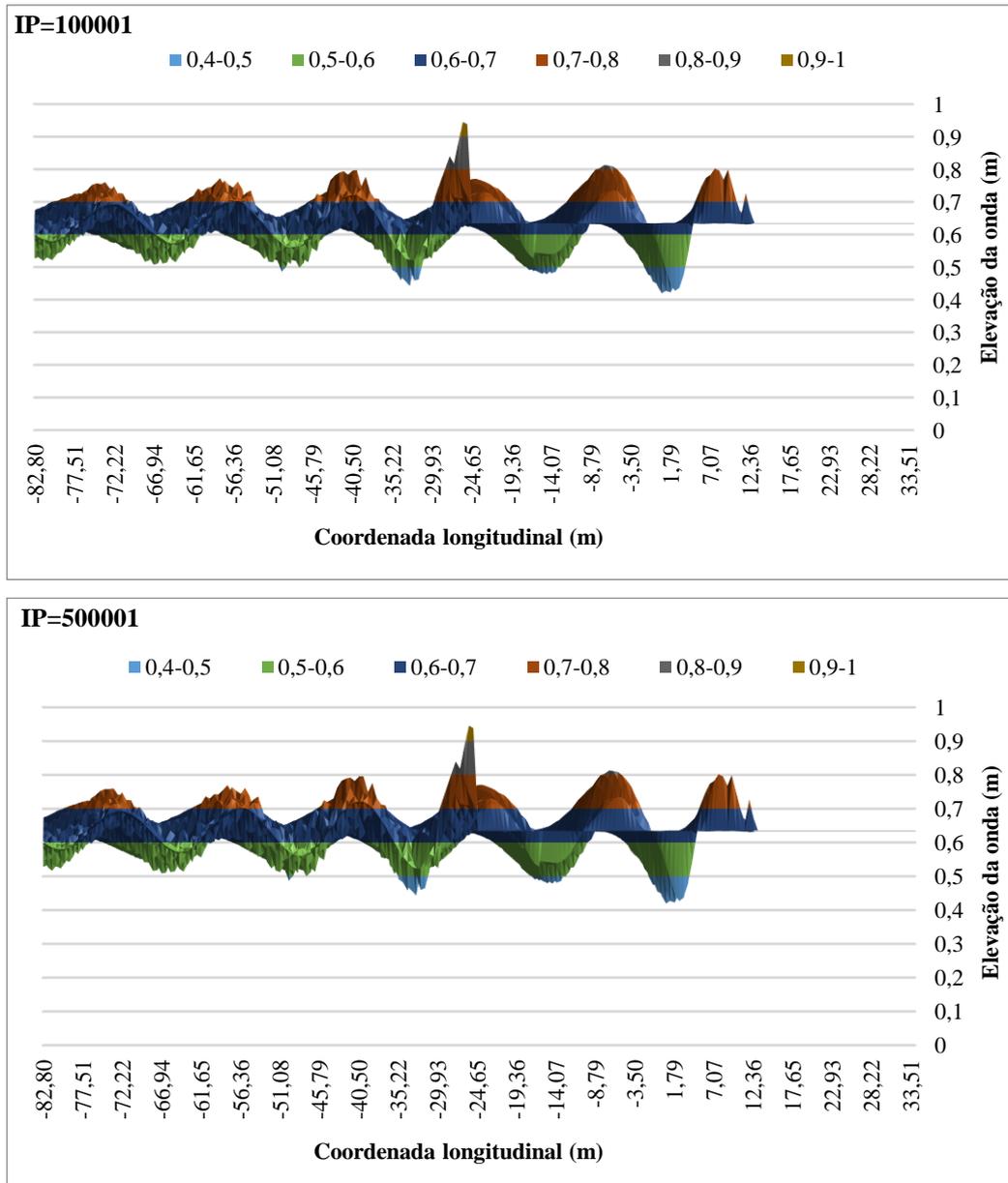
Os gráficos estão organizados de uma forma semelhante à análise anterior. Na Figura 21, estão dispostos os gráficos que representam a vista lateral das ondas geradas, onde o eixo vertical mostra a altura da onda e o eixo horizontal equivale à distribuição longitudinal das ondas geradas.

O padrão de ondas para o menor valor do parâmetro analisado ($IP = 2.001$), foi o que apresentou maior elevação da altura da onda. No entanto, a causa provável desse efeito é a baixa precisão no cálculo, e como as demais ordens de precisão apresentaram gráficos mais semelhantes, verifica-se que o valor mínimo para o parâmetro integral de precisão pode apresentar resultados pouco confiáveis e, portanto, pode não ser indicado para análises que necessitam de resultados mais precisos.

Figura 21 - Vista lateral das ondas geradas para os diferentes valores do parâmetro de precisão de integração para $F_{nL} = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.



