



AVALIAÇÃO DIRETA DOS FENÔMENOS DE SURF-RIDING E GUINADA
BRUSCA DE UM NAVIO PATRULHA POR MEIO DE UM MODELO UNIFICADO
DE MANOBRA E SEAKEEPING

Higor Pereira de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Paulo de Tarso Themistocles
Esperança

Claudio Alexis Rodríguez
Castillo

Rio de Janeiro
Março de 2025

AVALIAÇÃO DIRETA DOS FENÔMENOS DE SURF-RIDING E GUINADA
BRUSCA DE UM NAVIO PATRULHA POR MEIO DE UM MODELO UNIFICADO
DE MANOBRA E SEAKEEPING

Higor Pereira de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientadores: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Aprovado por: Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Prof. Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Prof. Carlos Antonio Levi da Conceição

Prof. Carl Horst Albrecht

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2025

Oliveira, Higor Pereira

Avaliação direta dos fenômenos de surf-riding e guinada brusca em um navio patrulha por meio de um modelo unificado de manobra e seakeeping/ Higor Pereira de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XX, 183 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 105 – 112.

1. Surf-riding. 2. Broaching. 3. Modelo unificado. I. Esperança, Paulo de Tarso Themistocles et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

À minha esposa, Renata,

e ao meu filho, Lucas.

Agradecimentos

Ao concluir esta etapa tão importante da minha vida acadêmica, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha mãe, Eliane, minha maior fonte de motivação, que sempre renunciou a suas próprias ambições para que eu pudesse estudar e me desenvolver, tanto pessoal quanto profissionalmente. Seu apoio incondicional e sua dedicação foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu pai, Humberto, pelo incentivo e pela ajuda na conquista desta oportunidade.

À minha esposa Renata e ao meu filho Lucas, por compreenderem minha ausência e pelas inúmeras vezes em que tiveram que renunciar ao meu tempo e companhia nos últimos dois anos. Seu apoio, paciência e amor foram essenciais para que eu pudesse me dedicar inteiramente a este trabalho.

Ao meu amigo Douglas Cabral, pela ajuda, incentivo e parceria ao longo dessa jornada, sempre disposto a compartilhar conhecimento e a oferecer apoio quando mais precisei.

Aos professores Paulo de Tarso Themistocles Esperança e Claudio Alexis Rodríguez Castillo, pelo imenso comprometimento, pelo compartilhamento de conhecimento e pela orientação valiosa ao longo deste processo. Suas sugestões, conselhos e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa e para minha evolução acadêmica e profissional.

Agradeço também a todos os colegas e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada pessoa que me apoiou, incentivou e acreditou em minha capacidade, minha mais sincera gratidão.

Este trabalho é fruto de muitos esforços e desafios, mas também de muito aprendizado e crescimento. A todos que fizeram parte dessa jornada, meu muito obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DIRETA DOS FENÔMENOS DE SURF-RIDING E GUINADA
BRUSCA DE UM NAVIO PATRULHA POR MEIO DE UM MODELO UNIFICADO
DE MANOBRA E SEAKEEPING

Higor Pereira de Oliveira

Março/2025

Orientadores: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Programa: Engenharia Oceânica

Esta dissertação se dedicou à avaliação direta do fenômeno de surf-riding, um dos cinco modos de falha considerados pela segunda geração de critérios de estabilidade intacta (SGISC) da IMO. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico unificado de manobrabilidade e seakeeping, que integra simultaneamente as forças hidrodinâmicas associadas à manobra e aquelas resultantes da interação com as ondas.

A modelagem foi realizada no software ANSYS AQWA. As forças de propulsão, resistência ao avanço, leme e manobra foram inseridas na simulação por meio de uma rotina de forças externas. As forças de resistência e de propulsão foram modeladas com base em resultados de ensaios experimentais, enquanto as forças do leme e de manobra foram estimadas por modelos empíricos, com calibração dos coeficientes de manobra a partir de ensaios com modelo em escala.

As simulações foram conduzidas para ondas de popa na região identificada pelos critérios de nível 2 da IMO como suscetível a ocorrência de surf-riding. O modelo desenvolvido permite identificar as diversas forças que levam à ocorrência do fenômeno e indicam que, até uma certa altura de onda, o modelo numérico é compatível com o nível 2 de predição de vulnerabilidade da IMO.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIRECT ASSESSMENT OF SURF-RIDING AND BROACHING PHENOMENA
FOR A PATROL VESSEL USING UNIFIED MANEUVERING AND SEAKEEPING
MODEL

Higor Pereira de Oliveira

March/2025

Advisors: Paulo de Tarso Themistocles Esperança
Claudio Alexis Rodríguez Castillo

Department: Ocean Engineering

This dissertation focused on the direct evaluation of the surf-riding phenomenon, one of the five failure modes considered by the second-generation intact stability criteria (SGISC) of the IMO. To achieve this, a unified numerical model of maneuverability and seakeeping was developed, integrating simultaneously the hydrodynamic forces associated with maneuvering and those resulting from wave interaction.

The modeling was carried out using the ANSYS AQWA software. Propulsion, resistance, rudder, and maneuvering forces were incorporated into the simulation through an external forces routine. The resistance and propulsion forces were modeled based on experimental tests results, while the rudder and maneuvering forces were estimated using empirical models, with maneuvering coefficients calibrated from scaled model tests.

Simulations were conducted for following waves in the region identified by the IMO's Level 2 criteria as susceptible to surf-riding. The results allowed for the identification of the forces that lead to the phenomenon and indicate that, up to a certain wave height, the numerical model is compatible with IMO's Level 2 vulnerability prediction.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Siglas.....	xxiv
1 Introdução.....	1
1.1. Contexto	1
1.2. Revisão bibliográfica.....	4
1.2.1. A SGISC na avaliação da estabilidade dinâmica.....	4
1.2.2. Modos de falha em estabilidade dinâmica de um navio-patrolha	5
1.2.3. Métodos de modelagem numérica do surf-rding.....	8
1.3. Objetivo	11
2 O Surf-riding e Broaching.....	13
2.1. Avaliação do Surf-Riding de acordo com a SGISC	14
2.1.1. Nível 1 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching	15
2.1.2. Nível 2 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching	15
2.2. Critérios para modelagem numérica (Nível 3)	17
2.3. Caracterização do Surf-riding/Broaching.....	18
3 Metodologia	20
3.1. Sistemas de referência	22
3.1.1. Referencial inercial fixo <i>FRA</i>	22
3.1.2. Referencial solidário <i>LSA</i>	23
3.2. Transformação entre referenciais	23
3.3. Módulo de forças externas do AQWA.....	27
3.4. Equação de movimento	30
3.5. Ambiente Marinho.....	30

3.6.	Forças hidrodinâmicas e hidrostáticas.....	31
3.7.	Força de manobra	34
3.8.	Força de propulsão e resistência ao avanço.....	36
3.9.	Leme	38
3.10.	Emersão do leme	41
4	Análise dos resultados.....	44
4.1.	Navio Estudo de caso	44
4.2.	Coefficientes hidrodinâmicos	46
4.3.	Simulação de manobras em águas calmas.....	52
4.3.1.	Ajuste dos coeficientes de manobra	52
4.3.2.	Manobras de giro	60
4.3.3.	Manobras de zig-zag.....	63
4.4.	Análise da vulnerabilidade a guinada brusca	65
4.4.1.	Crítério nível 1 da IMO	65
4.4.2.	Crítério nível 2 da IMO	66
4.5.	Avaliação direta do surf-riding e broaching	69
4.5.1.	Avaliação direta do caso 1	71
4.5.2.	Avaliação direta do caso 2	79
4.5.3.	Avaliação direta do caso 3	86
4.5.4.	Avaliação direta de outros casos de interesse	92
4.5.5.	Influência da função de rampa da onda	95
5	Conclusões	99
6	Trabalhos futuros.....	103
7	Referências	105
	Apêndice A: Surf-riding e guinada brusca	113
	Apêndice B: Código de forças externas do AQWA.....	125

Apêndice C: Código para automação do solver do AQWA com forças externas.....	135
Apêndice D: Código de pós processamento de dados do AQWA	139
Apêndice E: Código do critério de vulnerabilidade de nível 2 da IMO	154
Apêndice F: Desenvolvimento da teoria linear de onda.....	162
Apêndice G: Desenvolvimento das forças hidrodinâmicas	169
Apêndice H: Escoamento incidente no leme	176
Apêndice I: Resultados adicionais das simulações numéricas em águas calmas	180

Lista de Figuras

Figura 1 - Amazônia Azul - 5,7 milhões de Km ² e 60.000 km de hidrovias. Fonte: (ESCOTISMO AZUL, 2022).	1
Figura 2 – Vista de perfil do navio patrulha de 500 toneladas Maracanã, classe Macaé. 2	
Figura 3 – Diagrama da análise no domínio do tempo indicando a interface do solver do AQWA com a rotina de forças externas.....	21
Figura 4 - Sistemas de referência.	22
Figura 5 – Velocidades em 6 graus de liberdade (u, v, w, p, q, r) no sistema de referência solidário ao corpo (LSA)......	24
Figura 6 – Vetor de posição e velocidade do navio.	25
Figura 7 – Interação entre a rotina de cálculo de forças externas e o solver do AQWA	28
Figura 8 - Ação do leme na guinada de um navio.	38
Figura 9 – Forças atuantes no leme em um navio em manobra.	40
Figura 10 – Arranjo da emersão do leme.....	42
Figura 11 – Forma do casco renderizada no software Rhinoceros.....	45
Figura 12 – Geração da malha no casco do navio patrulha.	46
Figura 13 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para surge, heave e pitch, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.	47
Figura 14 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para sway, roll e yaw, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.....	48
Figura 15 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para surge, heave e pitch, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.	49

Figura 16 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para sway, roll e yaw, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.....	50
Figura 17 – Coeficientes termos a_{55} , a_{66} e a_{46} sem velocidade de avanço.	52
Figura 18 – Curva de giro para boreste. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°. Coeficientes de manobra ajustado conforme Tabela 7.	55
Figura 19 – Curva de giro para boreste. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°. Coeficientes de manobra ajustados (Tabela 8).	57
Figura 20 – Curva de giro para boreste. Séries temporais dos ângulos de yaw, deriva e do leme. Velocidade de aproximação 19kt e leme a 35°.	58
Figura 21 – Curva de giro para boreste. Séries temporais das velocidades de surge, sway e yaw. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°.	58
Figura 22 – Curva de giro para boreste. Séries temporais das forças e momentos. Velocidade de aproximação 19kt e leme a 35°.	59
Figura 23 – Curvas de giro com leme a 35° respectivamente para bombordo e boreste. Velocidade inicial: 19kt (a) e (b); 17,5kt (c) e (d); 14,3kt (e) e (f).	61
Figura 24 – Curvas de giro com velocidade inicial de 19kt e leme a 35°, 20° e 10°.	62
Figura 25 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a -20°/20° começando.	64
Figura 26 – Cálculo de C2 - nível 2 para surf-riding da IMO SGISC – $F_n = 0,38$	68
Figura 27 – Índice C de probabilidade de ocorrência de surf-riding de acordo com o nível 2 do critério da IMO SGISC.....	68
Figura 28 – Pontos representativos da zona de ocorrência de surf-riding para $F_n = 0,42$, identificada no nível 2, para avaliação direta através do modelo numérico.....	70
Figura 29 – Força de excitação de onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço ($H=1,65m$; $T=5,94s$).	72

Figura 30 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão (9,77m/s) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda (9,26 m/s). Rotação do propulsor constante = 8,23Hz.....	73
Figura 31 – Velocidade de surge do navio (H=1,65m; T=5,94s).....	73
Figura 32 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA (H=1,65m; T=5,94s).	74
Figura 33 – Série temporal de $ZW - RFRA$ (H=1,65m; T=5,94s).	75
Figura 34 – Série temporal área submersa do leme (H=1,65m; T=5,94s).....	76
Figura 35 – Vetores de posição e ângulos de Euler (H=1,65m; T=5,94s).	77
Figura 36 – Vetores de velocidade (H=1,65m; T=5,94s).	78
Figura 37 – Ângulo de roll para simulação com duração de 1500s (H=1,65m; T=5,94s).	79
Figura 38 – Força de excitação de onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço (H=2,07m; T=6,64s).	80
Figura 39 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão (9,77m/s) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda (10,37 m/s). Rotação do propulsor constante = 8,23Hz.....	81
Figura 40 – Velocidade de surge do navio (H=2,07m; T=6,64s).....	81
Figura 41 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA (H=2,07m; T=6,64s).	82
Figura 42 – Série temporal de $ZW - RFRA$ (H=2,07m; T=6,64s).	82
Figura 43 – Vetores de posição e ângulos de Euler (H=2,07m; T=6,64s).	83
Figura 44 – Vetores de velocidade (H=2,07m; T=6,64s).	84
Figura 45 – Ângulo de roll para simulação com duração de 2000s (H=2,07m; T=6,64s).	85

Figura 46 – Força de excitação da onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	86
Figura 47 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão ($9,77m/s$) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda ($13.12 m/s$). Rotação do propulsor constante = $8,23Hz$	87
Figura 48 – Velocidade de surge do navio ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	88
Figura 49 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	88
Figura 50 – Série temporal de $ZW - RFRA$ ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	89
Figura 51 – Vetores de posição e ângulos de Euler ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	90
Figura 52 – Vetores de velocidades ($H=3,3m$; $T=8,4s$).	91
Figura 53 – Pontos representativos no limite da zona de ocorrência de surf-riding para avaliação direta através do modelo numérico.	92
Figura 54 – Exemplo de série da elevação da onda sem (a) e com (b) a função de rampa.	95
Figura 55 – Força de excitação de onda e a diferença entre as forças de propulsão e resistência para: onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08m$; $T=7,03s$).	96
Figura 56 – Série temporal de heave para os casos com a onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08m$; $T=7,03s$).	97
Figura 57 – Série temporal de $ZW - RFRA$ do leme de bombordo para os casos com a onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08m$; $T=7,03s$).	98
Figura 58 - Forças axiais que atuam em um navio navegando em ondas de popa. Fonte: IMO-MSC.1/Circ.1652.	113
Figura 59 – Pequenos movimentos de surging entorno do ponto de autopropulsão. Fonte: IMO-MSC.1/Circ.1652.	114

Figura 60 – a) Curvas de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda em águas calmas e b) força da onda para diferentes posições do navio na onda. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.....	115
Figura 61 – Forças da onda e equilíbrio entre o empuxo do propulsor e a resistência ao avanço para diferentes posições do navio na onda. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.	116
Figura 62 – Perturbação para vante a partir do equilíbrio estável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.....	117
Figura 63 – Perturbação para ré a partir do equilíbrio estável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.....	117
Figura 64 – Perturbação para vante a partir do equilíbrio instável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.....	118
Figura 65 – Perturbação para ré a partir do equilíbrio instável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.....	118
Figura 66 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a $-20^{\circ}/20^{\circ}$ começando.	180
Figura 67 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt e leme entre $20^{\circ}/-20^{\circ}$. Séries temporais dos ângulos de yaw, deriva, leme e roll.	181
Figura 68 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt e leme entre $-20^{\circ}/20^{\circ}$. Séries temporais das velocidades de surge, sway, yaw e roll.....	181
Figura 69 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt, iniciando por boreste e leme entre $-20^{\circ}/-20^{\circ}$. Séries temporais das forças e momentos.	182
Figura 70 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a $10^{\circ}/-10^{\circ}$ começando por bombordo.	182
Figura 71 – Manobra de espiral direta com velocidade de 19kt. Leme variando entre $25^{\circ}/-25^{\circ}$ com incremento de 5°	183

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Nomenclatura de acordo com o grau de liberdade (GL)	24
Tabela 2 – Notação vetorial da posição, atitude e velocidade do navio.	24
Tabela 3 - Tabela comparativa entre a série 60 e o navio patrulha.....	35
Tabela 4 – Características do navio patrulha.	44
Tabela 5 – Comparativo entre o modelo numérico e o casco do navio-patrulha.....	46
Tabela 6 – Correção dos coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial devido à velocidade de avanço.	51
Tabela 7 – Comparativo entre as derivadas hidrodinâmicas de manobra obtidas pelo modelo de Clarke e a parcela potencial obtida através do AQWA, e os coeficientes corrigidos (1ª Correção) conforme 4.3.	53
Tabela 8 – Derivadas hidrodinâmicas de manobra calibradas com base no ensaio experimental de curva de giro.	56
Tabela 9 – Comparativo do diâmetro tático e do avanço para curvas com diferentes velocidades de aproximação, realizadas no modelo numérico e experimental,	62
Tabela 10 - Tabela de comparação entre o número de Froude crítico de acordo com o nível 2 do critério de surf-riding da IMO calculado pelo código Python e apresentado no exemplo do anexo 6 da IMO-MSA.1-Circ.1652.	67
Tabela 11 - Tabela de comparação entre o índice de probabilidade C de acordo com o nível 2 do critério de surf-riding da IMO calculado pelo código Python e apresentado no exemplo do anexo 6 da IMO-MSA.1-Circ.1652.	67
Tabela 12 – Pontos representativos para a avaliação direta.....	70
Tabela 13 – Comparação entre a avaliação da ocorrência do surf-riding pelo nível 2 da IMO com a identificação, pelo modelo numérico, do surf-riding, broaching e perda de estabilidade (V = verificado, NV = não verificado).	93

Tabela 14 - Tabela de dispersão de onda (IMO-MS.C.1-Circ.1627)..... 124

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
V_S	Velocidade de serviço
L	Comprimento do navio
χ	Ângulo de incidência da onda
F_n	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
T_e	Empuxo do propulsor
f_{ij}	Amplitude da força da onda atuando na direção de surge
c	Celeridade da onda
n_{cr}	Rotação crítica do propulsor
$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$	Coefficientes para o cálculo da rotação crítica
r_1, r_2, r_3, r_4, r_5	Coefficientes para o polinômio da força de resistência ao avanço
k_0, k_1, k_2	Coefficientes para o polinômio da força do propulsor
t_p	Fator de redução do empuxo
w_p	Fator de esteira
k	Número da onda
J	Coefficiente de avanço
ρ	Massa específica da água salgada
n	Rotação do propulsor em Hz
D_p	Diâmetro do propulsor
M	Massa do navio
M_x	Massa adicional do navio na direção de surge

H	Altura da onda
F_{c_i}	Componente da força de Froude-Krylov
F_{s_i}	Componentes da força de surge
x_m	Posição longitudinal da baliza m em relação a meia nau do navio
δx_m	Distância entre balizas
$d(x_m)$	Calado na seção m em águas calmas
$S(x_m)$	Área da porção submersa da baliza m em águas calmas r
λ	Comprimento da onda
s_j	Declividade da onda
r_i	Razão de comprimento da onda
Δs	Incremento da declividade da onda
Δr	Incremento da razão de comprimento da onda
u_{cr}	velocidade crítica do navio
Fn_{cr}	Número de Froude crítico
$C2_{ij}$	Coefficiente que indica a ocorrência de surf-riding
C	Índice de probabilidade e ocorrência de surf-riding
w_{ij}	Peso estatístico de uma onda
T_Z	Período de cruzamento zero
H_s	Altura significativa da onda
R_{SR}	Limite para a vulnerabilidade ao surf-riding
$W2$	Fator de ponderação do estado do mar de curto prazo especificado
FRA	Referencial inercial fixo FRA
$O, x_{FRA}, y_{FRA}, z_{FRA}$	Origem e eixos do referencial FRA
LSA	Referencial solidário LSA

$CG, x_{LSA}, y_{LSA}, z_{LSA}$	Origem e eixos do referencial LSA
ψ	Ângulo de yaw ou rotação no eixo z_{LSA}
θ	Ângulo de pitch ou rotação no eixo y_{LSA}
ϕ	Ângulo de roll ou rotação no eixo x_{LSA}
u	Velocidade instantânea na direção longitudinal expressa em LSA
v	Velocidade instantânea na direção transversal expressa em LSA
w	Velocidade instantânea na direção vertical expressa em LSA
p	Velocidade instantânea de roll expressa em LSA
q	Velocidade instantânea de pitch expressa em LSA
r	Velocidade instantânea de yaw expressa em LSA
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	Velocidade instantânea em surge, sway e yaw expressa em FRA
$\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$	Derivadas temporais dos ângulos de Euler
$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$	Aceleração instantânea em surge, sway e yaw expressa em LSA
R_{LSA}^{FRA}	Matriz de transformação de LSA para FRA
R_{FRA}^{LSA}	Matriz de transformação de FRA para LSA
$r_{LSA/FRA}^{FRA}$	Vetor de posição de LSA em relação a FRA expresso em FRA
$\Theta_{LSA/FRA}$	Ângulos de Euler
$v_{LSA/FRA}^{LSA}$	Vetor de velocidades lineares expresso em LSA
$\dot{r}_{LSA/FRA}^{FRA}$	Vetor de velocidades lineares expresso em FRA
$\dot{\Theta}_{LSA/FRA}$	Derivadas dos ângulos de Euler
$\omega_{LSA/FRA}^{LSA}$	Vetor de velocidades angulares expresso em LSA
M_{RB}	Matriz de massa do navio
$C_{RB}^{LSA}(v)$	Matriz coriolis-centrípeta

U	Velocidade instantânea resultante entre as componentes u e v
η	Vetor de posição e orientação do navio
$\dot{\eta}$	Vetor de aceleração do navio
τ^{LSA}	Vetor de forças e momentos externos expresso em LSA
T	Período da onda
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	Momento de inércia
I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}	Momento de inércia cruzado
F_H	Vetor de forças e momentos hidrostáticos
F_{FK}	Vetor de forças e momentos de Froude-Krylov
F_{DF}	Vetor de forças e momentos de difração
F_{RAD}	Vetor de forças e momentos de radiação
F_{PROP}	Vetor de forças e momentos de propulsão
F_{RESIT}	Vetor de forças e momentos de resistência ao avanço
F_{LEME}	Vetor de forças e momentos do leme
F_{MAN}	Vetor de forças e momentos de manobra
X, Y, Z, K, M, N	Componentes de forças e momentos externos nos 6 GL
B	Boca do navio
C_B	Coefficiente de bloco
$Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$	Coefficientes de manobra relativos à massa adicional
Y_v, Y_r, N_v, N_r	Coefficientes de manobra relativos ao amortecimento
$b'_{22}, b'_{26}, b'_{62}, b'_{66}$	Coefficientes adimensionais de amortecimento potencial
K_T	Coefficiente de empuxo do propulsor
δ	Ângulo do leme
β	Ângulo de deriva do navio

C_T	Coeficiente de carregamento de empuxo
V_x	Velocidade do escoamento no leme na direção x_{LSA}
a_H	Fator de aumento de força no leme
Δx	Deslocamento do centro de atuação da força transversal do leme
C_L	Coeficiente de sustentação do leme
C_D	Coeficiente de arrasto do leme
Λ	Razão de aspecto do leme
C_{D0}	Coeficiente de arrasto friccional do leme
Rn	Número de Reynolds
<i>Lift</i>	Força de sustentação do leme
<i>Drag</i>	Força de arrasto do leme
V_y	Velocidade do escoamento no leme na direção y_{LSA}
V_R	Velocidade resultante do escoamento no leme na direção
γ	Ângulo entre as componentes V_x e V_y
α	Ângulo de ataque do leme
B	Boca do navio
X_{CG}^{FRA}	Posição longitudinal do CG em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
Z_{CG}^{FRA}	Posição vertical do CG em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
$x_R^{LSA}, y_R^{LSA}, z_R^{LSA}$	Coordenadas da posição do topo do leme em relação ao centro de gravidade, expressas no referencial LSA.
Z_W^{FRA}	Elevação da superfície livre da onda em relação a origem do referencial FRA, medida na coordenada longitudinal do centro de leme, expressa no referencial FRA.

Z_R^{FRA}	Posição vertical do centro do leme em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
Z_{W-R}^{FRA}	Elevação da superfície livre da onda em relação ao centro de leme, medido na coordenada longitudinal do centro de leme, expressa no referencial FRA.
ζ_W	Amplitude da onda
ω	Frequência da onda
x_R, y_R, z_R	vetor de localização do leme em relação a origem de b
Δ	Deslocamento do navio

Lista de Siglas

AJB	-	Águas Jurisdicionais Brasileiras
END	-	Estratégia Nacional de Defesa
SGISC	-	Second Generation Intact Stability Criteria
IMO	-	International Maritime Organization
APL	-	American President Lines
PR	-	Parametric Roll
PL	-	Pure Loss
SR	-	Surf-riding/Broaching-to
DS	-	Dead Ship
EA	-	Excessive Acceleration
ONR	-	Office of Naval Research
FREMM	-	Fregata Europea Multi-Missione
CPL	-	Continuous Piecewise Linear Approximation
GL	-	Grau de Liberdade
CFD	-	Computational Fluid Dynamic
PMM	-	Planar Motion Mechanism
MARIN	-	Maritime Research Institute Netherlands
LSTM	-	Long Short-Term Memory
TCP	-	Transmission Control Protocol
ITTC	-	International Towing Tank Conference

CG	-	Centro de Gravidade
BB	-	Bombordo
BE	-	Boreste
LCG	-	Longitudinal Center of Gravity
TCG	-	Transversal Center of Gravity
VCG	-	Vertical Center of Gravity
LCB	-	Longitudinal Center of Buoyancy
TCB	-	Transversal Center of Buoyancy
VCB	-	Vertical Center of Buoyancy
SM	-	Seção Mestra

1 Introdução

1.1. Contexto

Os recursos marítimos e as vias navegáveis interiores desempenham um papel fundamental para o Brasil. Dentro das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), o país detém direitos de soberania e exploração econômica de recursos até 200 milhas náuticas do litoral, incluindo o solo e subsolo das áreas submarinas, conforme estabelecido pelos limites da Plataforma Continental. Essa área compreende aproximadamente 5,7 milhões de km², incluindo cerca de 60.000 km de hidrovias (MARINHA DO BRASIL, 2020). A vasta Floresta Amazônica, reconhecida como a maior floresta tropical do mundo, cobre uma área de aproximadamente 6,74 milhões de km². Inspirado por essa relevância, surgiu em 2005 o conceito de "Amazônia Azul", referindo-se à região que se estende do litoral até o limite exterior da Plataforma Continental brasileira.



Figura 1 - Amazônia Azul - 5,7 milhões de Km² e 60.000 km de hidrovias. Fonte: (ESCOTISMO AZUL, 2022).

A Amazônia Azul é uma área de extrema importância estratégica, abrigando vastos recursos naturais e biodiversidade. Essa região é responsável por cerca de 95% do petróleo, 80% do gás natural e 45% de toda a produção pesqueira do país. Além disso, mais de 95% do comércio exterior brasileiro utiliza suas vias marítimas (MARINHA DO

BRASIL, 2019). Dada sua relevância econômica e ambiental, sua proteção e exploração sustentável são cruciais para o presente e o futuro do Brasil.

Com base nessa perspectiva, a Estratégia Nacional de Defesa (END) de 2008 (BRASIL, 2008) estabeleceu diretrizes para garantir a soberania na extensa costa brasileira, enfatizando a importância de vigilância constante e a presença do Estado. Para isso, a utilização de meios navais, incluindo embarcações como os navios-patrolha, desempenha um importante papel. Esses navios, além de seu baixo custo e dimensões compactas, são considerados como multipropósito, sendo empregados em inspeções de pesca, patrulhas antipirataria, busca, salvamento, e defesa de plataformas de petróleo (MARINHA DO BRASIL, 2017).

Diante dessa necessidade, a Marinha retomou a construção de navios patrulha no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, com os projetos do “Maracanã” e “Mangaratiba”. Trata-se de navios de 500 toneladas, sendo que o Maracanã já foi concluído e está em operação, enquanto o Mangaratiba encontra-se em fase final de construção até a presente data. Originalmente, ambos os navios tiveram suas construções iniciadas no estaleiro civil Ilha S.A., mas, devido à descontinuidade das atividades do estaleiro, a construção foi transferida para o Arsenal de Marinha.



Figura 2 – Vista de perfil do navio patrulha de 500 toneladas Maracanã, classe Macaé.

Além disso, a partir de 2015, a Marinha iniciou o desenvolvimento do projeto básico de engenharia de novos navios-patrolha de 500 toneladas, com o objetivo de aprimorar as capacidades da classe “Macaé”. Baseado no projeto francês Vigilante 400 CL54, o NPa classe Macaé já havia recebido diversas atualizações em seus equipamentos embarcados. Contudo, os novos projetos foram concebidos para atender às demandas

operacionais do século XXI, trazendo melhorias significativas em relação à classe anterior. As inovações incluem maior capacidade operativa, aumento do raio de ação, redução do custo do ciclo de vida e maior velocidade de serviço.

Em setembro de 2020, o Plano Estratégico da Marinha 2040 (MARINHA DO BRASIL, 2020) foi promulgado, reforçando a necessidade de modernização da frota. Entre as diretrizes estratégicas, destaca-se a obtenção de novos navios-patrolha de 500 toneladas, voltados à proteção da Amazônia Azul e à substituição daqueles que estão próximos do fim de sua vida útil. Esse contexto evidencia a relevância crescente desses navios no cenário de defesa marítima do Brasil, consolidando-os como peças-chave na proteção das águas jurisdicionais do país.

Com as adaptações introduzidas no projeto da classe Macaé e o desenvolvimento de um novo modelo de navio-patrolha de 500 toneladas, torna-se essencial avaliar a estabilidade dinâmica dessas embarcações em condições de mar adversas. Considerando suas atividades operacionais, que frequentemente envolvem enfrentamento de situações hostis, é crucial garantir que esses navios mantenham níveis adequados de estabilidade para assegurar a continuidade de suas missões, mesmo em mares agitados. Essa avaliação é particularmente importante para preservar a segurança das operações e a eficácia dos meios empregados na proteção da Amazônia Azul.

Nesse contexto, a Segunda Geração de Critérios de Estabilidade Intacta (SGISC), desenvolvido pela Organização Marítima Internacional (IMO), se apresenta como uma importante ferramenta de projeto no que diz respeito à estabilidade do navio, introduzindo um novo conjunto de regras que abordam cinco diferentes modos de vulnerabilidade em ondas: perda pura de estabilidade, roll paramétrico, condição de navio inoperante, surf-riding / guinada brusca (broaching-to) e aceleração excessiva. Pela regra, cada modo de falha pode ser avaliado em três níveis distintos, do mais rigoroso (nível 1) ao menos rigoroso (nível 3). Este último totalmente baseado em simulações dinâmicas numéricas ou experimentais no domínio do tempo.

Os navios da frota atual da Marinha do Brasil foram projetados antes da formulação da SGISC e, até o momento, inexistem estudos que avaliem a estabilidade intacta dessas embarcações sob esses novos critérios. Diante disso, e considerando o crescente destaque dos navios-patrolha na proteção da Amazônia Azul, torna-se

indispensável investigar sua vulnerabilidade às falhas de estabilidade dinâmica. Essa investigação não apenas contribuirá para assegurar o desempenho seguro e eficiente dessas embarcações em cenários desafiadores, mas também fortalecerá a capacidade da Marinha em garantir a soberania e a exploração sustentável dos recursos marítimos brasileiros.

1.2. Revisão bibliográfica

1.2.1. A SGISC na avaliação da estabilidade dinâmica

Os critérios de estabilidade da IMO, conhecidos como 2008 IS CODE, baseiam-se nas curvas de estabilidade estática e têm sido a principal referência para avaliar a estabilidade e o equilíbrio de navios e estruturas offshore. Contudo, mesmo quando esses critérios são cumpridos, relatos de acidentes envolvendo embarcações submetidas a condições severas de mar, como os casos do APL China, M/V Aratere e Chicago Express (PETERS *et al.*, 2011), evidenciam as limitações desses critérios em situações extremas. Tais incidentes destacam a necessidade de critérios mais abrangentes e dinâmicos para lidar com os desafios impostos por mares agitados.

MARLANTES *et al.* (2021) reforçam essa perspectiva ao discutir a urgência de adotar critérios dinâmicos e adaptativos, como os propostos pela SGISC da IMO. Esses critérios visam preencher as lacunas deixadas pelo 2008 IS CODE, fornecendo ferramentas para avaliar a estabilidade de embarcações em condições operacionais mais exigentes.

Estudos recentes corroboram essas observações. OLIVEIRA *et al.* (2020), por exemplo, demonstraram, por meio de análises numéricas e experimentais, que uma balsa pode ser vulnerável ao emborcamento em certas condições de carregamento e mar, mesmo quando atende aos critérios tradicionais da IMO. Da mesma forma, SHIN *et al.* (2023) destacaram a importância de avaliar modos específicos de falha, como o roll paramétrico, especialmente em embarcações químicas, para garantir a segurança em cenários de mar severo.

Outro estudo relevante é o de SZOZDA E KRATA (2022), que avaliou a credibilidade dos critérios da SGISC ao analisar o naufrágio do navio pesqueiro polonês Cyranka, no Mar do Norte, após uma guinada brusca provocada por uma onda de popa.

O navio foi considerado vulnerável de acordo com os critérios de surf-riding e guinada brusca, segundo os padrões da SGISC, evidenciando a confiabilidade desses critérios para identificar falhas críticas de estabilidade.

A SGISC foi desenvolvida para abordar modos de falha que não são adequadamente considerados nos critérios de primeira geração. Esses modos incluem roll paramétrico, perda pura de estabilidade, surf-riding/guinada brusca, aceleração excessiva e condição inoperante. Tais modos são particularmente relevantes em condições de ondas, onde a estabilidade dinâmica é crítica. A SGISC fornece uma abordagem estruturada para avaliar vulnerabilidades em múltiplos níveis, permitindo um diagnóstico mais completo e elevando os padrões de segurança (PETACCO & GUALENI, 2020).

Além de garantir maior segurança operacional, a adoção dos critérios da SGISC tem potencial para melhorar decisões relacionadas ao projeto e operação de navios. Por exemplo, PETACCO *et al.* (2021) realizaram modificações no projeto do casco de um navio porta-contêineres sem lastro, utilizando os critérios da SGISC como referência. O estudo resultou em uma redução significativa do risco de falha de estabilidade em ondas, demonstrando a aplicabilidade prática desses critérios em projetos inovadores.

Em resumo, a SGISC da IMO se mostra uma ferramenta robusta e representa um avanço significativo na avaliação da estabilidade de navios em ondas. Sua abordagem integrada permite identificar vulnerabilidades específicas, ao mesmo tempo em que orienta estratégias operacionais e de projeto para mitigar riscos de forma eficaz.

1.2.2. Modos de falha em estabilidade dinâmica de um navio-patrolha

Embora os critérios da SGISC da IMO não tenham sido originalmente concebidos para navios de guerra, sua aplicação a esse tipo de embarcação tem sido amplamente explorada nos últimos anos. Estudos recentes investigam a vulnerabilidade de navios militares a modos de falha de estabilidade dinâmica em ondas, como roll paramétrico (PR), perda pura de estabilidade (PL), surf-riding/guinada brusca (SR), condição de navio inoperante (DS) e aceleração excessiva (EA).

O critério de aceleração excessiva (EA) foi aplicado por BOCCADAMO E ROSANO (2019) em cascos de navios militares, incluindo os modelos da série sistemática D, o ONR Tumblehome e a fragata multiuso europeia FREMM. Esses cascos,

caracterizados por sua geometria de semi-deslocamento com espelho de popa e bojo arredondado, apresentaram períodos de roll relativamente baixos e significativas variações na geometria vertical, tornando-os, segundo os autores, suscetíveis ao fenômeno de EA. A análise revelou que o KG mínimo permitido para cumprir com o Nível 2 do critério de EA da IMO foi consistentemente maior do que o KG máximo permitido pelos critérios da RINA (Registro Italiano Navale) de estabilidade intacta para navios militares, indicando incompatibilidade entre os dois critérios e sugerindo que esses navios podem falhar no Nível 2 do critério de EA mesmo sendo aprovados pela RINA.

ROSANO *et al.* (2020) corroboraram esses resultados ao aplicar o critério de EA em cascos militares como o principal modelo da Série Sistemática D e o ONR Tumblehome. Os autores reforçam que a geometria do casco e os períodos reduzidos de roll são fatores críticos de vulnerabilidade, reforçando a necessidade de mais estudos sobre esse fenômeno de EA para esses navios.

GRINNAERT *et al.* (2016) ampliaram essa análise para navios como porta-helicópteros, destróieres e navios-patrolha offshore, avaliando os modos de PR e PL segundo os níveis 1 e 2 da SGISC. Os resultados mostraram que esses navios, com formas clássicas de cascos militares, não apresentaram vulnerabilidades a esses modos de falha.

PETACCO E GUALENI (2023) investigaram a influência da estabilidade do navio de guerra em ondas nos perfis operacionais. A SGISC foi utilizada para elaborar medidas operacionais para três navios militares, incluindo um navio patrulha. Os resultados foram apresentados em forma de diagramas polares para cada modo de falha e indicam as combinações de aproamento e velocidade adequadas para cada estado de mar. Os resultados indicam nenhuma embarcação precisa de orientação operacional para os modos de falha de PR e PL, independentemente do estado do mar considerado.

Por outro lado, TOMASZEK E BASSLER (2015) analisaram oito navios de guerra nos critérios de PR e SR, observando que seis navios falharam no critério de SR e um no critério de PR. Entre os avaliados, um navio-patrolha, com comprimento e velocidade semelhantes aos NPa-500 brasileiros, demonstrou vulnerabilidade significativa ao modo de SR, evidenciando a relevância desse fenômeno para navios de pequeno porte.

A vulnerabilidade ao SR também foi investigada por REAY E ENSHAEI (2017) em um navio-patrolha da Nova Zelândia. Os resultados indicaram que o navio era suscetível a surf-riding/guinada brusca, reforçando a necessidade de considerar esse critério em análises de estabilidade dinâmica para embarcações militares.

BEGOVIĆ *et al.* (2018) e BEGOVIĆ *et al.* (2019) aprofundaram o estudo do SR e PL em cascos da Série D, incluindo os modelos D1 e D5, o ONR Tumblehome e uma fragata. Suas análises apontaram vulnerabilidades ao PR em velocidades inferiores a 20 nós e ao SR em velocidades superiores a 23,5 nós, mostrando que a velocidade operacional é um fator determinante para a estabilidade desses navios.

Com base nesses estudos sobre a avaliação dos modos de falha em estabilidade em ondas em navios de emprego militar, é possível concluir que os modos de falha de aceleração excessiva e surf-riding/guinada brusca se mostram como problemas recorrentes para navios militares de pequeno porte, como o NPa-500 brasileiro. Isto ocorre especialmente devido à variação na geometria do casco no sentido vertical, aos períodos de roll mais baixos, ao comprimento reduzido e ao elevado número de Froude, que são características desses navios.

Embora não se possa descartar a vulnerabilidade do navio-patrolha aos modos de perda pura de estabilidade e roll paramétrico, a literatura sugere que navios com características semelhantes apresentam menor suscetibilidade a esses modos segundo os critérios de segunda geração da IMO. Da mesma forma, a avaliação do modo de falha de navio inoperante pode ser considerada de menor relevância, já que embarcações militares dessa classe possuem sistemas redundantes de propulsão e energia, mitigando significativamente os riscos associados a essa condição.

Portanto, esta pesquisa se restringirá ao fenômeno de surf-riding e seus desdobramentos, como a guinada brusca, sem incluir a avaliação da falha por aceleração excessiva. Essa escolha se baseia na natureza das instabilidades analisadas. Enquanto o surf-riding está diretamente relacionado à perda de estabilidade, o fenômeno de EA está mais associado ao conforto da tripulação, sendo um critério mais relevante para navios mercantes e embarcações de transporte de passageiros.

1.2.3. Métodos de modelagem numérica do surf-riding

Os primeiros estudos sobre surf-riding e broaching surgiram nas décadas de 1950 e 1960, com pesquisas experimentais e teóricas voltadas para a compreensão do comportamento de navios em mares de popa. GRIM (1951, 1963) investigou o fenômeno do surging e sua relação com a perda de controle direcional. Seu estudo demonstrou que, sob certas condições, a embarcação pode acelerar até a velocidade da onda, resultando em instabilidades que podem levar ao surf-riding e, eventualmente, ao broaching.

