



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

ALTAMIRO ALLEBRANDT JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E DA ESTABILIDADE DE CASCOS PLANANTES

Joinville
2021

ALTAMIRO ALLEBRANDT JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E DA ESTABILIDADE DE CASCOS PLANANTES

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville
2021

ALTAMIRO ALLEBRANDT JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO E DA ESTABILIDADE DE CASCOS PLANANTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 22 de Setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Lucas Weihmann
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de ferramentas computacionais que visam acelerar o projeto e a análise de embarcações planantes. Foram desenvolvidos três módulos, os quais destinam-se a estimativa da resistência ao avanço e a avaliação da estabilidade dinâmica de lanchas. O desenvolvimento foi baseado na clássica literatura disponível sobre o assunto e foi realizado usando a linguagem Delphi/Pascal. O processo de verificação foi realizado comparando-se os resultados obtidos usando a ferramenta desenvolvida com aqueles obtidos em diversas ferramentas já consolidadas na literatura. No total foram analisadas 6 embarcações e os erros obtidos variam entre 0,1% para a ferramenta usada como referência no desenvolvimento proposto e 10% para as demais ferramentas comerciais. Por fim, os resultados previstos para o ângulo de equilíbrio hidrodinâmico usando a ferramenta desenvolvida foram comparados a aqueles observados na prova de mar de uma lancha real. Nesse caso, a margem de erro observada em todas as velocidades analisadas se manteve abaixo dos 30%. Os resultados foram consistentes, indicando o real potencial de aplicação prática da ferramenta desenvolvida, a qual espera-se que contribua para a consolidação de tecnologias genuinamente brasileiras destinadas ao projeto de embarcações de alta velocidade.

Palavras-chave: Lancha. Planeio. Resistência ao avanço. Savitsky. Estabilidade.

ABSTRACT

This paper presents the development of computational tools that aim to accelerate the design and analysis of planing boats. Three modules were developed, which are intended for the estimation of the forward resistance and the evaluation of the dynamic stability of planing boats. The development was based on the classic literature available on the subject and was carried out using the Delphi/Pascal language. The verification process was carried out by comparing the results obtained with the tool developed with those obtained in several tools already consolidated in the literature. In total 6 high speed crafts were analyzed and the errors obtained vary between 0.1% for the tool used as reference in the proposed development and 10% for the other commercial tools. Finally, the results predicted for the hydrodynamic equilibrium angle using the developed tool were compared to those observed in the sea trial of a real boat. In this case, the margin of error observed for all the speeds analyzed remained below 30%. The results were consistent, indicating a real potential for practical application of the developed tool, which is expected to contribute to the consolidation of genuinely Brazilian technologies for the design of high-speed vessels.

Keywords: Yatch. Planning. Drag, Savitsky, Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de veículos não terrestres	17
Figura 2 – Exemplos de sustentação hidrodinâmica	18
Figura 3 – Aproximação prismática proposta por Savistky	21
Figura 4 – Esquema referente as variáveis do casco	22
Figura 5 – Equilíbrio dinâmico de uma lancha	23
Figura 6 – Efeitos hidrodinâmicos no fundo de um casco planante	24
Figura 7 – Tipos de apêndices externos ao casco	25
Figura 8 – Esquema referente as variáveis dos apêndices	26
Figura 9 – Distribuição estatística da altura das ondas	29
Figura 10 – Tipos de instabilidades associadas à um casco planante	30
Figura 11 – Forças dinâmicas em um casco planante adernado ϕ graus	32
Figura 12 – Precisão versus acurácia de uma análise	34
Figura 13 – Metodologia empregada no desenvolvimento	35
Figura 14 – Metodologia empregada na verificação	37
Figura 15 – Abordagens implementadas no ambiente Synapse	38
Figura 16 – Diagrama de blocos de um problema de otimização	38
Figura 17 – Fluxograma de uso da ferramenta desenvolvida	42
Figura 18 – Fluxograma referente ao processo de análise	43
Figura 19 – Casco 01: Análise do trim de equilíbrio	45
Figura 20 – Casco 01: Análise de resistência ao avanço	45
Figura 21 – Casco 01: Verificação do trim de equilíbrio a 40 nós	46
Figura 22 – Casco 01: Verificação da resistência ao avanço a 40 nós	46
Figura 23 – Casco 01: Nova verificação do trim de equilíbrio a 40 nós	47
Figura 24 – Casco 01: Nova verificação da resistência ao avanço a 40 nós	47
Figura 25 – Casco 02: Análise do trim de equilíbrio	48
Figura 26 – Casco 02: Análise de resistência ao avanço	48
Figura 27 – Casco 03: Análise do trim de equilíbrio	48
Figura 28 – Casco 03: Análise de resistência ao avanço	49
Figura 29 – Casco 04: Análise do trim de equilíbrio	49
Figura 30 – Casco 04: Análise de resistência ao avanço	49
Figura 31 – Casco 05: Análise do trim de equilíbrio	50
Figura 32 – Casco 05: Análise de resistência ao avanço	50
Figura 33 – Casco Experimental: Trim experimental (2 passageiros)	51
Figura 34 – Casco Experimental: Trim experimental (10 passageiros)	52
Figura 35 – Casco Experimental: Trim analítico (2 passageiros)	53

Figura 36 – Casco Experimental: Resistência analítica (2 passageiros)	53
Figura 37 – Casco Experimental: Trim analítico (10 passageiros)	53
Figura 38 – Casco Experimental: Resistência analítica (10 passageiros)	54
Figura 39 – Casco Experimental: Instabilidade longitudinal (2 passageiros) . . .	54
Figura 40 – Casco Experimental: Instabilidade transversal (17,25 nós)	55
Figura 41 – Casco Experimental: Instabilidade transversal (24,33 nós)	56
Figura 42 – Casco Experimental: Adernamento crítico	56
Figura 43 – Casco Experimental: Momento restaurador dinâmico	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis referentes à geometria do casco e da casaria	22
Tabela 2 – Principais adimensionais usados na modelagem de Savitsky	24
Tabela 3 – Variáveis referentes aos apêndices externos ao casco	26
Tabela 4 – Modelos empíricos para os coeficientes C_{f_r} e C_{f_s}	27
Tabela 5 – Modelos empíricos para o coeficiente $C_{f_{ws}}$	29
Tabela 6 – Embarcações analisadas	44
Tabela 7 – Síntese dos resultados obtidos	51
Tabela 8 – Casco 01: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	63
Tabela 9 – Casco 01: Análise de erros (Tweedie, 2011)	63
Tabela 10 – Casco 01: Comparação com resultado de Faltisen (2006)	64
Tabela 11 – Casco 01: Nova comparação com Faltisen (2006)	64
Tabela 12 – Casco 02: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	65
Tabela 13 – Casco 02: Análise de erros (Tweedie, 2011)	65
Tabela 14 – Casco 02: Comparação com MaxSurf	66
Tabela 15 – Casco 03: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	67
Tabela 16 – Casco 03: Análise de erros (Tweedie, 2011)	67
Tabela 17 – Casco 03: Comparação com MaxSurf	68
Tabela 18 – Casco 04: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	69
Tabela 19 – Casco 04: Análise de erros (Tweedie, 2011)	69
Tabela 20 – Casco 04: Comparação com MaxSurf	70
Tabela 21 – Casco 05: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	71
Tabela 22 – Casco 05: Análise de erros (Tweedie, 2011)	71
Tabela 23 – Casco 05: Comparação com MaxSurf	72
Tabela 24 – Casco Experimental: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)	73
Tabela 25 – Casco Experimental: Comparação (Tweedie, 2011) e experimentos	74
Tabela 26 – Casco Experimental: Análise de trim (2 Passageiros)	74
Tabela 27 – Casco Experimental: Comparação com Orca3D	75
Tabela 28 – Casco Experimental: Análise de erros Orca3d (2 Passageiros)	76
Tabela 29 – Casco Experimental: Análise de erros (Tweedie, 2011) (10 passageiros)	76
Tabela 30 – Casco Experimental: Análise de trim (Tweedie, 2011) (10 passageiros)	77
Tabela 31 – Casco Experimental: Análise de erros (10 passageiros)	77
Tabela 32 – Casco Experimental: Análise de instabilidade longitudinal	78
Tabela 33 – Mapa de calor de instabilidades transversais 1/2	79
Tabela 34 – Mapa de calor de instabilidades transversais 2/2	80
Tabela 35 – Casco Experimental: Critério de estabilidade transversal 1/2	81

Tabela 36 – Casco Experimental: Critério de estabilidade transversal 2/2	82
Tabela 37 – Análise de erro relativo geral por velocidade	83
Tabela 38 – Dados de entrada das embarcações analisadas	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACOBAR	Associação Brasileira de Construtores de Barcos
FAST	<i>International Conference on Fast Sea Transportation</i>
ITTC	<i>International Towing Tank Conference</i>
RIT	Radar de Instabilidade Transversal
SI	Sistema Internacional
SWATH	<i>Small Waterplane Area Twin Hull</i>
Synapse	Sistema de Otimização para Projetos de Engenharia utilizando Superfícies de Resposta Neurais

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{hull}	Área frontal não submersa do casco
A_{rud}	Área molhada do leme
A_{ss}	Área frontal da casaria/superestrutura
A_{strut}	Área molhada do pé de galinha
A_{wet}	Área molhada do casco
B_{wl}	Boca molhada
C_f	Coefficiente de arrasto de fricção
$C_{L\beta}$	Coefficiente de sustentação (placa com <i>deadrise</i>)
C_{Lo}	Coefficiente de sustentação (placa plana)
l_a	Comprimento do eixo
C_p	Distância entre o centro de pressão e a quilha no espelho de popa
C_v	Coefficiente de velocidade
$C_{f_{ws}}$	Coefficiente de arrasto por spray
Δ	Deslocamento hidrostático com velocidade nula
d_a	Diâmetro do eixo
F_r	Força exercida no leme
$F_{d,port}$	Força dinâmica resultante a bombordo
$F_{d,stab}$	Força dinâmica resultante a boreste
I_T	Momento de inércia do plano de linha d'água
L_c	Comprimento do chine molhado
L_k	Comprimento de quilha molhada
L_{wl}	Comprimento de linha d'água
L_{ws}	Comprimento da área de <i>spray</i>
L_x	Distância da popa a meia nau
N_{prop}	Número de eixos propulsores
N_{rudder}	Número de lemes
N	Número de propulsores
R_{drag}	Resistência aerodinâmica
R_{ap}	Resistência por apêndices
R_{aw}	Resistência adicional de ondas
R_{fpf}	Resistência de placa plana
R_{ind}	Resistências induzidas
R_{rudder}	Resistência devido aos lemes
R_r	Resistência de rugosidade
R_{shaft}	Resistência devido aos eixos propulsores

R_{spray}	Resistência por <i>spray</i>
R_{strut}	Resistência devido aos pés de galinha
R_{ta}	Resistência total da água
R_{vf}	Resistência viscosa de fricção
R_{vp}	Resistência viscosa de pressão
R_{wb}	Resistência de quebra de onda
R_{wp}	Resistência por formação de onda
θ	Ângulo entre quilha e a aresta da área de influência do <i>spray</i>
∇	Deslocamento volumétrico do casco
V	Velocidade da embarcação
Z	Pontal
a_{1d}	Momento restaurador dinâmico
a_{1s}	Momento restaurador hidrostático
α_r	Ângulo de ataque do leme
α	Ângulo entre quilha e a aresta da área de pressão
A_{rud}	Área de seção do leme
A_{strut}	Área de seção do mancal
BG	Distância entre o centro vertical de gravidade e o centro de flutuação
B_{oa}	Boca máxima
b	Boca no espelho de popa
$chord_{leme}$	Corda do leme
$chord_{strut}$	Corda do mancal
c_{tab}	Corda dos estabilizadores
β_x	<i>Deadrise</i> à meia nau
β	<i>Deadrise</i> na popa
δ	Ângulo de deflexão do estabilizador
ϵ	Ângulo entre linha de empuxo e quilha
t_{rud}	Espessura do leme
t_{strut}	Espessura do mancal
f	Distância entre ponto de empuxo e LCG
$H_{\frac{1}{3}}$	Altura de onda significativa
λ	Razão comprimento/boca molhados
λ_k	Razão média de comprimento molhado e boca
L_{oa}	Comprimento total
Λ	Momento induzido pelos lemes e aletas
N_v	Número de velocidades analisadas
ϕ_r	Ângulo em relação ao plano horizontal
ϕ	Grau de adernamento
ρ	Densidade da água

σ	Razão entre corda e boca
Δ_s	Deslocamento hidrostático
τ	Trim de planeio
ϑ	Ângulo entre chine e quilha
V	Velocidade em nós
ν	Viscosidade dinâmica da água
V_{max}	Velocidade máxima analisada em nós
V_{min}	Velocidade mínima analisada em nós
V_m	Velocidade média no fundo do casco
x_{axis}	Distância do centroide do eixo ao espelho de popa
x_r	X do leme em relação ao CG da embarcação
x_{strut}	Distância do centroide do mancal ao espelho de popa
x_{rud}	Distância do centroide do leme ao espelho de popa
y_{axis}	Distância do centroide do eixo a quilha
y_r	Y do leme em relação ao CG da embarcação
y_{strut}	Distância do centroide do mancal a quilha
y_{rud}	Distância do centroide do leme a quilha
z_r	Z do leme em relação ao CG da embarcação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos gerais	16
1.1.1	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Embarcações de planeio	17
2.2	Resistência ao avanço	19
2.2.1	Métodos empíricos para análise de cascos planantes	20
2.2.2	Resistência aerodinâmica	25
2.2.3	Resistência dos apêndices	25
2.2.4	Resistência gerada pelo <i>spray</i>	28
2.2.5	Resistência adicional causada pelas ondas do mar	29
2.3	Estabilidade	29
2.3.1	Instabilidade longitudinal	30
2.3.2	Instabilidade transversal	31
2.4	Verificação e validação	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	Metodologia usada no desenvolvimento	35
3.2	Metodologia usada na verificação	36
3.3	Inclusão no ambiente Synapse	37
3.4	Ensaio em escala real	39
3.5	Medida de erro utilizada	39
4	DESENVOLVIMENTO	41
4.1	Parâmetros de entrada	41
4.2	Melhorias realizadas no código desenvolvido	41
4.3	Funcionamento do programa	41
5	RESULTADOS	44
5.1	Embarcações analisadas	44
5.2	Embarcação de referência	44
5.3	Cascos disponíveis na literatura	47
5.4	Análise do casco experimental	51
5.5	Comparação com resultado analítico usando o Orca3D	52
5.6	Análise de estabilidade longitudinal	54
5.7	Análise de estabilidade transversal	55

6	CONCLUSÕES	58
6.1	Trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A	63
	APÊNDICE B	65
	APÊNDICE C	67
	APÊNDICE D	69
	APÊNDICE E	71
	APÊNDICE F	73
	APÊNDICE G	74
	APÊNDICE H	78
	APÊNDICE I	84

1 INTRODUÇÃO

Embora o transporte de carga e de pessoas exija embarcações mercantes de grande porte; o extenso litoral, bem como o rico conjunto de bacias hidrográficas, fazem das lanchas um dos principais motores impulsionadores do mercado brasileiro de embarcações. Porém, enquanto em muitos países, embarcações de lazer são objetos tão comuns quanto automóveis, a tradição brasileira costuma dedicar-se ao comércio de embarcações de médio e grande porte; ou então, com elevado acabamento, focando em produtos de alto valor agregado (CARRO, 2021).

Mesmo focado em embarcações de alto valor, antes da pandemia de COVID-19, o mercado brasileiro de embarcações de recreio cresceu cerca de 10% ao ano (CATUCCI, 2016). No entanto, conforme constatado por Netto (2019), a crise econômica iniciada em 2014 causou uma redução de quase 50% nas atividades econômicas do segmento náutico entre 2015 e 2018.

Após os primeiros sinais da recuperação do setor em 2018, em 2019 o polo de Santa Catarina, segundo maior do país, apesar da pandemia, observou um aumento de 30% na prestação de serviços náuticos (NSC, 2021).

Utilizando informações disponibilizadas pela Associação Brasileira de Construtores de Barcos (ACOBAR), Souza (2021) destaca que a venda de barcos de até R\$ 1,8 milhões subiu 20% no ano de 2020 e a fila de espera atingiu a marca dos 4 meses em diversos estaleiros nacionais.

Em 2020 a ocupação de docas molhadas subiu 12% e mesmo com as dificuldades da crise sanitária, o evento São Paulo Boat Show movimentou 155 milhões de reais. Logo, é de se esperar que esse crescimento se repita no ano de 2022 (CARRO, 2021).

Embora o Brasil venha, pouco a pouco, se consolidando como um grande mercado para o setor náutico, paradoxalmente, o projeto dessas embarcações continua a ser realizado no exterior, ou então, é fortemente baseado no empirismo e na experiência dos diversos estaleiros existente ao longo de todo o território nacional (MORAES, 2017).

Devido a complexidade dos fenômenos físicos observados em uma embarcação de planeio, pequenos ajustes no desenho do casco e no arranjo interno podem afetar significativamente o desempenho, levando ao aumento do consumo de combustível ou, eventualmente, a redução do conforto e da segurança dos tripulantes (FALTINSEN, 2006).

Conforme a competitividade entre os estaleiros nacionais cresce, o tempo para novos projetos ganharem mercado se aperta. Assim, além da redução dos prazos de

projeto, a carência de técnicas e ferramentas acessíveis para a análise hidrodinâmica de embarcações de alta velocidade fazem com que, em muitos casos, a primeira lancha produzida sirva também de protótipo para a verificação da estabilidade e do projeto estrutural ¹.

Nesses casos, as provas de mar realizadas substanciam ajustes intuitivos nos moldes de laminação, os quais são realizados antes que a segunda lancha seja produzida. Evidentemente, tal abordagem gera um custo de retrabalho, além de sacrificar a precisão da geométrica fabricada.

Segundo Lamb et al. (2003), o objetivo de um projeto naval consiste na definição das características que permitam à embarcação atender aos requisitos do armador, além de satisfazer os critérios e normas das Sociedades Classificadoras e autoridades marítimas.

Nesse sentido, o projeto de embarcações é uma atividade complexa, seja pela dificuldade da análise dos atributos, seja pela interdependência das características de projeto (MORAES, 2017). A complexidade dessa atividade é agravada pela ausência e/ou limitação de referências bibliográficas, somados à quantidade de variáveis e fenômenos físicos envolvidos no planeio, além do balanceamento necessário entre os atributos de desempenho e as necessidades do armador.

Tradicionalmente, projetos navais são realizados seguindo uma abordagem representada pela Espiral de Evans (EVANS, 1959). Nessa abordagem, o projeto é desenvolvido por meio do sequenciamento de diversas etapas, as quais são revisitadas iterativamente. O processo iterativo é repetido até que todos os requisitos de projeto sejam satisfeitos (LAMB et al., 2003).

Devido a dificuldade em se obter uma solução que atenda aos requisitos de projeto, em muitos casos, o projeto é encerrado assim que uma solução viável é encontrada (MORAES, 2017). Nesse caso, o desempenho do projeto dependerá fortemente da habilidade e experiência do projetista, pois cabe a ele avaliar as prioridades e as características mais importantes a serem exploradas, buscando a viabilidade econômica do projeto.

Esse cenário fomenta o desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem o projetista, permitindo maior assertividade e agilidade nas tomadas de decisões, bem como nas análises realizadas.

Dentro do contexto discutido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de três módulos destinados ao projeto hidrodinâmico de lanchas, seguindo a metodologia descrita no capítulo 4.

¹ Esse fato foi presenciado pelo autor em diversas oportunidades durante o tempo em que prestou serviços para vários estaleiros nacionais.

1.1 Objetivos gerais

Este trabalho busca desenvolver uma ferramenta computacional que permita estimar a resistência ao avanço, além das características associadas à estabilidade dinâmica de embarcações planantes. Tal ferramenta deve funcionar tanto de maneira independente, como integrada a outros ambientes de projeto naval.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo deste trabalho, propõem-se:

- Identificar as variações nos modelos empíricos descritos por Savitsky para a estimativa do arrasto de cascos planantes;
- Implementar a análise de resistência ao avanço de cascos planantes;
- Implementar o modelo de estimativa do arrasto devido ao efeito *spray*;
- Implementar o modelo para avaliar a estabilidade dinâmica longitudinal de uma lancha;
- Implementar o modelo para avaliar a estabilidade dinâmica transversal de uma lancha;
- Verificar o modelo de estimativa de resistência ao avanço usando ferramentas comerciais.

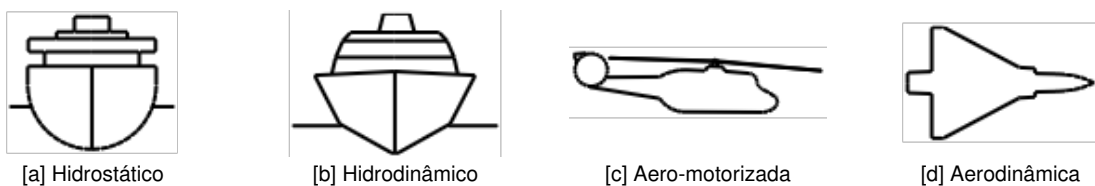
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diante do contexto apresentado na introdução, este capítulo discute os fundamentos associados ao desenvolvimento proposto, tratando dos aspectos mais relevantes referentes à resistência ao avanço e à estabilidade dinâmica de embarcações planantes.

2.1 Embarcações de planeio

Segundo Papanikolau (2002), existe uma linha tênue que separa as categorias nas quais os veículos não terrestres podem ser classificados. Em muitos casos, os projetos podem apresentar características que permitem classificar um mesmo veículo em múltiplas categorias. Na Figura 1 são mostradas as quatro categorias principais nas quais um veículo não terrestre pode ser classificado de acordo com o tipo de sustentação que desenvolve.

Figura 1 – Classificação de veículos não terrestres



Fonte: Adaptado de Papanikolau (2002)

As embarcações de sustentação hidrostática são aquelas mais comumente encontradas nos oceanos e compreendem os navios cargueiros, de contêineres, graneleiros, petroleiros entre outros, além de embarcações de serviço, como rebocadores e pesqueiros.

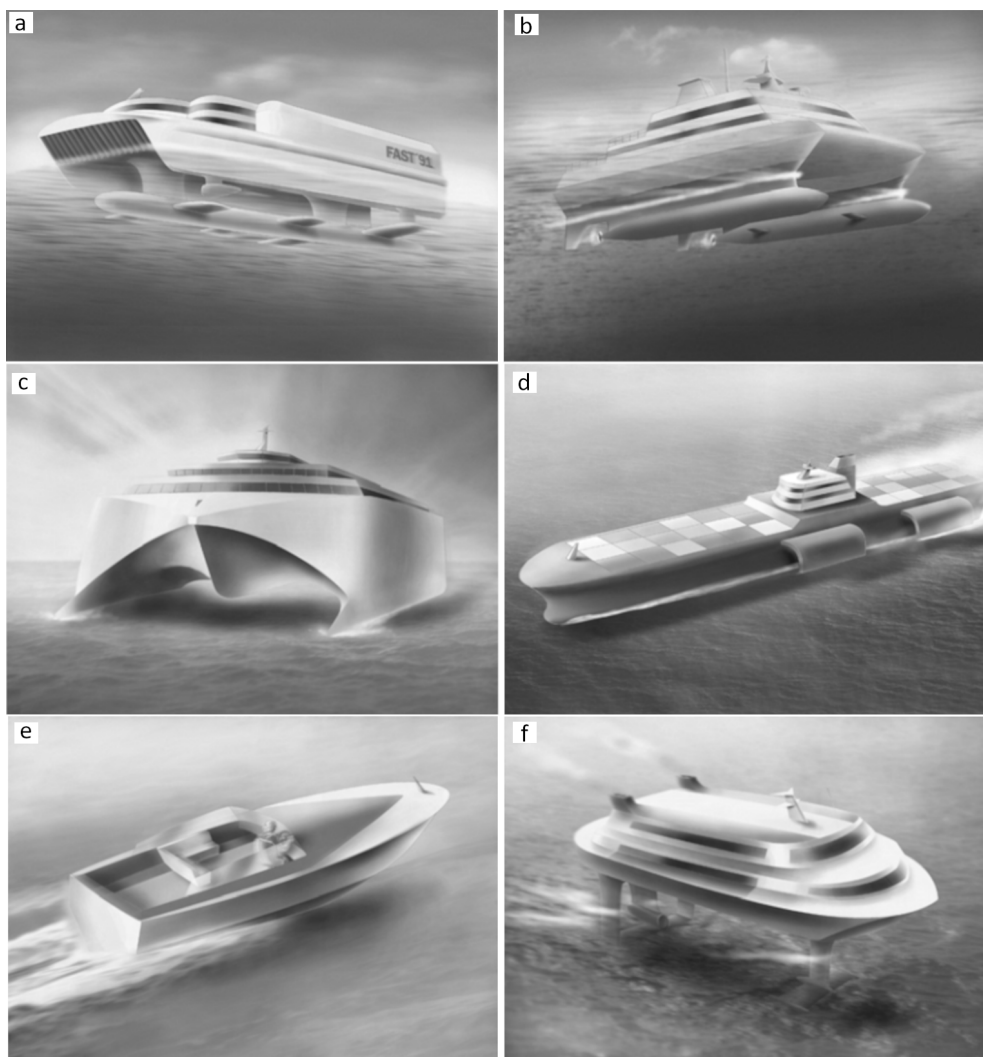
Veículos de sustentação aero-motorizada são aqueles que usam motores e bombas para gerarem sustentação. No caso de embarcações, essa classificação engloba os veículos sustentados por bolsões de ar ao redor do casco, sendo geralmente empregados no meio militar.

Entre as embarcações classificadas como veículos de sustentação aerodinâmica, destacam-se os chamados escanoplanos, os quais utilizam o efeito solo para se deslocarem acima do nível d'água.

Finalmente, as embarcações de sustentação hidrodinâmica, foco deste estudo, são aquelas cuja interação com a água resulta em uma força de sustentação proporcional a velocidade da embarcação.