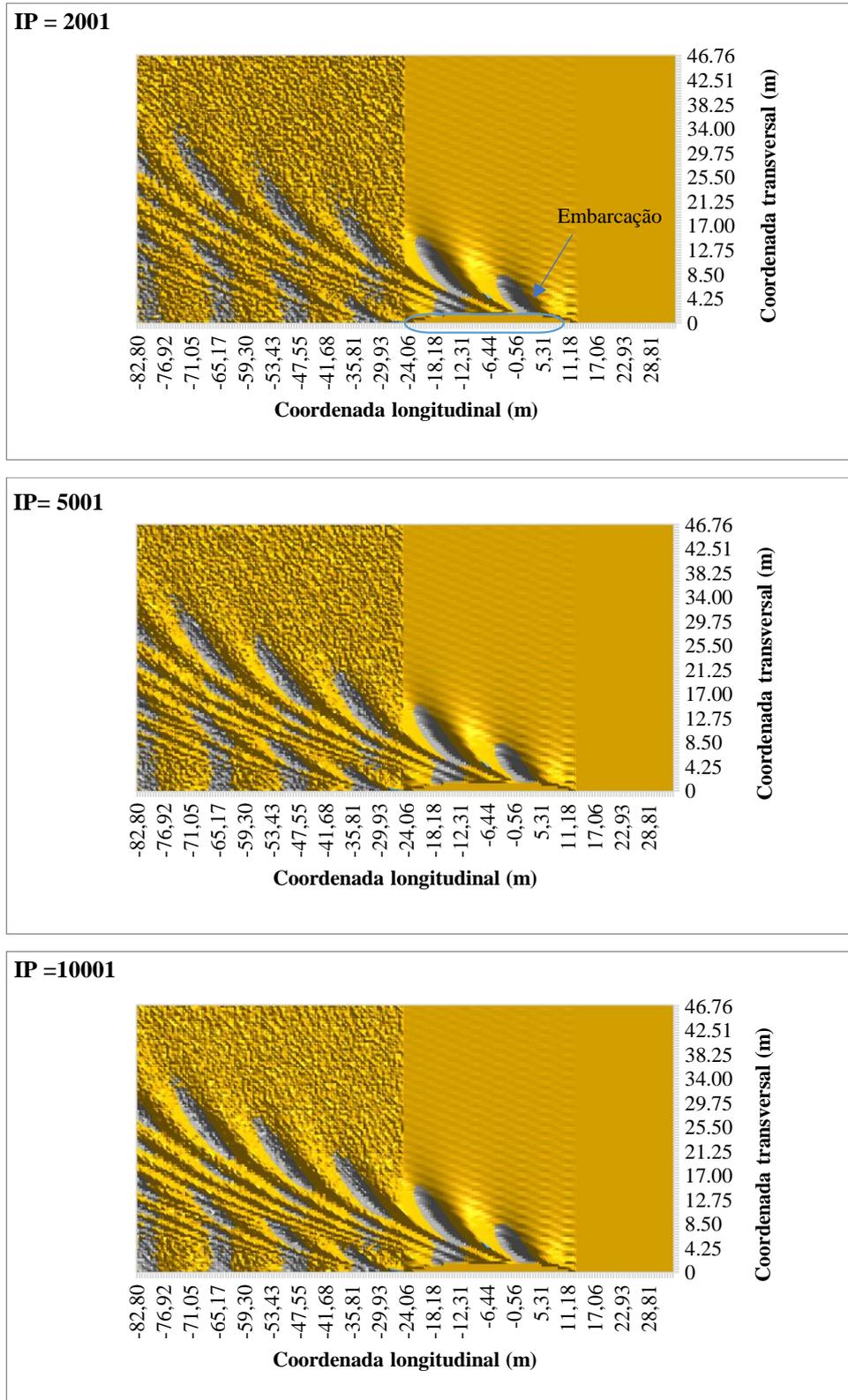


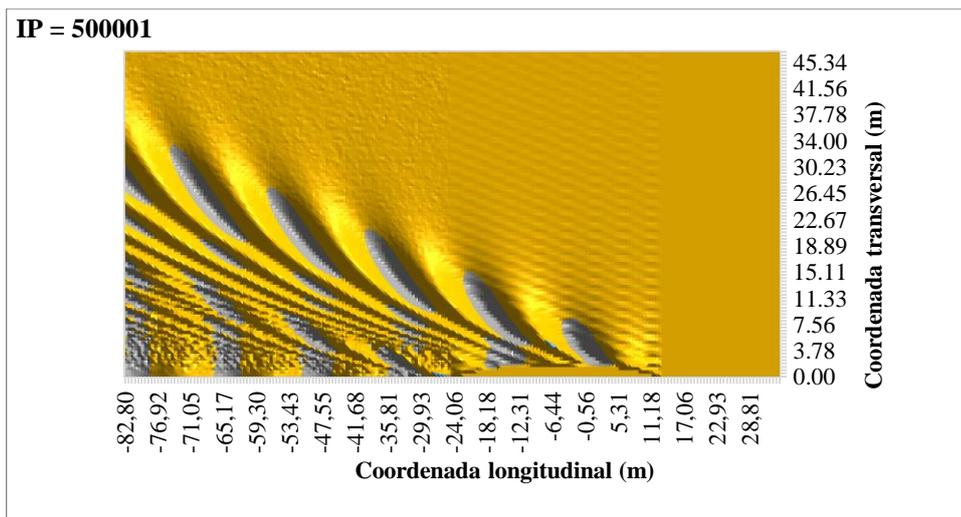
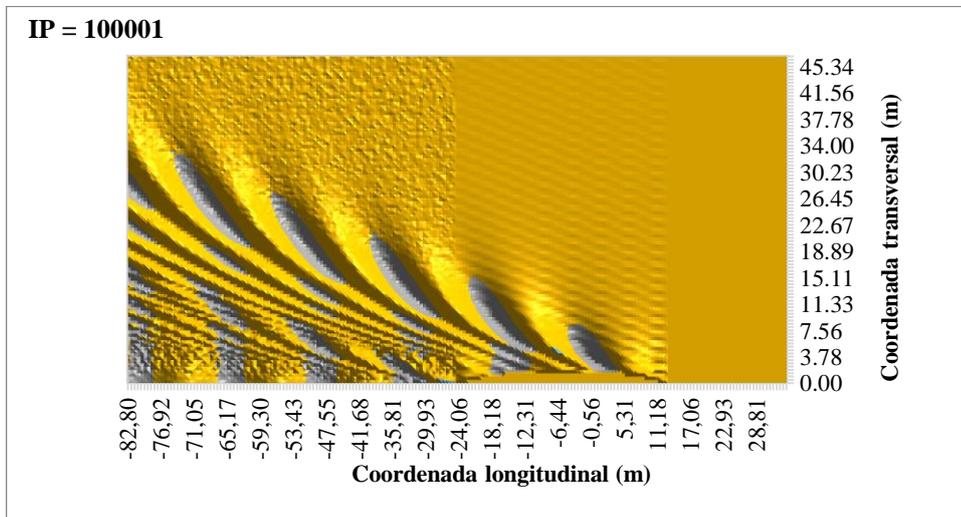
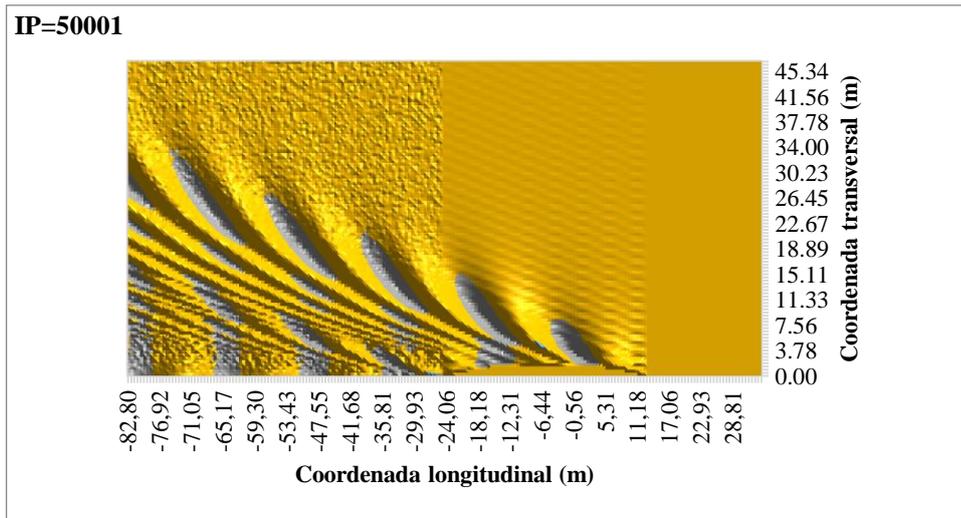


Fonte: Elaboração própria.

Os gráficos que simbolizam a vista superior das ondas, para verificar o efeito de variação do parâmetro de precisão de integração, são exibidos na Figura 22, sendo agora a coordenada transversal de propagação da onda indicado pelo eixo vertical, e a coordenada longitudinal pelo eixo horizontal. Um ponto analisado é com relação à suavidade das ondas, pois com o aumento dos valores de precisão, mais refinados e detalhados se tornam os padrões de ondas calculados, proporcionando uma melhor visualização do contorno das ondas.

Figura 22 - Vista superior das ondas geradas para os diferentes valores do parâmetro de precisão de integração para $F_{nl} = 0,331$. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.





Fonte: Elaboração própria.

Aumentar a precisão de integração realmente implica em um maior tempo de cálculo, uma vez que o software precisa processar um maior número de pontos da superfície livre para obter resultados mais detalhados. Por outro lado, uma precisão menor pode acelerar o tempo de

processamento, mas resulta em uma perda de detalhes e possíveis erros nas simulações. O manual do *Maxsurf Resistance* recomenda que esse valor seja tão alto quanto possível, sendo que maior precisão é alcançada com valores acima de 50.000 e para a maioria dos casos é indicado o valor de 100.000 ou maior.

5.5 Efeitos da variação da velocidade de avanço na geração de ondas.

Os artigos revisados no capítulo 2 reforçam a influência da velocidade de operação na geração de ondas pelas embarcações. Portanto, a variação da velocidade de operação será considerada nessa seção com o objetivo de observar e constatar os seus efeitos, sendo necessária a validação para estudos futuros que visem análises mais detalhadas.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 23. Nas imagens, pode-se visualizar claramente o apêndice virtual adicionado para completar o casco e o trem de ondas iniciando logo após. Com relação à análise das ondas, para faixas de velocidade mais baixas, nota-se a formação de ondas divergentes e convergentes, em concordância com a teoria descrita por Kelvin, mencionado na seção 3.2.2. Os trens de ondas formados possuem o formato em “V” característico do sistema de ondas secundárias gerados por embarcações. À medida que a velocidade aumenta, o ângulo que dá início a esse formato se torna menor, tornando o padrão de ondas mais fechado.