Paralelamente, DU CANE (1957, 1961) conduziu experimentos com modelos de cascos de alta velocidade, avaliando a influência das ondas de popa na estabilidade direcional. Suas pesquisas mostraram que a redução da eficácia do leme e a influência das forças hidrodinâmicas da onda podem fazer com que o navio perca sua capacidade de corrigir o rumo, aumentando o risco de broaching.

RENILSON (1981) desenvolveu um modelo matemático baseado nas equações de manobra para investigar as condições em que ocorre o broaching e identificar os principais fatores que influenciam a suscetibilidade de um navio a esse fenômeno. Em seu modelo, os coeficientes hidrodinâmicos variam com a posição longitudinal do navio na onda, mas são independentes da frequência de encontro. Adicionalmente, utilizou a teoria de faixas para calcular os coeficientes e validou os resultados por meio de experimentos com modelos físicos.

Os resultados indicaram que a combinação entre um alto momento de guinada induzido pela onda e a perda de eficácia do leme são os principais fatores que levam ao broaching. Além disso, foi demonstrado que a suposição de que o broaching ocorre devido à perda de estabilidade direcional, conforme avaliada pelos critérios de estabilidade em águas calmas, não se sustenta.

UMEDA (1982) estudou o fenômeno de surf-riding, concentrando-se na descrição qualitativa e observação do fenômeno. Em seu trabalho, o autor analisou, de forma teórica e experimental, a variação da resistência de ondas e sua influência no surf-riding, utilizando a hipótese de Froude-Krylov como base. Através de experimentos com modelos restritos e simulações numéricas, ele demonstrou que a resistência ao avanço varia significativamente ao longo de um ciclo de onda, especialmente em condições de mares de popa.

Posteriormente, UMEDA (1999) avançou para abordagens numéricas mais complexas, incorporando modelos dinâmicos não lineares com quatro graus de liberdade (surge, sway, yaw e roll) e a inclusão da ação do leme. Em ambos os estudos, ele avaliou os pontos fixos dos modelos e sua estabilidade, destacando a relação entre bifurcações e a perda de estabilidade dinâmica.

SPYROU (2006) utilizou um modelo desacoplado de surge para resolver a equação de movimento por meio do método de Melnikov. Este trabalho fundamentou a avaliação de vulnerabilidade de segundo nível da IMO, BEGOVIC *et al.* (2020). O método de Melnikov, originalmente apresentado por HOLMES (1980), é uma abordagem analítica que testa a estabilidade da resposta dinâmica de um navio, verificando a presença de bifurcações homoclínicas ou heteroclínicas, sendo estas últimas o limiar para o início do surf-riding.

MAKI *et al.* (2014) compararam diferentes métodos para resolver a equação de movimento de surge, incluindo testes experimentais, análises de bifurcação numérica e abordagens analíticas, como o método de Melnikov e a aproximação linear contínua por partes (CPL). A comparação com os experimentos demonstrou que ambas as metodologias analíticas apresentaram boa precisão na previsão dos limites de surf-riding.

FENG *et al.* (2015) avaliaram a vulnerabilidade ao surf-riding de navios amostrais segundo a SGISC, realizando análises de sensibilidade sobre os parâmetros de entrada. Concluíram que uma incerteza de 5% na previsão da resistência ao avanço pode gerar variações de até 16% no índice C, enquanto a escolha da ordem dos polinômios para ajustar as curvas de resistência e propulsão pode impactar os resultados em até 29,5%. Já uma variação de 10% nos coeficientes de propulsão K_T , w_p e t_p resulta em uma diferença de 1 a 3% no valor de C. A maior influência, entretanto, foi atribuída à força de surge induzida pela onda, onde diferenças de até 50% foram relatadas ao incluir ou excluir a correção devido a variação da superfície molhada por causa da onda nas forças de Froude-Krylov.

BEGOVIC *et al.* (2018) focaram na análise da vulnerabilidade ao surf-riding e broaching em cascos da Série D, utilizando as formulações da SGISC. Os resultados mostraram que os índices C calculados com base na celeridade de onda linear foram mais conservadores do que os obtidos pela abordagem não linear. O efeito de difração foi

destacado como um fator crítico, pois a negligência desse componente leva a uma superestimativa das forças de avanço induzidas por ondas. Para cálculos mais precisos, os autores utilizaram o método dos painéis (3D) no software HydroSTAR, que considera as forças de Froude-Krylov e de difração, resultando em índices C inferiores aos da abordagem da teoria de faixas.

Em ACANFORA (2019), o fenômeno de surf-riding foi avaliado utilizando duas abordagens complementares: um modelo não linear com 1 grau de liberdade (1GL), resolvido analiticamente por meio da análise de bifurcação homoclínica, e um modelo com 6 GL, que incluía as forças de propulsão, leme e variações na superfície molhada do casco para cálculo das forças de restauração e Froude-Krylov. Inicialmente, o modelo 1GL foi utilizado para identificar as condições críticas para o surgimento do surf-riding, sendo essas posteriormente avaliadas no modelo 6GL, permitindo uma análise mais detalhada do impacto das não linearidades. Os resultados mostraram que o modelo 1GL apresentou-se mais conservador em comparação ao 6GL, devido à sua formulação simplificada. Como conclusão, a autora propôs uma metodologia em duas etapas: o uso inicial do modelo 1GL, mais rápido e simples, para determinar os valores críticos das inclinações das ondas, seguido pela aplicação do modelo 6GL para refinar os resultados e incluir efeitos não lineares, garantindo maior precisão na avaliação.

HASHIMOTO *et al.* (2019) validaram o uso de CFD para prever forças induzidas por ondas em mares irregulares de popa, comparando os resultados numéricos com experimentos. A boa concordância entre as simulações e os dados experimentais reforçou a confiabilidade do CFD para essas aplicações.

GUALENI *et al.* (2020) simularam a dinâmica de três embarcações em 6GL, investigando surf-riding e guinada brusca em mares de popa. Utilizando o software PANSHIP, baseado em métodos de painel com modelos viscosos semiempíricos, foram simulados dois iates e um navio-patrolha. A análise revelou discrepâncias significativas entre os critérios de segundo nível da IMO e as simulações numéricas, incluindo casos em que o critério da IMO não indicava vulnerabilidade, mas a análise direta demonstrava o contrário.

BEGOVIC *et al.* (2020) aplicaram CFD com 3GL para estudar surf-riding, explorando a influência do campo de velocidade da onda na força de propulsão e no

cálculo das forças de Froude-Krylov. As simulações, realizadas com o software Naval Hydro Pack, identificaram melhorias potenciais na precisão ao considerar esses efeitos.

ILIC E BACKALOV (2023) investigaram o surf-riding em navios da Série MARIN, aplicando os critérios de segundo nível da SGISC. O estudo calculou as velocidades máximas permitidas dos navios, avaliando diferentes métodos para determinar a resistência ao avanço e a força de surge de ondas. Os resultados indicaram que a resistência ao avanço tem impacto mínimo nos cálculos, mas os efeitos de difração na força de surge da onda são determinantes, influenciando significativamente as velocidades máximas permitidas. Foi observado que navios menores da série MARIN são mais sensíveis a modelos mais precisos de resistência e força de onda, ressaltando a necessidade de incluir os efeitos de difração para garantir uma avaliação mais confiável da vulnerabilidade ao surf-riding.

XU *et al.* (2024) investigaram a previsão de surf-riding e broaching em embarcações navegando em ondas oblíquas de popa utilizando uma arquitetura de redes neurais Long Short-Term Memory (LSTM). A metodologia combinou simulações numéricas para geração de dados com aprendizado de máquina aplicado à previsão dos fenômenos, usando como base dados de movimento de um trimarã equipado com piloto automático. Os resultados mostraram que a integração de aprendizado multi-condicional, otimização das características de entrada e vetores de estado melhorou significativamente a precisão das redes LSTM na previsão de surf-riding e broaching em diversas condições de onda. As conclusões destacaram a eficácia do método híbrido, apontando-o como uma ferramenta promissora para estratégias proativas de segurança e controle em condições marítimas adversas.

1.3. Objetivo

Esta pesquisa baseia-se na possibilidade de que os navios-patrolha da Marinha do Brasil sejam vulneráveis a falhas de estabilidade dinâmica, em especial aos fenômenos de surf-riding e broaching, devido às alterações no projeto e em áreas de navegação ao longo do tempo. Tal preocupação decorre da questão de que os navios da frota atual foram projetados antes da formulação da SGISC, e inexistem estudos que avaliem sua adequação aos novos critérios. Além disso, a susceptibilidade desse tipo de embarcação

aos fenômenos citados, conforme discutido na introdução, reforça a necessidade de investigação.

A hipótese que fundamenta a condução desta pesquisa considera que é possível aprofundar a aplicação dos critérios de níveis mais altos (níveis 2 e/ou 3) da SGISC, por exemplo, por meio da avaliação direta do fenômeno de surf-riding em situações específicas de projeto (design situations), utilizando simulações numéricas no domínio do tempo.

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é investigar a vulnerabilidade de um navio-patrolha típico ao fenômeno de surf-riding e seus desdobramentos, como o broaching (i.e., a guinada brusca), por meio de simulações no domínio do tempo que permitam identificar e compreender os mecanismos físicos associados à ocorrência do surf-riding e do broaching em diferentes condições de operação. A análise priorizará uma abordagem mais elaborada do que os critérios de vulnerabilidade dos níveis 1 e 2 da SGISC, mas sem alcançar a complexidade de uma avaliação probabilística completa do nível 3. Para atingir o objetivo geral, os seguintes tópicos serão abordados:

- a) Desenvolver um procedimento para simular numericamente os fenômenos de surf-riding e broaching;
- b) Aplicar os critérios da SGISC para investigar as zonas de suscetibilidade do navio-patrolha ao surf-riding e broaching;
- c) Selecionar casos representativos das zonas de ocorrências identificadas no nível 2 de vulnerabilidade da SGISC e realizar análises aprofundadas através de um modelo numérico de predição de movimentos no domínio do tempo, buscando compreender os mecanismos físicos envolvidos;
- d) Avaliar a capacidade e as limitações da ferramenta computacional para aplicações na avaliação direta de surf-riding, fornecendo subsídios para futuras melhorias no procedimento desenvolvido.

2 O Surf-riding e Broaching

Ao navegar em ondas de popa, uma embarcação está suscetível ao fenômeno de surf-riding, no qual a onda captura o navio e o acelera até alcançar a velocidade de fase da onda. Nessa condição, a maioria das embarcações tende a ser direcionalmente instável mesmo com a ação do leme, o que pode levar o navio a guinar bruscamente, realizando uma curva acentuada e assumir um ângulo significativo de banda, podendo apresentar falha de estabilidade. A IMO-MSC.1-Circ.1627 define que a falha de estabilidade é caracterizada pela ocorrência de pelo menos um dos seguintes eventos:

- a) O ângulo de roll excede o menor valor entre:
 - 40°;
 - o ângulo de perda de estabilidade positiva; ou
 - o ângulo em que as aberturas do convés ficam submersas.
- b) A aceleração lateral excede $9,81\text{m/s}^2$ no ponto mais elevado onde a tripulação ou passageiros possam estar presentes.

De acordo com a IMO-MSC.1-Circ.1652, para que o surf-riding ocorra, algumas condições precisam ser satisfeitas: o comprimento de onda deve ser próximo ao comprimento do navio; a onda deve ter declividade necessária para produzir uma força suficientemente grande; e a velocidade e o rumo do navio devem ser próximos à velocidade e direção da onda.

Ainda de acordo com a referência, quando um navio avança em ondas periódicas, três forças principais atuam na direção axial: o empuxo do propulsor, a resistência ao avanço, e as forças da onda, que pode agir contra ou a favor do avanço do navio, dependendo de sua posição na onda. A força de excitação da onda desequilibra o balanço de forças no eixo longitudinal do navio (em relação ao cenário de águas calmas), resultando em acelerações e variações na velocidade instantânea nessa direção. Isto, por sua vez, implica em alterações nas forças de propulsão e de resistência ao avanço.

Neste ponto, é relevante pontuar que na teoria clássica de seakeeping (teoria linear de primeira ordem) consideram-se apenas pequenas oscilações de velocidade do navio em torno de uma velocidade média de avanço. Nesta abordagem, as forças de resistência

ao avanço e de propulsão são consideradas constantes. Além disso, as forças de onda de primeira ordem são periódicas e não dependem da posição do navio na onda.

Porém, neste trabalho, é considerada a superfície molhada instantânea para o cálculo das forças de excitação de onda. Esta consideração introduz uma não-linearidade no modelo, pois a força da onda passa a depender diretamente da superfície molhada momentânea, que varia com a posição do navio na onda. Conseqüentemente, as flutuações na superfície molhada resultam em variações da força da onda, que se refletem diretamente nas flutuações na velocidade instantânea do navio e nas forças de resistência ao avanço e de propulsão.

Adicionalmente, a IMO-MSC.1-Circ.1652 esclarece que, caso a magnitude da força de excitação da onda seja suficiente para compensar a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço, o navio é acelerado por esta força de excitação até alcançar a celeridade da onda, passando a navegar juntamente com ela (caracterizando o surf-riding). Por outro lado, quando essa força não é suficiente, as ondas ultrapassam o navio, induzindo um movimento periódico denominado surging.

O Apêndice A apresenta uma descrição detalhada dos fenômenos de surf-riding e surging, fundamentada no equilíbrio das forças longitudinais atuantes sobre o navio, conforme abordado nas notas explanatórias da IMO MSC.1/Circ.1652.

2.1. Avaliação do Surf-Riding de acordo com a SGISC

O fenômeno de surf-riding é frequentemente observado como um precursor do broaching (IMO-MSC.1-Circ.1652) e por isso ele é utilizado como base para estabelecer critérios de vulnerabilidade desse tipo de instabilidade.

Os critérios da segunda geração de estabilidade intacta estabelecidos pela IMO seguem uma estrutura dividida em três níveis, que aumentam progressivamente em complexidade. Os níveis iniciais, 1 e 2, têm o propósito de determinar se uma embarcação é vulnerável aos fenômenos de instabilidade, enquanto o nível 3 permite uma avaliação direta da estabilidade dinâmica do navio.

A aplicação dos critérios de estabilidade não segue uma ordem rígida e pode ser iniciada por qualquer nível. Se o resultado da avaliação indicar vulnerabilidade no nível

inicial escolhido, recomenda-se avançar para o nível seguinte, que é menos conservador. Caso a vulnerabilidade seja confirmada nos diferentes níveis, o projeto da embarcação pode precisar ser revisado ou pode-se desenvolver orientações operacionais, fornecidas ao comandante do navio para auxiliar na tomada de decisões operacionais.

2.1.1. Nível 1 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching

De acordo com a IMO-MSC.1/Circ.1627, um navio é considerado vulnerável ao surf-riding se:

$$\begin{aligned} F_n &\geq 0,3 \text{ ou} \\ L &\leq 200m \end{aligned} \quad (2.1)$$

Portanto, de acordo com o nível 1, um navio que possuir comprimento superior a 200 metros ou operar com número de Froude inferior a 0,3 não é considerado vulnerável ao fenômeno de surf-riding.

2.1.2. Nível 2 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching

O procedimento da IMO para avaliar o nível 2 de vulnerabilidade ao surf-riding, conforme SHIN *et al.* (2021), pode ser dividido em quatro partes conforme apresentado a seguir de forma resumida. A apresentação completa do nível 2, conforme definido na IMO-MSC.1/Circ.1627, é apresentada no Apêndice A.

A primeira parte considera o cálculo da rotação crítica do hélice, n_{cr} , obtido pela solução da equação de movimento de surge do navio em ondas de popa.

A segunda parte consiste em calcular o número de Froude crítico, obtido a partir da velocidade crítica do navio. A velocidade crítica do navio (u_{cr}) é calculada a partir da solução da equação de equilíbrio entre o empuxo (T_e) e a resistência (R):

$$T_e(u_{cr}; n_{cr}) - R(u_{cr}) = 0 \quad (2.2)$$

Onde $T_e(u_{cr}; n_{cr})$ é o empuxo entregue pelo propulsor do navio em águas calmas, na velocidade u_{cr} e na rotação crítica n_{cr} , e $R(u_{cr})$ é a resistência ao avanço, também em águas calmas, na velocidade u_{cr} .

Determinada a velocidade u_{cr} que equilibra a equação 2.2, é calculado o número de Froude crítico Fn_{cr} correspondente ao limite de ocorrência de surf-riding:

$$Fn_{cr} = u_{cr}/\sqrt{gL} \quad (2.3)$$

O número de Froude crítico é analisado para ondas com diferentes combinações de declividades s_j e razões de comprimento r_i :

$$0,03 \leq s_j = \frac{H_{ij}}{\lambda} \leq 0,15 \quad \Delta s = 0,0012 \quad (2.4)$$

$$1,0 \leq r_i = \frac{\lambda_i}{L} \leq 3,0 \quad \Delta r = 0,025 \quad (2.5)$$

Posteriormente, ele é comparado com o Froude da embarcação calculado na velocidade de serviço. A partir dessa comparação é definido o coeficiente $C2_{ij}$, que recebe o valor unitário 1 se a onda ij em questão implicar em um número de Froude crítico inferior ao Froude na velocidade de serviço. Caso contrário, $C2_{ij}$ recebe o valor 0, excluindo a onda ij do cálculo do índice C da probabilidade de ocorrência do surf-riding:

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } Fn > Fn_{cr}(r_i, s_j) \\ 0 & \text{if } Fn \leq Fn_{cr}(r_i, s_j) \end{cases} \quad (2.6)$$

A terceira parte refere-se ao cálculo do peso estatístico de uma onda (w_{ij}) com declividade s_j e a razão de comprimento r_i , como função da altura significativa da onda, Hs , e do período de cruzamento zero, Tz . A expressão para w_{ij} também é apresentada no Apêndice A.

Por último, a quarta parte consiste em obter o resultado da vulnerabilidade do navio através do cálculo do índice de probabilidade C , feito através da média dos valores de $C2_{ij}$ obtidos. Um navio é considerado como não vulnerável a perda de estabilidade devido ao fenômeno de surf-riding no nível 2 se:

$$C \leq R_{SR} \quad (2.7)$$

Onde $R_{SR} = 0,005$.

2.2. Critérios para modelagem numérica (Nível 3)

A avaliação direta da estabilidade (nível 3) requer a aplicação de modelos capazes de simular com precisão o comportamento do navio em ondas. Esses modelos podem ser baseados em simulações numéricas ou testes com modelos físicos. A IMO-MSC.1-Circ.1627 recomenda que, nas simulações numéricas, os seguintes requisitos gerais:

- As forças de Froude-Krylov devem ser calculadas utilizando a forma exata do casco empregando, por exemplo, métodos baseados em painéis ou teoria de faixas.
- As forças de radiação e difração podem ser representadas utilizando coeficientes aproximados ou através de uma solução exata para o problema de contorno associado à geometria do casco.
- As forças de resistência ao avanço devem ser obtidas, preferencialmente, por meio de ensaios em modelos físicos.
- O empuxo do propulsor pode ser estimado utilizando modelos baseados em coeficientes aproximados, que levem em conta as interações entre o propulsor e o casco.
- Para o modo de falha por surf-riding/broaching, as simulações do movimento do navio devem considerar, no mínimo, quatro graus de liberdade: surge, sway, roll e yaw.
- Além disso, os coeficientes hidrodinâmicos relacionados aos movimentos de sway e yaw podem ser estimados a partir de: testes experimentais com mecanismo de movimento planar (PMM); simulações CFD; ou por modelos empíricos.

Após a modelagem numérica, a IMO-MSC.1-Circ.1627 define critérios para o processo de avaliação desses modelos, que é dividido em duas fases: qualitativa e quantitativa. Na fase qualitativa, o objetivo é avaliar se o modelo é capaz de reproduzir os fenômenos físicos relevantes para o modo de falha em análise. Já na fase quantitativa, busca-se determinar o grau de precisão dos resultados do modelo na previsão do modo de falha específico considerado.

Segundo a IMO-MSC.1/Circ.1627, para a avaliação qualitativa de um modelo numérico que simula os fenômenos de surf-riding e broaching, é necessário que o modelo seja capaz de:

- Reproduzir o fenômeno de surf-riding enquanto o ângulo de yaw permanece fixo. O critério de aceitação é observar a navegação do navio com velocidade igual à celeridade da onda enquanto o RPM do propulsor é definido para a velocidade em águas calmas. Além disso, é esperado que o centro de gravidade do navio fique posicionado próximo ao cavado da onda.
- Reproduzir o adernamento causado durante uma manobra de curva de giro. O critério de aceitação é observar o desenvolvimento do ângulo de banda conforme a curva é executada.
- Executar uma curva de giro em águas calmas. O critério de aceitação é verificar se a direção da curva está correta ao aplicar grandes ângulos de leme.

A avaliação quantitativa é realizada através da comparação dos resultados das simulações numéricas com os resultados dos experimentos com modelo. Para o surf-riding, a declividade das ondas que causam o surf, quando o comprimento de onda está entre 0,75 e 1,5 vezes o comprimento do navio, deve apresentar uma diferença de até 15% entre os resultados dos testes com modelos físicos e as simulações numéricas.

2.3. Caracterização do Surf-riding/Broaching

Uma vez definidos os critérios para a modelagem numérica e a avaliação do modelo, a IMO-MSC.1-Circ.1627 estabelece critérios para caracterizar quando o modo de falha ocorre. De acordo com a referência, o broaching relacionado ao surf-riding pode ser caracterizado quando tanto o ângulo de yaw (ψ) quanto a velocidade angular de yaw (r) aumentam ao longo do tempo. Sendo assim, a caracterização desse fenômeno é feita a partir das séries temporais de ψ e r .

A fim de caracterizar o fenômeno de surf-riding, imaginemos primeiramente uma embarcação navegando em águas calmas com trajetória retilínea a uma velocidade constante V_S . Neste momento, existe um equilíbrio entre as forças de propulsão e de resistência ao avanço. Agora imaginemos uma onda de popa com velocidade de propagação superior a V_S e que atinge o navio pela popa. A partir daqui, para que a embarcação passe a navegar com velocidade igual a celeridade da onda, conforme abordado no início deste capítulo, é preciso que a força que essa onda impõe no navio seja suficiente para compensar a diferença entre a força propulsiva e a resistência ao avanço do navio em águas calmas na celeridade da onda.

Dessa forma, para uma avaliação direta do surf-riding, são utilizadas simulações no domínio do tempo da embarcação navegando em ondas de popa. A análise da ocorrência do surf-riding é feita a partir das séries temporais das forças de propulsão, resistência ao avanço e das forças de excitação de ondas (difração e Froude-Krylov). Espera-se verificar se a força da onda equilibra a diferença entre as forças de propulsão e resistência. Caso isso seja observado, deve-se analisar se a velocidade de surge aumenta até atingir a celeridade da onda, caracterizando assim o surf-riding.

Portanto, como estratégia para a avaliação direta dos fenômenos de surf-riding e broaching, propõe-se inicialmente analisar a vulnerabilidade do navio-patrolha com base nos critérios de níveis 1 e 2 da IMO. No nível 2, espera-se identificar as combinações críticas de declividade e comprimento de onda que favorecem a ocorrência do surf-riding.

Em seguida, pretende-se analisar pontos específicos que levam ao surf-riding, identificados pelo nível 2, por meio de uma avaliação direta com o modelo numérico de predição de movimentos no domínio do tempo, verificando o comportamento das séries temporais da resposta do navio nas condições de onda previamente identificadas como propícias ao fenômeno, permitindo uma compreensão mais detalhada e precisa do comportamento da embarcação.

3 Metodologia

O estudo da dinâmica do navio é tradicionalmente segmentado em duas grandes áreas de estudo: a teoria de manobra e a teoria de seakeeping. De acordo com PEREZ E FOSSEN (2007), a teoria da manobra trata do movimento do navio em águas calmas, sem a influência direta de ondas, e geralmente está relacionada a operações como a manutenção do curso, manobras de giro e de zig-zag. Já a teoria de seakeeping analisa os efeitos da excitação das ondas sobre o movimento da embarcação, considerando seu rumo e velocidade de avanço, e normalmente é relacionada ao comportamento do navio parado ou navegando sob o efeito das ondas.

Uma das principais diferenças entre essas abordagens está no sistema de coordenadas adotado para descrever as equações de movimento. Na teoria de manobra, as equações são formuladas em relação a um referencial solidário ao navio (fixo ao corpo), enquanto em seakeeping as equações são formuladas em relação a um referencial de equilíbrio preso no plano médio de flutuação, mas que acompanha a velocidade média e o rumo da embarcação.

Embora as teorias de manobra e seakeeping sejam tradicionalmente tratadas como áreas distintas, alguns fenômenos ocorrem na interseção entre elas, como, por exemplo, o surf-riding e o broaching. Isso levanta a questão de como combinar as teorias disponíveis de forma eficiente. Quando se trata de simulações no domínio do tempo, uma opção é utilizar um modelo unificado de manobra e seakeeping, FOSSEN E PEREZ (2007). No modelo unificado, as componentes de força de baixa frequência, relacionadas aos modelos de manobra, e as componentes de alta frequência, relacionadas aos modelos de seakeeping, são linearmente sobrepostas para formular a excitação total do corpo a cada passo de tempo.

Nesta pesquisa, foi feita a escolha de utilizar o software comercial de seakeeping ANSYS AQWA para as simulações no domínio do tempo. Essa escolha se deve, principalmente, pela capacidade do software em calcular as forças de Froude-Krylov integrando as pressões hidrodinâmicas sobre a superfície molhada instantânea do casco, considerando, assim, o efeito da variação da superfície molhada por causa da onda. Conforme destacado por FENG *et al.* (2015), esta não linearidade é o parâmetro de maior

influência no cálculo do índice de vulnerabilidade ao surf-riding, impactando em até 50% o resultado do índice.

O Ansys AQWA é um software numérico baseado na teoria potencial que utiliza o método dos painéis 3D. Ele é capaz de realizar análises dinâmicas no domínio do tempo, permitindo simular o comportamento de corpos flutuantes em resposta a ondas regulares ou irregulares, bem como sob efeito de vento e de corrente marinha. A cada intervalo de tempo na simulação, são calculadas as forças instantâneas de excitação de onda. Já as forças de radiação são calculadas a partir dos coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial, obtidos previamente através de uma análise no domínio da frequência e armazenados em um banco de dados do software. As acelerações do corpo são obtidas pela solução das equações de movimento e, a partir delas, determinam-se as velocidades, posições e ângulos de Euler.

No entanto, o AQWA não é capaz de simular diretamente manobras de giro, zig-zag e até mesmo o surf-riding, já que não é possível inserir nativamente forças como as de propulsão, resistência ao avanço e leme, incluindo o controle de sua deflexão. Desta forma, neste trabalho foi desenvolvido um código em Python (descrito no capítulo 3.3) que, a cada passo de tempo, insere essas forças no cálculo. A interface entre a rotina de forças externas com o solver do AQWA é ilustrada na Figura 3.

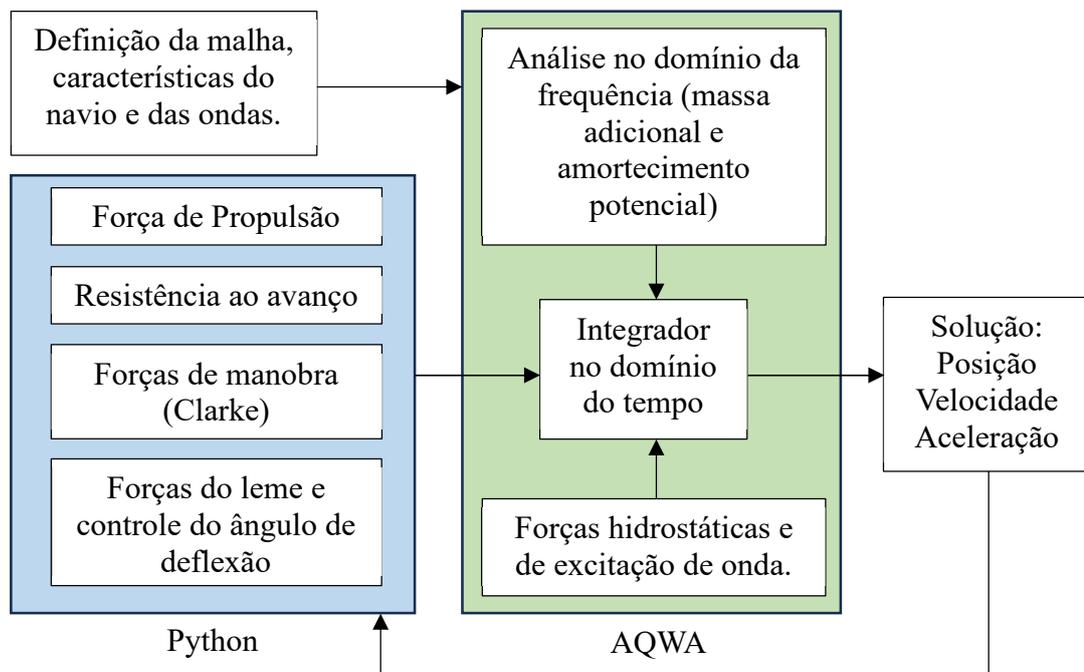


Figura 3 – Diagrama da análise no domínio do tempo indicando a interface do solver do AQWA com a rotina de forças externas

3.1. Sistemas de referência

Os sistemas de referência utilizados no modelo matemático para expressar as forças e movimentos do navio são descritos a seguir. São eles o referencial inercial fixo $FRA \{O, x_{FRA}, y_{FRA}, z_{FRA}\}$ e o referencial solidário $LSA \{CG, x_{LSA}, y_{LSA}, z_{LSA}\}$, os mesmos utilizados no AQWA de acordo com o manual teórico.

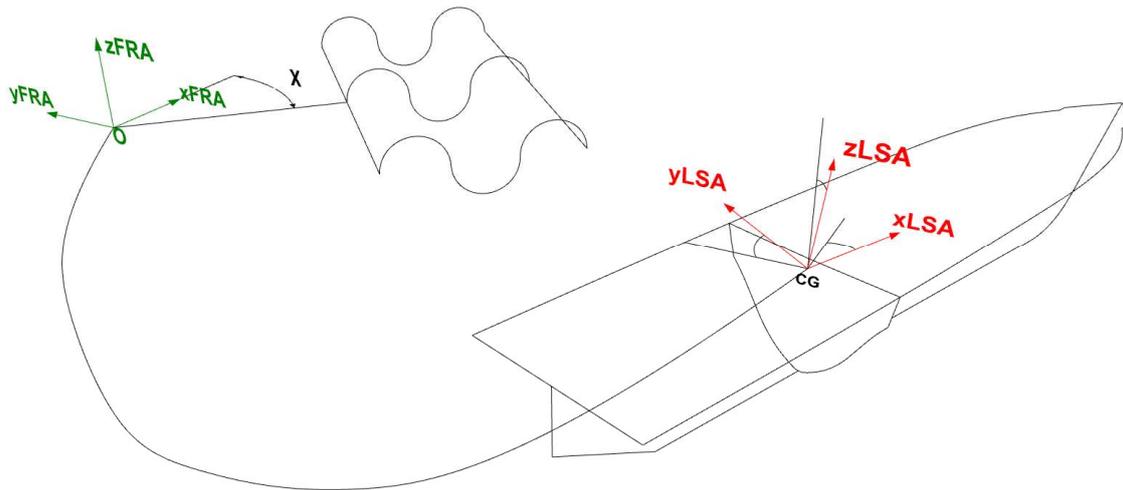


Figura 4 - Sistemas de referência.

3.1.1. Referencial inercial fixo FRA

O sistema de coordenadas inercial fixo FRA tem sua origem na superfície livre média do fluido, na interseção do espelho de popa com a linha de centro. O eixo z_{FRA} aponta para cima e os eixos x_{FRA} e y_{FRA} formam um plano que coincide com a superfície média da água, x_{FRA} apontando inicialmente para a proa do navio e y_{FRA} para bombordo. Esse referencial acompanha os movimentos da Terra, mas não se moverá em nenhuma etapa da análise.

É em relação a este sistema que serão expressos todos os deslocamentos translacionais e rotacionais da embarcação a cada passo de tempo. É também a partir dele que é definido o ângulo de incidência de onda χ .

Também é este referencial que o AQWA utiliza internamente para expressar forças, posição, velocidade e acelerações locais do navio, i.e., em relação a ele mesmo.

3.1.2. Referencial solidário *LSA*

É um sistema de coordenadas móvel, com origem no centro de gravidade do navio, eixo x_{LSA} apontando para a proa, eixo y_{LSA} para bombordo e z_{LSA} para cima. Seus eixos são inicialmente paralelos aos eixos do sistema inercial fixo *FRA*, porém, este sistema acompanha os movimentos do navio nos seis graus de liberdade.

Este é o referencial no qual o presente trabalho calcula localmente as forças e momentos do leme, de propulsão, resistência ao avanço e de manobra para logo serem incorporados no solver do AQWA. Também a partir dele que serão expressos os resultados dessa pesquisa.

3.2. Transformação entre referenciais

A dinâmica do navio será modelada no ANSYS AQWA, que expressa os vetores de posição, velocidade, aceleração e força no referencial *FRA*. No entanto, as forças de leme, propulsão, resistência ao avanço e manobra são calculadas no referencial solidário ao casco *LSA*, pois esse sistema de coordenadas é mais adequado para representar os efeitos dos atuadores.

Essas forças são expressas em função de algumas das saídas do AQWA, em especial o vetor de velocidade, e posteriormente reinseridas no software para a continuidade da simulação. Dessa forma, torna-se essencial realizar a transformação das variáveis de movimento (posição, velocidade e aceleração), bem como das forças atuantes, entre os referenciais *FRA* e *LSA*, garantindo a consistência do modelo numérico e a correta integração nas equações de movimento.

Uma embarcação, livre para se movimentar em seis graus de liberdade (GL), pode assumir movimentos de translação em três direções distintas (surge, sway e heave) ao longo dos eixos x_{LSA} , y_{LSA} e z_{LSA} respectivamente, e movimentos de rotação (roll, pitch e yaw) em relação a cada um dos eixos, ver Figura 5 e Tabela 1.

As forças, momentos, deslocamentos e velocidades que o navio pode assumir em cada GL é apresentada na Tabela 1, definidas de acordo com a SNAME (1950). Essas grandezas são expressas em uma forma vetorial na Tabela 2, de acordo com FOSSEN (2011).

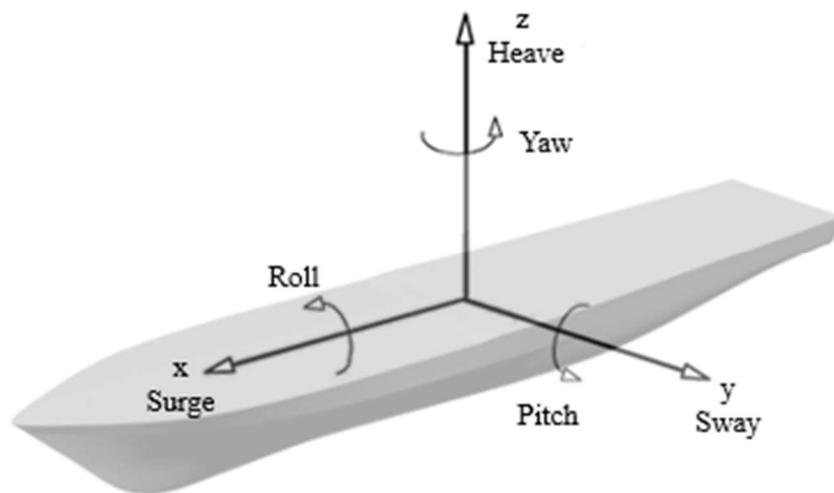


Figura 5 – Velocidades em 6 graus de liberdade (u, v, w, p, q, r) no sistema de referência solidário ao corpo (LSA).

Tabela 1 - Nomenclatura de acordo com o grau de liberdade (GL)

GL		Forças e Momentos	Velocidades lineares e angulares	Posição e ângulos de Euler
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z
4	Roll	K	p	ϕ
5	Pitch	M	q	θ
6	Yaw	N	r	ψ

Tabela 2 – Notação vetorial da posição, atitude e velocidade do navio.

Referencial	FRA	LSA
Posição	$r_{LSA/FRA}^{FRA} = [x, y, z]^T$	-
Atitude (ângulos de Euler)	$\Theta_{LSA/FRA} = [\phi, \theta, \psi]^T$	-
Velocidade linear	$\dot{r}_{LSA/FRA}^{FRA} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$	$v_{LSA/FRA}^{LSA} = [u, v, w]^T$
Velocidade angular	$\dot{\Theta}_{LSA/FRA} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$	$\omega_{LSA/FRA}^{LSA} = [p, q, r]^T$
Forças	-	$f_{LSA}^{LSA} = [X, Y, Z]^T$
Momentos	-	$m_{LSA}^{LSA} = [K, M, N]^T$

A notação é tal que, para o vetor $r_{LSA/FRA}^{FRA}$ por exemplo, o subscrito LSA/FRA significa que o vetor r descreve a posição da origem do sistema LSA (CG) em relação a origem do referencial FRA . O sobrescrito FRA significa que o vetor é decomposto em FRA . Seguindo a notação de FOSSEN (2011), o vetor que descreve a posição e orientação do navio é definido como:

$$\eta = \begin{bmatrix} r_{LSA/FRA}^{FRA} \\ \Theta_{LSA/FRA} \end{bmatrix} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (3.1)$$

Já os vetores que definem a velocidade e as forças e momentos são definidos no referencial solidário como:

$$v = \begin{bmatrix} v_{LSA/FRA}^{LSA} \\ \omega_{LSA/FRA}^{LSA} \end{bmatrix} = [u, v, w, p, q, r]^T \quad (3.2)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} f_{LSA}^{LSA} \\ m_{LSA}^{LSA} \end{bmatrix} = [X, Y, Z, K, M, N]^T \quad (3.3)$$

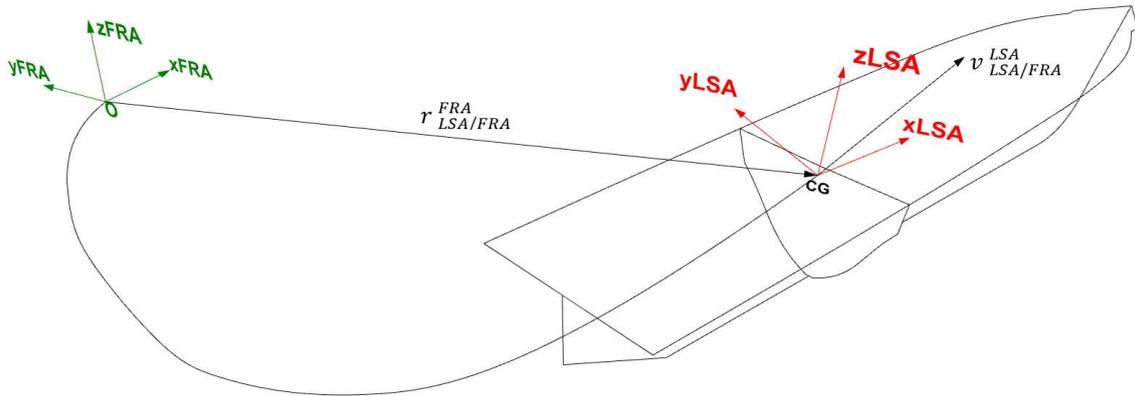


Figura 6 – Vetor de posição e velocidade do navio.

A orientação (ou atitude) do sistema de coordenadas móvel LSA em relação ao sistema fixo FRA pode ser definida por meio de três rotações sequenciais em torno dos eixos principais, que ajustam o sistema FRA para coincidir com LSA .

Segundo FOSSEN E PEREZ (2007), no contexto de navegação, essas rotações são realizadas de acordo com os ângulos de Euler, que são aplicados na seguinte sequência:

- 1) Rotação em torno do eixo z de FRA em um ângulo ψ (yaw), resultando no referencial intermediário FRA^2 ;
- 2) Rotação ao redor do eixo y de FRA em um ângulo θ (pitch), resultando no referencial intermediário FRA^3 ;
- 3) Rotação ao redor do eixo x de um ângulo ϕ (roll), resultando no referencial LSA .

As rotações seguem a convenção de mão direita, ou seja, no sentido positivo da rotação em torno de cada eixo

Utilizando essa sequência de rotações individuais, a matriz de rotação que define a orientação relativa de LSA em relação a FRA é expressa por:

$$R_{LSA}^{FRA}(\Theta_{LSA/FRA}) = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (3.4)$$

$$R_{LSA}^{FRA} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Onde os índices c e s representam, respectivamente, as funções cosseno e seno.

Então, sendo o vetor $v_{LSA/FRA}^{LSA}$ um vetor livre que expressa a velocidade linear da origem de LSA em relação a FRA , expresso em LSA , esse mesmo vetor pode ser expresso em FRA através da matriz de transformação R_{LSA}^{FRA} :

$$\dot{r}_{LSA/FRA}^{FRA} = R_{LSA}^{FRA} \cdot v_{LSA/FRA}^{LSA} \quad (3.6)$$

A transformação inversa, de FRA para LSA , é realizada aplicando a matriz de rotação na ordem reversa das rotações (roll, pitch e yaw):

$$R_{FRA}^{LSA}(\Theta_{LSA/FRA}) = R_{x,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = R_{LSA}^{FRA^{-1}} = R_{LSA}^{FRA^T} \quad (3.7)$$

Como a matriz de rotação é ortogonal, a matriz inversa é igual a sua transposta.

$$v_{LSA/FRA}^{LSA} = R_{LSA}^{FRA^T} \cdot \dot{r}_{LSA/FRA}^{FRA} \quad (3.8)$$

Embora os ângulos de Euler não sejam vetores, as velocidades angulares são. Sendo evidente que a forma como a velocidade angular de um navio, com componentes p , q e r , variam no tempo depende da forma como os ângulos de Euler ϕ , θ e ψ variam.

Essa relação é deduzida em BISHOP (1982) e FOSSEN (2011) através da matriz de rotação $T_{\Theta}(\Theta_{LSA/FRA})$:

$$\dot{\Theta}_{LSA/FRA} = T_{\Theta}(\Theta_{LSA/FRA}) \cdot \omega_{LSA/FRA}^{LSA} \quad (3.9)$$

$$\omega_{LSA/FRA}^{LSA} = T_{\Theta}(\Theta_{LSA/FRA})^{-1} \cdot \dot{\Theta}_{LSA/FRA} \quad (3.10)$$

Onde:

$$T_{\Theta} = \begin{bmatrix} 1 & -\text{sen}\phi \text{tg}\theta & \text{cos}\phi \text{tg}\theta \\ 0 & \text{cos}\phi & -\text{sen}\phi \\ 0 & \text{sen}\phi/\text{cos}\theta & \text{cos}\phi/\text{cos}\theta \end{bmatrix}, T_{\Theta}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen}\theta \\ 0 & \text{cos}\phi & \text{cos}\theta \text{sen}\phi \\ 0 & -\text{sen}\phi & \text{cos}\theta/\text{cos}\phi \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3. Módulo de forças externas do AQWA

A implementação das forças de propulsão, resistência ao avanço, do leme e de manobra neste software é realizada através de uma rotina de cálculo de forças externas chamada “User-Defined Force Calculation”. Essa rotina é acionada através de um servidor de forças externas do AQWA que, quando ativado, se conecta ao solver do AQWA através de uma tomada TCP (Transmission Control Protocol).

Durante a simulação, o solver do AQWA envia, a cada passo de tempo, dados relevantes (listados posteriormente) para o servidor. Ao mesmo tempo, o solver permanece em escuta, aguardando as informações processadas pela rotina externa que calcula e retorna as forças a serem aplicadas no modelo. Essa abordagem permite a integração dinâmica das forças externas no cálculo, ampliando a capacidade do software para modelar fenômenos complexos com maior precisão.

De acordo com o manual de referência do AQWA, as informações mais relevantes que o solver envia para a rotina externa, a cada passo de tempo, são:

- O passo de tempo;
- O vetor de posição do centro de gravidade e os ângulos de Euler expressos no referencial *FRA*; e
- O vetor de velocidades expresso no referencial *FRA*.

As informações que o solver espera receber da rotina externa são:

- Os vetores de forças e momentos, a serem aplicados no centro de gravidade do navio, descritos em um referencial com origem no CG mas com os eixos paralelos aos eixos do sistema inercial fixo FRA . Este referencial será chamado daqui por diante de FRA' .

A rotina de cálculo das forças externas foi desenvolvida em Python e é apresentada no Apêndice B. A metodologia para o cálculo de cada força é detalhada nas seções subsequentes deste capítulo.

A Figura 7 ilustra o processo iterativo entre a rotina de forças externas e o solver do ANSYS AQWA, destacando a contínua troca de informações e a necessidade de transformações entre referenciais para garantir a correta integração entre os modelos hidrodinâmico e de manobrabilidade.

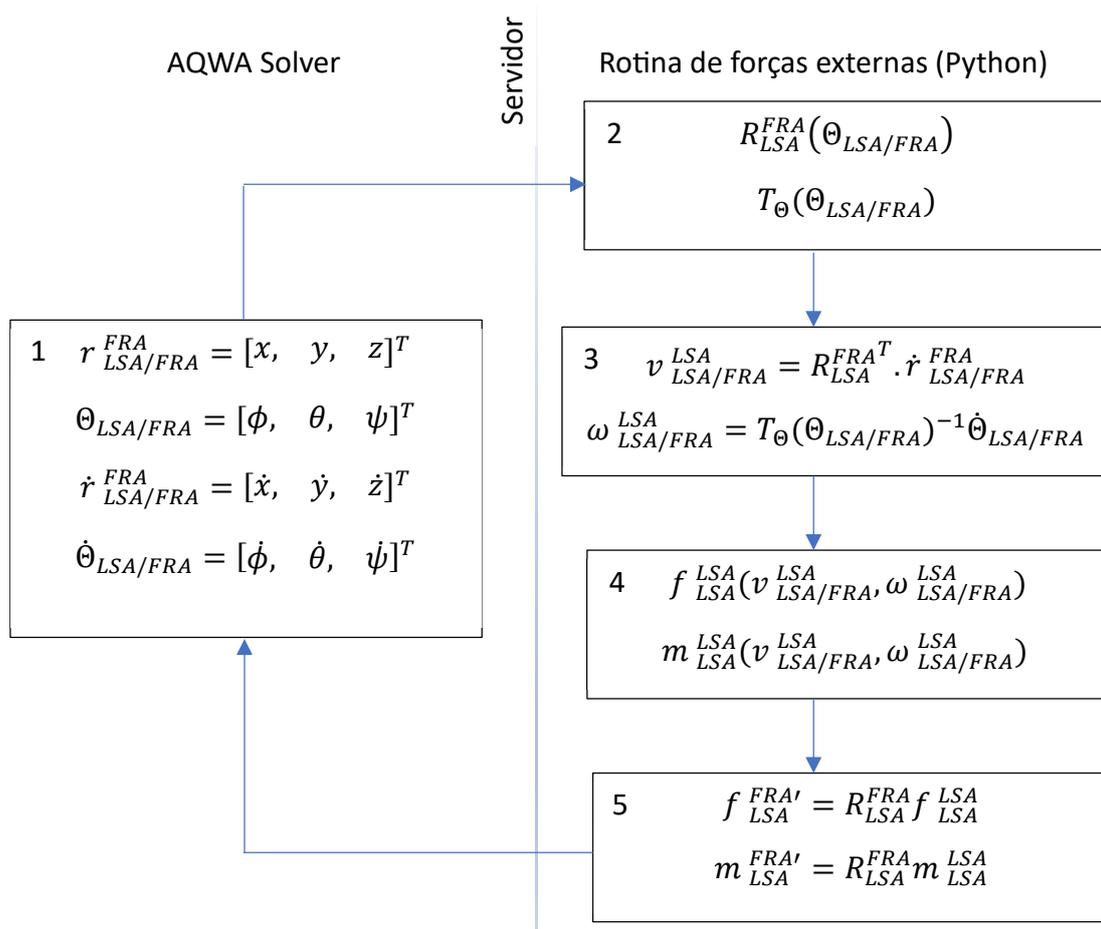


Figura 7 – Interação entre a rotina de cálculo de forças externas e o solver do AQWA

A interação se dá da seguinte forma:

- 1) O solver calcula e fornece à rotina os vetores de posição, orientação e velocidade linear e angular, todos expressos no sistema *FRA*;
- 2) A rotina utiliza os ângulos de Euler que recebe para construir a matriz de transformação entre os referenciais fixo *FRA* e o solidário *LSA*;
- 3) Essa matriz é empregada para transformar o vetor de velocidades enviado pelo solver do referencial *FRA* para o *LSA*;
- 4) Com as velocidades expressas no referencial *LSA*, a rotina calcula as forças nesse mesmo referencial; e
- 5) Em seguida, o vetor de forças calculado, ainda expresso em *LSA*, é transformado para o referencial *FRA'* antes de ser enviado ao solver através do servidor. Como os eixos dos referenciais *FRA'* e *FRA* são paralelos ao longo de toda a simulação, a transformação de *LSA* para *FRA'* segue o mesmo procedimento da transformação de *LSA* para *FRA*, conforme descrito no capítulo 3.2;
- 6) A partir desse ponto é iniciado um novo ciclo.

Por conveniência, o solver é executado fora do ambiente gráfico da ANSYS, chamado de workbench. Isso é realizado por meio do código apresentado no Apêndice B, que inicia o servidor de forças externas, executa a rotina de cálculo de forças, e roda todos os cartões .dat disponíveis através do solver do AQWA.

A visualização gráfica das series temporais também é realizada a partir de um código também elaborado em Python, apresentado no Apêndice C. O solver do AQWA gera arquivos no formato .LIS, contendo os dados das séries temporais. Esse código processa os resultados das simulações armazenados nesses arquivos, lendo as séries temporais de posição, velocidade e forças hidrodinâmicas, originalmente expressas no referencial *FRA*, e realizando as transformações necessárias para o referencial *LSA*. Além disso, o código gera gráficos das séries temporais, facilitando a visualização dos resultados e a interpretação dos fenômenos analisados.

3.4. Equação de movimento

A equação de movimento do navio como um corpo rígido é formulada em relação ao referencial inercial FRA , derivada da Segunda Lei de Newton, e apresentada na forma matricial, conforme proposto por FOSSEN E PEREZ (2007).

$$(M_{RB} + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + K\eta = F_{FK} + F_{DF} + F_{PROP} + F_{RESIT} + F_{LEME} + F_{MAN} \quad (3.12)$$

Onde M_{RB} é a matriz de massa do navio e $\ddot{\eta}$ são as acelerações. As componentes F_{FK} , F_{DF} , F_{PROP} , F_{RESIT} , F_{LEME} e F_{MAN} correspondem, respectivamente, à força de Froude-Krylov, difração, propulsiva, de resistência ao avanço, leme e de manobra. As matrizes A , B e K representam, respectivamente a massa adicional, amortecimento potencial e a restauração hidrostática.

O AQWA solicita que matriz de massa seja declarada no referencial solidário LSA . Como a origem deste referencial é no CG do navio, essa matriz se resume a:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Onde m é a massa do navio e I_{ij} são os momentos de inércia em torno dos eixos x , y e z do referencial solidário. De acordo com o manual do software, essa matriz de massa é atualizada a cada passo de tempo conforme a orientação instantânea do corpo.

A metodologia para o cálculo de cada uma dessas componentes será detalhada nas próximas seções. Por conveniência, os cálculos serão realizados no referencial LSA . No entanto, o AQWA exige que as forças sejam transformadas para o referencial FRA' , esse procedimento foi descrito nas seções 3.2. excitação

3.5. Ambiente Marinho

As ondas que incidem sobre um navio, causando cargas e influenciando seu comportamento, são geralmente irregulares e de natureza aleatória. Segundo NEWMAN

(2017), os efeitos não lineares e viscosos das ondas tornam-se relevantes em situações específicas, porém, é possível obter resultados úteis ao adotar a teoria linear de onda.

A teoria linear de onda, também conhecida como teoria de Airy, se baseia nas premissas de um fluido ideal, ou seja, homogêneo, incompressível, invíscido e sem vorticidade. Além disso, assume-se que o escoamento pode ser descrito por meio do potencial de velocidade ϕ , que representa o vetor de velocidade do fluido no sistema de coordenadas FRA.

A determinação de um potencial de velocidade que satisfaça a equação de Laplace e respeite as condições de contorno, incluindo a impenetrabilidade do fundo do mar, a condição de contorno dinâmica na superfície livre, a condição de contorno cinemática da superfície livre e a cinemática da partícula fluida, bem como toda a formulação da teoria linear de ondas, é apresentada em maior detalhe no Apêndice E.

3.6. Forças hidrodinâmicas e hidrostáticas

No estudo do surf-riding, analisamos a dinâmica de corpos flutuantes que se deslocam com velocidade de avanço U sob efeito de ondas.

É importante destacar que, quando um navio possui uma velocidade de avanço diferente de zero e encontra ondas que se propagam em uma direção χ , sua frequência de oscilação será distinta da frequência das ondas. Essa frequência ajustada, conhecida como frequência de encontro, pode ser expressa matematicamente como:

$$\omega_e = \omega - kU \cos \chi \quad (3.14)$$

Onde ω é a frequência da onda, k o número de onda, U é a velocidade de avanço e χ é o ângulo entre a direção de propagação das ondas e o eixo longitudinal do navio. Quando as ondas se aproximam pela popa, o ângulo μ considerado é nulo.

Segundo FALTINSEN, O.M. (1990), em análises hidrodinâmicas é comum abordar as respostas do navio em ondas sobrepondo linearmente os efeitos de dois subproblemas:

- a) Forças de radiação – São as forças e momentos que atuam no corpo quando a estrutura é forçada a oscilar, gerando ondas que se propagam no mar. Neste caso

não há ondas incidentes. As cargas hidrodinâmicas induzidas pela radiação podem ser separadas em três componentes: massa adicional, amortecimento potencial e forças de restauração.

- b) Forças de Froude–Krylov e difração – São as cargas hidrodinâmicas chamadas de cargas de excitação de ondas. Atuam no corpo quando a estrutura é impedida de oscilar e há ondas regulares incidentes.

A seguir são apresentadas as expressões das forças de Froude–Krylov, de difração, radiação e a parcela hidrostática. A formulação completa dessas forças, incluindo os potenciais de perturbação, são apresentadas com maiores detalhes no Apêndice F.

- **Forças de Froude-Krylov**

As forças e momentos de Froude-Krylov são resultantes da pressão não perturbada das ondas que atuam sobre o corpo submerso, ou seja, não leva em conta os efeitos causados pela presença do corpo na distribuição da pressão ao redor dele. Essas forças são obtidas a partir do potencial de velocidade da onda incidente, integrando a pressão (p) gerada pelo campo de velocidade da onda sobre a superfície molhada da estrutura (S). A força \vec{F} e o momento \vec{M} de Froude-Krylov são expressos como:

$$\vec{F}_{FK} = -\rho \iint_S \vec{n} \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_w \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (3.15)$$

$$\vec{M}_{FK} = \rho \iint_S (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_w \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (3.16)$$

Onde \vec{n} é o vetor unitário normal a superfície do corpo e \vec{r} representa o vetor de posição da superfície dS .

- **Forças de difração**

A força de difração surge devido à perturbação que um corpo introduz no campo de ondas ao seu redor. Quando uma onda encontra um corpo, idealmente considerado fixo, ela é difratada, alterando sua forma e direção.

A força \vec{F}_{DF} e momento \vec{M}_{DF} são o resultado da diferença entre as pressões sobre o corpo no campo de ondas perturbado e não perturbado, sendo calculados de maneira

análoga às forças de Froude-Krylov, porém, levando em consideração a alteração da pressão devido à presença do corpo na onda incidente. Para isso, o potencial de difração é inserido na equação de Bernoulli, permitindo a obtenção do campo de pressões de difração. A força é determinada pela integração da pressão resultante sobre a superfície molhada do corpo:

$$\vec{F}_{DF} = -\rho \iint_S \vec{n} \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_{dif} \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (3.17)$$

$$\vec{M}_{DF} = -\rho \iint_S (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_{dif} \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (3.18)$$

- **Forças de radiação**

A força de onda irradiada é gerada pelas ondas induzidas pelo movimento do corpo na superfície do fluido. O potencial de radiação associado a essas ondas pode ser descrito como a soma dos potenciais individuais gerados por cada grau de liberdade da estrutura. Cada um desses potenciais é expresso como uma função dependente da geometria do corpo e da frequência de oscilação, multiplicada pela velocidade correspondente.

Ao integrar a pressão hidrodinâmica associada ao potencial de radiação sobre a superfície do corpo flutuante em um fluido com superfície livre, obtêm-se dois termos principais: um proporcional à aceleração, relacionado à massa adicional, e outro proporcional à velocidade, representando o amortecimento potencial. As forças e momentos hidrodinâmicos de radiação podem então ser decompostos em componentes em fase com a aceleração e com a velocidade do corpo:

$$F_{RAD} = -A \ddot{\eta} - B \dot{\eta} \quad (3.19)$$

Onde A é a matriz de massa adicional e B a matriz de amortecimento potencial.

- **Forças de restauração hidrostática**

Já a força \vec{F}_H e momento \vec{M}_H de restauração hidrostática são dados pela integral da pressão hidrostática na superfície molhada instantânea do casco.

$$\vec{F}_H = \rho g \iint_S z \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (3.20)$$

$$\vec{M}_H = \rho g \iint_S z. (\vec{r} \times \vec{n}). dS \quad (3.21)$$

3.7. Força de manobra

As forças de radiação, apresentadas no capítulo anterior, estão relacionadas às ondas geradas pelos movimentos do navio com base na teoria do potencial. Porém, as forças hidrodinâmicas de manobra são governadas principalmente por efeitos relacionados a viscosidade do fluido. Por esta razão, no intuito de incluir a parcela viscosa nos coeficientes hidrodinâmicos de manobra, será utilizado o modelo semiempírico de CLARKE *et al.* (1983).

As seguintes fórmulas de regressão para os coeficientes lineares adimensionais de massa adicional e amortecimento potencial foram propostas por Clarke:

$$\begin{aligned} Y'_v &= -\pi(T/L)^2 \cdot [1 + 0.16C_B(B/T) - 5.1(B/L)^2] \\ Y'_r &= -\pi(T/L)^2 [0.67(B/L) - 0.0033(B/T)^2] \\ N'_v &= -\pi(T/L)^2 [1.1(B/L) - 0.041(B/T)] \\ N'_r &= -\pi(T/L)^2 [1/12 + 0.017C_B(B/T) - 0.33(B/L)] \\ Y'_v &= -\pi(T/L)^2 [1 + 0.4C_B(B/T)] \\ Y'_r &= -\pi(T/L)^2 [-0.5 + 2.2(B/L) - 0.08(B/T)] \\ N'_v &= -\pi(T/L)^2 [0.5 + 2.4(T/L)] \\ N'_r &= -\pi(T/L)^2 [0.25 + 0.039(B/T) - 0.56(B/L)] \end{aligned} \quad (3.22)$$

Onde T , L , B e C_B são respectivamente o calado, comprimento, boca e coeficiente de bloco do navio.

Este modelo é uma estimativa para os coeficientes hidrodinâmicos lineares de manobra no sistema de coordenadas solidário ao corpo com origem no centro de gravidade, BRIX (1993), e foram obtidos através de experimentos com modelos em

escala de cascos da Série 60. A tabela a seguir apresenta um comparativo entre navios da série 60 e o navio em estudo.

Tabela 3 - Tabela comparativa entre a série 60 e o navio patrulha

Parâmetro	Séries 60	Patrulha
Cb	0.55 - 0.85	0.46
Cp	0.6 - 0.8	0.6
L/B	6.5 - 7.5	6.7
B/T	2.3 - 2.5	3.5
$L / \nabla^{1/3}$	5.092 - 6.165	6.688
LCB % da SM	1.5 aft - 2.5 fwd	1.2 aft

As chamadas derivadas hidrodinâmicas de movimento lento para movimentos de manobra são avaliadas, pelo modelo de Clarke, para a condição de águas calmas. Sua aplicação para o navio operando em ondas é justificável uma vez que o fenômeno de surf-riding ocorre em ondas de popa na condição de frequência de encontro tendendo a zero.

Nesta condição, se espera que a contribuição potencial nos coeficientes de amortecimento seja pequena e a parcela viscosa seja a dominante. Assim, um bom compromisso seria substituir os termos de massa adicional do modelo de Clarke (que dependem apenas das dimensões principais do navio) pelos da teoria potencial (que levam em conta a geometria real do casco), e no caso dos coeficientes de amortecimento, descontar o amortecimento potencial calculado pelo AQWA (b'_{22} , b'_{26} , b'_{62} , b'_{66}) na frequência zero, dos termos da formulação do Clarke correspondentes (Y_v , Y_r , N_v e N_r).

Os coeficientes de manobra relativos à massa adicional (Y_v , Y_r , N_v e N_r), para frequência zero, serão obtidos diretamente do AQWA. Já para os coeficientes de amortecimento temos:

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -\pi(T/L)^2[1 + 0.4C_B(B/T)] + b'_{22} \\
 Y'_r &= -\pi(T/L)^2[-0.5 + 2.2(B/L) - 0.08(B/T)] + b'_{26} \\
 N'_v &= -\pi(T/L)^2[0.5 + 2.4(T/L)] + b'_{62} \\
 N'_r &= -\pi(T/L)^2[0.25 + 0.039(B/T) - 0.56(B/L)] + b'_{66}
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

As forças e momentos hidrodinâmicos devido à manobra do navio, atuando no centro de gravidade, descritas no referencial solidário ao navio (*LSA*) e dimensionalizadas de acordo com Clarke, são expressos como:

$$F_{MAN} = \begin{bmatrix} X_{MAN} \\ Y_{MAN} \\ Z_{MAN} \\ K_{MAN} \\ M_{MAN} \\ N_{MAN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/2\rho U^2 L^2 (Y'_v v' + Y'_r r') \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/2\rho U^2 L^3 (N'_v v' + N'_r r') \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Onde U é a velocidade resultante instantânea ($U = \sqrt{u^2 + v^2}$) e v' e r' são as velocidades adimensionalizadas de sway e yaw, todas descritas no referencial solidário.

$$v' = \frac{v}{U} \quad r' = \frac{rL}{U} \quad (3.25)$$

3.8. Força de propulsão e resistência ao avanço

A seguir é apresentada a metodologia adotada para a modelagem das forças de propulsão e resistência ao avanço implementadas no modelo numérico. Os coeficientes adimensionais do propulsor foram obtidos por meio dos ensaios em águas abertas, enquanto o fator de esteira do casco e o fator de dedução de empuxo foram extraídos dos ensaios de autopropulsão. Já as curvas de resistência ao avanço são provenientes dos ensaios de reboque. Todas as informações referentes aos ensaios foram obtidas a partir dos resultados apresentados em MARINHA DO BRASIL (2016b).

A força propulsiva é modelada assumindo o equilíbrio de forças entre a resistência ao avanço em águas calmas R e o empuxo do propulsor T quando o navio está em uma velocidade de serviço constante V_S . A rotação do propulsor n é então definida de forma a atingir esse equilíbrio de forças para a velocidade desejada em águas calmas, sendo mantida constante ao longo das simulações.

A força gerada pelos propulsores no casco é expressa em relação ao referencial solidário (*LSA*) e modelada a partir dos resultados existentes do ensaio em águas abertas do propulsor do navio. Esses resultados são convencionalmente disponibilizados na forma de coeficientes adimensionais de empuxo e torque, respectivamente K_T e K_Q .

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D_p^5} \quad (3.26)$$

Onde n é a rotação do propulsor em Hz, D_p é o diâmetro do propulsor, ρ é a massa específica da água e T e Q são o empuxo e o torque do propulsor. O diagrama de K_T e K_Q são apresentados em função do coeficiente de avanço J , sendo a velocidade de avanço do propulsor, V_A , definida em função do coeficiente de esteira do navio.

$$J = \frac{V_A}{n D_p} = \frac{u(1-w)}{n D_p} \quad (3.27)$$

Onde u é a velocidade longitudinal instantânea do navio e w o fator de esteira do casco.

Segundo S. HARVALD (1983), para viabilizar estudos preliminares de projeto de navios, as características em águas abertas do propulsor também podem ser expressas como polinômios em função do coeficiente de avanço. Para a modelagem da curva $K_T(J)$ do ensaio do propulsor do navio em estudo foi utilizado um polinômio de grau 4:

$$K_T(J) = k_0 + k_1 J + k_2 J^2 + k_3 J^3 + k_4 J^4$$

Como os propulsores de bombordo e boreste são simétricos e giram de fora para dentro com a mesma rotação, os resultados dos ensaios em águas abertas são iguais para ambos os propulsores. Portanto, a força axial gerada pelos dois propulsores expressa no referencial solidário LSA é descrita pela seguinte expressão:

$$X_{PROP} = 2\{\rho n^2 D_p^4 (k_0 + k_1 J + k_2 J^2 + k_3 J^3 + k_4 J^4)\} \quad (3.28)$$

A curva resistência ao avanço do navio é obtida dos resultados dos ensaios experimentais de reboque MARINHA DO BRASIL (2016b). O polinômio $R(u)$ que aproxima a força de resistência de reboque do navio em função de sua velocidade longitudinal instantânea (u) é de grau 5, conforme recomendação da IMO.

$$R(u) = r_0 + r_1 u + r_2 u^2 + r_3 u^3 + r_4 u^4 + r_5 u^5 \quad (3.29)$$

A força de resistência ao avanço do navio autopropelido é amplificada em relação à resistência de reboque devido a alteração do escoamento que a operação do propulsor causa na região de esteira. Este aumento da resistência é estabelecido através do

coeficiente de dedução de empuxo t_p . Então a força de resistência ao avanço X_{RESIST} expressa no referencial solidário LSA é dada pela expressão:

$$X_{RESIST} = \frac{r_0 + r_1u + r_2u^2 + r_3u^3 + r_4u^4 + r_5u^5}{1 - t_p} \quad (3.30)$$

Neste modelo, em águas calmas, quando o navio está na velocidade de serviço, as forças X_{PROP} e X_{RESIST} se equilibram e a resultante é nula. Na presença de outras forças externas na direção longitudinal, a velocidade longitudinal instantânea (u) do navio varia e ocorre um desequilíbrio entre X_{PROP} e X_{RESIST} . Com isso, a resultante passa a ser não nula e atua de forma a acelerar ou desacelerar o navio de volta para a velocidade V_s , restaurando o equilíbrio.

3.9. Leme

Os lemes são hidrofólios que giram em torno de um eixo vertical, madre, usualmente posicionados na popa do navio, a ré dos propulsores, para produzir uma força transversal e um momento de guinada em torno do centro de gravidade do navio.

O efeito de um leme nas forças que atuam em um navio é ilustrado na Figura 8. Ao aplicar um ângulo δ , surge uma força hidrodinâmica devido ao escoamento no perfil do leme. A componente Y_R desta força atua na direção transversal y_{LSA} . E N_R é o momento no eixo z_{LSA} criado pela força transversal do leme atuando no centro de gravidade.

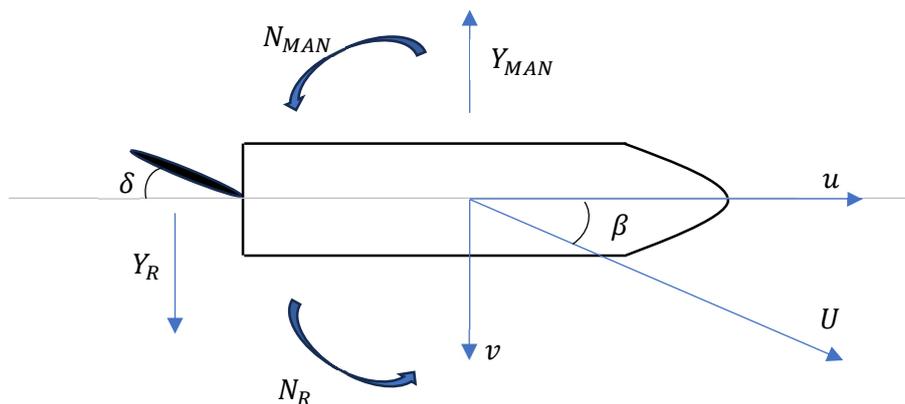


Figura 8 - Ação do leme na guinada de um navio.

A força produzida pelo leme projeta a popa do navio em direção ao bordo oposto ao bordo do ângulo δ . Conseqüentemente, surge um ângulo de deriva β entre o vetor de velocidade resultante instantânea U e a linha de centro do navio.

Este é o ângulo no qual o escoamento ataca o casco do navio, que passa a atuar como uma asa móvel em um fluido. Conseqüentemente, surge uma força hidrodinâmica no casco devido a manobra de giro Y_{MAN} no sentido oposto a Y_R , que por sua vez gera um momento N_{MAN} . Os momentos combinados causam o movimento de giro do navio.

Nesta pesquisa, as forças no leme são avaliadas através dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D) obtidos através do modelo de THIEME (1962), WHICKER e FEHLNER (1958), que utiliza uma abordagem semiempírica, baseada em dados teóricos e de experimentos realizados em tuneis de vento e tanques de prova, para expressar esses coeficientes em função do ângulo de ataque (α) e da razão de aspecto do leme (Λ):

$$C_L = \frac{2\pi\Lambda(\Lambda + 1)}{(\Lambda + 2)^2} \sin \alpha + C_q \sin \alpha |\sin \alpha| \cos \alpha \quad (3.31)$$

$$C_D = 1,1 \frac{C_L^2}{\pi\Lambda} + C_q |\sin \alpha|^3 + C_{D0} \quad (3.32)$$

Onde $C_q = 1$ para um leme com ângulos retos entre as laterais e as partes superior e inferior. A razão de aspecto do leme é a razão entre o quadrado da altura (b) e a área lateral projetada (A_R):

$$\Lambda = \frac{b^2}{A_R} \quad (3.33)$$

O coeficiente C_{D0} é tomado como 2,5 vezes o coeficiente de arrasto friccional de acordo com o ITTC (1957):

$$C_{D0} = 2.5C_F = 2.5 \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (3.34)$$

Onde o número de Reynolds é dado em função da corda do leme (c) e da viscosidade cinemática da água (ν):

$$Rn = \frac{V_R c}{\nu} \quad (3.35)$$

As forças de sustentação (*Lift*) e arrasto (*Drag*) no leme são obtidas pelas expressões:

$$Lift = \frac{1}{2} \rho C_L(\alpha) A_R V_R^2 \quad (3.36)$$

$$Drag = \frac{1}{2} \rho C_D(\alpha) A_R V_R^2 \quad (3.37)$$

Como ilustrado na Figura 9, as componentes da força hidrodinâmica na direção do escoamento (V_R) e perpendicular a ele são as forças de arrasto (D) e de sustentação (L). As forças e momentos do leme atuando no centro de gravidade, quando representadas no referencial solidário ao navio (LSA), são expressos como:

$$F_{LEME} = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ K_R \\ M_R \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \cdot \text{sen} \gamma - D \cdot \text{cos} \gamma \\ (1 + a_H) \cdot \lambda_{LEME} \cdot (L \cdot \text{cos} \gamma - D \cdot \text{sen} \gamma) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Y_R(x_R + \Delta x) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

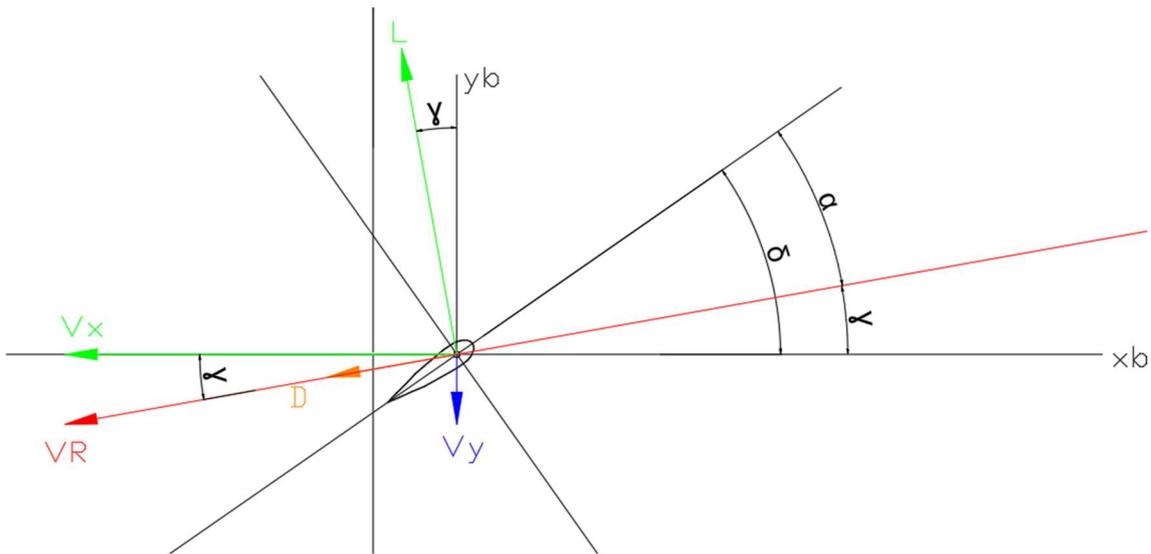


Figura 9 – Forças atuantes no leme em um navio em manobra.

A velocidade resultante na entrada do leme (V_R) é obtida a partir dos modelos de SODING (1982 e 1986), que considera a influencia do propulsor e do casco no escoamento incidente no leme. A dedução completa da velocidade V_R é apresentada no Apêndice H.

O ângulo em que o escoamento ataca o leme (α) é dado pela soma de ângulo do leme (δ) com o ângulo do vetor de velocidade resultante em relação a linha de centro (γ):

$$\gamma = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (3.39)$$

$$\alpha = \delta + \gamma \quad (3.40)$$

Na expressão 3.38, λ_{LEME} e a_H são os fatores de correção da força do leme devido a presença do propulsor e do casco, respectivamente (ver Apêndice H). O termo Δx é o deslocamento do centro de atuação da força transversal do leme devido a presença do propulsor e x_R é a distância do cetro do leme ao CG do navio.

3.10. Emersão do leme

Quando o leme é parcial ou totalmente emerso, ocorre uma diminuição da força de controle gerada por ele, que é uma componente importante para a estabilidade direcional do navio.

Em CHU *et al.* (2024) e LU *et al.* (2023), o efeito da emersão no cálculo da força do leme é considerado, de forma aproximada, pela redução da área efetiva molhada do leme. A exposição do leme é determinada avaliando a distância vertical instantânea entre um ponto de referência no leme e a superfície da onda, considerando os movimentos do navio, conforme descrito a seguir.

O topo do leme é adotado como ponto de referência para determinar a emersão. Na Figura 10 é ilustrado um exemplo da alteração da região molhada do leme no instante em que o leme está no cavado de uma onda. Conforme abordado anteriormente, o referencial inercial *FRA* tem sua origem no plano médio de linha d'água e o referencial solidário *LSA*, no centro de gravidade.

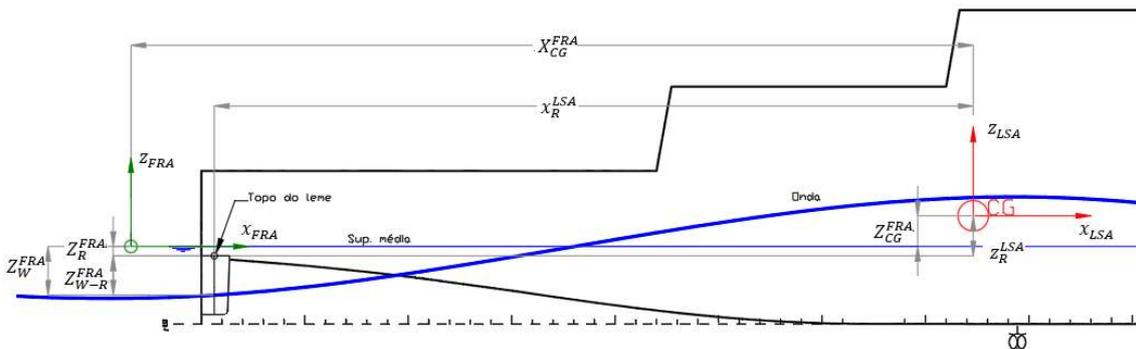


Figura 10 – Arranjo da emersão do leme.

- X_{CG}^{FRA} : posição longitudinal do CG em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
- Z_{CG}^{FRA} : posição vertical do CG em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
- $x_R^{LSA}, y_R^{LSA}, z_R^{LSA}$: coordenadas da posição do topo do leme em relação ao centro de gravidade, expressas no referencial LSA.
- Z_W^{FRA} : elevação da superfície livre da onda em relação a origem do referencial FRA, medida na coordenada longitudinal do centro de leme, expressa no referencial FRA.
- Z_R^{FRA} : distância vertical do topo do leme em relação a origem do referencial FRA, expressa no referencial FRA.
- Z_{W-R}^{FRA} : distância relativa entre a superfície livre da onda e o topo do leme, expressa no referencial FRA.

A elevação da onda Z_W^{FRA} , calculada no ponto onde o leme está localizado, é determinada levando em conta a posição longitudinal do centro do leme em relação ao CG e considerando os efeitos dos movimentos de roll, pitch e yaw do navio. Considerando uma onda regular com amplitude ζ_W , número de onda k , frequência ω e com incidência pela popa χ , Z_W^{FRA} é obtido pela expressão (CHU *et al.*, 2024):

$$Z_W^{FRA} = \zeta_W \cos\{k[X_{CG}^{FRA} + x_R \cos\chi \cos\theta + y_R(\cos\chi \sin\theta \sin\varphi - \sin\chi \cos\varphi) + z_R(\cos\chi \sin\theta \cos\varphi + \sin\chi \sin\varphi) - \omega t]\} \quad (3.41)$$

A distância vertical do topo do leme em relação a origem do referencial FRA é determinada levando em conta a posição vertical do topo do leme em relação ao CG e considerando os efeitos dos movimentos de roll e pitch, (CHU *et al.*, 2024):

$$Z_R^{FRA} = Z_{CG}^{FRA} - x_R \sin\theta + y_R \cos\theta \sin\varphi + z_R \cos\theta \cos\varphi \quad (3.42)$$

A distância da superfície livre da onda em relação ao topo do leme, medido na coordenada longitudinal do centro de leme, é dada por:

$$Z_{W-R}^{FRA} = Z_W^{FRA} - Z_R^{FRA} \quad (3.43)$$

O valor de Z_{W-R}^{FRA} é utilizado então para verificar a emersão do leme. Observando a Figura 10, se Z_{W-R}^{FRA} for maior do que 0, ou seja, se o topo do leme estiver mais elevado do que a superfície da onda, o leme está completamente submerso. Caso Z_{W-R}^{FRA} seja negativo, o leme está parcialmente submerso e sua área é corrigida, deduzindo a parte emersa da área total, até o limite que esta atinja o valor mínimo igual a zero.

No caso do leme parcialmente submerso, a área molhada do leme (AR) é então aproximada descontando a área da parte emersa da área total do leme:

$$AR = \begin{cases} AR & \text{se } Z_{W-R}^{FRA} \geq 0 \\ \text{máximo} \left(AR + Z_{W-R}^{FRA} \cdot \sqrt{\frac{AR}{\Lambda}}, 0 \right) & \text{se } Z_{W-R}^{FRA} < 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

4 Análise dos resultados

4.1. Navio Estudo de caso

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi selecionado um navio patrulha de 500 toneladas típico empregado pela Marinha do Brasil. Por questões de sigilo, a identificação da embarcação não será divulgada, porém suas principais propriedades geométricas e operacionais são apresentadas a seguir.

Tabela 4 – Características do navio patrulha.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento	L	55,08 m
Boca	B	9,00 m
Calado	T	2,57 m
Deslocamento	Δ	568 ton
Velocidade de serviço	V_S	19 kt

A condição de carregamento escolhida para a análise foi a de navio carregado, com 100% de combustível, aguada, tripulação e munição. A velocidade analisada foi a de serviço, 19 nós.

A embarcação selecionada conta com documentação técnica referente à análise de estabilidade, além de relatórios de ensaios experimentais, incluindo testes de reboque, autopropulsão, desempenho em águas abertas (MARINHA DO BRASIL, 2016b) e ensaios de manobras em águas calmas (MARINHA DO BRASIL, 2016a). No entanto, não há um levantamento detalhado dos pesos e centros da embarcação.

O deslocamento e a posição do CG na condição de carregamento escolhida foram obtidos no estudo de estabilidade intacta. Porém, os momentos de inércia são calculados com base nos raios de giração, que são estimados considerando o valor de $0,40B$ para o raio de giração em roll e de $0,25L_{PP}$ para os raios de giração em pitch e yaw. As inércias cruzadas não foram consideradas.

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= K_{xx}^2 m & K_{xx} &= 0,40B \\
 I_{yy} &= K_{yy}^2 m & K_{yy} &= 0,25L_{PP} \\
 I_{zz} &= K_{zz}^2 m & K_{zz} &= 0,25L_{PP}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

O casco da embarcação foi modelado no software Rhinoceros a partir do plano de linhas.

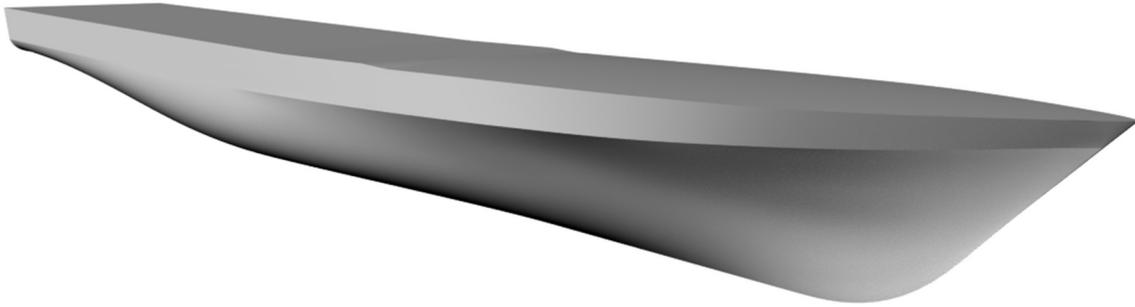


Figura 11 – Forma do casco renderizada no software Rhinoceros.

Após a definição da geometria e das propriedades de massa, é realizada a geração da malha do modelo. De acordo com o manual do AQWA, o tamanho máximo dos elementos da malha deve ser entre 1/7 e 1/10 do menor comprimento de onda considerado na análise. Neste estudo, a faixa de períodos de onda analisada varia entre 5 s e 180 s, sendo o menor comprimento de onda correspondente ao período $T = 5s$. Para condições de águas profundas, o comprimento de onda associado a este período é de 39m. Dessa forma, o tamanho máximo da malha deve ser inferior a 3,9m.

Entretanto, essa discretização não é suficiente para capturar adequadamente a curvatura do casco, principalmente da parte submersa. Assim, optou-se por uma malha mais refinada de 0,4 m, conforme apresentado na Figura 12.

O comparativo entre as características volumétricas do navio real e os valores obtidos a partir da malha gerada no modelo numérico é apresentado na Tabela 5, indicando um bom nível de fidelidade da discretização adotada. Esses valores são expressos em relação à linha de centro, à quilha e ao espelho de popa da embarcação.

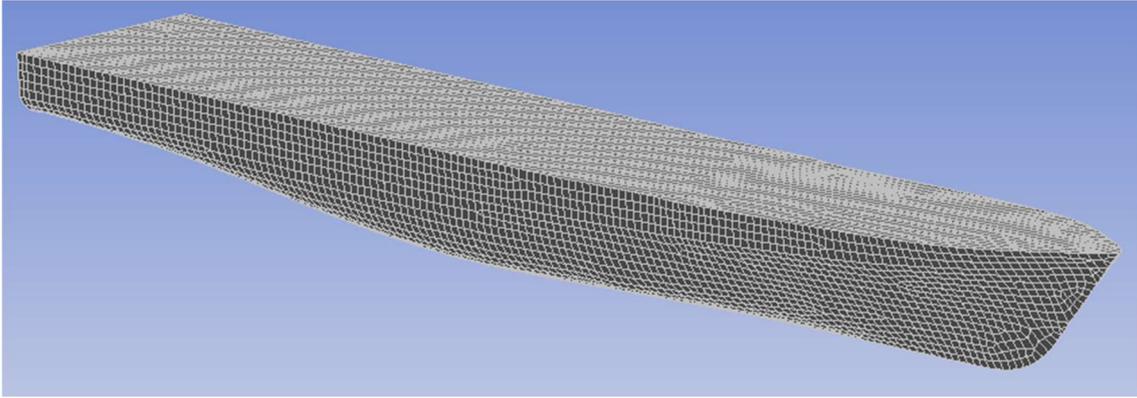


Figura 12 – Geração da malha no casco do navio patrulha.

Tabela 5 – Comparativo entre o modelo numérico e o casco do navio-patrulha

Parâmetro	Casco real	Modelo numérico
Deslocamento [kg]	568000	567984
LCB [m]	26,105	26,408
TCB [m]	-0,036	0,00015
VCB [m]	1,586	1,603
LCG [m]	26,113	26,408
TCG [m]	-0,012	0,00015
VCG [m]	3,673	3,673

4.2. Coeficientes hidrodinâmicos

A análise no domínio da frequência foi realizada para um total de 40 direções de onda, variando de -180° a 180° , e para 100 valores de frequência, abrangendo o intervalo de períodos de 180 a 5s.

Os resultados obtidos para os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial através do AQWA são apresentados nas figuras a seguir para os casos sem velocidade de avanço (curvas azuis) e com velocidade de avanço de 19 nós (curvas laranjas). Quando o coeficiente não é afetado pela velocidade de avanço, essas curvas aparecem sobrepostas.

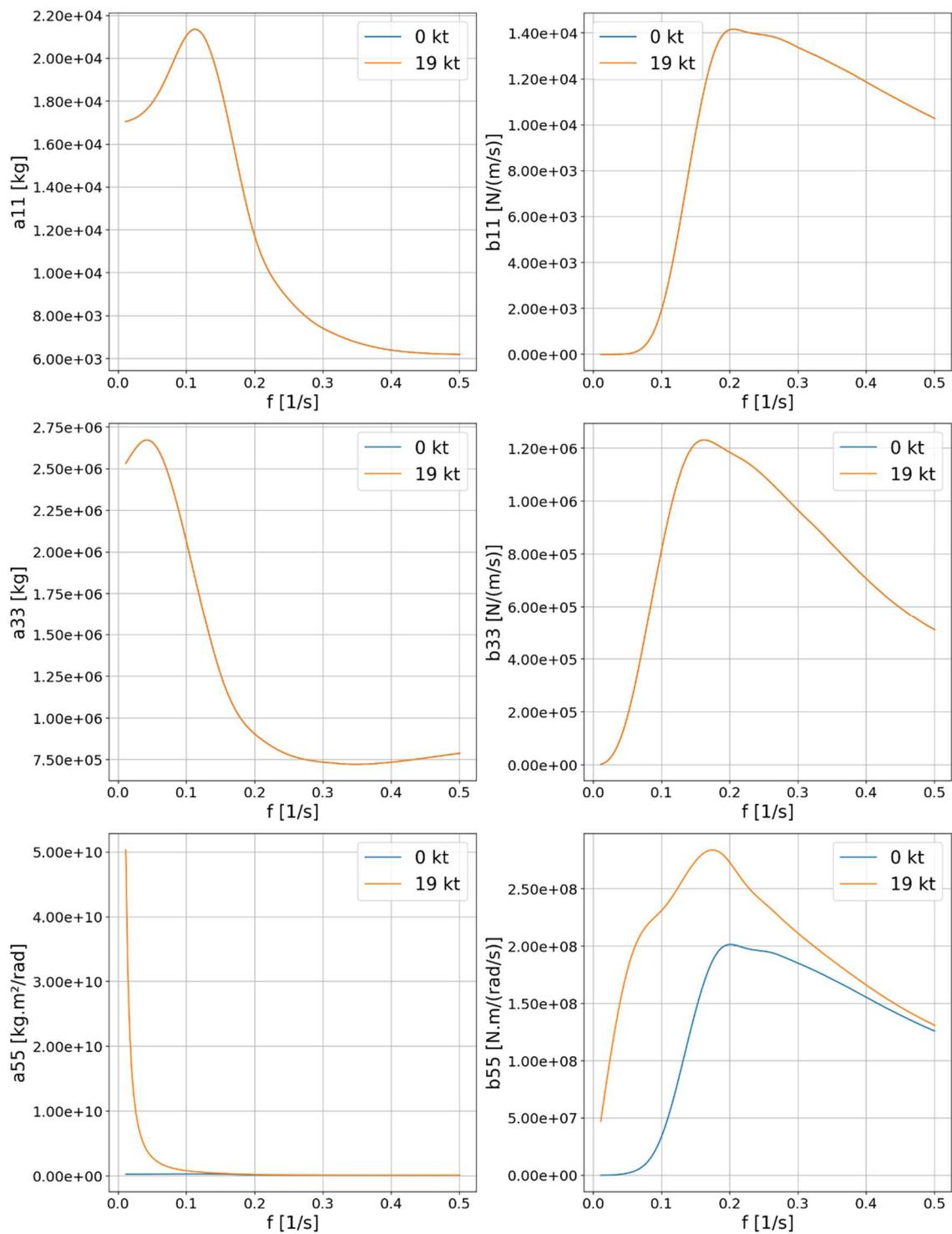


Figura 13 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para surge, heave e pitch, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.

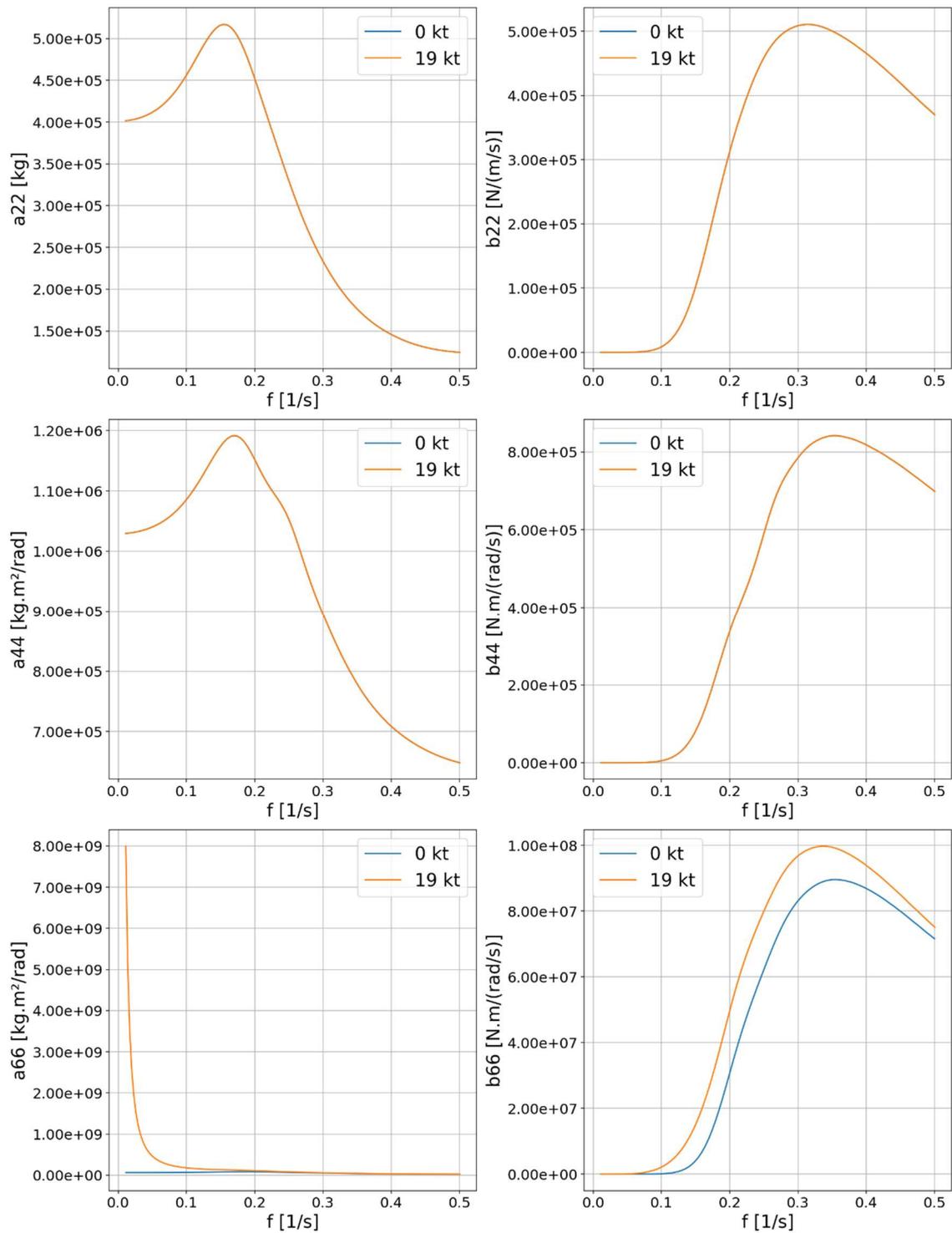


Figura 14 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para sway, roll e yaw, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.

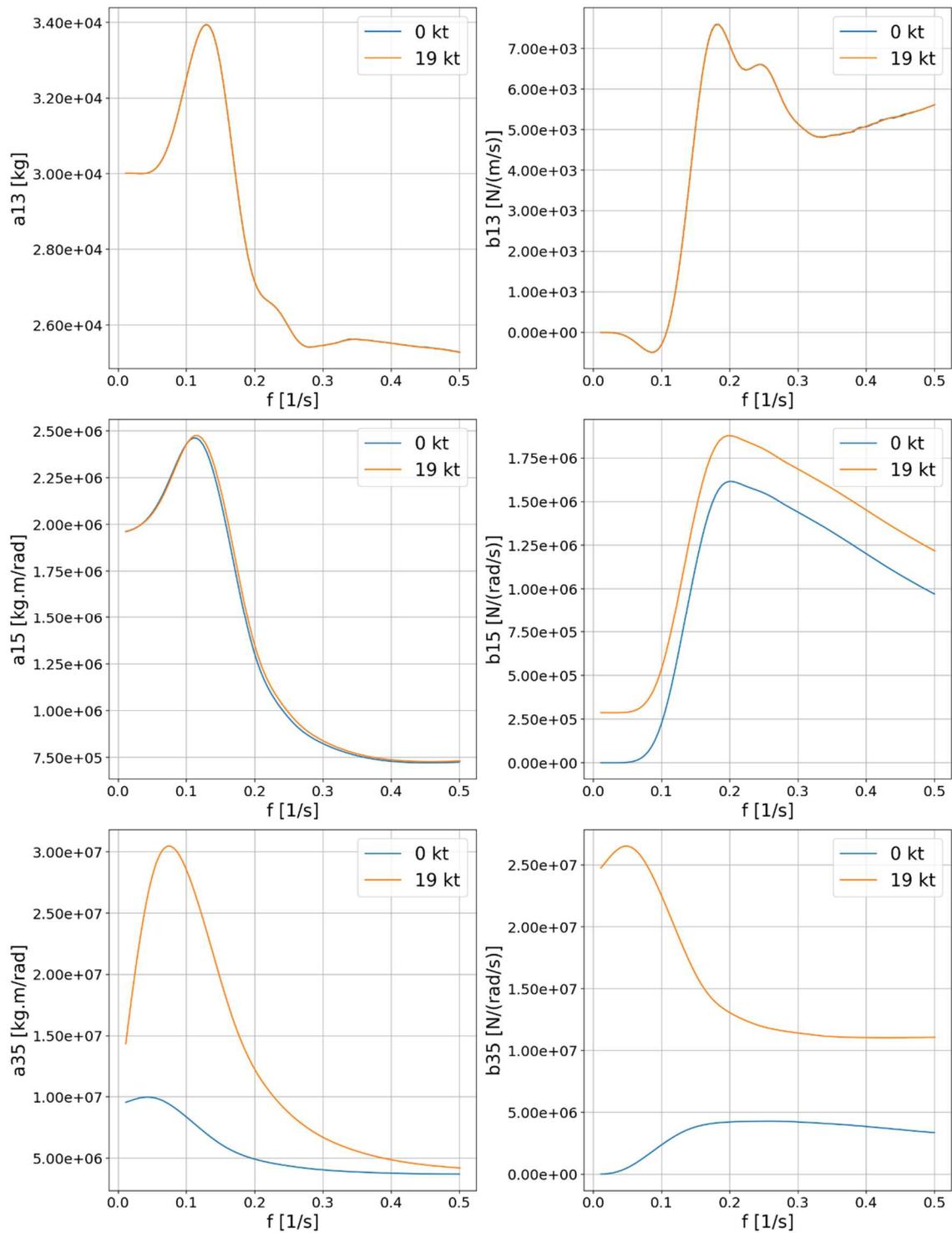


Figura 15 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para surge, heave e pitch, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.

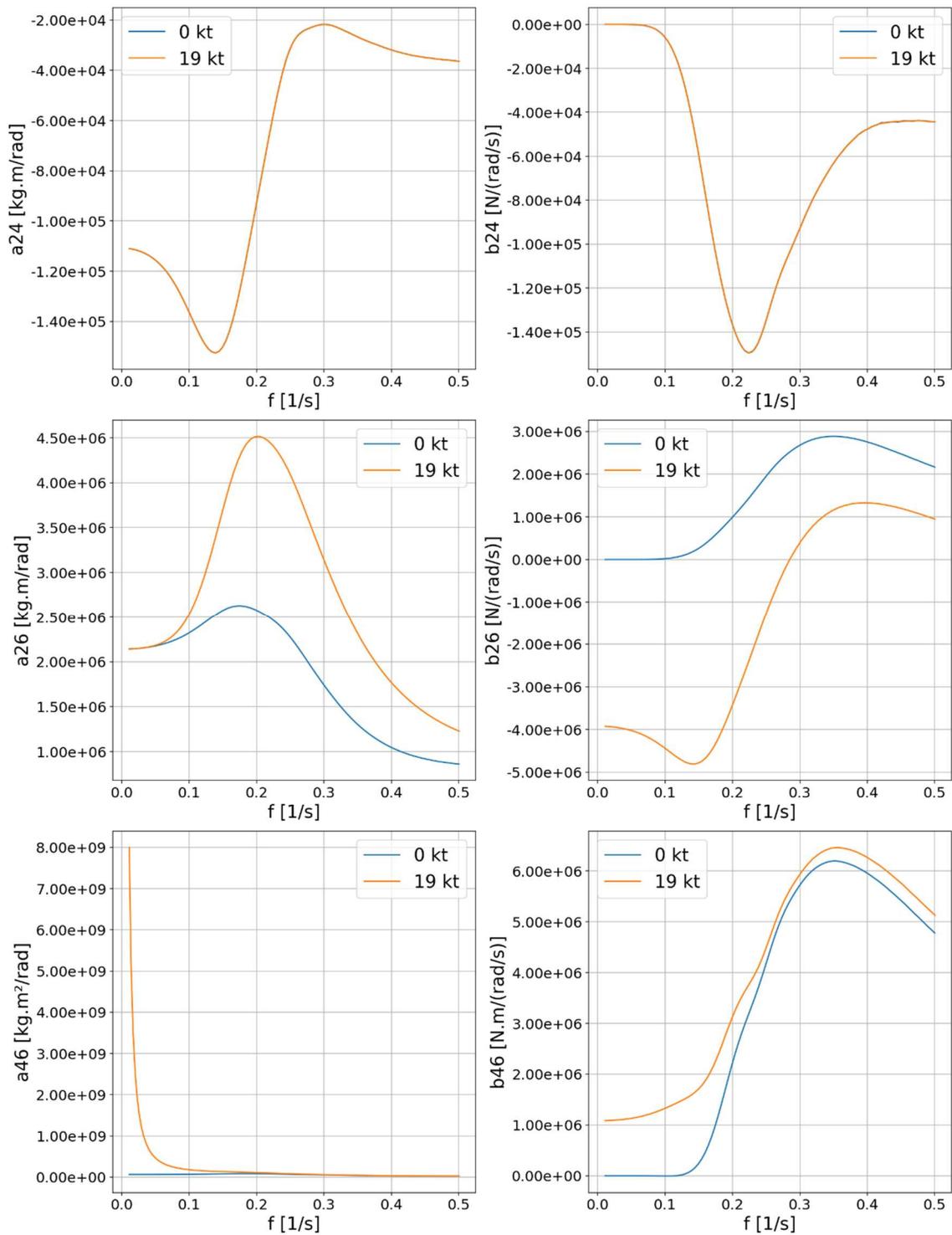


Figura 16 – Coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial para sway, roll e yaw, incluindo os casos sem velocidade de avanço e com velocidade de 19kt.

A correção dos coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial devido à velocidade de avanço é feita pela teoria das faixas, de acordo LEWIS *et al.* (1989). As expressões para a correção dos termos que sofrem influência da velocidade de avanço são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Correção dos coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial devido à velocidade de avanço.

$A_{15} = - \int x a_{13} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{13}$	$B_{15} = - \int x b_{13} dx + U_0 A_{13}$
$A_{35} = - \int x a_{33} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{33}$	$B_{35} = - \int x b_{33} dx + U_0 A_{33}$
$A_{55} = \int x^2 a_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{33}$	$B_{66} = \int x^2 b_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{33}$
$A_{26} = \int x a_{22} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{22}$	$B_{26} = \int x b_{22} dx + U_0 A_{22}$
$A_{46} = \int x a_{24} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{24}$	$B_{46} = \int x b_{24} dx - U_0 A_{24}$
$A_{66} = \int x^2 a_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{22}$	$B_{66} = \int x^2 b_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{22}$

Nesta pesquisa, foram feitas simulações de manobras em águas calmas e de surf-riding, manobras que ocorrem em frequências de encontro próximas a zero. O AQWA não calcula os coeficientes hidrodinâmicos na frequência zero, porém, permite adotar frequência próximas a este limite. A menor frequência adota é referente ao período de 180s, o que corresponde a 0,005Hz.

Entretanto, a correção dos coeficientes devido a velocidade de avanço pela teoria das faixas é desenvolvida para frequências mais altas. Quando se usa uma frequência muito pequena, pode haver uma distorção nas correções devido aos termos U_0/ω_e^2 , que faz com que os valores dos coeficientes fiquem excessivamente grandes na frequência mais baixa.

Essa distorção é observada nos termos a_{55} (Figura 13), a_{66} (Figura 14) e a_{46} (Figura 16). Dessa forma, optou-se por não utilizar as curvas corrigidas pela velocidade de avanço para esses coeficientes. Em vez disso, foram adotadas as curvas correspondentes ao caso sem velocidade de avanço (ver Figura 17). Isto foi implementado através dos comandos WAMS (Wave Frequency Added Mass Matrix) e WDMP (Wave Frequency Damping Matrix) no cartão .DAT do modelo, que é entregue ao solver do AQWA. Esses comandos permitem inserir manualmente as matrizes de massa adicional e amortecimento potencial para cada frequência especificada.

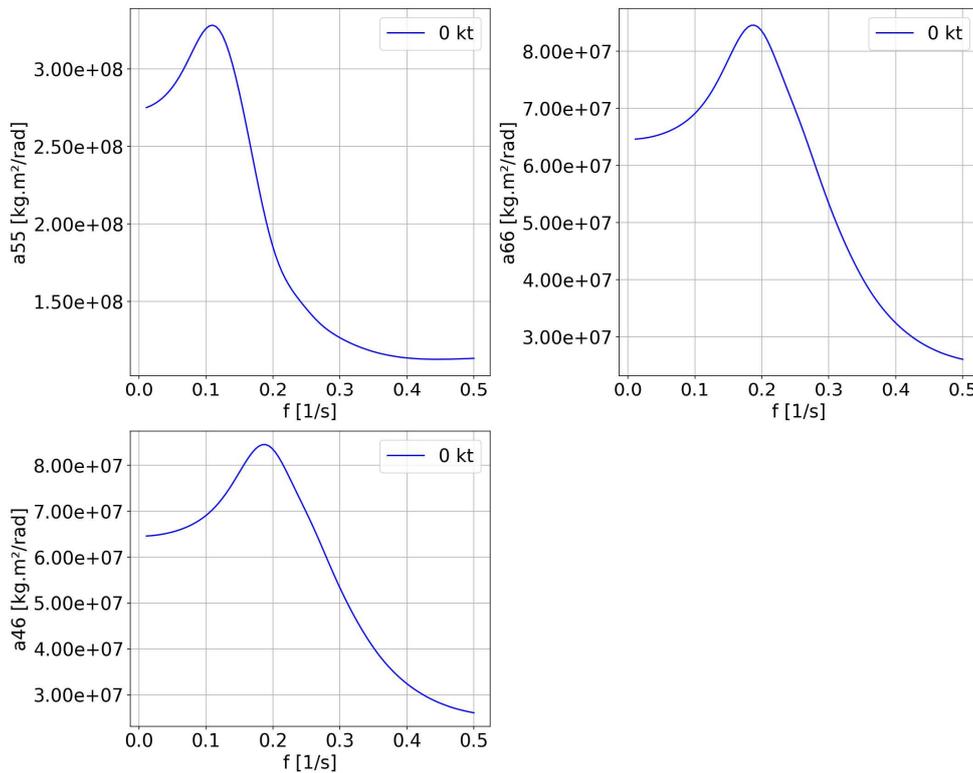


Figura 17 – Coeficientes termos a_{55} , a_{66} e a_{46} sem velocidade de avanço.

4.3. Simulação de manobras em águas calmas

4.3.1. Ajuste dos coeficientes de manobra

O objetivo das simulações em águas calmas é calibrar os resultados do modelo numérico e os obtidos experimentalmente (MARINHA DO BRASIL, 2016a) com um modelo em escala de um navio-patrolha nas manobras de giro, zig-zag e espiral. Por meio das simulações numéricas, busca-se ajustar os coeficientes hidrodinâmicos de manobra, conforme capítulo 3.7, de forma a alcançar uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados simulados.

Nas simulações, os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial foram determinados considerando o maior período da faixa (180s), caracterizando, assim, a condição de frequência de encontro próxima a zero, típica de manobra em águas calmas. O cálculo dos coeficientes de amortecimento pelo AQWA representa apenas a componente potencial. A relação entre as derivadas hidrodinâmicas associadas à manobra e os coeficientes de amortecimento é dada pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} b_{22}(0) &= -Y_v^{POT} & b_{26}(0) &= -Y_r^{POT} \\ b_{62}(0) &= -N_v^{POT} & b_{66}(0) &= -N_r^{POT} \end{aligned} \quad (4.2)$$

As derivadas hidrodinâmicas de manobra, obtidas pelo modelo semiempírico de CLARKE *et al.* (1983) e inseridas no modelo através do módulo de forças externas, incluem inerentemente efeitos viscosos e potenciais. Para evitar a duplicação da componente potencial, as derivadas hidrodinâmicas utilizadas no cálculo das forças de manobra (Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r) foram ajustadas deduzindo dos coeficientes de Clarke ($Y_v^{CLARKE}, Y_r^{CLARKE}, N_v^{CLARKE}, N_r^{CLARKE}$) a parcela potencial obtida pelo AQWA (b_{22}, b_{26}, b_{62} e b_{66}) na frequência próxima a zero.

$$\begin{aligned} Y'_v &= Y_v^{CLARKE} - Y_v^{POT} & Y'_r &= Y_r^{CLARKE} - Y_r^{POT} \\ N'_v &= N_v^{CLARKE} - N_v^{POT} & N'_r &= N_r^{CLARKE} - N_r^{POT} \end{aligned} \quad (4.3)$$

A Tabela 7 apresenta um comparativo entre os valores das derivadas hidrodinâmicas adimensionais calculadas pelo modelo de Clarke, pelo AQWA e os coeficientes ajustados de acordo com a equação 4.3.

Tabela 7 – Comparativo entre as derivadas hidrodinâmicas de manobra obtidas pelo modelo de Clarke e a parcela potencial obtida através do AQWA, e os coeficientes corrigidos (1ª Correção) conforme 4.3.

Coef.	Clarke	Potencial	Ajustado
Y'_v	-0,011093	-0,000000	-0,011093
Y'_r	0,002877	0,002345	0,000532
N'_v	-0,004186	-0,002345	-0,001841
N'_r	-0,002018	-0,000000	-0,002018

O procedimento para adimensionalizar os coeficientes do AQWA seguiu a metodologia descrita pela SNAME (1950), que é a mesma utilizada no trabalho de Clarke.

$$\begin{aligned} Y'_v &= \frac{Y_v}{(1/2)\rho L^2 U} & Y'_r &= \frac{Y_r}{(1/2)\rho L^3 U} \\ N'_v &= \frac{N_v}{(1/2)\rho L^3 U} & N'_r &= \frac{N_r}{(1/2)\rho L^4 U} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Onde U é a velocidade resultante instantânea.

Os coeficientes de massa adicional adotados nas simulações foram calculados pelo AQWA, que leva em consideração a geometria do casco. Os coeficientes relacionados à massa adicional fornecidos pelo modelo de Clarke, que levam em conta somente as dimensões principais, não foram utilizados, de modo a evitar duplicidade.

Uma limitação do AQWA é a impossibilidade de inserir diretamente uma condição de velocidade inicial não nula. Para contornar essa restrição, as simulações foram configuradas de modo que o leme permanecesse a 0° por um período inicial suficiente para que o navio atingisse a velocidade desejada. Após esse intervalo, o leme é acionado, dando início ao desenvolvimento da manobra.

A Figura 18 apresenta as trajetórias do navio durante a manobra de curva de giro, considerando uma velocidade de aproximação de 19 nós e o leme a 35° para boreste. A taxa de rotação da madre do leme é de $2,3^\circ/\text{s}$. A rotação do propulsor é mantida fixa em $n = 8,23\text{Hz}$. São apresentadas tanto a trajetória obtida por simulação numérica (curva azul) quanto a trajetória resultante do ensaio experimental (curva vermelha). Para esta simulação, as forças de manobra foram calculadas de acordo com a expressão 3.24, utilizando os coeficientes corrigidos conforme apresentado na Tabela 7.

Neste ponto, ressalta-se que o AQWA, nas simulações sem ondas, utiliza os coeficientes hidrodinâmicos referentes a menor frequência disponível das análises de radiação/difração.

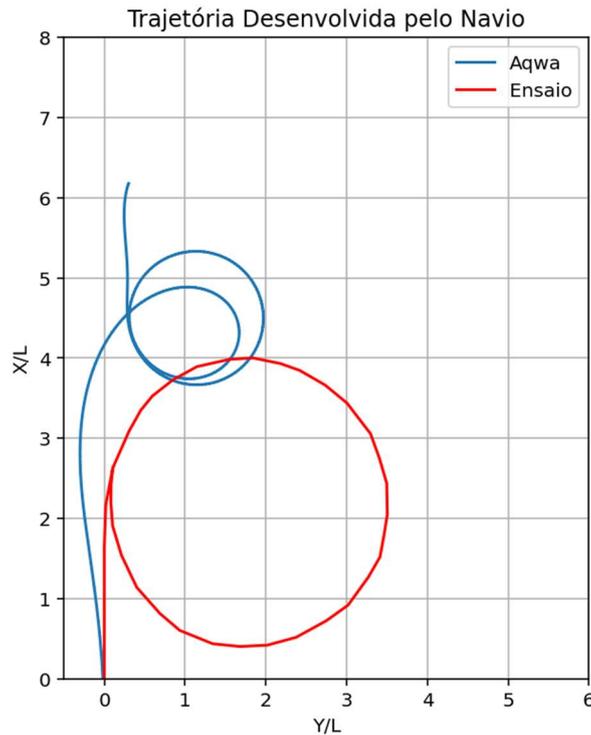


Figura 18 – Curva de giro para boreste. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°. Coeficientes de manobra ajustado conforme Tabela 7.

Nos resultados da Figura 20 observa-se uma predição numérica da trajetória não característica de uma curva de giro típica e muito diferente da curva experimental. A curva de giro numérica apresenta uma razão de diâmetro táctico/comprimento do navio de 1,14, bem menor do que a razão experimental de 3,6. Se faz necessário então um ajuste nos coeficientes de manobra a fim de calibrar a curva da simulação numérica com a curva experimental.

O raio de giro do navio na fase permanente da manobra, conforme FOSSEN (2011), é calculado através da expressão:

$$\frac{R}{L} = \frac{Y'_v(N'_r - m'x'_g) - N'_v(Y'_r - m')}{Y'_v N'_\delta - N'_v Y'_\delta} \frac{1}{\delta} \quad (4.5)$$

Pela expressão acima, observa-se que o raio de giro não depende dos termos de massa adicional. Então, para que o raio de giro do modelo numérico seja igual ao do experimento, os coeficientes de manobra relativos ao amortecimento devem ser calibrados.

A metodologia empregada para ajustar os coeficientes baseou-se não somente em fazer convergir o raio de giro, mas também a trajetória como um todo. Foi estudada a sensibilidade de cada coeficiente na trajetória das curvas. Por exemplo, variações em Y'_v e Y'_r demonstraram maior influência no tamanho do raio de giro na fase permanente. Já ajustes em N'_v e N'_r mostraram-se mais relevantes para corrigir a trajetória inicial da curva numérica.

Por meio de iterações, foi possível identificar um conjunto de coeficientes que minimiza a diferença entre as trajetórias simulada e experimental, indicando a representatividade do modelo numérico. Ao final das iterações, os coeficientes de manobra utilizados (calibrados) foram os seguintes:

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= Y'^{POT} & Y'_v &= 2,5 Y'^{CLARKE} - Y'^{POT} \\
 Y'_r &= Y'^{POT} & Y'_r &= 2,5 Y'^{CLARKE} - Y'^{POT} \\
 N'_v &= N'^{POT} & N'_v &= 2,0 N'^{CLARKE} - N'^{POT} \\
 N'_r &= N'^{POT} & N'_r &= 4,5 N'^{CLARKE} - N'^{POT}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Tabela 8 – Derivadas hidrodinâmicas de manobra calibradas com base no ensaio experimental de curva de giro.

Coeficientes	Clarke Amplificado	Potencial	Coeficientes calibrados
Y'_v	-0,02773	0,000000	-0,027733
Y'_r	0,007193	-0,002345	0,004848
N'_v	-0,00837	0,002345	-0,006026
N'_r	-0,00908	0,000000	-0,009082

A Figura 19 apresenta as trajetórias do navio durante a manobra de curva de giro, considerando uma velocidade inicial de 19 nós e o leme a 35° para boreste. A coordenada (0,0) marca o instante do início do giro do leme na simulação numérica.

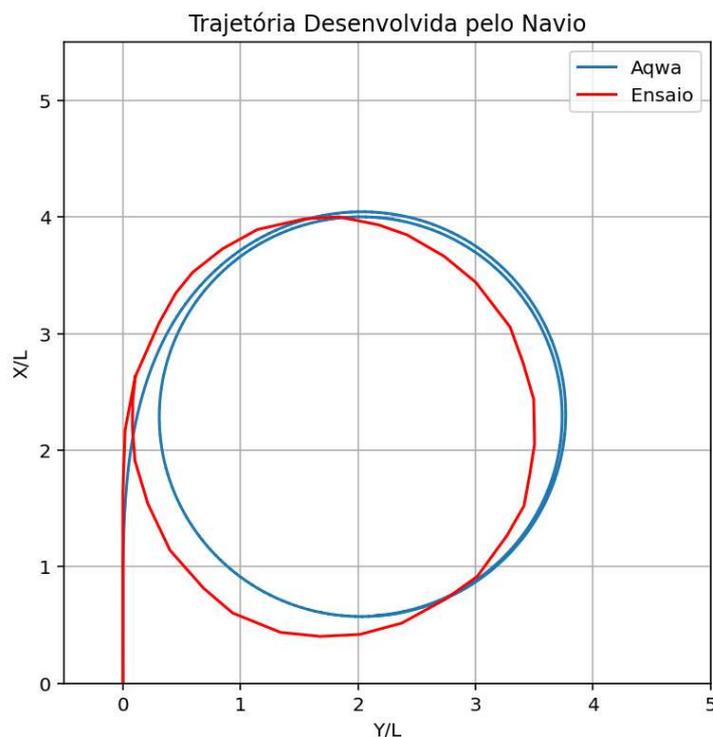


Figura 19 – Curva de giro para boreste. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°. Coeficientes de manobra ajustados (Tabela 8).

Observa-se uma boa concordância entre as curvas da simulação numérica e o ensaio experimental. De modo geral, a fase transiente da manobra não coincide com o experimento, porém, a parte permanente é semelhante.

Sabe-se que a fase transiente da manobra sofre grande influência dos termos de massa adicional, visto que as acelerações de sway e yaw não são nulas e as velocidades ainda estão se desenvolvendo. Então, uma possível justificativa para a diferença na fase transiente da curva de giro, apresentada na Figura 19, é uma discrepância entre os coeficientes de massa adicional que estão sendo utilizados no modelo numérico e os presentes nos experimentos.

As próximas figuras ilustram as séries temporais dos ângulos de yaw, deriva e leme, bem como das velocidades instantâneas em surge, sway e yaw, além das forças relacionadas à propulsão, resistência, leme e manobra.

A velocidade instantânea de surge (u), inicialmente 9,77 m/s (19 kt), estabiliza-se em 7,1m/s no regime permanente, representando cerca de 27% de perda. O mesmo comportamento é observado para o ângulo de deriva (β), que se estabiliza próximo a 16°.

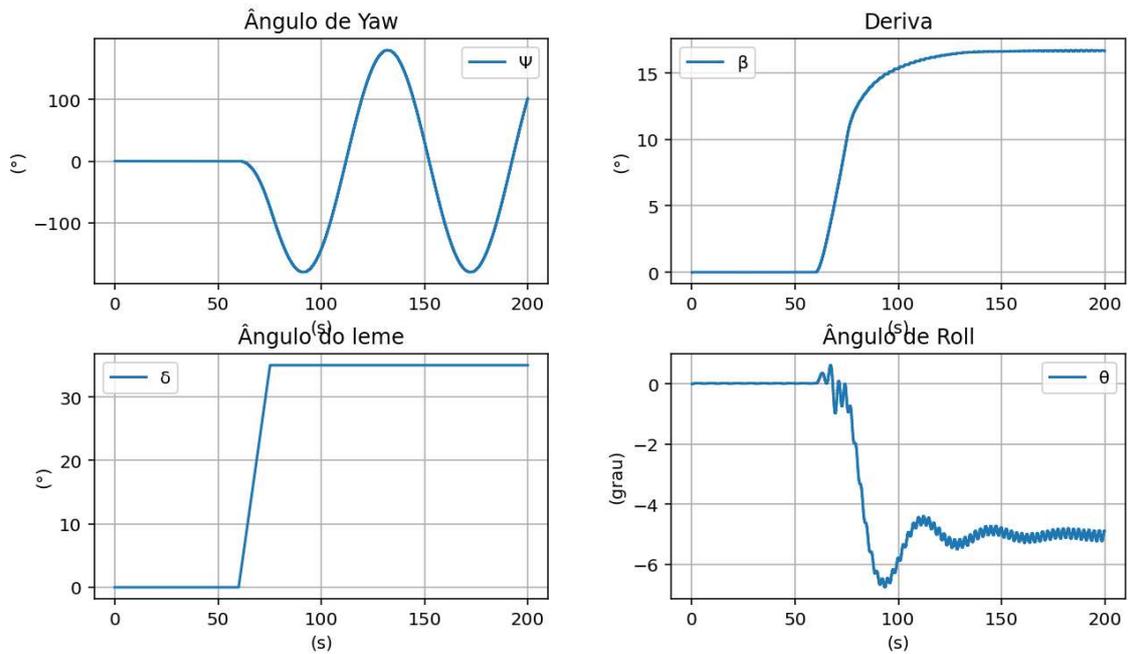


Figura 20 – Curva de giro para boreste. Séries temporais dos ângulos de yaw, deriva e do leme. Velocidade de aproximação 19kt e leme a 35°.

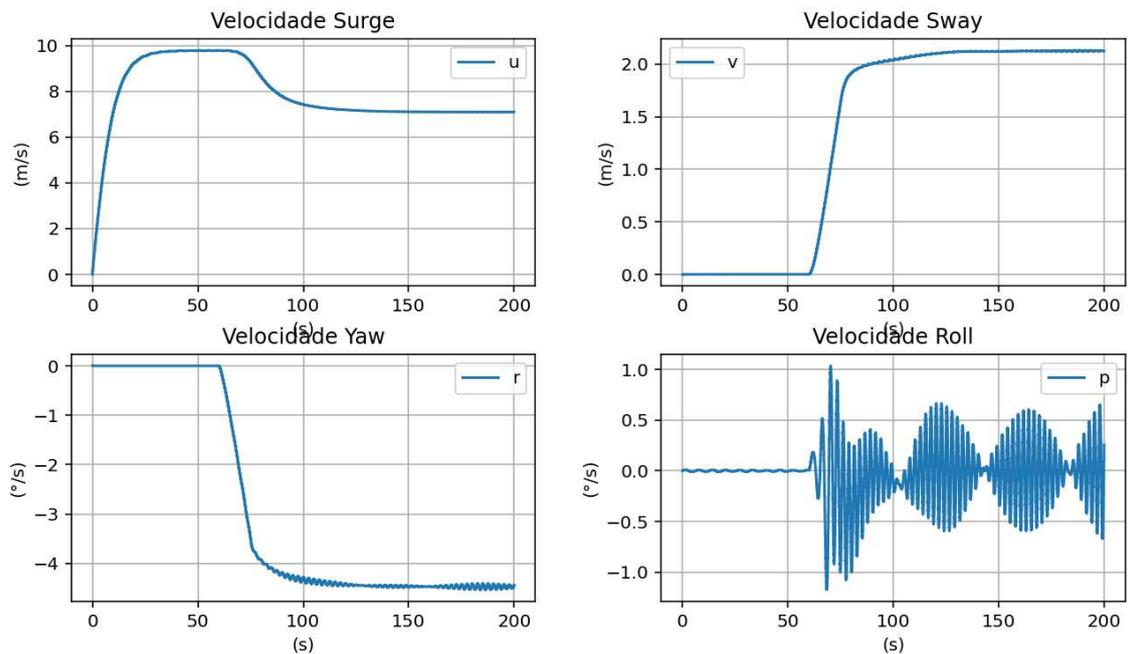


Figura 21 – Curva de giro para boreste. Séries temporais das velocidades de surge, sway e yaw. Velocidade inicial de 19kt e leme a 35°.

Na fase permanente da manobra, a velocidade de yaw (r) se estabiliza em 4,4°/s e o ângulo de roll (φ) em 4,8°. Isto demonstra a capacidade do modelo de também reproduzir o adernamento causado durante uma manobra de curva de giro.

No modelo utilizado, o amortecimento de roll considera apenas a parcela potencial, efeitos viscosos não foram incluídos. Essa escolha pode justificar a presença de oscilações de alta frequência observadas na série temporal da velocidade de roll, uma vez que o amortecimento potencial, por si só, pode não ser suficiente para dissipar rapidamente essas oscilações.

A Figura 22 apresenta as séries temporais das forças externas de propulsão, resistência ao avanço, do leme e de manobra (ver equação 3.24). O navio parte do repouso e o leme é acionado (através do módulo de forças externas) somente após 60s para permitir o navio chegar na velocidade de serviço. Por esse motivo, observa-se que as forças do leme e, conseqüentemente, as de manobra, começam a surgir após esse instante.

A rotação do propulsor, definida no módulo de forças externas, é definida de forma a equilibrar a resistência e o empuxo do propulsor na velocidade de serviço. Esta rotação é mantida fixa ao longo de toda a simulação. Por este motivo, a força de propulsão acaba sendo máxima no início da simulação, visto que o navio parte do repouso e a força propulsiva (ver equação 3.28) passa a ser governada pelo termo k_0 (que é o valor de k_T para o coeficiente de avanço zero na referida rotação).

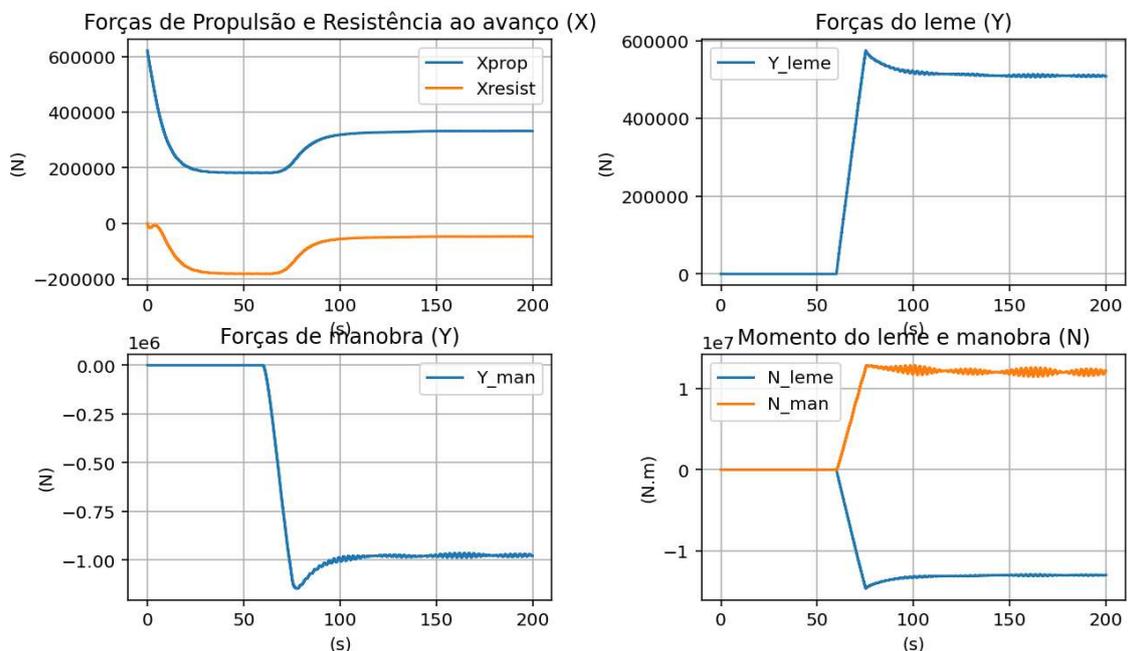


Figura 22 – Curva de giro para boreste. Séries temporais das forças e momentos. Velocidade de aproximação 19kt e leme a 35°.

4.3.2. Manobras de giro

Com os coeficientes hidrodinâmicos de manobra calibrados, foram realizadas manobras com diferentes ângulos de leme e velocidades de aproximação para verificar o comportamento do modelo numérico em diferentes manobras em águas calmas, comparando-o com os resultados experimentais.

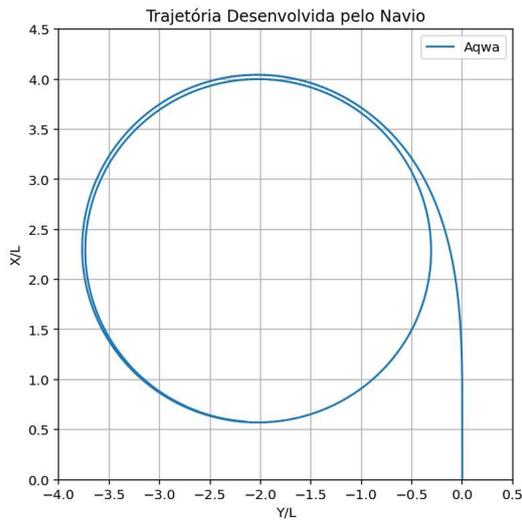
Os ensaios experimentais de manobra (MARINHA DO BRASIL, 2016a), com modelo reduzido autopropelido, foram realizados em águas profundas, sem restrições e sem ondas. A trajetória do modelo (considerando a posição do centro de gravidade como ponto de referência) foi continuamente registrada por meio de um taquímetro conectado a um sistema de coleta e processamento de dados. Paralelamente, a deflexão do leme e o aproamento do navio foram monitorados em tempo real, utilizando um sistema composto por controladores sem fio e software de aquisição e processamento de dados.

Os ensaios de curva de giro foram realizados com ângulos de leme de 35° para três velocidades selecionadas (a manobra para boreste foi conduzida somente na maior velocidade). Também foram realizados ensaios de espiral e zig-zag para a velocidade de serviço, considerando diferentes ângulos de leme. Os ensaios foram feitos para um único calado fixo, equivalente à condição de carregamento de navio carregado.

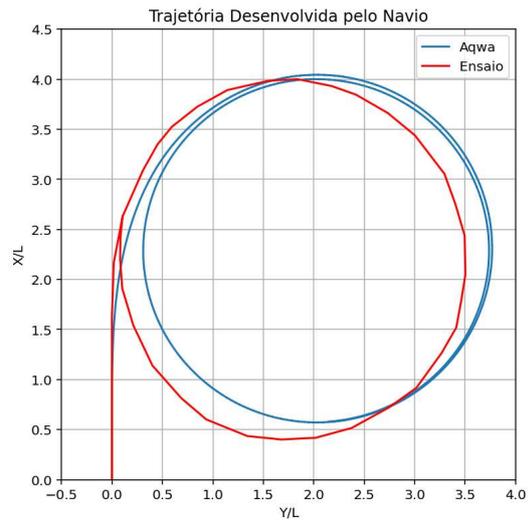
Os resultados numéricos (curvas azuis) da resposta do navio nas manobras de giro para as diferentes velocidades de aproximação (19, 17,5 e 14,3 nós) são apresentados na Figura 23. A rotação do propulsor foi mantida constante. O leme é acionado na coordenada (0,0), saindo de 0° para 35° para bombordo ou boreste a uma taxa de $2,3^\circ/s$.

Os resultados de diâmetro tático e avanço podem ser avaliados na Tabela 9, que compara os resultados do modelo numérico com os experimentos.

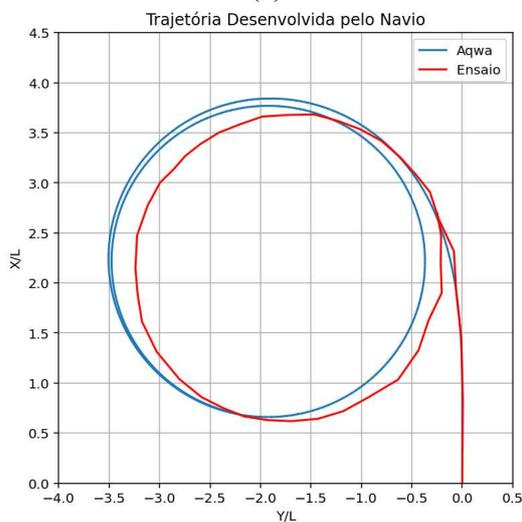
Observa-se (Figura 23) que a predição numérica da trajetória do navio durante o giro é influenciada pela velocidade, sendo que um aumento na velocidade resulta em uma trajetória mais aberta e em um raio de giro maior. Esse comportamento está de acordo com o esperado e com os resultados experimentais (curvas vermelhas).



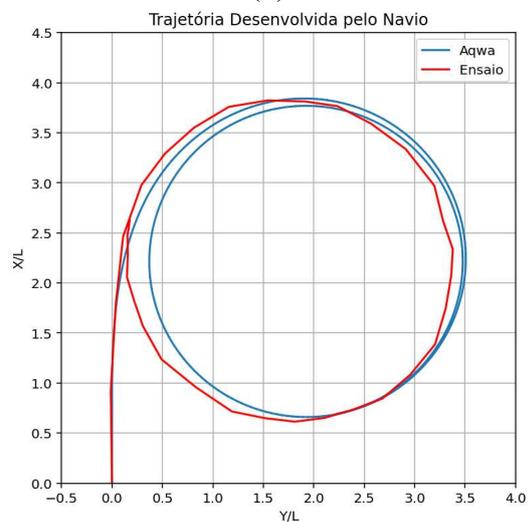
(a)



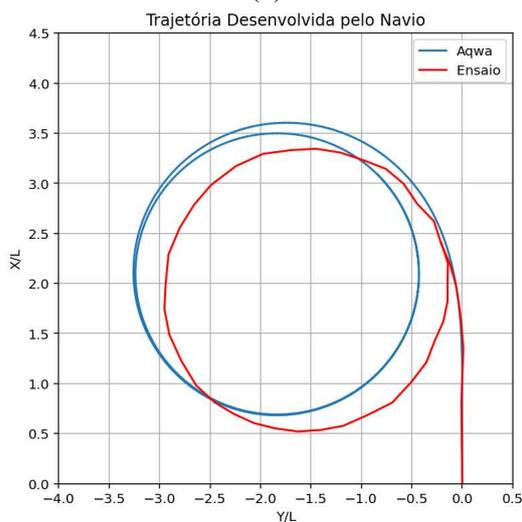
(b)



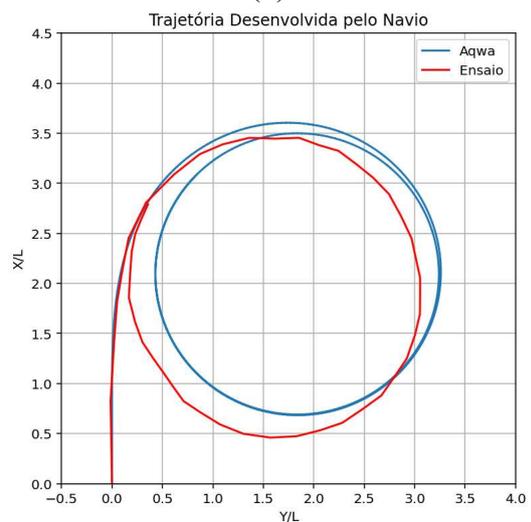
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 23 – Curvas de giro com leme a 35° respectivamente para bombordo e boreste. Velocidade inicial: 19kt (a) e (b); 17,5kt (c) e (d); 14,3kt (e) e (f).

Tabela 9 – Comparativo do diâmetro tático e do avanço para curvas com diferentes velocidades de aproximação, realizadas no modelo numérico e experimental,

Velocidade [nó]	Raio de Giro / L		Avanço / L	
	Experimento	Numérico	Experimento	Numérico
19	1,8	1,8	3,9	3,8
17,5	1,6	1,6	3,7	3,5
14,3	1,5	1,4	3,0	3,3

Também foi avaliado o comportamento da trajetória de giro do navio sob diferentes ângulos de leme. Embora não existam ensaios experimentais equivalentes, o propósito foi verificar, de forma qualitativa, a capacidade do modelo em desenvolver as alterações esperadas nas trajetórias. Os ângulos de leme avaliados foram de 35°, 20° e 10°, com a velocidade inicial fixada em 19 nós.

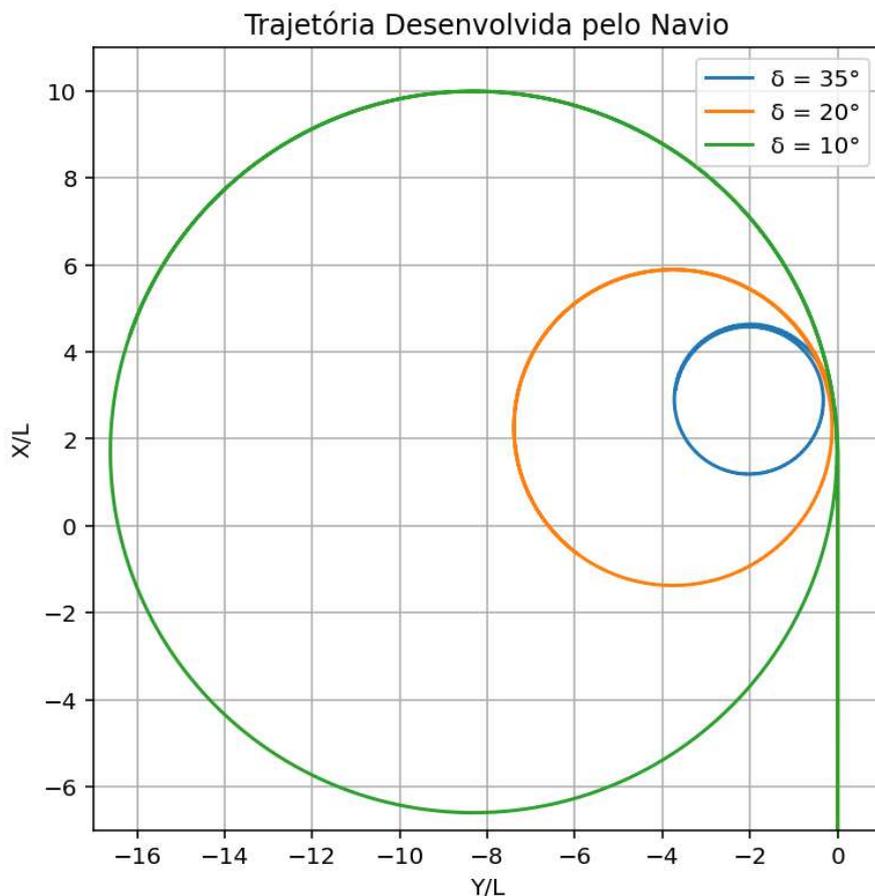


Figura 24 – Curvas de giro com velocidade inicial de 19kt e leme a 35°, 20° e 10°.

A comparação das trajetórias para diferentes ângulos de leme na Figura 24 demonstra que a amplitude da curva de giro aumenta conforme o ângulo do leme diminui. Esse resultado é esperado, pois a força lateral gerada pelo leme é proporcional ao seu ângulo de deflexão, influenciando diretamente o momento de guinada do navio. Assim, ângulos menores resultam em manobras mais abertas.

4.3.3. Manobras de zig-zag

Também foram realizadas simulações das manobras de zig-zag com leme variando de $10^{\circ}/-10^{\circ}$ e $20^{\circ}/-20^{\circ}$. Nesta manobra, o navio se aproxima com velocidade de 19 nós no aproamento 0° , para depois alternar o leme para o primeiro ângulo, por exemplo, 20° . O leme permanece nessa deflexão até que o aproamento atinja o mesmo valor, de 20° . Neste momento o leme começa a girar até alcançar -20° , dando início a um novo ciclo.

A análise dos resultados da manobra com leme variando entre $20^{\circ}/-20^{\circ}$ é apresentada na Figura 25, onde as curvas cheias são do modelo numérico e as pontilhadas do experimento. O modelo numérico apresenta um comportamento consistente em relação a uma manobra típica de zig-zag. No entanto, algumas discrepâncias podem ser observadas em relação aos dados experimentais. O modelo numérico demonstra respostas adequadas em termos de tempo de reversão do leme, indicando que os ângulos de guinada se igualam aos ângulos do leme em um tempo similar aos obtidos no experimento. Porém, com diferenças significativas em relação ao ângulo de overshoot de yaw, que é de aproximadamente 50° no experimento e de 30° no modelo numérico.

De acordo com LEWIS (1989), os resultados da manobra de zig-zag indicam a capacidade do leme de controlar a trajetória do navio, e que o ângulo de overshoot é uma medida da capacidade de contramanobra (reação a manobra), sendo um indicativo do tempo de antecipação necessário a um timoneiro ao operar em águas restritas.

O autor destaca que esse teste é influenciado tanto pelas características de estabilidade direcional da embarcação quanto pela eficiência do leme. Além disso, ele afirma que a magnitude do ângulo de overshoot de yaw tende a diminuir conforme a estabilidade direcional do navio aumenta e a eficiência do leme se reduz.

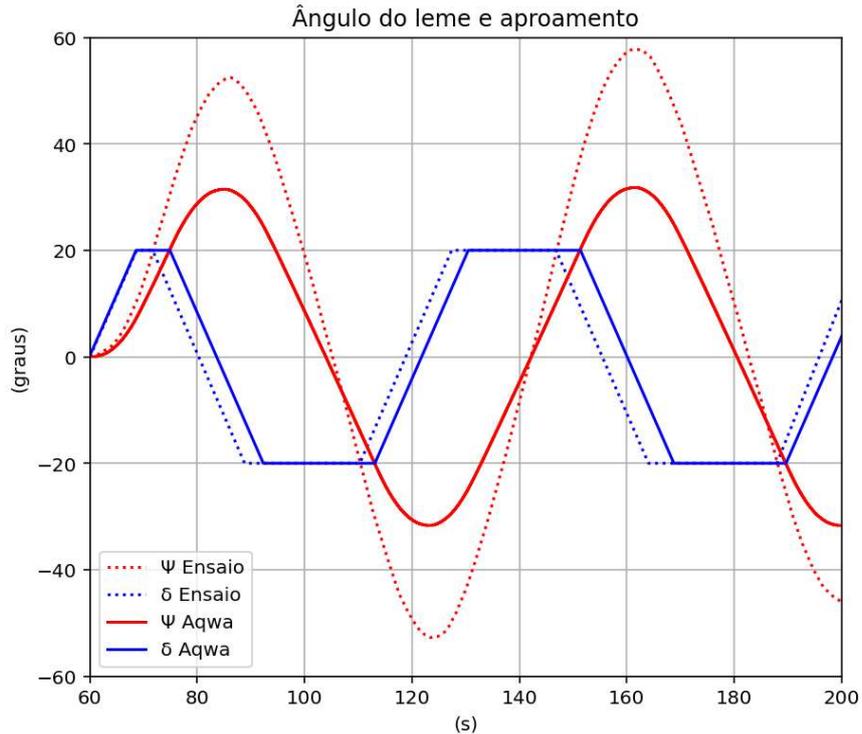


Figura 25 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a $-20^{\circ}/20^{\circ}$ começando.

Ainda segundo LEWIS (1989), o navio é considerado direcionalmente estável se o índice C for maior do que zero:

$$C = Y_v N_r - N_v (Y_r - m) > 0 \quad (4.7)$$

O índice C para o navio patrulha, calculado com base nos coeficientes calibrados (Tabela 8), é positivo, igual a $2,61 \cdot 10^{-4}$, o que indica que o navio é direcionalmente estável.

Outro possível fator para esta diferença no ângulo de overshoot pode estar relacionado à inércia do navio em yaw. No modelo numérico, a inércia foi assumida como $0.25L$ devido à ausência de dados experimentais específicos para esse parâmetro. Se a inércia presente nos experimentos for superior ao valor adotado, isso poderia explicar o overshoot maior observado no experimento, já que uma maior inércia tornaria a resposta em yaw mais lenta, levando a um maior ângulo de yaw antes da reversão do leme.

O aspecto overshoot de yaw é especialmente relevante para o fenômeno da guinada brusca (broaching), já que se relaciona com a capacidade do leme do navio de resistir a grandes oscilações em yaw. A discrepância observada no overshoot entre o modelo numérico e os dados experimentais pode ser explicada por uma combinação de

diferenças na inércia de yaw, estabilidade direcional superior no modelo numérico e variações na eficiência do leme.

Embora essa discrepância possa comprometer a resposta numérica que o navio daria ao acionar o leme para conter o broaching e a predição do ângulo máximo de yaw durante uma guinada brusca, ela não compromete a capacidade do modelo de prever a ocorrência desse fenômeno.

O Apêndice G apresenta resultados adicionais da manobra de zig-zag, como as séries temporais dos ângulos de yaw, roll, deriva e leme, bem como das velocidades de surge, sway, roll e yaw, além das forças relacionadas à propulsão, resistência, leme e manobra. Também contam no Apêndice G os resultados das simulações da manobra de zig-zag com leme variando entre $10^{\circ}/-10^{\circ}$ e da manobra de espiral.

4.4. Análise da vulnerabilidade a guinada brusca

A análise da vulnerabilidade do navio patrulha à guinada brusca será conduzida com base nos critérios de nível 1 e 2 da SGISC da IMO, que utiliza o surf-riding como base para estabelecer os critérios de vulnerabilidade, uma vez que esse fenômeno de surf-riding é observado como um precursor da guinada brusca.

Esses critérios permitem uma avaliação preliminar da suscetibilidade da embarcação a esses fenômenos, sendo o nível 1 mais conservador e baseado em limites simples, enquanto o nível 2 considera um maior refinamento matemático para estimar a probabilidade de ocorrência do fenômeno. Como essa abordagem é qualitativa e busca, de maneira geral, identificar condições de carregamento, navegação e estado do mar potencialmente vulneráveis à ocorrência de broaching, a avaliação direta da estabilidade será discutida posteriormente, seguindo a estrutura progressiva da SGISC.

4.4.1. Critério nível 1 da IMO

A classe de navio patrulha em estudo possui comprimento próximo a 55m e operam com Froude por volta de 0,42. Então, de acordo com o primeiro nível da IMO, ver seção 2.1.1, são considerados vulneráveis a este modo de falha.

4.4.2. Critério nível 2 da IMO

O nível 2 de vulnerabilidade da IMO analisa a falha de estabilidade através da verificação da ocorrência do fenômeno de surf-riding. A vulnerabilidade é avaliada considerando combinações de ondas com diferentes razões de altura e comprimento. Para a razão de altura ($s_j = H_{ij}/\lambda$), os valores variam no intervalo $0,03 \leq s_j \leq 0,15$ com um incremento de $\Delta s = 0,0012$. Já para a razão de comprimento ($r_i = \lambda_i/L$), os valores estão no intervalo $1,0 \leq r_i \leq 3,0$ com um incremento de $\Delta r = 0,025$.

Com base nas combinações de r_i e s_j , o número de Froude da velocidade do navio é comparado com o número de Froude crítico para determinar os pontos de ocorrência de surf-riding em um cenário específico de ondas.

Com o objetivo de avaliar a classe de navio patrulha em estudo de acordo com o nível 2 de vulnerabilidade de surf-riding da SGISC da IMO, foi desenvolvido um código em Python, apresentado no Apêndice E, para aplicação do procedimento descrito no capítulo 2.1.2.

O código Python desenvolvido foi testado e verificado com os resultados disponibilizados pela IMO (anexo 6 da IMO-MS.C.1-Circ.1652) para o caso de um navio de pesca denominado ITTC A2. Utilizando os dados disponíveis do casco, como dimensões do navio e coeficientes de resistência e propulsão, foram realizadas duas análises principais: uma para determinar o número de Froude crítico em cinco combinações diferentes de inclinação e comprimento de onda, e outra para avaliar o valor final do Índice de Probabilidade C para cinco cenários de número de Froude. A condição de carregamento escolhida para a análise foi a de navio carregado.

Conforme apresentado na Tabela 10 e na Tabela 11, os resultados gerados pelo código Python apresentaram variações de até 1.65% no número de Froude crítico e de até 1.96% nos valores do Índice C em comparação aos dados relatados no exemplo da IMO.

Tabela 10 - Tabela de comparação entre o número de Froude crítico de acordo com o nível 2 do critério de surf-riding da IMO calculado pelo código Python e apresentado no exemplo do anexo 6 da IMO-MS.C.1-Circ.1652.

λ/L	H/L	Froude Crítico		Diff
		(IMO 1652)	Python	
1.250	0.0504	0.3296	0.3261	1.06%
1.500	0.0396	0.3563	0.3516	1.32%
1.500	0.0504	0.3428	0.3378	1.46%
1.500	0.0600	0.3325	0.3273	1.57%
1.750	0.0504	0.3577	0.3518	1.65%

Tabela 11 - Tabela de comparação entre o índice de probabilidade C de acordo com o nível 2 do critério de surf-riding da IMO calculado pelo código Python e apresentado no exemplo do anexo 6 da IMO-MS.C.1-Circ.1652.

Fn	C_RS		Diff
	(IMO 1652)	Python	
0.30	0.0008	0.0008	-0.76%
0.35	0.0231	0.0226	-1.96%
0.40	0.0591	0.0589	-0.31%
0.45	0.0877	0.0875	-0.24%
0.50	0.0919	0.0917	-0.17%

Uma vez verificado o código Python, foi realizada a avaliação de vulnerabilidade no nível 2 do navio patrulha objeto do estudo. A Figura 26 ilustra esse resultado para a velocidade de serviço de 19 nós, exibindo pontos vermelhos (que indicam vulnerabilidade ao surf-riding) quando $C2ij = 1$ e pontos azuis quando $C2ij = 0$ (não vulnerabilidade), de acordo com as variações de r_i e s_j .

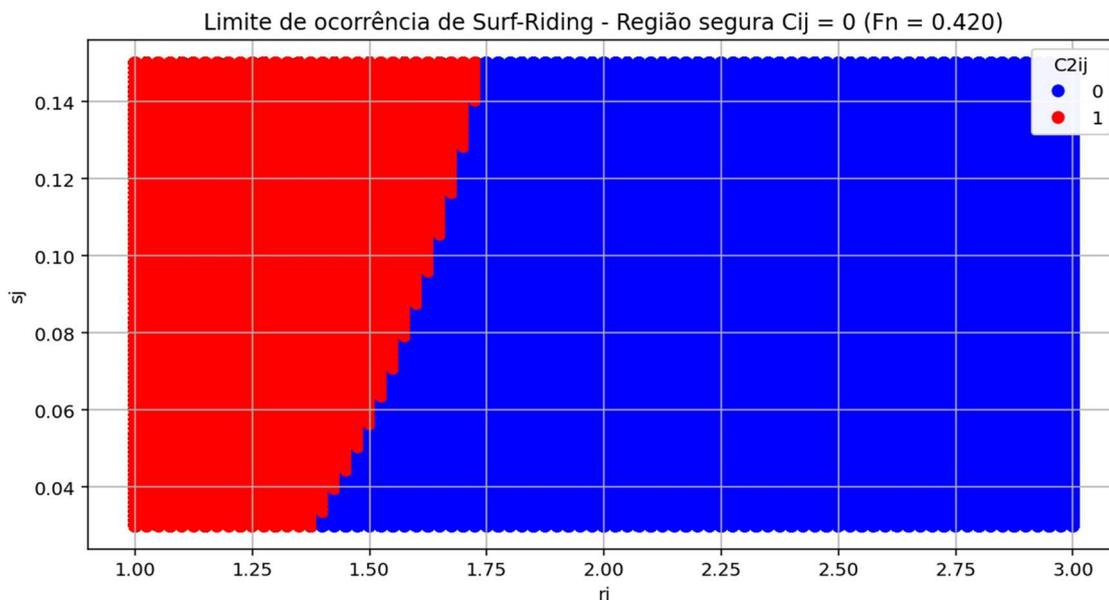


Figura 26 – Cálculo de C2 - nível 2 para surf-riding da IMO SGISC – $F_n = 0,38$

Esse procedimento foi repetido para números de Froude na faixa de 0,32 a 0,52. Para cada Froude, foi feito o cálculo do índice C de probabilidade de ocorrência de surf-riding, de acordo com os critérios de nível 2 da IMO. Os resultados são apresentados na Figura 27, onde a linha tracejada preta ($C = 0.005$) define o limite de vulnerabilidade da IMO para o surf-riding.

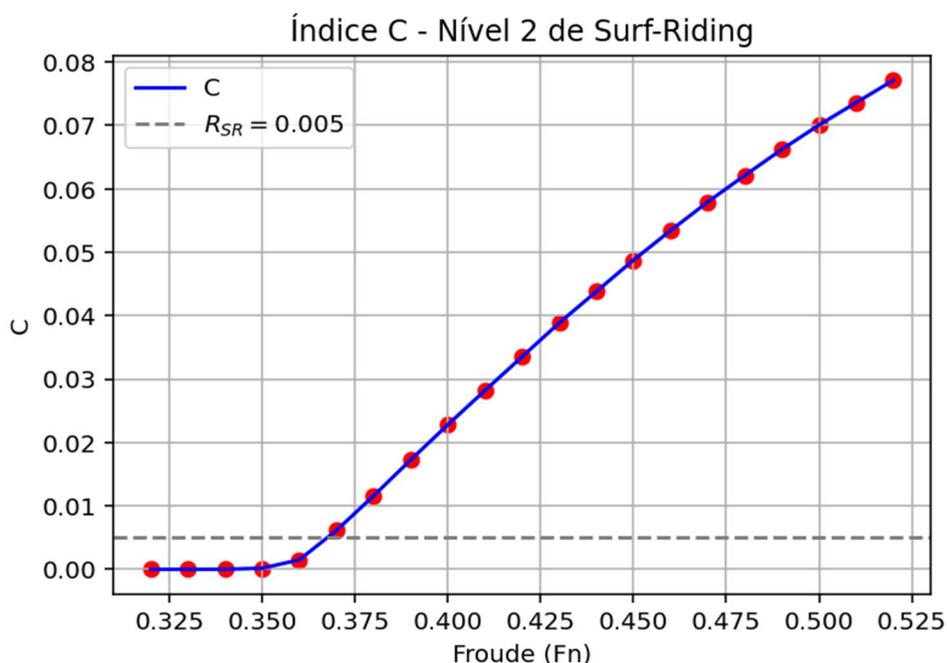


Figura 27 – Índice C de probabilidade de ocorrência de surf-riding de acordo com o nível 2 do critério da IMO SGISC

Os casos (números de Froude) onde $C > 0.005$ indicam que nessa condição o navio é vulnerável ao surf-riding e não atende aos critérios de vulnerabilidade nível 2. Logo, para Froude a partir de 0,37 (16,7 nós), o navio patrulha começa a apresentar vulnerabilidade para ocorrência de surf-riding.

Como a velocidade de projeto do navio é 19 nós ($Fn = 0,42$), nessa condição, o navio é considerado vulnerável de acordo com os IMO. Nesses casos, a IMO recomenda fazer a avaliação direta da estabilidade do navio (nível 3) para confirmar (ou não) a ocorrência de surf-riding. Caso confirmada, recomenda-se a adoção de limites operacionais ou a restrição geográfica de operação do navio.

4.5. Avaliação direta do surf-riding e broaching

A avaliação direta da estabilidade é uma análise mais aprofundada e detalhada baseada na física do fenômeno, baseada no estado da arte em simulações numéricas ou ensaios experimentais. No presente trabalho será usado o modelo numérico descrito no Capítulo 3 e implementado no ambiente ANSYS-AQWA. O objetivo é investigar a capacidade desse modelo numérico de simular situações de surf-riding, broaching (ou guinada brusca) e eventualmente a falha de estabilidade, i.e., quando o ângulo de roll do navio ultrapassa o limite de 40° .

Com base nos resultados da análise de vulnerabilidade no nível 2, foram selecionados alguns pontos representativos dentro e fora das regiões de vulnerabilidade ao surf-riding, i.e., as regiões vermelhas e azuis, respectivamente. Todas as simulações foram conduzidas para a velocidade de serviço (19 nós) e para ondas regulares incidindo pela popa.

Neste ponto é necessário fazer uma ressalva quanto a análise do movimento de roll do navio através do modelo numérico proposto. A análise do comportamento de um navio em ondas pode ser descrita de maneira satisfatória pela teoria potencial. No entanto, como o amortecimento de roll é fortemente influenciado por efeitos viscosos, um modelo baseado apenas na teoria potencial se torna inadequado para prever a amplitude de roll, frequentemente superestimando-a (ITTC 2021). Nesse contexto, determinar quantitativamente as falhas de estabilidade associadas ao broaching com base no ângulo de roll seria impreciso sem ter o amortecimento de roll acuradamente modelado. Contudo,

mesmo sem uma modelagem confiável do movimento de roll, o modelo atual tende a ser mais conservador oferecendo, no mínimo, uma avaliação qualitativa da falha de estabilidade – neste caso particular, definida como o crescimento progressivo do ângulo de roll sem chegar a estabilizar.

Com objetivo de verificar a consistência das predições do modelo numérico com os resultados da análise de vulnerabilidade, inicialmente foram selecionados 3 casos representativos destacados pelos pontos 1, 2 e 3 na Figura 28 e detalhados na Tabela 12.

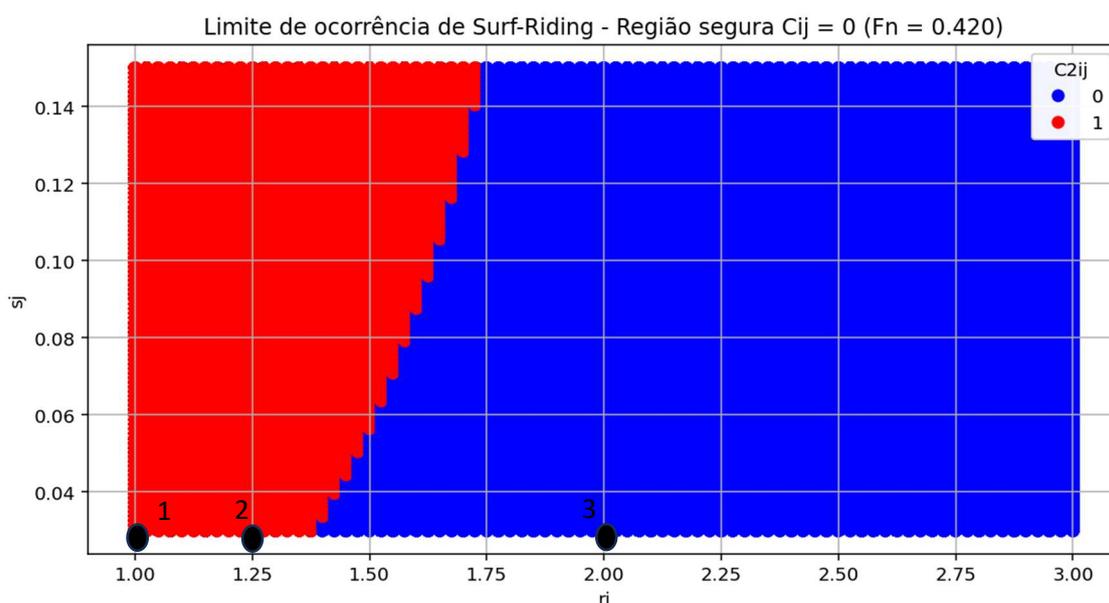


Figura 28 – Pontos representativos da zona de ocorrência de surf-riding para $F_n = 0,42$, identificada no nível 2, para avaliação direta através do modelo numérico.

Tabela 12 – Pontos representativos para a avaliação direta

Caso	r_i	s_j	λ [m]	H [m]	T [s]	c [m/s]
1	1,00	0,030	55,08	1,65	5,94	9,27
2	1,25	0,030	68,85	2,07	6,64	10,37
3	2,00	0,030	110,16	3,30	8,40	13,12

Para a avaliação direta do fenômeno de surf-riding, broaching e a eventual falha de estabilidade é essencial analisar as séries temporais de movimentos, trajetórias e as forças mais relevantes atuantes sobre o navio (saídas do modelo numérico via interface AQWA), e pós processá-las. Conforme descrito no capítulo 2, a ocorrência do fenômeno de surf-riding é identificada a partir das seguintes condições:

- 1) A elevação da onda (ζ) se mantém constante por um período pré-determinado numa certa posição do navio, i.e., a posição relativa navio-onda não se altera, ou seja, o navio se move junto com a onda.
- 2) O navio é acelerado pela onda até que sua velocidade de avanço (u) atinge a velocidade de fase da onda (c).

As séries temporais de ζ e u são verificadas para checar se esses valores se mantêm constantes simultaneamente por um período mínimo de duração, a partir do qual é caracterizado um evento de surf-riding. Seguidamente, analisa-se a ocorrência de broaching (associados ao surf-riding) com base nas seguintes três condições simultâneas:

- 1) O evento de surf-riding foi previamente identificado.
- 2) O ângulo de guinada (ψ) cresce bruscamente.
- 3) A velocidade e a aceleração de guinada possuem o mesmo sinal do ângulo ψ , indicando que o desvio do curso está se agravando.

Já a falha de estabilidade é definida quando, após a caracterização do broaching, o ângulo de roll do navio ultrapassa o limite de 40° .

4.5.1. Avaliação direta do caso 1

O caso 1 corresponde a uma onda de popa com altura de 1,65 m e período de 5,94 segundos. O comprimento dessa onda é de 55,08m e é igual ao comprimento do navio. A velocidade de fase dessa onda é de 9,26 m/s, inferior a velocidade de serviço do navio de 9,77m/s (19 nós). A rotação do propulsor é mantida fixa em 8,23Hz. O ângulo do leme é mantido na posição zero ao longo de toda a simulação e o efeito de emersão do leme é considerado.

Para avaliar o surf-riding, a Figura 29 apresenta as séries temporais da força de excitação da onda (curva vermelha) na direção longitudinal do navio e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço, calculadas em cada instante de tempo (curva azul). A componente de força de excitação da onda inclui as forças de difração e de Froude-Krylov. Esta componente é comparada com a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço a fim de estudar o equilíbrio de surf-riding. Além dessas forças, é plotada a diferença entre as forças de propulsão e resistência para velocidade igual a celeridade da onda (linha preta pontilhada).

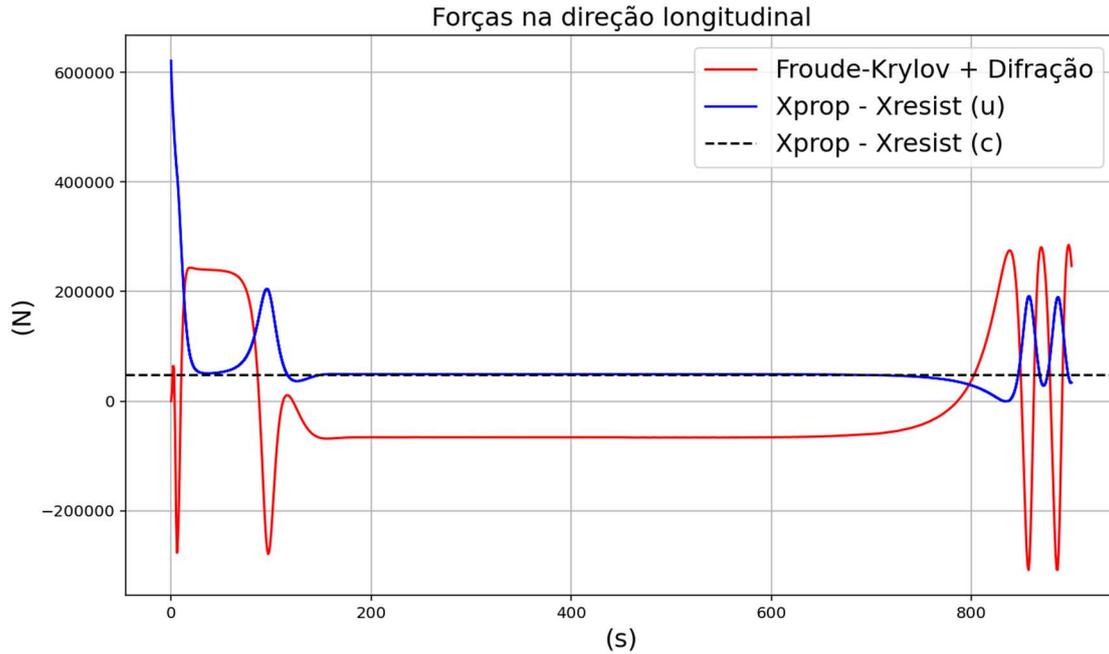


Figura 29 – Força de excitação de onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço ($H=1,65\text{m}$; $T=5,94\text{s}$).

Observa-se na Figura 29 que a diferença entre as forças de resistência e propulsão ($X_{prop} - X_{resist}$) se iguala a esta diferença calculada na celeridade da onda (linha tracejada). Além disso, observa que, após oscilações iniciais, essas forças permanecem constantes (equilibradas), indicando o fenômeno de surf-riding. Para confirmar isto, tomando o instante $t = 300\text{s}$ como exemplo, temos que:

$$X_{PROP} - X_{RESIST} (u) = +49135 \text{ N} \quad (4.8)$$

Esta diferença (49135 N) é a aproximadamente a mesma observada na curva de integração casco-propulsor em águas calmas (Figura 30) quando calculada na celeridade da onda ($9,26\text{m/s}$). Neste caso, temos que:

$$X_{PROP} - X_{RESIST} (c) = 205441 \text{ N} - 155868 \text{ N} = +49573 \text{ N} \quad (4.9)$$

Em outras palavras, o empuxo gerado pelo propulsor (na velocidade de serviço) é maior do que o necessário para a embarcação navegar com velocidade igual à celeridade da onda em águas calmas, ver Figura 30. Porém, em um dado instante, a força de excitação da onda (curva vermelha na Figura 29) age contra o avanço do navio e o força a navegar junto à onda, dando origem ao equilíbrio de surf-riding, assim como bem definido na IMO-MS.C.1/Circ.1652 (ver Figura 60 do Apêndice A).

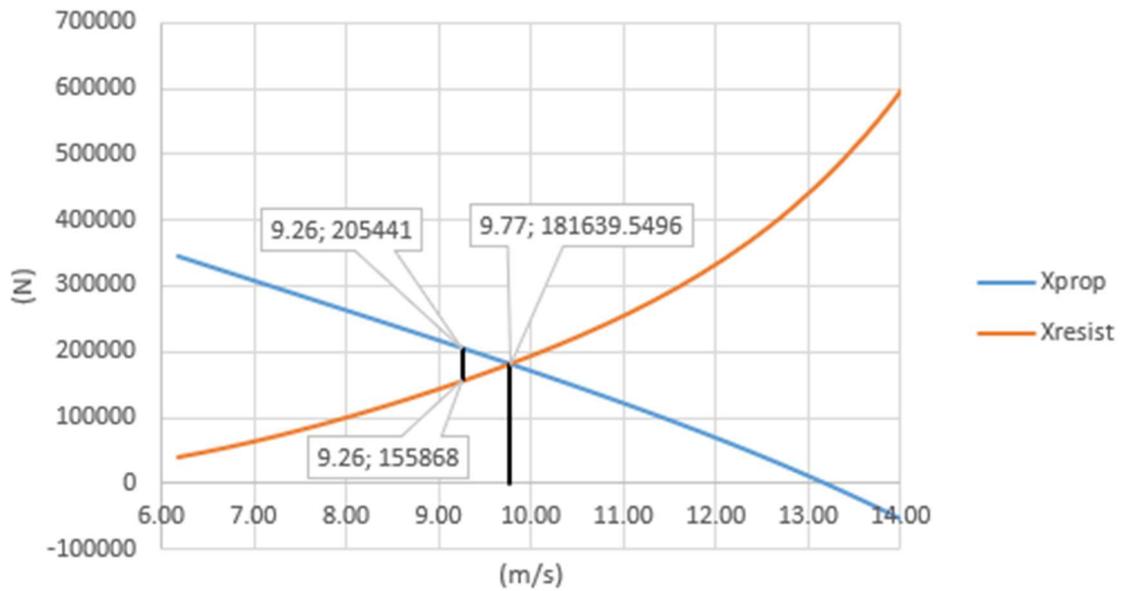


Figura 30 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão (9,77m/s) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda (9,26 m/s). Rotação do propulsor constante = 8,23Hz.

O surf-riding também pode ser observado através da série temporal da velocidade de surge (u) no referencial local, ilustrada na Figura 31. Observa-se que o navio não atinge sua velocidade de serviço, permanecendo com velocidade igual a celeridade da onda (c) e caracterizando o fenômeno de surf-riding.

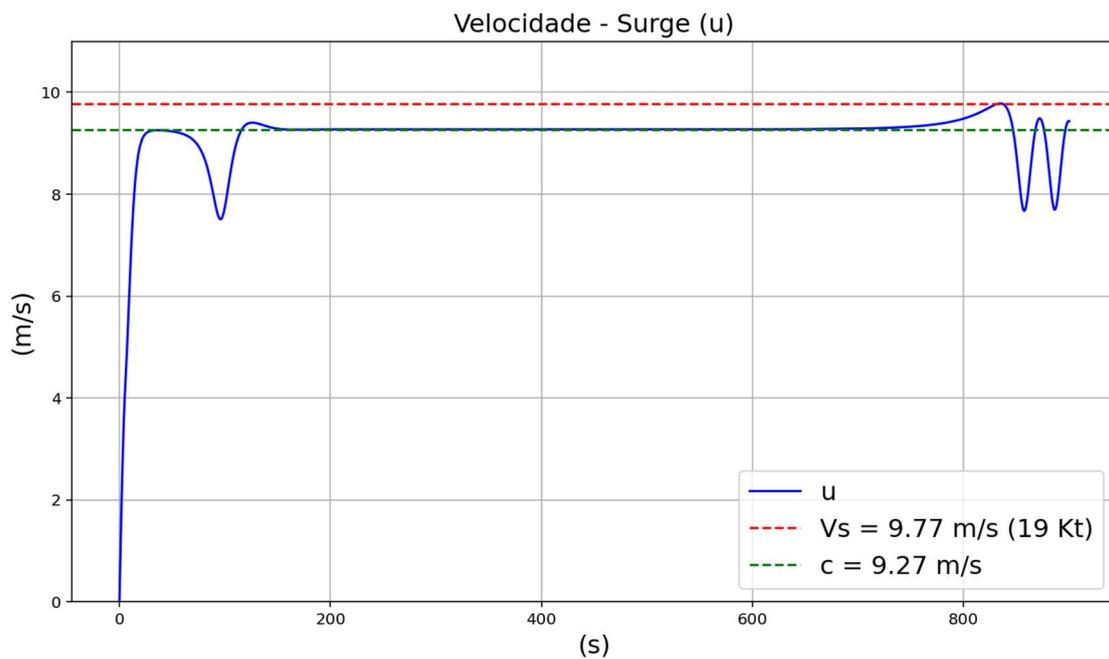


Figura 31 – Velocidade de surge do navio ($H=1,65$ m; $T=5,94$ s).

Outro parâmetro que confirma a ocorrência do surf-riding é a elevação da onda em relação a superfície média (ζ), medida na posição longitudinal do centro de gravidade do navio e expressa no referencial inercial FRA . Este parâmetro permanece constante do instante $t = 100s$ até o final da simulação, como apresentado na Figura 32. Isto indica que, na posição longitudinal do CG, não há movimento relativo entre o navio e à onda, uma vez que, se houvesse movimento relativo no sentido longitudinal, a medida da elevação iria se alterar.



Figura 32 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA ($H=1,65m$; $T=5,94s$).

Na Figura 32, a elevação da onda (ζ) é medida sempre na posição longitudinal do CG, mesmo o navio se movendo, e é expressa no referencial FRA . A onda tem altura $H = 1,65m$ e sua amplitude é de $\zeta_a = 0.825m$. Como a origem de FRA é na superfície média ($\zeta = 0$), a crista da onda se dá em $\zeta = +0.825m$ e o cavado em $\zeta_a = -0.825m$. Logo, como ζ é aproximadamente $-0.8m$ durante o período de surf, observa-se que o navio se localiza próximo ao cavado da onda durante o surf, caracterizando o equilíbrio estável conforme abordado no Apêndice A.

A emersão do leme também foi avaliada através da série temporal de Z_{W-R}^{FRA} (elevação da superfície livre da onda em relação ao topo de leme) do leme de bombordo,

apresentada na Figura 33. Conforme visto na seção 3.10, o leme fica parcialmente submerso quando Z_{W-R}^{FRA} é negativo.

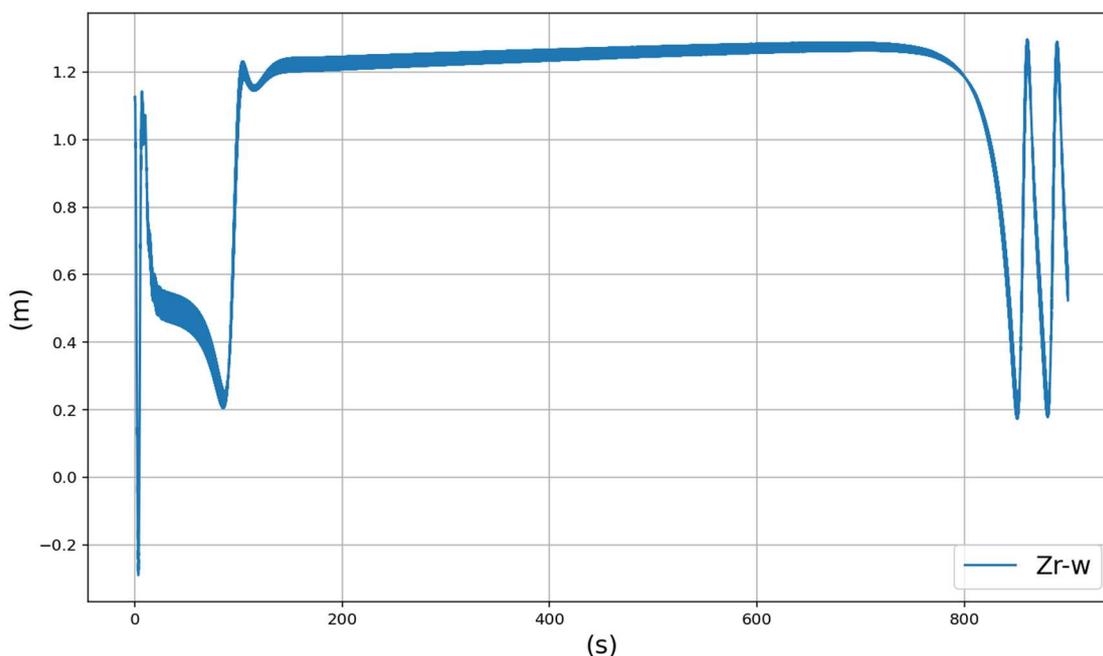


Figura 33 – Série temporal de Z_{W-R}^{FRA} ($H=1,65m$; $T=5,94s$).

Este parâmetro mostra que, inicialmente, o leme de bombordo fica parcialmente submerso, mas que, durante o surf-riding, ele se mantém totalmente submerso. Após o surf, o navio oscila e o leme fica parcialmente submerso em apenas alguns instantes.

A emersão inicial do leme se deve à posição inicial da onda na simulação. Como a função de rampa para a onda não foi utilizada, a onda já está completamente desenvolvida desde o primeiro instante da simulação, e seu cavado encontra-se próximo a meia nau do navio. Essa configuração inicial resulta em uma oscilação pronunciada em heave, pois o navio responde imediatamente à presença da onda sem uma transição gradual.

Esse comportamento inicial, caracterizado pelo aumento da restauração na proa e na popa devido as cristas da onda, pode ser visto como um efeito transiente da simulação e tende a se estabilizar ao longo da simulação. A influência da função de rampa para onda na predição do surf-riding e da guinada brusca é avaliada ao final deste capítulo.

A Figura 34 apresenta a série temporal da área submersa do leme de bombordo. Nos instantes em que Z_{W-R}^{FRA} é negativo, observa-se uma diminuição da área submersa. Porém, isto só ocorre no início e o leme permanece submerso em quase toda simulação.

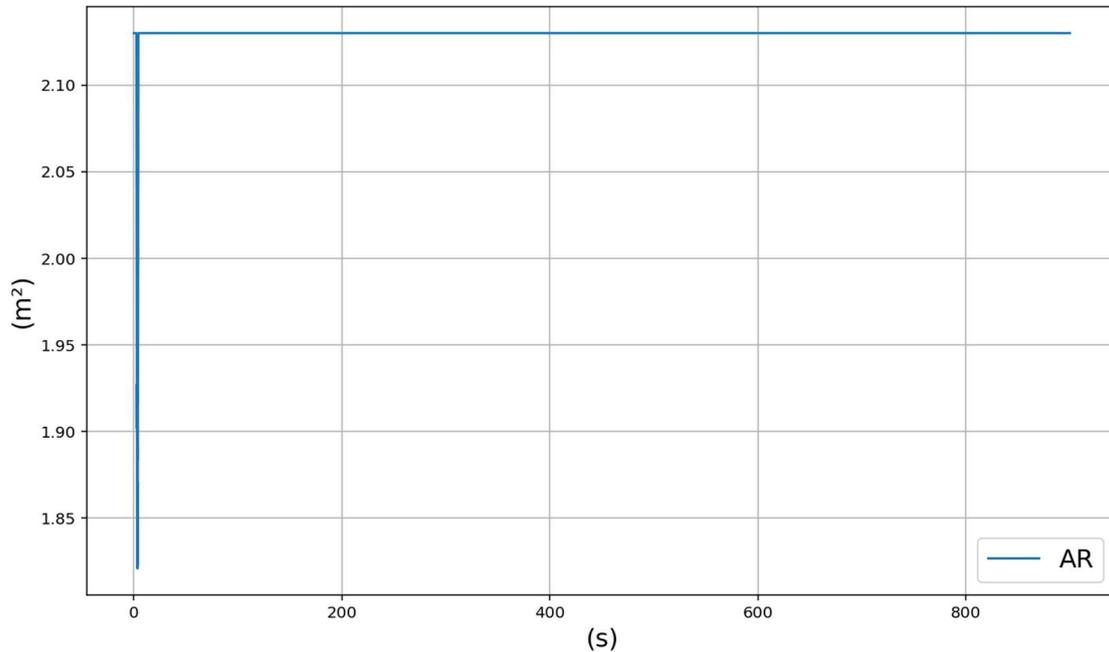


Figura 34 – Série temporal área submersa do leme (H=1,65m; T=5,94s).

A Figura 35 apresenta os ângulos de Euler e o vetor de posição do navio. A Figura 36 apresenta as derivadas dos ângulos de Euler e o vetor de velocidades.

Se observa que, a partir do instante $t = 400s$, durante o surf, o ângulo de yaw (ψ) do navio aumenta de maneira brusca até alcançar cerca de 35° , enquanto a velocidade de yaw cresce junto, alcançando $0.6^\circ/s$, o que indica um agravamento da guinada. Esta instabilidade pode ser identificada como a ocorrência do fenômeno de broaching associado ao surf-riding.

A partir do instante $t = 400s$, onde o navio começa a guinar, o ângulo de roll (φ) também começa a crescer (ver Figura 35), assumindo o valor máximo de cerca de 3° até o término da simulação. Porém, esse valor não se estabiliza durante a simulação, indicando que continuaria a crescer se o tempo de simulação fosse ampliado.

A fim de verificar a tendencia de crescimento do ângulo de roll, foi realizada uma análise adicional estendendo o tempo de simulação para 1500s. A seguinte série temporal do ângulo de roll foi obtida é apresentada na Figura 37.

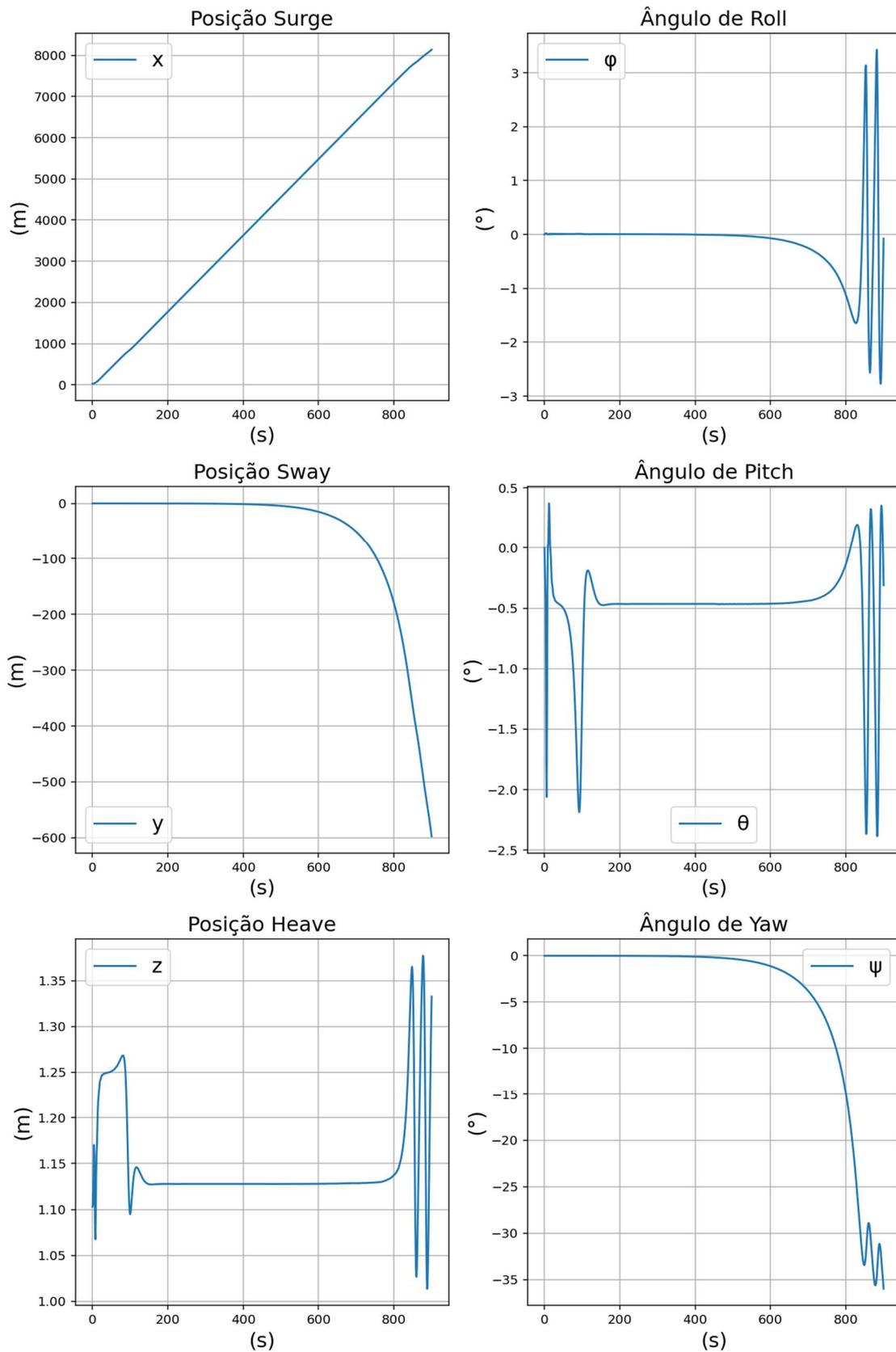


Figura 35 – Vetores de posição e ângulos de Euler (H=1,65m; T=5,94s).

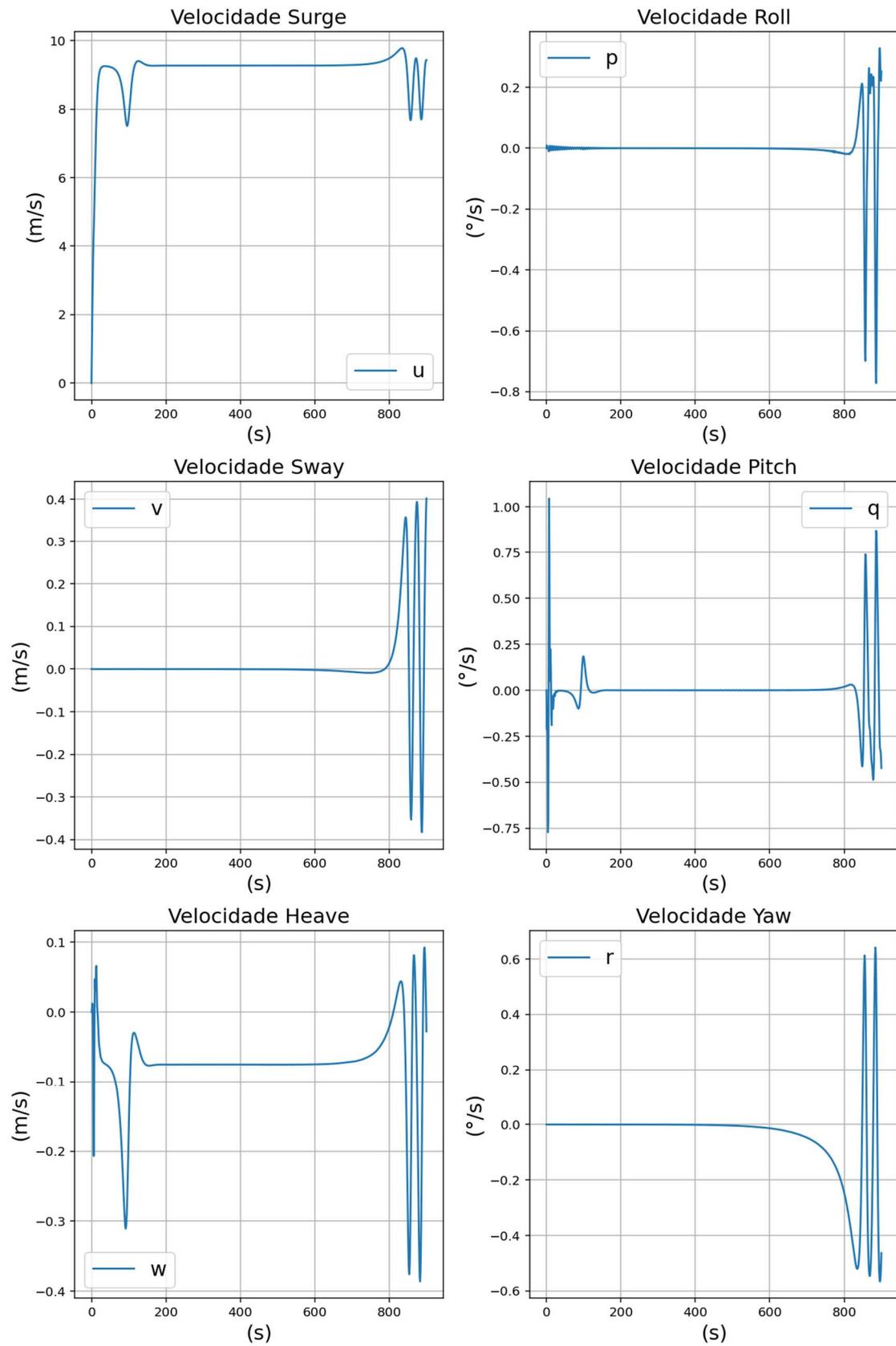


Figura 36 – Vetores de velocidade (H=1,65m; T=5,94s).

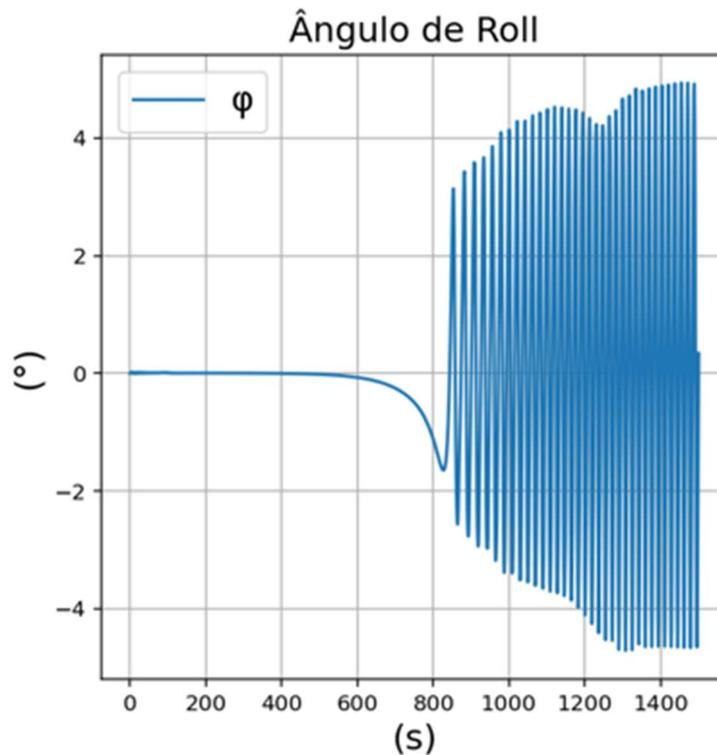


Figura 37 – Ângulo de roll para simulação com duração de 1500s ($H=1,65\text{m}$; $T=5,94\text{s}$).

A simulação estendida revela que o ângulo de roll continua crescendo até se estabilizar entre $\pm 5^\circ$ à medida que as ondas passam pelo navio.

Nesse ponto, é importante destacar que, como o modelo empregado não considera efeitos viscosos no amortecimento de roll, tanto a magnitude desse ângulo quanto sua taxa de crescimento devem ser interpretadas de forma aproximada.

4.5.2. Avaliação direta do caso 2

Este caso corresponde a uma onda com 2.07 m de altura e período de 6,64 s. O comprimento de onda é de 68,85m, i.e., 1.25 vezes o comprimento do navio. A velocidade de fase da onda é 10.37 m/s, superior a velocidade de serviço de 9,77m/s. A rotação do propulsor é mantida fixa em 8,23Hz. O ângulo do leme é mantido na posição zero ao longo de toda a simulação e o efeito de emersão do leme é considerado.

A Figura 38 apresenta as séries temporais da força de excitação de onda na direção longitudinal do navio (curva vermelha) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço (curva azul). Além dessas forças, é plotada a diferença entre as forças de propulsão e resistência para velocidade igual a celeridade da onda (linha preta pontilhada).

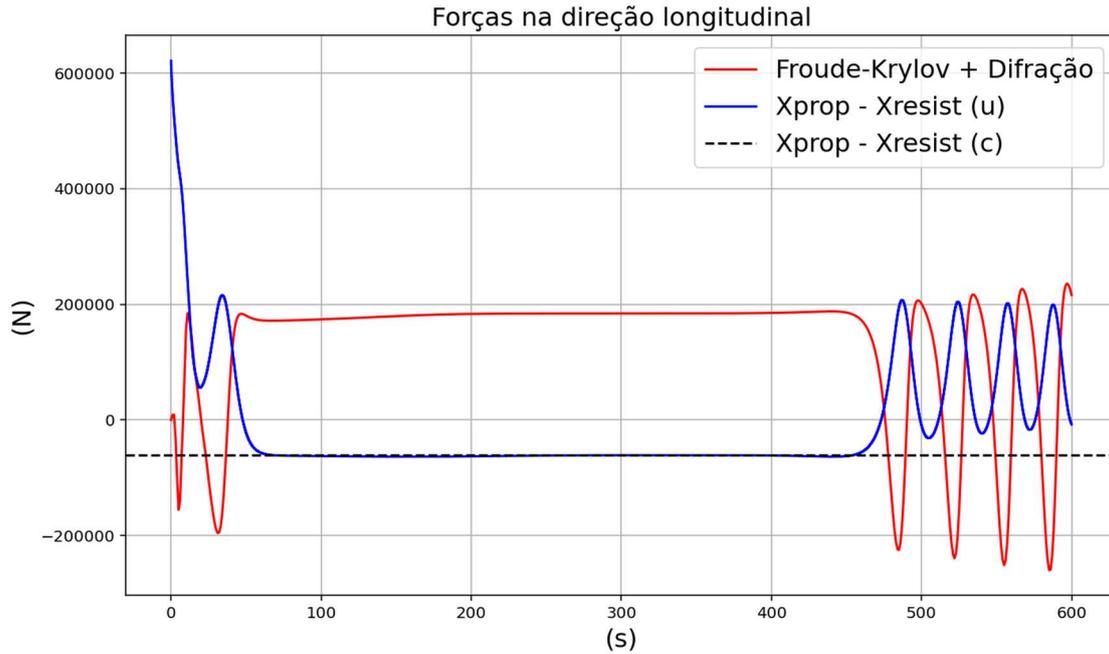


Figura 38 – Força de excitação de onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço ($H=2,07\text{m}$; $T=6,64\text{s}$).

Assim como no caso 1, observa-se que a diferença entre as forças de resistência e propulsão ($X_{prop} - X_{resist}$) se iguala a esta diferença calculada na celeridade da onda (linha tracejada). Além disso, observa que, após oscilações iniciais, essas forças permanecem constantes (equilibradas), indicando o fenômeno de surf-riding. Para confirmar isto, tomando o instante $t = 300\text{s}$ como exemplo, temos que:

$$X_{PROP} - X_{RESIST} (u) = -61104 \text{ N} \quad (4.10)$$

Esta diferença (-61104 N) é a aproximadamente a mesma observada na curva de integração casco-propulsor em águas calmas (Figura 39) quando calculada na celeridade da onda ($9,26\text{m/s}$). Neste caso, temos que:

$$X_{PROP} - X_{RESIST} (c) = 205441 \text{ N} - 155868 \text{ N} = -60039 \text{ N} \quad (4.11)$$

Neste caso, o empuxo gerado pelo propulsor (na velocidade de serviço) é insuficiente para propelar a embarcação até a velocidade igual à celeridade da onda em águas calmas, ver Figura 39. Porém, em um dado instante, a força de excitação da onda (curva vermelha na Figura 38) age a favor do avanço do navio e o força a navegar junto à onda, dando origem ao equilíbrio de surf-riding, assim como bem definido na IMO- MSC.1/Circ.1652 (ver Figura 60 do Apêndice A).

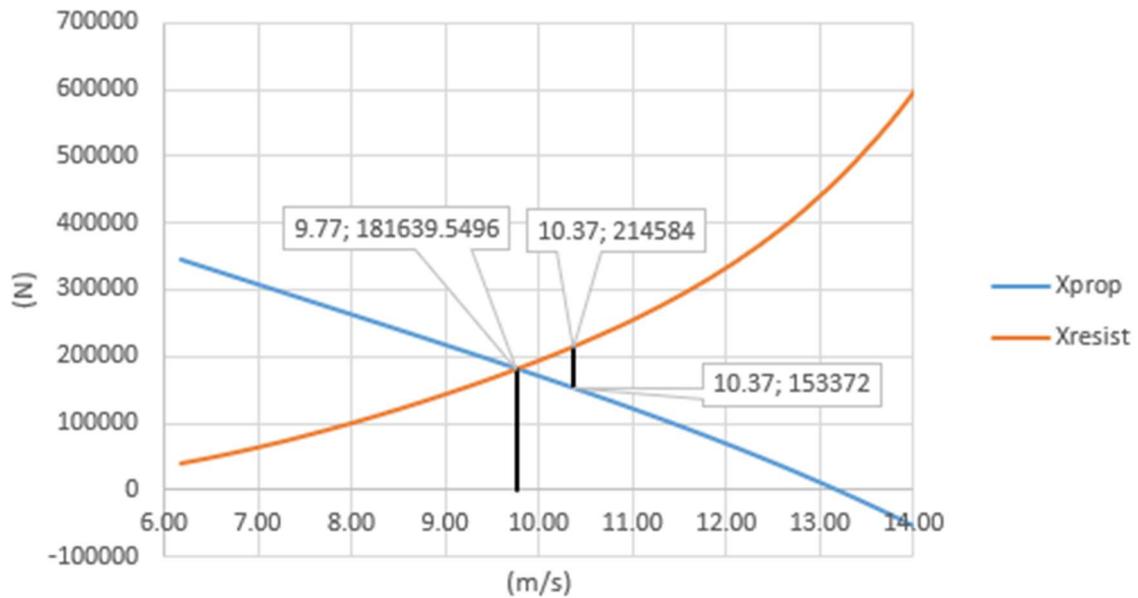


Figura 39 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão (9,77m/s) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda (10,37 m/s). Rotação do propulsor constante = 8,23Hz.

O surf-riding também pode ser observado através da série temporal da velocidade de surge (u) no referencial local, ilustrada na Figura 40. O navio é acelerado até a velocidade da onda, permanecendo nessa velocidade em parte da simulação, o que caracteriza o surf-riding. Após o instante $t = 400s$, a velocidade do navio começa a oscilar próxima a velocidade de serviço, indicando que as ondas ultrapassam o navio.

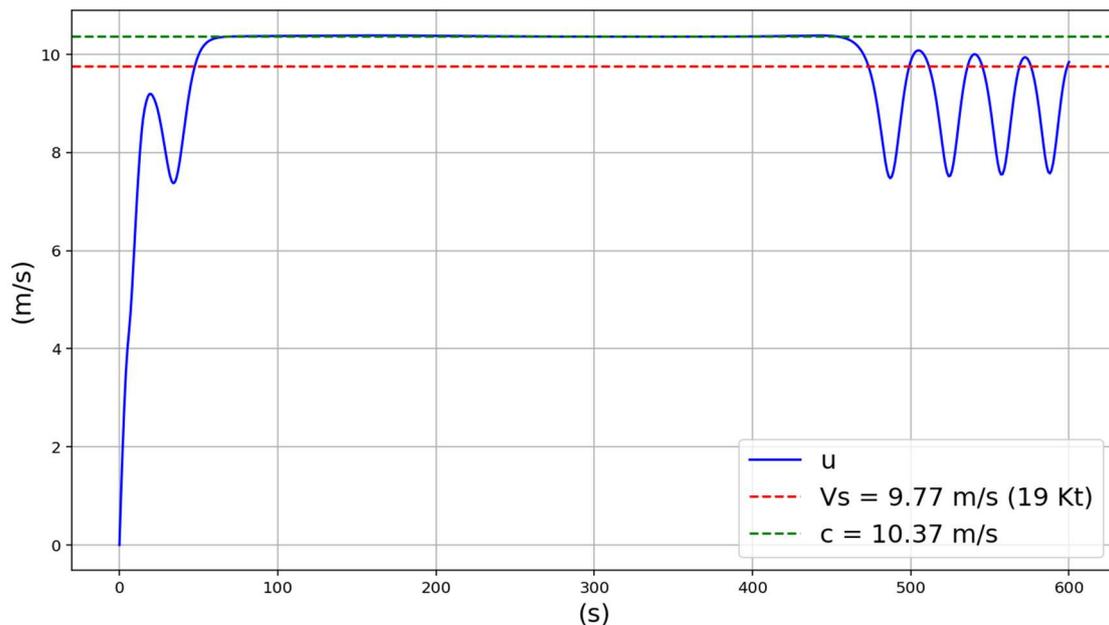


Figura 40 – Velocidade de surge do navio ($H=2,07m$; $T=6,64s$).

A elevação da onda em relação a superfície média (ζ), medida na posição longitudinal do CG, também permanece constante (Figura 41). Novamente o CG do navio fica próximo ao cavado da onda durante o surf, indicando o equilíbrio estável.

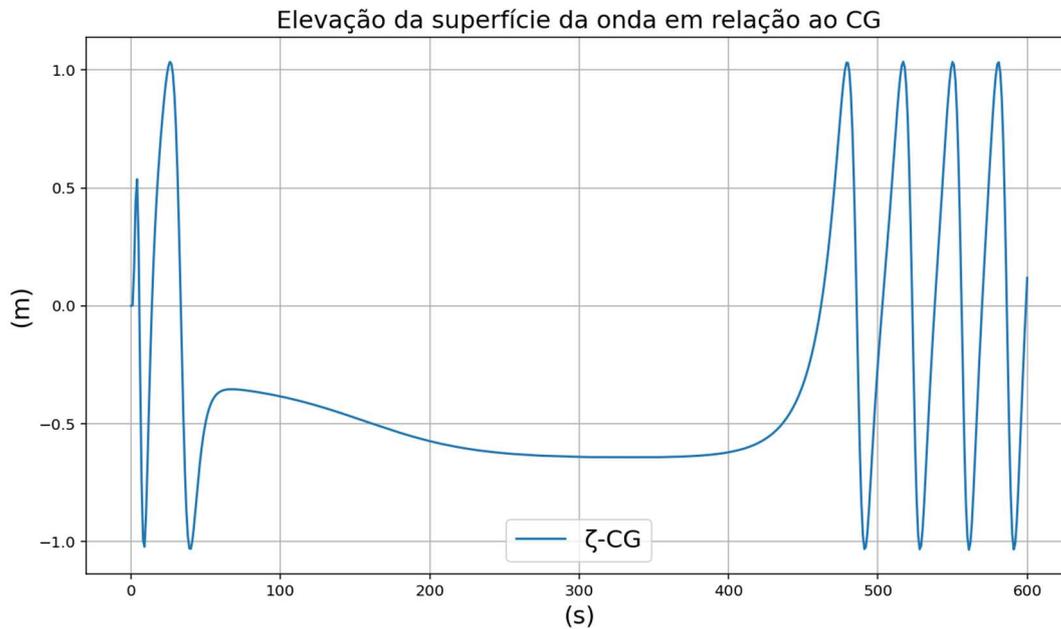


Figura 41 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA ($H=2,07\text{m}$; $T=6,64\text{s}$).

A série temporal de Z_{W-R}^{FRA} do leme de bombordo é apresentada na Figura 42 e, assim como no caso anterior, indica que o leme fica totalmente submerso durante a simulação.

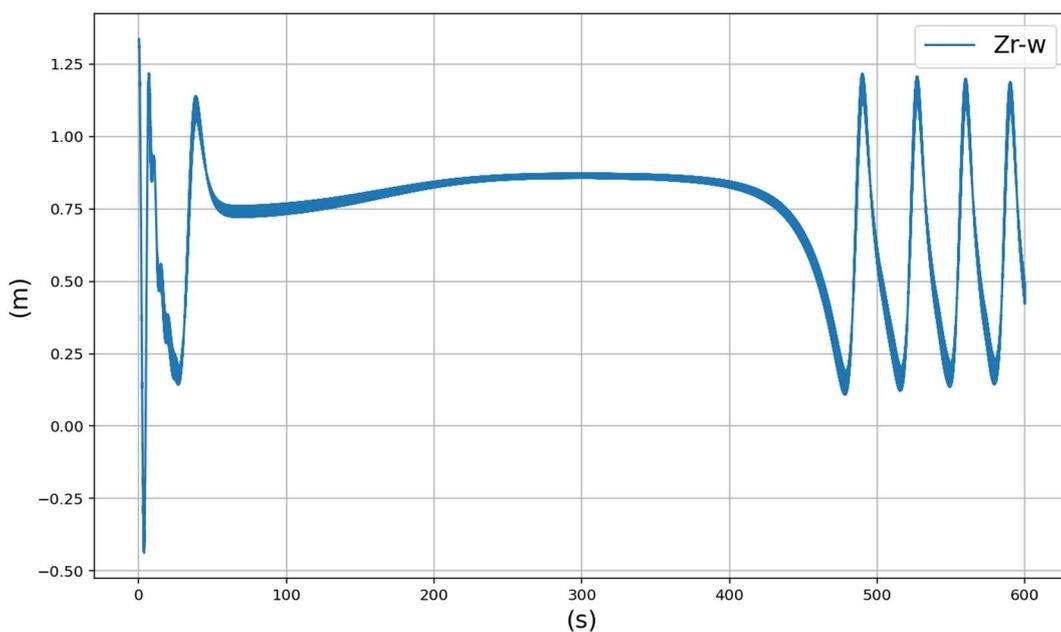


Figura 42 – Série temporal de Z_{W-R}^{FRA} ($H=2,07\text{m}$; $T=6,64\text{s}$).

A Figura 43 apresenta os ângulos de Euler e o vetor de posição do navio. A Figura 44 apresenta as derivadas dos ângulos de Euler e o vetor de velocidades.

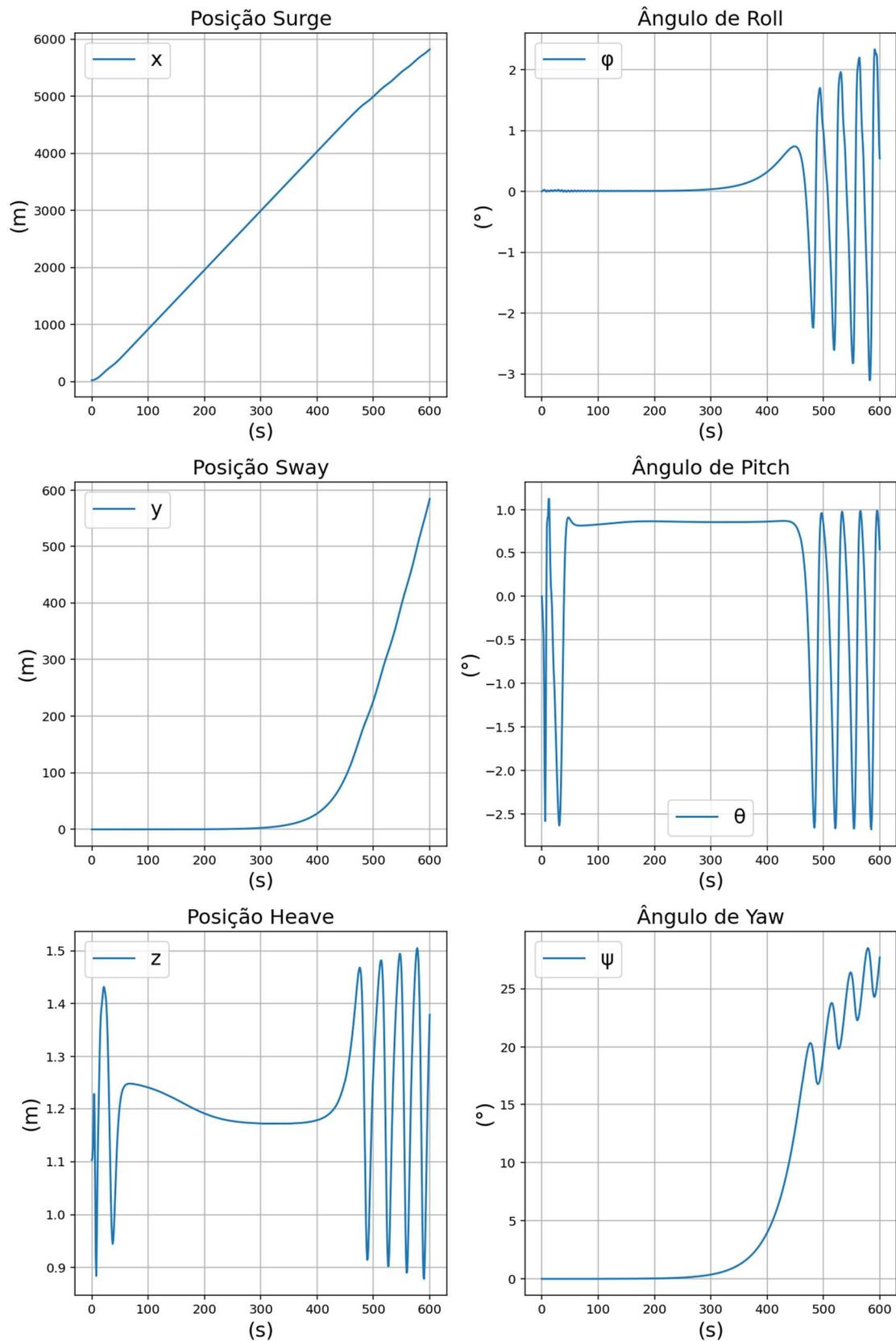


Figura 43 – Vetores de posição e ângulos de Euler ($H=2,07\text{m}$; $T=6,64\text{s}$).

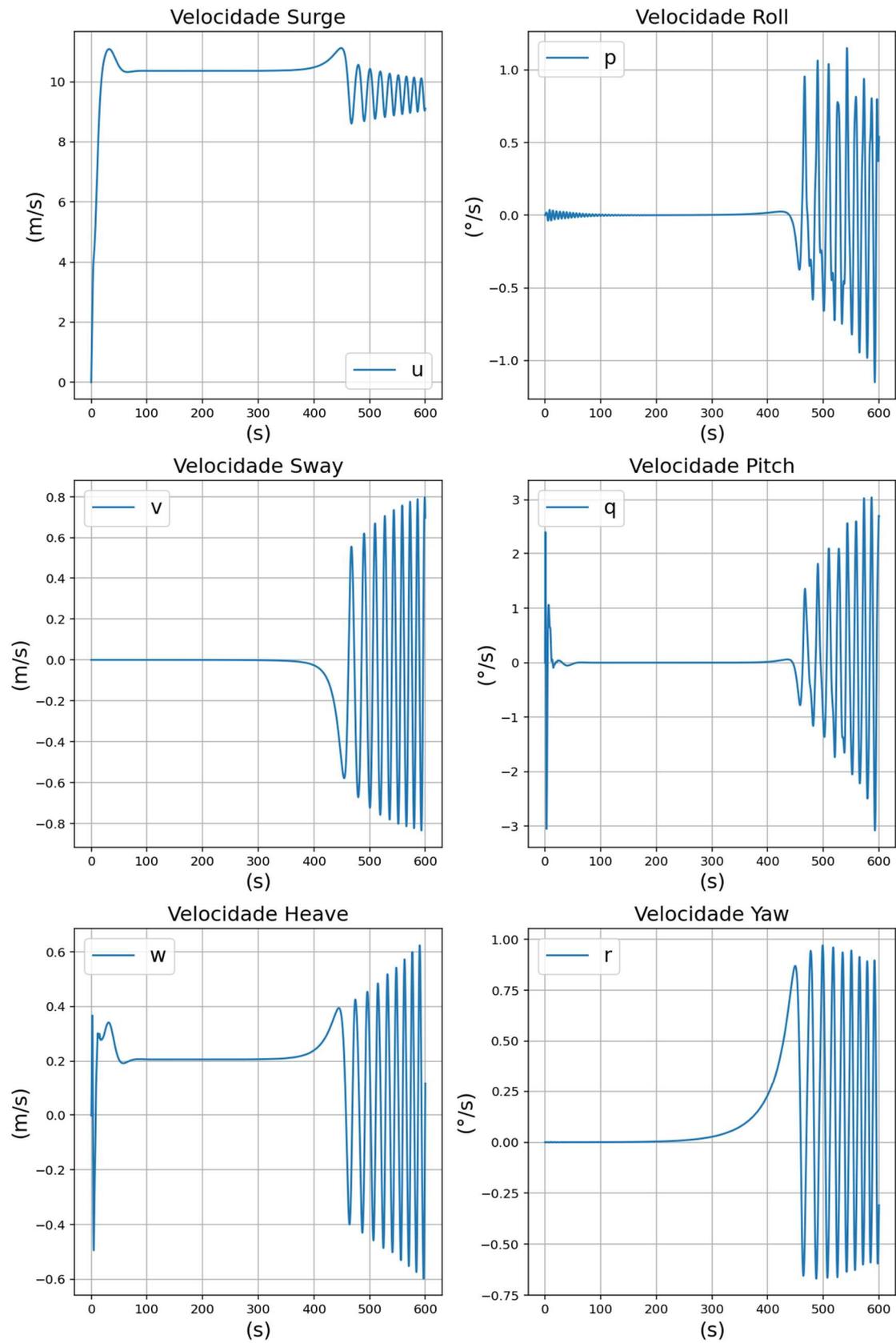


Figura 44 – Vetores de velocidade (H=2,07m; T=6,64s).

A partir do instante $t = 300s$, o ângulo de yaw (ψ) aumenta bruscamente até alcançar cerca de 25° , enquanto a velocidade de yaw cresce junto até alcançar cerca de $0.5^\circ/s$, indicando um agravamento da guinada. Esta instabilidade pode ser identificada como ocorrência do fenômeno de broaching associado ao surf-riding.

Igualmente, a partir de $t = 300s$, à medida que o navio começa a guinar, o ângulo de roll (φ) também aumenta (Figura 43), assumindo o valor máximo de cerca de 3° , porém, não se estabiliza até o término da simulação. Uma simulação adicional com $t = 2000s$ foi feita e a série temporal de φ é apresentada na Figura 45.

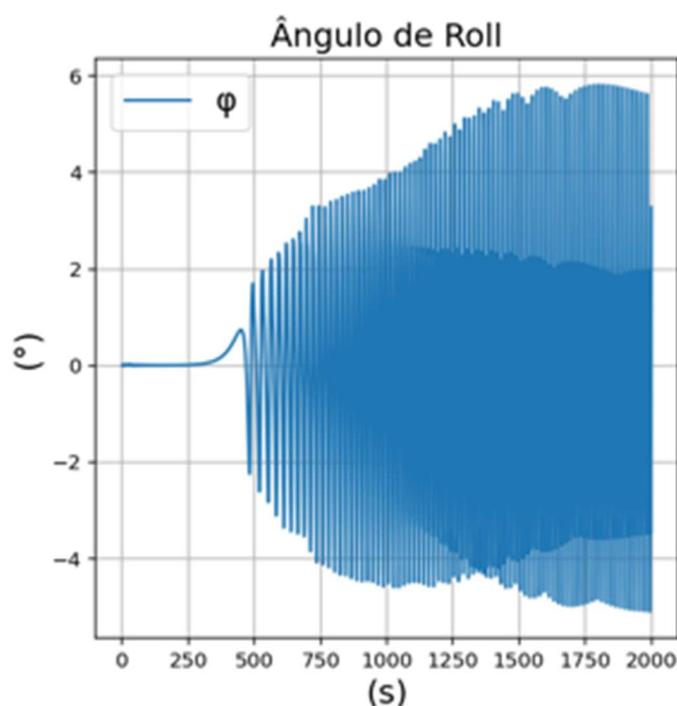


Figura 45 – Ângulo de roll para simulação com duração de 2000s ($H=2,07m$; $T=6,64s$).

A nova simulação estendida mostra que o ângulo de roll continua crescendo e depois se estabiliza, variando entre $\pm 6^\circ$ à medida que as ondas passam pelo navio.

Algumas diferenças no comportamento do navio durante o fenômeno de surf-riding e guinada brusca podem ser pontuadas entre os casos 1 e 2. No caso 1, a velocidade do navio é superior à velocidade da onda, fazendo com que a força de excitação gerada pela onda atue no sentido contrário ao avanço do navio. Isso pode ser observado na Figura 29, onde a força de excitação da onda é negativa durante o surf. Já no caso 2, a onda é mais rápida do que o navio, resultando em uma força de excitação positiva que atua no

mesmo sentido do avanço do navio, conforme evidenciado na Figura 38. Além disso, no caso 2, o navio atinge uma velocidade maior durante o surf quando comparado ao caso 1.

Uma consequência direta dessa diferença é a forma como a guinada brusca ocorre em cada cenário. No caso 1, o fenômeno ocorre de maneira mais gradual, durando cerca de 400s entre o instante em que ψ começa a crescer até o instante que ele começa a oscilar (ver Figura 35). No caso 2, esse tempo é de aproximadamente 150s.

4.5.3. Avaliação direta do caso 3

Este caso corresponde a uma onda com 3,30 m de altura e período de 8,40 s. A razão entre os comprimentos da onda e do navio é de 2,00. A velocidade de fase da onda é de 13,12 m/s. De acordo com a análise de vulnerabilidade de nível 2, este caso está fora do limite de vulnerabilidade para surf-riding.

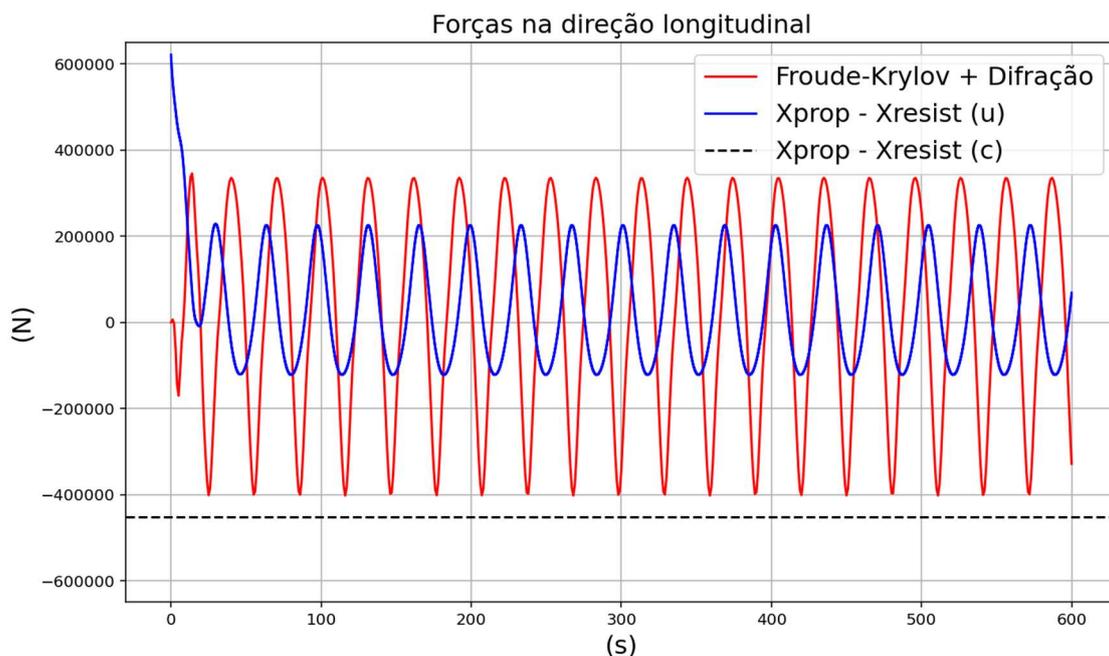


Figura 46 – Força de excitação da onda (hidrodinâmica) e a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço ($H=3,3\text{m}$; $T=8,4\text{s}$).

Pela Figura 46 observa-se que a força de excitação de onda não se equilibra com a diferença entre as forças de propulsão e resistência ao avanço, indicando que não ocorre o surf-riding.

Pela curva de integração casco-propulsor (Figura 47), verifica-se que, para a velocidade de fase da onda (13,12m/s), há uma diferença de 453318 N entre as forças de propulsão e resistência ao avanço. Na Figura 46, essa diferença é marcada pela linha tracejada.

Observa-se (Figura 46) que a força de excitação da onda não é suficiente para compensar essa diferença em nenhum momento da simulação, i.e., o navio não pode ser acelerado até a velocidade da onda. O único movimento o que ocorre é o avanço e o recuo do navio, aqui chamado de surging (ver Figura 60 do Apêndice A).

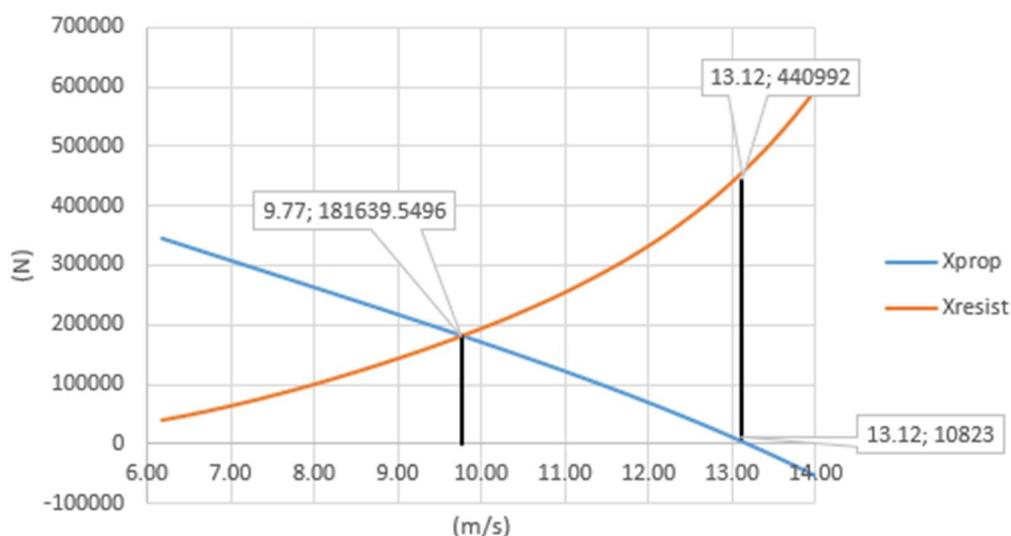


Figura 47 – Curva de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão (9,77m/s) e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda (13.12 m/s). Rotação do propulsor constante = 8,23Hz.

A série da velocidade de surge, na Figura 48, confirma que o surf não ocorre. O navio é acelerado, mas não alcança a velocidade de fase da onda. À medida que as ondas ultrapassam o navio, sua velocidade oscila entorno de uma velocidade média próxima a velocidade de serviço.

Outro parâmetro que confirma que não ocorre o surf-riding é a elevação da onda em relação a superfície média (ζ), medida no CG do navio e expressa em *FRA*. Na Figura 49, esse parâmetro oscila à medida que as ondas passam pelo navio.

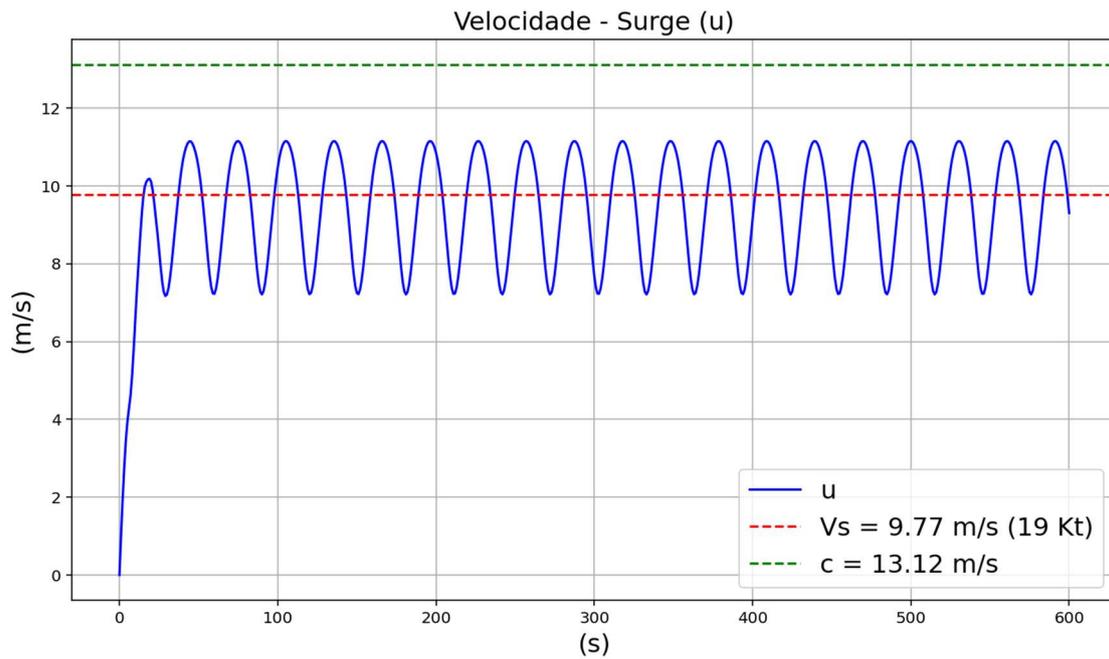


Figura 48 – Velocidade de surge do navio (H=3,3m; T=8,4s).

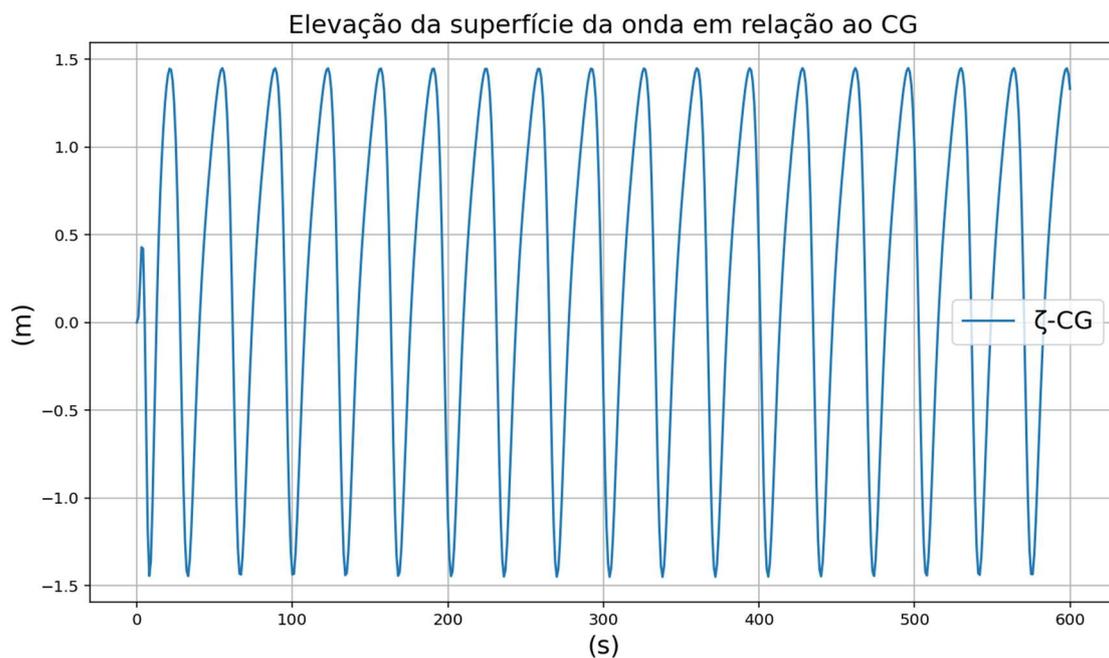


Figura 49 – Elevação da onda em relação a superfície média, medida na posição longitudinal do CG do navio e expressa em FRA (H=3,3m; T=8,4s).

A distância relativa entre a superfície da onda em relação ao topo do leme de bombordo é apresentada na Figura 50. Neste caso, o leme fica totalmente submerso em quase toda a simulação.

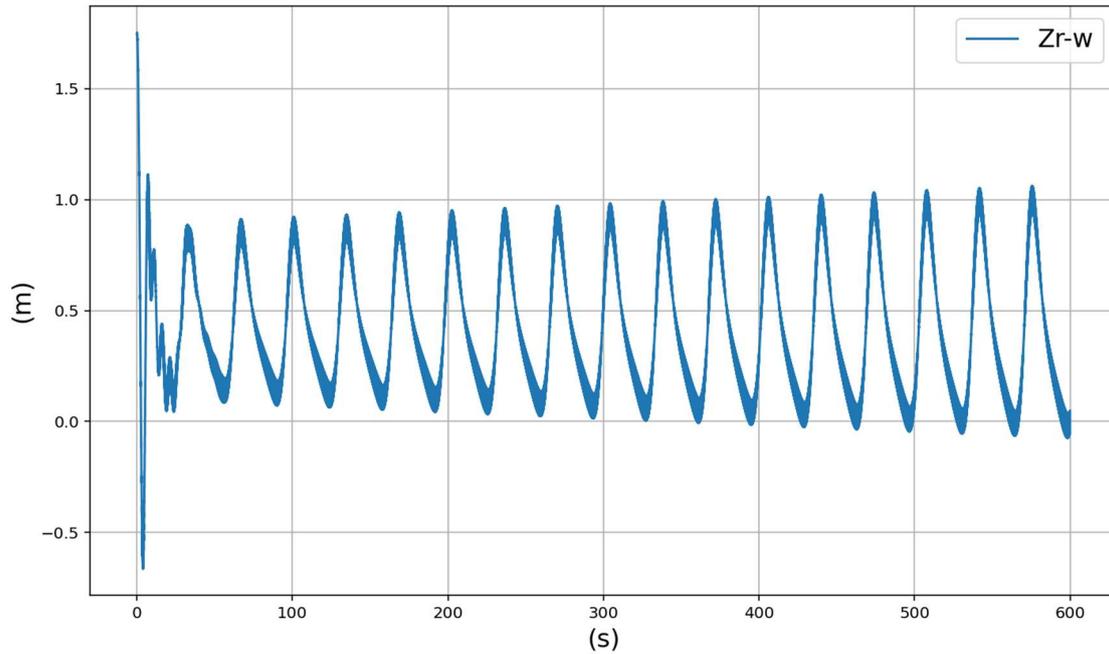


Figura 50 – Série temporal de Z_{W-R}^{FRA} ($H=3,3m$; $T=8,4s$).

A Figura 51 apresenta os ângulos de Euler e o vetor de posição do navio. A Figura 52 apresenta as derivadas dos ângulos de Euler e o vetor de velocidades.

Como não ocorre o surf, também não é observado um aumento brusco no ângulo de yaw (ψ). Embora ψ não se estabilize, ele não cresce de maneira contínua e rápida. O que se observa é um aumento pequeno ao longo de 600s de simulação, atingindo um valor máximo de $0,004^\circ$.

O ângulo máximo de roll (φ) observado durante a simulação é de cerca de 0.03° , valor significativamente inferior ao observado nos casos anteriores, onde ocorreram a guinada brusca.

A velocidade de yaw (r), diferentemente dos casos anteriores, não cresce de maneira brusca de forma a amplificar o ângulo de yaw. Ao contrário, fica variando em torno de $0^\circ/s$, atingindo o valor máximo de $0.0002^\circ/s$.

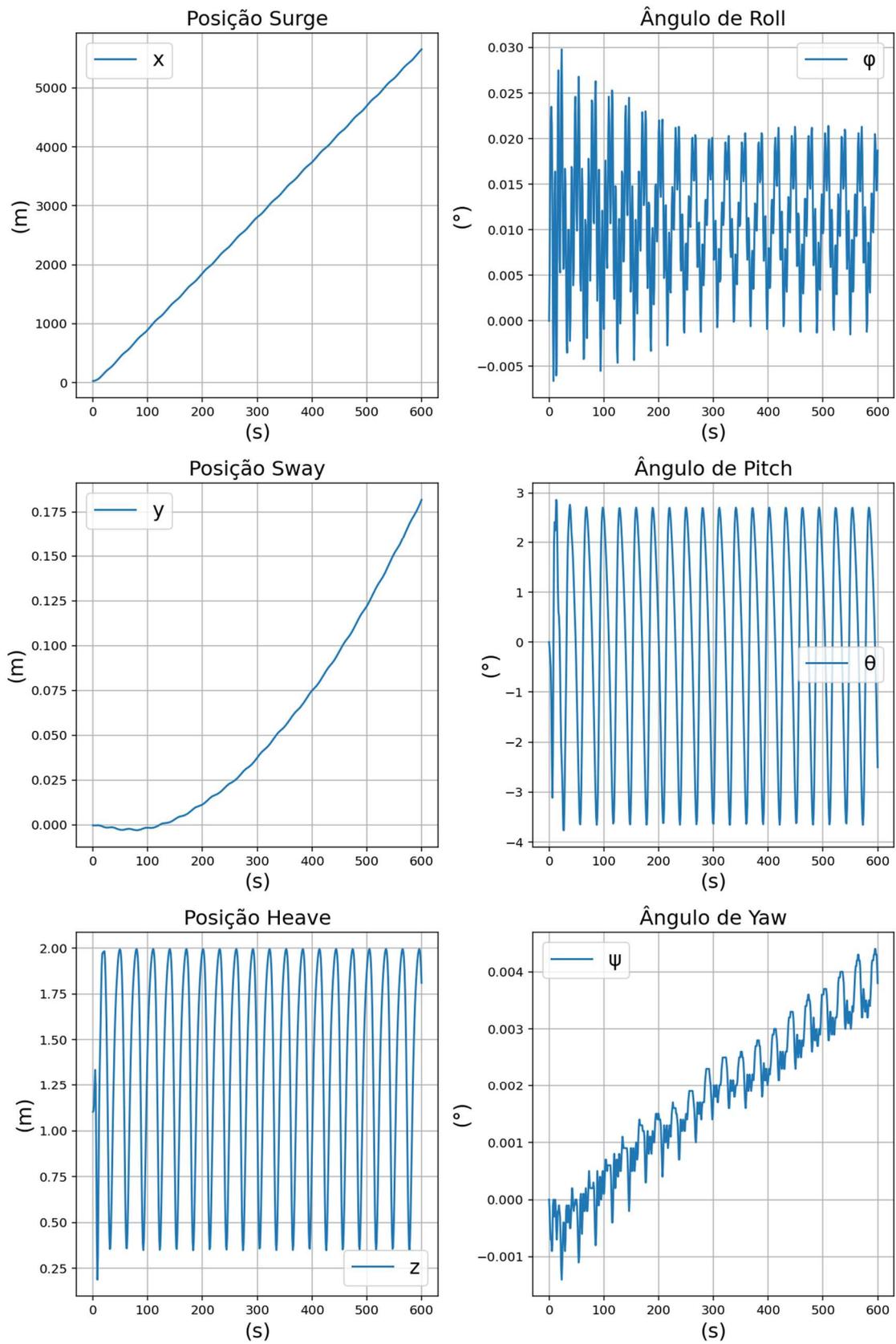


Figura 51 – Vetores de posição e ângulos de Euler ($H=3,3\text{m}$; $T=8,4\text{s}$).

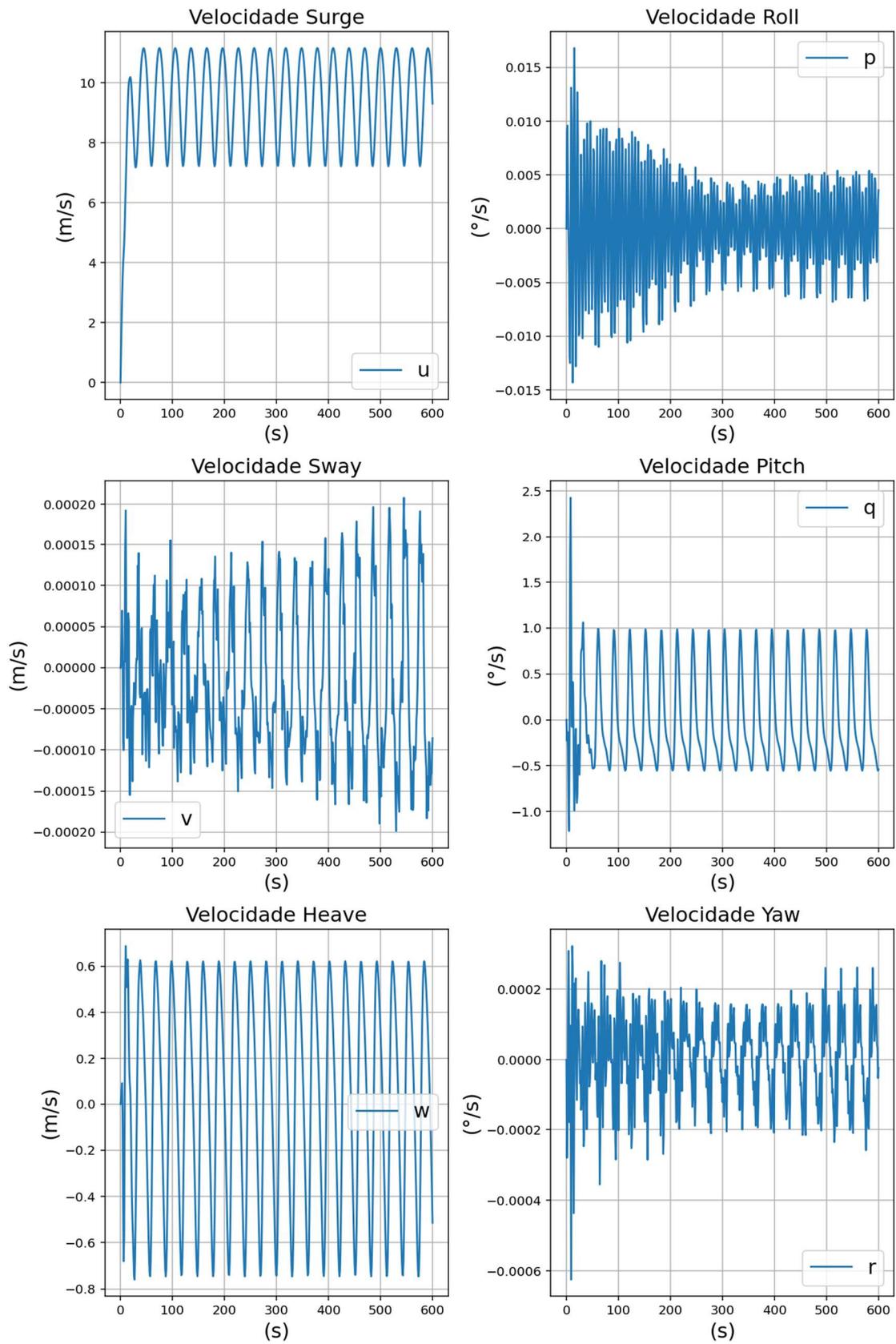


Figura 52 – Vetores de velocidades (H=3,3m; T=8,4s).

4.5.4. Avaliação direta de outros casos de interesse

Ao todo foram investigados 22 casos para o navio com velocidade de 19 nós, todos próximos ao limite de ocorrência do surf-riding (limite entre as regiões vermelha e azul), conforme apresentado na Figura 53. O objetivo é identificar se, com a avaliação direta, é possível explorar um novo limite de ocorrência de surf-riding, menos conservador do que o limite estabelecido no nível 2, tendo em vista a hierarquia entre os níveis.

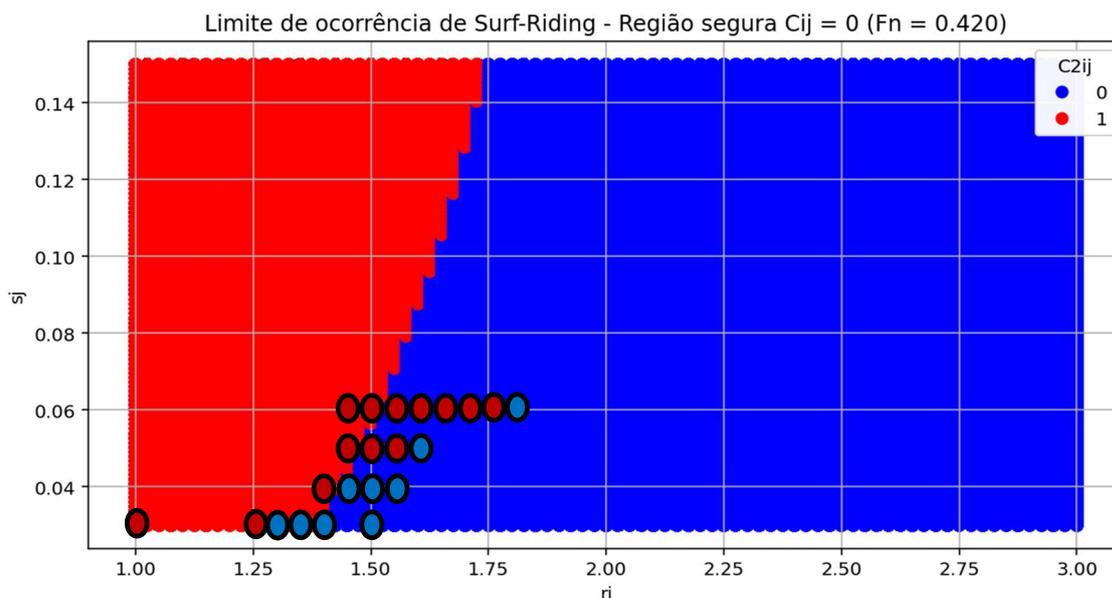


Figura 53 – Pontos representativos no limite da zona de ocorrência de surf-riding para avaliação direta através do modelo numérico.

Os casos foram escolhidos para as faixas menores de declividade de onda (0.03 a 0.06) a fim de avaliar, para cada razão de declividade, até qual razão de comprimento de onda é observada a ocorrência (numérica) do fenômeno.

Na avaliação através do modelo numérico foram verificadas a ocorrência do surf-riding e da guinada brusca. A avaliação foi realizada utilizando a mesma metodologia para identificação desses empregada nos 3 primeiros casos.

A Tabela 13 apresenta um quadro comparativo entre a avaliação dos 22 pontos realizada pelo nível de 2 de vulnerabilidade da IMO e pelo modelo numérico, equivalente a avaliação direta da estabilidade (nível 3). Para cada caso, quando o fenômeno é identificado, a célula na Tabela 13 é marcada com a letra “V” em vermelho e o respectivo ponto na Figura 53 é destacado na mesma cor. Caso contrário, a célula é marcada com a letra “NV” em azul e o ponto correspondente na Figura 53 também aparece em azul.

Tabela 13 – Comparação entre a avaliação da ocorrência do surf-riding pelo nível 2 da IMO com a identificação, pelo modelo numérico, do surf-riding, broaching e perda de estabilidade (V = verificado, NV = não verificado).

Caso	ri	sj	λ [m]	H [m]	c [m/s]	Surf-Riding (IMO Nv 2)	Surf-Riding (Numérico)	Broaching (Numérico)
1	1.00	0.03	55.1	1.65	9.27	V	V	V
2	1.25	0.03	68.9	2.07	10.37	V	V	V
3	1.30	0.03	71.6	2.15	10.57	V	NV	NV
4	1.35	0.03	74.4	2.23	10.77	V	NV	NV
5	1.40	0.03	77.1	2.31	10.97	NV	NV	NV
6	1.50	0.03	82.6	2.48	11.36	NV	NV	NV
7	1.40	0.04	77.1	3.08	10.97	V	V	V
8	1.45	0.04	79.9	3.19	11.17	V	NV	NV
9	1.50	0.04	82.6	3.30	11.36	NV	NV	NV
10	1.55	0.04	85.4	3.41	11.55	NV	NV	NV
11	1.45	0.05	79.9	3.99	11.17	V	V	V
12	1.50	0.05	82.6	4.13	11.36	V	V	V
13	1.55	0.05	85.4	4.27	11.55	NV	V	V
14	1.60	0.05	88.1	4.41	11.73	NV	NV	NV
15	1.45	0.06	79.9	4.79	11.17	V	V	V
16	1.50	0.06	82.6	4.96	11.36	V	V	V
17	1.55	0.06	85.4	5.12	11.55	NV	V	V
18	1.60	0.06	88.1	5.29	11.73	NV	V	V
19	1.65	0.06	90.9	5.45	11.91	NV	V	V
20	1.70	0.06	93.6	5.62	12.09	NV	V	V
21	1.75	0.06	96.4	5.78	12.27	NV	V	V
22	1.80	0.06	99.1	5.95	12.44	NV	NV	NV

Pode-se observar que, para pequenas razões de declividade de onda (entre 0.03 e 0.04), o modelo numérico não aponta a ocorrência de surf-riding e broaching nos casos detectados como não vulneráveis ao surf-riding pelo nível 2 de vulnerabilidade (casos 5,

6, 9 e 10). Isto pode indicar uma coerência entre os resultados de níveis 2 e 3, visto que o nível 2 é mais conservador.

Já nos casos 1, 2 e 7, tanto o modelo numérico quanto a avaliação de nível 2 indicam a ocorrência de surf-riding e broaching. Portanto, estas ondas são potencialmente perigosas para o navio na condição de operação escolhida.

Entretanto, houve casos identificados como vulneráveis pelo nível 2 (casos 3, 4 e 8) mas que, na avaliação pelo modelo numérico, não foram observadas a ocorrência do surf-riding nem da guinada brusca. Nestes casos, modelo numérico se mostrou menos conservador do que o nível 2 de vulnerabilidade da IMO. Isso já era esperado, uma vez que as ferramentas/modelos usados nos níveis mais altos são, em princípio, mais acurados do que as aproximações/premissas adotadas nos níveis mais baixos.

Para casos com altura de onda inferior a 5 metros (até o caso 16), os resultados das simulações numéricas mostraram consistência com a predição de vulnerabilidade do nível 2. Em outras palavras, não foram identificados casos em que a avaliação direta (menos conservadora) apontasse vulnerabilidade enquanto o critério de nível 2 indicasse que o navio é vulnerável. A exceção é o caso 13, que representa um caso em que não ocorre o surf-riding pelo nível mais conservador (2) mas é detectado pela avaliação direta.

Já para os casos com altura de onda superior a 5 metros (a partir do caso 17), todos os casos avaliados não apresentam a ocorrência de surf-riding pela avaliação de nível 2, mas a avaliação direta indica que ocorre até o caso 21. Isto, a princípio, denotaria uma limitação do modelo numérico adotado ou uma eventual inconsistência do critério de nível 2 (que também é passível de ocorrer, conforme relatado nas referências em ACANFORA (2019) e GUALENI (2020)).

Uma possível limitação do modelo pode estar associada ao cálculo da força da onda pelo método da integração. Nos casos 17 a 21, devido à celeridade mais elevada das ondas, a diferença entre as forças de propulsão e resistência na velocidade da onda se torna maior. Assim, uma explicação possível para a ocorrência do surf-riding nesses casos é que, para ondas de grande altura, a força da onda calculada pela metodologia apresentada pode ser superestimada, se tornando grande o suficiente para acelerar o navio até a velocidade da onda.

4.5.5. Influência da função de rampa da onda

Com o objetivo de avaliar a influência da posição inicial do navio em relação a onda, o que pode induzir respostas transientes de grande magnitude em mar severo no início de uma análise no domínio do tempo, foi introduzida uma função de rampa que suaviza a amplitude e as forças da onda no início da análise. Esta função é definida como:

$$f(t) = \begin{cases} \text{sen}^2(\pi \cdot t / 2t_w), & \text{se } 0 \leq t < t_w \\ 1 & \text{se } t \geq t_w \end{cases} \quad (4.12)$$

Na expressão 4.12, t_w representa o período durante o qual a suavização da onda permanece ativa. A função de rampa $f(t)$ é o fator que suaviza a amplitude da onda incidente no início da simulação até o instante t_w .

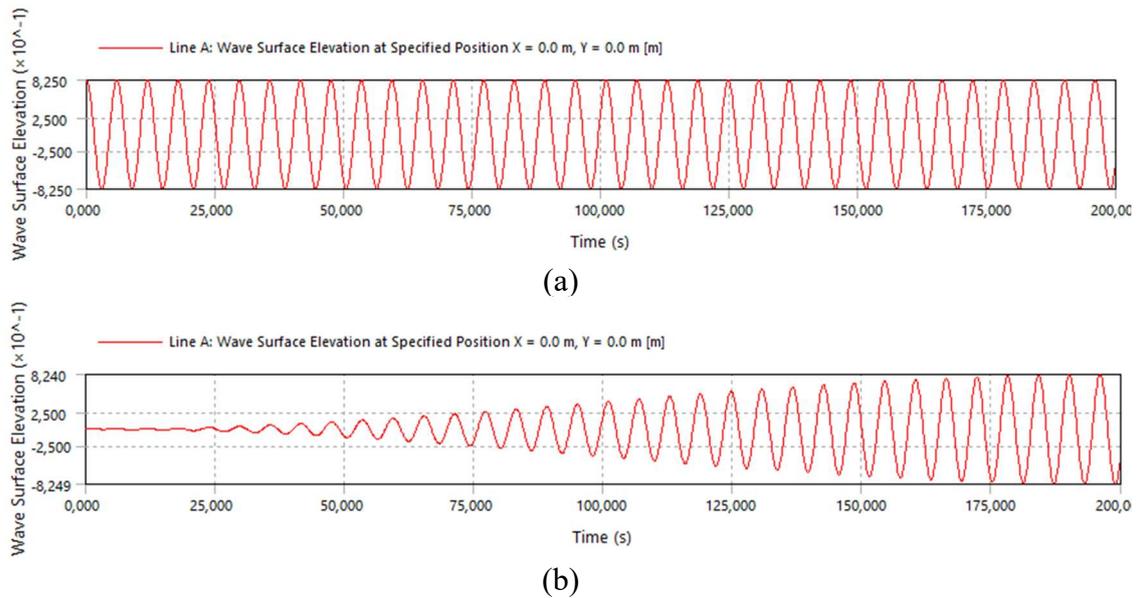
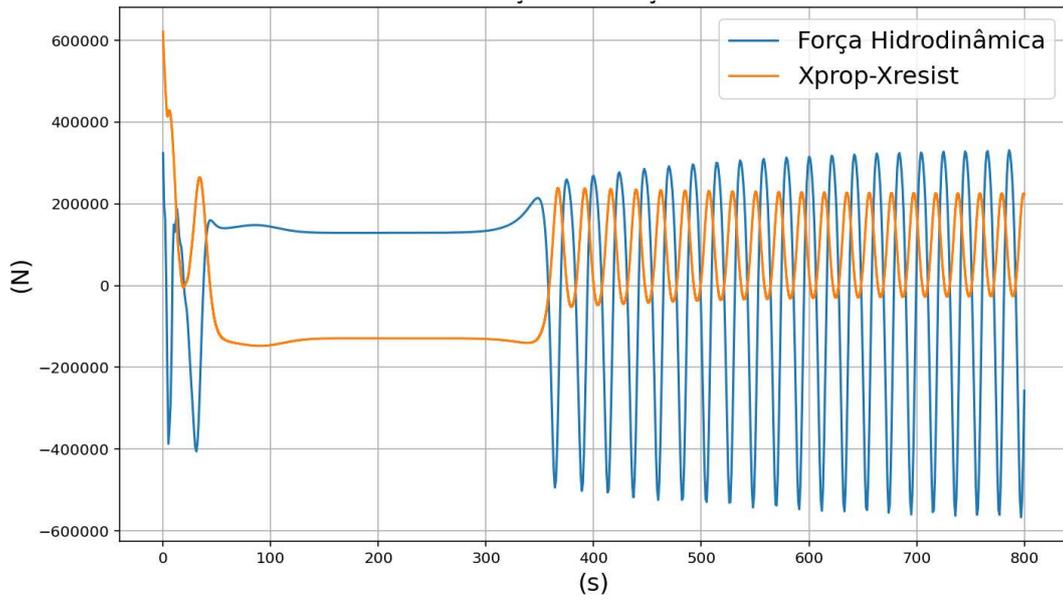


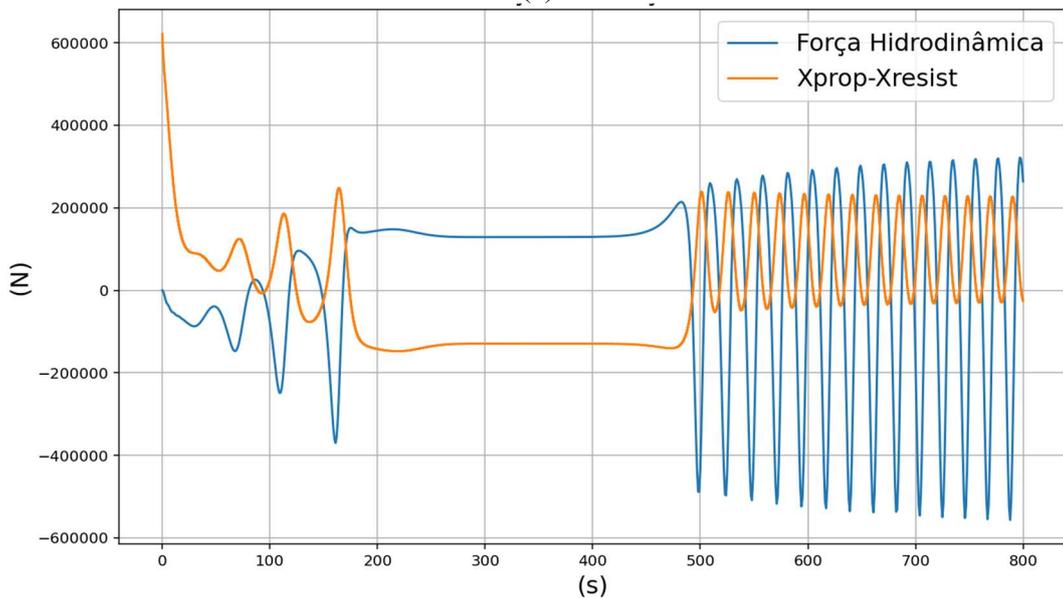
Figura 54 – Exemplo de série da elevação da onda sem (a) e com (b) a função de rampa.

A Figura 54 apresenta o resultado da implementação da função de rampa com $t_w = 200s$ em uma onda com período $T = 5,94s$ e altura $H = 1,65m$.

Algumas análises nas quais ocorreram surf-riding foram repetidas inserindo a função de rampa. Como exemplo, é apresentada a reanálise do caso 7 com $t_w = 200s$ e tempo de análise ampliado para 800s. A Figura 55 apresenta as séries temporais da força de excitação da onda e a diferença entre as forças de propulsão e resistência para os casos com e sem rampa.



(a)



(b)

Figura 55 – Força de excitação de onda e a diferença entre as forças de propulsão e resistência para: onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08\text{m}$; $T=7,03\text{s}$).

Mesmo com a função de rampa (b), ocorre o equilíbrio de forças, i.e., o surf-riding. A função de rampa retarda o tempo necessário para o início da ocorrência do fenômeno, porém não impede de ocorrer. Isto vai ao encontro com a IMO-MS-Circ.1627 que diz que, se a onda possui força suficiente para compensar a diferença entre as forças de propulsão e resistência, a ocorrência do surf-riding independe das condições iniciais.

A série temporal de heave mostra que, quando introduzida a função de rampa, a oscilação vertical no início da simulação desaparece.

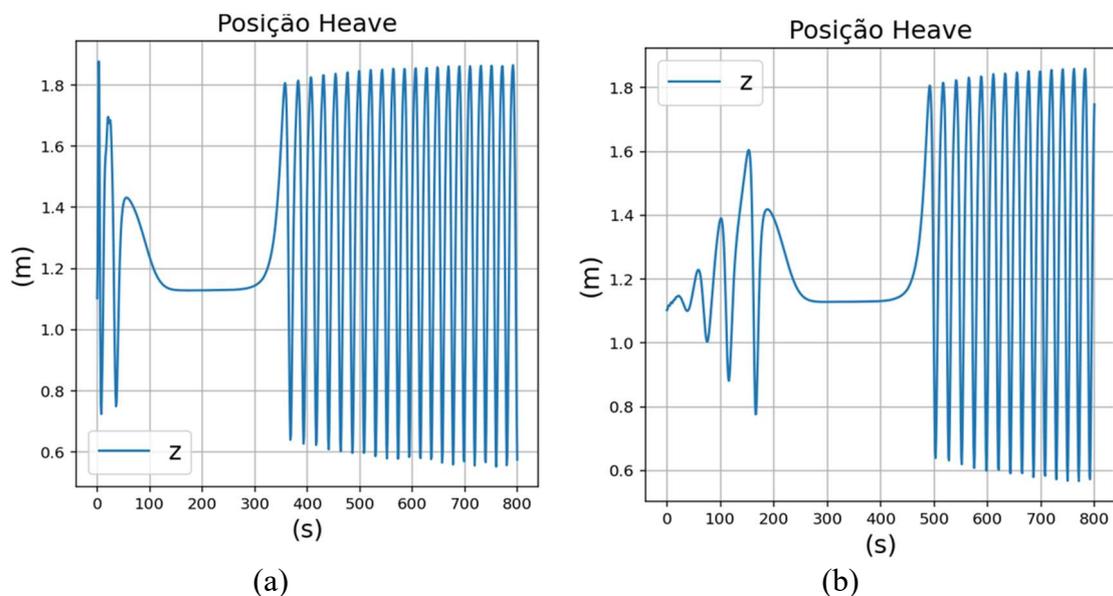
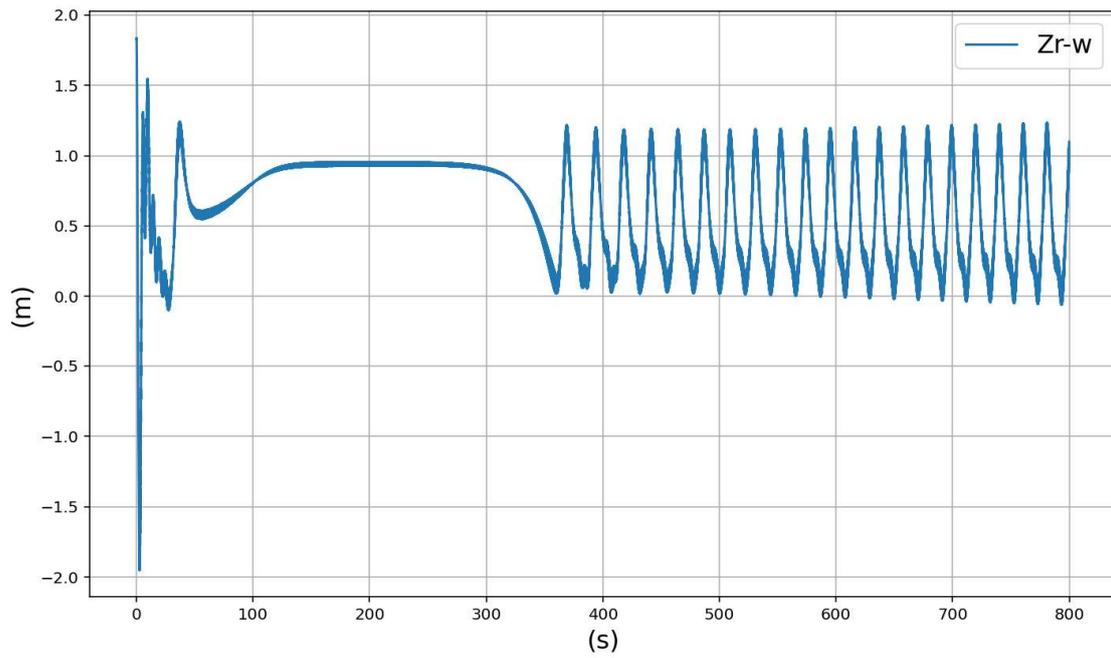


Figura 56 – Série temporal de heave para os casos com a onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08\text{m}$; $T=7,03\text{s}$).

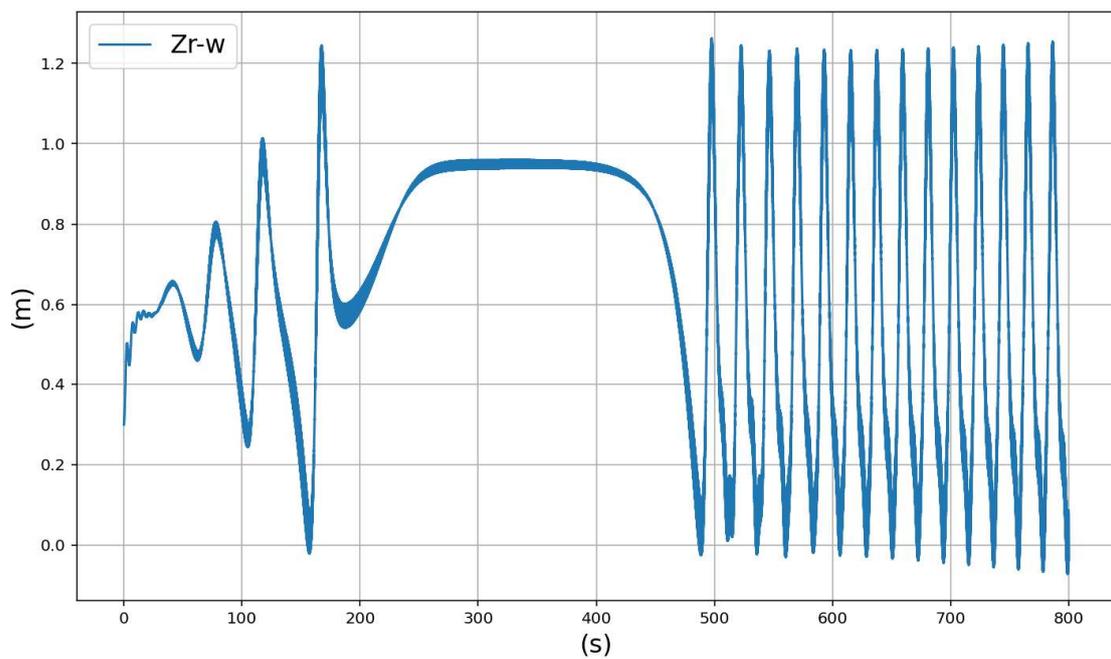
Eliminado esse efeito transiente de oscilação de heave no início da simulação, a emersão inicial do leme também desaparece. Conforme observado na Figura 66, Z_{W-R}^{FRA} não fica negativo quando a função de rampa é inserida.

A respeito do broaching, para o caso da onda com a rampa, na simulação numérica ele ocorre da mesma maneira, com o ângulo de yaw atingindo o valor máximo de 30° e sua derivada uma taxa de $0.7^\circ/\text{s}$, semelhantes ao caso sem rampa. A única diferença é que a guinada demora mais a se iniciar.

De forma geral, a única diferença observada com a implementação da função de rampa (para todas as análises realizadas) foram as respostas transientes no início da simulação, não alterando a resposta do navio durante o surf-riding e na guinada brusca.



(a)



(b)

Figura 57 – Série temporal de Z_{W-R}^{FRA} do leme de bombordo para os casos com a onda sem (a) e com (b) a função de rampa ($H=3,08\text{m}$; $T=7,03\text{s}$).

5 Conclusões

Nesta pesquisa, foi investigada a ocorrência dos fenômenos de surf-riding e guinada brusca (broaching-to) com base num modelo numérico não linear no domínio do tempo e a segunda geração dos critérios de estabilidade recentemente publicada pela IMO. Como caso de estudo foi adotado um navio patrulha de 500 toneladas da Marinha do Brasil. O modelo numérico foi desenvolvido sobre a interface do software ANSYS AQWA, que permite a simulação do comportamento dinâmico do navio sob a ação de ondas. As forças de propulsão, resistência ao avanço, leme e forças de manobra foram implementadas seguindo formulações teóricas e semi-empíricas e introduzidas no AQWA através de uma rotina de forças externas.

A modelagem das forças atuantes no navio considerou abordagens experimentais e semiempíricas. A força propulsiva foi modelada com base nos coeficientes adimensionais de empuxo (K_T), obtidos por meio de ensaios em águas abertas. A resistência ao avanço foi modelada com base em ensaios de reboque, utilizando um polinômio de quinto grau para a aproximação da força de resistência, conforme a recomendação da IMO. As forças do leme foram avaliadas a partir dos modelos semiempíricos de THIEME (1962), WHICKER E FEHLNER (1958), E SÖDING (1982 e 1986), permitindo uma representação da influência do casco e do propulsor no escoamento incidente no leme.

Os coeficientes hidrodinâmicos de manobra foram inicialmente obtidos pelo modelo de CLARKE *et al.* (1983), sendo deduzida a parcela potencial obtida pelo AQWA. A calibração dos coeficientes foi realizada por meio da comparação com ensaios experimentais de manobra, resultando em boa aderência entre os ensaios e as simulações numéricas de curvas de giro e de zig-zag.

A implementação no AQWA utilizou uma rotina de cálculo de forças externas, que, observada a necessidade de transformação entre referenciais, permitiu a aplicação das forças de propulsão, resistência, leme e manobra durante a simulação.

A vulnerabilidade do navio patrulha ao surf-riding foi avaliada de acordo com o nível 2 da SGISC da IMO. Para isso, foi desenvolvido um código em Python aplicando o procedimento descrito no capítulo 2.3.2. A ferramenta foi testada e validada utilizando o

navio de pesca ITTC A2, referência da IMO. A análise consistiu em duas etapas: a determinação do número de Froude crítico e a avaliação do Índice de Probabilidade C. Os resultados obtidos mostraram variações máximas de 1,65% para o número de Froude crítico e 1,96% para o Índice C, quando comparados aos dados de referência da IMO, validando a precisão do código desenvolvido.

Adicionalmente, foi analisada a influência da função de rampa da onda nas simulações, com o objetivo de minimizar efeitos transitórios iniciais e avaliar sua repercussão na resposta dinâmica do navio. Ao implementar a rampa, observou-se uma transição mais suave na interação inicial navio-onda, entretanto, não foram percebidas alterações da resposta do navio durante o surf-riding e a guinada.

Por fim, foi realizada a avaliação direta da estabilidade para surf-riding e broaching por meio de simulações no domínio do tempo com o navio navegando com velocidade de serviço com ondas incidindo pela popa. As simulações foram conduzidas para condições potencialmente vulneráveis ao surf riding identificadas a partir da análise de vulnerabilidade nível 2 da IMO.

As simulações possibilitaram a identificação do equilíbrio de forças responsável pela ocorrência do surf-riding. Foram observados três cenários distintos: situações em que o navio foi acelerado até atingir a velocidade de fase da onda, casos em que ele foi bloqueado e passou a navegar junto com a onda; e casos em que as ondas ultrapassavam o navio sem induzir a aceleração necessária para o surf-riding. Em todos os casos em que ocorreu o surf-riding, também se observou guinada brusca.

A emersão do leme não se mostrou um fator determinante para a ocorrência da guinada brusca (broaching-to) neste navio, porque, nos casos simulados em que houve surf-riding, o leme permaneceu totalmente submerso durante o fenômeno. Além disso, foi observado que o navio se manteve na posição de equilíbrio estável do surf-riding em todas as simulações, ou seja, no vale da onda. Essa posição favorece a submersão do leme, uma vez que a onda tem comprimento próximo ao do navio e o calado na popa aumenta, proporcionando uma maior imersão da superfície de controle.

A avaliação do modelo numérico desenvolvido foi conduzida de forma qualitativa, principalmente no que diz respeito ao movimento de roll, portanto, à falha de estabilidade associada. Para uma avaliação qualitativa, A IMO estabelece que um modelo numérico deve demonstrar sua capacidade de reproduzir fenômenos físicos relevantes antes de

qualquer análise quantitativa ser realizada. Nesse sentido, as simulações realizadas mostraram que o modelo implementado atende aos seguintes critérios:

- Capacidade de reproduzir o fenômeno de surf-riding, evidenciado pela aceleração do navio até a velocidade de fase da onda e sua estabilização próxima ao cavado da onda.
- Correlação entre a deflexão do leme e o desenvolvimento do ângulo de banda durante manobras de curva de giro, confirmado nos ensaios em águas calmas.
- Execução correta de curvas de giro em águas calmas.
- Modelagem consistente das forças de onda, demonstrando a relação entre a força da onda e a posição do navio na onda.

A avaliação quantitativa não foi realizada por falta de dados experimentais. A avaliação direta da estabilidade realizada no contexto deste trabalho não teve como objetivo determinar a probabilidade de ocorrência do surf-riding e broaching, pois isso exigiria uma abordagem estatística, extrapolação de dados e um grande volume de simulações. Em vez disso, a estratégia adotada foi selecionar casos representativos dentro das áreas identificadas como vulneráveis pelo nível 2 da IMO, explorando séries temporais que ilustram a ocorrência (ou não) do surf-riding e da guinada brusca. Esse nível de análise, embora qualitativo, proporcionou um entendimento detalhado da dinâmica do fenômeno.

A partir da análise dos casos representativos, foi identificado que o navio é propenso (vulnerável) aos fenômenos de surf-riding e guinada brusca, conforme indicado pelo nível 2 da IMO. No entanto, os resultados sugerem que a zona de ocorrência desses fenômenos pode ser menor do que a prevista pelo critério de nível 2. Isso ocorre porque, para razões de alturas de onda de até 5 metros, onde o modelo numérico apresentou resultados menos conservadores em relação ao nível 2 de vulnerabilidade.

Para casos com altura de onda superior a 5 metros, os resultados do modelo numérico apontaram a ocorrência do surf-riding e da guinada brusca para casos que foram considerados como não vulnerável pelo nível 2 (mais conservador), indicando, a princípio, uma limitação do modelo numérico adotado ou uma eventual inconsistência do critério de nível 2.

Nesses casos, como as ondas possuem celeridade mais elevada, a diferença entre as forças de propulsão e resistência para essa velocidade de fase torna-se maior. Uma

possível explicação para a ocorrência de surf-riding nessas condições é que, para ondas de grande altura, a metodologia utilizada pode estar superestimando a força da onda, tornando-a grande o suficiente para acelerar o navio até a velocidade da onda.

Dessa forma, o estudo demonstra que o modelo desenvolvido pode ser uma ferramenta útil para a análise de surf-riding e broaching, fornecendo informações detalhadas sobre a física do fenômeno e seus mecanismos de desenvolvimento.

6 Trabalhos futuros

O presente estudo forneceu uma avaliação direta dos fenômenos de surf-riding e broaching em um navio patrulha, utilizando um modelo numérico unificado de manobra e seakeeping. No entanto, trabalhos futuros podem expandir a abordagem feita nesta pesquisa.

Um dos principais aprimoramentos para pesquisas futuras é para permitir a simulação da falha de estabilidade após a guinada brusca, ou seja, a predição quantitativa do movimento de roll. Atualmente, o modelo não considera efeitos viscosos no amortecimento de roll, o que limita sua capacidade de prever com precisão a evolução do ângulo de roll e sua estabilização. Para superar essa limitação, recomenda-se a implementação de amortecimento externo, seja por meio de coeficientes obtidos a partir de ensaios experimentais de decaimento, seja pela aplicação de modelos baseados em CFD. A inclusão desses efeitos permitiria a avaliação/predição da falha de estabilidade do navio em cenários de guinada brusca.

Outra melhoria seria a obtenção das derivadas hidrodinâmicas de manobra do casco por meio de ensaios do tipo Planar Motion Mechanism (PMM), proporcionando uma estimativa mais precisa desses coeficientes em comparação com os valores obtidos pelo modelo de Clarke e posteriormente calibrados com base em ensaios de manobra. A obtenção dessas derivadas por experimentos possibilitaria uma predição mais precisa da guinada brusca, possibilitando uma análise mais detalhada do impacto de cada coeficiente nesse fenômeno. Além disso, a comparação entre os resultados obtidos a partir dos ensaios PMM e os apresentados neste estudo contribuiria para uma melhor compreensão das incertezas associadas ao modelo numérico e à calibração baseada em testes de manobra.

Outra possível extensão é a implementação de um piloto automático para o leme, conforme mencionado nas diretrizes da IMO-MSC.1-Circ.1652. No guia da IMO o broaching é caracterizado quando tanto o ângulo de guinada quanto a velocidade angular de guinada aumentam ao longo do tempo, apesar da aplicação oposta máxima da deflexão do leme. A inclusão de um sistema de controle ativo do leme permitiria tentar contrapor (controlar) o movimento de guinada a partir do momento que ela se inicia, possibilitando

uma análise mais detalhada da capacidade de recuperação do navio diante de um episódio de surf-riding.

Outra melhoria para o modelo é considerar o efeito da velocidade das partículas da onda no cálculo das forças do leme. No fenômeno de surf-riding, a velocidade do navio se assemelha a velocidade de fase da onda. Embora a velocidade da partícula fluida não seja igual a velocidade da onda, descontar essa componente na velocidade do escoamento que incide no leme pode modificar a sustentação e o arrasto gerados pelo ele, impactando diretamente na ocorrência da guinada brusca.

Além disso, uma possível linha de estudo futuro seria a aplicação de um método de extrapolação estatística utilizado na avaliação direta da estabilidade, como o método da onda crítica sugerido pela IMO. Esse método permite estimar a probabilidade de ocorrência de eventos raros, como falhas de estabilidade, sem a necessidade de realizar uma grande quantidade de simulações detalhadas no contexto do full-direct stability assessment.

7 Referências

ABKOWITZ, M. A. *Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Manoeuvrability*. Technical report, Danish Technical Press, Lyngby, Denmark, 1964.

ACANFORA, M.; BEGOVIC, E.; RINAURO, B. Surf-riding failure mode: from IMO criterion to Direct Assessment procedure and application on Systematic Series D. *Proceedings of the 17th International Ship Stability Workshop*, Helsinki, Finland, p. 1-6, 10-12 June 2019.

ANSYS Inc. *Aqwa Theory Manual*. 2023.

ANSYS Inc. *Aqwa Reference Manual*. 2023.

ANSYS Inc. *Aqwa User's Manual*. 2023.

BEGOVIC, E.; BERTORELLO, C.; BOCCADAMO, G.; RINAURO, B. Application of surf-riding and broaching criteria for the systematic series D models. *Ocean Engineering*, v. 170, p. 246–265, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.062>.

BEGOVIC, E.; GATIN, I.; JASAK, H.; RINAURO, B. CFD simulations for surf-riding occurrence assessment. *Ocean Engineering*, v. 218, p. 107975, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107975>.

BEGOVIC, E.; RINAURO, B.; ÇAKICI, F. Application of the 2nd Generation Intact Stability Criteria for fast semi displacement ships. *Conference Paper*, September 2019.

BERTRAM, V. *Practical Ship Hydrodynamics*. 2. ed. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2012.

BOCCADAMO, G.; ROSANO, G. Excessive Acceleration Criterion: Application to Naval Ships. *JMSE*, v. 7, p. 431, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmse7120431>.

BRASIL. *Decreto n. 6.703, de 18 de dezembro de 2008*. Aprova a Estratégia Nacional de Defesa e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2008. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6703.htm. Acesso em: 1 mar. 2024.

BRIX, J. *Manoeuvring technical manual*. Seehafen-Verlag, 1993.

CHU, J.; GU, M.; LU, J.; ZHANG, P. A Prediction Method and Model Experiments on Surf-Riding and Broaching in Stern-Quartering Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, p. 1538, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse12091538>.

CLARKE, D.; GEDLING, P.; HINE, G. The application of manoeuvring criteria in hull design using linear theory. *The Naval Architect*, p. 45–68, 1983.

CLAYTON, B. R.; BISHOP, R. E. D. *Mechanics of Marine Vehicles*. 1st ed. Bristol: Gulf Publishing Company, 1982.

DONG MIN SHIN; BYUNG YOUNG MOON; JAEHO CHUNG. Application of surf-riding and broaching mode based on IMO second-generation intact stability criteria for previous ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 13, p. 545-553, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.07.001>

DU CANE, P., GOODRICH, G. J. *The Broaching and Surging*. Trans. Following Sea, RINA, v. 104, abr. 1962.

DU CANE, P. *Model Evaluation of 4 High Speed Hull Forms in Following and Head Sea Conditions*. In: *Proceedings Symposium on the Behaviour of Ships in a Seaway*, 1957.

ESCOTISMO AZUL. O que é a Amazônia Azul? 2022. Disponível em: <https://escotismoazul.org/2022/o-que-e-amazonia-azul/>. Acesso em: 6 mar. 2025.

FALTINSEN, O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. 1. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

FENG, P.; FAN, S.; LIU, X. Study on the second generation intact stability criteria of broaching failure mode. In: *Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, 2015.

FOSSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 1. ed. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2011.

GRIM, O. *Das Schiff in von achtern auflaufender See*. Jahrbuch Schiffbautechnische Gesellschaft, v. 45, 1951.

GRIM, O. Surging motion and broaching tendencies in a severe irregular sea. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, v. 16, p. 201–231, 1963. Disponible em: <https://doi.org/10.1007/BF02032715>.

GRINNAERT, F.; GUALENI, P.; BILLARD, J.-Y.; LAURENS, J.-M.; PETACCO, N. Application of 2nd Generation Intact Stability Criteria on Naval Ships. *Proceedings of the 15th International Ship Stability Workshop*, Stockholm, Sweden, p. 1-5, 13-15 June 2016.

GUALENI, P.; PAOLOBELLO, D.; PETACCO, N.; LENA, C. Seakeeping time domain simulations for surf-riding/broaching: investigations toward a direct stability assessment. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 25, p. 1120–1128, 2020. Disponible em: <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00704-x>.

HARVALD, S. A. *Resistance and Propulsion of Ships*. 4. ed. Department of Ocean Engineering, The Technical University of Denmark, John Sons. Inc., 1983.

HASHIMOTO, H.; YONEDA, S.; OMURA, T.; UMEDA, N.; MATSUDA, A.; STERN, F.; TAHARA, Y. CFD prediction of wave-induced forces on ships running in irregular stern quartering seas. *Ocean Engineering*, v. 188, p. 106277, 2019. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106277>.

HOLMES, P. J. Averaging and Chaotic motions in forced oscillations. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, v. 38, n. 1, p. 65–80, 1980.

ILIĆ, N.; BAČKALOV, I. Surf-Riding of Ships from the MARIN Series of Fast Displacement Ships. In: *BEGOVIĆ, E. (Ed.), Progress in Marine Science and Technology*. IOS Press, 2023. Disponible em: <https://doi.org/10.3233/PMST230028>.

IMO. *Intact Stability Code 2008 (2009 edition)*. London, UK: IMO, 2009.

IMO-MSC.1-Circ.1627. *Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria*. London, UK: IMO, 2020.

IMO-MSC.1-Circ.1652. *Explanatory Notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria*. London, UK: IMO, 2023.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. *Proceedings of the 15th ITTC*. 1978.

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. *Recommended Procedures and Guidelines: Estimation of Roll Damping*. [S.l.]: ITTC, 2021. (Procedure 7.5-02-07-04.5).

ITTC. *Subjects 2 and 4 Skin Friction and Turbulence Stimulation. International Towing Tank Conference*, Madrid, Spain, 1957.

JOURNÉE, J.; MASSIE, W. *Offshore Hydromechanics*. 1. ed. Delft, NL: Delft University of Technology, 2001.

KOSE, K. On the new mathematical model of manoeuvring motions of a ship and applications. *International Shipbuilding Progress*, v. 29, p. 205–220, 1982.

LEWIS, E. V. *Principles of Naval Architecture: Motions in Waves and Controllability*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.

LU, J.; GU, M.; BOULOUGOURIS, E. A Unified Numerical Method for Broaching and Loss of Stability in Astern Seas. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, p. 1555, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse11081555>.

MAKI, A.; UMEDA, N.; RENILSON, M.; UETA, T. Analytical formulae for predicting the surf-riding threshold for a ship in following seas. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 15, n. 3, p. 218–229, 2010.

MAKI, A.; UMEDA, N.; RENILSON, M.; UETA, T. Analytical methods to predict the surf-riding threshold and the wave-blocking threshold in astern seas. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 19, p. 415–424, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0257-2>.

MARINHA DO BRASIL. *Amazônia Azul*. Brasília, DF: Marinha do Brasil, [2019]. Disponível em: https://www.mar.mil.br/hotsites/amazonia_azul/. Acesso em: 7 mar. 2024.

MARINHA DO BRASIL. *Estado-Maior da Armada*. O posicionamento da Marinha do Brasil nos principais assuntos de interesse naval. Brasília, DF: Estado-Maior da Armada,

2017. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/ema-322.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2024.

MARINHA DO BRASIL. *Plano Estratégico da Marinha 2040*. Brasília, DF: Marinha do Brasil, 2020. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/all/modules/pub_pem_2040/book.html. Acesso em: 7 mar. 2024.

MARINHA DO BRASIL (2016a). *Results of Free Model Manoeuvring Tests - Patrol Vessel Model*. Technical Report, Ship Hydromechanics Division, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro de 2016.

MARINHA DO BRASIL (2016b). *Results of Model Tests in Still Water - Patrol Vessel Model*. Technical Report, Ship Hydromechanics Division, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro de 2016.

MARLANTES, K. E.; KIM, S. (Peter); HURT, L. A. Implementation of the IMO Second Generation Intact Stability Guidelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, p. 41, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse10010041>.

NEWMAN, J. N. *Marine Hydrodynamics*. 40th anniversary ed. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

OLIVEIRA, M.; DE BARROS MENDES KASSAR, B.; COELHO, L. C. G.; RODRÍGUEZ CASTILLO, C. A.; ESPERANÇA, P. D. T.; ALMEIDA DE SANTOS NEVES, M.; SOUZA RAMOS, I.; ABREU, S. