

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

JORGE ARTUR LEITE DA SILVA JÚNIOR

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO CASCO NA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E NOS MOVIMENTOS DE UMA
BARCAÇA REGIONAL**

Manaus
2022

JORGE ARTUR LEITE DA SILVA JÚNIOR

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO CASCO NA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E NOS MOVIMENTOS DE UMA
BARCAÇA REGIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes.

Manaus
2022

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.

J95ee	<p>Júnior, Jorge Artur Leite da Silva Efeito da variação da geometria do casco na resistência ao avanço e nos movimentos de uma embarcação regional. / Jorge Artur Leite da Silva Júnior. Manaus : [s.n], 2022. 68 f.: color.; 30 cm.</p> <p>TCC - Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2022. Inclui bibliografia Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes</p> <p>1. Barcaça. 2. Hidrostática. 3. Resistência ao avanço. 4. Comportamento em ondas. 5. Região Amazônica. I. Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Efeito da variação da geometria do casco na resistência ao avanço e nos movimentos de uma embarcação regional.</p>
-------	---

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

JORGE ARTUR LEITE DA SILVA JÚNIOR

**EFEITO DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO CASCO NA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E NOS MOVIMENTOS DE UMA
BARCAÇA REGIONAL**

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

Área de concentração: Engenharia Naval

APROVADO EM: 29/09/2022

BANCA EXAMINADORA

Presidente: Jassiel Vladimir Hernández Fontes
Universidade do Estado do Amazonas

Membro interno: Jose Ramon Hechavarria Perez
Universidade do Estado do Amazonas

Membro interno: Harlysson Wheiny Silva Maia
Universidade do Estado do Amazonas

Membro externo: Mojtaba Maali Amiri
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Manaus

2022

Dedicatória

Eu dedico este trabalho à minha amada mãe, Maria Rufina Almeida Leite, ao meu amado pai, Jorge Artur Leite da Silva e aos meus amados irmãos Diego Almeida Leite da Silva e Yasmim Almeida Leite da Silva.

AGRADECIMENTO

Eu agradeço imensamente à H'shem, o D'us de Israel, que me abençoou até aqui com saúde, força de vontade, garra e dedicação aos estudos e à busca pelos meus objetivos pessoais. Aos meus amados pais Jorge Artur Leite da Silva e Maria Rufina Almeida Leite, que sem seu apoio ético, moral, financeiro e amoroso eu jamais chegaria a lugar nenhum, eu dedico este trabalho para vocês! Aos meus irmãos Diego Almeida Leite da Silva e Yasmim Almeida Leite, que sem o seu apoio não teria sustentado os desafios e percalços enfrentados até aqui.

Agradeço ao meu professor orientador, Jassiel Vladimir Hernández Fontes, que graças à sua orientação, dicas e conselhos sobre a vida e Engenharia Naval, pude evoluir positivamente como graduando, e hoje como Engenheiro Naval tenho a honra e prazer de considerá-lo um companheiro de profissão e grande amigo.

Agradeço também aos meus companheiros de UEA, que caminharam juntamente comigo nesses caudalosos anos de Engenharia, especialmente ao meu grande amigo, que considero também como irmão, Vinícius Magno Nunes Santos, o querido "Peixe" e ao meu grande amigo, também irmão, Lucas Alexandre Gomes da Anunciação, que tenho a honra de ter compartilhado momentos incríveis. Um muito obrigado também aos meus demais amigos e colegas, são tantos, não quero pecar em esquecer o nome de algum!

Eu agradeço ao senhor Ricardo Sanchez, do escritório de projetos navais RGF, por me ceder os planos base da barcaça caso padrão, que foi de suma importância neste trabalho.

Eu agradeço à empresa *Bentley*, pela licença acadêmica para o uso do software *Maxsurf* e os seus utilitários *Modeler*, *Resistance* e *Motions*, que forma de extrema importância neste trabalho. Também agradeço à empresa *Wolfram*, por facilitar o acesso gratuito para fins acadêmicos ao software *Wolfram Mathematica* que foi utilizado para a geração de gráficos neste trabalho.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM por meio do projeto de pesquisa intitulado “Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção”, chamada N°010/2021 – CT&I Áreas Prioritárias (termo de outorga 106/2022; processo 01.02.016301.03431/2021-02). De forma semelhante, agradeço ao Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM, pelo apoio financeiro dado ao Projeto de Apoio à Iniciação Científica do Amazonas - PAIC para o Projeto “Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico de uma Embarcação Regional”, edital N° 016/2021 – GR/UEA.

RESUMO

A região amazônica possui diversas atividades de navegação fluvial relacionada com o transporte de cargas em barcaças fluviais. Todavia, ainda existe uma escassez de estudos técnicos relacionados com o comportamento hidrodinâmico deste tipo de embarcação. Com o intuito de conhecer mais dos aspectos operacionais de barcaças fluviais regionais, foi realizado um estudo comparativo, com o qual se pretendeu analisar diversos conceitos hidrodinâmicos de uma barcaça regional. Foi avaliado o efeito da mudança da inclinação da proa e popa de uma barcaça de transporte de carga regional nas características hidrostáticas, resistência ao avanço e comportamento em ondas, utilizando métodos simplificados. Foram analisadas características hidrostáticas como o deslocamento, o raio metacêntrico e a altura metacêntrica. Na análise da resistência ao avanço, foram avaliados métodos de uso prático (i.e., *Holtrop* e *KR Barge*), discutindo as restrições e limitações de uso de cada um. Finalmente, foram analisados os movimentos desacoplados de *heave* e *pitch* em ondas regulares. Para efeitos de comparação em cada um destes tópicos, foi modelado um caso padrão de barcaça, mudando a inclinação da proa e da popa do casco, totalizando quatro casos de estudo. Para realizar as análises, foi utilizado o software *Maxsurf* e seus pacotes utilitários *Modeler*, *Resistance* e *Motions* nas análises da hidrostática, resistência ao avanço e comportamento em ondas. Quanto às características hidrostáticas, o caso de estudo 2 (inclinação de 30° na proa e de 48° na popa) e o caso de estudo 4 (12° proa e 14° popa) se destacaram em relação ao caso padrão (17° proa e 21° popa), apresentando uma variação de 7.13% na altura metacêntrica transversal para o caso 4 e -6.21% para o caso 2. De forma análoga na análise de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*, o caso 2 apresentou variações entre 13.7% e 39.3% e o caso 4 variações entre -6.7% e -25% em relação ao caso padrão. O método de *KR Barge* superestimou os valores de resistência ao avanço, devido as suas restrições e limitações de uso prático e simplificado. Para as acelerações significativas no movimento de heave o caso de estudo 3 (14° proa e 17° popa) apresentou variação de 2.17% e o caso 4 (12° proa e 14° popa) variação de 4.56%, ambos operando com uma velocidade de um nó. Com os resultados obtidos referentes a barcaças fluviais é esperado que o trabalho some ao acervo sobre navegação fluvial na região amazônica.

Palavras chave: Barcaça, hidrostática, resistência ao avanço, comportamento em ondas, geometria do casco, região amazônica.

ABSTRACT

The Amazon region has several inland navigation activities related to the transportation of cargo on river barges. However, there is still a lack of technical studies related to the hydrodynamic behavior of this type of vessel. In order to investigate the operational aspects of regional river barges, a comparative study was conducted, aiming to analyze several hydrodynamic characteristics of a regional barge hull. The effect of the change of the bow and stern hull inclination of a regional cargo transport barge on the hydrostatic characteristics, ship resistance and motions was evaluated using simplified methods. Hydrostatic characteristics such as displacement, metacentric radius and height were analyzed. For the analysis of ship resistance, methods of practical use were evaluated (i.e., *Holtrop* and *KR Barge*), discussing the restrictions and limitations of each. Finally, the uncoupled motions of *heave* and *pitch* in regular waves were analyzed. For comparison purposes in each of these topics, a reference barge case was modeled, changing the inclination of the bow and stern of the hull, totaling four case studies. To perform the analysis, the software *Maxsurf* and its utility packages *Modeler*, *Resistance* and *Motions* were used in the analysis of hydrostatics, ship resistance and motions in waves. Regarding the hydrostatic characteristics, study case 2 (inclination of 30° in the bow and 48° in the stern) and study case 4 (12° bow and 14° stern) presented better performance in relation to the standard case (17° bow and 21° stern), presenting a variation of 7.13% in cross-sectional metacentric height for case 4 and -6.21% for case 2. Similarly, in the analysis of ship resistance using the method of *Holtrop*, case 2 presented variations between 13.7% and 39.3% and the case 4 variations between -6.7% and -25% in relation to the standard case. The *KR Barge* method overestimated the reference ship resistance values due to its limitations for practical implementation. For the significant accelerations in heave motion, study case 3 (14° bow and 17° stern) showed a variation of 2.17% and case 4 (12° bow and 14° stern) a variation of 4.56% with respect to the reference case, both operating at a speed of 1 knot. With the results obtained regarding river barges, it is expected that the work will add to the research on inland navigation in the Amazon region.

Keywords: Barge, hydrostatics, ship resistance, ship behavior, parametric analysis, Amazon region.

Lista de Figuras

1	Amazônia Brasileira, formada pelos estados do Amazonas, Pará, Amapá, Roraima, Rondônia, Acre, Mato Grosso, Tocantins e Maranhão.	14
2	Transporte de cargas por hidrovia, representando a quantidade de carga em toneladas (t) transportada em cada hidrovia por percurso em quilômetros (km). Indicador TKU, representa a quantidade de carga em toneladas multiplicado pela distância do percurso (km).	15
3	Comboio fluvial (barcaça e empurrador) em navegação na hidrovia do rio Madeira.	16
4	Comboio fluvial em navegação na Hidrovia do Solimões-Amazonas	17
5	Alguns tipos de barcaças que são utilizadas comumente na região amazônica. (a) Barcaça de transporte de madeira. (b) Barcaça de transporte de gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). (c) Barcaça de transporte de petróleo. (d) Barcaça de transporte de carga geral.	18
6	Tipos de proa das barcaças consideradas no estudo de Tabaczek, Kulczyk e Zawisłak (2007) e resistência total ao avanço, sendo RTM a resistência total ao avanço do modelo, em Newtons (N).	20
7	Curva de estabilidade intacta da barcaça, que relaciona o braço de endireitamento GZ com o ângulo de banda da barcaça.	21
8	Operadores de amplitude de resposta que relaciona o movimento de <i>roll</i> e <i>pitch</i> da barcaça com seus respectivos ângulos de fase. (a) RAO de <i>roll</i> (90°). (b) RAO de <i>pitch</i> (180°).	22
9	Comparação de RAO 's teóricos com os obtido experimentalmente. (a) Movimento de <i>heave</i> . (b) Movimento de <i>pitch</i>	23
10	Comparação entre o método do <i>Holtrop-Mennen</i> e o <i>ANSYS-CFX</i>	25
11	Comparação da resistência ao avanço com a proa inclinada, uso de <i>skegs</i> e rotores.	26
12	Configuração estrutural. (a) Uso de um <i>skeg</i> central na simulação realizada. (b) Uso de dois <i>skegs</i> ; um em cada borda da barcaça.	26
13	Representação das inclinações de popa e proa da barcaça.	28
14	Representação das superfícies geradas pelas curvas <i>B-spline</i>	30
15	Imagens da barcaça Escambal II, que inspirou a barcaça caso padrão deste trabalho. (a) Barcaça Escambal II carregada com granél sólido. (b) Inclinação de proa da barcaça Escambal II. (c) Comboio fluvial formado pela barcaça Escambal II e empurrador regional. (d) Barcaça Escambal II e empurrador fluvial.	31
16	Planos de linhas da barcaça, incluindo plano de linhas do alto, plano de linhas d'água e plano de balizas da barcaça caso padrão.	32

17	Modelo do caso padrão de barçaço gerado no <i>Maxsurf Modeler</i> . (a) Balizas que foram geradas no software. (b) Superfície do casco.	33
18	Vista de perfil das extremidades dos cascos das barçaços consideradas como caso de estudo: proa (acima) e popa (embaixo). A linha amarela representa o calado de operação, em 3.14 m.	34
19	(a) Representação do LCF, LCB. da embarcação (b) Representação do BM, GM, KM e KB da embarcação.	36
20	(a) Coeficiente de bloco da embarcação. (b) Coeficiente de seção mestra da embarcação. (c) Coeficiente prismático da embarcação. (d) Coeficiente prismático vertical da embarcação.	36
21	Eixos coordenados utilizados no software <i>Maxsurf Motions</i> . É representado a proa, popa e os bordos (bombordo e boreste) da embarcação.	45
22	Gráficos de barras, representando o erro de cada característica hidrostáticas estudada, para cada caso de estudo. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.	51
23	Comparação de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de <i>Holtrop</i>	53
24	Gráficos comparativos dos erros de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de <i>Holtrop</i> . (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.	54
25	Resistência ao avanço utilizando o método <i>KR Barge</i> , para o intervalo de Número de <i>Froude</i> entre 0 e 0.372.	55
26	Resistência ao avanço utilizando o método <i>KR Barge</i>	56
27	Gráficos comparativos dos erros de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de <i>KR Barge</i> . (a) Caso 2. (b) Caso 1. (c) Caso 3. (d) Caso 4	57
28	(a) Resposta em <i>heave</i> caso 1, (b) Resposta em <i>heave</i> caso 2, (c) Resposta em <i>heave</i> caso padrão, (d) Resposta em <i>heave</i> caso 3, (e) Resposta em <i>heave</i> caso 4.	59
29	Gráficos comparativos dos erros na análise do movimento de <i>heave</i>	60
30	(a) Resposta em <i>pitch</i> caso 1, (b) Resposta em <i>pitch</i> caso 2, (c) Resposta em <i>pitch</i> caso padrão, (d) Resposta em <i>pitch</i> caso 3, (e) Resposta em <i>pitch</i> caso 4.	61
31	Gráficos comparativos dos erros na análise do movimento de <i>pitch</i>	62

Lista de Tabelas

1	Características principais do caso padrão	30
2	Ângulos de inclinação de proa e popa dos casos de estudo	34
3	Componentes principais da resistência ao avanço total, comparação entre os métodos <i>Holtrop</i> e <i>KR Barge</i>	43
4	Características hidrostáticas principais dos casos de estudo, analisadas na linha d'água das barças.	50
5	Coefficientes hidrostáticos principais analisados na linha d'água.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Descrição do problema	13
1.2	Revisão bibliográfica	19
1.3	Justificativa	28
1.4	Objetivos	28
1.4.1	Geral	28
1.4.2	Específicos	29
2	MATERIAIS E MÉTODOS	29
2.1	Descrição do software <i>Maxsurf Modeler</i>	29
2.2	Casos de estudo da barcaça regional	30
2.3	Cálculos de características hidrostáticas	35
2.4	Cálculos de resistência ao avanço	37
2.4.1	Descrição do software <i>Maxsurf Resistance</i>	37
2.4.2	Método <i>Holtrop</i>	38
2.4.3	Método <i>KR Barge</i>	41
2.4.4	Principais diferenças entre os métodos <i>Holtrop</i> e <i>KR Barge</i>	43
2.5	Cálculos de comportamento em ondas	44
2.5.1	Descrição do <i>Maxsurf Motions</i>	44
2.5.2	Cálculo de RAO's de <i>heave</i> e <i>pitch</i>	44
2.6	Métodos para geração e análise de resultados gráficos	47
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
3.1	Características hidrostáticas principais	49
3.2	Resistência ao avanço	52
3.2.1	Método <i>Holtrop</i>	52
3.2.2	Método <i>KR Barge</i>	55
3.3	Comportamento em ondas	58
3.3.1	Movimento de <i>heave</i>	58
3.3.2	Movimento de <i>pitch</i>	61
4	CONCLUSÕES	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

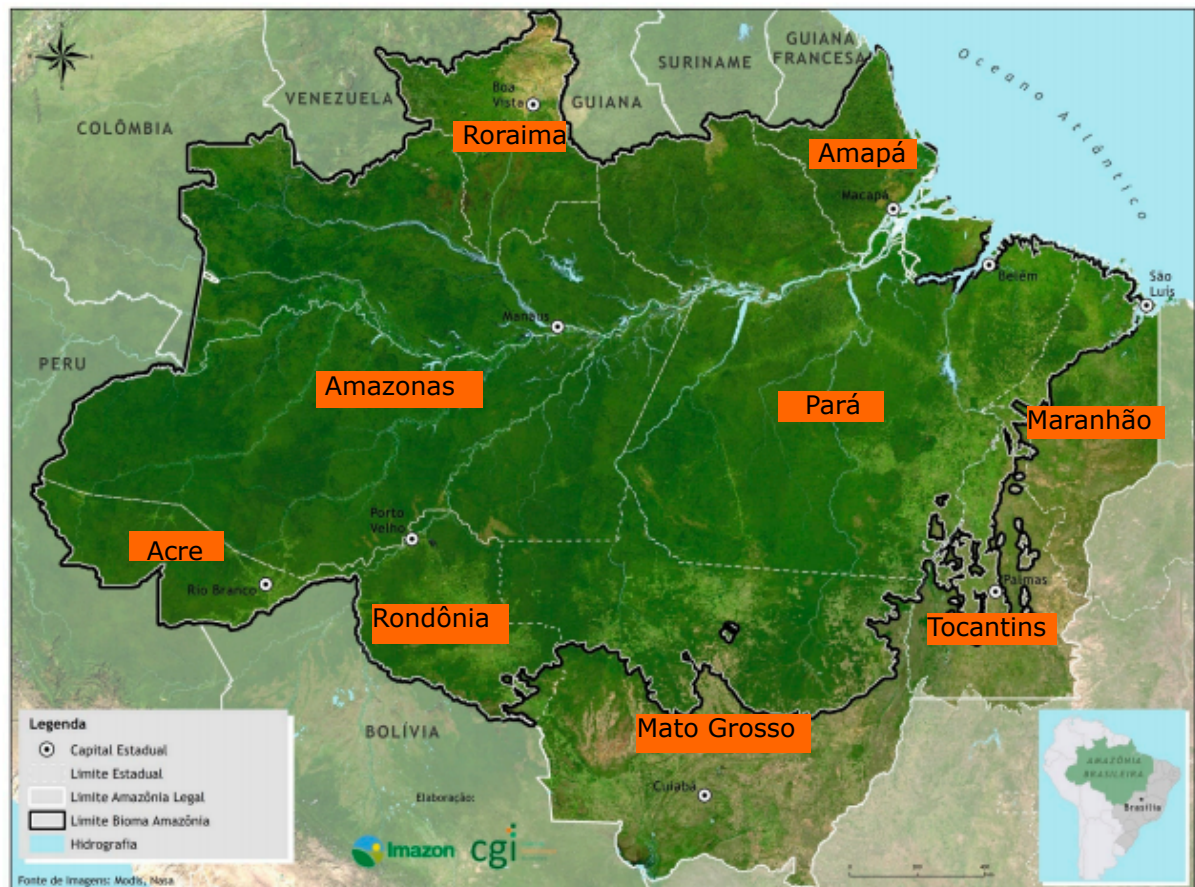
A região amazônica é uma das regiões geográficas mais preservadas do Brasil. A Amazônia Brasileira, também conhecida como Amazônia Legal, compreende nove estados da federação brasileira: Amazonas, Pará, Amapá, Roraima, Rondônia, Acre, Mato Grosso, Tocantins e Maranhão. A Amazônia possui aproximadamente 5 milhões de km², compreendendo 772 municípios e representando 59% do território nacional (IBGE, 2022).

Segundo Oliveira e Silva (2021), a economia da Amazônia está concentrada na indústria agropecuária, voltada à exportação industrial de *commodities* como, por exemplo, minério de ferro e granel de soja. Devido ao grande potencial hídrico e recursos naturais da região, a economia da região amazônica também está ligada ao setor de serviços e trocas de mercadorias, assim como de produção de energia. A Figura 1 representa os nove estados do Brasil que compreendem a região amazônica. É perceptível o grande potencial hídrico da região, pela presença de rios como o Amazonas, Solimões, Tapajós e Madeira. As hidrovias da bacia amazônica são de extrema importância para o desenvolvimento socioeconômico do norte do Brasil, devido ao fato de funcionarem como meios de comunicação entre as principais cidades e as comunidades ribeirinhas.

As hidrovias na região Norte do Brasil são de extrema importância, tanto por fatores econômicos, quanto sociais. Os estados da região Norte do Brasil tiveram políticas de desenvolvimento e ocupação diferentes das regiões Sudeste e Nordeste, que sempre foram o centro econômico e político do país. Entretanto, com suas características peculiares, a região Norte se destaca por sua relevância em termos de recursos naturais, incluindo suas extensas hidrovias. Muitas destas hidrovias são navegáveis e de grande importância na vida da população regional, pois são necessárias para realizar diversos empreendimentos econômicos na região relacionados com as áreas de logística e transportes.

A Figura 2, obtida de ANTAQ (2019), mostra a relação do transporte de carga por hidrovia analisada, dando ênfase para as hidrovias do Madeira, Solimões-Amazonas e Tocantins-Araguaia. Os resultados mostrados na Figura 2 indicam a crescente tendência das hidrovias do Madeira, Solimões-Amazonas e Tocantins-Araguaia no transporte de cargas em percursos interiores estaduais e interestaduais e percursos internacionais. Dentre as 3 hidrovias citadas, a hidrovia Solimões-Amazonas se destaca na quantidade de toneladas que escoam, sendo cerca de 24,5 milhões de toneladas. As hidrovias dos rios Solimões-Amazonas, Madeira e Tocantins-Araguaia despontaram na importância dentre as hidrovias do Brasil. Isto é expresso pelos indicadores tonelada útil (U) e tonelada quilômetro útil (TKU). O indicador tonelada útil (U) representa o total de carga transportado na hidrovia, enquanto o indicador tonelada quilômetro útil (TKU) representa a multiplicação da tonelada útil transportada pela distância percorrida. Estes indicadores

Figura 1 – Amazônia Brasileira, formada pelos estados do Amazonas, Pará, Amapá, Roraima, Rondônia, Acre, Mato Grosso, Tocantins e Maranhão.



Fonte: (OLIVEIRA; SILVA, 2021)

aumentaram em quantidade de carga transportada, dando um salto de 13.123 milhões de toneladas para 44.175 milhões de toneladas, representando um aumento de 235% (ANTAQ, 2019).

De acordo com a Figura 2 pode ser inferida a importância das hidrovias nos estados da região Norte do Brasil, principalmente em estados conhecidamente estratégicos da chamada Amazônia Legal, tais como os estados do Amazonas e Pará.

Segundo ANTAQ (2019), a hidrovia do Solimões-Amazonas é a principal via de deslocamento de carga da região norte do Brasil (Figura 2), sendo responsável por 15 milhões de toneladas transportadas de grãos vegetais do complexo da soja e cereais em 2019 (equivalente a 61.3% do total transportado na hidrovia) e 3,376 milhões de toneladas de combustíveis e óleos minerais.

Ainda, segundo a Figura 2, a hidrovia Tocantins-Araguaia também desponta no rol das hidrovias em destaque da região Norte, onde o transporte de cereais, especialmente o milho tem tido relevância, juntamente ao transporte de grãos vegetais do complexo da

Figura 2 – Transporte de cargas por hidrovia, representando a quantidade de carga em toneladas (t) transportada em cada hidrovia por percurso em quilômetros (km). Indicador TKU, representa a quantidade de carga em toneladas multiplicado pela distância do percurso (km).

Corredor Hidroviário	Percurso			Indicadores	
	Interior Estadual	Interior Interestadual	Interior Internacional	T (t)	TKU (t-km)
Hidrovia do Madeira	3.514	9.331.948	7.326	9.342.788	9.806.255.062
Hidrovia do Paraná-Tietê	2.358.776	2.313.287	877.083	5.549.146	2.128.701.818
Hidrovia do rio Paraguai		93.200	3.869.326	3.962.526	1.826.021.822
Hidrovia do Solimões-Amazonas	12.695.453	11.639.691	102.585	24.437.729	13.729.251.919
Hidrovias do Sul	5.218.619	1		5.218.620	1.430.902.682
Hidrovia do Tocantins-Araguaia	7.721.668	2.673.316		10.394.983	1.998.586.461
Total Geral	27.998.030	26.051.443	4.856.320	-	30.919.719.764

Fonte: ANTAQ (2019)

soja, que representam cerca de 80% do volume de carga transportada nessa hidrovia.

A Figura 3 (LOPES; MAGALHÃES, 2018) ilustra um comboio fluvial característico da região amazônica. O comboio é composto por uma barcaça fluvial e um empurrador regional, navegando na hidrovia do rio Madeira, mais especificamente no Baixo Madeira em Porto Velho, Roraima. Ao analisar a Figura 2, a hidrovia do rio Madeira também é considerada uma das hidrovias mais importantes da Amazônia. Seu potencial é utilizado para o transporte de granéis vegetais e minerais, principalmente os do complexo da soja e cereais, carros-chefe do agronegócio da região Centro-Oeste.

É importante mencionar que por meio destas hidrovias são conectados os estados dessa região central do Brasil com o Oceano Atlântico, principalmente no estado de Pará, servindo como rota de escoamento para a exportação de produtos e mercadorias para os continentes europeu e asiático, incluindo a navegação de cabotagem nacional.

Figura 3 – Comboio fluvial (barcaça e empurrador) em navegação na hidrovia do rio Madeira.



Fonte: Modificado de Lopes e Magalhães (2018)

De acordo com a Figura 2, os dados citados sobre as hidrovias que tomam para si um papel mais central no transporte de cargas e passageiros na Região Norte, é possível destacar um protagonismo da hidrovia da rota entre os rios Solimões-Amazonas. Seu extenso percurso entre os estados do Amazonas e Pará, a conectividade entre as cidades e o impacto na economia regional e nacional, são características importantes desta hidrovia. Como representado na Figura 4, a hidrovia Solimões-Amazonas também é utilizada para o transbordo de cargas do tipo *RO-RO* (*Roll on - Roll off*), com um comboio fluvial composto por uma barcaça fluvial e um empurrador do tipo regional.

Segundo Cardanha et al. (2020), o comboio da Figura 4 é representado pela empresa Transportes Bertolini Ltda., que é uma das empresas líderes no segmento de transporte fluvial de cargas do tipo RO-RO na região amazônica, com um total de cerca de 45% de expressividade no segmento, tendo como um dos destinos principais o município de Manaus, Amazonas. Esta hidrovia tem um papel fundamental neste trabalho, pois foi considerada como a hidrovia base para a atuação da barcaça padrão considerada como caso de estudo.

Cabe mencionar que o transporte fluvial na Amazônia é composto por diversos tipos de barcas, sendo elas para transporte de cargas, veículos, madeira, maquinários e

Figura 4 – Comboio fluvial em navegação na Hidrovia do Solimões-Amazonas



Fonte: Modificado de Cardanha et al. (2020)

mercadorias, sendo classificadas como de carga geral. Dentre essas mercadorias que são comumente transportadas por barcaças podemos citar os derivados de petróleo, materiais químicos, graneis sólidos e líquidos, bem como gasosos (FERREIRA et al., 2016).

A Figura 5 mostra quatro tipos de barcaças que são tipicamente utilizadas na navegação fluvial da região amazônica. A barcaça da Figura 5a é utilizada no transporte de madeira do tipo eucalipto, com capacidade de carga de 200 toneladas (ALVES, 2020). A barcaça da Figura 5b, chamada AMAZONGÁS VI, foi construída pela empresa AMAZONGÁS em um estaleiro de Manaus, Amazonas, para o transporte de gás liquefeito de petróleo (GLP, isto é, o gás utilizado na cozinha de forma doméstica) entre as cidades do estado do Amazonas. A barcaça da Figura 5c é do tipo petroleira, enquanto a barcaça da Figura 5d é do tipo carga geral, transportando cargas diversas, desde containeres até graneis. Segundo Ramos et al. (2019), ambas as barcaças das Figuras 5c e 5d operam na hidrovia Solimões-Amazonas, nas proximidades da cidade de Manaus.

É perceptível que o uso de barcaças nos rios da região amazônica é de extrema importância para a economia regional; por conta disso, estudos que visualizam e analisam problemas relacionados com a operação de comboios fluviais, tais como manobrabilidade, resistência ao avanço, estabilidade e seu comportamento dinâmico, são de muita importância, embora ainda sejam escassos na região.

Figura 5 – Alguns tipos de barcaças que são utilizadas comumente na região amazônica. (a) Barcaça de transporte de madeira. (b) Barcaça de transporte de gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). (c) Barcaça de transporte de petróleo. (d) Barcaça de transporte de carga geral.



Fonte: (a) Modificado de Alves (2020), (b) Acervo do autor, (c) Modificado de Ramos et al. (2019), (d) Modificado de Ramos et al. (2019).

O problema a ser analisado e estudado neste trabalho consiste no estudo do comportamento hidrodinâmico de uma barcaça regional. O objetivo é verificar e analisar os efeitos da variação das inclinações de popa e proa nas características hidrostáticas principais, na resistência ao avanço e em seus movimentos quando submetido à interação com ondas regulares. Para isto, foi utilizado o software computacional Maxsurf, que é um programa que inclui métodos simplificados para análises de Engenharia Naval. O software *Maxsurf* possui módulos como o *Modeler* para a modelagem do caso padrão e casos de estudo das barcaças, o *Resistance* para a análise de resistência ao avanço das embarcações e o *Motions*, para a análise de comportamento em ondas.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi digitalizado o casco de uma embarcação regional do tipo barcaça. Posteriormente, análises paramétricas foram desenvolvidas para verificar os efeitos da variação da forma do casco nas características hidrostáticas, na resistência ao avanço e nos movimentos da embarcação. Por meio de análises de erro, considerando o caso do casco padrão como referência, foram avaliadas as diferenças de diversos parâmetros. Espera-se que a metodologia desenvolvida possa ser de utilidade

para o desenvolvimento de mais estudos relacionados com comboios fluviais regionais.

Este trabalho está organizado de acordo com os seguintes tópicos:

O Capítulo 1 apresenta a Introdução. Nesta seção é apresentada uma introdução às hidrovias da região Norte do Brasil, o problema que o trabalho visa estudar, revisão bibliográfica, justificativa e os objetivos do trabalho.

Os Materiais e Métodos são apresentados no Capítulo 2. Esta seção apresenta a geometria do caso padrão da barcaça regional, assim como os casos de estudo obtidos por meio da variação da geometria do casco padrão. Também é incluída a descrição dos módulos *Modeler*, *Resistance* e *Motions* do software *Maxsurf*. Nesta seção também são apresentados os métodos utilizados para a geração e análise dos resultados gráficos e os métodos estatísticos simplificados utilizados. Além disso, o capítulo inclui uma revisão teórica simplificada sobre as características hidrostáticas de uma embarcação de deslocamento, alguns conceitos de resistência ao avanço considerando os métodos de *Holtrop* e *KR Barge*, além de uma descrição sucinta dos movimentos de *heave* e *pitch* de uma embarcação.

Subsequentemente, o Capítulo 3 descreve os resultados e discussões. Este capítulo detalha os resultados referentes às mudanças nas características hidrostáticas principais dos casos de estudo em comparação com o caso padrão de barcaça regional, incluindo as diferenças do uso do método de *Holtrop* e *KR Barge* na análise de resistência ao avanço, e por fim as mudanças em relação ao comportamento em ondas das embarcações, relacionada com os movimentos de *heave* e *pitch*.

Finalmente, o Capítulo 4 descreve as principais conclusões. Este capítulo trata dos principais resultados referentes às características hidrostáticas principais dos diversos casos de estudo das barcaças em comparação com o caso padrão, as principais diferenças entre os resultados de resistência ao avanço utilizando os métodos de *Holtrop* e *KR Barge* e os resultados mais significativos referente aos movimentos de *heave* e *pitch*, no comportamento em ondas das embarcações.

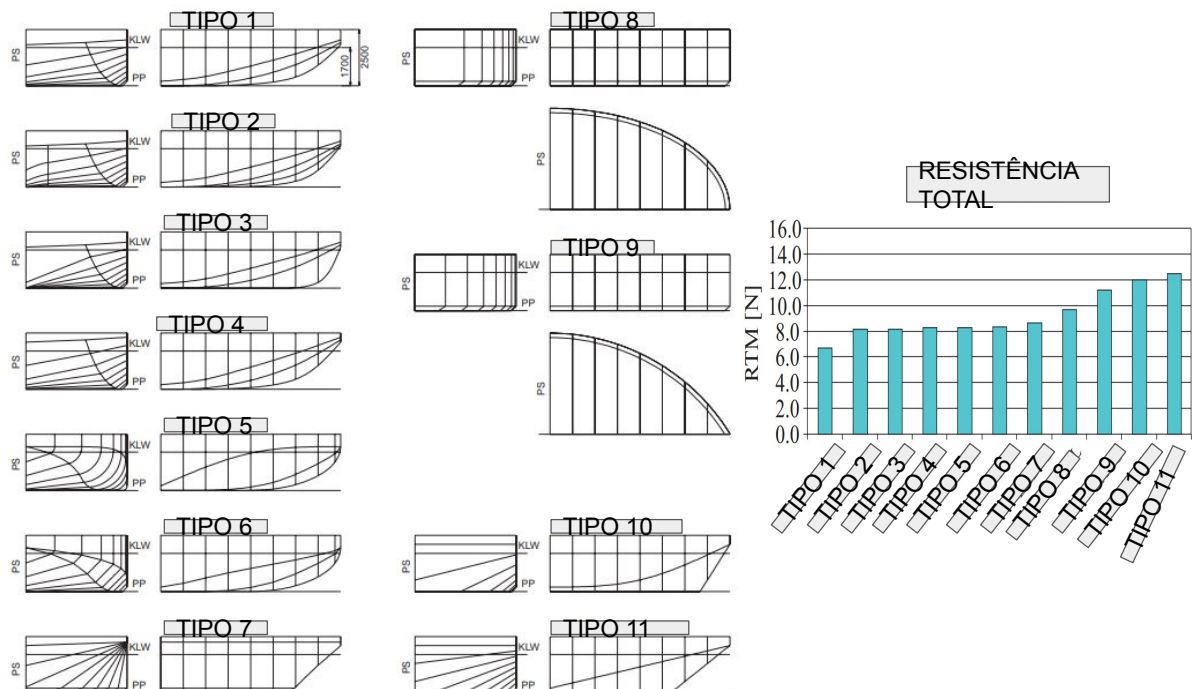
1.2 Revisão bibliográfica

O estudo da interação de embarcações do tipo barcaça com diversos tipos de escoamento tem sido foco de estudo nos últimos anos em diversas regiões do mundo. Algumas das contribuições mais relevantes, relacionadas com o tópico de estudo, são apresentadas a seguir.

Tabaczek, Kulczyk e Zawislak (2007) analisaram a resistência do casco de barcaças rebocadas em águas rasas. Cálculos numéricos utilizando o software *ANSYS Fluent* (software baseado em análises *CFD*, *Computational Fluid Dynamics*), foram feitos em torno do escoamento d'água, considerando diferentes tipos de barcaças com diferentes formas

de proa. A Figura 6 mostra os diferentes formatos de proa das barcaças que foram avaliadas (11 tipos diferentes de proa) para as profundidades de 2 e 3.4 m, ou seja, os 11 formatos de casco foram utilizados para ambas as profundidades, juntamente com o total de resistência ao avanço dos respectivos modelos utilizados nas simulações.

Figura 6 – Tipos de proa das barcaças consideradas no estudo de Tabaczek, Kulczyk e Zawislak (2007) e resistência total ao avanço, sendo RTM a resistência total ao avanço do modelo, em Newtons (N).



Fonte: Adaptado de Tabaczek, Kulczyk e Zawislak (2007)

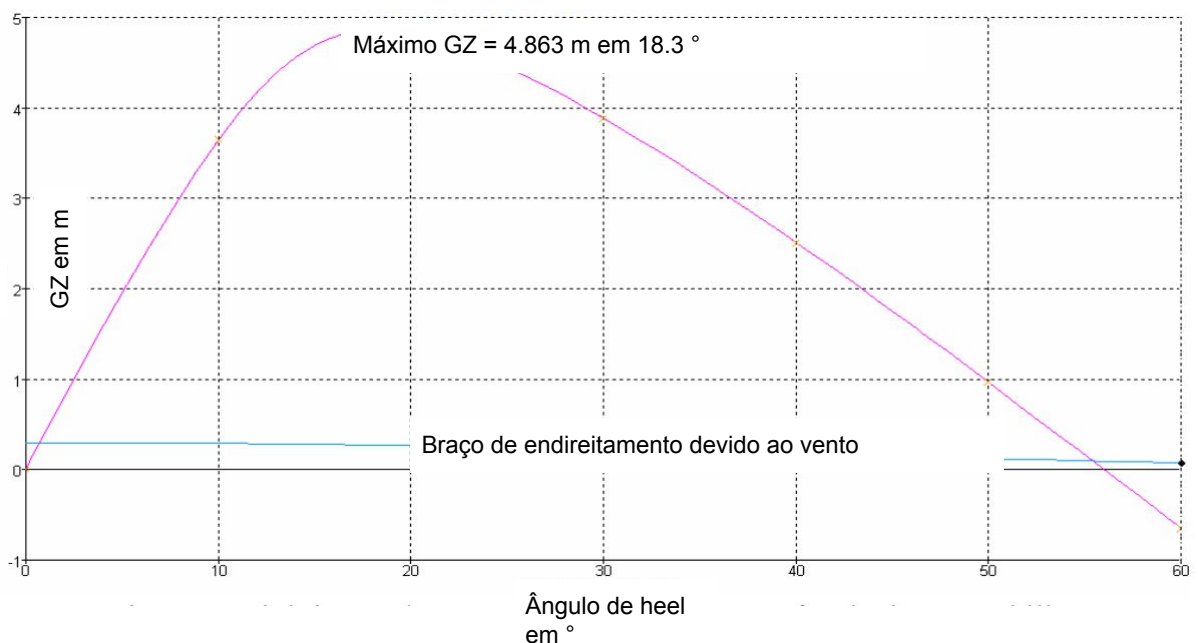
A resistência ao avanço foi calculada separadamente entre a proa, a popa, e o corpo esbelto da barcaça. Os resultados para todos os tipos de proa foram comparados e apresentados nas conclusões da publicação, sendo a embarcação tipo 1 a mais adequada segundo os autores. As condições dos cálculos foram feitas para 2 e 3.4 m de profundidade d'água e F_{rh} (número de Froude de profundidade) de 0.56 e 0.43 para as condições de menor e maior profundidade, respectivamente. O F_{rh} foi definido como $F_{rh} = v/\sqrt{gh}$, onde v é a velocidade de operação da embarcação (m/s), g corresponde à aceleração da gravidade (m/s^2), e h é a profundidade do leito do rio ou base do tanque de prova até a quilha da embarcação (m). Nas simulações numéricas em *CFD*, os efeitos viscosos da superfície livre do escoamento foram considerados. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o modelo *RNG k - e*, considerando uma resolução temporal de 0.01s.

A estabilidade e os movimentos de uma barcaça foram analisados por Dhavalikar, Negi e Doshi (2009), que fizeram cálculos referentes às características hidrostáticas iniciais, a curva de estabilidade intacta e os operadores de amplitude de resposta (R.A.O., *Response*

Amplitude Operators) dos movimentos de *roll* (rolagem) e *pitch* (cabeceio). Estes são movimentos rotacionais de uma embarcação referentes aos eixos longitudinal e transversal que passam pelo centro de gravidade da embarcação. A barça considerada no estudo tem por objetivo auxiliar em operações *offshore* (longe da costa), como o transporte de estruturas do tipo jaqueta, materiais para reparo em plataformas de petróleo *offshore* e módulos de construção dessas plataformas.

A Figura 7 representa o gráfico de estabilidade inicial da barça avaliada em Dhavalikar, Negi e Doshi (2009). A figura mostra os braços de endireitamento (GZ), que são as distâncias que geram momentos restauradores da embarcação em função dos ângulos de banda (*heel*), que são ângulos de inclinação em relação aos bordos da embarcação (bom-bordo e boreste). Também é mostrado o braço de endireitamento causado pelo vento, em função do ângulo de *heel*. De acordo com o gráfico, é obtido um valor de GZ de 4.863 m para um ângulo de banda de 18.3° . Este valor, poderia ser considerado típico para barças similares; porém, é importante mencionar que o mesmo pode variar de acordo com as suas condições de operação, a quantidade de tripulantes e a condição do ambiente de navegação em que elas estejam inseridas.

Figura 7 – Curva de estabilidade intacta da barça, que relaciona o braço de endireitamento GZ com o ângulo de banda da barça.

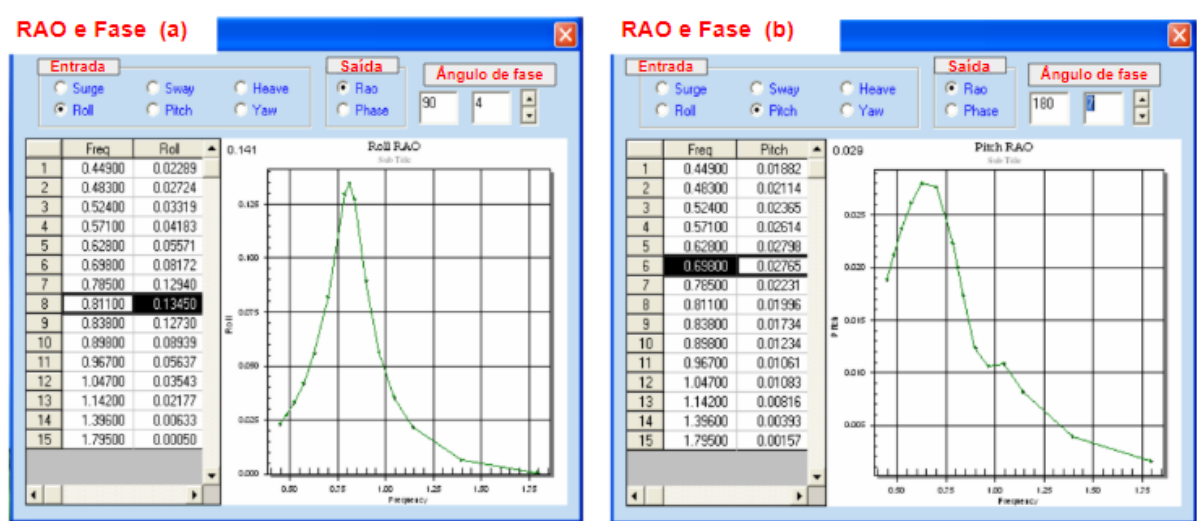


Fonte: Modificado de Dhavalikar, Negi e Doshi (2009)

Na Figura 8, são apresentados os operadores de amplitude de resposta (RAO a partir de agora, *Response Amplitude Operator*) da barça estudada por Dhavalikar, Negi e Doshi (2009). Os RAO 's foram computados e obtidos utilizando o software *SO FORCE*

desenvolvido pela sociedade classificadora *Indian Register of Shipping*. Nesse estudo foi considerado o espectro de mar *JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Project*) para representar as condições de excitação das ondas. Assim, foram obtidos os *RAO's* de *roll* com ângulo de fase de 90° (Figura 8a) e de *pitch* com ângulo de fase de 180° (Figura 8b). A Figura 8 contém dados de entrada (*roll* ou *pitch*) e saída (*RAO* ou fase). Segundo os autores, visa-se necessário conhecer um plano de lastro para a barçaça, seguindo as recomendações técnicas de segurança da *Marine Warranty Surveyors* (*MWS*).

Figura 8 – Operadores de amplitude de resposta que relaciona o movimento de *roll* e *pitch* da barçaça com seus respectivos ângulos de fase. (a) *RAO* de *roll* (90°). (b) *RAO* de *pitch* (180°).



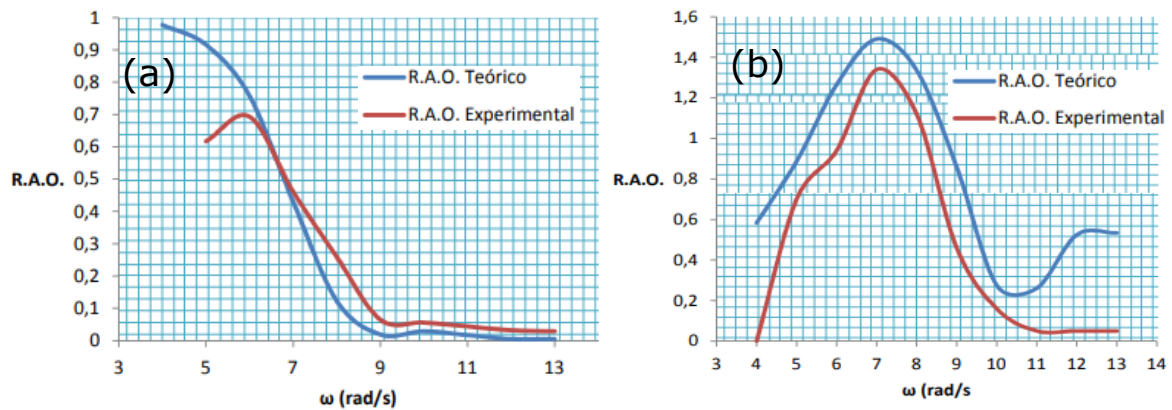
Fonte: Modificado de Dhavalikar, Negi e Doshi (2009)

Uma análise do potencial econômico da padronização de uma barçaça para navegação interior foi proposto por Basso (2012). Nesse trabalho, foi desenvolvido um estudo sobre a utilização de uma barçaça para movimentação de derivados líquido de petróleo, realizando um levantamento das características da barçaça e dos componentes que podem ser padronizados, tais como as suas cavernas (simples e de grandes dimensões) e anteparas estanques, com o intuito de minimizar seus custos de compra de materiais e montagem dos mesmos. Este estudo foi realizado com uma barçaça de 60 m de comprimento total da empresa Navegação Guarita S.A., que utiliza sua frota para transporte de diversos tipos de carga, dentre elas as da indústria petroquímica, da cidade de Triunfo (Rio Grande do Sul, Brasil) até o superporto de Rio Grande-RS. Foram obtidos resultados interessantes referentes à economicidade de materiais para a fabricação da barçaça como a redução de 2 à 3% dos custos com materiais utilizados nos perfis estruturais das cavernas e bulbos.

O estudo do comportamento de uma barçaça foi realizado utilizando a teoria das faixas por Larsen (2012). Esse trabalho teve por objetivo o estudo dos movimentos de

heave e *pitch* de uma barça. Os resultados comparativos entre os dados obtidos de forma experimental e os obtidos com o método de teoria das faixas, com o auxílio do software *MATLAB*, foram satisfatórios quanto aos *RAO's* dos movimentos de *heave* e *pitch*. Foi discutido que a discrepância entre os resultados pode ser devida a fatores relacionados com imprecisões das medidas experimentais, calibração dos sensores de pressão e aceleração entre as ondas no tanque de provas e a ausência da viscosidade no método numérico. A questão da linearidade das ondas experimentais, sendo que foi utilizada a teoria linear das ondas para a modelagem teórica das mesmas, também pode contribuir na discrepância da comparação de resultados. As Figuras 9a e 9b representam as comparações entre os *RAO's* teóricos e experimentais de *heave* e *pitch*, respectivamente.

Figura 9 – Comparação de *RAO's* teóricos com os obtido experimentalmente. (a) Movimento de *heave*. (b) Movimento de *pitch*.



Fonte: Modificado de Larsen (2012)

Samson, Ogbonnaya e Ejabefio (2013) apresentaram uma análise de estabilidade para o desenho de uma barça offshore. O trabalho teve por objetivo avaliar o desenho ótimo de uma barça que opera com um guindaste em alto mar com um peso total de 5000 toneladas. Durante o estudo foi feita uma análise das suas estabilidades transversal e longitudinal, com o objetivo de mensurar os limites de carregamento para operação em segurança, assim como a obtenção dos valores ótimos de operação por meio de suas curvas hidrostáticas. A pesquisa relacionou e representou os gráficos do deslocamento, do *KG* (distância da quilha até o centro de gravidade da embarcação), do *BM*, raio metacêntrico, do *MTC1* (momento para trimar 1 centímetro) e do *KM* (distância da quilha até o metacentro da embarcação); todas essas grandezas são apresentadas em função do calado da embarcação.

Obreja (2013) realizou testes de resistência ao avanço em um modelo experimental de uma barça transportadora de gás, Utilizando dados experimentais obtidos no tanque de provas “Dunarea de Jos”, sediado na Universidade de Galati, Romênia. No estudo, foi

feita a modelagem da barcaça com um bulbo estilo “pescoço de ganso”. A estimativa da resistência ao avanço foi feita por meio do método de regressão de *Holtrop-Mennen*, e a extrapolação dos resultados experimentais por meio de critérios da *ITTC-1957*. Por fim foi realizada uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos por meio da simulação numérica, obtendo resultados razoáveis.

Também têm sido avaliados alguns métodos para o cálculo da resistência ao avanço de embarcações em águas restritas. O trabalho desenvolvido por Skupień e Prokopowicz (2014) teve por objetivo analisar a resistência ao avanço de embarcações que operam em navegação interior. Por meio de métodos de regressão e métodos já conhecidos de cálculo de resistência ao avanço, como a equação de Marchal e a fórmula de Howe, foram calculadas as curvas de potência para estimar o consumo de combustível dessas embarcações. Com a equação desenvolvida na pesquisa, juntamente com as equações de Marchal e Howe para a predição da resistência ao avanço, foi realizada uma comparação em três gráficos com diferentes condições de calados, bocas, comprimentos e profundidade dos canais, envolvendo três embarcações com os dados conhecidos pelo autor. Ao analisar intervalos de 2 a 2.5 m da profundidade do canal são obtidos resultados confiáveis com a equação de Marchal; porém, para profundidades maiores o método é ineficiente. Para o método envolvendo a equação de Howe foram obtidos bons resultados comparativos com profundidades acima de 2 m; porém, para pequenas profundidades os resultados divergiram.

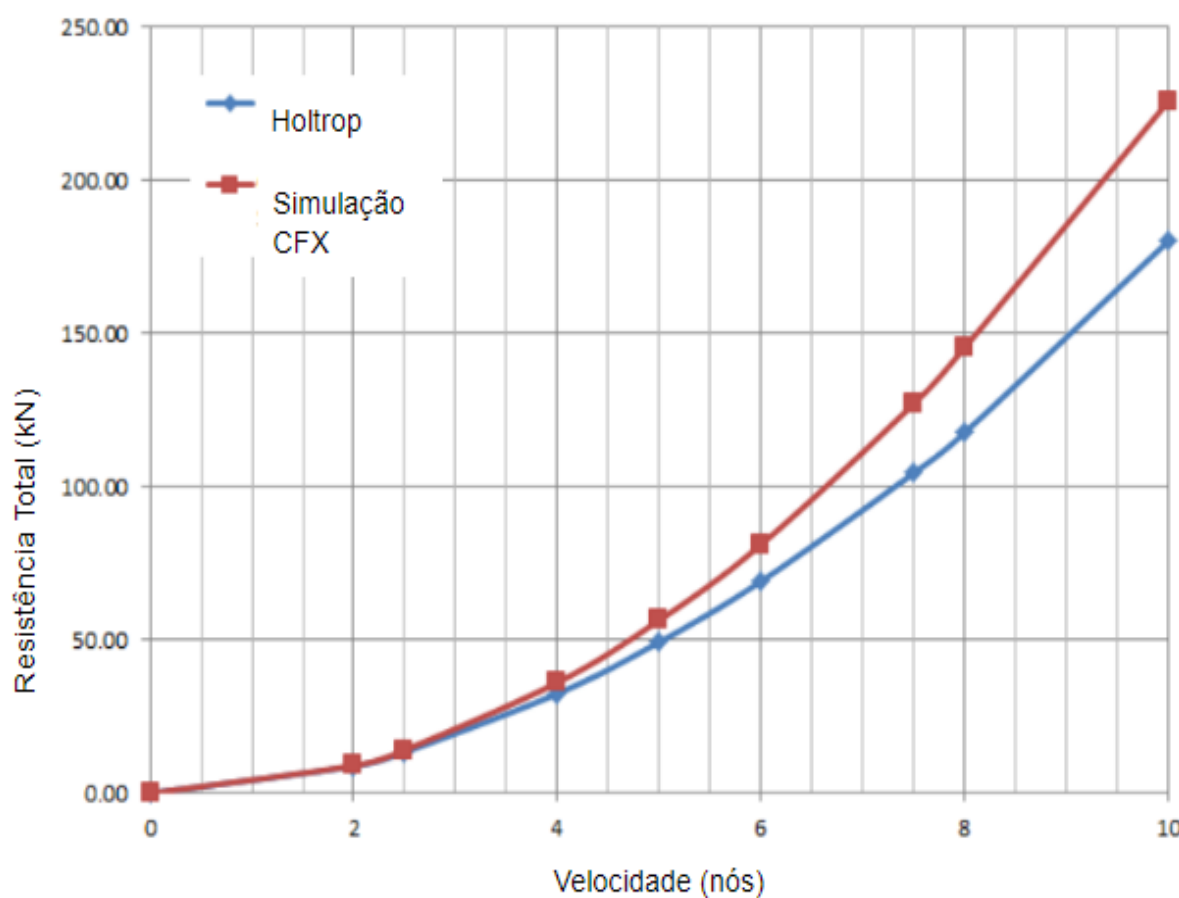
Analisando dados de trabalhos anteriores de testes com modelos de diversos tipos de embarcações e com limitações como F_{rh} (número de *Froude* de profundidade) menores do que 0.7, foi desenvolvido um novo método para o cálculo da resistência ao avanço de embarcações de carga a motor que operam em navegação interior, considerando a resistência dos cascos, velocidades de avanço e profundidades dos canais navegáveis (SKUPIEŃ; PROKOPOWICZ, 2014).

A predição da resistência ao avanço total de uma barcaça carvoeira autopropelida, utilizando CFD, foi apresentada no trabalho de Purwana e Husodo (2015). A pesquisa teve por objetivo estimar a resistência ao avanço total de uma barcaça com propulsão própria que opera no transporte de carvão utilizando métodos *CFD* com o software *ANSYS-CFX*, que resolve as equações de *Navier-Stokes* (ou seja, considerando os efeitos viscosos do escoamento). A Figura 10 mostra a comparação dos dados de resistência ao avanço utilizando o método de regressão de Holtrop e o método com efeitos viscosos do *ANSYS-CFX* (PURWANA; HUSODO, 2015).

Nesse trabalho foi feita a modelagem do casco da barcaça no software *Maxsurf* para comparação dos resultados da simulação com *CFD*. Os resultados comparativos foram satisfatórios para a faixa entre 2 e 4 nós, onde os erros variaram de 2.284% à 10.026%, na comparação entre o método *ANSYS-CFX* e o método de *Holtrop*.

Um inovador sistema de direção acoplado para uma barcaça fluvial rebocada em

Figura 10 – Comparação entre o método do *Holtrop-Mennen* e o *ANSYS-CFX*.



Fonte: Modificado de Purwana e Husodo (2015)

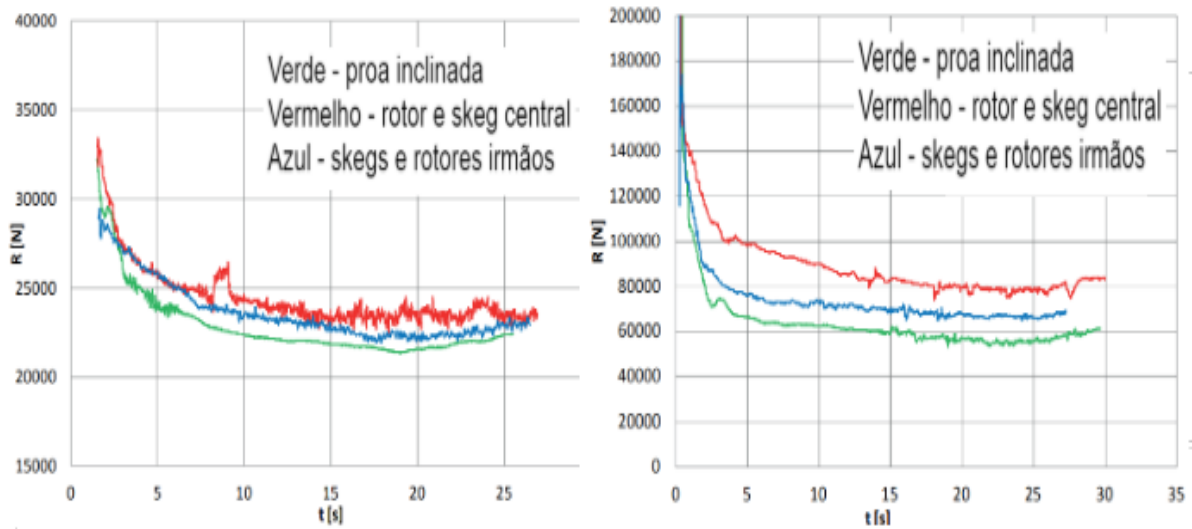
operação em áreas ambientalmente sensíveis foi estudado por Abramowicz-Gerigk, Burciu e Jachowski (2017). A Figura 11 mostra a comparação da resistência ao avanço do protótipo em *CFD* operando a 10 km/h e 15 km/h, utilizando uma proa inclinada sem uso de *skegs*¹, um *skeg* central e um rotor e, finalmente, *skegs* e rotores irmãos. Foi identificada uma menor resistência ao avanço na simulação da barcaça sem o uso de rotores e *skegs*.

A Figura 12 representa as barcaças utilizadas nas simulações feitas por Abramowicz-Gerigk, Burciu e Jachowski (2017), com o uso de um *skeg* central na Figura 12a e *skegs* nos bordos da barcaça Figura 12b. O uso de *skegs* pode ser administrado de acordo com os objetivos a serem alcançados na operação final da barcaça.

O trabalho de Abramowicz-Gerigk, Burciu e Jachowski (2017) teve por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de direção acoplado na popa da barcaça, composto por um sistema de direção auxiliar localizado na proa e um sistema mecânico de acoplamento, que opera em rotas de navegação interior na Polônia, especialmente comboio

¹ *skeg* é uma extensão da quilha da embarcação que auxilia na manobrabilidade da barcaça.

Figura 11 – Comparação da resistência ao avanço com a proa inclinada, uso de *skegs* e rotores.



Fonte: Modificado de Abramowicz-Gerigk, Burciu e Jachowski (2017)

Figura 12 – Configuração estrutural. (a) Uso de um *skeg* central na simulação realizada. (b) Uso de dois *skegs*; um em cada borda da barcaça.



Fonte: Modificado de Abramowicz-Gerigk, Burciu e Jachowski (2017)

de barcaças operadas no rio Vistula. Um dos objetivos do sistema de direção desenvolvido consiste em minimizar os impactos ambientais de forma eficiente, otimizando a manobrabilidade da barcaça com o apoio de um leme na proa. A simulação numérica foi feita em *CFD* utilizando o modelo $k - \epsilon$ para modelar os efeitos viscosos d'água. Os resultados foram validados com resultados de modelos, com a presença de 1 e 2 rotores juntamente com 1 ou 2 *skegs*.

Llauca (2018) realizou um estudo experimental de resistência ao avanço em barcaças menores. O trabalho consistiu em realizar um estudo experimental sobre a resistência ao

avanço de barcaças com 3 diferentes relações de comprimento e boca, obtendo dados em um tanque de prova para experimentos hidrodinâmicos. Foi feita a extrapolação dos dados dos modelos para o protótipo das barcaças em tamanho real, e em seguida foram obtidas as curvas de resistência ao avanço, assim como as curvas de potência efetiva, para dois calados por barcaça. Nos resultados gráficos foram observadas tendências quadráticas, tanto para os resultados de resistência ao avanço, como para a potência efetiva dos casos de estudo de barcaças, de forma que foi demonstrado que os ensaios foram feitos de maneira adequada. Com os pontos obtidos na análise dos dados, não foi possível construir uma série sistemática de resistência ao avanço específica para barcaças.

A estimativa da resistência ao avanço por meio de uso de métodos computacionais tem tido relevância no estudo de diversas embarcações, incluindo veículos militares anfíbios. Por exemplo, o trabalho desenvolvido por Islam et al. (2018) teve por objetivo estimar a resistência ao avanço e a potência efetiva de um veículo anfíbio de uso militar em Bangladesh, principalmente para fins de obtenção de dados escassos de resistência ao avanço desses veículos. Na pesquisa, foram utilizados os softwares *Maxsurf* e *Star CCM+* para esse fim e o software *SolidWorks* para a modelagem do veículo, além de métodos práticos para estimar a potência efetiva. Como resultado das simulações com o software *Maxsurf*, foi obtida uma simulação do trem de ondas gerado pelo veículo com um intervalo de velocidades de avanço entre 1 e 6 nós, com um passo de 0.5 nós.

Na análise do comportamento hidrodinâmico de embarcações, métodos estatísticos também tem sido desenvolvidos. Por exemplo, Muñoz et al. (2020) apresentou um modelo estatístico para a estimativa da resistência ao avanço de uma embarcação de desembarque (*landing craft*). O trabalho teve por objetivo estimar a resistência total ao avanço e, conseqüentemente, a potência efetiva da embarcação, por meio de métodos estatísticos e regressões lineares múltiplas. Utilizando dados experimentais do canal de ensaios hidrodinâmicos da Universidade Austral do Chile, obtidos com 520 modelos, os resultados foram comparados com os dados obtidos de 3 barcaças em operação. Com a falta de séries sistemáticas para a predição da resistência ao avanço de embarcações de desembarque, foram utilizados os dados de resistência ao avanço de barcaças com formas a estas embarcações.

Kwon e Yeon (2021) pesquisou a otimização do ângulo de inclinação de uma barcaça tipo *FPSO* (*Floating, Production, Storage and Offloading*) desde uma perspectiva de estabilidade de reboque e carregamento. Especificamente, a pesquisa teve por objetivo analisar a inclinação da popa e da proa da barcaça, utilizando modelagem *CFD* (*URANS, Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes*), utilizando o software *STAR-CCM+ v.13*. A Figura 13 mostra a inclinação da proa e da popa da barcaça utilizada na pesquisa. As inclinações da proa variam entre 30-60° com intervalos de 10° e as inclinações da popa variam no intervalo de 20-50° com intervalos de 5°.

Figura 13 – Representação das inclinações de popa e proa da barcaça.



Fonte: Modificado de Kwon e Yeon (2021)

Com as simulações em *CFD* e as suas respectivas comparações experimentais foi possível obter conclusões sobre a estabilização do movimento de *yaw* da embarcação. O movimento de *yaw* se mostra mais amortecido em torno de 40° , independentemente das inclinações de proa dentro do intervalo de 30° e 60° . Também são obtidos resultados em referência à intensidade dos vórtices gerados na popa em torno da inclinação de 40° . O ângulo de 40° se apresentou como o mais estável para inclinações de popa da barcaça, trazendo mais estabilidade à embarcação. Com relação à resistência ao avanço, foi concluído que quanto menor for o ângulo de proa, menor será a resistência ao movimento da barcaça.

1.3 Justificativa

Embora existam diversas pesquisas relacionadas com a avaliação do comportamento hidrodinâmico de barcaças e outras embarcações, ainda não existem muitos estudos focados na avaliação de barcaças de carga que operam na região amazônica. Por tanto, este trabalho tem por justificativa realizar um estudo simplificado sobre as características hidrostáticas principais, resistência ao avanço e comportamento em ondas de uma barcaça regional. Considera-se relevante considerar o casco de uma barcaça real da região como um padrão, avaliando o efeito das inclinações da proa e popa. Com a finalidade de realizar um estudo prático, foram considerados os métodos disponíveis no *Maxsurf*. O procedimento simplificado proposto, assim como os resultados obtidos, podem somar à bibliografia sobre a Engenharia Naval na região amazônica e aos estudos sobre características hidrostáticas, resistência ao avanço, comportamento em ondas e transporte fluvial em barcaças.

1.4 Objetivos

1.4.1 Geral

Estudar o comportamento hidrodinâmico de uma barcaça de carga regional, avaliando o efeito da mudança da inclinação da proa e da popa nas características hidrostáticas, resistência ao avanço e comportamento em ondas, utilizando métodos simplificados.

1.4.2 Específicos

- Revisar estudos do comportamento hidrodinâmico de barcaças que envolvam características hidrostáticas, resistência ao avanço e comportamento em ondas.
- Avaliar o efeito da variação da inclinação da proa e da popa nas características hidrostáticas de uma barcaça regional utilizando software *Maxsurf Modeler*.
- Avaliar, comparar e discutir o efeito da variação da inclinação da proa e popa na resistência ao avanço de uma barcaça regional, utilizando os métodos de *Holtrop* e *KR Barge*, disponíveis no software *Maxsurf Resistance*. Discutir as restrições e limitações do uso prático e simplificado desses métodos para os casos de estudo dos cascos considerados.
- Avaliar e discutir o efeito da variação da inclinação da proa e da popa no comportamento em ondas de uma barcaça regional (movimentos *heave* e *pitch*), utilizando os métodos da teoria das faixas, disponível no software *Maxsurf Motions*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta uma descrição simplificada do software *Maxsurf Modeler*. Este software foi utilizado para modelar a barcaça considerada como referência (caso padrão) e as barcaças cujas inclinações da proa e da popa foram variadas (casos de estudo). Também, são apresentadas as geometrias do caso padrão e dos casos de estudo, onde a proa e popa são inclinadas considerando o caso de estudo como referência central.

Também são abordados alguns conceitos teóricos sobre os métodos utilizados nos estudos comparativos. Estes métodos incluem análises hidrostáticas, de resistência ao avanço e do comportamento em ondas de uma embarcação; especificamente dos movimentos de *heave* e *pitch*.

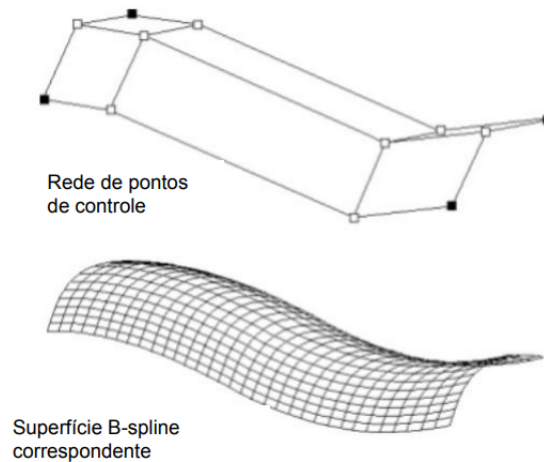
2.1 Descrição do software *Maxsurf Modeler*

O software *Modeler* é um utilitário do software *Maxsurf*, desenvolvido e gerenciado pela empresa privada *Bentley*. O *Modeler* é utilizado para fazer as primeiras modelagens do casco de uma embarcação quando se tem por objetivo estudar os conceitos iniciais da modelagem de uma embarcação. Utilizando suas ferramentas é possível adequar cada vez mais, de maneira manual, a modelagem do casco desejado.

O software contém uma importante ferramenta para a modelagem de embarcações, que consiste nas linhas *B-spline*, como mostrado na Figura 14 (BENTLEY, 2022). Estas linhas possuem pontos iniciais e finais, chamados de "pontos de controle". Manipulando os pontos de controle, é possível dar um formato suave às linhas da superfície limitante do casco da embarcação a ser modelada.

Ao utilizar as ferramentas de trabalho do *Modeler*, é possível criar os formatos de diversas embarcações para estudo, no caso deste trabalho o *Modeler* foi usado para a modelagem dos cascos das barcaças regionais.

Figura 14 – Representação das superfícies geradas pelas curvas *B-spline*.



Fonte: Bentley (2022)

2.2 Casos de estudo da barcaça regional

No presente trabalho, foi considerado como caso padrão de estudos (referência) uma barcaça regional, com as dimensões principais mostradas na Tabela 1, incluindo o comprimento total, o comprimento entre perpendiculares, a boca moldada, o pontal moldado e o calado de projeto.

A Figura 15 representa a barcaça regional Escambal II, que inspirou a barcaça caso padrão deste trabalho, cedida pelo escritório de projetos RGF e pelo Eng. Ricardo Sanchez. A barcaça Escambal II opera na região do estado do Amazonas, mais precisamente no entorno da cidade de Manaus-AM. A Figura 15a e 15c representam uma vista da barcaça carregada com granel sólido, juntamente com um empurrador fluvial, formando um comboio fluvial. A Figura 15b representa a barcaça em uma vista longitudinal de sua inclinação de proa. A Figura 15d representa a barcaça sendo carregada com granel sólido.

Tabela 1 – Características principais do caso padrão

Comprimento total	83 m
Comprimento entre perpendiculares	79,679 m
Boca moldada	21 m
Pontal moldado	3,8 m
Calado de projeto	3,14 m

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Imagens da barcaça Escambal II, que inspirou a barcaça caso padrão deste trabalho. (a) Barcaça Escambal II carregada com granél sólido. (b) Inclinação de proa da barcaça Escambal II. (c) Comboio fluvial formado pela barcaça Escambal II e empurrador regional. (d) Barcaça Escambal II e empurrador fluvial.



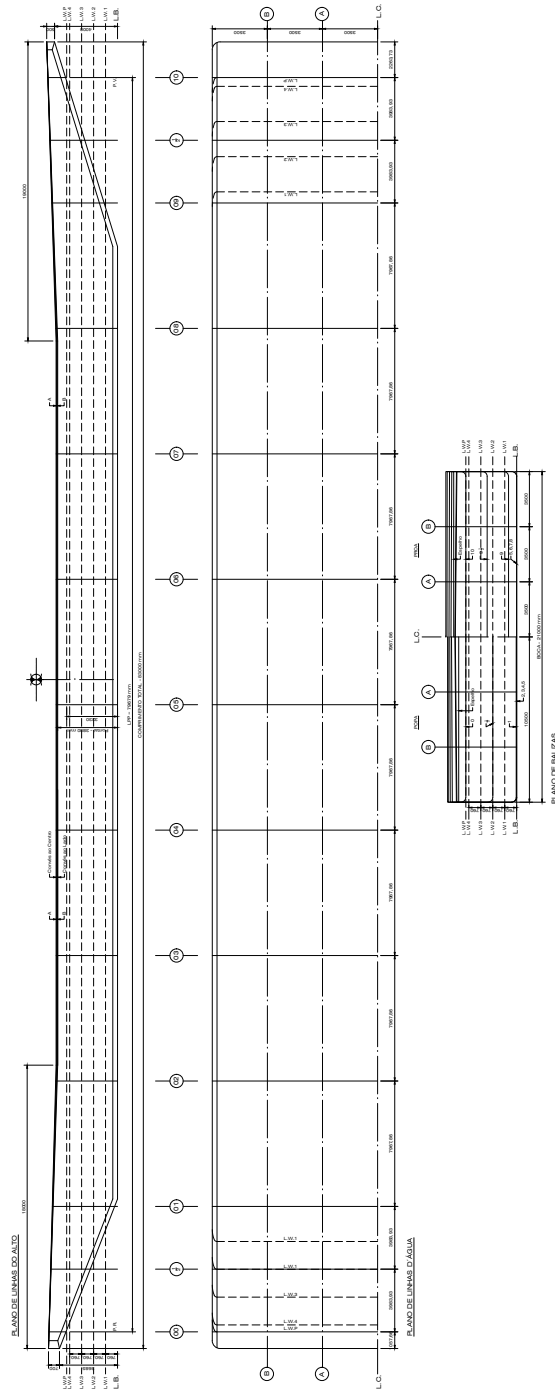
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os planos de linha da embarcação foram digitalizados a partir dos planos originais, utilizando o software de desenho técnico *Autocad*. A Figura 16 mostra o plano de alto, plano de linhas d'água e o plano de balizas da embarcação de referência. No desenho técnico da barcaça (caso padrão e casos de estudo), foram consideradas 13 balizas para o desenho geométrico (ver Figura 16). As balizas 0, 0.5 e 1 são relacionadas às inclinações da popa e as balizas 9, 9.5 e 10 são relacionadas às inclinações da proa. No plano de linhas do alto mostrado na Figura 16, pode-se observar a vista longitudinal da embarcação, incluindo o comprimento total (L), o comprimento entre perpendiculares (L_{pp}), 5 linhas d'água, vista do convés ao centro, convés ao lado e as inclinações de proa e popa do convés da barcaça, denominados "tosamento".

O plano de linhas d'água representado na Figura 16 mostra uma vista vertical da barcaça. Nele estão representadas as dimensões da barcaça assim como as 5 linhas d'água utilizadas no projeto. É uma vista cortada pela metade, representando apenas um bordo da embarcação, dividida simetricamente pela linha de centro da mesma.

Ainda na Figura 16, o plano de balizas da barcaça também está representado. É uma vista transversal, dando ênfase à boca da barcaça. Nela estão representadas as vistas da proa e da popa da embarcação. Cada vista de proa e popa da barcaça está dividida em dois cortes, corte A e corte B, para melhor visualização da barcaça nos planos de linha. No plano de balizas estão representadas as 13 balizas utilizadas no projeto da barcaça caso padrão, além da presença dos espelhos de proa e popa da embarcação.

Figura 16 – Planos de linhas da barça, incluindo plano de linhas do alto, plano de linhas d'água e plano de balizas da barça caso padrão.

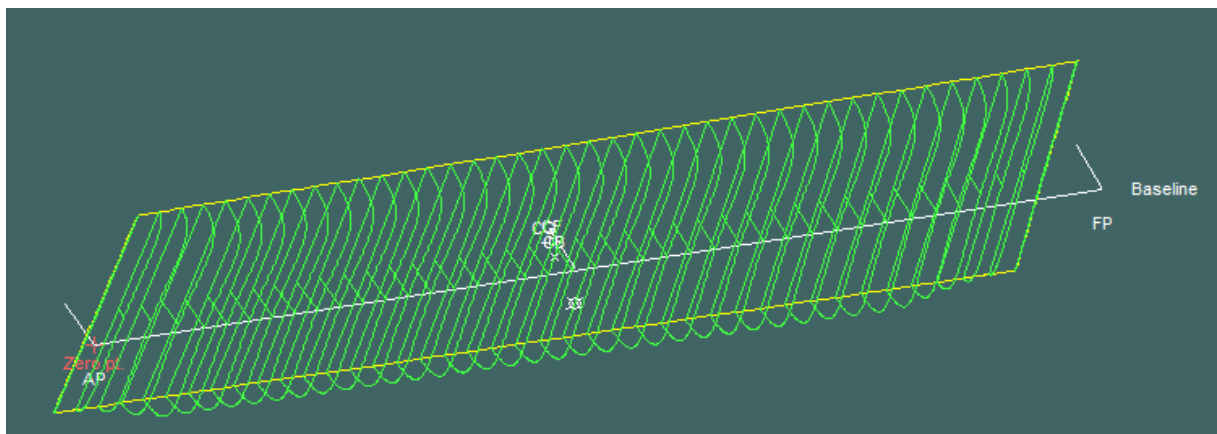


Fonte: Elaborado pelo autor.

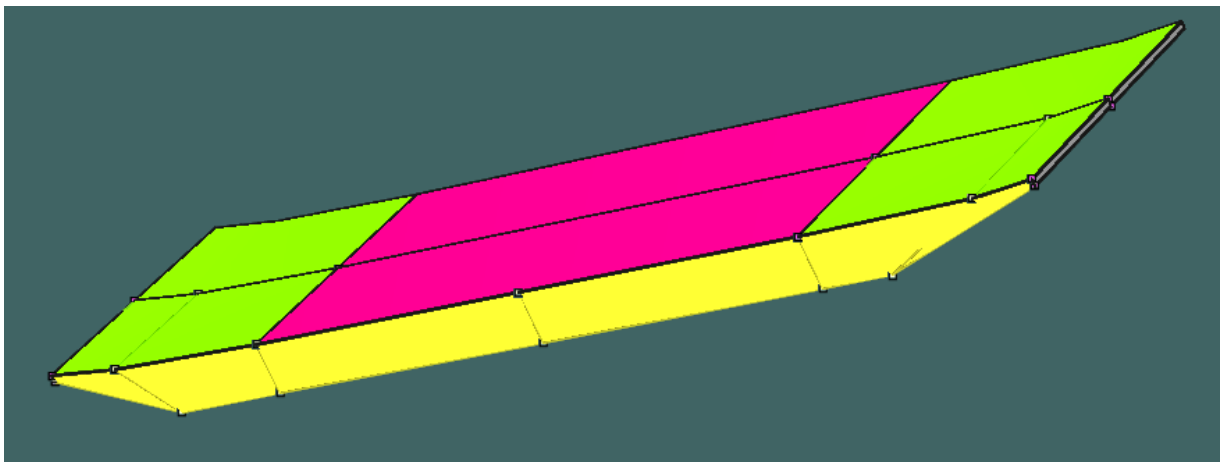
A Figura 17a mostra a barça caso padrão representada por suas balizas, gerada no software *Maxsurf Modeler*. Esta figura mostra 41 balizas, que foram geradas entre as balizas de referência (Figura 16) com o objetivo de contornar e visualizar adequadamente as dimensões principais da barça. Considera-se que com uma modelagem mais realística da barça caso padrão é possível contribuir com simulações de resistência ao avanço e comportamento em ondas mais adequadas.

A Figura 17b mostra uma vista da modelagem da embarcação caso padrão utilizando o *Maxsurf Modeler*, onde podem ser vistas as suas formas geométricas e angulações tanto de proa como também de popa.

Figura 17 – Modelo do caso padrão de barça gerado no *Maxsurf Modeler*. (a) Balizas que foram geradas no software. (b) Superfície do casco.



(a)



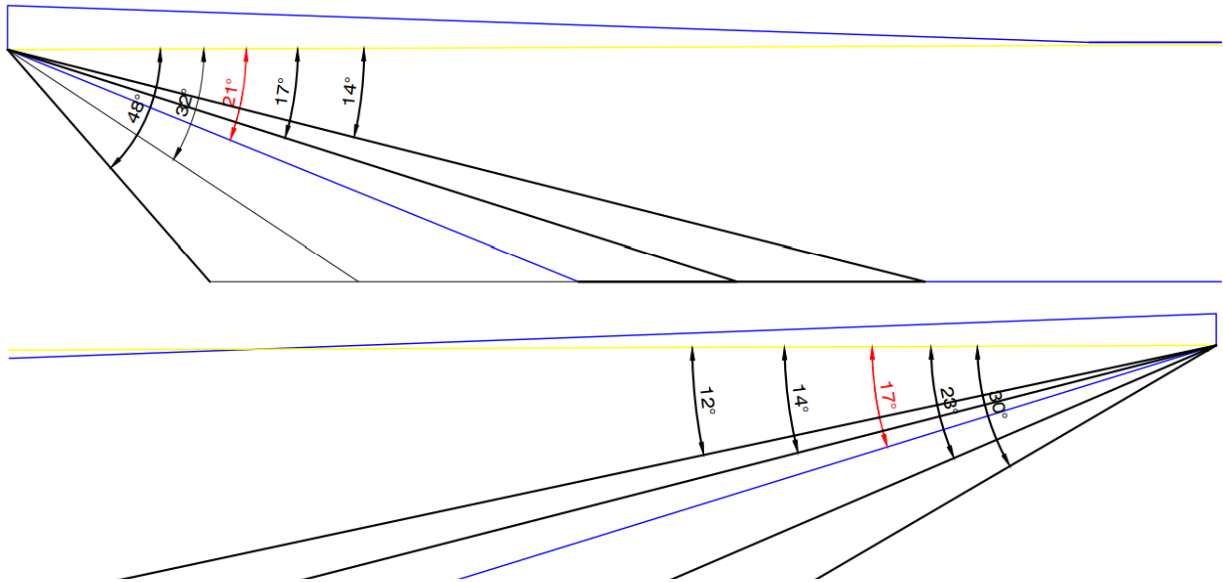
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 18 mostra as extremidades das barças dos casos de estudo na Tabela 2, com sua vista de proa e popa. O contorno azul representa a geometria original da barça (caso de estudo padrão), os contornos em preto representam as novas geometrias da barça, de acordo com os ângulos de inclinação indicados. A linha amarela representa

o calado de operação da barcaça, em 3.14 m.

Figura 18 – Vista de perfil das extremidades dos cascos das barcaças consideradas como caso de estudo: proa (acima) e popa (embaixo). A linha amarela representa o calado de operação, em 3.14 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta as inclinações da proa e da popa do caso padrão e dos 4 casos de estudo. Os respectivos ângulos de cada caso são medidos em relação à linha que liga os espelhos de proa e popa, seguindo o padrão de medição dos ângulos encontrado em Kwon e Yeon (2021) (ver linha amarela na Figura 18).

É importante citar que o estudo efetuado neste trabalho sobre o efeito das inclinações de proa e popa de uma barcaça regional é realizado levando em consideração 5 casos de estudo isolados, incluindo o caso padrão de estudo, com suas respectivas inclinações de popa e proa, ou seja, a variação das inclinações da proa e da popa não foi feita de maneira sistemática. O objetivo principal consiste em avaliar o comportamento de diversas configurações do casco da barcaça original.

Tabela 2 – Ângulos de inclinação de proa e popa dos casos de estudo

Ângulo	Proa	Popa
Caso padrão	17°	21°
Caso 1	23°	32°
Caso 2	30°	48°
Caso 3	14°	17°
Caso 4	12°	14°

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 Cálculos de características hidrostáticas

A primeira análise a ser feita dos casos de estudo em relação ao caso padrão consiste na análise hidrostática inicial, onde são analisadas as características das barcas com a água parada, ou seja, em situação estática. Os parâmetros analisados foram os seguintes :

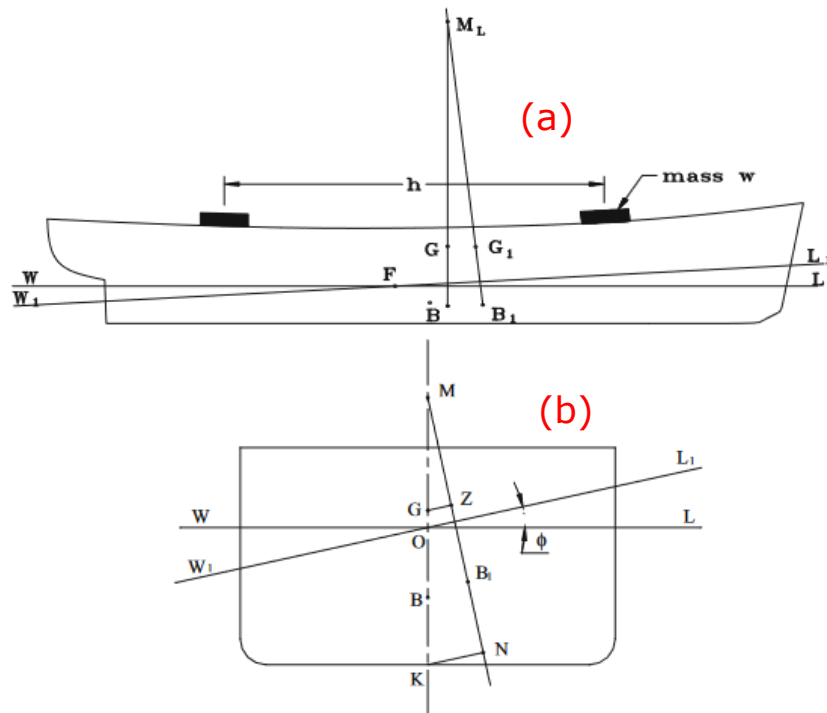
- ∇ - Deslocamento da embarcação (ton): é o volume d'água que a embarcação desloca, com base no Princípio de Arquimedes,
- A_m - Área molhada (m^2): é a área da embarcação em contato com a água, obras vivas,
- LCB - Centro longitudinal de carena (m): é a coordenada longitudinal do centro de empuxo da embarcação, sendo que o ponto de empuxo é o ponto por onde passa a linha de atuação ou o centro geométrico do volume submerso, força de empuxo,
- LCF - Centro longitudinal de flutuação (m): é a coordenada longitudinal de onde a flutuação ocorre concentradamente na embarcação,
- KB - Distância da quilha até o centro de carena da embarcação (m),
- BM_t - Raio metacêntrico transversal (m): é a distância transversal do centro de carena ao metacentro da embarcação,
- GM_t - Altura metacêntrica transversal (m): é a distância transversal do centro de gravidade ao metacentro da embarcação,
- KM_t - Distância transversal da quilha ao metacentro da embarcação (m),
- TP_c - Toneladas por centímetro $\frac{ton}{cm}$: é uma medida relacionada ao volume de imersão da embarcação,
- MT_c - Momento para trimar 1 centímetro $ton \cdot cm$: é uma medida relacionada à rotação do corpo da embarcação.
- $C_{L/\nabla}$ - Coeficiente de razão comprimento-deslocamento. Coeficiente definido por :

$$C_{L/\nabla} = \frac{L}{\nabla^{1/3}} \quad (1)$$

- C_b - Coeficiente de bloco (adimensional) : Relaciona o volume deslocado pela parte submersa da embarcação com o volume do paralelepípedo formado pelo comprimento entre as perpendiculares, boca e calado da embarcação. A sua fórmula é dada por :

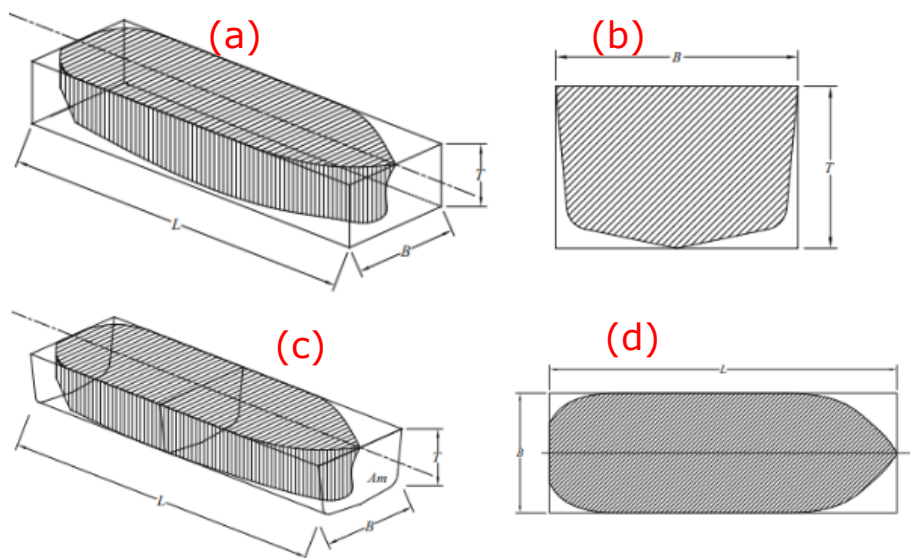
$$C_b = \frac{\nabla}{L_{pp} \cdot B \cdot T} \quad (2)$$

Figura 19 – (a) Representação do LCF, LCB. da embarcação (b) Representação do BM, GM, KM e KB da embarcação.



Fonte: (LEE, 2019).

Figura 20 – (a) Coeficiente de bloco da embarcação. (b) Coeficiente de seção mestra da embarcação. (c) Coeficiente prismático da embarcação. (d) Coeficiente prismático vertical da embarcação.



Fonte: (LEE, 2019).

- C_m - Coeficiente de seção mestra, ou a meia nau: Relaciona a área da seção mestra da embarcação imersa e a área do retângulo formado pela boca e calado da embarcação. Sua fórmula é dada por :

$$C_m = \frac{A_{mestra}}{B \cdot T} \quad (3)$$

- C_p - Coeficiente prismático longitudinal, ou simplesmente coeficiente prismático (adimensional): Relaciona o volume deslocado pela parte submersa da embarcação com o volume do prisma formado pela área da seção mestra e o comprimento entre perpendiculares da embarcação. A sua fórmula é dada por :

$$C_p = \frac{\nabla}{A_{mestra} \cdot L_{pp}} \quad (4)$$

- C_{wp} - Coeficiente prismático vertical, ou coeficiente de área do plano d'água (adimensional): Relaciona o volume deslocado pela parte submersa da embarcação com o volume do prisma formado pela área da seção. A sua fórmula é dada por :

$$C_{wp} = \frac{\nabla}{A_{mestra} \cdot T} \quad (5)$$

Sendo,

L = comprimento total da embarcação (m),

L_{pp} = comprimento entre perpendiculares da embarcação (m),

B = boca da embarcação (m),

T = calado da embarcação (m),

A_{mestra} = área da seção mestra da embarcação (m^2).

Informações mais detalhadas sobre as características hidrostáticas de uma embarcação podem ser encontradas em Lee (2019).

2.4 Cálculos de resistência ao avanço

2.4.1 Descrição do software *Maxsurf Resistance*

O software Resistance é um módulo do software *Maxsurf*, desenvolvido e gerenciado pela empresa privada Bentley®. O software possui diversas alternativas de métodos de uso prático para estimar a resistência ao avanço de embarcações. Alguns exemplos são os conhecidos métodos de *Holtrop* e *Savitsky*, úteis na engenharia para estimar, de maneira simplificada, a resistência ao avanço de embarcações de deslocamento e embarcações de alto desempenho (também conhecidas como embarcações do tipo *planing hulls*) respectivamente. O software *Resistance* possui métodos preditivos de resistência ao avanço para

embarcações de planeio; estas embarcações de acordo com Sun e Faltinsen (2007) operam a um número de *Froude* baseado em comprimento com limite inferior entre 1.0 - 1.2. O software *Resistance* também possui métodos preditivos para embarcações do tipo iate. Além disso, possui métodos para embarcações de deslocamento, que será o caso neste estudo, para baixos números de *Froude*, menores do que 0.4.

O presente trabalho visa fazer um estudo estimado da resistência ao avanço dos casos de estudo da barça, que foram previamente modelados no software utilitário *Maxsurf Modeler*. Com a embarcação modelada e importada no software *Maxsurf Resistance*, é possível selecionar os métodos desejados e definir condições iniciais para estimar a resistência ao avanço.

Neste trabalho foram considerados dois métodos disponíveis no *Maxsurf Resistance* para estimar a resistência ao avanço das barças, considerando as condições de operação no regime de deslocamento. Os métodos selecionados são o Método de *Holtrop* e o Método *KR Barge*. Nas simulações utilizando os métodos de *Holtrop* e *KR Barge* foi utilizado um intervalo de velocidades de 0 a 20 nós, com o objetivo de se obter um maior intervalo de representação para comparação gráfica dos valores de resistência ao avanço.

Uma explicação simplificada será apresentada nos próximos tópicos deste trabalho.

O *Resistance* é um módulo que utiliza como base para seus cálculos o método chamado de Teoria das Faixas, ou como se originou na literatura "*Strip Theory*". É utilizado também o método do corpo esbelto ou "*slender body method*", para estimar a resistência de ondas para uma embarcação monocasco, que é o caso deste estudo. Para o cálculo do componente da força total de resistência o *Resistance* utiliza a componente viscosa da resistência através do critério do coeficiente de fricção com seu fator de forma, conforme especificado na *ITTC-57 (International Towing Tank Conference)* (ITTC, 1957).

2.4.2 Método *Holtrop*

O método de *Holtrop* (HOLTROP, 1978) é um método de predição da resistência total de uma embarcação muito utilizado na Engenharia Naval. O método é baseado em análises de múltiplas regressões para embarcações que operam no regime de deslocamento. Devido a este regime de operação, o método de *Holtrop* pode ser utilizado para a estimativa de resistência ao avanço para qualquer tipo de barça, visto que as embarcações deste tipo operam tipicamente no regime de deslocamento. Para se formarem os dados utilizados nas equações e expressões preditivas no método de *Holtrop*, foram utilizados 147 modelos e ~1707 medições de resistência ao avanço, utilizando também ~82 medições em campo a bordo de 46 embarcações.

O cálculo da resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop* poder ser aplicável para modelos e protótipos de embarcações de diferentes dimensões, sendo preciso que seja

feita uma análise de forma adimensional. Para isto, o método de *Holtrop* considera a resistência viscosa (R_v) e a resistência devido às ondas geradas pela embarcação (R_w), sendo representadas da seguinte forma específica :

$$\frac{R_v}{\Delta} = f_1(R_n, forma) \quad (6)$$

$$\frac{R_w}{\Delta} = f_2(F_n, forma) \quad (7)$$

Onde a resistência viscosa (R_v) e a resistência gerada pelas ondas (R_w) são funções da forma da embarcação e dos números de *Reynolds* (R_n) e *Froude* (F_n), respectivamente. Estes números são expressos como:

$$R_n = \frac{UL}{\nu} \quad (8)$$

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (9)$$

Sendo :

- U = velocidade do escoamento, em m/s;
- L = comprimento total da embarcação, em m;
- ν = viscosidade cinemática do fluido, em m^2/s ;
- g = aceleração da gravidade, em m/s^2 .

É importante mencionar que o método de *Holtrop* considera, de maneira simplificada, a contribuição na resistência total ao avanço devida ao efeito dos apêndices da embarcação. Também, é utilizada uma correção devido à forma do casco da embarcação, representada pelo fator $1 + k$, onde k é conhecido como fator de forma (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

De acordo com Holtrop (1978), a resistência devido aos efeitos viscosos é dada por :

$$R_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_F \cdot (1 + k) \cdot S_{tot} \quad (10)$$

sendo:

- ρ = massa específica da água,
- V = velocidade da embarcação,
- C_F = coeficiente friccional de resistência, retirado da formulação do *ITTC-1957* (ITTC, 1957),

- S_{tot} = área molhada total, somado o casco e os apêndices,
- $(1+k)$ = fator de forma da embarcação.

Considerando que :

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(R_n) - 2)^2} \quad (11)$$

O fator de forma pode ser dividido de $(1+k)$ para um fator representativo da resistência do formato do casco $(1+k_1)$ e um fator representativo da resistência dos apêndices da embarcação, k_2 .

Assim, uma fórmula representativa para $(1+k)$ pode ser expressa pela equação a seguir, onde S_{app} representa a área dos apêndices da embarcação:

$$1+k = 1+k_1 + (k_2 - k_1) \cdot \frac{S_{app}}{S_{tot}} \quad (12)$$

Para embarcações sem apêndices, o método Holtrop considera a superfície molhada do casco de acordo com a seguinte relação, obtida por meio de regressões múltiplas:

$$S = L \cdot (2T + B) \cdot \sqrt{C_M} \cdot [0.5303368 + 0.6321359C_B - 0.360327(C_M - 0.5) - 0.0013553 \cdot \frac{L}{T}] \quad (13)$$

sendo:

- L = comprimento na linha d'água,
- B = boca moldada,
- T = calado moldado,
- C_B = coeficiente de bloco,
- C_M = coeficiente de seção mestra.

Para a predição da resistência gerada pelas ondas são utilizadas as seguintes relações, onde C_P representa o coeficiente prismático da embarcação analisada e C_{WL} o coeficiente da área do plano d'água, ou coeficiente prismático vertical:

$$\frac{R_w}{\Delta} = c \cdot e^{m_1 F_n^d + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2})} \quad (14)$$

Considerando $d = 0.9$, os coeficientes da expressão anterior são dados como segue:

$$c = 569 \cdot \frac{B^{2.984}}{L} \cdot C_M^{-0.7439} \cdot C_{WL}^{1.2655} \quad (15)$$

$$m_1 = -4.8507 \frac{B}{L} - 8.1768 C_P + 14.034 C_P^2 - 7.0682 C_P^3 \quad (16)$$

$$m_2 = -0.4468 e^{-0.1 F_n^{-2}} \quad (17)$$

Informações mais detalhadas sobre o cálculo de resistência ao avanço de uma embarcação pelo método de regressão de *Holtrop* podem ser encontrado em Holtrop (1978), Molland, Turnock e Hudson (2017).

2.4.3 Método *KR Barge*

O método *KR Barge* foi proposto pela classificadora sul coreana de navios *Korean Register of Shipping* para calcular, de maneira prática, a resistência ao avanço de embarcações tipo barcaça, usadas para diferentes tipos de atividades (KRS, 2022), incluindo transporte de sólidos e líquidos. Cabe mencionar que existem algumas restrições para o uso do método *KR Barge* para a estimativa da resistência ao avanço. Recomenda-se que este método seja utilizado para barcaças que são rebocadas por empurradores com comprimento total menor do que 20 m e que operem com potência menor do que 300 HP (*Horse Power*). O método não é recomendável para barcaças construídas em madeira e que possuam porte bruto menor do que 50 ton. De acordo com KRS (2022), o cálculo da resistência ao avanço total com este método é dado pelas seguintes formulações:

$$R_t = R_f + R_w + R_a \quad (18)$$

sendo

- R_t = resistência total da barcaça, dada em t (toneladas),
- R_f = resistência friccional da barcaça, dada em t,
- R_w = resistência devido às ondas geradas pela barcaça, dada em t,
- R_a = resistência devido ao ar, dada em t.

Seguindo as formulações apresentadas na publicação da *Korean Register of Shipping* (KRS, 2022), temos que os valores de R_f , R_w e R_a são dados por:

$$R_f = 0.000136 \cdot F_1 \cdot A_1 \cdot V^2 \quad (19)$$

sendo:

- F_1 = coeficiente de condição da superfície do casco da barcaça, dado pelo valor padrão 0.8,

- A_1 = área da superfície abaixo da linha d'água, dada em m^2 ,
- V = velocidade que a barcaça está sendo rebocada, pelo empurrador utilizado, dada em nós.

A formulação para R_w é dada por :

$$R_w = 0.014 \cdot C \cdot F_2 \cdot A_2 \cdot V^2 \quad (20)$$

sendo:

- C = coeficiente de resistência devido à taxa de incrustação do casco, dado pelo valor padrão 1.2.
- A_2 = área da seção abaixo da linha d'água, dada em m^2 ,
- V = velocidade que a barcaça está sendo rebocada, pelo empurrador utilizado, dada em nós,
- F_2 = coeficiente da forma da proa da barcaça, dado pelo intervalo de 0.3 à 0.5 (KRS, 2022).

A formulação para R_a é dada por :

$$R_a = 0.0000195 \cdot C_s \cdot C_H \cdot A_3 \cdot (V_w + V)^2 \quad (21)$$

sendo:

- C_s = coeficiente da forma da superfície do casco, dado pelo valor 1, fornecido por valor tabelado na publicação,
- A_3 = área da seção acima da linha d'água que está exposta à ação dos ventos, dada em m^2 ,
- V = velocidade que a barcaça está sendo rebocada, pelo empurrador utilizado, dada em nós,
- C_H = coeficiente de altura desda linha d'água até o centro da área que está sofrendo a ação dos ventos, dado pelo valor 1, selecionado de acordo com uma tabela que relaciona a forma de proa distinta para cada tipo de barcaça com o coeficiente F_2 , fornecida na publicação (KRS, 2022),
- V_w = velocidade dos ventos devido à área de serviço, dado pelo valor 29.16 nós, para águas calmas de acordo com KRS (2022). Considerando a operação das barcaças envolvidas no estudo em água doce, no rio Amazonas, no estado do Amazonas, Brasil, as águas podem ser consideradas como águas calmas.

Informações mais detalhadas sobre o cálculo de resistência ao avanço de barcaças utilizando o método *KG Barge* podem ser encontradas em (KRS, 2022).

2.4.4 Principais diferenças entre os métodos *Holtrop* e *KR Barge*

É importante mencionar que o presente estudo visa explorar a aplicabilidade de métodos simplificados para comparar os resultados hidrodinâmicos com diversas configurações do casco. No entanto, é importante saber as limitações dos métodos que estão sendo utilizados, pois existem algumas restrições para o uso do método *Holtrop* e *KR Barge* para estimar a resistência ao avanço dos casos de estudo.

De acordo com Holtrop (1978), para o uso do método de *Holtrop* é necessário que a embarcação opere em regime de deslocamento ou semi-deslocamento, ou seja, opere com até cerca de $F_n \sim 0.6$. Além disso, são necessárias as seguintes considerações:

- O C_p deve estar entre 0.55 e 0.95,
- A razão $\frac{L}{B}$ deve estar entre 3.9 e 15.

Com relação ao método *KR Barge*, também existem algumas restrições que devem ser consideradas nas análises. De acordo com (KRS, 2022) deve ser considerado o seguinte:

- Empurradores envolvidos na operação de reboque das barcaças devem ter comprimento, L, menor do que 20 m,
- Empurradores envolvidos na operação de reboque das barcaças devem possuir potência menor do que 300 HP,
- As barcaças não devem possuir porte bruto menor do que 50 ton e não devem ser construídas de madeira.

A Tabela 3 mostra a relação das componentes principais utilizadas no cálculo da resistência ao avanço total, com os métodos *Holtrop* e *KR Barge*. Tendo em vista os dados da tabela, o método *KR Barge* possui menos componentes de resistência ao avanço. Portanto, devido às simplificações feitas em cada método, podem existir diferenças nas grandezas dos valores de resistência ao avanço. Vale a pena mencionar que o presente trabalho tem como objetivo realizar análises comparativas, de maneira exploratória para demonstrar o uso dos métodos. Procedimentos de validação para definir a faixa de aplicabilidade real de cada método está fora do escopo do trabalho e deverá ser estudado em trabalhos futuros.

Tabela 3 – Componentes principais da resistência ao avanço total, comparação entre os métodos *Holtrop* e *KR Barge*.

	R_t	R_r	R_w	R_f	R_v	R_{corr}	R_{app}	R_{ar}
Método <i>Holtrop</i>	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Método <i>KR Barge</i>	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM

Fonte: Elaborado pelo autor

sendo :

- R_t : Resistência total,
- R_r : Resistência residual,
- R_w : Resistência devido às ondas geradas pela embarcação,
- R_f : Resistência devido à fricção,
- R_v : Resistência devido aos efeitos viscosos,
- R_{corr} : Resistência devido ao formato do casco da embarcação,
- R_{app} : Resistência devido aos apêndices da embarcação,
- R_{ar} : Resistência devido ao ar.

2.5 Cálculos de comportamento em ondas

2.5.1 Descrição do *Maxsurf Motions*

O software *Motions* é um módulo do software *Maxsurf*, sendo útil para avaliar o comportamento em ondas de uma embarcação, desprezando os efeitos viscosos do fluido.

Para avaliar a dinâmica de embarcações de deslocamento, o software *Motions* utiliza o modelo da Teoria das Faixas (*Strip Theory*), cujos detalhes podem ser encontrados no trabalho de Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970). Este modelo é uma das abordagens mais conhecidas e tradicionais na avaliação de movimentos de embarcações cuja relação comprimento/boca seja maior do que 3, ou seja, embarcações com forma 'alongada'. O método despreza os efeitos viscosos no escoamento e permite a obtenção, usando pouco tempo computacional, dos Operadores de Amplitudes de Resposta (RAOs) dos movimentos desacoplados da embarcação. Basicamente, os RAOs são gráficos que apresentam a resposta dos movimentos de translação ou rotação da embarcação e as frequências ou períodos de encontro nos eixos vertical e horizontal, respectivamente. Estes gráficos são bastante úteis no estudo do comportamento de embarcações em ondas regulares e em mar irregular (FALTINSEN, 1993).

2.5.2 Cálculo de RAO's de *heave* e *pitch*

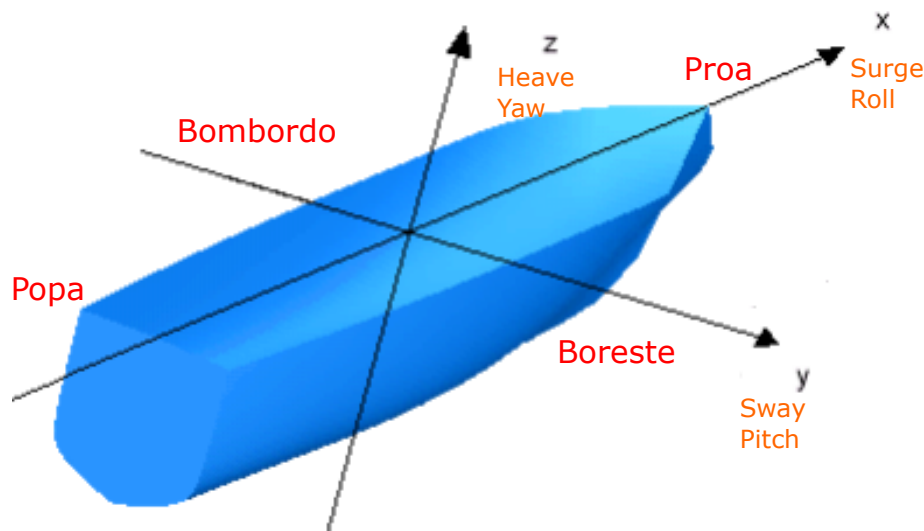
Como descrito acima, os RAO's de uma embarcação são gráficos que representam a resposta de algum grau de liberdade da embarcação, em função, normalmente, da frequência de encontro com ondas. Ao se estudar a dinâmica das embarcações, são levados em consideração 6 graus de liberdade da massa, localizada no centro de gravidade da embarcação. Existem três movimentos de translação e três de rotação, descritos como segue:

- Movimento translacional de *surge*, ao longo do eixo coordenado X,
- Movimento rotacional de *roll*, em torno do eixo coordenado X,

- Movimento translacional de *sway*, ao longo do eixo coordenado Y,
- Movimento rotacional de *pitch*, em torno do eixo coordenado Y,
- Movimento translacional de *heave*, ao longo do eixo coordenado Z,
- Movimento rotacional de *yaw*, em torno do eixo coordenado Z.

A Figura 21 representa a definição dos eixos coordenados utilizada no software *Maxsurf Motions*. Como citado anteriormente, são representados 3 movimentos rotacionais e 3 movimentos translacionais da embarcação entorno dos 3 eixos coordenados.

Figura 21 – Eixos coordenados utilizados no software *Maxsurf Motions*. É representado a proa, popa e os bordos (bombordo e boreste) da embarcação.



Fonte: Bentley (2022).

Neste trabalho, foram analisados dois movimentos desacoplados das barcas consideradas nos casos de estudo: o movimento translacional ao longo do eixo coordenado Z (movimento de *heave*), e o movimento rotacional ao redor do eixo coordenado Y (movimento de *pitch*).

As equações que representam os movimentos desacoplados de *heave* e *pitch* da embarcação, respectivamente, são equações diferenciais ordinárias de segunda ordem, também conhecidas na Dinâmica de Sistemas Navais e outras áreas de estudo como equações da massa-mola-amortecedor. De acordo com Bentley (2022) estas equações são representadas da seguinte forma pelo software *Motions*:

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 = F_3 e^{i\omega_e t} \quad (22)$$

$$(I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F_5 e^{i\omega_e t} \quad (23)$$

sendo o movimento de *heave* representado pelo índice 3 e o movimento de *pitch* pelo índice 5. O procedimento para a obtenção dos coeficientes pelo software *Maxsurf Motions* é descrito em Bentley (2022). A definição das variáveis de ambas as equações é descrita a seguir, sendo que os métodos para obter tais coeficientes podem ser encontrados em Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970), Journée e Massie (2001):

- M = massa da embarcação,
- I_5 = momento de inércia em *pitch*;
- A_{33} = coeficiente de massa adicional em *heave*;
- B_{33} = coeficiente de amortecimento em *heave*;
- F_3 = força de excitação do movimento em *heave*;
- η_3 = deslocamento instantâneo em *heave*;
- $\dot{\eta}_3$ = velocidade instantânea em *heave*;
- $\ddot{\eta}_3$ = aceleração instantânea em *heave*;
- A_{55} = coeficiente de massa adicional em *pitch*;
- B_{55} = coeficiente de amortecimento em *pitch*;
- C_{55} = coeficiente de restauração em *pitch*;
- F_5 = força de excitação do movimento em *pitch*;
- η_5 = deslocamento instantâneo em *pitch*;
- $\dot{\eta}_5$ = velocidade instantânea em *pitch*;
- $\ddot{\eta}_5$ = aceleração instantânea em *pitch*.

No estudo comparativo dos RAO's dos movimentos de *heave* e *pitch* dos casos de estudo e caso padrão, serão utilizadas cinco velocidades de avanço da embarcação. Nos gráficos, o eixo horizontal representará a frequência de encontro das ondas com a embarcação, e o eixo vertical indicará a resposta do movimento.

Informações mais detalhadas sobre a dinâmica dos movimentos de uma embarcação podem ser encontradas em Lewis (1988), Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970), Faltinsen (1993), Journée e Massie (2001).

Para a análise dos resultados gráficos dos movimentos de *heave* e *pitch* das barcaças, serão analisados de modo comparativo com o caso padrão e de modo estatístico alguns dados cedidos pelo software *Maxsurf Motions*, sendo:

- amplitude significativa do movimento de *heave*, em m,

- velocidade significativa do movimento de *heave*, em $\frac{m}{s}$,
- aceleração significativa do movimento de *heave*, em $\frac{m}{s^2}$,
- amplitude significativa do movimento de *pitch*, em $^\circ$,
- velocidade significativa do movimento de *pitch*, em $\frac{rad}{s}$,
- aceleração significativa do movimento de *pitch*, em $\frac{rad}{s^2}$.

Os valores de amplitude significativa, velocidade significativa e aceleração significativa na análise dos movimentos de *heave* e *pitch* representam os valores máximos encontrados pelo software *Maxsurf Motions*, para a faixa de frequências utilizada (0 a $7 \frac{rad}{s}$) e velocidades utilizadas (1 a 7 nós).

As análises serão feitas tomando por base as velocidades de avanço das barcaças padrão e casos de estudo, com um intervalo de 1.5 nó entre cada velocidade, com o objetivo de simular velocidades padrão de operação de barcaças na região amazônica de forma sistemática, são elas:

- $v_1 = 1$ nó,
- $v_2 = 2.5$ nó,
- $v_3 = 4$ nós,
- $v_4 = 5.5$ nós,
- $v_6 = 7$ nós.

Para o cálculo destas características de resposta das barcaças, foram consideradas as frequências de onda no espectro de ondas *JONSWAP* predeterminado no software. As frequências variaram de $0.4 \frac{rad}{s}$ à $7 \frac{rad}{s}$. Para mais informações sobre, consultar (HASSELMANN; DUNCKEL; EWING, 1980).

2.6 Métodos para geração e análise de resultados gráficos

Os resultados do presente trabalho consistem, principalmente, na comparação de resultados dos distintos casos de estudo, obtidos a partir das análises feitas nos módulos do software *Maxsurf*. Para fins de comparação, os resultados dos módulos do *Maxsurf* foram exportados e processados no software *Mathematica*®, para gerar gráficos comparativos. Este software é comumente utilizado como linguagem de programação para diversas funções científicas, como *data science*, resolução de equações matemáticas, análise de dados em engenharia, *machine learning*, dentre outros. Especificamente para fins deste trabalho, o *Wolfram Mathematica*®, foi utilizado para a plotagem das imagens obtidas nas simulações no software *Maxsurf*, tanto para o estudo comparativo de resistência ao avanço das barcaças, como no estudo de *heave* e *pitch* das mesmas. Mais informações sobre este software podem ser encontradas em (WOLFRAM, 1991).

As diferenças entre os resultados avaliados nos gráficos comparativos foram discutidas utilizando alguns métodos estatísticos, como o desvio padrão e a variação simples. O desvio padrão tem por objetivo quantificar o grau de homogeneidade dos dados de resistência ao avanço utilizando os métodos de *Holtrop* e *KR Barge* para cada caso de estudo. Da mesma forma, com os resultados dos RAO de *heave* e *pitch* das barcaças, foram analisadas da mesma forma sendo obtidos dentro de um intervalo de frequência de 0 a 7 rad/s. Quanto mais próximo de 0 o desvio padrão estiver, mais homogêneo será o grupo de dados, ou seja, dados mais próximos ao caso da barcaça padrão serão obtidos. Um valor positivo de porcentagem significa que ocorreu um aumento em comparação com o caso padrão de estudos, por exemplo, um aumento da resistência ao avanço. Em contrapartida, para valores negativos de uma porcentagem, significa que ocorreu uma diminuição em comparação com o caso padrão de estudos, por exemplo, uma diminuição do deslocamento da embarcação.

O desvio padrão é definido como segue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (24)$$

sendo:

- x_i = valor na posição i no conjunto de dados a ser analisado,
- \bar{x} = média aritmética dos dados,
- n = quantidade de dados .

Além do desvio padrão, também será utilizado o conceito de porcentagem de diferença relativa, útil para representar a variação em porcentagem dos dados, utilizando a seguinte expressão:

$$\delta = \left(\frac{x_i - x_0}{x_0} \right) \cdot 100 \quad (25)$$

sendo:

- δ = porcentagem de diferença relativa (em %),
- x_i = valor do dado a ser comparado,
- x_0 = valor padrão para a comparação.

Ao final do cálculo de porcentagem de diferença relativa, para cada caso de estudo em comparação com o caso padrão, será calculada uma média aritmética simples do percentual de erro. Tendo por fim, o objetivo de se comparar ao final esta média aritmética simples com o desvio padrão obtido para cada caso.

A expressão para a média aritmética simples (\bar{X}) é a seguinte:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (26)$$

Informações mais detalhadas sobre estatística básica podem ser encontradas em Morettin e Bussab (2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados e discussões das comparações das análises de hidrostática, resistência ao avanço (métodos de *Holtrop* e *KR Barge*) e dinâmica (movimentos de *heave* e *pitch* desacoplados) dos casos de estudo das barcaças, levando em consideração as suas respectivas inclinações de popa e proa com relação ao caso padrão de estudo. Para as comparações do caso padrão de estudo com os demais casos de estudo foi mantido constante o calado de projeto da barcaça, fixado em 3.14 m.

3.1 Características hidrostáticas principais

As características hidrostáticas principais foram analisadas na medida da linha d'água, com um calado de 3.14 m, que é o calado de operação da barcaça. Os parâmetros hidrostáticos principais analisados foram os seguintes:

- ∇ , deslocamento da embarcação, em toneladas (ton);
- BM_t , raio metacêntrico transversal, em m;
- GM_t , altura metacêntrica transversal, em m;
- LCB , centro longitudinal de carena, em m;
- TP_c , toneladas por centímetro, em $\frac{ton}{cm}$;
- MT_c , momento para trimar 1 centímetro, em $ton \cdot m$;
- C_b , coeficiente de bloco (adimensional);
- C_m , coeficiente de seção mestra (adimensional);
- C_p , coeficiente prismático (adimensional);
- C_{wp} , coeficiente de área do plano d'água (adimensional);
- $C_{L/\nabla}$, coeficiente de razão comprimento-deslocamento (adimensional).

A Tabela 4 mostra as características hidrostáticas principais analisadas neste trabalho, referentes às barcaças caso padrão e casos de estudo.

Tabela 4 – Características hidrostáticas principais dos casos de estudo, analisadas na linha d'água das barcaças.

	Caso Padrão	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
∇	4567	4859	5059	4358	4105
BM_t	13.21	12.65	12.33	13.63	14.22
GM_t	14.85	14.27	13.93	15.29	15.91
LCB	40.47	40.46	40.46	40.49	40.48
TPC	16.41	16.73	16.97	16.17	15.89
MT_c	101.58	107.50	112.20	97.08	92.09

Fonte: Elaborado pelo autor

Por outro lado, a Tabela 5 representa os valores dos coeficientes das barcaças do caso de estudo em relação à barcaça caso padrão para fins de comparação.

Tabela 5 – Coeficientes hidrostáticos principais analisados na linha d'água.

	Caso Padrão	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
C_b	0.886	0.924	0.949	0.858	0.823
C_m	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
C_p	0.886	0.924	0.949	0.858	0.823
C_{wp}	1.000	0.999	1.000	0.999	1.000
$C_{L/\nabla}$	4.711	4.708	4.707	4.716	4.727

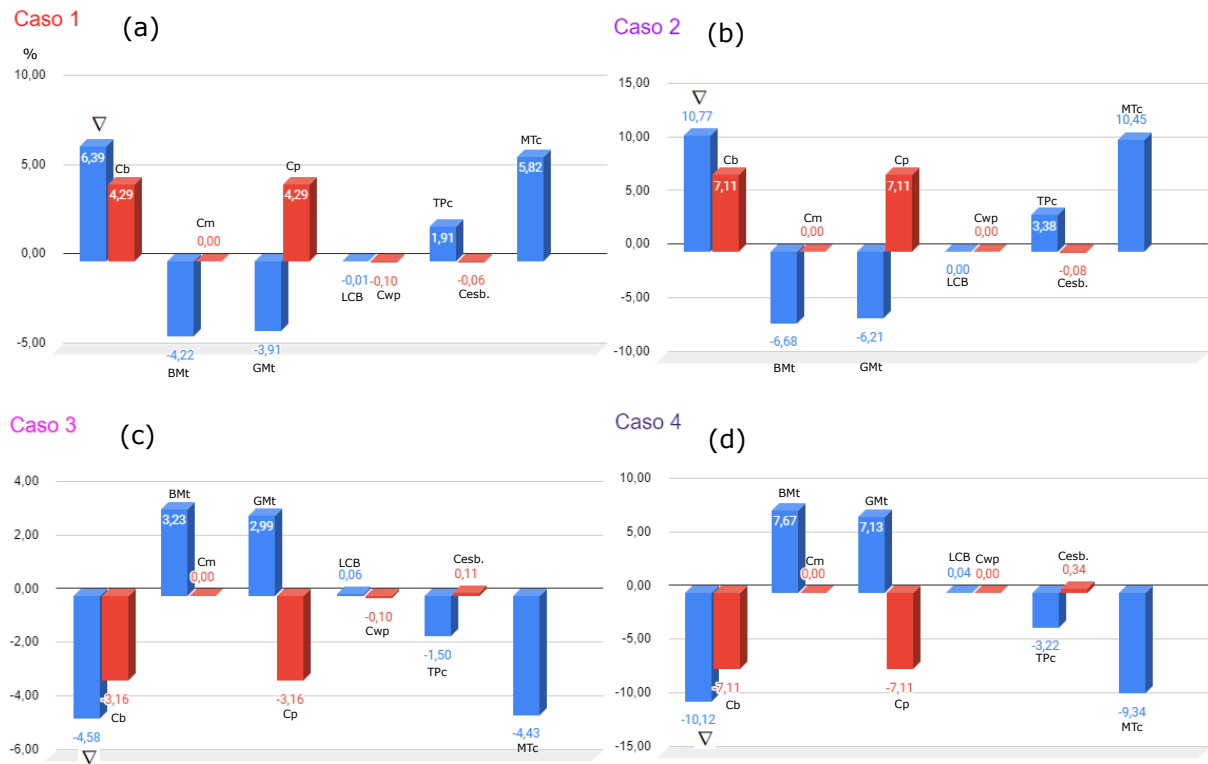
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se analisar os dados da Tabela 4, é possível comparar a variação δ das características hidrostáticas na linha d'água da barcaça padrão com os casos de estudo, como ilustrado na Figura 22.

Para o deslocamento ∇ apresentado nas simulações obtidas pelo software *Maxsurf*, verifica-se um valor maior para o caso de estudo 2, em comparação com o caso padrão, com um aumento da variação de porcentagem de erro de $\delta = 10.77\%$, sendo que para o caso de estudo 4, foi obtido uma diminuição de $\delta = 10.12\%$, em comparação com o caso padrão.

Na análise do BM_t , raio metacêntrico transversal, foi obtido um valor máximo de variação de $\delta = 7.67\%$ para o caso 4, em comparação com o caso de estudo padrão, e uma diminuição de $\delta = 6.68\%$ para o caso de estudo 2. Para o GM_t , altura metacêntrica transversal, foi obtido um valor de aumento de $\delta = 7.13\%$ para o caso de estudo 4, e uma diminuição de $\delta = 6.21\%$ para o caso de estudo 2.

Figura 22 – Gráficos de barras, representando o erro de cada característica hidrostáticas estudada, para cada caso de estudo. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o LCB , centro longitudinal de carena, foi obtido um valor máximo de $\delta = 0.06\%$ no caso de estudo 3, e uma diminuição de $\delta = 0.01\%$ no caso de estudo 1.

Na comparação dos dados hidrostáticos, para o TP_c , toneladas por centímetro, foi obtida uma variação máxima de $\delta = 3.38\%$ para o caso de estudo 2, e uma variação mínima de $\delta = 3.22\%$ para o caso de estudo 4. Para o MT_c , momento para trimar 1 centímetro, foi obtida uma variação máxima de $\delta = 10.45\%$ para o caso de estudo 2, e uma variação mínima de $\delta = 9.34\%$ para o caso de estudo 4.

A partir da análise da Tabela 5, é possível obter as variações δ para os coeficientes hidrostáticos da embarcação caso padrão e seus casos de estudo.

Com relação ao C_b , coeficiente de bloco, obteve-se uma variação máxima de $\delta = 7.11\%$ para o caso de estudo 2 e uma variação negativa de $\delta = 7.11\%$ para o caso de estudo 4. Para o C_p , coeficiente prismático, foi obtida uma variação positiva de $\delta = 7.11\%$ para o caso de estudo 2 e uma variação negativa de $\delta = 7.11\%$ para o caso de estudo 4.

Na análise dos dados referentes ao C_{wp} , coeficiente de área do plano d'água, verificou-se uma variação negativa de $\delta = 0.1\%$ para os casos de estudo 1 e 3, enquanto não se obteve variação para os casos de estudo 2 e 4. Observando os dados sobre o coeficiente de

razão comprimento-deslocamento, $C_{L/\nabla}$, obteve-se uma variação positiva de $\delta = 0.34\%$ para o caso de estudo 4 e uma variação negativa de $\delta = 0.08\%$ para o caso de estudo 2.

Ao se analisar as porcentagens de variação das características hidrostáticas, o caso de estudo 2 (30° proa e 48° popa) e o caso de estudo 4 (12° proa e 14° popa) se destacam como casos de variação máxima (positiva) e variação mínima (negativa), considerando, por exemplo, a análise das seguintes características:

- TP_c , toneladas por centímetro, variação positiva de $\delta = 3.38\%$ para o caso 2 e variação negativa de $\delta = 3.22\%$ para o caso 4,
- MT_c , momento para trimar 1 centímetro, variação positiva de $\delta = 10.45\%$ para o caso 2 e variação negativa de $\delta = 9.34\%$ para o caso 4.

Analogamente, para as variações dos coeficientes de forma, onde os casos de estudo 2 (30° proa e 48° popa) e o caso de estudo 4 (12° proa e 14° popa) também se destacaram com resultados mais proeminentes, como se segue, desta vez nas variações de:

- C_b , coeficiente de bloco, variação positiva de $\delta = 7.11\%$ para o caso 2 e variação negativa de $\delta = 7.11\%$ para o caso 4,
- C_p , coeficiente prismático, variação positiva de $\delta = 7.11\%$ para o caso 2 e variação negativa de $\delta = 7.11\%$ para o caso 4,
- $C_{L/\nabla}$, coeficiente de razão comprimento-deslocamento, variação positiva de $\delta = 0.34\%$ para o caso 4 e variação negativa de $\delta = 0.08\%$ para o caso 2.

É interessante citar que, durante a análise da variação do coeficiente de área do plano d'água, C_{wp} , obteve-se uma variação negativa de $\delta = 0.1\%$ para os casos de estudo 1 e 3, enquanto não foi obtida variação para os casos de estudo 2 e 4.

O caso 2 possui um maior coeficiente de bloco (C_b) dentre todos os casos de estudo (mais próximo da unidade). Porém, o caso 2 não é o mais estável dentre os casos analisados, levando em consideração as características hidrostáticas. O caso 4 possui o maior valor de GM_t , fazendo com que este caso seja o candidato a apresentar maior estabilidade dentre os analisados. O caso 4 também possui os menores valores de TP_c e MT_c . Quanto menor o valor de toneladas por centímetro da embarcação, e menor o valor do momento para trimar 1 cm, mais estável seria esta embarcação, o que ocorre no caso 4 de estudo. Portanto, o caso 4 de estudo poderia ser o mais estável, com relação às características hidrostáticas estudadas.

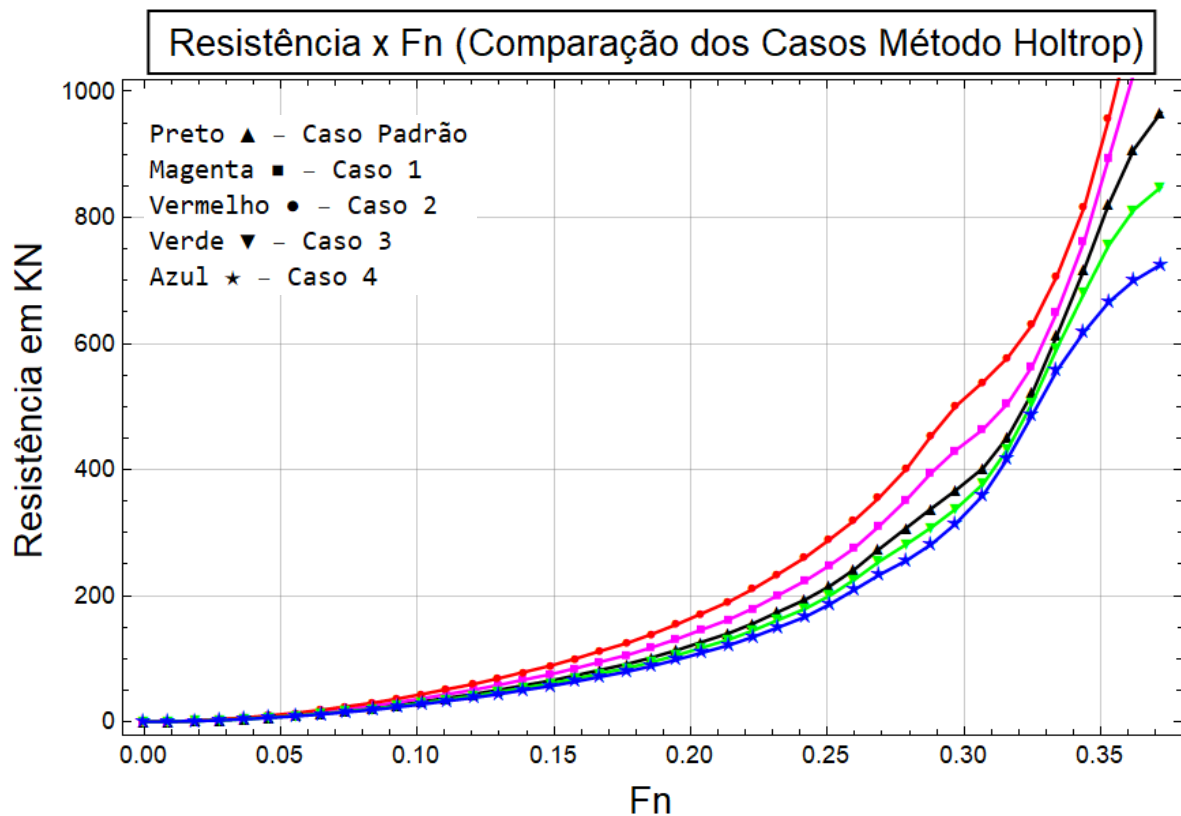
3.2 Resistência ao avanço

3.2.1 Método *Holtrop*

No presente estudo, foram comparados os efeitos do número de *Froude* na resistência ao avanço dos diferentes casos de estudo das barcas com geometrias de casco diferentes.

A figura 23 mostra a comparação da resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop* para as barcasas caso padrão e os 4 diferentes casos de estudo. O eixo vertical é representativo da resistência ao avanço propriamente dita, em kN. Por outro lado, o eixo horizontal representa o número adimensional de *Froude* (F_n , ver equação 9), variando de 0 à 0.372. Esta faixa de F_n corresponde ao regime deslocamento para a operação de uma embarcação, segundo Faltinsen (2005).

Figura 23 – Comparação de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os comportamentos dos casos analisados juntamente com o caso padrão começam a se diferenciar a partir de $F_n = 0.05$, ou seja, a uma velocidade de operação de $v = 1.43 \frac{m}{s}$ ou $v = 2.78$ nós.

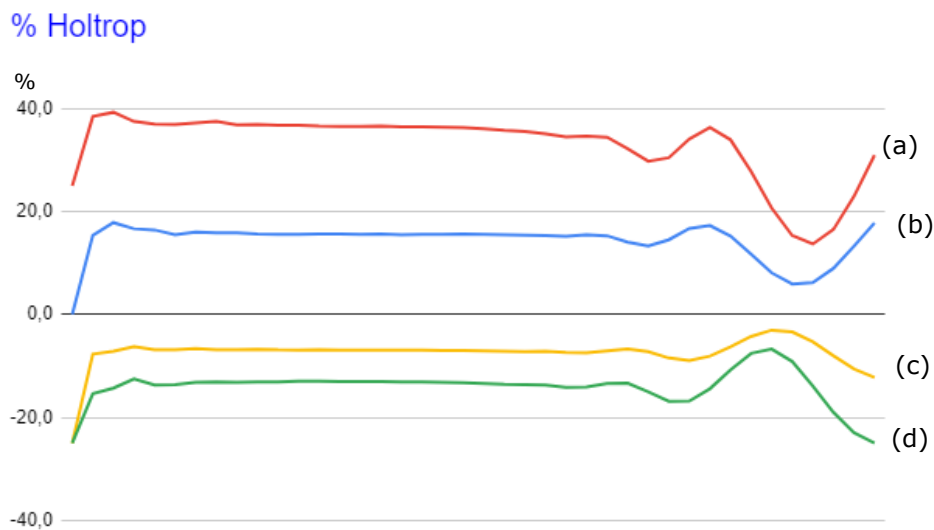
Ao ser analisado o caso de estudo 1 (23° proa e 32° popa), em comparação com o caso padrão de estudo (17° proa e 21° popa) na Figura 19, é observado que a resistência ao avanço aumenta em um intervalo de δ variando de 5.9% a 17.9%, com uma média de aumento de $\bar{X} = 14.3\%$ de acordo com os métodos estatísticos introduzidos na seção de materiais e métodos. É apresentado um desvio padrão de $\sigma = 3.60$.

De forma similar, de acordo com a Figura 23 ao analisar o caso de estudo 2 (30° proa e 48° popa), conclui-se que a resistência ao avanço aumenta em um intervalo de δ variando

de 13.7% a 39.3%, com uma média de aumento de $\bar{X} = 33\%$ e um desvio padrão $\sigma = 6.57$.

É interessante notar que entre os casos de estudo 1 e 2, mesmo os dois tendo por resultado o aumento da resistência ao avanço, no caso 2 o aumento é mais abrupto com variações e médias maiores. Sendo que também o desvio padrão dos dados de resistência ao avanço do caso 2 é maior, mostrando mais heterogeneidade nos dados em comparação com o caso de estudo 1. A Figura 24 representa a comparação dos erros de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*.

Figura 24 – Gráficos comparativos dos erros de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao passo que, ao analisar o caso de estudo 3 (14° proa e 17° popa) na Figura 23, os resultados apontam uma diminuição da resistência ao avanço, em comparação com o caso de estudo padrão. Com uma variação δ entre 3% e 25%, com uma média de diminuição de $\bar{X} = 7.5\%$ e um desvio padrão $\sigma = 3.23$.

De forma similar, ao analisar a Figura 23 é concluído que no caso de estudo 4 (12° proa e 14° popa), também ocorre diminuição da resistência ao avanço. Resultando numa variação δ entre 6.7% e 25%, uma média de diminuição de $\bar{X} = 14.1\%$ e um desvio padrão $\sigma = 3.61$.

Pode-se notar que a resistência ao avanço aumenta nos casos de estudo 1 e 2, em comparação com o caso padrão. Ao passo que a resistência ao avanço diminui nos casos de estudo 3 e 4.

Ao serem analisados conjuntamente o caso 3 e 4, ambos os casos resultaram em uma diminuição da resistência ao avanço. Entretanto o caso 4 é o mais eficaz dentre os dois,

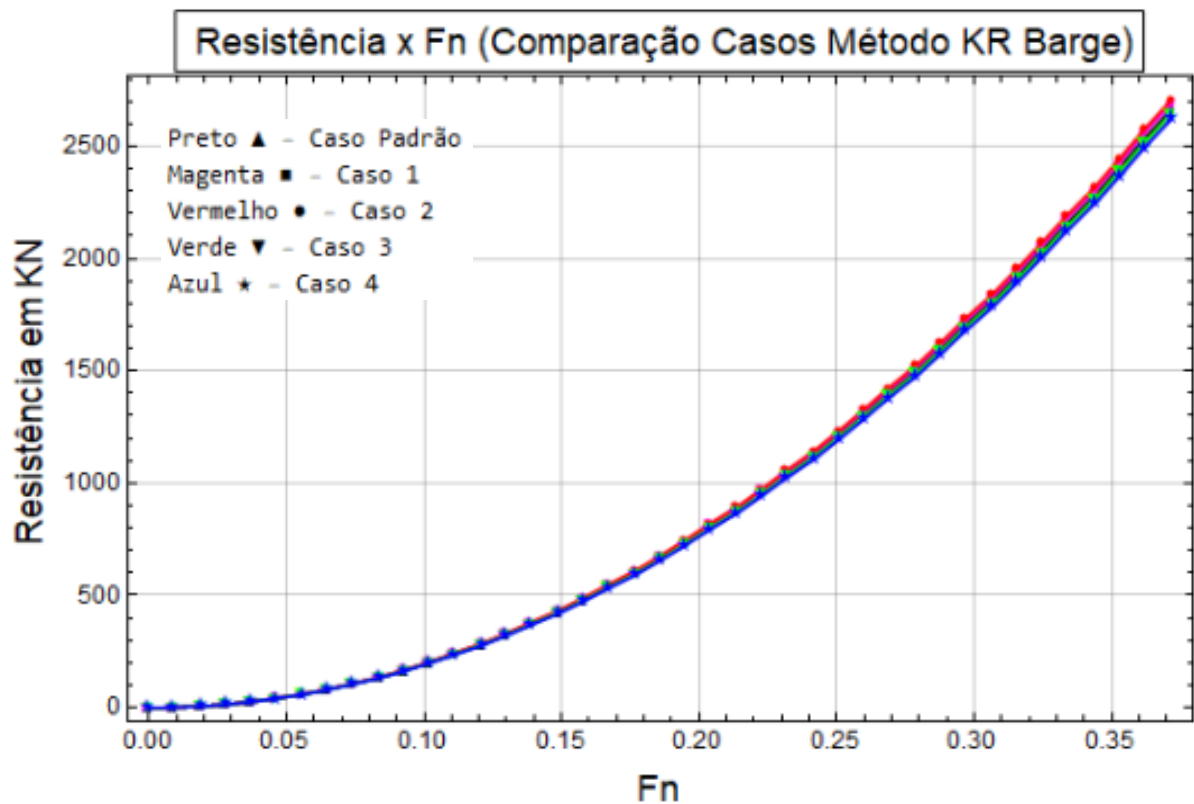
pois sua variação de diminuição da resistência ao avanço δ e média \bar{X} são maiores em comparação com o caso 3. Porém, no caso 3 o desvio padrão σ é menor do que no caso 4, mostrando mais homogeneidade entre os dados analisados.

3.2.2 Método KR Barge

Analogamente às análises comparativas de resistência ao avanço utilizando o método *Holtrop*, será feita a análise utilizando o método *KR Barge*, seguindo os mesmos procedimentos.

O intervalo de número de *Froude* (F_n) trabalhado para as simulações das barcaças também foi entre 0 e 0.372. (ver equação 9). Esta faixa de F_n corresponde ao regime de deslocamento para a operação de uma embarcação, segundo Faltinsen (2005). A Figura 25 representa a comparação dos casos de estudo com o caso padrão, sendo o eixo X representado pelo número de *Froude* e o eixo Y representado pelo valor da resistência ao avanço, em kN. É perceptível a grande semelhança entre os casos.

Figura 25 – Resistência ao avanço utilizando o método *KR Barge*, para o intervalo de Número de *Froude* entre 0 e 0.372.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em uma primeira análise, os dados obtidos para a estimativa da resistência ao avanço utilizando o método *KR Barge*, é que a diferença entre o caso padrão e os casos de estudo

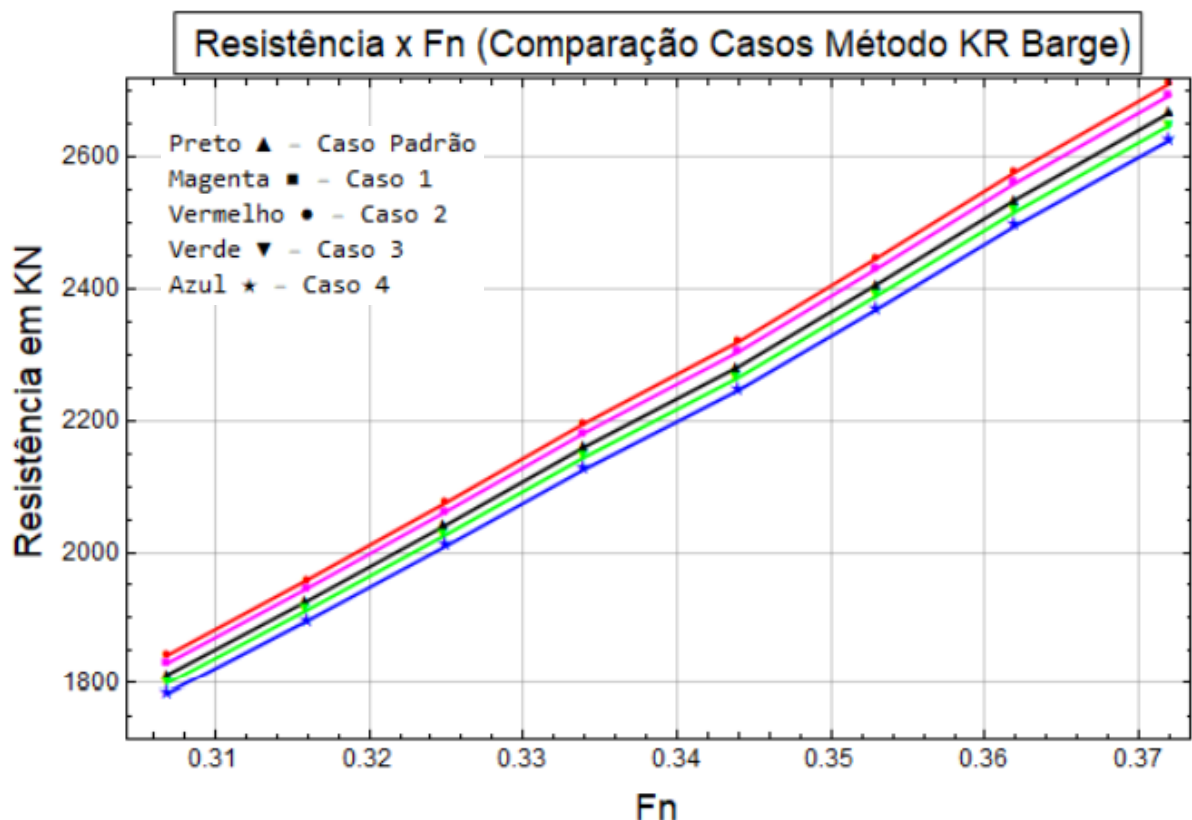
é mínima. O que será reafirmado com uma análise dos dados numéricos das simulações.

É importante citar que na análise dos casos de estudo 1 e 2 ocorre aumento na resistência ao avanço, diferentemente do ocorrido nos casos 3 e 4, que representam uma leve diminuição da resistência ao avanço.

Ao ser analisado o caso de estudo 1 (23° proa e 32° popa), em comparação com o caso padrão de estudo (17° proa e 21° popa), é observado que a resistência ao avanço aumenta em um intervalo de δ variando de 0.7% à 1%, com uma média de aumento de $\bar{X} = 0.9\%$ e um desvio padrão $\sigma = 0.22$.

A Figura 26 representa uma configuração mais delimitada dos casos de estudo e caso padrão, com o número de *Froude* (F_n) variando de 0.31 à 0.37, com o objetivo de obter uma melhor visualização, visto que os resultados das simulações utilizando o método *KR Barge* possuem uma grande semelhança. A Figura 27 representa a comparação dos erros de resistência ao avanço utilizando o método de *KR Barge*.

Figura 26 – Resistência ao avanço utilizando o método *KR Barge*.

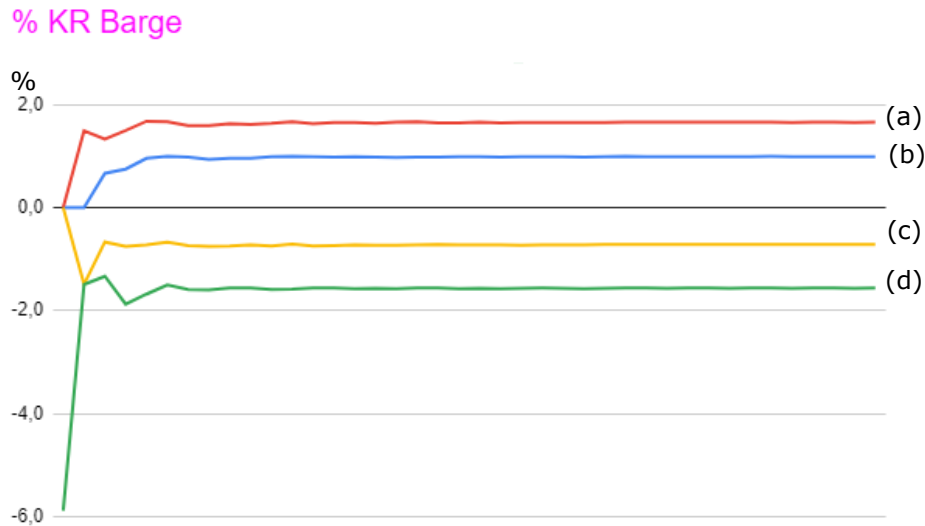


Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma semelhante, também acontece o aumento da resistência ao avanço no caso de estudo 2 (30° proa e 48° popa). Com variações um pouco mais acentuadas, com o δ

variando de 1.3% à 1.7%, uma média de aumento de $\bar{X} = 1.6\%$ e um desvio padrão $\sigma = 0.27$.

Figura 27 – Gráficos comparativos dos erros de resultados de resistência ao avanço utilizando o método de *KR Barge*. (a) Caso 2. (b) Caso 1. (c) Caso 3. (d) Caso 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando conjuntamente o caso 1 e 2, é possível concluir que apesar dos dois casos apresentarem um certo aumento de resistência ao avanço em comparação com o caso padrão, o caso 2 apresenta um aumento ligeiramente maior de um aumento médio de 1.6% em comparação com 0.9% de aumento do caso 1. Apresentando também dados mais heterogêneos, em comparação com o caso 1, devido ao seu desvio padrão ser menor.

Ao analisar o caso de estudo 3 (14° proa e 17° popa), é obtida uma pequena diminuição da resistência ao avanço, apresentando resultados de variação δ entre 0.7% e 1.5%, com uma média de diminuição de $\bar{X} = 0.7\%$, e um desvio padrão σ de 0.17.

Ao passo que, de forma semelhante, ao ser analisado os dados do caso 4 (12° proa e 14° popa), também foi obtido uma certa diminuição, porém um pouco mais acentuada. Apresentando valores de variação δ entre 1.3% e 5.9%, com uma média de diminuição de $\bar{X} = 1.7\%$, com um desvio padrão σ de 0.69.

Ao ser tomado uma comparação entre os casos 3 e 4, é tido que acontecem maiores diminuições de resistência ao avanço durante o caso 4, mesmo que apenas um pouco mais ligeiras. Portanto o caso 4 é o mais eficaz dentre os casos estudados. De forma também que os dados de resistência ao avanço do caso 3 são mais homogêneos, devido ao seu desvio padrão ser menor do que o do caso 4 e também mais próximo do valor $\sigma = 0$.

3.3 Comportamento em ondas

3.3.1 Movimento de *heave*

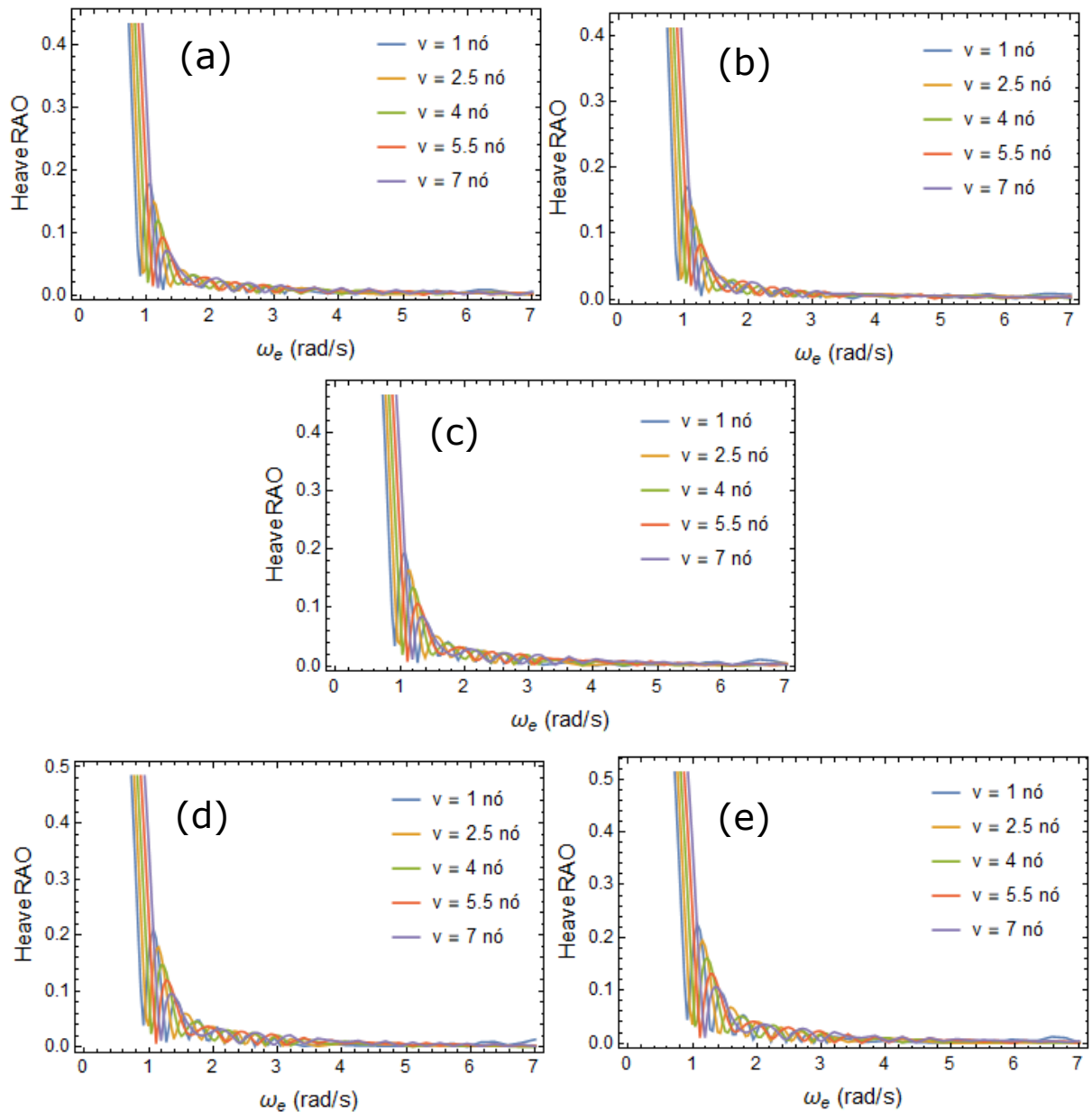
A Figura 28 representa os gráficos que apresentam as resposta do movimento de *heave* das barcaças caso padrão e casos de estudo, tendo como parâmetros no eixo X a frequência de encontro das águas com a embarcação ω_e em $\frac{rad}{s}$ e no eixo Y a própria resposta em *heave* (adimensional). Sendo o eixo Y definido por $Y_{heave} = \eta_3/\xi_3$, onde η_3 representa a resposta em *heave* em metros (m) e ξ_3 é o comprimento de onda dado em metros (m).

Ao se analisar a velocidade $v_1 = 1$ nó para o caso padrão e os casos de estudo, foi obtida uma variação na amplitude do movimento de *heave* negativa de -1.63% para o caso 1 (Figura 28a) em comparação com o caso padrão (Figura 28c) e -2.63% para o caso 2 (Figura 28b), por outro lado o caso 3 (Figura 28d) e caso 4 (Figura 28e) apresentaram uma variação positiva respectivamente de 1.67% e 2.72%. Apresentando uma média $\bar{X} = 1.1$ m para amplitude significativa e um desvio padrão de $\sigma = 0.02$. No quesito velocidade significativa em *heave* o caso 1 (Figura 28a) e caso 2 (Figura 28b) respectivamente apresentaram uma variação simples negativa de -1.86% e -3.15%, enquanto o caso 3 (Figura 28d) e caso 4 (Figura 28e) respectivamente apresentaram uma variação positiva de 1.57% e 3.29%. Apresentando uma média de $\bar{X} = 0.7\frac{m}{s}$ e um desvio padrão $\sigma = 0.02$, mostrando assim que os dados são homogêneos. Por fim, no quesito aceleração significativa em *heave*, o caso 1 (Figura 28a) e caso 2 (Figura 28b) respectivamente apresentaram uma variação de -2.39% e -3.9%, enquanto os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente apresentaram 2.17% e 4.56%. Com uma média simples de $\bar{X} = 0.46\frac{m}{s^2}$ e $\sigma = 0.02$.

Na análise para $v_2 = 2.5$ nós, para o caso de estudo 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) respectivamente foi obtida uma variação de amplitude de -1.61% e -2.59%, enquanto para o caso 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) foram obtidas variações 1.16% e 2.59%, com uma média $\bar{X} = 1.12$ m e desvio padrão $\sigma = 0.023$. Ademais, para a análise de velocidade significativa, foram obtidas para o caso 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) respectivamente as variações de -1.89% e -2.96%. Por outro lado, os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) representando 1.48% e 3.1%, com uma média $\bar{X} = 0.74\frac{m}{s}$ e um desvio padrão $\sigma = 0.018$. Por fim, na aceleração significativa os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -2.34% e -3.91% e os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente 1.95% e 4.1%, com uma média $\bar{X} = 0.51\frac{m}{s^2}$ e um desvio padrão $\sigma = 0.016$.

Ao se analisar a velocidade $v_3 = 4$ nós, no tocante à amplitude significativa, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram uma variação de -1.49% e -2.45%, enquanto o caso 3 (Figura 28d) e (Figura 28e) apresentaram respectivamente 1.14% e 2.45%, com uma variação média de $\bar{X} = 1.14$ m e um desvio padrão $\sigma = 0.022$. Para a velocidade significativa o caso 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.77% e -2.78%, enquanto os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) resultaram em respectiva-

Figura 28 – (a) Resposta em *heave* caso 1, (b) Resposta em *heave* caso 2, (c) Resposta em *heave* caso padrão, (d) Resposta em *heave* caso 3, (e) Resposta em *heave* caso 4.

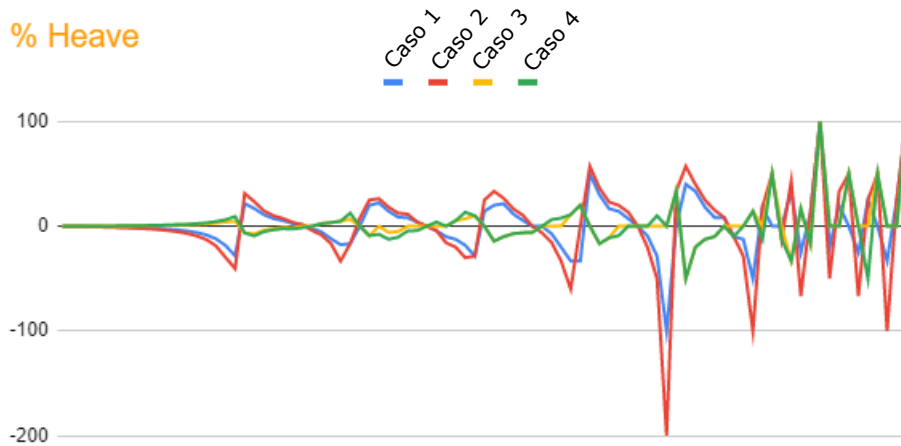


Fonte: Elaborado pelo autor.

mente 1.39% e 3.03%, com uma média $\bar{X} = 0.79 \frac{m}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.019$. Por fim, na aceleração significativa, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -2.28% e -3.5%, e os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente 1.75% e 4.03%, com uma média $\bar{X} = 0.57 \frac{m}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.017$. A Figura 29 representa os erros na análise do movimento de *heave*

Para a velocidade $v_4 = 5.5$ nós, em amplitude significativa de *heave* os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.45% e -2.39%, ao passo que os casos

Figura 29 – Gráficos comparativos dos erros na análise do movimento de *heave*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) apresentaram 1.11% e 2.39%, com uma variação média de $\bar{X} = 1.17$ m e desvio padrão $\sigma = 0.022$. Em velocidade significativa de *heave*, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.76% e -2.82%, enquanto os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente 1.29% e 2.82%, com uma variação média de $\bar{X} = 0.85 \frac{m}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.019$. Por fim, em aceleração significativa, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -2.02% e -3.43%, enquanto os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente 1.71% e 3.58%, com uma média $\bar{X} = 0.64 \frac{m}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.018$.

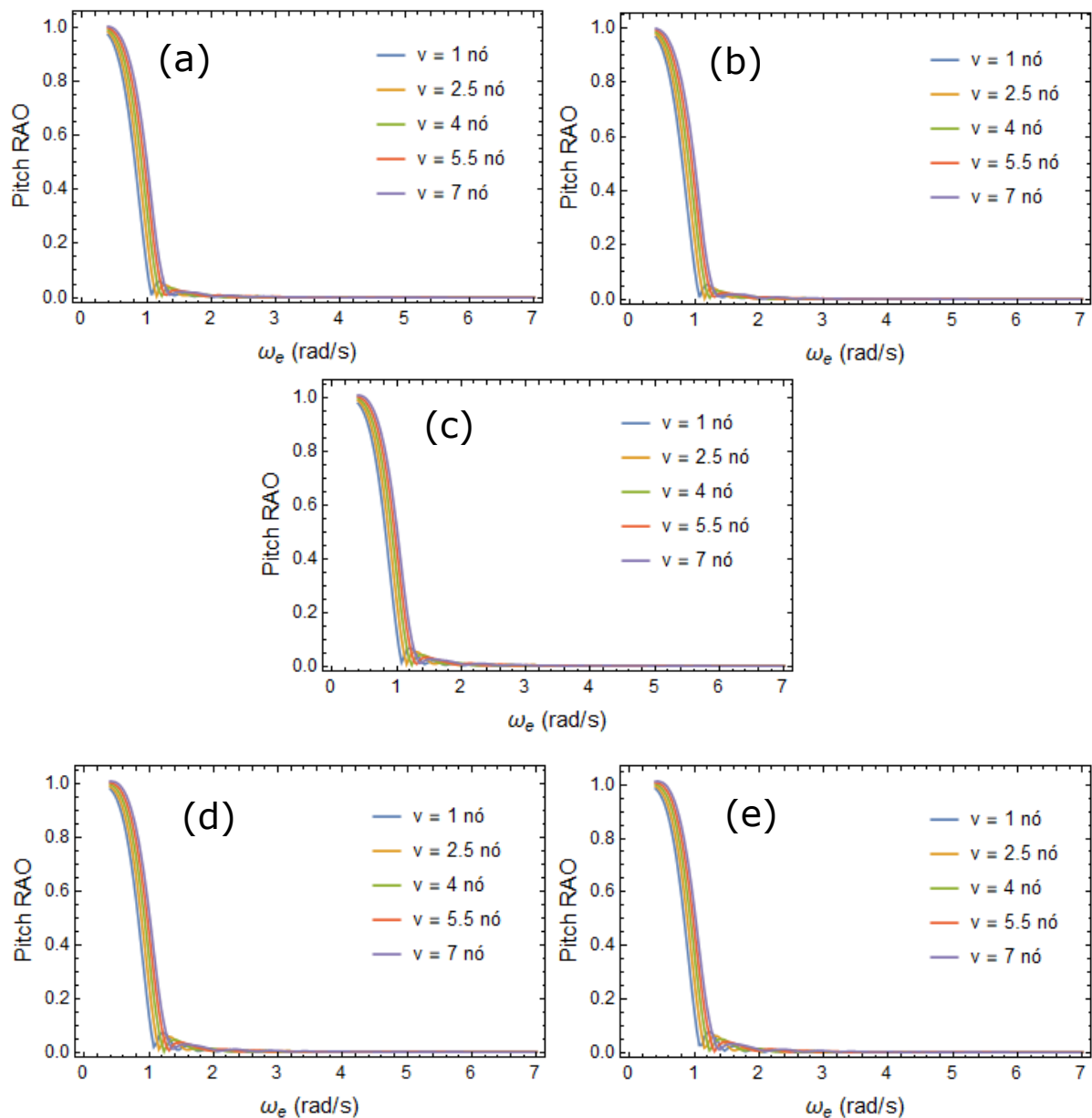
Para a velocidade $v_5 = 7$ nós, em amplitude significativa de *heave* os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.4% e -2.31%, ao passo que os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) apresentaram 0.99% e 2.23%, com uma variação média de $\bar{X} = 1.21$ m e desvio padrão $\sigma = 0.022$. Em velocidade significativa de *heave*, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.52% e -2.5%, por outro lado os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e), apresentaram respectivamente 1.31% e 2.72%, com uma variação média de $\bar{X} = 0.92 \frac{m}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.019$. Por fim, em aceleração significativa, os casos 1 (Figura 28a) e 2 (Figura 28b) apresentaram respectivamente -1.93% e -3.43%, enquanto os casos 3 (Figura 28d) e 4 (Figura 28e) respectivamente 1.52% e 3.31%, com uma média $\bar{X} = 0.72 \frac{m}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.019$.

No movimento de *heave*, os casos de estudo 1 (23° proa e 32° popa) (Figura 28a) e caso de estudo 2 (30° proa e 48° popa) (Figura 28b) se destacaram na análise das 5 velocidades como os casos que obtiveram as menores variações de amplitude significativa em *heave*. Por exemplo, operando A 1 nó, o caso 1 (Figura 28a) obteve uma diminuição de 1.63% em relação ao caso padrão e o caso 2 (Figura 28b) obteve uma diminuição de 2.63%.

3.3.2 Movimento de *pitch*

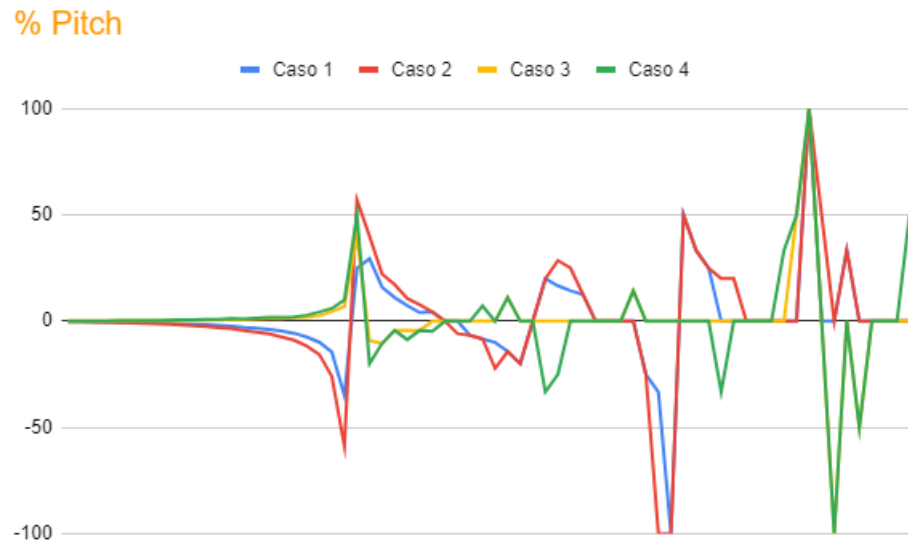
A Figura 30 representa os gráficos que apresentam as respostas do movimento de *pitch* das barcaças caso padrão e casos de estudo, tendo como parâmetros no eixo X a frequência de encontro das águas com a embarcação ω_e , em $\frac{rad}{s}$, e no eixo Y a própria resposta em *pitch* (adimensional). Sendo o eixo Y definido por $Y_{pitch} = \eta_5 / \xi_5$, onde η_5 representa a resposta em *pitch* em graus ($^\circ$) e ξ_5 é a inclinação de onda dado em graus ($^\circ$). A Figura 31 representa os erros na análise do movimento de *pitch*.

Figura 30 – (a) Resposta em *pitch* caso 1, (b) Resposta em *pitch* caso 2, (c) Resposta em *pitch* caso padrão, (d) Resposta em *pitch* caso 3, (e) Resposta em *pitch* caso 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Gráficos comparativos dos erros na análise do movimento de *pitch*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na análise da velocidade $v_1 = 1$ nó da barcaça padrão e os casos de estudo, para a amplitude significativa em *pitch* foram obtidos para os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b), respectivamente -2.43% e -4.26%, por outro lado para os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e), respectivamente foram obtidas as variações simples de 2.13% e 4.26%, com uma variação média de $\bar{X} = 3.29^\circ$ e desvio padrão $\sigma = 0.112$. Ademais, para a velocidade significativa em *pitch* se obteve para os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) respectivamente -3.01% e -4.93%, enquanto para os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) se obteve respectivamente 2.27% e 4.96%, com uma variação média de $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.002$. Na conclusão da análise para a aceleração significativa em *pitch* para a velocidade $v_1 = 1$ nó, para os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) respectivamente foram obtidos -3.71% e -5.99%, enquanto para os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 2.83% e 6.2%, com uma média $\bar{X} = 0.03 \frac{rad}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$.

Ao se analisar a velocidade $v_2 = 2.5$ nós, no tocante à amplitude significativa em *pitch*, o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram uma variação de -2.69% e -4.19%, enquanto o caso 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) apresentaram respectivamente 1.8% e 3.89%, com uma variação média de $\bar{X} = 3.33^\circ$ e desvio padrão $\sigma = 0.109$. Em velocidade significativa de *pitch* o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.79% e -4.56%, enquanto os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 2.07% e 4.58%, com uma média $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.002$. Por fim, em aceleração significativa em *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -3.37% e -4.56%, por outro lado os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 2.55% e 5.67%, com uma média $\bar{X} = 0.03 \frac{rad}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$.

Para a velocidade $v_3 = 4$ nós, em amplitude significativa de *pitch* o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.37% e -3.86%, ao passo que o caso 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) apresentaram 1.48% e 2.97%, com uma variação média de $\bar{X} = 3.36^\circ$ e desvio padrão $\sigma = 0.094$. Em velocidade significativa de *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.52% e -4.1%, por outro lado os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 1.87% e 4.13%, com uma variação média de $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$. Por fim, em aceleração significativa em *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -3.04% e -4.86%, enquanto os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 2.26% e 5.05%, com uma média $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$.

Para a velocidade $v_4 = 5.5$ nós, em amplitude significativa de *pitch* o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.07% e -3.25%, ao passo que o caso 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) apresentaram 1.48% e 3.25%, com uma variação média de $\bar{X} = 3.38^\circ$ e desvio padrão $\sigma = 0.089$. Em velocidade significativa de *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.22% e -3.6%, enquanto os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 1.66% e 3.67%, com uma variação média de $\bar{X} = 0.05 \frac{rad}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$. Por fim, em aceleração significativa em *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.64% e -4.21%, enquanto os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 2% e 4.49%, com uma média $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$.

Ao se analisar a velocidade $v_5 = 7$ nós, no tocante à amplitude significativa em *pitch*, o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram uma variação de -1.77% e -2.95%, enquanto o caso 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) apresentaram respectivamente 1.18% e 2.65%, com uma variação média de $\bar{X} = 3.38^\circ$ e desvio padrão $\sigma = 0.076$. Em velocidade significativa em *pitch* o caso 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -1.93% e -3.1%, enquanto os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 1.41% e 3.18%, com uma média $\bar{X} = 0.05 \frac{rad}{s}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$. Por fim, em aceleração significativa em *pitch*, os casos 1 (Figura 30a) e 2 (Figura 30b) apresentaram respectivamente -2.28% e -3.62%, por outro lado os casos 3 (Figura 30d) e 4 (Figura 30e) respectivamente 1.74% e 3.93%, com uma média $\bar{X} = 0.04 \frac{rad}{s^2}$ e desvio padrão $\sigma = 0.001$.

No movimento de *pitch*, os casos de estudo 1 (23°proa e 32° popa) (Figura 30a) e caso de estudo 2 (30°proa e 48° popa) (Figura 30b) se destacaram na análise das 5 velocidades como os casos que obtiveram as menores variações de amplitude significativa em *pitch*, como por exemplo operando a 2.5 nós o caso 1 (Figura 30a) obteve uma diminuição de 2.69% em relação ao caso padrão e o caso 2 (Figura 30b) obteve uma diminuição de 4.26% operando a 1 nó.

4 CONCLUSÕES

Neste capítulo são abordadas as conclusões obtidas através dos resultados obtidos, analisados e discutidos no capítulo anterior e durante o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Ao se analisar as porcentagens de variação das características hidrostáticas o caso de estudo 2 (30° proa e 48° popa) e o caso de estudo 4 (12° proa e 14° popa) se destacam, como casos de variação máxima (positiva) e variação mínima (negativa). Como por exemplo na análise de características como :

- ∇ , deslocamento , variação positiva de $\delta = 10.77\%$ para o caso 2 e variação negativa de $\delta = 10.12\%$ para o caso 4,
- BM_t , raio metacêntrico transversal , variação positiva de $\delta = 7.64\%$ para o caso 4 e variação negativa de $\delta = 6.68\%$ para o caso 2,
- GM_t , altura metacêntrica transversal , variação positiva de $\delta = 7.13\%$ para o caso 4 e variação negativa de $\delta = 6.21\%$ para o caso 2.

O caso 4 possui o maior valor de GM_t , fazendo com que este caso seja o mais estável dentre os analisados. O caso 4 também possui os menores valores de TPC e MT_c . Quanto menor o valor de toneladas por centímetro da embarcação, e menor o valor de momento para trimar 1 cm, mais estável será esta embarcação, o que ocorre no caso 4 de estudo. Portanto, o caso 4 de estudo é o mais estável em relação às características hidrostáticas estudadas.

Portanto, devido ao maior valor de GM_t e menores valores de TPC e MT_c em comparação com os outros casos de estudo, o caso de estudo 4 é o mais estável em relação às características hidrostáticas analisadas. Conforme comentado na seção resultados e discussões.

Seguindo a mesma tendência, ao analisar os resultados de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*, os casos de estudo 2 e 4 também se destacam, sendo o caso 2 o que apresentou a maior resistência ao avanço em comparação com o caso de estudo padrão, com um intervalo de δ variando de 13.7% a 39.3% de acordo com o número de *Froude* analisado F_n . O caso de estudo 4 apresentou aos menores valores de resistência ao avanço, em comparação com o caso padrão, sendo um intervalo δ entre 6.7% e 25%. Portanto o caso 4 é o caso de estudo mais eficaz em comparação com os outros casos de estudo. É o caso 4 que apresenta os menores valores de resistência ao avanço, utilizando o método de *Holtrop*.

No método *KR Barge*, o caso 2 apresentou as maiores variações de resistência ao avanço, com δ variando de 1.3% à 1.7%, ao passo que o caso 4 apresentou as menores taxas de variação, com δ entre 1.3% e 5.9%. Portanto o caso 4 é o caso de estudo mais

eficaz em comparação com os outros casos de estudo. É o caso 4 que apresenta os menores valores de resistência ao avanço, utilizando o método de *KR Barge*.

É notável a diferença dos valores de variação para os casos de estudo utilizando o método *Holtrop* e *KR Barge*. Isso pode ser explicado pelas respectivas modelagens numéricas desenvolvidas para estimar o valor aproximado da resistência ao avanço total das embarcações.

É possível citar a certa simplicidade do método *KR Barge*, que se utiliza de 3 componentes principais de resistência ao avanço, a resistência friccional do casco da embarcação, a resistência devido às ondas geradas pela embarcação e a resistência devido ao ar. Diferentemente da formulação desenvolvida no método de *Holtrop*, que é mais refinada, utilizando por exemplo o fator de forma (k) do casco e dados sobre os apêndices do casco, refinando mais o cálculo da resistência friccional. Outro fator que também pode influenciar na diferença de resultados é que o método *Holtrop* é baseado em formulações matemáticas mais complexas, ajudando assim a refinar cada vez mais os resultados, em comparação com o método *KR Barge*.

Além de que os valores finais de resistência ao avanço podem ser influenciados pelas restrições do método *KR Barge*, como por exemplo valor do comprimento total e potência efetiva do motor de combustão principal do empurrador envolvido na operação das barcaças. Dessa forma os valores finais de resistência ao avanço utilizando o método *KR Barge* podem ser superestimados em comparação com a realidade. Portanto, conclui-se que a utilização do método *Holtrop* nos casos estudados neste trabalho é mais condizente com a realidade, apresentando resultados mais realísticos.

Para trabalhos futuros que envolvam a predição de resistência ao avanço de barcaças na região amazônica, é aconselhável a utilização de métodos experimentais unidos à análises com base em *CFD*, para a validação dos resultados e comparação com os dados obtidos neste trabalho.

Ao ser analisado o movimento de *heave* e *pitch* da barcaça caso padrão e os casos de estudo, foram levadas em consideração as 5 velocidades analisadas.

Em relação à aceleração significativa em *heave*, os casos de estudo 3 (14°proa e 17° popa) e caso 4 (12°proa e 14° popa) se destacaram, apresentando as variações mais críticas. A exemplo disto foi obtido um aumento de 2.17% para o caso 3 e um aumento de 4.56% para o caso 4, ambos operando a 1 nó.

Em relação à aceleração significativa em *pitch*, os casos de estudo 3 (14°proa e 17° popa) e caso 4 (12°proa e 14° popa) se destacaram, apresentando as variações mais críticas. A exemplo disto foi-se obtido um aumento de 2.83% para o caso 3 e um aumento de 6.2% para o caso 4, ambos operando a 1 nó.

Observando os resultados principais tanto dos movimentos de *heave* e *pitch*, quanto

da amplitude significativa fica claro como os casos 1 e 2 se destacaram de forma positiva, ou seja, minimizando este movimento em comparação com o caso padrão. Portanto as configurações dos casos de estudo 1 e 2 são mais estáveis quanto aos movimentos de *heave* e *pitch*. Diferentemente dos casos 3 e 4, que se destacaram de forma que foi-se aumentando as variações na aceleração significativa em comparação com o caso padrão.

Quanto maior a velocidade de operação, menores são as variações de amplitude significativa nos casos 1 e 2. Da mesma forma se comportam as acelerações significativas, tanto no movimento de *heave*, quanto no de *pitch*.

Altas amplitudes e acelerações significativas em *heave* e *pitch* ajudam a maximizar a ocorrência de reações fisiológicas e desconforto nos tripulantes das embarcações, as chamadas *sea sickness*, ou "doenças do mar", que acarretam em tonturas, náuseas e dores de cabeça nos tripulantes envolvidos na operação das embarcações. Portanto, analisar as velocidades de avanço das barcas e identificar variações significativas pode ser de suma importância para o bem estar da tripulação.

Para o movimento de *heave* e *pitch* temos como situações ideais para a não proliferação de *sea sickness* a operação a 1 nó para os casos de estudo 1 e 2, em relação à amplitude significativa. Portanto, pode-se apontar que os casos de estudo 1 e 2 são mais estáveis na operação a 1 nó de velocidade de avanço. Entretanto, para os casos de estudo 3 e 4, a situação é crítica em relação à aceleração significativa, casos estes em que as variações são maiores do que na operação a 1 nó em comparação com o caso de estudo padrão.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWICZ-GERIGK, T.; BURCIU, Z.; JACHOWSKI, J. An innovative steering system for a river push barge operated in environmentally sensitive areas. *Polish Maritime Research*, v. 24, n. 96, p. 27–34, 2017.
- ALVES, B. V. Transporte de cabotagem no brasil: uma análise da evolução dos fluxos de carga geral e granel, monografia. Florianópolis, SC, 2020.
- ANTAQ. *Raio-X do Transporte de Cargas na Cabotagem e Navegação Interior no Brasil por meio de Estudos Simplificados*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), 2019.
- BASSO, E. D. Análise do potencial econômico da padronização de uma barça para navegação interior, monografia. 2012.
- BENTLEY, S. *Maxsurf Modeller*. 2022. Disponível em: <<https://www.bentley.com/pt/products/product-line/offshore-structural-analysis-software/maxsurf>>. Acesso em: 07 mai. 2022.
- CARDANHA, B. H. et al. Logística fluvial de grãos no arco norte: um estudo da eficiência operacional de comboios, monografia. Manaus, 2020.
- DHAVALIKAR, S.; NEGI, A.; DOSHI, R. *Stability and motion analysis for barges*. India: National Conference on Computer Aided Modelling and Simulation in Computational Mechanics, 2009. 13–14 p.
- FALTINSEN, O. *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1993. v. 1.
- FALTINSEN, O. M. *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge, UK: Cambridge university press, 2005.
- FERREIRA, M. A. C. et al. Transporte fluvial por embarcações mistas no amazonas: uma análise do trecho manaus-coari e manaus-parintins, tese. Universidade Federal do Amazonas, 2016.
- HASSELMANN, D. E.; DUNCKEL, M.; EWING, J. Jonswap directional wave spectra observed during 1973. *Journal of physical oceanography*, v. 10, n. 8, p. 1264–1280, 1980.
- HOLTROP, J. Statistical data for the extrapolation of model performance tests. *International Shipbuilding Progress*, v. 25, n. 588, 1978.
- IBGE. *Amazônia Brasileira*. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 12 agosto. 2022.
- ISLAM, M. T. et al. Resistance prediction of an armored personnel carrier. *AIP Publishing LLC, AIP Conference Proceedings*, v. 1980, n. 1, p. 1–5, 2018.
- ITTC. *8th International Towing Tank Conference, Madrid, Spain*. 1957. Disponível em: <<https://www.ittc.info/media/3089/index.pdf>>. Acesso em: 15 agosto. 2022.
- JOURNÉE, J. M.; MASSIE, W. Offshore hydromechanics - first edition (technical notes). Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2001.

- KRS, K. R. of S. *Rules for the Towing Survey of Barges and Tugboats*. 2022. Disponível em: <http://www.krs.co.kr>. Acesso em: 14 mai. 2022.
- KWON, C. S.; YEON, S. M. Optimization of slope angles of a barge-shaped fpso from the towing stability and load perspective. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Elsevier, v. 13, p. 786–793, 2021.
- LARSEN, H. T. d. S. *Análise do comportamento de um navio utilizando a teoria das faixas*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- LEE, B. S. *Hydrostatics and Stability of Marine Vehicles*. USA: Springer, 2019.
- LEWIS, E. V. *Principles of Naval Architecture Second Revision*. 2. ed. USA: Sname, 1988.
- LLAUCA, W. R. H. *Estudio Experimental De Resistencia Al Avance En Barcazas Memores*. Tese (Doutorado) — Texas A-M University, 2018.
- LOPES, I. d. M. O.; MAGALHÃES, M. T. Q. Hidrovia do rio madeira como indutor de desenvolvimento microrregional das comunidades tradicionais do baixo madeira em porto velho. *Paranoá*, n. 22, p. 143–158, 2018.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. *Ship resistance and propulsion*. Cambridge, UK: Cambridge university press, 2017.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística Básica*. 2. ed. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2017.
- MUÑOZ, C. V. et al. Statistic model for the estimation of the resistance of landing craft hulls. *Ciencia y tecnología de buques*, v. 13, n. 26, p. 45–50, 2020.
- OBREJA, D. Experimental model resistance tests on a gas carrier barge. *Annals of Dunarea de Jos University of Galati*, Galati University Press, v. 13, p. 69–74, 2013.
- OLIVEIRA, R. C. d.; SILVA, R. D. de Souza e. Increase of agribusiness in the brazilian amazon: Development or inequality? *Earth*, MDPI, v. 2, n. 4, p. 1077–1100, 2021.
- PURWANA, A.; HUSODO, A. W. Total resistance prediction of self propelled coal barge (spcb) using computational fluid dynamic. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Department of Naval Architecture-Diponegoro University, v. 12, n. 2, p. 97–105, 2015.
- RAMOS, M. de S. et al. Esse paraná, para onde nos levará?: a história e o conatus em dois estaleiros de manaus, tese. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- SALVESEN, N.; TUCK, E.; FALTINSEN, O. *Ship Motions and Sea Loads*. 1. ed. USA: Sname, 1970.
- SAMSON, N.; OGBONNAYA, E.; EJABEFIO, K. Stability analysis for the design of 5000-tonnes offshore work barge. *International journal of Engineering and Technology*, v. 3, n. 9, p. 849–857, 2013.
- SKUPIEŃ, E.; PROKOPOWICZ, J. Methods of calculating ship resistance on limited waterways. *Polish Maritime Research*, n. 4, p. 12–17, 2014.
- SUN, H.; FALTINSEN, O. M. The influence of gravity on the performance of planing vessels in calm water. *Journal of Engineering Mathematics*, Springer, v. 58, n. 1, p. 91–107, 2007.

TABACZEK, T.; KULCZYK, J.; ZAWIŚLAK, M. Analysis of hull resistance of pushed barges in shallow water. *Polish Maritime Research*, v. 14, n. 1 (51), p. 10–15, 2007.

WOLFRAM, S. *Mathematica: a system for doing mathematics by computer*. USA: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1991.