Na Figura 2 são mostrados seis tipos de embarcações de alta velocidade. Na Figura 2b tem-se a representação de uma embarcação do tipo *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH), onde corpos submersos provêm a flutuação necessária, mas, por estarem distantes da superfície, resultam em uma geração de ondas consideravelmente menor. Já na Figura 2c observa-se um catamarã "corta-ondas", cujas formas induzem um fluxo de ar entre os cascos, o qual promove uma sustentação aerodinâmica na embarcação. Esse efeito é conhecido como *tunnel hull*. A embarcação mostrada na Figura 2d corresponde à um cargueiro pentamarã, cujos cascos finos e afastados promovem estabilidade à embarcação com uma baixa geração de ondas. Já na Figura 2e é mostrado uma embarcação monocasco do tipo planante, enquanto na Figura 2f pode ser vista uma embarcação com hidrofólios submersos. Por fim, na Figura 2a pode ver vista uma embarcação que combina os efeitos *tunnel hull*, SWATH e hidrofólios.

Figura 2 – Exemplos de sustentação hidrodinâmica



[a] Casco combinado de múltiplos efeitos [b] Casco de efeito SWATH [c] Catamarã com efeito *tunnel hull* [d] Pentamarã [e] Embarcação monocasco planante [f] Casco com hidrofólio

Fonte: Adaptado de Faltinsen (2006)

A categoria de embarcações objeto deste trabalho são os monocascos de planeio, especialmente associados ao projeto de lanchas. Conforme discutido por Moraes (2017), diferentemente das embarcações deslocantes, onde o objetivo é atingir as expectativas de um único armador, as lanchas devem agradar ao maior número possível de potenciais clientes, destacando-se de eventuais competidores.

Assim, enquanto os projetos de embarcações mercantes e de serviço costumam dar origem a poucas embarcações irmãs (fabricadas individualmente), as lanchas seguem a lógica da fabricação seriada, onde o custo de fabricação do molde tem que ser dissolvido na produção de um grande lote de produtos com baixo grau de customização.

Nesse contexto, o desafio consiste em executar um novo projeto inovador e competitivo que conquiste novos clientes a cada ano, sujeito ao alto risco (e custo) associado à fabricação da primeira unidade.

Segundo Faltinsen (2006), o desafio no projeto de embarcações planantes é resultado da complexa interação que a embarcação desenvolve com a água durante a navegação. Embora a sustentação hidrodinâmica permita ao casco alcançar maiores velocidades com um menor consumo de combustível, o caráter dinâmico das forças envolvidas impossibilita o desacoplamento dos movimentos da embarcação, potencializando o surgimento de instabilidades dinâmicas durante a navegação (LEWANDOWSKI, 2004).

2.2 Resistência ao avanço

A resistência ao avanço pode ser definida como a força que se opõem ao deslocamento de uma embarcação quando essa navega à uma velocidade constante (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Segundo o modelo proposto por Larsson e Raven (2010), a resistência ao avanço da parte molhada da embarcação pode ser decomposta de acordo com a Equação 1, onde R_{ta} é a resistência total exercida pela água, R_{wb} é a resistência por quebra de onda, R_{wp} é a resistência por formação de onda, R_{vp} é a resistência viscosa de pressão, R_{vf} é a resistência viscosa de fricção causada pela forma do casco, R_r é a resistência de rugosidade e finalmente R_{fpp} é a resistência de placa plana.

$$R_{ta} = R_{fpp} + R_r + R_{wp} + R_{vp} + R_{vf} + R_{wb} \quad (1)$$

O detalhamento das diversas componentes mostradas na Equação 1 foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser visto em Larsson e Raven (2010).

Ainda segundo Larsson e Raven (2010), no caso de cascos planantes, a resistência viscosa de pressão R_{vp} e a resistência viscosa de fricção causada pela forma do casco R_{vf} tendem a zero, sendo substituídas pela resistência gerada pelos

apêndices R_{ap} , a qual corresponde ao arrasto decorrente dos elementos externos ao casco, tais como eixos, lemes, pé de galinha, entre outros. Além disso, a resistência por quebra de onda R_{wb} dá lugar a resistência causada pelo *spray* gerado pelo avanço em alta velocidade do casco R_{spray} . Assim, durante o regime de planeio, a resistência ao avanço da parte molhada de uma lancha pode ser escrita na forma:

$$R_{ta} = R_{f_{pf}} + R_r + R_{wp} + R_{ap} + R_{spray} \quad (2)$$

Além da resistência referente a parte molhada (Equação 2), a resistência ao avanço total R_t deve considerar ainda as parcelas decorrentes da resistência adicional de ondas R_{aw} , da resistência aerodinâmica R_{drag} e da resistência induzida R_{ind} , resultando na equação:

$$R_t = R_{f_{pf}} + R_r + R_{wp} + R_{ap} + R_{spray} + R_{aw} + R_{drag} + R_{ind} \quad (3)$$

É importante observar que a resistência aerodinâmica R_{drag} considera, além das obras mortas, a porção do casco da embarcação que se encontra fora da água em virtude da diminuição temporária de calado ocorrida durante o regime de planeio.

Já a resistência adicional de onda R_{aw} decorre da variação da área molhada, do trim e do calado ocorrida em virtude da interação do casco com as ondas do mar (LEWANDOWSKI, 2004).

Por fim, a resistência induzida R_{ind} refere-se à resistência gerada por vórtices na água e no ar, provenientes do deslocamento em alta velocidade da embarcação.

2.2.1 Métodos empíricos para análise de cascos planantes

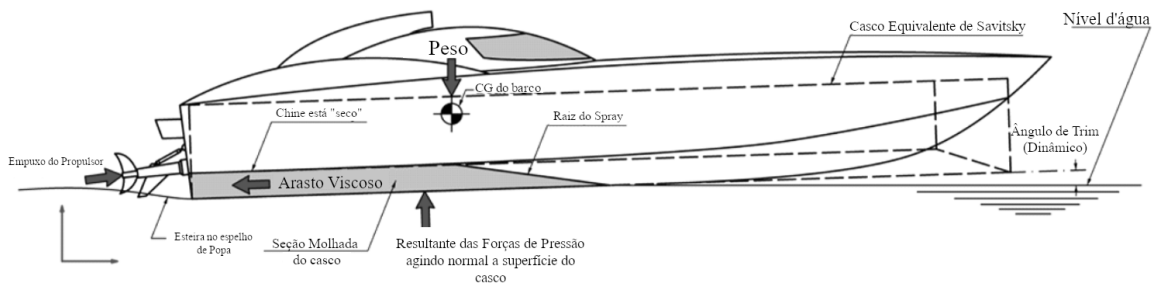
Entre os métodos empíricos disponíveis na literatura para a estimativa da resistência ao avanço de embarcações planantes, destacam-se os clássicos trabalhos de Daniel Savitsky ((SAVITSKY, 1964), (SAVITSKY; BROWN, 1976), (SAVITSKY, 1985), (SAVITSKY, 2003) e (SAVITSKY; DELORME; DATLA, 2007)).

A relevância desses trabalhos é tamanha que a edição desse ano da *International Conference on Fast Sea Transportation* (FAST) homenageou Daniel Savitsky, reconhecendo suas importantes contribuições no estudo das embarcações de alta velocidade.

Originalmente publicado em Savitsky (1964), o método foi desenvolvido a partir de ensaios de arrasto com cascos prismáticos com o ângulo de *deadrise* variando entre 2 e 15 graus. Cada modelo possuía um único valor de *deadrise* da popa até a proa e foi ensaiado em diferentes velocidades.

Na Figura 3 pode ser vista a modelagem adotada por Savitsky (1964), na qual a linha pontilhada representa o casco prismático, enquanto a imagem do barco representa a geometria típica de cascos reais.

Figura 3 – Aproximação prismática proposta por Savitsky



Fonte: Adaptado de Orca3D User Manual (2021)

Tal como visto em Farah e Tancredi (2021), o ângulo de *deadrise* é um dos parâmetros mais importantes associados ao projeto de uma lancha, influenciando tanto no conforto quanto na resistência ao avanço da embarcação.

Embarcações com fundo chato são utilizadas principalmente em regiões pantanosas, onde a profundidade da água é limitada, mas ainda grande o suficiente para impedir o uso de veículos terrestres. Segundo Gerr (1995), essas embarcações possuem maior estabilidade inicial e são mais facilmente fabricadas, mas possuem menor manobrabilidade e pior desempenho ao enfrentarem ondas.

Por outro lado, Savitsky (2003) divide os cascos prismáticos com fundo V em dois grupos. O primeiro, com *deadrise* entre 15 e 20 graus, tem melhor controle de direção e melhor comportamento ao enfrentarem ondas, mas apresentam maior resistência ao avanço que as embarcações de fundo chato. Já as embarcações prismáticas de fundo V profundo (*deadrise* entre 20 e 26 graus) têm as melhores características de estabilidade e conforto em águas agitadas, mas, no entanto, em baixas velocidades, têm maior tendência de movimentação, causando desconforto nos tripulantes, principalmente quando fundeadas.

Já os cascos de *deadrise* variável combinam as características dos três modelos, possuindo um ângulo maior na proa (melhorando o conforto e estabilidade em mar agitado) e uma popa mais chata, trazendo conforto nas baixas velocidades e maior eficiência no planeio.

Por fim, é importante destacar que, além da variação longitudinal, alguns cascos possuem uma variação transversal, onde o ângulo de *deadrise* diminui a cada *lifting strake*.

Assim, por conta da aproximação prismática, certas variações são esperadas quando os resultados de prova de mar de cascos reais são comparados com àqueles estimados utilizando-se o método de Savitsky.

Buscando mitigar essas limitações, ao longo dos anos diversos autores publicaram adições e correções que, por exemplo, aumentaram a faixa de validade do modelo ou adicionaram parcelas de resistências não consideradas em Savitsky

(1964). Entre os principais trabalhos que complementam o método original, destacam-se Hadler (1966), Savitsky e Brown (1976), Doctors (1985), Lewandowski (1996a), Blount e Bartee (1997) e Savitsky, DeLorme e Datla (2007).

Para facilitar a compreensão da modelagem matemática apresentada nesta seção, na Tabela 1 são sintetizadas as variáveis associadas as características do casco e da casaria de uma lancha, as quais são representadas na Figura 4.

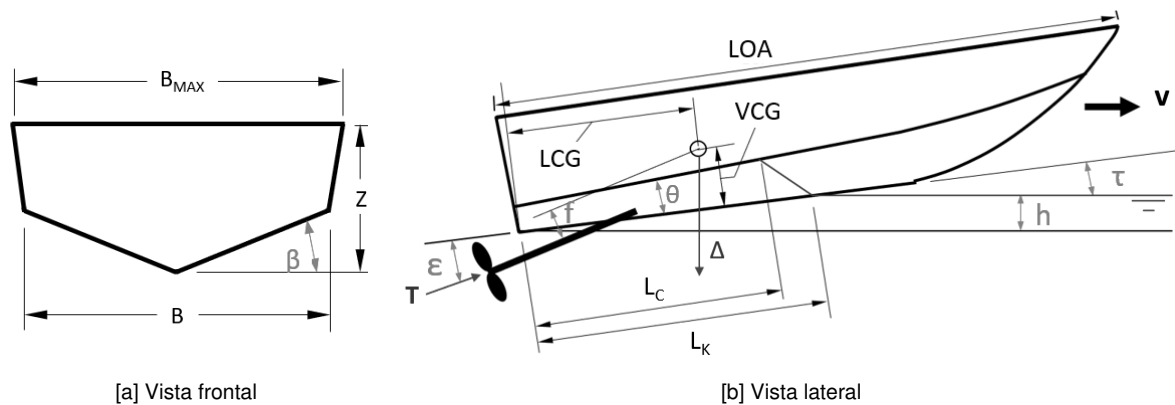
Tabela 1 – Variáveis referentes à geometria do casco e da casaria

Variável	Descrição	Unid.
L_{oa}	Comprimento total da embarcação	m
L_{wl}	Comprimento de linha d'água	m
B_{max}	Boca máxima da embarcação	m
B	Boca da embarcação no chine do espelho de popa	m
B_{wl}	Boca da embarcação na linha d'água	m
Z	Pontal da embarcação	m
V_{CG}	Posição vertical do centro de gravidade	m
L_{CG}	Posição longitudinal do centro de gravidade	m
Δ	Deslocamento da embarcação	kg
∇	Deslocamento volumétrico do casco	m ³
β	<i>Deadrise</i> no espelho de popa	°
β_x	<i>Deadrise</i> à meia nau	°
L_x	Distância entre o espelho de popa e a meia nau	m
f	Distância entre o espelho de popa e o centro de pressão	m
ϵ	Ângulo do empuxo em relação a quilha	°
A_{ss}	Área frontal exposta a resistência do ar	m ²
A_{wet}	Área molhada do casco	m ²

Fonte: Autor (2021)

Devido à natureza dinâmica das forças envolvidas, a cada velocidade (V) analisada, o ângulo de trim (τ), o comprimento de linha d'água (L_{wl}), a boca na linha d'água (B_{wl}), o valor da sustentação, a posição do centro de pressão, a área molhada (A_{wet}) e o volume deslocado (∇), variam.

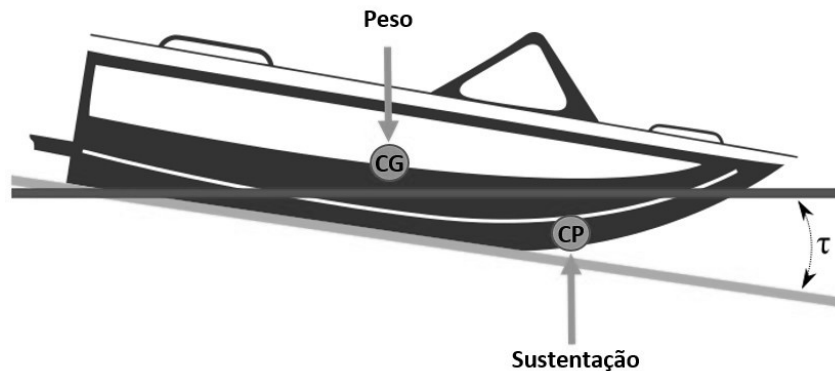
Figura 4 – Esquema referente as variáveis do casco



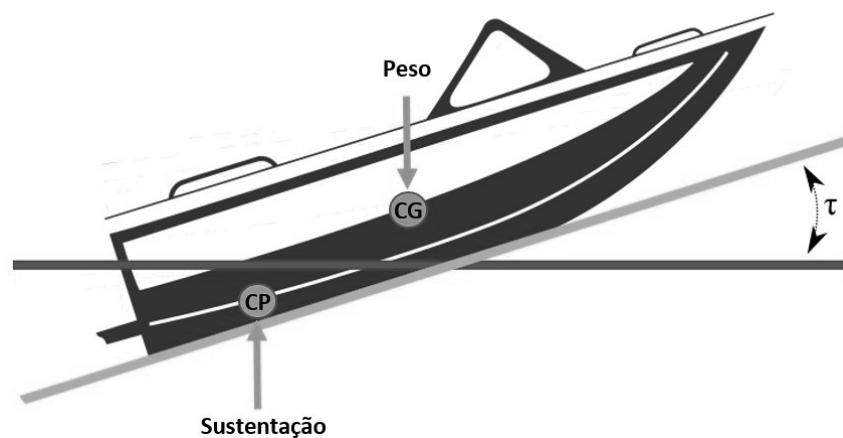
Fonte: Tweedie (2011)

Assim, conforme descrito por Molland, Turnock e Hudson (2011), o método de Savitsky depende de um processo iterativo para a determinação do ângulo de trim (τ) para o qual ocorre o equilíbrio das forças verticais. Ou seja, o ângulo de trim para o qual a posição longitudinal do centro de gravidade coincide com a posição longitudinal do centro de pressão (Figura 5).

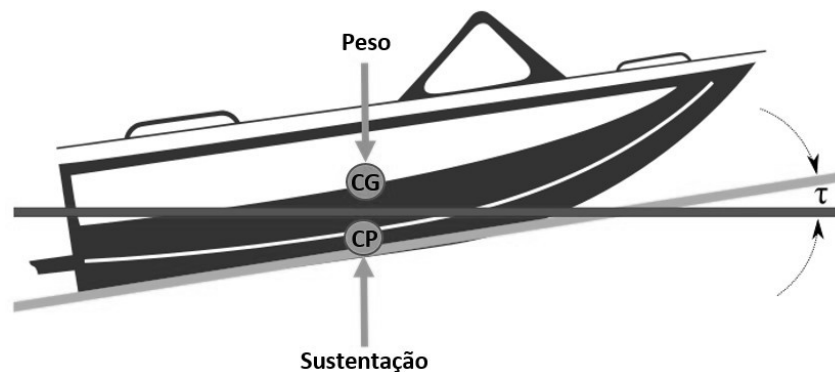
Figura 5 – Equilíbrio dinâmico de uma lancha



[a] Centro de gravidade à vante do centro de pressão



[b] Centro de gravidade à ré do centro de pressão

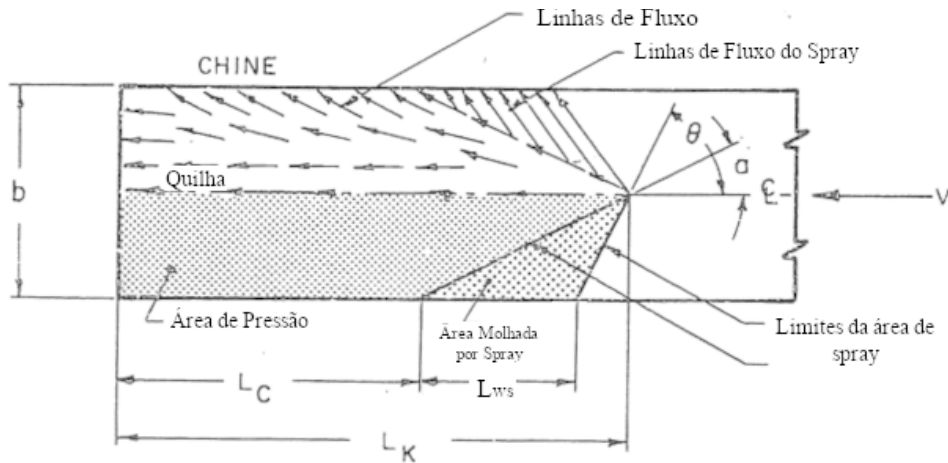


[c] Centro de gravidade alinhado com o centro de pressão

Fonte: Autor (2021)

Na Figura 6 são mostrados os efeitos hidrodinâmicos observados no fundo de um casco planante e que são considerados no modelo empírico de Savitsky (1964). Nesse caso, L_k é o comprimento da quilha molhada, L_c é o comprimento de chine molhado, L_{ws} é o comprimento da área de *spray*, b é a boca no espelho de popa, α é o ângulo entre a quilha e a aresta da área de pressão e θ é o angulo entre a quilha e a aresta da área de influência do *spray*.

Figura 6 – Efeitos hidrodinâmicos no fundo de um casco planante



Fonte: Adaptado de Savitsky (1964)

Para que os resultados do modelo empírico pudessem ser aplicados aos cascos reais, Savitsky propôs que a análise ocorresse de maneira adimensional. Ou seja, as equações foram elaboradas de maneira a usar as proporções geométricas e coeficientes adimensionais enumerados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais adimensionais usados na modelagem de Savitsky

Símbolo	Descrição	Equação
C_f	Coeficiente de arrasto de fricção	$\frac{R_f * \cos(\beta)}{0,5 * \rho * V^2 * \lambda * b^2}$
C_{Lo}	Coeficiente de sustentação (placa plana)	$\frac{\nabla}{0,5 * \rho * V^2 * b^2}$
$C_{L\beta}$	Coeficiente de sustentação (placa com <i>deadrise</i>)	$C_{Lo} - 0,0065 * \beta * C_{Lo}^{0,60}$
C_p	Distância do centro de pressão ao espelho de popa	$0,75 - \frac{1}{5,21 * \frac{C_p^2}{\lambda^2} + 2,39}$
C_v	Coeficiente de velocidade	$\frac{V}{\sqrt{g * b}}$
λ	Razão comprimento/boca molhados	$\frac{L_k + L_c}{2 * b}$
C_{fws}	Coeficiente de arrasto por <i>spray</i>	Tabela 5

Fonte: Autor (2021)

2.2.2 Resistência aerodinâmica

Conforme visto em Savitsky, DeLorme e Datla (2007), a resistência aerodinâmica (Equação 4) considera tanto a casaria e a superestrutura da embarcação quanto a área do casco não submersa, a qual varia em função da velocidade da lancha.

$$R_{drag} = 0,5 * \rho_{air} * V^2 * (A_{ss} + A_{hull}) * C_D \quad (4)$$

Na Equação 4, A_{ss} refere-se à área frontal da casaria, enquanto A_{hull} à área do casco não submersa. Já C_D refere-se ao coeficiente de arrasto que segundo Tweedie (2011) vale 0,6. No entanto, Savitsky, DeLorme e Datla (2007) propõem que esse coeficiente seja mais próximo de 0,7. Por fim, a área do casco não submersa pode ser estimada com base na equação:

$$A_{hull} = B_{max} * \left(\frac{Z}{\cos(\tau)} + L_{oa} * \sin(\tau) - \lambda_K * B * \sin(\tau) \right) \quad (5)$$

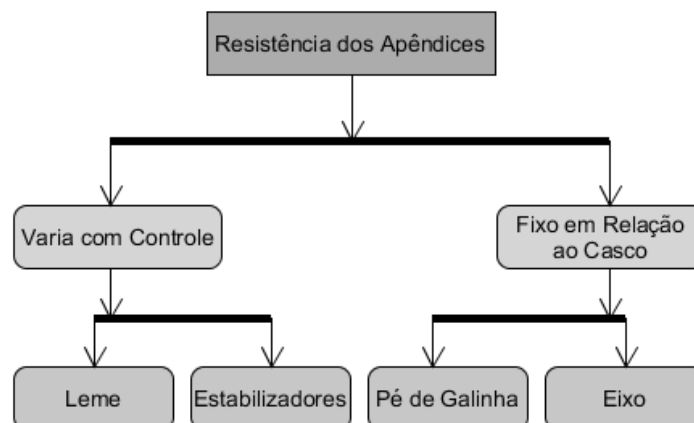
Onde Z é o pontal da embarcação e λ_k é a razão média entre o comprimento molhado e a boca do casco.

2.2.3 Resistência dos apêndices

A estimativa da resistência ao avanço causada pela presença de apêndices externos ao casco pode ser realizada usando o modelo originalmente proposto em Hadler (1966), o qual foi atualizado em Savitsky e Brown (1976), Blount e Fox (1976) e Blount e Bartee (1997).

Nesse modelo, a resistência de apêndices por ser essencialmente dividida em quatro itens: leme, estabilizadores, pé de galinha e eixo. Sendo que, conforme visto na Figura 7, a resistência devido a presença do pé de galinha e do eixo são constantes, enquanto a resistência causada pelo leme e pelos estabilizadores depende da posição em que esses elementos se encontram.

Figura 7 – Tipos de apêndices externos ao casco



Fonte: Autor (2021)

Para facilitar o entendimento da modelagem matemática da resistência ao avanço causada pela presença de apêndices externos ao casco, na Tabela 3 são enumeradas as variáveis associadas as características dos quatro tipos de apêndices enumerados na Figura 7.

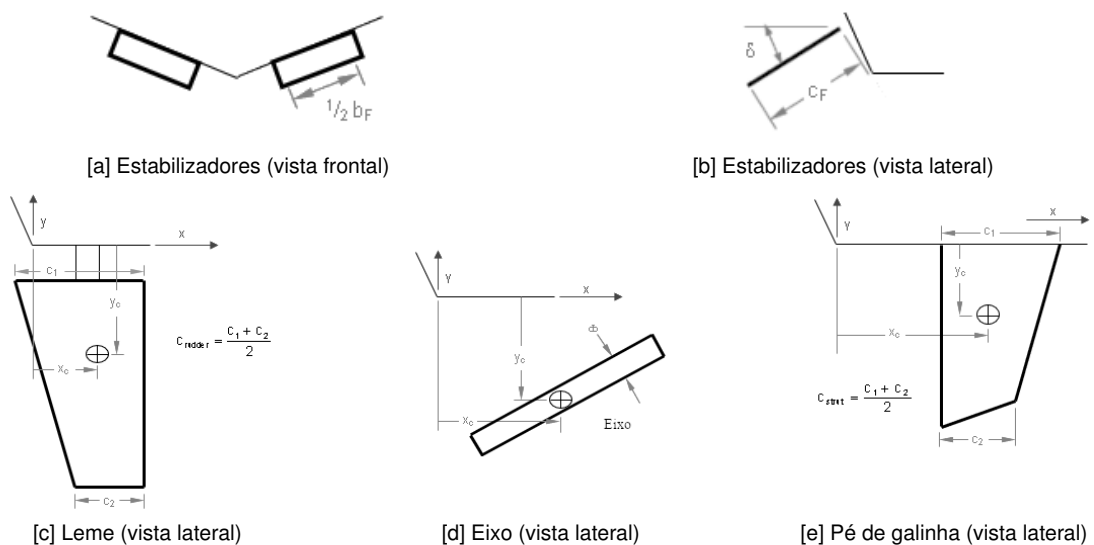
Tabela 3 – Variáveis referentes aos apêndices externos ao casco

Variável	Descrição	Unid.
N_{prop}	Quantidade de propulsores	-
N_{rud}	Quantidade de lemes	-
$TTab_{span}$	Soma das bocas dos estabilizadores dividido pela boca do chine	-
σ	Ângulo do estabilizador em relação ao fundo da embarcação	°
c_{rudder}	Corda da seção do leme	m
t_{rudder}	Espessura da seção do leme	m
A_{rudder}	Área molhada do leme	m ²
Rud_x	Pos. X do centroide da área longitudinal do leme	m
Rud_y	Pos. Y do centroide da área longitudinal do leme	m
d_a	Diâmetro do eixo propulsor	m
l_a	Comprimento do eixo propulsor	m
$Shaft_x$	Pos. X do centroide da área longitudinal do eixo	m
$Shaft_y$	Pos. Y do centroide da área longitudinal do eixo	m
c_{strut}	Corda da seção do pé de galinha	m
t_{strut}	Espessura da seção do pé de galinha	m
A_{strut}	Área molhada do pé de galinha	m ²
$Strut_x$	Pos. X do centroide da área longitudinal do pé de galinha	m
$Strut_y$	Pos. Y do centroide da área longitudinal do pé de galinha	m

Fonte: Autor (2021)

Na imagem 8 são representadas as variáveis associadas aos apêndices do casco, as quais foram enumeradas na Tabela 3.

Figura 8 – Esquema referente as variáveis dos apêndices



Fonte: Tweedie (2011)

Seguindo o modelo proposto por Blount e Fox (1976), a resistência ao avanço causada pela presença dos apêndices R_{ap} pode ser escrita na forma da equação:

$$R_{ap} = R_{rudder} * N_{rudder} + R_{shaft} * N_{prop} + R_{strut} * N_{prop} + R_{tt} \quad (6)$$

Onde R_{rudder} é a resistência devido aos lemes, N_{rudder} é o número de lemes, R_{shaft} é a resistência devido aos eixos propulsores, N_{prop} é o número de eixos propulsores e R_{strut} é a resistência devido aos pés de galinha.

Conforme visto em Hadler (1966), a resistência por eixo pode ser estimada com base na equação:

$$R_{shaft} = 0,5 * \rho * l_a * d_a * V^2 * (1,1 * \sin(\epsilon)^3 + \pi * C f_a) \quad (7)$$

Onde, em virtude da razão geométrica, o coeficiente de arrasto relativo à um eixo propulsor $C f_a$ é determinado como sendo o maior valor entre a Equação 8 e a Equação 9.

$$C f_a = V * d_a / \nu \quad (8)$$

$$C f_a = V * l_a / \nu \quad (9)$$

Onde ν é a viscosidade dinâmica da água, d_a é o diâmetro do eixo, l_a é o comprimento do eixo e V é a velocidade do escoamento no entorno do eixo, a qual pode ser aproximada pela velocidade da embarcação.

Ainda segundo Hadler (1966), a resistência ao avanço devido a presença de um leme pode ser estimada usando a Equação 10, enquanto a resistência ao avanço devido a presença de um pé de galinha pode ser estimada usando a Equação 11.

$$R_{rudder} = C f_r * 0,5 * \rho * V^2 * A_{rud} \quad (10)$$

$$R_{strut} = C f_s * 0,5 * \rho * V^2 * A_{strut} \quad (11)$$

Onde A_{rud} é a área molhada do leme e A_{strut} é a área molhada do pé de galinha. Já os coeficientes de arrasto $C f_r$ e $C f_s$ dependem do número de Reynolds, tal como visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos empíricos para os coeficientes $C f_r$ e $C f_s$

Condição	Equação
$Re < 50000$	$\frac{(0,466 * Re^{-0,259}) - (1,46 * Re^{-0,507})}{0,2} * (t/c) + (1,46 * Re^{-0,507})$
$50000 \leq Re < 500000$	$\frac{(181 * Re^{-0,81}) - (0,172 * Re^{-0,31})}{0,2} * (t/c) + (0,172 * Re^{-0,31})$
$500000 \leq Re < 10000000$	$0,00293 * (1 + 2 * (t/c) + 60 * (t/c)^4)$
$Re > 10000000$	$0,03 * Re^{-0,143} * (1 + 2 * (t/c) + 60 * (t/c)^4)$

Fonte: Modelos empíricos propostos por Lewis (1988a)

É importante observar que as equações mostradas na Tabela 4 podem ser usadas tanto para a análise de um leme quanto para a análise de um pé de galinha. Nesse caso, t se refere a espessura da seção e c se refere a corda da seção do elemento analisado. Além disso, a velocidade usada no cálculo do número de Reynolds pode ser aproximada pela velocidade da embarcação.

Por fim, conforme visto em Savitsky e Brown (1976), a resistência gerada pelos estabilizadores pode ser estimada com base na Equação 12, onde c_{tab} é a corda dos estabilizadores, ρ é a densidade da água, V_m é a velocidade média da água no fundo no casco, Δ é o deslocamento da embarcação, δ é o ângulo de deflexão dos estabilizadores e σ é a razão entre a corda dos estabilizadores e a boca da embarcação.

$$R_{tt} = C_{f_F} * 0,5 * \rho * V_m^2 * \sigma * b * c_{tab} * \cos(\tau + \delta) + 0,0052 * \Delta * (\tau + \delta) \quad (12)$$

$$C_{f_F} = \frac{0,455}{(\log Re_f)^{2,58}} \quad (13)$$

Já a velocidade média no fundo do casco pode ser estimada usando a Equação 14, onde V é a velocidade da embarcação, τ é o trim da embarcação na velocidade analisada, β o ângulo de *deadrise* do casco no espelho de popa, λ é a razão entre o comprimento molhado e a boca molhada da embarcação e $C_{L\beta}$ é o coeficiente de sustentação de uma placa com *deadrise* (Tabela 2).

$$V_m = V * \left(1 - \frac{C_{L\beta}}{\lambda * \cos(\tau) * \cos(\beta)}\right) \quad (14)$$

É importante destacar que o trabalho de Blount e Bartee (1997) propõe melhorias na estimativa da resistência ao avanço causada pela presença de estabilizadores, além de incorporar efeitos associados a presença de propulsores. No entanto, essas implementações não foram realizadas e permanecem como sugestões para trabalhos futuros.

2.2.4 Resistência gerada pelo *spray*

Seguindo o modelo proposto em Savitsky, DeLorme e Datla (2007), a resistência gerada pelo *spray* pode ser estimada usando a Equação 15.

$$R_{ws} = 0,5 * \rho * V^2 * \frac{b^2 * \cos(\Theta) * \cos(\tau)}{4 * \sin(\Theta) * \cos(\beta)} * C_{f_{ws}} \quad (15)$$

Onde θ corresponde ao ângulo entre a quilha e a aresta da área de *spray* (Figura 6). Já o coeficiente de atrito $C_{f_{ws}}$ depende do número de Reynolds associado ao *spray* $Re_{N_{ws}}$, podendo ser calculado conforme a formulação mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Modelos empíricos para o coeficiente Cf_{ws}

Condição	Equação
$RN_{ws} \leq 1,5 * 10^6$	$Cf_{ws} = \frac{1,328}{\sqrt{RN_{ws}}}$
$RN_{ws} > 1,5 * 10^6$	$Cf_{ws} = \frac{0,074}{\sqrt[5]{RN_{ws}}} - \frac{4800}{RN_{ws}}$

Fonte: Autor (2021)

Por fim, o número de Reynolds associado ao *spray* (RN_{ws}) pode ser calculado usando a Equação 16, onde L_{ws} corresponde ao comprimento da área de *spray* (Figura 6) e a velocidade do *spray* (V) pode ser aproximada pela velocidade da embarcação.

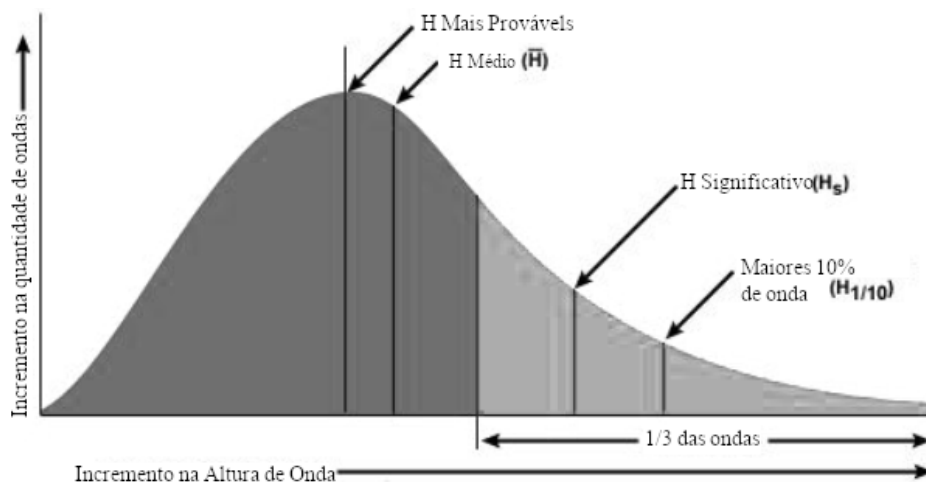
$$RN_{ws} = \frac{V * L_{ws}}{\nu} \quad (16)$$

2.2.5 Resistência adicional causada pelas ondas do mar

Embora as análises realizadas neste trabalho considerem a navegação em mar calmo (ausência de ondas), a planilha de Tweedie (2011) possui a variável $H_{\frac{1}{3}}$, a qual é usada na análise de *seakeeping* baseada no método proposto por Savitsky e Brown (1976).

O termo $H_{\frac{1}{3}}$ tem origem na análise estatística das ondas do mar e representa a média das alturas das 30% maiores ondas do histórico de uma dada região (Figura 9).

Figura 9 – Distribuição estatística da altura das ondas



Fonte: NOAA (2017)

2.3 Estabilidade

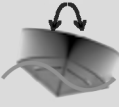
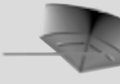







Dada a alta velocidade das embarcações planantes, problemas associados a instabilidade do casco quase sempre resultam em acidentes graves, podendo, inclusive, resultar em vítimas fatais.

Em geral, a verificação do potencial de instabilidade de uma embarcação consiste na análise das alturas metacêntricas longitudinal (GM_L) e transversal (GM_T) associadas a cada uma das condições de carga previstas no projeto. Esses valores são então confrontados com os limites estabelecidos por normas técnicas (LEWIS, 1988b).

No entanto, segundo Lewandowski (2004), a natureza dinâmica das forças atuantes em um casco planante pode induzir comportamentos instáveis mesmo quando a embarcação possui estabilidade hidrostática comprovada.

Conforme descrito por Faison (2014), a instabilidade dinâmica pode ser do tipo não oscilatória, a qual ocorre quando carregamentos dinâmicos não simétricos induzem o adernamento ou a inclinação longitudinal da lancha. No entanto, são as instabilidades oscilatórias as mais perigosas, pois além de causarem desconforto durante a navegação, podem causar danos estruturais e acidentes a bordo (Figura 10).

Figura 10 – Tipos de instabilidades associadas à um casco planante

	Hidrostática		Hidrodinâmica	
	Deslocante	Semi-Deslocante		Planante
	Incremento no número de Froude →			
Transversal	Hidrostática Transversal $GM_T \leq 0$	Perda de GMT Devido Efeito de Onda 	Instabilidade de Balanço Adernamento Diferente de Zero Não oscilatório 	"Chine Walking"* Oscilação Dinâmica de Balanço 
Longitudinal	Hidrostática Longitudinal $GM_L \leq 0$	Perda de GML Devido Efeito Onda 	Instabilidade de Caimento Caída de Proa Não Oscilatório 	"Porpoising" Oscilação Dinâmica de Caturro e Arfagem 
Combinadas	Hidrostáticas Combinadas $GM_T \leq 0$ $GM_L \leq 0$	Efeito de Onda Combinado Crista da Onda 	"Broach"* Emborcamento com Rolamento Lateral Não Oscilatório 	"Corkscrew"* Oscilação Dinâmica de Caturro, Arfagem e Balanço 

*Google Translator

Fonte: Traduzido de Faison (2014)

Embora a instabilidade possa ocorrer na ausência de ondas, a interação do casco com as ondas pode induzir a perda de estabilidade em virtude da variação momentânea da geometria submersa.

2.3.1 Instabilidade longitudinal

A instabilidade longitudinal de um casco planante, conhecida como *porpoising*, acontece quando a embarcação não consegue manter o equilíbrio longitudinal durante o regime de planeio, pois o centro de pressão sofre deslocamentos constantes para

posições a vante e a ré do centro de gravidade da embarcação.

A constante diferença entre a posição do LCB e do LCG causa um movimento estilo “gangorra”, o qual, além de tornar a navegação desconfortável, pode ocasionar acidentes, lesões e até mesmo danos estruturais. Embora possa ocorrer em mar calmo, o *porpoising* pode ser agravado por ondas do mar.

Seguindo a modelagem das forças dinâmicas proposta por Savitsky (1964), Lewandowski e Celano (1998) calculam que a embarcação irá iniciar o movimento de *porpoising* se o ângulo de trim ultrapassar o valor definido pela Equação 17.

$$\tau_{lew} = -1,87 + 12,54 * k_{lew} + 80,87 * k_{lew}^2 + 0,193 * \beta - 0,0017 * \beta^2 - 0,3125 * \beta * k_{lew} \quad (17)$$

$$k_{lew} = \sqrt{\left(\frac{C_{Lb}}{2}\right)}$$

Para mitigar a limitação da modelagem realizada por Lewandowski e Celano (1998), a qual considera cascos prismáticos com um valor de *deadrise* constante de proa a popa, Angeli (1973) propõe que o ângulo crítico a partir do qual a embarcação irá iniciar o movimento de *porpoising* pode ser calculado usando a Equação 18. Nesse caso, β refere-se ao *deadrise* na popa e β_x refere-se ao *deadrise* à meia nau.

$$\tau_{ang} = (angK / (Fn_v^2 * \frac{L_{cg}}{\sqrt[3]{\frac{\Delta}{\rho * g}}} * \frac{b}{\sqrt[3]{\frac{\Delta}{\rho * g}}} * \frac{C_{Lb}}{C_{Lo}}))^{0,75} \quad (18)$$

$$angK = (106 + 85 * k_{ang}) * (1 + 0,2 * \frac{(\beta_x - \beta)}{\beta_x}) * (\frac{L_{cg}}{b})^{0,25} \quad (19)$$

Onde, segundo Tweedie (2011), k_{ang} vale 1.

2.3.2 Instabilidade transversal

De acordo com Lewandowski (2004), a complexidade física das ações e reações de uma embarcação em planeio torna praticamente impossível desacoplar a análise dos movimentos nos diferentes graus de liberdade de um casco planante.

Tradicionalmente, os métodos utilizados na análise da estabilidade de embarcações são baseados em extrapolações de casos hidrostáticos, causando incertezas quando aplicados à cascos planantes.

Assim, Lewandowski (1996a e 1996b) propõem um método para avaliar a estabilidade transversal de cascos planantes de chine definido, o qual inclui os efeitos dinâmicos e pode ser usado ainda nas fases iniciais do projeto. Esse método é baseado nas equações de movimento de rolagem de embarcações em conjunto com as equações propostas por Savitsky (1964) para estimar as forças dinâmicas atuantes em um casco planante.

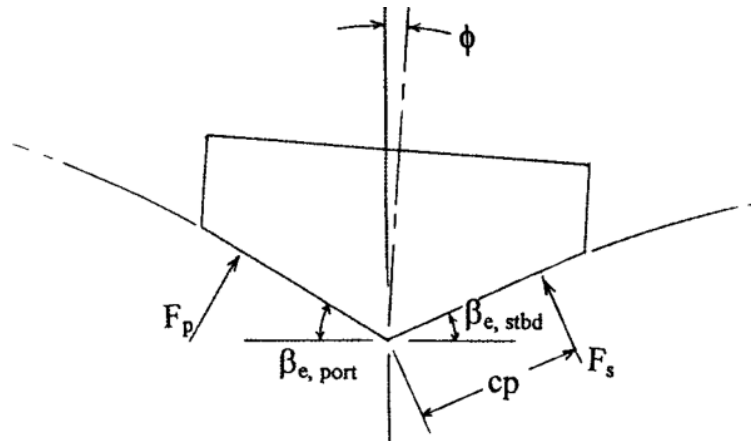
O equacionamento desse método é extenso, sendo que apenas as equações principais são apresentadas neste texto. O leitor interessado pode consultar os trabalhos originais para se aprofundar na modelagem desenvolvida.

O critério para identificar a ocorrência da instabilidade transversal de uma lancha é mostrado na Equação 20, onde a_{1s} é o momento restaurador hidrostático, a_{1d} é o momento restaurador dinâmico e Λ é a somatória dos efeitos decorrentes da presença de lemes e aletas. Já o sinal negativo serve para atender as referências e convenções definidas pela *International Towing Tank Conference* (ITTC).

$$-(a_{1s} + a_{1d} + \sum_i \Lambda_i * \sin\tau * \cos\phi_{ri}) > 0 \quad (20)$$

Ainda na Equação 20, ϕ é o grau de adernamento, o qual afeta o *deadrise* efetivo do casco, modificando as forças à bombordo $F_{d,port}$ e à boreste $F_{d,stb}$. Pois, conforme a embarcação aderna, essas forças passam a agir de forma assimétrica (Figura 11).

Figura 11 – Forças dinâmicas em um casco planante adernado ϕ graus



Fonte: Lewandowski (1996a)

Para a estimativa da componente hidrostática do momento restaurador a_{1s} Lewandowski (1996a) propõe a Equação 21, cujo momento de inércia do plano de linha d'água I_T pode ser aproximado pela Equação 22.

$$a_{1s} = -\rho * g * I_T + BG * \Delta_s \quad (21)$$

$$I_T = \int y^2 dA_{wp} = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} y^2 * \ell(y) dy \approx \frac{b^3}{48} * (L_k + 3L_c) \quad (22)$$

Ainda na Equação 21, BG é a distância entre o centro vertical de gravidade e o centro de flutuação e Δ_s é a “sustentação estática”, a qual corresponde a flutuação da porção submersa do casco durante o regime de planeio.

A substituição da Equação 22 na Equação 21 resulta em:

$$a_{1s} \approx -\rho * g * \frac{b^3}{48} * (L_k + 3L_c) + BG * \Delta_s \quad (23)$$

Já para a componente dinâmica, Lewandowski (1996a) propõe a Equação 24.

$$a_{1d} = \left[\frac{d}{d\phi} K_d \right]_{\phi=0} = \frac{d}{d\phi} (F_{d,port} - F_{d,stbd})_{\phi=0} * \left(0,8 * \frac{\pi b}{8 \cos(\beta)} - KG \sin(\beta) \right) \quad (24)$$

Onde $F_{d,port}$ e $F_{d,stbd}$ são as forças normais à cada um dos bordos da embarcação, as quais variam com o ângulo de adernamento ϕ .

Por fim, segundo Lewandowski (1996a), o momento causado pela presença de lemes e aletas pode ser estimado por:

$$\Lambda_i = \frac{dF_r}{d\alpha_r} (y_r \sin(\phi_r) + (z_r \cos\tau - x_r \sin\tau) \cos\phi_r) \quad (25)$$

Onde i refere-se à cada um dos lemes e aletas existentes, x_r , y_r e z_r são as coordenadas do leme em relação ao CG da embarcação, ϕ_r é o ângulo em relação ao plano horizontal, F_r é a força exercida no leme e α_r é o ângulo de ataque do leme.

Usando a modelagem apresentada, é possível construir a matriz de critérios de estabilidades, onde cada linha representa um grau de adernamento e cada coluna uma velocidade analisada. Nessa matriz, um valor negativo indica a ocorrência da instabilidade transversal.

Conforme observado em Lewandowski (1996a), é possível identificar se a instabilidade desenvolvida pela embarcação será do tipo oscilatória ou não. Entretanto, essa análise foge ao escopo deste trabalho, que foca apenas em indicar a ocorrência da instabilidade transversal, sem especificar o tipo de instabilidade desenvolvida.

2.4 Verificação e validação

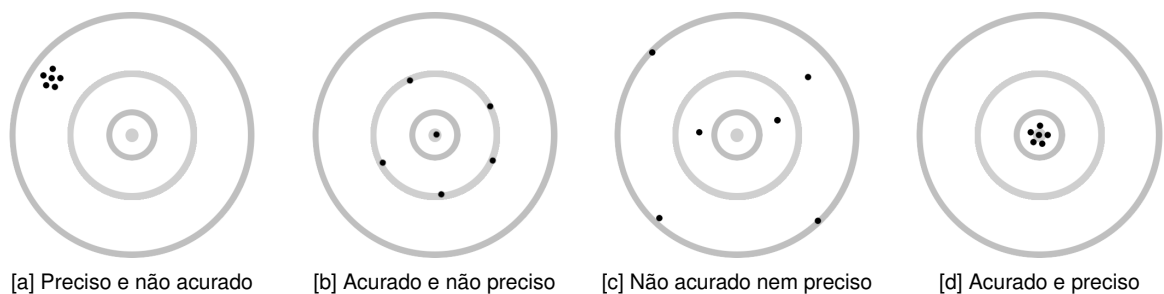
O desenvolvimento de ferramentas computacionais que empregam métodos complexos de análise numéricas pode apresentar erros que vão desde problemas de programação até imprecisões numéricas associadas a intervalos de discretização e parâmetros de convergência.

Assim, para que a ferramenta possa ser usada em projetos de engenharia, é necessário que seja realizado um processo de verificação e validação, no qual os resultados são analisados e confrontados com aqueles já consolidados na literatura (GHEZZI; JAZAYERI; MANDRIOLI, 2003).

Roache (1998) sintetiza essa discussão dizendo que a verificação consiste em se resolver as “equações corretamente”, enquanto a validação consiste em se resolver as “equações corretas”.

Outra questão a ser analisada diz respeito a precisão e a acurácia da ferramenta. Fazendo uma analogia com o desempenho de um atirador esportivo, considera-se que um atirador é preciso quando esse consegue acertar uma mesma região de maneira consistente, independente de qual seja a região alvejada. Por outro lado, considera-se que ele seja acurado, quando consegue acertar no alvo, mesmo que de maneira dispersa. A situação ideal acontece quando ambas as definições se alinham, tendo acurácia e precisão para atingir o centro do alvo de maneira consistente (Figura 12).

Figura 12 – Precisão versus acurácia de uma análise



Fonte: Autor (2021)

No caso de ferramentas computacionais, é possível afirmar que uma ferramenta é precisa quando obtém resultados consistente em diferentes análises, e é acurada, quando os resultados obtidos representam com precisão o fenômeno modelado.

3 METODOLOGIA

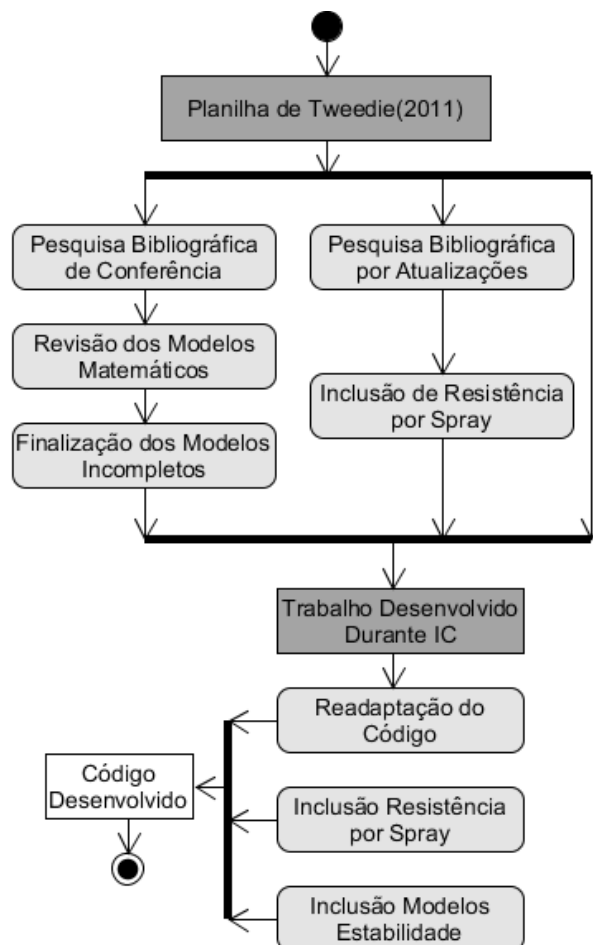
Conforme apresentado, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional destinada ao projeto de cascos planantes, tendo como foco a resistência ao avanço e a estabilidade dinâmica da embarcação.

Nesse contexto, este capítulo apresenta a metodologia utilizada, o qual foi dividido em duas partes. Na Seção 3.1 descreve-se a metodologia aplicada no desenvolvimento da ferramenta proposta, enquanto na Seção 3.2 descreve-se a metodologia aplicada na verificação da ferramenta desenvolvida.

3.1 Metodologia usada no desenvolvimento

Nesta seção é discutida a metodologia utilizada para realizar o desenvolvimento proposto, a qual é sintetizada na Figura 13.

Figura 13 – Metodologia empregada no desenvolvimento



Fonte: Autor (2021)

Inicialmente, é importante destacar que este trabalho dá seguimento a um período de Iniciação Científica do autor (ALLEBRANDT; SALLES; TANCREDI, 2017) no qual ele realizou a implementação do modelo clássico de Savitsky (1964), confrontando o código desenvolvido com aquele observado na planilha de Tweedie (2011).

Embora não se tenha registro de um procedimento rigoroso de validação do trabalho de Tweedie (2011), ele vem sendo usado e discutido em diversos fóruns sobre o assunto há mais de uma década. Portanto, admite-se que ele reproduza o modelo de Savitsky (1964), bem como algumas das melhorias discutidas no capítulo anterior.

Assim, a primeira fase do desenvolvimento consistiu na revisão bibliográfica, a qual se dedicou a encontrar as referências usadas por Tweedie (2011), além de trabalhos recentes sobre o assunto. A busca foi realizada no portal de periódicos CAPES além do site *www.google.com*, e utilizou as palavras chaves: Savitsky, Blount, Lewandowski, *highspeed boat*, *drag* e *porpoising*.

A seguir os elementos gráficos associados ao código desenvolvido pelo autor durante sua Iniciação Científica foram limpos, permitindo que o desenvolvimento prosseguisse dentro dos objetivos propostos para este trabalho.

O desenvolvimento continuou a ser feito usando a linguagem Delphi/Pascal, por meio da ferramenta Delphi Community, a qual é gratuita e não oferece limitações ao desenvolvimento proposto.

O uso desta linguagem visa assegurar a compatibilidade do código desenvolvido com o ambiente de otimização Synapse, apresentado em Tancredi (2008). Mas, uma vez que o código desenvolvido não possui elementos gráficos, esse pode ser facilmente convertido para diversas outras linguagens.

Por fim, conforme mostrado na Figura 13, a ferramenta desenvolvida, além de ter sido revisada, recebeu três novas contribuições: o módulo para a estimativa da resistência ao avanço causada pelo efeito *spray*, o módulo para avaliação da ocorrência da instabilidade longitudinal e, por fim, o módulo destinado a verificação da ocorrência da instabilidade transversal.

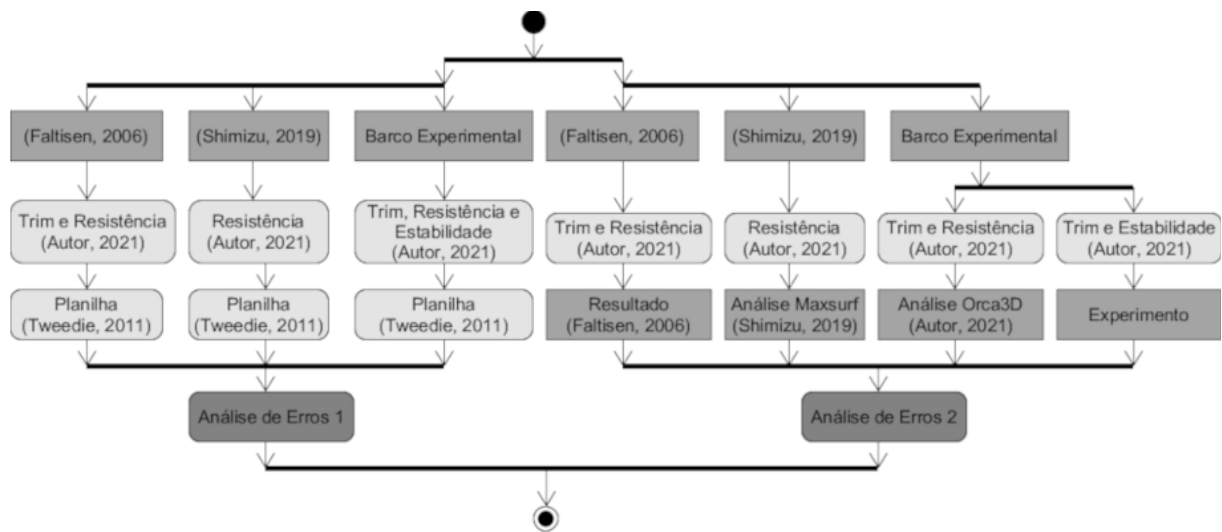
3.2 Metodologia usada na verificação

Finalizada a fase do desenvolvimento, tem-se início o processo de verificação da ferramenta desenvolvida, cuja metodologia foi dividida em três eixos (Figura 14).

Conforme já discutido, a principal referência para a verificação do código desenvolvido foi a planilha desenvolvida por Tweedie (2011), a qual foi analisada detalhadamente por Marin (2015) e utilizada por Santos e Tancredi (2014).

No total foram analisadas seis embarcações, divididas em dois grupos de análise. No primeiro, os resultados obtidos com o código desenvolvido são comparados com aqueles obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011).

Figura 14 – Metodologia empregada na verificação



Fonte: Autor (2021)

Inicialmente, o ângulo de trim de equilíbrio e a resistência ao avanço da primeira geometria foram comparados com aqueles calculados por Faltinsen (2006).

A seguir, os resultados de resistência ao avanço das geometrias estudadas por Shimizu (2019) foram comparados com os resultados obtidos pelo autor usando o programa MaxSurf.

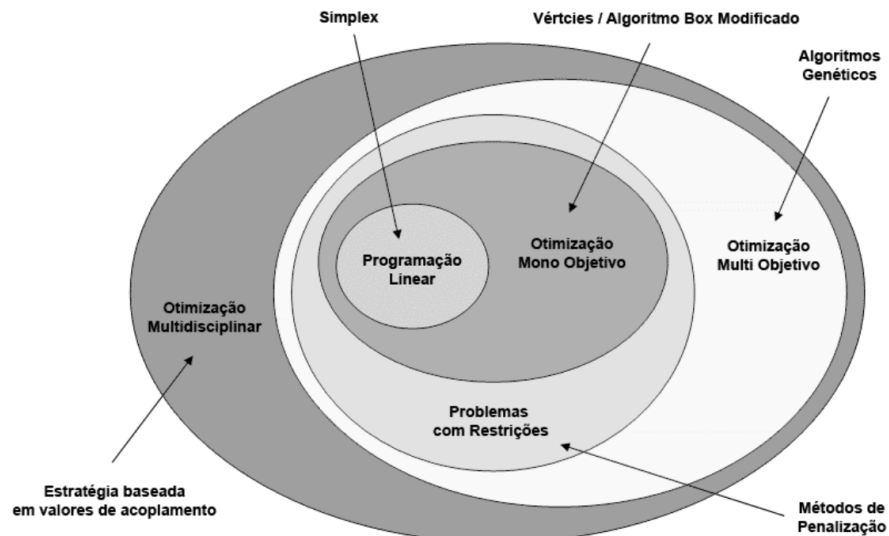
Por fim, a geometria de uma embarcação fabricada por um estaleiro catarinense é analisada. Os resultados de ângulo de trim e de estabilidade transversal são comparados com aqueles obtidos na prova de mar realizada. A seguir, a geometria CAD da embarcação ensaiada é utilizada para a análise do ângulo de trim de equilíbrio e da resistência ao avanço calculados utilizando o programa Orca3D. A utilização do mesmo modelo CAD empregado na fabricação do molde da lancha assegura um erro máximo de 1 mm entre o modelo 3D e a embarcação real.

Uma vez realizadas as análises, os erros observados são tabelados buscando identificar se o código desenvolvido tem aderência com aquele visto em Tweedie (2011), além daqueles presentes nos programas MaxSurf e Orca3D.

3.3 Inclusão no ambiente Synapse

O Sistema de Otimização para Projetos de Engenharia utilizando Superfícies de Resposta Neurais (Synapse), vem sendo desenvolvido desde 2010 através da colaboração de diversos trabalhos acadêmicos. Ele foi e segue sendo construído usando a linguagem de programação orientada a objetos Delphi e inclui implementações de vários algoritmos de otimização (Figura 15), os quais permitem a realização dos mais diversos tipos de projetos de engenharia (TANCREDI, 2008).

Figura 15 – Abordagens implementadas no ambiente Synapse

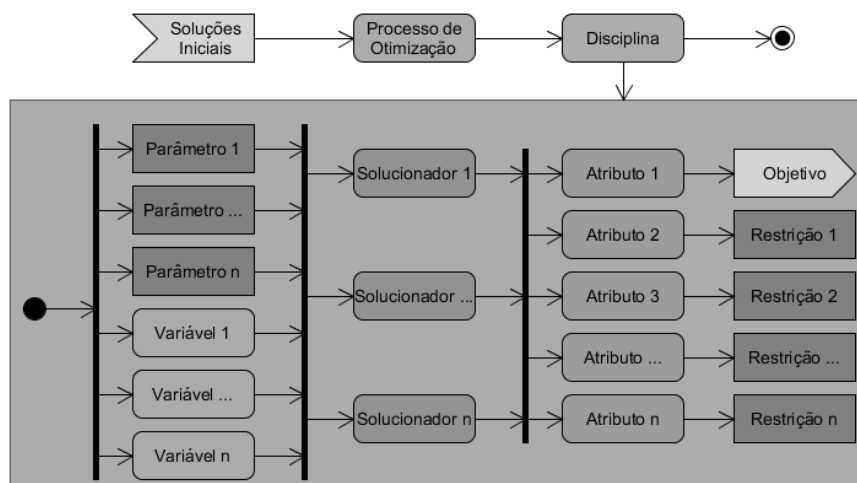


Fonte: Tancredi (2008)

O funcionamento do ambiente baseia-se na modelagem dos problemas usando diagramas de blocos, os quais representam os diversos elementos do modelo de otimização a ser resolvido.

Na primeira corrente de blocos são definidas as variáveis de projeto, os parâmetros constantes, as ferramentas de análise, os atributos de desempenho, as funções objetivos e as restrições do projeto. Já na segunda corrente, são definidas as soluções iniciais, o algoritmo de otimização e o tipo de processo realizado (Figura 16).

Figura 16 – Diagrama de blocos de um problema de otimização



Fonte: Autor (2021)

O detalhamento dos diversos elementos que compõem a modelagem do problema de otimização foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser visto em Synapse (2021).

É importante mencionar que o Synapse possui a capacidade de incluir vários tipos de solucionadores na modelagem de problemas complexos de engenharia, incluindo, mas não limitado a:

- Planilhas de cálculo;
- Programas matemáticos (Matlab/Octave);
- Programas de simulação de elementos finitos;
- Equações;
- Solucionadores implementados no próprio ambiente.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, o qual objetiva ser um solucionador pronto para ser utilizado por engenheiros e pesquisadores no projeto de embarcações planantes, sem que seja necessário que esses realizem as suas próprias implementações.

3.4 Ensaio em escala real

A tomada de dados da prova de mar foi feita com um equipamento de medida de inclinações fixado no convés, junto ao CG da lancha. Já a velocidade foi registrada a partir do GPS da embarcação localizado no posto de comando.

Foram realizadas dez tomadas de dados, sendo cinco com dois passageiros a bordo e cinco com a capacidade máxima da lancha, ou seja, dez passageiros. Em ambos os casos, o peso foi distribuído de maneira a assegurar o adernamento zero enquanto a lancha encontrava-se fundeada.

As tomadas de dados foram realizadas em sequência, portanto existem variações da quantidade de combustível a bordo, as quais podem influenciar a acurácia dos dados registrados em relação a distribuição de pesos estabelecida. Dessa forma, para efeitos de comparação, utilizou-se sempre a média das cinco corridas realizadas para cada uma das condições de carga analisadas.

Infelizmente foram realizadas poucas medições, pois tanto a leitura quanto o registro dos dados foram realizados manualmente. Além disso, a tomada de dados transversais foi comprometida, pois o equipamento disponível não foi capaz de medir o ângulo de trim e o ângulo de adernamento simultaneamente.

3.5 Medida de erro utilizada

Seguindo o procedimento utilizado por Shimizu (2019), a principal medida de erro utilizada na verificação do código desenvolvido foi a análise do erro relativo (Equação 26), com eventuais usos do erro absoluto (Equação 27).

$$Error_r = \left| \frac{R_p - R_c}{R_p} \right| \quad (26)$$

$$Error_{abs} = |R_p - R_c| \quad (27)$$

Sobre a precisão esperada para os resultados, Shimizu (2019) escreve:

Os valores são considerados satisfatórios para um erro relativo médio inferior a 10%, o qual contempla as incertezas inerentes aos métodos empíricos.

É importante observar que o limite de 10% foi arbitrado como limite razoável que, geralmente, não afetará a escolha do sistema propulsivo utilizado, pois, em tese, não deve alterar a seleção do propulsor e, principalmente, a seleção do motor. (SHIMIZU, 2019, p. 41)

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento realizado, o qual pode ser usado de forma independente, integrado ao ambiente Synapse ou integrado à ferramentas CAD/CAM.

4.1 Parâmetros de entrada

Os módulos desenvolvidos utilizam uma estrutura de entrada de dados baseada em arquivo texto, na qual cada linha corresponde ao valor de um parâmetro da análise. Essa abordagem agilizou o desenvolvimento, dispensando a implementação de interfaces, além de facilitar a criação de um banco de dados padronizado para os testes dos algoritmos.

A utilização de arquivos texto permite ainda que o código desenvolvido possa ser transcrito em diferentes linguagens, ou ainda, ser integrado a qualquer programa capaz de manipular arquivos de texto.

Vale ressaltar que o código utiliza o Sistema Internacional (SI) para manipular tanto os dados de entrada quanto os resultados. Porém, neste texto, para facilitar a comparação com outros estudos já publicados, a análise dos resultados foi feita seguindo o Sistema Imperial de Medidas.

4.2 Melhorias realizadas no código desenvolvido

Foi constatado que o método proposto por Lewandowski (1996a) para a avaliação da estabilidade transversal de cascos planantes não havia sido inteiramente implementado por Tweedie (2011).

A revisão bibliográfica revelou também que Tweedie (2011) não realizou a implementação da parcela da resistência ao avanço decorrente do *spray* oriundo do deslocamento do casco em alta velocidade, cujo efeito foi modelado por Savitsky, DeLorme e Datla (2007).

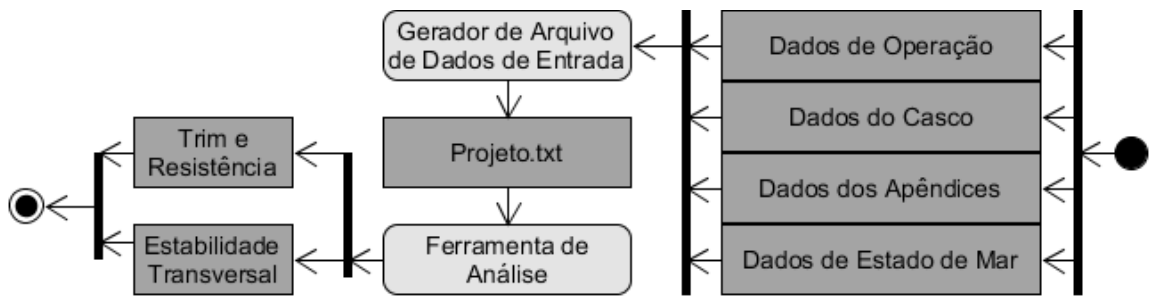
Assim, utilizando os trabalhos originais, foi possível realizar a implementação completa de ambos os métodos.

4.3 Funcionamento do programa

Conforme discutido anteriormente, um dos objetivos propostos é que o código desenvolvido seja facilmente portátil para outras linguagens, além de poder ser facilmente integrado a outras ferramentas de projeto de engenharia.

Assim, a importação dos dados de entrada ocorre de maneira simples e direta, sendo realizado por um laço que lê o arquivo da primeira à última linha. Dessa forma o posicionamento dos dados é importante. Por essa razão foi criado também um programa para auxiliar a montagem do arquivo texto, o qual ordena os dados na sequência utilizada pela ferramenta de análise (Figura 17).

Figura 17 – Fluxograma de uso da ferramenta desenvolvida



Fonte: Autor (2021)

Conforme pode ser visto na Figura 17, os dados de entrada podem ser divididos em quatro categoria:

- Dados de operação;
- Dados do casco;
- Dados dos apêndices;
- Dados referente ao estado de mar.

As variáveis referentes as características do casco, da casaria e dos apêndices já foram amplamente discutidas no Capítulo 2. Já os dados de operação referem-se a faixa de velocidades utilizada na análise, a qual é calculada usando o passo definido pela Equação 28.

$$Passo = \frac{Vel_{max} - Vel_{min}}{N} \quad (28)$$

Onde Vel_{max} representa a velocidade final, Vel_{min} a velocidade inicial e N o número de velocidades a serem analisadas.

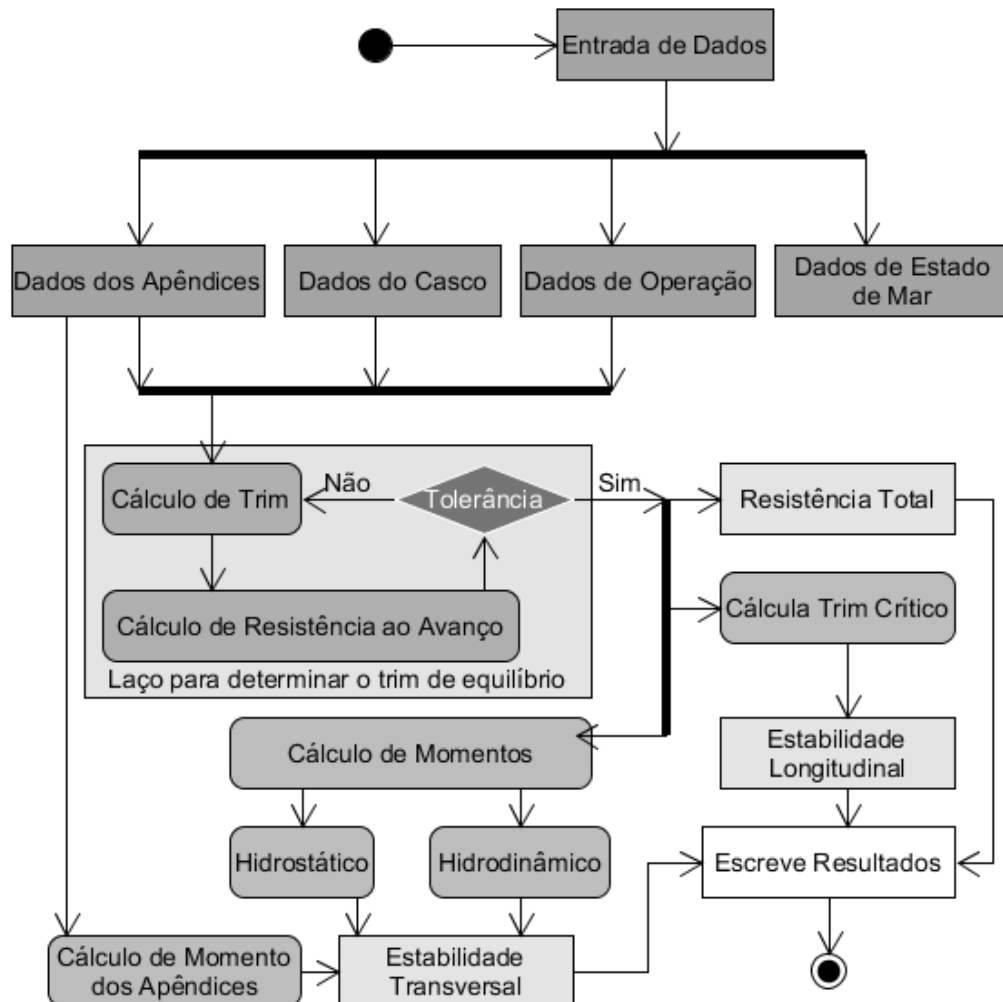
Dessa forma, as velocidades analisadas são igualmente espaçadas, com a velocidade mínima sendo a inicial e a velocidade máxima a final.

Por fim, apesar de o desenvolvimento não ter incluído as análises de *seakeeping*, a variável $H_{\frac{1}{3}}$ já foi registrada e o desenvolvimento está preparado para receber essas análises em um trabalho posterior.

Para sintetizar o desenvolvimento realizado, na Figura 18 é apresentado um fluxograma geral de funcionamento da ferramenta desenvolvida, destacando o processo

iterativo necessário para determinar o trim de equilíbrio associado a cada velocidade analisada. Para facilitar esse processo é utilizado o método da bisseção de Newton, o qual é aplicado com uma tolerância de 1 milionésimo de unidade.

Figura 18 – Fluxograma referente ao processo de análise



Fonte: Autor (2021)

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises realizadas, as quais foram divididas em três categorias. A primeira categoria trata dos resultados referentes a embarcação vista em Faltinsen (2006). A segunda, trata dos cascos analisados por Shimizu (2019). Por fim, na terceira, são avaliados os resultados obtidos em prova de mar de uma embarcação real, a qual teve suas características omitidas para respeitar o sigilo da propriedade intelectual.

5.1 Embarcações analisadas

Para padronizar a tabulação e facilitar a interpretação dos resultados, foi adotado um padrão de cores nos gráficos deste trabalho, sendo que cada embarcação avaliada recebeu uma identificação e um padrão de cor (Tabela 6). As características das seis embarcações analisadas podem ser vistas no Apêndice I.

Tabela 6 – Embarcações analisadas

Embarcação	Nomenclatura	Cor
Faltinsen (2006)	Casco 01	
Shimizu (2019) (BG60)	Casco 02	
Shimizu (2019) (Aquarama)	Casco 03	
Shimizu (2019) (Higgins Hellcat)	Casco 04	
Shimizu (2019) (Cobra)	Casco 05	
Confidencial	Experimental	

Fonte: Autor (2021)

5.2 Embarcação de referência

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a análise da embarcação descrita em Faltinsen (2006). Inicialmente os resultados de trim (Figura 19) e de resistência ao avanço (Figura 20) obtidos com a ferramenta desenvolvida são confrontados com aqueles obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011).

Analisando os resultados (Apêndice A), observa-se que as variações obtidas entre as ferramentas ficaram abaixo de 0,1% para todo o espectro de velocidades analisado. Essas diferenças podem ser creditadas à discretização do método numérico usado na determinação do trim de equilíbrio.

Figura 19 – Casco 01: Análise do trim de equilíbrio

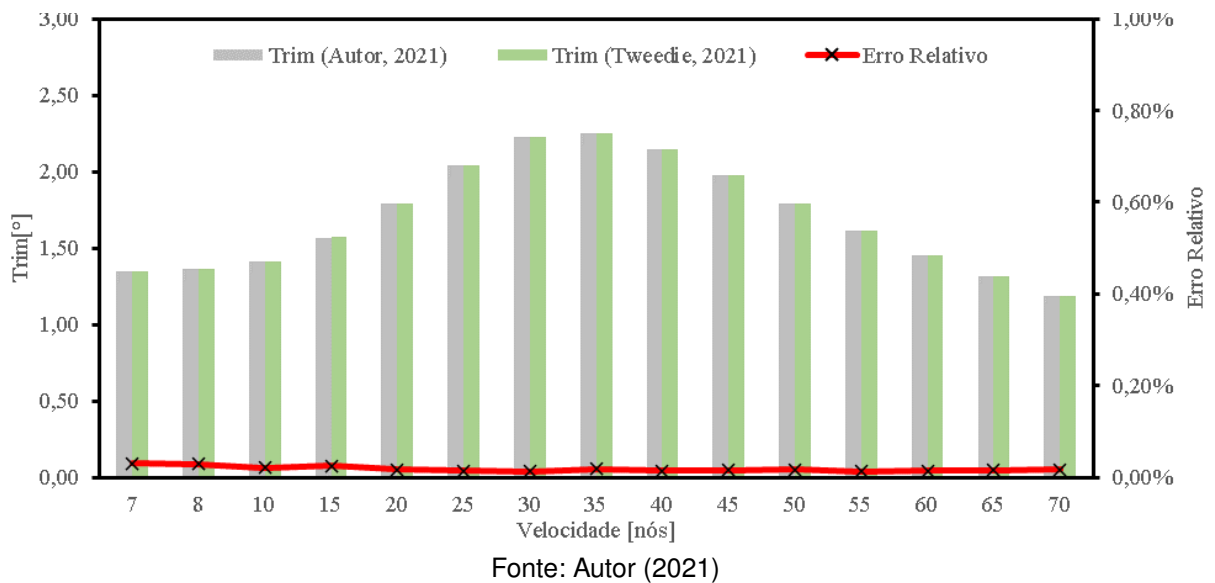
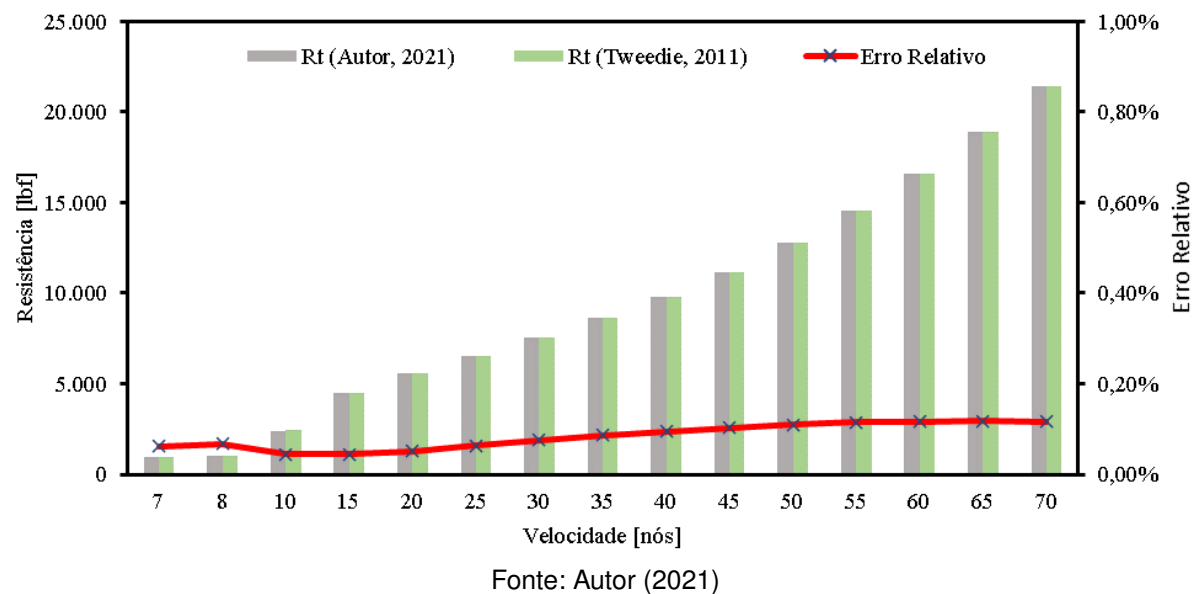


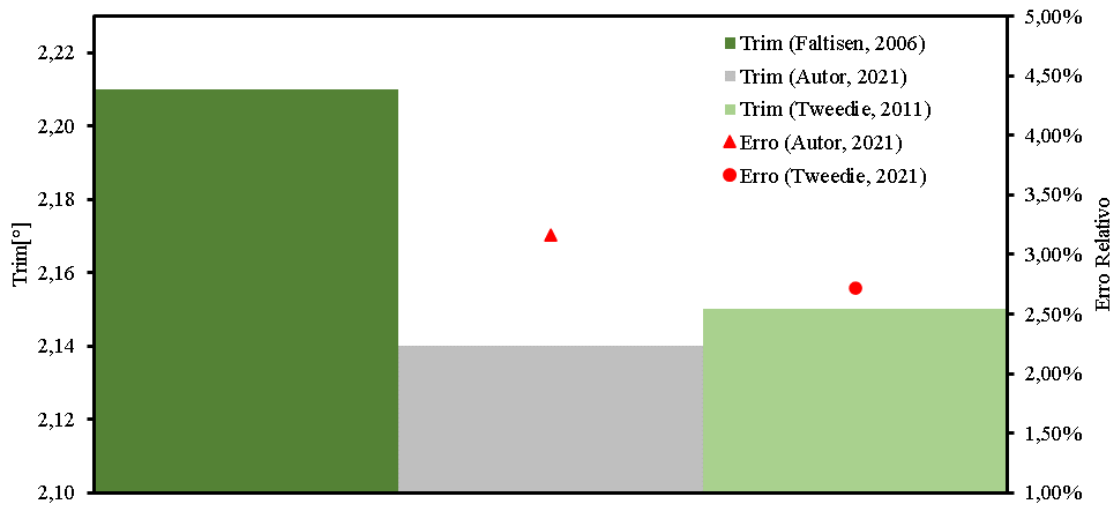
Figura 20 – Casco 01: Análise de resistência ao avanço



No entanto, ao se comparar o resultado obtido para a velocidade de 40 nós com aquele obtido por Faltinsen (2006), a variação se torna bem maior, chegando à 10% (Figura 21 e Figura 22).

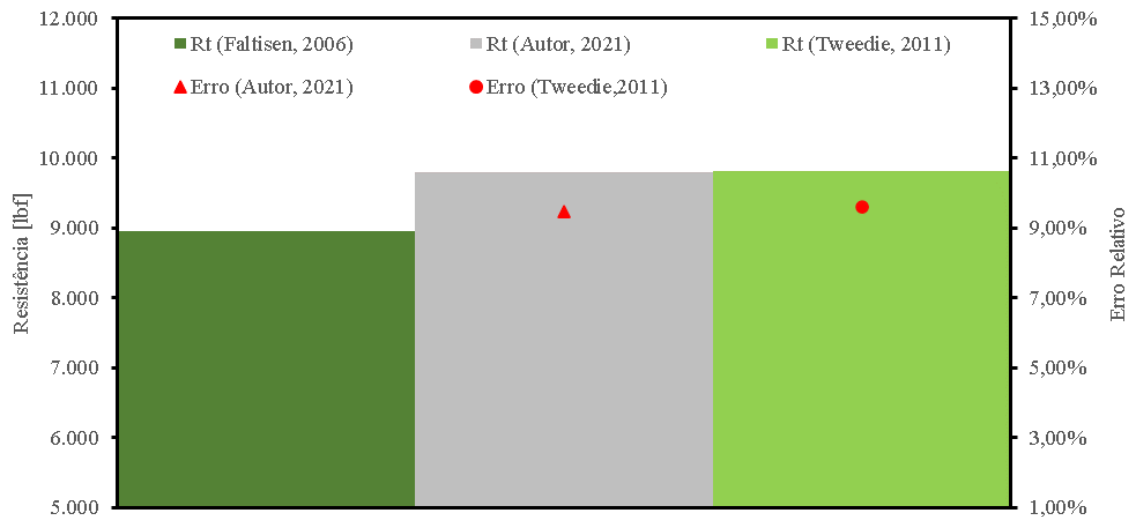
É estranho imaginar que implementações diferentes de um mesmo modelo resultem em variações da ordem de 10%. No entanto, Faltinsen (2006) analisa apenas a resistência hidrodinâmica da parte submersa do casco, além de desconsiderar a resistência por *spray* descrita em Savitsky, DeLorme e Datla (2007). Já no código desenvolvido, ambos os efeitos são considerados.

Figura 21 – Casco 01: Verificação do trim de equilíbrio a 40 nós



Fonte: Autor (2021)

Figura 22 – Casco 01: Verificação da resistência ao avanço a 40 nós

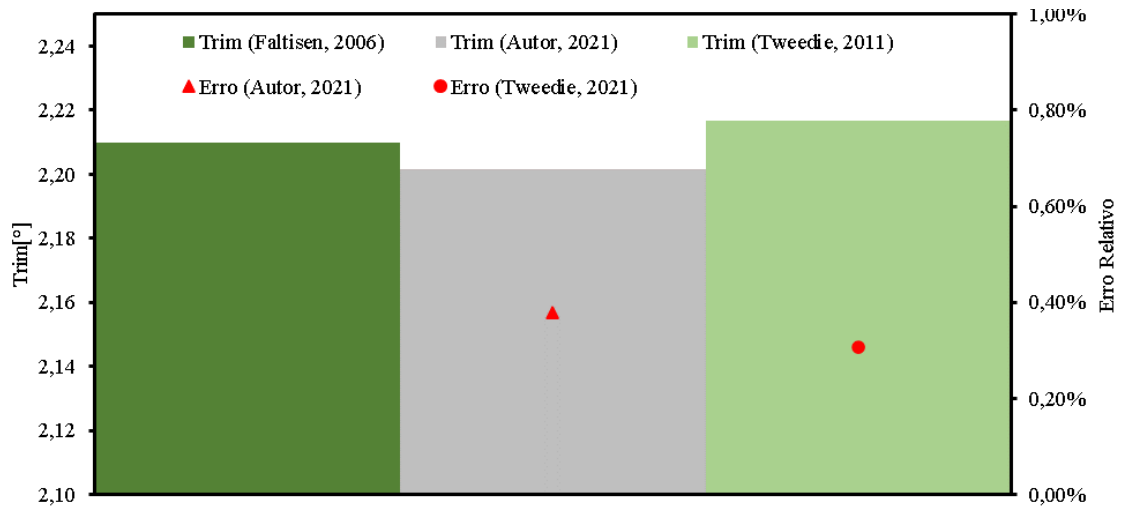


Fonte: Autor (2021)

Para avaliar a hipótese de que as diferenças observadas são decorrentes dos efeitos negligenciados por Faltinsen (2006), tanto da resistência aerodinâmica quanto da resistência por *spray*, esses efeitos foram temporariamente removidos do código desenvolvido.

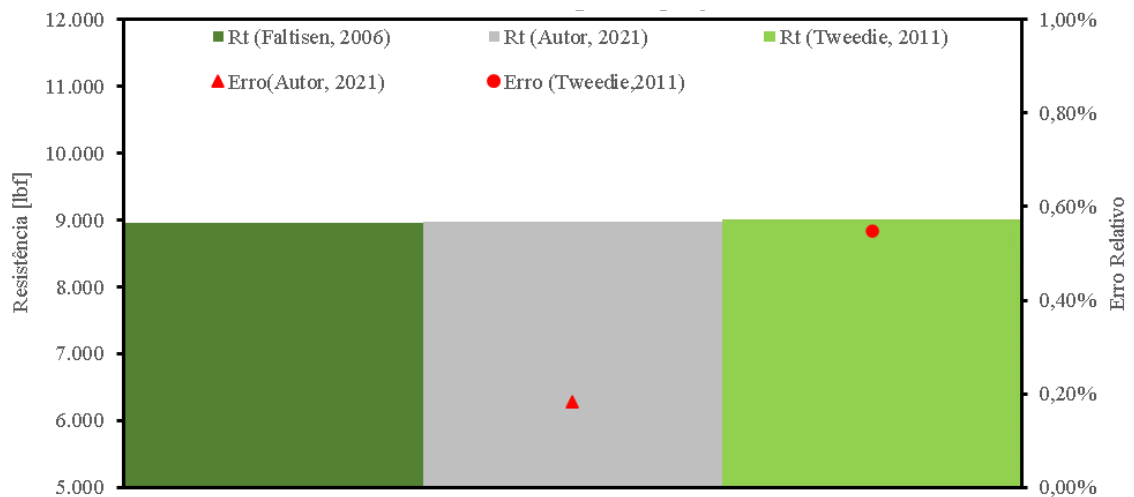
Os novos valores de trim (Figura 23) e de resistência (Figura 24) ficaram consideravelmente próximos daqueles calculados por Faltinsen (2006), sendo que eventuais diferenças podem ser creditadas à discretização usada na definição do ângulo de trim de equilíbrio do casco.

Figura 23 – Casco 01: Nova verificação do trim de equilíbrio a 40 nós



Fonte: Autor (2021)

Figura 24 – Casco 01: Nova verificação da resistência ao avanço a 40 nós

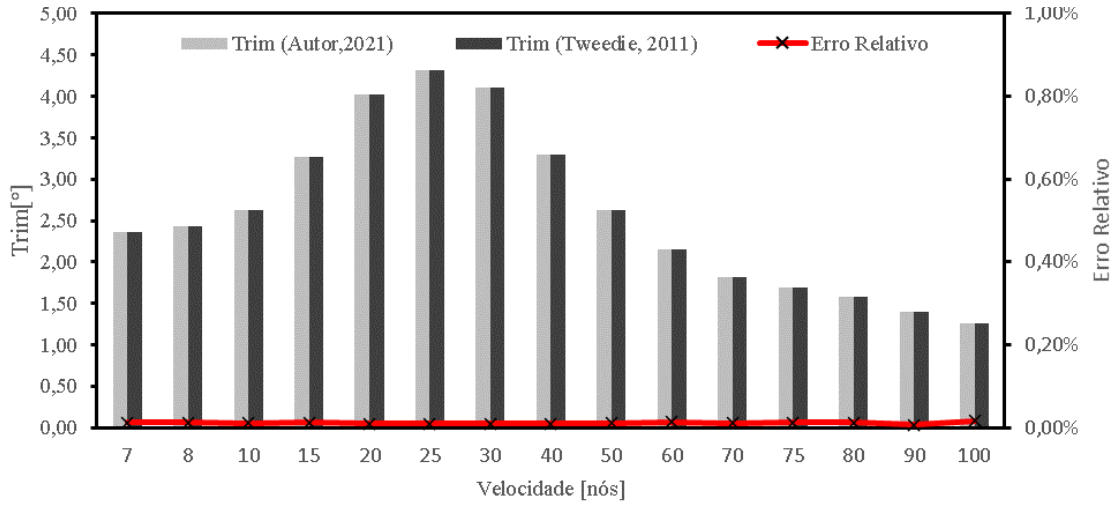


Fonte: Autor (2021)

5.3 Cascos disponíveis na literatura

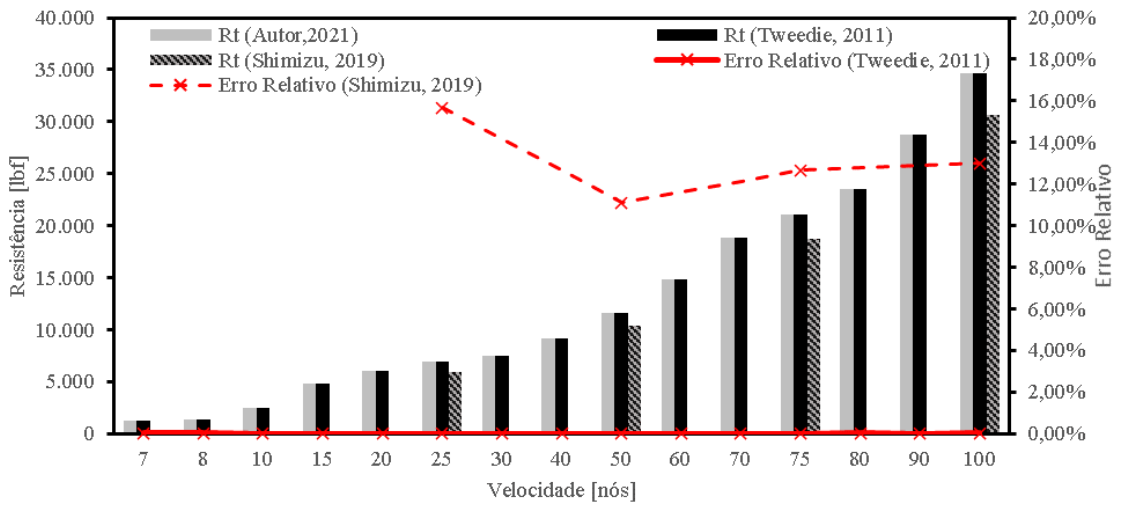
Nesta seção são apresentados os resultados referentes às 04 embarcações analisadas por Shimizu (2019). Os resultados de trim de equilíbrio (Figuras 25, 27, 29 e 31) e de resistência ao avanço (Figuras 26, 28, 30 e 32) obtidos com o código desenvolvido são confrontados com aqueles obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011) e aqueles obtidos por Shimizu (2019) usando o programa MaxSurf.

Figura 25 – Casco 02: Análise do trim de equilíbrio



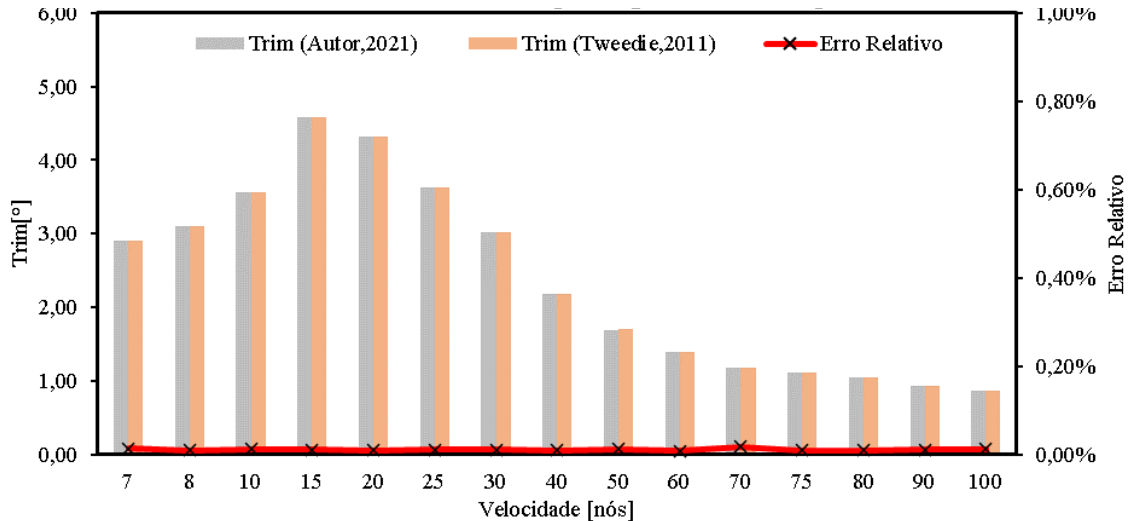
Fonte: Autor (2021)

Figura 26 – Casco 02: Análise de resistência ao avanço



Fonte o Autor (2021)

Figura 27 – Casco 03: Análise do trim de equilíbrio



Fonte: Autor (2021)

Figura 28 – Casco 03: Análise de resistência ao avanço

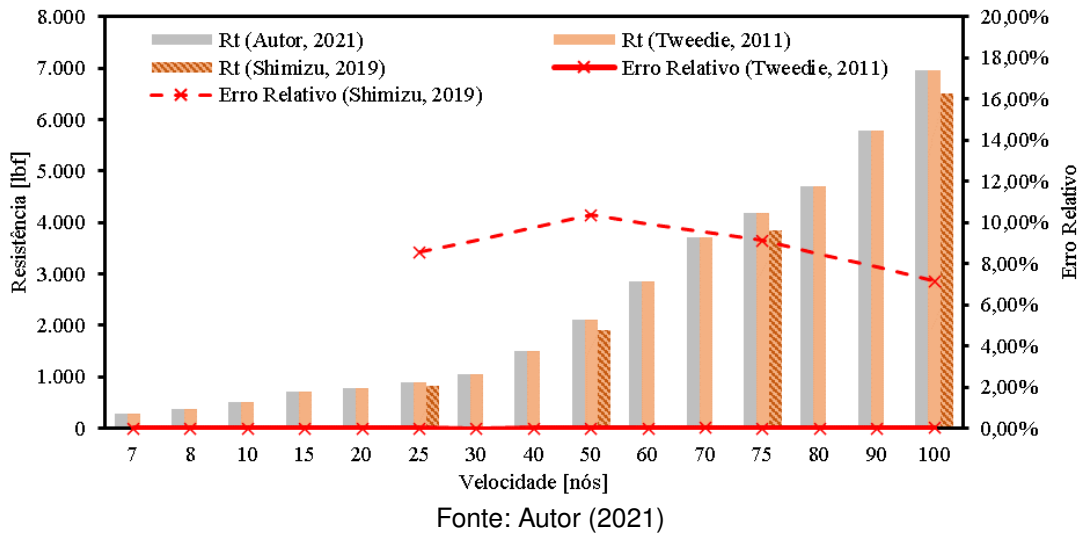


Figura 29 – Casco 04: Análise do trim de equilíbrio

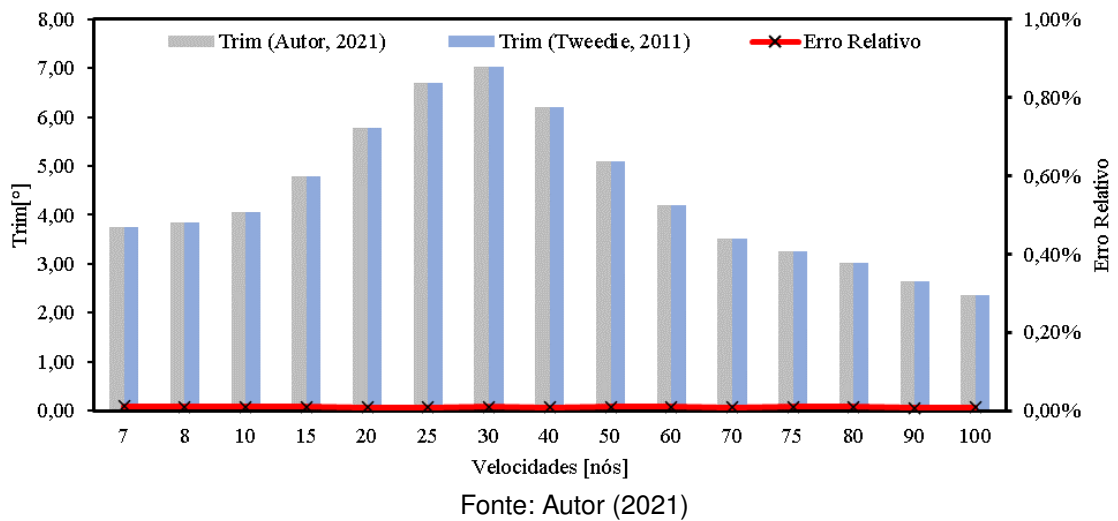


Figura 30 – Casco 04: Análise de resistência ao avanço

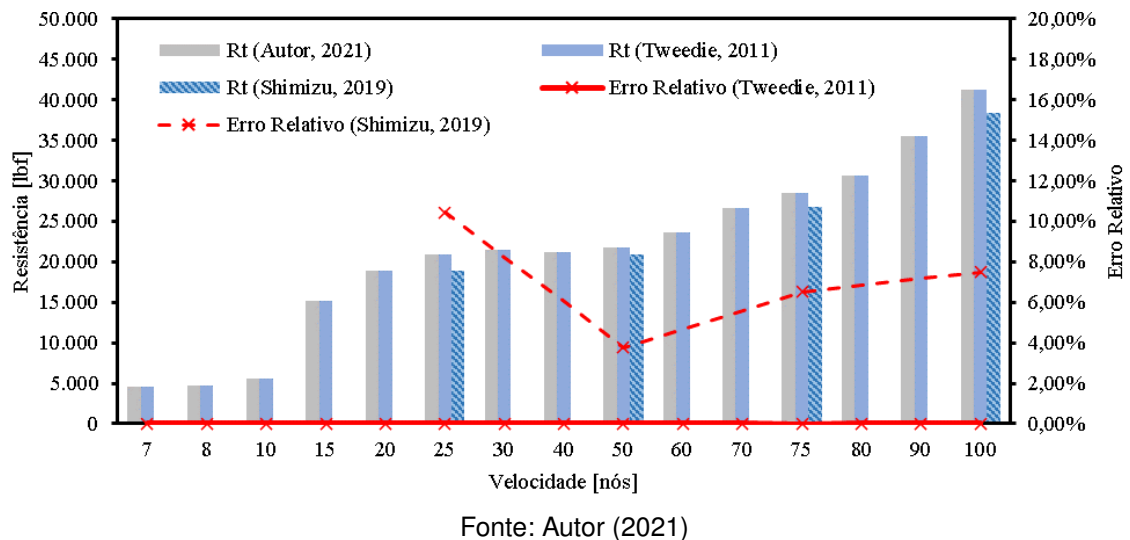
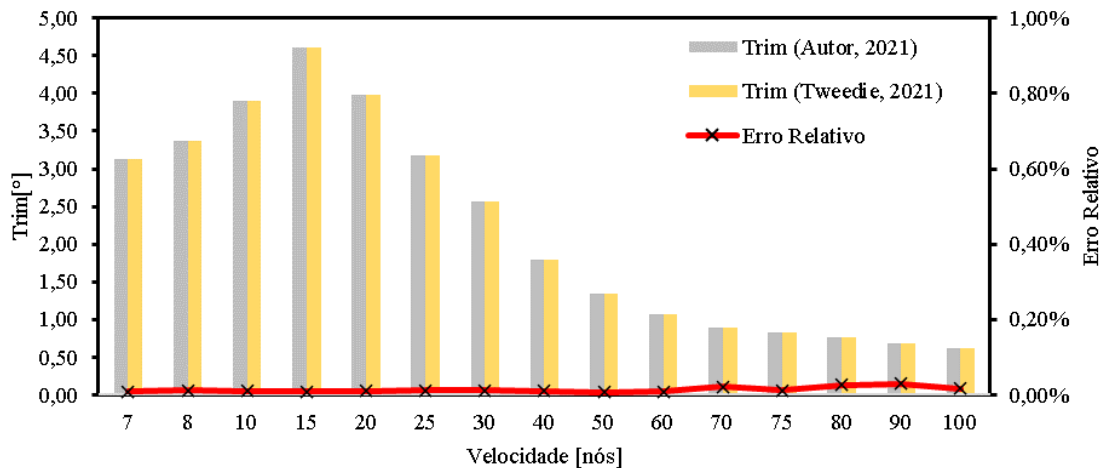
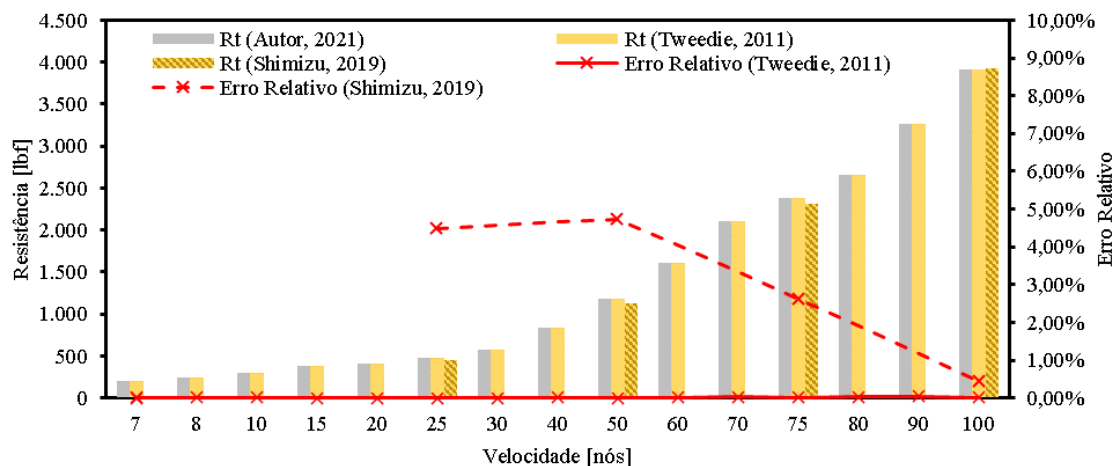


Figura 31 – Casco 05: Análise do trim de equilíbrio



Fonte: Autor (2021)

Figura 32 – Casco 05: Análise de resistência ao avanço



Fonte: Autor (2021)

Os resultados obtidos novamente indicam uma variação abaixo de 0,1% quando comparados àqueles obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011). Já a comparação com os resultados obtidos por Shimizu (2019) usando o MaxSurf é um pouco mais limitada, pois o autor analisou apenas 4 velocidades, além de não apresentar os resultados referentes ao trim de equilíbrio dinâmico do casco.

Apesar de alguns resultados apresentarem variações acima dos 10%, observa-se que a estimativa de resistência ao avanço obtida pelo código desenvolvido é sempre maior que o resultado calculado pelo programa MaxSurf.

Analisando os erros médios apresentados na Tabela 7, pode-se concluir que as variações entre os resultados obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011) e àqueles obtidos com o código desenvolvido são mínimas, sendo possível afirmar que o código desenvolvido reproduz o modelo implementado pelo autor.

Tabela 7 – Síntese dos resultados obtidos

Análise estatística das 4 embarcações	Trim	Resistência
Erro médio geral (TWEEDIE, 2011)	0,011%	0,006%
Desvio padrão geral (TWEEDIE, 2011)	0,003%	0,004%
Erro médio geral (SHIMIZU, 2019)	-	7,921%
Desvio padrão geral (SHIMIZU, 2019)	-	0,590%

Fonte: Autor (2021)

Já no caso das comparações com os resultados usando o MaxSurf, mesmo utilizando apenas as 4 velocidades do estudo original, nota-se que em todos os casos a resistência do código foi superior àquela calculada por Shimizu (2019), indicando uma possível diferença no modelo implementado.

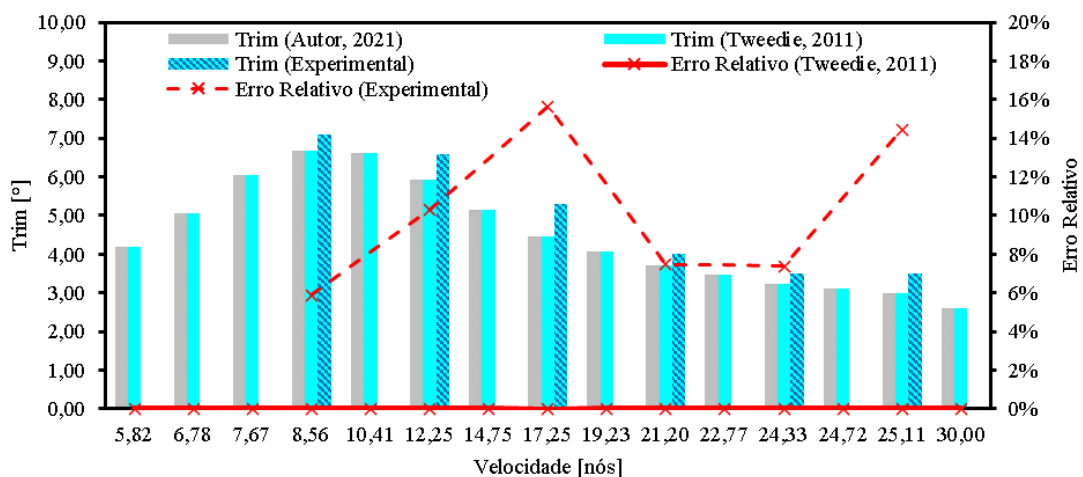
5.4 Análise do casco experimental

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a análise de uma embarcação de planeio fabricada por um estaleiro catarinense. As informações do estaleiro e da embarcação são omitidas para assegurar as questões de propriedade intelectual envolvidas na análise.

Conforme discutido na metodologia, foram realizadas coletas de dados experimentais para duas condições de carga. Na primeira, a lancha navegou com 2 passageiros a bordo, enquanto na segunda, existiam 10 passageiros a bordo, sempre distribuídos de maneira a assegurar o equilíbrio transversal da embarcação.

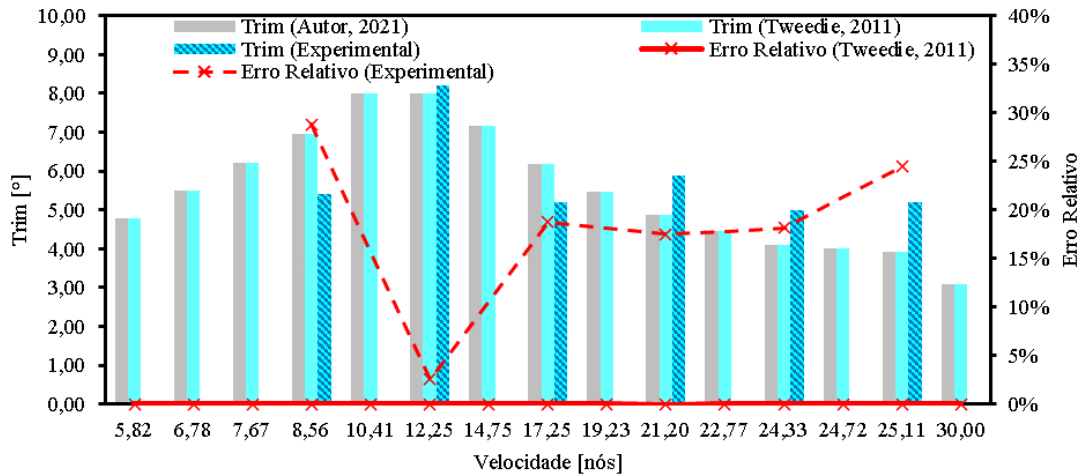
A seguir são apresentados os resultados referentes ao experimento com 2 passageiros (Figura 33) e com 10 passageiros (Figura 34). É importante observar que os dados utilizados nas análises analíticas foram os mesmos observados no início das provas de mar.

Figura 33 – Casco Experimental: Trim experimental (2 passageiros)



Fonte: Autor (2021)

Figura 34 – Casco Experimental: Trim experimental (10 passageiros)



Fonte: Autor (2021)

Conforme pode ser visto no Apêndice G, a variação dos resultados entre o código desenvolvido e a planilha de Tweedie (2011) continua virtualmente nula. No entanto, a comparação com os resultados experimentais mostrou diferenças maiores, com um erro médio de 8,9% na condição de 2 passageiros e 18,5% na condição de 10 passageiros.

Mesmo com erros máximos próximos a 30%, os resultados são promissores, dada as limitações do experimento realizado e as hipóteses simplificadoras do modelo empírico implementado.

Uma das necessidades percebidas foi a de aumentar a frequência da tomada de dados durante os experimentos. Pois o aumento da taxa de amostragem permitiria mitigar a influência das ondas, já que tanto o código desenvolvido quanto os programas comerciais consideram a condição de mar de almirante.

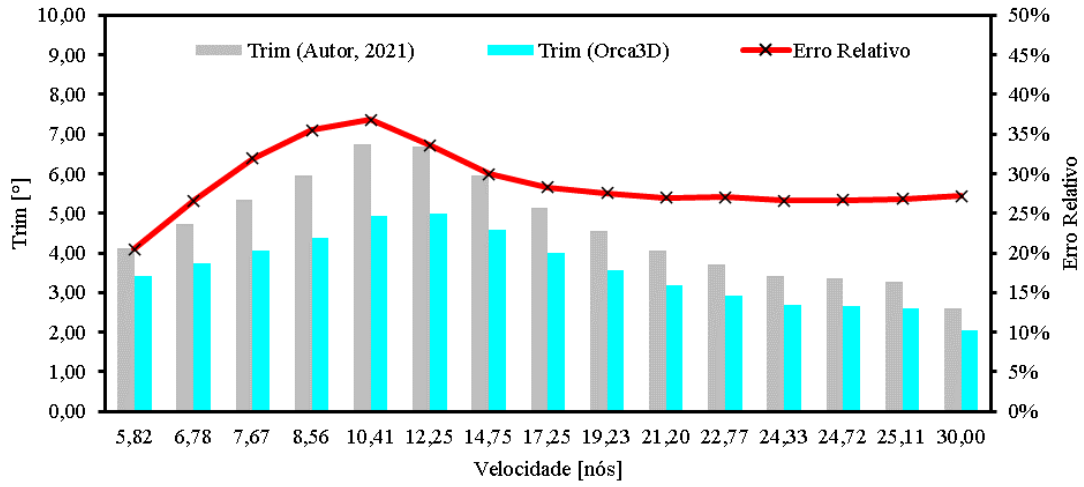
Outra potencial fonte das diferenças consiste na presença de um estabilizador de rabeta ajustável, cuja modelagem não é incluída no código desenvolvido. Pois a variação da posição do estabilizador de rabeta acarreta a variação da área frontal submersa, assim como no ângulo de empuxo em relação a linha de fundo da embarcação, influenciando no comportamento hidrodinâmico da lancha.

Por fim, destaca-se que as provas de mar foram realizadas com equipamentos simples e, dada a natureza agitada dos ensaios, erros no registro manual dos dados não podem ser descartados.

5.5 Comparação com resultado analítico usando o Orca3D

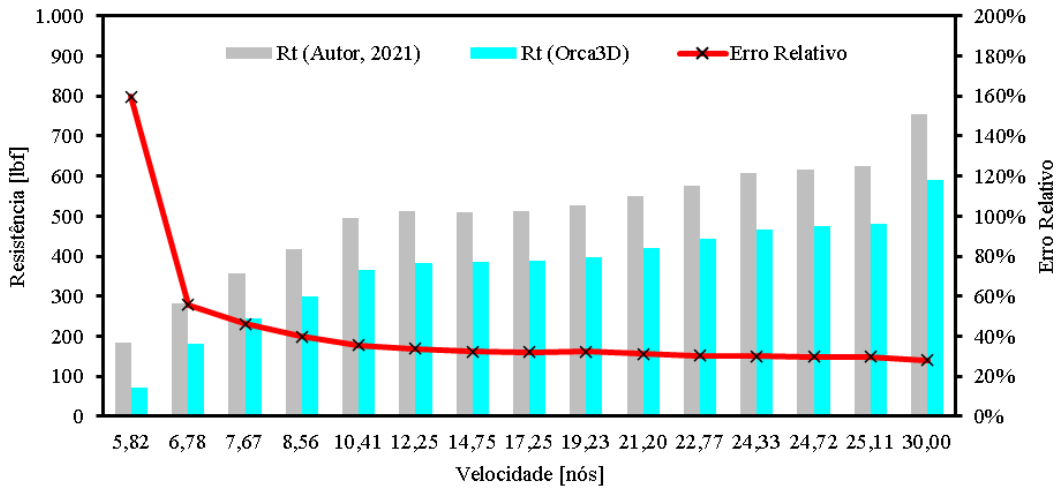
Nesta seção são apresentados os resultados de trim (Figuras 35 e 37) e de resistência ao avanço (Figuras 36 e 38) referentes a análise do casco experimental utilizando o programa Orca3D.

Figura 35 – Casco Experimental: Trim analítico (2 passageiros)



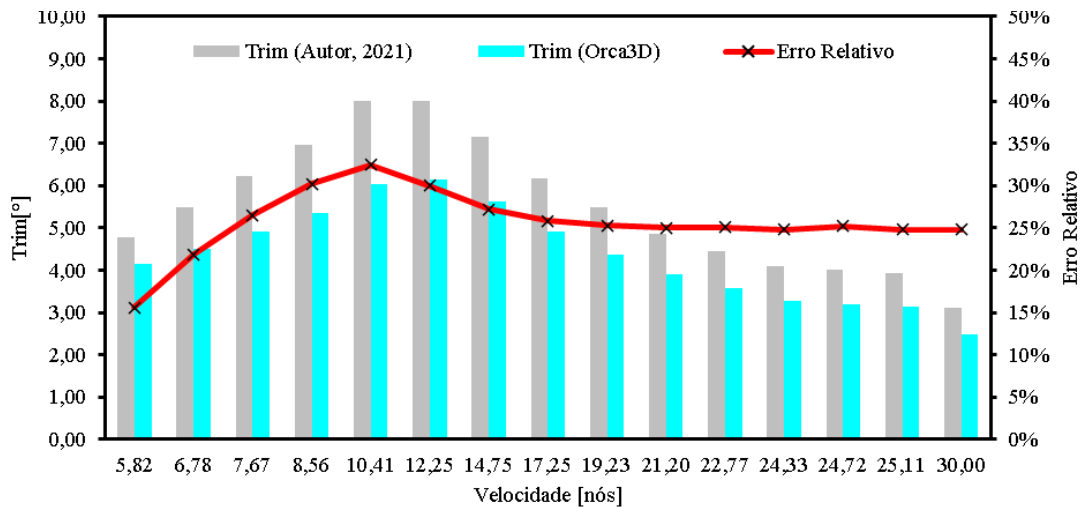
Fonte: Autor (2021)

Figura 36 – Casco Experimental: Resistência analítica (2 passageiros)



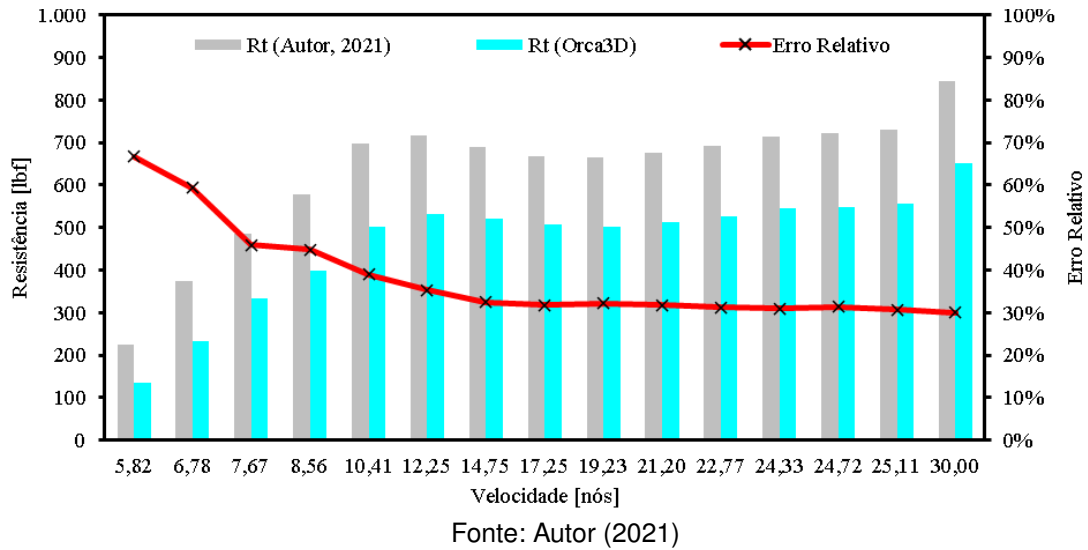
Fonte: Autor (2021)

Figura 37 – Casco Experimental: Trim analítico (10 passageiros)



Fonte: Autor (2021)

Figura 38 – Casco Experimental: Resistência analítica (10 passageiros)



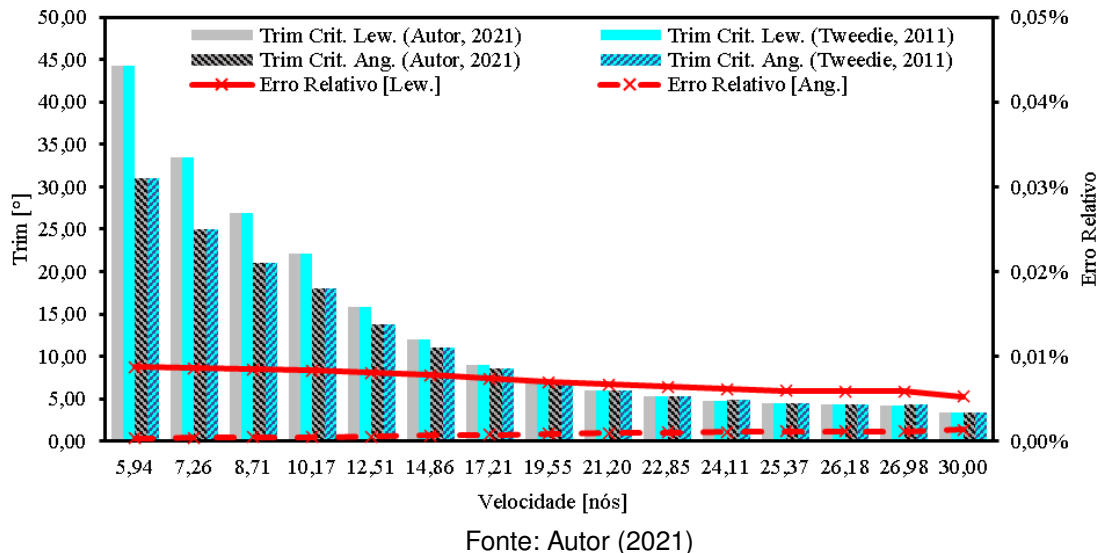
Observando os resultados (Apêndice G) é possível verificar que o código desenvolvido apresentou um erro médio de 30% para ambas as condições de carga analisadas, o qual diminui a medida que a velocidade analisada aumenta.

Assim como no caso da comparação com os resultados obtidos usando o programa MaxSurf, observa-se que os valores de resistências ao avanço estimados pelo código desenvolvido são sempre superiores a aqueles estimados pelo Orca3D, indicando uma possível diferença no modelo implementado.

5.6 Análise de estabilidade longitudinal

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a análise do ângulo de início de *porpoising* usando o modelo proposto por Lewandowski e Celano (1998) e, também, o modelo proposto por Angeli (1973) (Figura 39).

Figura 39 – Casco Experimental: Instabilidade longitudinal (2 passageiros)



Infelizmente, por limitação de tempo, a análise de estabilidade foi realizada apenas para a condição de navegação com 2 passageiros a bordo.

Analisando os resultados mostrados no Apêndice H, novamente é possível afirmar que a ferramenta desenvolvida reproduz o modelo implementado por Tweedie (2011) tanto para o ângulo crítico de início de *porpoising* proposto por Lewandowski e Celano (1998) quanto aquele proposto por Angeli (1973).

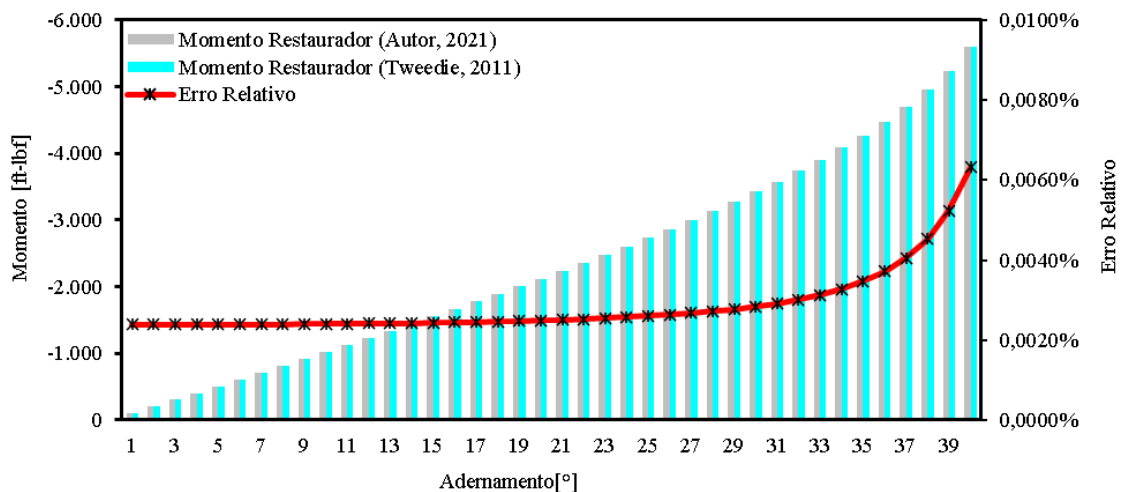
Observa-se também que, embora à baixas velocidades a tendência é que o modelo de Angeli (1973) seja mais conservador, conforme as velocidades aumentam, os dois métodos tendem a ter resultados convergentes.

5.7 Análise de estabilidade transversal

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a análise da estabilidade transversal considerando a condição de navegação com 2 passageiros a bordo. Os resultados obtidos são confrontados com àqueles calculados usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011).

Conforme visto na revisão bibliográfica, para cada velocidade analisada deve-se verificar a ocorrência da instabilidade transversal para diferentes graus de adernamento. No entanto, em virtude da concisão textual, apenas os resultados referentes as velocidades de 17,25 nós (Figura 40) e 24,33 nós (Figura 41) são apresentados, enquanto os demais resultados podem ser vistos no Apêndice H.

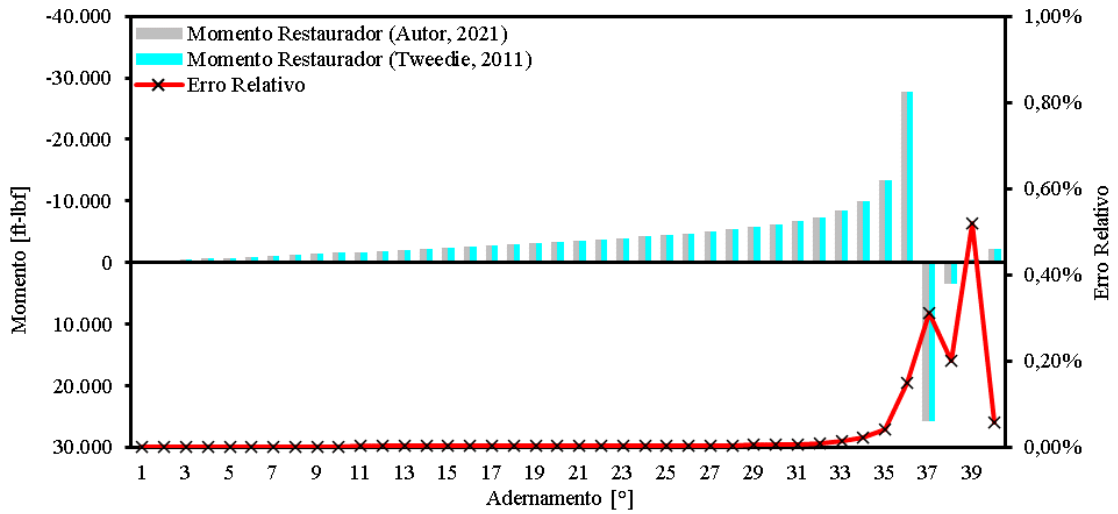
Figura 40 – Casco Experimental: Instabilidade transversal (17,25 nós)



Fonte: Autor (2021)

A ausência da inversão do sinal do momento restaurador na Figura 40 indica que, para a velocidade de 17,25 nós, até o adernamento de 40 graus, a embarcação não sofrerá instabilidade transversal. No entanto, os resultados referentes a velocidade de 24,33 nós (Figura 41), mostram que, nesse caso, a embarcação se tornará instável quando adernar 37 graus.

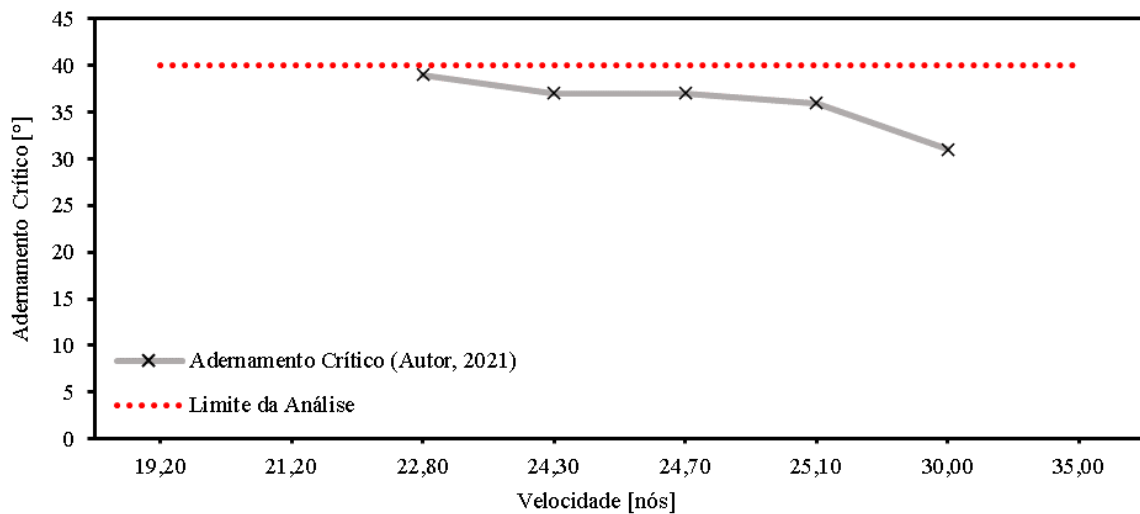
Figura 41 – Casco Experimental: Instabilidade transversal (24,33 nós)



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 42 são sintetizados os resultados referentes às análises realizadas, indicando o ângulo crítico para o qual ocorrerá a instabilidade transversal da embarcação em virtude da velocidade de navegação.

Figura 42 – Casco Experimental: Adernamento crítico

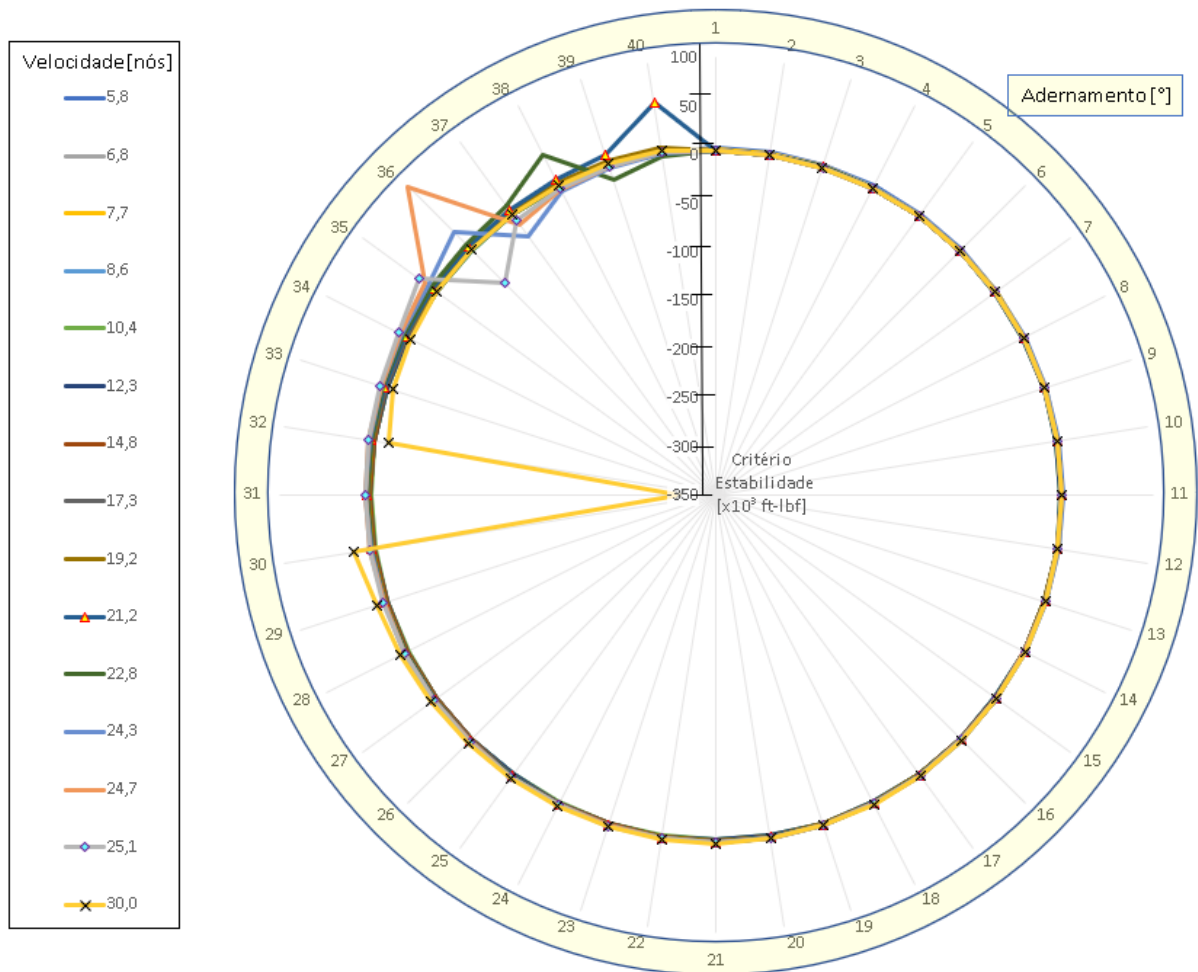


Fonte: Autor (2021)

Outra forma de representar a aplicação do critério de estabilidade transversal consiste na utilização de um gráfico estilo radar, onde cada linha representa uma velocidade, cada grau do radar representa um adernamento e cada raio do círculo representa os valores do critério de estabilidade (Figura 43). O autor batizou essa representação de Radar de Instabilidade Transversal (RIT).

Por fim, é possível representar a aplicação do critério de estabilidade transversal usando um mapa de calor, tal como pode ser visto no apêndice H.

Figura 43 – Casco Experimental: Momento restaurador dinâmico



Fonte: Autor (2021)

Observando os resultados mostrados no Apêndice H, constata-se que, mais uma vez, o código desenvolvido conseguiu reproduzir os resultados obtidos com a planilha de Tweedie (2011).

No entanto, é importante destacar que uma análise mais aprofundada é necessária para a verificação e validação dos módulos de estabilidade, que, por limitações financeiras e de disponibilidade da lancha, infelizmente, não pode ser finalizada.

6 CONCLUSÕES

Diante do cenário competitivo no emergente setor náutico brasileiro e da lacuna de ferramentas e tecnologias nacionais para o projeto naval, este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a análise da resistência ao avanço e da estabilidade de cascos planantes.

Para a verificação, foi realizada a análise de erro relativo, comparando os valores obtidos na ferramenta desenvolvida com aqueles obtidos usando a planilha desenvolvida por Tweedie (2011).

Foram analisadas a embarcação descrita por Faltinsen (2006) e as quatro embarcações estudadas por Shimizu (2019). Observando-se os resultados obtidos, verificou-se que a ferramenta desenvolvida obteve erros abaixo de 0,5% em todas as análises realizadas.

Já quando comparados com os programas comerciais, os resultados obtidos apresentaram diferenças maiores, chegando a 10%. No entanto, é importante observar que os resultados da ferramenta desenvolvida são sempre superiores aos estimados pelas ferramentas comerciais.

Na documentação do programa MaxSurf (BENTLEY, 2021), os únicos artigos mencionados para o cálculo do planeio e da resistência ao avanço são os artigos de Savitsky (1964) e de Savitsky e Brown (1976). O manual cita ainda o artigo de Blount e Fox (1976), o qual é tratado separadamente pelo programa.

Analisando o manual do programa Orca3D User Manual (2021) as mesmas três referências sobre o método de Savitsky foram encontradas: o artigo original de Savitsky (1964), as atualizações de Savitsky e Brown (1976) e Blount e Fox (1976). No entanto, o próprio manual orienta o usuário a usar um fator extra que inclua o arrasto por vento, ondas, apêndices etc. (Orca3D User Manual, 2021, p. 348).

Por outro lado, a ferramenta desenvolvida implementa algumas correções, como a de estabilidade de trim de planeio de Blount e Bartee (1997) através do fator "M" e o artigo de Doctors (1985) que revisa o coeficiente de fricção do casco para incluir um fator de correção relacionado ao *deadrise*, além de adicionar a influência dos apêndices e da resistência do ar (HADLER, 1966). Por fim, a resistência devido a geração do *spray* é adicionada com base no artigo de Savitsky, DeLorme e Datla (2007).

Diante dessas considerações, é seguro afirmar que a ferramenta desenvolvida é conservadora em relação as principais ferramentas comerciais existentes e possui grande acurácia quando comparada ao trabalho de Tweedie (2011), apresentando erros inferiores a 0,5%.

A terceira análise envolveu a comparação da estimativa do trim de equilíbrio dinâmico de uma lancha real, medido durante a prova de mar, com os resultados estimados pela ferramenta desenvolvida. Nesse caso, a ferramenta foi capaz de prever o trim com erro médio de 10% e erro máximo de 30%.

Considerando que o experimento não teve o rigor científico necessário, pois foi realizado no âmbito de provas de mar de um estaleiro de pequeno porte, os resultados são animadores e fomentam estudos futuros. Destaca-se que o próprio estaleiro pretende fomentar tal iniciativa, melhorando sua capacidade de projeto e, principalmente, de medições experimentais.

De modo geral, o desenvolvimento atingiu as expectativas, podendo ser considerado verificado em relação às outras ferramentas de análise computacional. Entretanto, recomenda-se cautela com situações reais, em especial na análise da estabilidade transversal, pelo menos, até que novos estudos de verificação e validação sejam conduzidos.

Os erros obtidos são consistentes com as variações decorrentes de diferentes implementações de um mesmo método numérico, sendo aceitáveis dentro do escopo e dos objetivos propostos.

6.1 Trabalhos futuros

Dentro do escopo apresentado, recomenda-se que os seguintes assuntos sejam explorados em trabalhos futuros:

- Inclusão da estimativa das resistências causadas por vento e ondas;
- Inclusão de correções para cascos com ângulos de *deadrise* variável;
- Inclusão da influência do propulsor na estabilidade transversal;
- Inclusão de modelos matemáticos para análise de manobra e *seakeeping*;
- Inclusão de modelos para a análise da resistência ao avanço de catamarãs;
- Verificação e validação dos módulos de análise de estabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALLEBRANDT, A. J.; SALLES, M. V.; TANCREDI, T. P. O uso de técnicas de otimização no projeto de embarcações de alta velocidade. **III Congresso Nacional das Engenharias da Mobilidade**, v. 01, 2017.
- ANGELI, J. C. Evaluation of the trim of a planing boat at inception of porpoising. **SNAME Spring Meeting**, apr 1973.
- BENTLEY ADVANCING INFRASTRUCTURE. **MAXSURF Resistance CONNECT Edition V23**: User manual. 2021.
- BLOUNT, D.; BARTEE, R. Design of propulsion systems for high-speed craft. **Marine Technology**, v. 34, p. 276–292, 10 1997.
- BLOUNT, D. L.; FOX, D. I. Small-craft power prediction. **Marine Technology**, v. 13, n. 1, p. 14–45, 1976.
- CARRO, R. Em alto-mar, demanda forte até 2022. **Valor Globo**, 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/04/05/em-alto-mar-demanda-forte-ate-2022.ghtml>.
- CATUCCI, A. SC reúne mercado milionário de iates de luxo e estaleiros internacionais: lates de SC podem passar de R\$ 20 milhões pendendo da customização. 'mercado náutico brasileiro vem evoluindo', diz CEO de marca italiana. **G1**, 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/sc-que-da-certo/noticia/2016/08/sc-reune-mercado-milionario-de-iates-de-luxo-e-estaleiros-internacionais.html>.
- DOCTORS, L. Hydrodynamics of high-speed small craft. 06 1985.
- EVANS, J. H. Basic design concepts. **Journal of the American Society for Naval Engineers**, v. 71, n. 4, p. 671–678, 1959.
- FAISON, L. Design of a high speed planing hull with a cambered step and surface piercing hydrofoils. In: . [S.l.: s.n.], 2014.
- FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.
- FARAH, M. A.; TANCREDI, T. P. Recomendações para a estimativa de resistência ao avanço viscosa de navios usando OpenFOAM. **II CoBICET - Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**, 2021.
- GERR, D. **The nature of boats: Insights and esoterica for the nautically obsessed**. [S.l.]: McGraw Hill Professional, 1995.
- GHEZZI, C.; JAZAYERI, M.; MANDRIOLI, D. **Fundamentals of software engineering**. 2. ed. [S.l.]: Universität Duisburg Essen, 2003.
- HADLER, J. The prediction of power performance on planing craft. **SNAME Transactons**, v. 74, 1966.

- LAMB, T. et al. **Ship design and construction**. United States of America: Sheridan Books, 2003. v. 2.
- LARSSON, L.; RAVEN, H. C. **The principles of naval architecture series: ship resistance and flow**. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- LEWANDOWNSKI, E. M. Prediction of the dynamic roll stability of hard-chine planing craft. **Journal of Ship Research**, v. 40, n. 2, p. 144–148, 1996.
- LEWANDOWNSKI, E. M. **Traverse dynamic stability of planing craft**. 1996. Presented to the New York Metropolitan Section the Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- LEWANDOWNSKI, E. M.; CELANO, T. The prediction of porpoising inception for modern planing craft. **SNAME Transactions**, 1998.
- LEWANDOWSKI, E. M. **The dynamics of marine craft: maneuvering and seakeeping**. [S.l.]: World Scientific, 2004. v. 22. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 22).
- LEWIS, E. **Principles of naval architecture: Resistance, propulsion and vibration**. [S.l.]: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. v. 2. (Principles of Naval Architecture, v. 2).
- LEWIS, E. **Principles of naval architecture: Stability and strength**. [S.l.]: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. v. 1. (Principles of Naval Architecture, v. 1).
- MARIN, G. **Estudo paramétrico de resistência ao avanço de uma embarcação de planeio: análise método de Savitsky**. thesis — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171772>.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of propulsive power**. Cambridge University Press, 2011. Disponível em: <https://eprints.soton.ac.uk/188555/>.
- MORAES, A. A. de. **Metodologia de suporte ao projeto informacional e conceitual de embarcações de recreio a motor de pequeno porte**. mathesis — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/177592/346864.pdf?sequence=1>.
- NETTO, V. Mercado náutico se recupera e vem crescendo no brasil: Em Itajaí (SC), serviços náuticos devem aumentar 30% até o final do ano. **FishTV**, 2019. Disponível em: <https://www.fishtv.com/noticias/mercado/mercado-nautico-se-recupera-e-vem-crescendo-no-brasil>.
- NOAA, N. W. S. **Experimental maximum wave height in Nearshore marine forecast**. 2017. Disponível em: <https://www.weather.gov/dlh/WaveHeightExplanation>.
- NSC, E. SC aproveita boom do mercado náutico brasileiro: Cenário exige mão de obra qualificada; conheça o curso inédito de Design de Interiores Náuticos da Faculdade Cesusc. **NSCTotal**, 2021. Disponível em: <https://www.nsctotal.com.br/noticias/sc-aproveita-boom-do-mercado-nautico-brasileiro>.

Orca3D User Manual. **Version 2.0.12**. [S.l.]: Orca3D TM, 2021.

PAPANIKOLAOU, A. D. Developments and potential of advanced marine vehicles concepts. **Bulletin of the KANSAI Society of Naval Architects**, n. 55, p. 50–54, abr. 2002.

ROACHE, P. **Verification and validation of computational fluid dynamics simulations**. Albuquerque, New Mexico: Hermosa, 1998.

SANTOS, P. K. C. dos; TANCREDI, T. P. Variação no desempenho de embarcações em alta velocidade em função da variação do LCG/calado ao longo de uma viagem: lancha de 26 pés. **25º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore**, 2014.

SAVITSKY, D. Hydrodynamic design of planing hulls. **Marine Technology**, v. 1, n. 1, p. 71–95, 1964.

SAVITSKY, D. Modern ships & crafts: Planing craft. **Naval Engineers Journal**, p. 113–141, 1985.

SAVITSKY, D. **On the subject of high-speed monohulls**. 2003. Presented to the Greek Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers Athens, Greece.

SAVITSKY, D.; BROWN, P. W. Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water. **Marine Technology**, v. 13, n. 4, p. 381–400, 1976.

SAVITSKY, D.; DELORME, M.; DATLA, R. Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls. **Marine Technology**, v. 44, p. 35–56, 01 2007.

SHIMIZU, E. A. **Validação dos módulos para estimativa de resistência ao avanço de embarcações utilizando modelos empíricos implementados no ambiente synapse**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

SOUZA, F. d. Vendas de barcos de até R\$ 1,8 mi sobem 20% em 2020: fila chega a 4 meses. **Economia UOL**, 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2021/03/16/brasileiros-compram-barcos-para-passar-isolamento-fila-chega-a-3-meses.htm>.

SYNAPSE. **Sistema de otimização para projetos de engenharia utilizando superfícies de respostas neurais**. 2021. Disponível em: <https://synapse.sites.ufsc.br/>.

TANCREDI, T. P. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo / Ecole Centrale de Nantes, 2008.

TWEEDIE, D. **Savitsky power prediction spreadsheet**. 2011. Disponível em: <https://www.boatdesign.net/threads/savitsky-power-prediction.2187/page-9#post-449328>.

APÊNDICE A - ANÁLISE - EMBARCAÇÃO VISTA EM FALTISEN (2006)

Tabela 8 – Casco 01: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Vel [nós]	(Autor,2021)		(Tweedie, 2011)	
	Trim [°]	Rt [lbf]	Trim [°]	Rt [lbf]
7	1,34	940,29	1,34	940,88
8	1,36	1016,38	1,36	1017,06
10	1,41	2418,32	1,41	2419,39
15	1,57	4512,11	1,57	4514,10
20	1,79	5580,08	1,79	5582,96
25	2,04	6534,08	2,04	6538,20
30	2,23	7538,94	2,23	7544,66
35	2,25	8609,17	2,25	8616,64
40	2,14	9801,59	2,15	9810,95
45	1,97	11173,45	1,97	11184,99
50	1,79	12756,15	1,79	12770,10
55	1,61	14564,26	1,61	14581,04
60	1,45	16604,98	1,45	16624,26
65	1,31	18883,32	1,31	18905,62
70	1,19	21405,98	1,19	21431,01

Fonte o Autor (2021)

Tabela 9 – Casco 01: Análise de erros (Tweedie, 2011)

Vel [nós]	Erro Relativo [τ]	Erro Relativo [Rt]
7	0,03%	0,06%
8	0,03%	0,07%
10	0,02%	0,04%
15	0,03%	0,04%
20	0,02%	0,05%
25	0,01%	0,06%
30	0,01%	0,08%
35	0,02%	0,09%
40	0,01%	0,10%
45	0,02%	0,10%
50	0,02%	0,11%
55	0,01%	0,12%
60	0,01%	0,12%
65	0,02%	0,12%
70	0,02%	0,12%
Erro Médio	0,02%	0,09%
Desvio Padrão	0,01%	0,03%

Fonte: Autor (2021).

Tabela 10 – Casco 01: Comparação com resultado de Faltisen (2006)

(Autor, 2021)			(Faltisen, 2006)		
Velocidade [nós]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	
40	2,14	9801,59	2,21	8953,02	
Erro Relativo	Trim	2,95%	Resistência	9,48%	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 11 – Casco 01: Nova comparação com Faltisen (2006)

(Autor, 2021)			(Faltisen, 2006)		
Velocidade [nós]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	
40	2,20	8953,52	2,21	8953,02	
Erro Relativo	Trim	2,95%	Resistência	9,48%	

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE B - ANÁLISE EMBARCAÇÃO BG60

Tabela 12 – Casco 02: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Casco 02 - Comparação Resultados [Código x Planilha]					
Código			Planilha		
Vel [nós]	Trim [grau]	Resistência [lbf]	Trim [grau]	Resistência [lbf]	
7	2,36	1221,41	2,36	1221,53	
8	2,43	1313,57	2,43	1313,69	
10	2,62	2503,58	2,62	2503,78	
15	3,27	4788,92	3,27	4789,27	
20	4,02	6075,57	4,02	6075,87	
25	4,32	6875,55	4,32	6875,81	
30	4,11	7482,56	4,11	7482,78	
40	3,30	9104,67	3,30	9104,70	
50	2,63	11584,04	2,63	11583,95	
60	2,15	14864,03	2,15	14862,89	
70	1,82	18859,99	1,82	18858,89	
75	1,69	21108,37	1,69	21107,09	
80	1,57	23517,62	1,57	23515,36	
90	1,39	28793,86	1,39	28792,88	
100	1,25	34666,22	1,25	34661,41	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 13 – Casco 02: Análise de erros (Tweedie, 2011)

Casco 02 - Análise de Erro [Código x Planilha]		
Vel [nós]	Erro Relativo [trim]	Erro Relativo [resistência]
7	0,01%	0,01%
8	0,01%	0,01%
10	0,01%	0,01%
15	0,01%	0,01%
20	0,01%	0,01%
25	0,01%	0,00%
30	0,01%	0,00%
40	0,01%	0,00%
50	0,01%	0,00%
60	0,01%	0,01%
70	0,01%	0,01%
75	0,01%	0,01%
80	0,01%	0,01%
90	0,01%	0,00%
100	0,02%	0,01%
Erro Médio	0,01%	0,01%
Devio Padrão	0,00%	0,00%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 14 – Casco 02: Comparação com MaxSurf

Casco 02 - Análise de Erro [Código x MaxSurf]				
Vel [nós]	Resistência Cód[lbf]	Resistência Max [lbf]	Erro Relativo	
25	6875,81	5944,32	15,67%	
50	11583,95	10425,61	11,11%	
75	21107,09	18734,18	12,67%	
100	34661,41	30675,20	12,99%	
Erro Medio			13,11%	
Devio Padrão			1,89%	

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE C - ANÁLISE EMBARCAÇÃO AQUARAMA

Tabela 15 – Casco 03: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Casco 03 - Comparação de Resultados [Código x Planilha]					
Código			Planilha		
Velocidade [nós]	Trim [grau]	Resistência [lbf]	Trim [graus]	Resistência [lbf]	
7,00	2,91	291,86	2,91	291,89	
8,00	3,11	385,07	3,11	385,10	
10,00	3,57	518,23	3,57	518,27	
15,00	4,58	705,20	4,58	705,24	
20,00	4,32	791,70	4,32	791,72	
25,00	3,63	896,74	3,63	896,76	
30,00	3,02	1051,75	3,02	1051,75	
40,00	2,19	1500,95	2,19	1500,92	
50,00	1,70	2107,52	1,70	2107,38	
60,00	1,39	2850,06	1,39	2849,95	
70,00	1,18	3715,73	1,18	3715,14	
75,00	1,11	4191,44	1,11	4191,09	
80,00	1,04	4694,74	1,04	4694,35	
90,00	0,94	5779,61	0,94	5779,11	
100,00	0,86	6962,93	0,86	6962,02	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 16 – Casco 03: Análise de erros (Tweedie, 2011)

Casco 03 - Análise de Erro [Código x Planilha]		
Velocidade [nós]	Erro Relativo [trim]	Erro Relativo [resistência]
7	0,01%	0,01%
8	0,01%	0,01%
10	0,01%	0,01%
15	0,01%	0,01%
20	0,01%	0,00%
25	0,01%	0,00%
30	0,01%	0,00%
40	0,01%	0,00%
50	0,01%	0,01%
60	0,01%	0,00%
70	0,02%	0,02%
75	0,01%	0,01%
80	0,01%	0,01%
90	0,01%	0,01%
100	0,01%	0,01%
Erro Médio	0%	0%
Desvio Padrão	0%	0%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 17 – Casco 03: Comparação com MaxSurf

Vel[nós]	Resistência Cód[lbf]	Resistência Max[lbf]	Erro Relativo
25	896,74	826,06	9%
50	2107,52	1909,81	10%
75	4191,44	3841,08	9%
100	6962,93	6497,38	7%
Erro Médio			9%
Desvio Padrão			1%

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE D - ANÁLISE EMBARCAÇÃO HIGGINS

Tabela 18 – Casco 04: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Casco 04: Comparação de Resultados [Código x Planilha]					
Velocidade [nós]	Código			Planilha	
	Trim [grau]	Resistência [lbf]	Trim [grau]	Resistência [lbf]	
7	3,75	4509,10	3,7525	4509,55	
8	3,84	4676,86	3,84	4677,31	
10	4,05	5642,23	4,05	5642,73	
15	4,78	15147,17	4,78	15148,51	
20	5,78	18836,80	5,78	18838,09	
25	6,71	20862,85	6,71	20864,28	
30	7,02	21533,27	7,02	21534,83	
40	6,21	21239,49	6,21	21240,43	
50	5,09	21716,69	5,09	21717,51	
60	4,19	23545,51	4,20	23545,96	
70	3,53	26567,44	3,52	26567,51	
75	3,26	28468,58	3,26	28468,55	
80	3,03	30605,39	3,03	30605,27	
90	2,65	35529,79	2,65	35529,24	
100	2,36	41253,11	2,36	41252,32	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 19 – Casco 04: Análise de erros (Tweedie, 2011)

Casco 04: Análise de Erro [Código x Planilha]			
Velocidade [nós]	Erro Relativo [trim]	Erro Relativo [resistência]	
7	0,01%	0,01%	
8	0,01%	0,01%	
10	0,01%	0,01%	
15	0,01%	0,01%	
20	0,01%	0,01%	
25	0,01%	0,01%	
30	0,01%	0,01%	
40	0,01%	0,00%	
50	0,01%	0,00%	
60	0,01%	0,00%	
70	0,01%	0,00%	
75	0,01%	0,00%	
80	0,01%	0,00%	
90	0,01%	0,00%	
100	0,01%	0,00%	
Erro Médio	0,01%	0,00%	
Desvio Padrão	0,00%	0,00%	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 20 – Casco 04: Comparação com MaxSurf

Casco 04: Comparação com Software Comercial				
Vel [nós]	Resistência Cód[lbf]	Resistência Max[lbf]	Erro Relativo	
25	20862,85	18891,91	10%	
50	21716,69	20931,38	4%	
75	28468,58	26727,71	7%	
100	41253,11	38377,77	7%	
Erro Médio			7%	
Desvio Padrão			3%	

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE E - ANÁLISE EMBARCAÇÃO COBRA

Tabela 21 – Casco 05: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Vel. [nós]	(Autor, 2021)		(Tweedie, 2011)	
	Trim [°]	Rt[lbf]	Trim [°]	Rt [lbf]
7	3,14	199,78	3,14	199,79
8	3,37	243,87	3,37	243,89
10	3,90	305,54	3,90	305,56
15	4,61	379,55	4,61	379,56
20	3,97	414,86	3,98	414,87
25	3,18	475,72	3,18	475,73
30	2,57	568,32	2,57	568,32
40	1,79	833,42	1,79	833,37
50	1,34	1186,18	1,35	1186,14
60	1,07	1613,48	1,07	1613,34
70	0,90	2106,54	0,90	2106,00
75	0,83	2375,52	0,83	2375,31
80	0,77	2658,77	0,77	2657,97
90	0,68	3263,98	0,68	3262,68
100	0,61	3916,61	0,61	3915,89

Fonte o Autor (2021)

Tabela 22 – Casco 05: Análise de erros (Tweedie, 2011)

Velocidade [nós]	Erro Relativo [τ]	Erro Relativo [Rt]
7	0,01%	0,01%
8	0,01%	0,01%
10	0,01%	0,01%
15	0,01%	0,00%
20	0,01%	0,00%
25	0,01%	0,00%
30	0,01%	0,00%
40	0,01%	0,01%
50	0,01%	0,00%
60	0,01%	0,01%
70	0,02%	0,03%
75	0,01%	0,01%
80	0,03%	0,03%
90	0,03%	0,04%
100	0,02%	0,02%
Erro Médio	0,01%	0%
Desvio Padrão	0,01%	0%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 23 – Casco 05: Comparação com MaxSurf

Vel[nós]	Resistência Cód[lbf]	Resistência Max[lbf]	Erro Relativo
25	475,72	455,29	4,49%
50	1186,18	1132,53	4,74%
75	2375,52	2314,93	2,62%
100	3916,61	3933,22	0,42%
Erro Médio			4%
Desvio Padrão			2%

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE F - ANÁLISE EMBARCAÇÃO EXPERIMENTAL

Tabela 24 – Casco Experimental: Comparação de resultados (Tweedie, 2011)

Vel [nós]	Casco Exp: 2 Passageiros		Casco Exp: Capacidade Máxima	
	Trim [°]	Trim Planilha [°]	Trim [°]	Trim Planilha [°]
5,94	4,20	4,20	4,79	4,79
7,26	5,05	5,05	5,49	5,49
8,71	6,04	6,04	6,22	6,22
10,17	6,68	6,68	6,96	6,96
12,51	6,62	6,62	8,00	8,00
14,86	5,92	5,92	7,99	7,99
17,21	5,15	5,15	7,16	7,16
19,55	4,47	4,47	6,17	6,17
21,20	4,06	4,06	5,47	5,47
22,85	3,70	3,70	4,87	4,87
24,11	3,46	3,46	4,45	4,46
25,37	3,24	3,24	4,09	4,09
26,18	3,11	3,11	4,01	4,01
26,98	2,99	2,99	3,93	3,93
30,00	2,61	2,61	3,10	3,10

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE G - ANÁLISE EMBARCAÇÃO EXPERIMENTAL COM SOFTWARE COMERCIAL

Tabela 25 – Casco Experimental: Comparação (Tweedie, 2011) e experimentos

Casco Experimental: 2 Passageiros		
Velocidade [nós]	Erro Relativo [Código x Planilha]	Erro Relativo [Código EXP]
5,94	0,01%	
7,26	0,01%	
8,71	0,01%	
10,17	0,01%	5,87%
12,51	0,01%	
14,86	0,01%	10,32%
17,21	0,01%	
19,55	0,01%	15,65%
21,20	0,01%	
22,85	0,01%	7,47%
24,11	0,01%	
25,37	0,01%	7,39%
26,18	0,01%	
26,98	0,01%	14,44%
30,00	0,01%	
Erro Médio	0,01%	8,90%
Desvio Padrão	0,00%	4,04%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 26 – Casco Experimental: Análise de trim (2 Passageiros)

Casco Experimental: 2 Passageiros			
Vel[nós]	Trim Cód[°]	Trim Plan[°]	Trim Exp[°]
5,94	4,20	4,20	
7,26	5,05	5,05	
8,71	6,04	6,04	
10,17	6,68	6,68	7,10
12,51	6,62	6,62	
14,86	5,92	5,92	6,60
17,21	5,15	5,15	
19,55	4,47	4,47	5,30
21,20	4,06	4,06	
22,85	3,70	3,70	4,00
24,11	3,46	3,46	
25,37	3,24	3,24	3,50
26,18	3,11	3,11	
26,98	2,99	2,99	3,50
30,00	2,61	2,61	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 27 – Casco Experimental: Comparação com Orca3D

Vel [nós]	Casco Exp: Resultados											
	2 Passageiros						Capacidade Máxima					
	Código			Orca			Código			Orca		
Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	Trim [°]	Resistência [lbf]	
5,94	185,23	3,43	71,30	4,79	226,16	4,14	135,69					
7,26	283,08	3,73	181,75	5,49	373,43	4,51	234,37					
8,71	357,55	4,05	244,58	6,22	485,92	4,91	333,11					
10,17	418,55	4,39	299,47	6,96	579,09	5,34	399,69					
12,51	494,96	4,92	365,04	8,00	697,09	6,04	501,26					
14,86	513,03	4,99	383,72	7,99	717,99	6,15	530,74					
17,21	508,76	4,58	384,65	7,16	690,22	5,63	520,93					
19,55	511,99	4,01	387,61	6,17	667,29	4,91	506,27					
21,20	526,34	3,58	397,71	5,47	664,36	4,37	502,61					
22,85	550,84	3,20	419,81	4,87	674,89	3,90	512,05					
24,11	576,69	2,93	442,25	4,45	691,71	3,56	527,05					
25,37	607,65	2,70	467,28	4,09	715,16	3,28	546,09					
26,18	616,13	2,65	474,41	4,01	721,96	3,20	549,30					
26,98	624,90	2,59	481,96	3,93	729,15	3,15	557,52					
30,00	755,86	2,05	589,56	3,10	845,69	2,49	650,32					

Fonte o Autor (2021)

Tabela 28 – Casco Experimental: Análise de erros Orca3d (2 Passageiros)

Casco Exp: 2 Passageiros - Código vs Orca		
Velocidade [nós]	Erro Relativo [trim]	Erro Relativo [resistência]
5,94	20,44%	159,78%
7,26	26,58%	55,75%
8,71	31,90%	46,19%
10,17	35,47%	39,76%
12,51	36,82%	35,59%
14,86	33,60%	33,70%
17,21	29,92%	32,27%
19,55	28,24%	32,09%
21,20	27,51%	32,34%
22,85	26,95%	31,21%
24,11	27,02%	30,40%
25,37	26,58%	30,04%
26,18	26,66%	29,87%
26,98	26,78%	29,66%
30,00	27,14%	28,21%
Erro Médio	27,14%	32,27%
Desvio Padrão	4,16%	33,11%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 29 – Casco Experimental: Análise de erros (Tweedie, 2011) (10 passageiros)

Casco Exp: Capacidade Máxima - Código vs Orca		
Velocidade [nós]	Erro Relativo Trim	Erro Relativo Resistência
5,94	15,55%	66,67%
7,26	21,88%	59,33%
8,71	26,54%	45,87%
10,17	30,19%	44,89%
12,51	32,49%	39,07%
14,86	29,97%	35,28%
17,21	27,16%	32,50%
19,55	25,85%	31,80%
21,20	25,29%	32,18%
22,85	25,00%	31,80%
24,11	25,10%	31,24%
25,37	24,78%	30,96%
26,18	25,24%	31,43%
26,98	24,81%	30,78%
30,00	24,81%	30,04%
Erro Médio	25,24%	32,18%
Desvio Padrão	3,86%	11,30%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 30 – Casco Experimental: Análise de trim (Tweedie, 2011) (10 passageiros)

Casco Experimental: Capacidade Máxima			
Vel[nós]	Trim Cód[°]	Trim Plan[°]	Trim Exp[°]
5,94	4,79	4,79	
7,26	5,49	5,49	
8,71	6,22	6,22	
10,17	6,96	6,96	5,40
12,51	8,00	8,00	
14,86	7,99	7,99	8,20
17,21	7,16	7,16	
19,55	6,17	6,17	5,20
21,20	5,47	5,47	
22,85	4,87	4,87	5,90
24,11	4,45	4,46	
25,37	4,09	4,09	5,00
26,18	4,01	4,01	
26,98	3,93	3,93	5,20
30,00	3,10	3,10	

Fonte o Autor (2021)

Tabela 31 – Casco Experimental: Análise de erros (10 passageiros)

Casco Experimental: Capacidade Máxima		
Velocidade [nós]	Erro Relativo [Código x Planilha]	Erro Relativo [Código EXP]
5,94	0,01%	
7,26	0,01%	
8,71	0,02%	
10,17	0,01%	28,84%
12,51	0,01%	
14,86	0,01%	2,54%
17,21	0,02%	
19,55	0,01%	18,74%
21,20	0,01%	
22,85	0,01%	17,48%
24,11	0,01%	
25,37	0,01%	18,17%
26,18	0,01%	
26,98	0,01%	24,49%
30,00	0,01%	
Erro Médio	0,01%	18,45%
Desvio Padrão	0,00%	8,93%

Fonte o Autor (2021)

APÊNDICE H - ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Tabela 32 – Casco Experimental: Análise de instabilidade longitudinal

Velocidade [nós]	Lew.[°] (Autor, 2021)	Ang.[°]	Lew.[°] (Tweedie, 2011)	Ang.[°]	Erro Lew	Erro Ang
5,94	44,30	31,05	44,31	31,05	0,009%	0,000%
7,26	33,51	25,00	33,51	25,00	0,009%	0,000%
8,71	26,84	21,01	26,85	21,01	0,008%	0,000%
10,17	22,11	18,02	22,11	18,02	0,008%	0,000%
12,51	15,78	13,73	15,78	13,73	0,008%	0,001%
14,86	12,02	10,97	12,02	10,97	0,008%	0,001%
17,21	8,94	8,54	8,94	8,54	0,007%	0,001%
19,55	7,06	6,93	7,06	6,93	0,007%	0,001%
21,20	6,04	6,01	6,04	6,01	0,007%	0,001%
22,85	5,28	5,30	5,28	5,30	0,006%	0,001%
24,11	4,81	4,84	4,81	4,84	0,006%	0,001%
25,37	4,42	4,45	4,42	4,45	0,006%	0,001%
26,18	4,33	4,36	4,33	4,36	0,006%	0,001%
26,98	4,24	4,28	4,24	4,28	0,006%	0,001%
30,00	3,45	3,43	3,45	3,43	0,005%	0,001%
Erro Médio					0,007%	0,001%
Desvio Padrão					0,001%	0,000%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 33 – Mapa de calor de instabilidades transversais 1/2

Casco Experimental: Critério de Estabilidade por Velocidade e Adernamento [ft-lbf]							
Adernamento °	Velocidades [nós]						
	5,82	6,78	7,67	8,56	10,41	12,25	14,75
1	9481,37	8468,41	7595,13	6852,72	5981,41	5823,44	5938,48
2	9493,70	8487,21	7621,81	6889,16	6041,57	5906,78	6049,86
3	9506,05	8506,04	7648,53	6925,64	6101,79	5990,21	6161,38
4	9518,41	8524,90	7675,29	6962,18	6162,11	6073,78	6273,10
5	9530,81	8543,79	7702,11	6998,79	6222,56	6157,54	6385,09
6	9543,24	8562,74	7729,01	7035,51	6283,18	6241,53	6497,42
7	9555,71	8581,75	7755,99	7072,35	6344,00	6325,82	6610,15
8	9568,23	8600,84	7783,07	7109,33	6405,06	6410,44	6723,37
9	9580,80	8620,01	7810,27	7146,47	6466,39	6495,45	6837,14
10	9593,44	8639,27	7837,61	7183,80	6528,03	6580,90	6951,55
11	9606,15	8658,64	7865,10	7221,33	6590,01	6666,84	7066,66
12	9618,94	8678,13	7892,76	7259,09	6652,38	6753,34	7182,57
13	9631,82	8697,76	7920,60	7297,11	6715,17	6840,44	7299,35
14	9644,79	8717,53	7948,65	7335,40	6778,42	6928,21	7417,09
15	9657,87	8737,46	7976,93	7374,00	6842,19	7016,71	7535,90
16	9671,07	8757,56	8005,44	7412,93	6906,50	7106,01	7655,85
17	9684,39	8777,85	8034,22	7452,22	6971,42	7196,16	7777,07
18	9697,85	8798,34	8063,29	7491,89	7036,99	7287,26	7899,65
19	9711,45	8819,05	8092,66	7531,98	7103,26	7379,36	8023,72
20	9725,22	8840,00	8122,36	7572,53	7170,28	7472,55	8149,40
21	9739,15	8861,21	8152,43	7613,56	7238,11	7566,92	8276,83
22	9753,28	8882,69	8182,88	7655,12	7306,82	7662,56	8406,15
23	9767,60	8904,47	8213,74	7697,23	7376,47	7759,56	8537,53
24	9782,15	8926,58	8245,05	7739,95	7447,12	7858,03	8671,14
25	9796,93	8949,02	8276,85	7783,32	7518,86	7958,09	8807,18
26	9811,96	8971,85	8309,16	7827,39	7591,77	8059,86	8945,86
27	9827,28	8995,08	8342,03	7872,21	7665,93	8163,47	9087,43
28	9842,89	9018,74	8375,50	7917,84	7741,44	8269,07	9232,17
29	9858,84	9042,89	8409,63	7964,34	7818,41	8376,84	9380,38
30	9875,16	9067,55	8444,46	8011,79	7896,95	8486,95	9532,44
31	9891,87	9092,79	8480,07	8060,26	7977,19	8599,63	9688,78
32	9909,03	9118,64	8516,51	8109,85	8059,29	8715,10	9849,90
33	9926,69	9145,19	8553,88	8160,65	8143,41	8833,64	10016,41
34	9944,92	9172,51	8592,26	8212,79	8229,73	8955,57	10189,06
35	9963,79	9200,68	8631,77	8266,40	8318,48	9081,27	10368,80
36	9983,41	9229,84	8672,55	8321,63	8409,91	9211,18	10556,80
37	10003,92	9260,12	8714,74	8378,69	8504,33	9345,87	10754,64
38	10025,49	9291,70	8758,57	8437,80	8602,10	9486,01	10964,43
39	10048,39	9324,85	8804,28	8499,26	8703,69	9632,47	11189,11
40	10072,99	9359,90	8852,23	8563,45	8809,66	9786,38	11432,95

Fonte o Autor (2021)

Tabela 34 – Mapa de calor de instabilidades transversais 2/2

Casco Experimental: Critério de Estabilidade por Velocidade e Adernamento [ft-lbf]							
Velocidades [nós]							
17,25	19,23	21,20	22,77	24,33	24,72	25,11	30,00
6041,77	6057,14	6012,28	5938,66	5835,47	5805,20	5774,30	5269,73
6179,04	6214,32	6189,42	6131,81	6044,98	6018,87	5992,14	5542,49
6316,48	6371,74	6366,84	6325,32	6254,92	6232,98	6210,45	5816,13
6454,20	6529,49	6544,70	6519,35	6465,50	6447,76	6429,46	6091,08
6592,28	6687,71	6723,15	6714,09	6676,94	6663,46	6649,43	6367,83
6730,82	6846,51	6902,33	6909,73	6889,47	6880,30	6870,61	6646,89
6869,91	7006,01	7082,40	7106,45	7103,35	7098,55	7093,27	6928,79
7009,66	7166,34	7263,54	7304,48	7318,82	7318,49	7317,71	7214,15
7150,17	7327,63	7445,91	7504,02	7536,16	7540,39	7544,22	7503,63
7291,54	7490,03	7629,71	7705,31	7755,66	7764,59	7773,16	7797,99
7433,88	7653,67	7815,11	7908,60	7977,66	7991,42	8004,88	8098,12
7577,31	7818,71	8002,34	8114,15	8202,50	8221,27	8239,80	8405,03
7721,95	7985,32	8191,62	8322,27	8430,59	8454,56	8478,38	8719,92
7867,92	8153,67	8383,20	8533,29	8662,37	8691,78	8721,13	9044,24
8015,37	8323,94	8577,34	8747,57	8898,34	8933,47	8968,67	9379,78
8164,44	8496,35	8774,35	8965,53	9139,09	9180,28	9221,67	9728,71
8315,28	8671,12	8974,56	9187,63	9385,29	9432,93	9480,95	10093,84
8468,08	8848,50	9178,35	9414,43	9637,75	9692,32	9747,49	10478,75
8623,00	9028,76	9386,15	9646,55	9897,40	9959,50	10022,46	10888,18
8780,25	9212,21	9598,47	9884,74	10165,41	10235,75	10307,30	11328,54
8940,06	9399,21	9815,86	10129,89	10443,17	10522,66	10603,80	11808,74
9102,68	9590,14	10039,03	10383,09	10732,47	10822,24	10914,23	12341,63
9268,37	9785,48	10268,78	10645,67	11035,54	11137,06	11241,54	12946,39
9437,47	9985,76	10506,10	10919,28	11355,29	11470,48	11589,63	13653,17
9610,32	10191,61	10752,20	11206,07	11695,60	11827,02	11963,80	14512,28
9787,34	10403,81	11008,62	11508,79	12061,73	12212,94	12371,46	15614,55
9969,03	10623,28	11277,28	11831,14	12461,09	12637,11	12823,32	17142,72
10155,95	10851,17	11560,72	12178,17	12904,45	13112,73	13335,58	19527,56
10348,79	11088,93	11862,33	12557,03	13408,18	13660,23	13933,91	24085,81
10548,41	11338,43	12186,74	12978,20	13998,46	14313,20	14661,80	37714,30
10755,83	11602,10	12540,54	13457,76	14720,11	15131,19	15599,32	-422633,79
10972,38	11883,27	12933,43	14021,80	15656,86	16230,83	16912,17	-10809,39
11199,77	12186,55	13380,38	14715,69	16985,71	17876,56	19008,61	758,39
11440,27	12518,58	13905,88	15626,32	19157,53	20824,00	23240,89	4957,93
11696,95	12889,42	14553,02	16943,88	23763,26	28453,39	38382,71	7243,22
11974,18	13314,98	15405,63	19181,42	43345,49	133615,77	-56131,85	8753,97
12278,35	13822,34	16651,71	24367,71	-29275,73	-8352,28	-1529,00	9877,48
12619,31	14461,61	18819,36	57515,76	839,62	3551,33	5243,31	10781,77
13013,18	15337,59	24185,14	-11002,13	6289,97	7300,56	8054,80	11551,75
13488,40	16713,13	78931,69	4011,42	8723,67	9257,07	9692,71	12235,10

Fonte o Autor (2021)

Tabela 35 – Casco Experimental: Critério de estabilidade transversal 1/2

Adernamento [°]	Velocidades [nós]						
	5,82	6,78	7,67	8,56	10,41	12,25	14,75
1	0,14%	0,24%	0,37%	0,52%	0,69%	0,69%	0,69%
2	0,14%	0,24%	0,37%	0,51%	0,68%	0,67%	0,67%
3	0,14%	0,24%	0,37%	0,51%	0,66%	0,65%	0,64%
4	0,14%	0,24%	0,37%	0,50%	0,65%	0,64%	0,62%
5	0,14%	0,24%	0,36%	0,50%	0,64%	0,62%	0,60%
6	0,14%	0,24%	0,36%	0,49%	0,63%	0,60%	0,58%
7	0,14%	0,24%	0,36%	0,49%	0,62%	0,59%	0,56%
8	0,14%	0,24%	0,36%	0,48%	0,60%	0,57%	0,54%
9	0,14%	0,24%	0,35%	0,48%	0,59%	0,56%	0,53%
10	0,14%	0,23%	0,35%	0,47%	0,58%	0,54%	0,51%
11	0,14%	0,23%	0,35%	0,47%	0,57%	0,53%	0,49%
12	0,14%	0,23%	0,35%	0,46%	0,56%	0,51%	0,47%
13	0,14%	0,23%	0,34%	0,46%	0,55%	0,50%	0,46%
14	0,14%	0,23%	0,34%	0,45%	0,54%	0,48%	0,44%
15	0,14%	0,23%	0,34%	0,45%	0,53%	0,47%	0,42%
16	0,14%	0,23%	0,34%	0,44%	0,52%	0,46%	0,41%
17	0,14%	0,23%	0,33%	0,44%	0,51%	0,44%	0,39%
18	0,13%	0,23%	0,33%	0,43%	0,50%	0,43%	0,38%
19	0,13%	0,22%	0,33%	0,43%	0,49%	0,42%	0,36%
20	0,13%	0,22%	0,33%	0,42%	0,48%	0,41%	0,35%
21	0,13%	0,22%	0,32%	0,42%	0,47%	0,39%	0,34%
22	0,13%	0,22%	0,32%	0,41%	0,46%	0,38%	0,32%
23	0,13%	0,22%	0,32%	0,41%	0,45%	0,37%	0,31%
24	0,13%	0,22%	0,32%	0,40%	0,44%	0,36%	0,30%
25	0,13%	0,22%	0,31%	0,40%	0,43%	0,35%	0,28%
26	0,13%	0,22%	0,31%	0,39%	0,42%	0,33%	0,27%
27	0,13%	0,22%	0,31%	0,39%	0,41%	0,32%	0,26%
28	0,13%	0,21%	0,31%	0,38%	0,40%	0,31%	0,24%
29	0,13%	0,21%	0,30%	0,38%	0,39%	0,30%	0,23%
30	0,13%	0,21%	0,30%	0,37%	0,38%	0,29%	0,22%
31	0,13%	0,21%	0,30%	0,37%	0,37%	0,28%	0,21%
32	0,13%	0,21%	0,29%	0,36%	0,36%	0,27%	0,19%
33	0,13%	0,21%	0,29%	0,36%	0,35%	0,25%	0,18%
34	0,13%	0,21%	0,29%	0,35%	0,34%	0,24%	0,17%
35	0,13%	0,21%	0,29%	0,35%	0,33%	0,23%	0,16%
36	0,13%	0,20%	0,28%	0,34%	0,32%	0,22%	0,15%
37	0,13%	0,20%	0,28%	0,34%	0,31%	0,21%	0,14%
38	0,13%	0,20%	0,28%	0,33%	0,30%	0,20%	0,13%
39	0,13%	0,20%	0,27%	0,33%	0,29%	0,19%	0,12%
40	0,13%	0,20%	0,27%	0,32%	0,28%	0,18%	0,11%
Erro Médio	0,13%	0,22%	0,32%	0,42%	0,47%	0,40%	0,34%
Desvio Padrão	0,01%	0,01%	0,03%	0,06%	0,12%	0,15%	0,17%

Fonte: Autor (2021)

Tabela 36 – Casco Experimental: Critério de estabilidade transversal 2/2

Adernamento [°]	Velocidades [nós]							
	17,25	19,23	21,20	22,77	24,33	24,72	25,11	30,00
1	0,76%	0,84%	0,94%	1,03%	1,14%	1,17%	1,19%	1,61%
2	0,73%	0,80%	0,90%	0,98%	1,07%	1,10%	1,12%	1,48%
3	0,70%	0,77%	0,85%	0,93%	1,01%	1,04%	1,06%	1,37%
4	0,68%	0,74%	0,81%	0,88%	0,96%	0,98%	0,99%	1,26%
5	0,65%	0,70%	0,77%	0,83%	0,90%	0,93%	0,94%	1,16%
6	0,62%	0,67%	0,74%	0,79%	0,85%	0,87%	0,88%	1,07%
7	0,60%	0,65%	0,70%	0,75%	0,80%	0,82%	0,83%	0,99%
8	0,58%	0,62%	0,67%	0,71%	0,76%	0,77%	0,78%	0,91%
9	0,55%	0,59%	0,64%	0,67%	0,71%	0,73%	0,73%	0,83%
10	0,53%	0,56%	0,61%	0,64%	0,67%	0,68%	0,69%	0,76%
11	0,51%	0,54%	0,58%	0,60%	0,63%	0,64%	0,64%	0,69%
12	0,49%	0,52%	0,55%	0,57%	0,59%	0,60%	0,60%	0,63%
13	0,47%	0,49%	0,52%	0,54%	0,56%	0,56%	0,56%	0,56%
14	0,45%	0,47%	0,49%	0,51%	0,52%	0,53%	0,52%	0,50%
15	0,43%	0,45%	0,47%	0,48%	0,49%	0,49%	0,49%	0,44%
16	0,41%	0,43%	0,44%	0,45%	0,45%	0,46%	0,45%	0,38%
17	0,40%	0,40%	0,42%	0,42%	0,42%	0,42%	0,42%	0,33%
18	0,38%	0,38%	0,39%	0,39%	0,39%	0,39%	0,38%	0,27%
19	0,36%	0,36%	0,37%	0,36%	0,35%	0,35%	0,35%	0,21%
20	0,34%	0,34%	0,34%	0,34%	0,32%	0,32%	0,31%	0,15%
21	0,33%	0,33%	0,32%	0,31%	0,29%	0,29%	0,28%	0,09%
22	0,31%	0,31%	0,30%	0,28%	0,26%	0,26%	0,24%	0,02%
23	0,30%	0,29%	0,28%	0,26%	0,23%	0,22%	0,21%	0,05%
24	0,28%	0,27%	0,25%	0,23%	0,20%	0,19%	0,18%	0,13%
25	0,26%	0,25%	0,23%	0,21%	0,17%	0,16%	0,14%	0,22%
26	0,25%	0,23%	0,21%	0,18%	0,13%	0,12%	0,10%	0,34%
27	0,23%	0,22%	0,19%	0,15%	0,10%	0,08%	0,06%	0,48%
28	0,22%	0,20%	0,17%	0,13%	0,06%	0,05%	0,02%	0,67%
29	0,20%	0,18%	0,15%	0,10%	0,03%	0,00%	0,02%	0,96%
30	0,19%	0,16%	0,12%	0,07%	0,01%	0,04%	0,07%	1,55%
31	0,17%	0,15%	0,10%	0,04%	0,06%	0,09%	0,13%	5,94%
32	0,16%	0,13%	0,08%	0,01%	0,11%	0,15%	0,19%	3,72%
33	0,15%	0,11%	0,05%	0,03%	0,16%	0,22%	0,26%	23,70%
34	0,13%	0,09%	0,03%	0,06%	0,21%	0,27%	0,30%	3,34%
35	0,12%	0,08%	0,01%	0,09%	0,18%	0,19%	0,10%	1,83%
36	0,10%	0,06%	0,01%	0,08%	0,74%	6,03%	7,53%	1,26%
37	0,09%	0,05%	0,02%	0,11%	7,50%	8,47%	33,64%	0,95%
38	0,08%	0,04%	0,04%	3,34%	28,28%	6,22%	3,50%	0,75%
39	0,07%	0,05%	0,44%	10,70%	2,64%	1,92%	1,55%	0,61%
40	0,07%	0,10%	9,33%	6,07%	1,30%	1,10%	0,97%	0,50%
Erro Médio	0,34%	0,33%	0,38%	0,40%	0,47%	0,47%	0,47%	0,72%
Desvio Padrão	0,21%	0,24%	1,44%	1,90%	4,52%	1,78%	5,35%	3,76%

Fonte o Autor (2021)

Tabela 37 – Análise de erro relativo geral por velocidade

Velocidade [nós]	Erro Médio	Desvio Padrão
5,82	0,13%	0,01%
6,78	0,22%	0,01%
7,67	0,32%	0,03%
8,56	0,42%	0,06%
10,41	0,47%	0,12%
12,25	0,40%	0,15%
14,75	0,34%	0,17%
17,25	0,34%	0,21%
19,23	0,33%	0,24%
21,20	0,38%	1,44%
22,77	0,40%	1,90%
24,33	0,47%	4,52%
24,72	0,47%	1,78%
25,11	0,47%	5,35%
30,00	0,72%	3,76%
Média	0,40%	0,21%
Desvio Padrão	0,13%	1,82%

Fonte: Autor (2021)

APÊNDICE I - CARACTERÍSTICAS DAS EMBARCAÇÕES ANALISADAS

Tabela 38 – Dados de entrada das embarcações analisadas

Variável	Unid.	1	2	3	4	5	6*
L_{WL}	m	19,81	15,23	7,18	19,64	5,90	6,12
B_{wl}	m	4,27	4,53	2,15	4,45	1,64	*
VCG	m	0,61	0,57	0,14	0,69	0,11	*
LCG	m	8,84	6,56	2,96	7,81	2,37	*
Θ	kg	27000	22147	2294	59159	1234	*
β	°	10,00	21,50	20,20	26,20	15,30	*
β_x	°	10,00	21,50	20,20	26,20	15,30	*
L_x	m	9,91	2,18	3,59	9,91	2,95	*
ϑ	°	0	0	0	0	0	*
ϵ	°	4,00	4,00	1,00	4,00	1,00	*
f	m	0,15	0,06	0,06	0,12	0,15	*
V_{min}	nós	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	5,50
V_{max}	nós	70,00	100,00	100,00	100,00	100,00	30,00
N_v		15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
L_{oa}	m	21,34	17,60	8,26	20,83	6,33	*
B_{oa}	m	4,27	5,17	4,57	4,57	2,04	*
Z	m	0,91	2,80	0,40	1,37	0,28	*
A_{ss}	m ²	3,25**	0	0	0	0	*
N		2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	*
$chord_{tab}$	m	0	0	0	0	0	*
θ		0	0	0	0	0	*
δ	°	0	0	0	0	0	*
$chord_{leme}$	m	0	0	0	0	0	*
t_{rud}	m	0	0	0	0	0	*
A_{rud}	m	0	0	0	0	0	*
x_{rud}	m	0	0	0	0	0	*
y_{rud}	m	0	0	0	0	0	*
d_a	m	0	0	0	0	0	*
l_a	m	0	0	0	0	0	*
x_{axis}	m	0	0	0	0	0	*
y_{axis}	m	0	0	0	0	0	*
$chord_{strut}$	m	0	0	0	0	0	*
t_{strut}	m	0	0	0	0	0	*
A_{strut}	m ²	0	0	0	0	0	*
x_{strut}	m	0	0	0	0	0	*
y_{strut}	m	0	0	0	0	0	*
$H_{\frac{1}{3}}$	m	0	0	0	0	0	0

* Valores Confidenciais

** Valor Zerado Para Segunda Análise