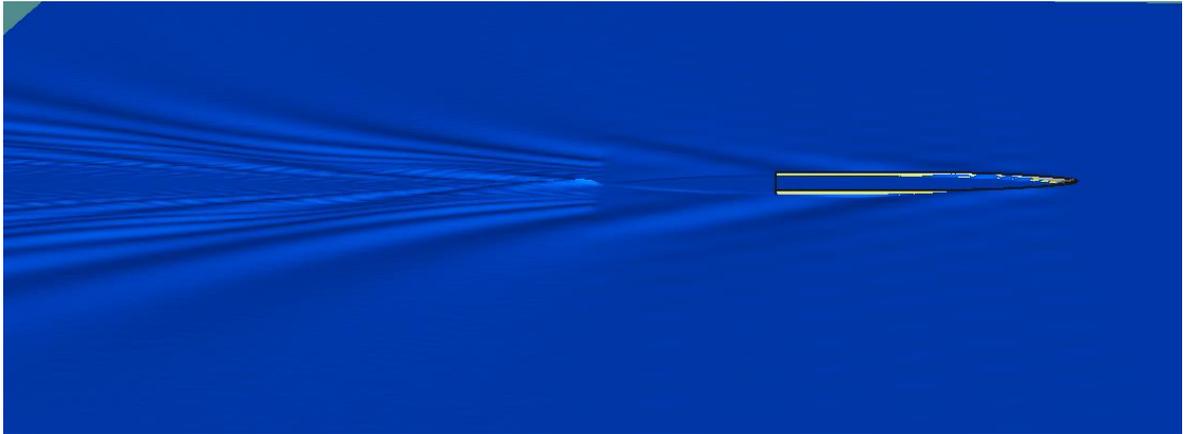
Nesse sentido, fica claro que para velocidades mais lentas, o rastro deixado pela embarcação é mais largo, e conforme a velocidade aumenta esse rastro torna-se mais estreito. Além disso, comparando as superfícies livres calculadas, é possível observar ainda que a altura das ondas varia significativamente de acordo com o aumento da velocidade.

Figura 23 - Padrões de onda considerando diferentes velocidades.

Velocidade = 11.773 nós, $F_{nL} = 0,4$



Velocidade = 14,716 nós, $F_{nL} = 0,5$



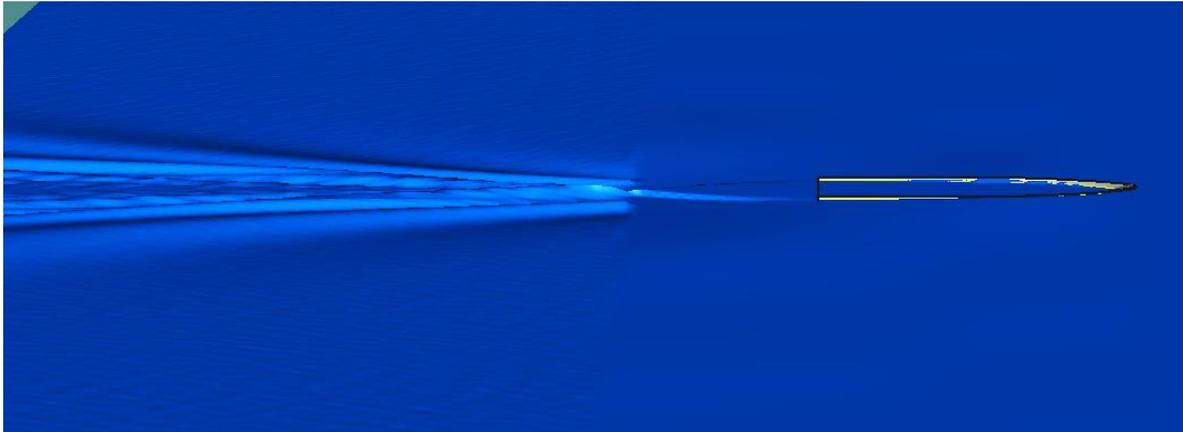
Velocidade = 20,603 nós, $F_{nL} = 0,7$



Velocidade = 26,489 nós, $F_{nL} = 0,9$



Velocidade = 29,432 nós, $F_{nL} = 1$



Fonte: *Maxsurf Resistance* (2023).

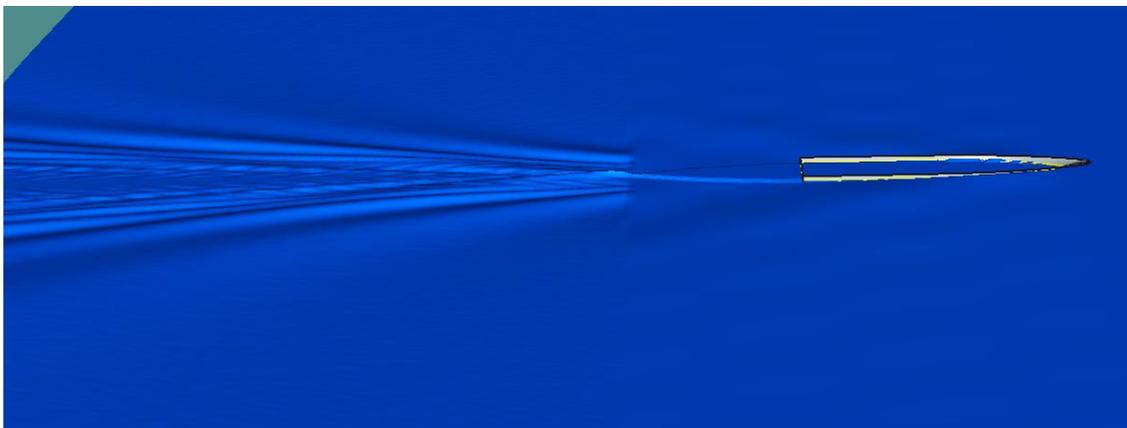
5.6 Efeitos da variação do calado na geração de ondas.

Qian et al. (2022) descreveram que, além da velocidade, a variação do calado também pode causar efeitos na altura das ondas. Diante disso, esta seção visa analisar como a modificação do calado da embarcação pode interferir na superfície livre calculada.

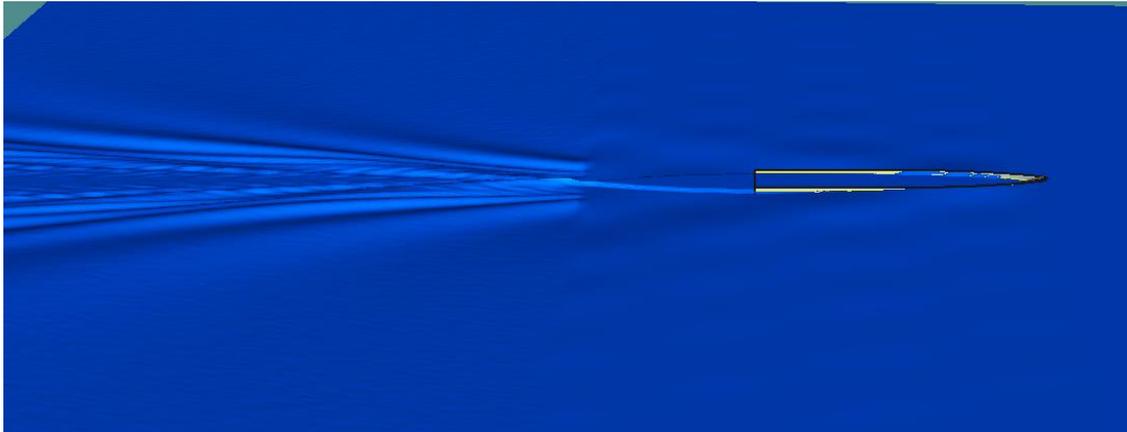
A Figura 24 apresenta o padrão de ondas calculado para diferentes condições de flutuação: para o calado mínimo de 0,503 m, o calado padrão (0,634 m) e para o calado de projeto (0,765 m). A partir das ondas geradas pelo cálculo de superfície livre, nota-se que a diferença entre os padrões de onda gerados não é tão significativa quanto os da variação da velocidade. Todavia, é possível visualizar pequenas diferenças entre as alturas das ondas.

Figura 24 - Padrões de ondas considerando diferentes calados.

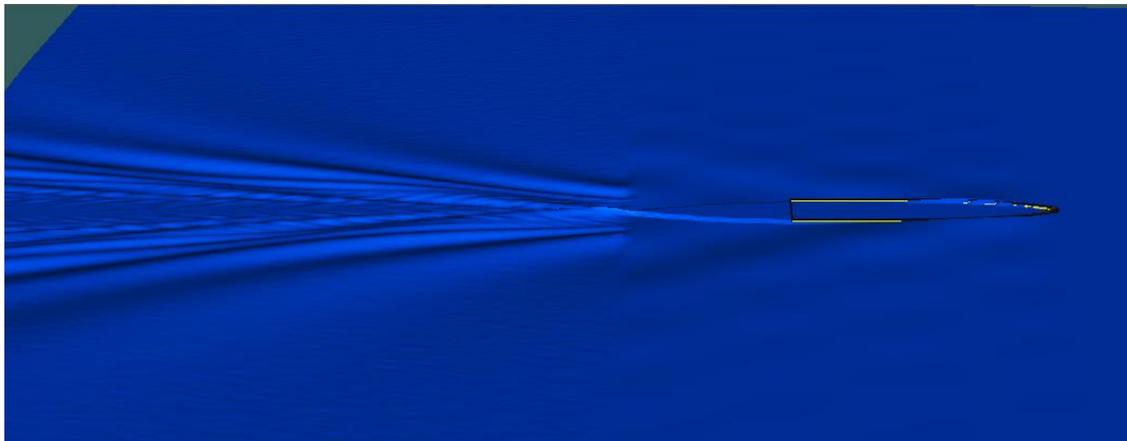
Padrão de ondas para $d = 0,503$ m, $v = 20,603$ nós e $F_{nL} = 0,711$



Padrão de ondas para casco padrão, $d = 0,634$ m, $v = 20,603$ nós e $F_{nL} = 0,7$



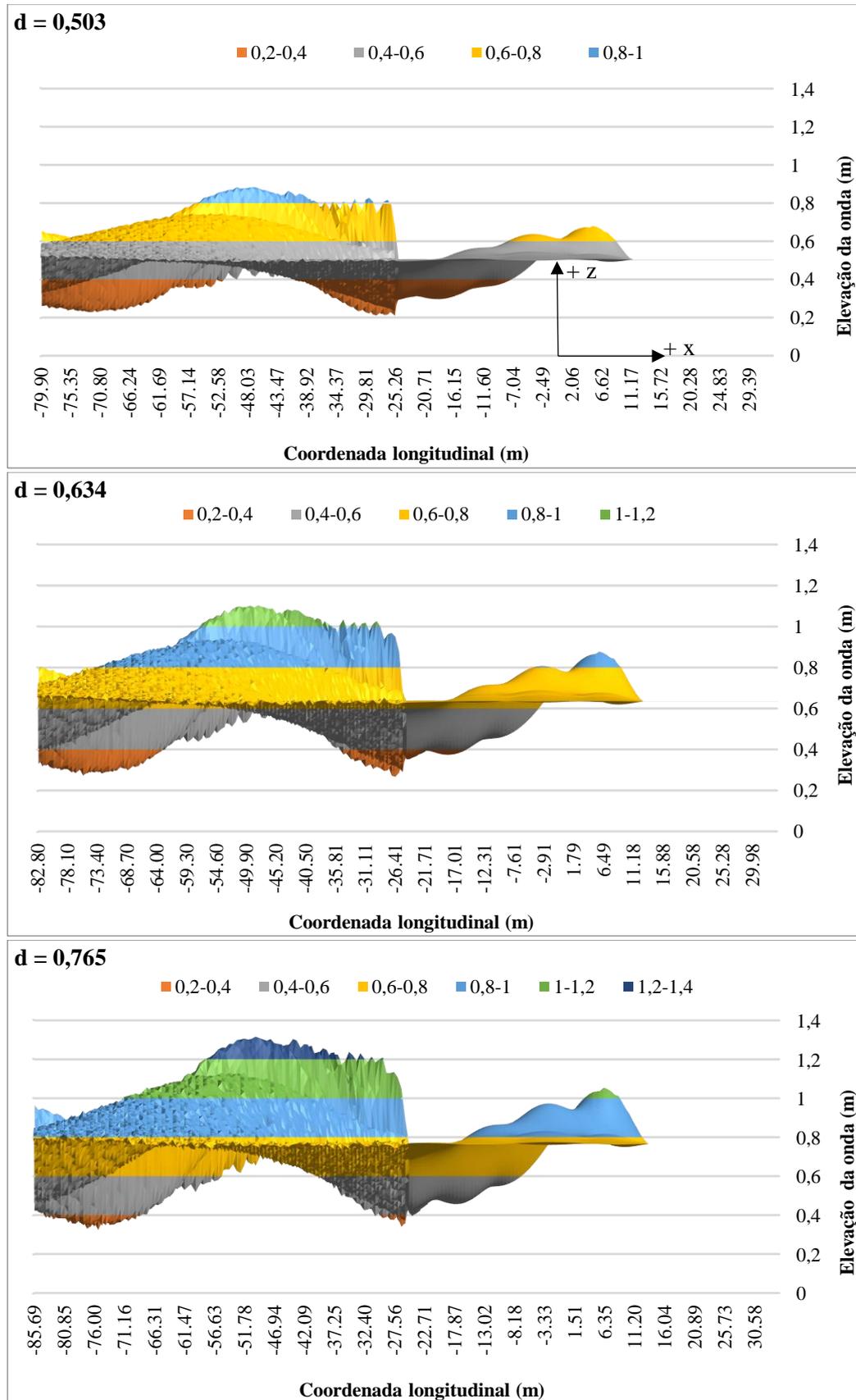
Padrão de ondas para $d = 0,765$ m, $v = 20,603$ nós e $F_{nL} = 0,689$



Fonte: *Maxsurf Resistance* (2023).

Para uma melhor visualização das oscilações devido às mudanças de calado, foram gerados gráficos de superfície lateral das ondas para cada caso analisado (Figura 25). Desta forma, é possível compreender a magnitude da variação de altura dessas ondas. Para o calado de 0,503 m, a onda mais elevada se encontra entre 0,8 m e 1 m. No caso do calado padrão (0,634 m) as ondas mais altas ultrapassam 1 m. E para o calado de projeto essas ondas podem chegar a alturas superiores a 1,2 m.

Figura 25 - Representação gráfica das ondas geradas pela embarcação considerando variações no calado. As cores representam diferentes intervalos de elevação da superfície da água.



Fonte: Elaboração própria

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o problema de geração e propagação de ondas geradas por embarcações, discutindo uma análise paramétrica do uso do software *Maxsurf Resistance* para modelar esse tipo de escoamento. Para fins demonstrativos, foi utilizado um casco similar ao de uma embarcação regional de transporte de passageiros, conhecida como expresso. As principais conclusões do estudo são listadas a seguir:

A representação do casco, com a popa aberta ou fechada, não altera o padrão de ondas calculado. Sendo assim, adicionar ou não uma seção para fechar a forma do casco altera apenas a sua representação visual no software.

As análises sistemáticas realizadas, demonstraram que o parâmetro de exagero vertical do software é apenas um parâmetro representativo. A sua alteração não modifica o padrão de ondas em si, apenas a sua visualização, tornando-a literalmente exagerada.

Maiores valores dos parâmetros da grade transversal e longitudinal do software, resultaram em ondas com melhores contornos e gráficos com melhor resolução. Pequenas variações e características das ondas também foram mais bem delineados.

Com relação a variação do parâmetro de precisão de integração, foi observado que ordens de precisão maiores também geram ondas com melhores contornos, os gráficos apresentaram ondas mais bem desenhadas conforme o aumento do parâmetro. Os valores mais altos considerados exibiram padrões de onda mais similares entre si. Observou-se que um valor mínimo para o parâmetro de precisão de integração pode não ser recomendável para análises que requerem alta precisão.

A variação da velocidade exerce efeitos expressivos sobre os padrões de ondas gerados, tanto na forma quanto na altura das ondas. Maiores velocidades resultam em trens de ondas mais estreitos e com ondas mais elevadas. Para a variação do calado também foram verificadas variações na altura das ondas, sendo as ondas mais altas observadas para os maiores calados.

Os padrões de ondas calculados para baixas velocidades foram muito semelhantes ao padrão de ondas de Kelvin para águas profundas. É importante lembrar que nem a teoria de Kelvin, nem o método do corpo esbelto consideram os efeitos viscosos da água.

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), na realidade, o trem de ondas gerados por uma embarcação não segue exatamente o padrão de ondas descrito por Kelvin, isso porque as ondas não são lineares, além de possuírem efeitos viscosos. No entanto, ainda assim, essa teoria pode descrever de maneira aceitável o sistema de ondas gerados por embarcações esbeltas.

Em suma, o Método do Corpo Esbelto, disponível no software *Maxsurf Resistance*, pode nos dar uma boa análise preliminar do trem de ondas que será produzido por uma embarcação com formato esbelto. Considerando o seu baixo custo, pode ser facilmente implementado nas etapas preliminares de projetos de embarcações, para compreender como a forma do casco pode influenciar na geração das ondas.

No entanto, para análises mais profundas, é recomendável utilizar softwares de simulação numérica, utilizando análises CFD, assim como realizar a validação com resultados experimentais. Por considerarem os efeitos viscosos da água, o método CFD pode fornecer padrões de ondas mais reais, permitindo uma visualização detalhada do comportamento das ondas, o que pode ajudar na compreensão dos fenômenos envolvidos.

Uma das medidas que pode contribuir para a redução dos possíveis problemas causados pelos trens de ondas produzidos por embarcações, é o estabelecimento de velocidades máximas para a hidrovía (Saha; Abdullah; Ashrafuzzaman, 2017). Portanto, como trabalhos futuros, recomendam-se estudos para definir velocidades máximas permitidas em vias navegáveis da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, F. D. R. **Investigação sobre a resposta estrutural local induzida pela batida de proa numa embarcação monocasco de semiplano.** Dissertação (Pós-Graduação) — Universidade Federal Do Rio Grande – Furg, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Oceânica, Rio Grande, 2016.
- AMAZONASTOUR. **Parintins: Terra da Magia.** , 202DC. Disponível em: <<http://www.amazonastur.am.gov.br/parintins-terra-da-magia/>>. Acesso em: 24 jul. 2023
- BELIBASSAKIS, K. A. A coupled-mode technique for the transformation of ship-generated waves over variable bathymetry regions. **Applied Ocean Research**, v. 25, n. 6, p. 321–336, dez. 2003.
- 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
- CHAGAS JÚNIOR, J. O. R. D. **Estudo das ondas geradas por embarcação no rio Guamá próximo a Belém-PA.** TCC — Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Oceanografia, Belém 2012.
- CHEN, P.-F.; HUANG, C.-H. An inverse hull design approach in minimizing the ship wave. **Ocean Engineering**, v. 31, n. 13, p. 1683–1712, set. 2004.
- CHICHERIN, I.; PUSTOSHNY, A. On the estimation of wash effect of ship waves system. 2015.
- COUSER, P. R. **An investigation into the performance of high-speed catamarans in calm water and waves.** 1996. PhD Thesis — University of Southampton, 1996.
- COUSER, P. R.; WELLICOME, J. F.; MOLLAND, A. F. An improved method for the theoretical prediction of the wave resistance of transom-stern hulls using a slender body approach. **International Shipbuilding Progress**, v. 45, p. 331–350, 1998.
- FLEIT, G.; BARANYA, S. LSPIV analysis of ship-induced wave wash. **Experiments in Fluids**, v. 63, n. 10, p. 160, out. 2022.
- GABEL, F.; LORENZ, S.; STOLL, S. Effects of ship-induced waves on aquatic ecosystems. **Science of The Total Environment**, v. 601–602, p. 926–939, dez. 2017.
- IPAAM. **A importância das florestas em pé.** Disponível em: <<https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/a-importancia-das-florestas-em-pe/#:~:text=A%20regi%C3%A3o%20Amaz%C3%B4nica%20concentra%20alimento%20para%20v%C3%A1rios%20organismos%20aqu%C3%A1ticos.>>. Acesso em 26 abr 2023
- JIANG, T.; HENN, R.; SHARMA, S. D. **Wash waves generated by ships moving on fairways of varying topography.** In: **24th Symposium on Naval Hydrodynamics Fukuoka**, Japão, 2002.

- KUCERA-HIRZINGER, V. *et al.* Potential effects of navigation-induced wave wash on the early life history stages of riverine fish. **Aquatic Sciences**, v. 71, n. 1, p. 94–102, mar. 2009.
- LARSON, M. *et al.* Sediment movement induced by ship-generated waves in restricted waterways. **Coastal Dynamics**, n. 120, 2017.
- LI, L.; YUAN, Z.; GAO, Y. Wash wave effects on ships moored in ports. **Applied Ocean Research**, v. 77, p. 89–105, ago. 2018.
- LIMA, J. S.; FREIRE, L. M. **Terras caídas e implicações socioambientais na cidade de Óbidos/PA**. In: XXII SINAGEO, Paisagem e geodiversidade: a valorização do patrimônio geomorfológico brasileiro. Crato /CE: 2018. Disponível em: <<https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/8/8-562-1276.html>>
- LORENZ, S.; PUSCH, M. T.; BLASCHKE, U. Minimum shoreline restoration requirements to improve the ecological status of a north-eastern German glacial lowland lake in an urban landscape. **Fundamental and Applied Limnology**, v. 186, n. 4, p. 323–332, 1 jun. 2015.
- MARQUES, R. O.; CARVALHO, J. A. L. D. Processos fluviais no rio Amazonas: erosão lateral e implicações para a cidade de Parintins. **Revista geonorte**, v. 10, n. 35, p. 108–132, 29 ago. 2019.
- 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: practical estimation of ship propulsive power**. New York: Cambridge University Press, 2011.
- MURPHY, J.; MORGAN, G.; POWER, O. **Literature review on the impacts of boat wash on the heritage of Ireland's inland waterways**. Irlanda, 2006.
- NASCIMENTO, M. F. DO. **Estudo numérico da propagação para águas rasas de ondas geradas por embarcações**. Tese de doutorado— Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.
- OLIVEIRA, E. C. DE. **A importância dos rios para os povos da Amazônia**. Anais do SICASA e ANPPAS Amazônia. **Anais**. In: IV SICASA e 1º ANPPAS Amazônia. Manaus, 2016.
- QIAN, Q. *et al.* Field Measurements and Modelling of Vessel-Generated Waves and Caused Bank Erosion—A Case Study at the Sabine–Neches Waterway, Texas, USA. **Water**, v. 15, n. 1, p. 35, 22 dez. 2022.
- SAHA, G. K.; ABDULLAH, M. S. B.; ASHRAFUZZAMAN, M. Wave Wash and Its Effects in Ship Design and Ship Operation: A Hydrodynamic Approach to Determine Maximum Permissible Speed in a Particular Shallow and Narrow Waterway. **Procedia Engineering**, v. 194, p. 152–159, 2017.
- SREEDEVI, R.; NALLAYARASU, S. Parametric study on passing ship effects on moored ship using CFD simulation validated with experiments. **Ocean Engineering**, v. 263, p. 112349, nov. 2022.

SUPRAYOGI, D. T. *et al.* Speed limit determination of fishing boats in confined water based on ship generated waves. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 4, p. 3165–3174, abr. 2022.

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.

VELEGRAKIS, A. F. *et al.* Field observations of waves generated by passing ships: A note. **Coastal Engineering**, v. 54, n. 4, p. 369–375, abr. 2007.

VOSSERS, G. **Some applications of the slender body theory in ship hydrodynamics.** Wageningen: H. Veenman & Zonen Nv., 1962.

YANG, Q.; FALTINSEN, O. M.; ZHAO, R. Wash and Wave Resistance of Ships in Finite Water Depth. *In: Practical Design of Ships and Other Floating Structures.* Elsevier, p. 475–483, 2001.

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

ZHOU, L.; GAO, G.; HUIJSMANS, R. H. M. Wash waves generated by high speed displacement ships. **China Ocean Engineering**, v. 29, n. 5, p. 757–770, 2015.

APÊNDICE A – PLANO DE LINHAS DO CASCO

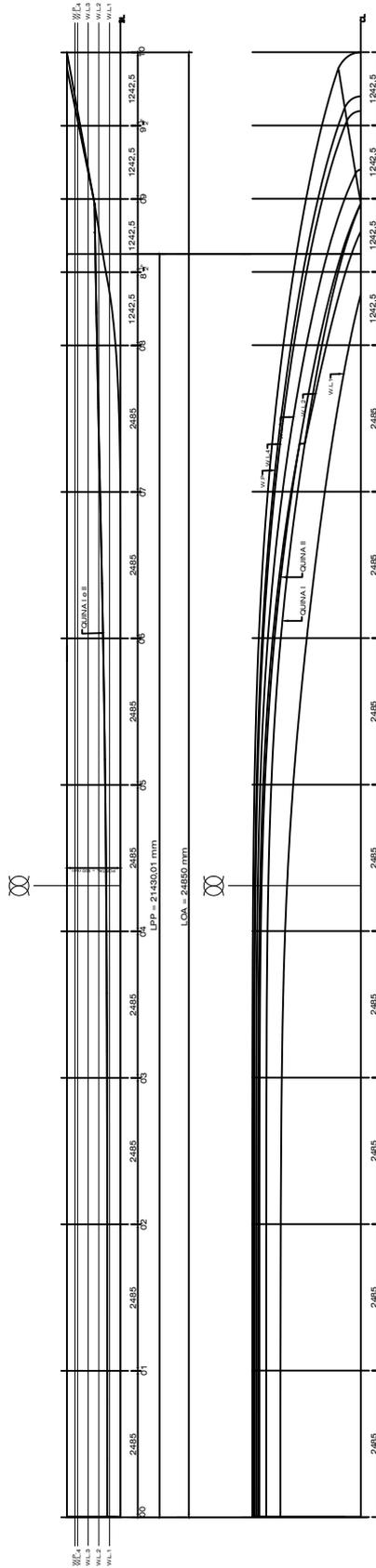
PLANO DE BALIZAS



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Comprimento total.....24,85 m
 Comprimento entre perpendiculares.....71,96 m
 Boca moldada.....3,65 m
 Pontal moldado.....0,9 m
 Calado de projeto.....0,765 m
 Calado máximo carregado.....0,834 m

PLANO DE LINHAS D'ÁGUA



PLANO DE LINHAS DO ALTO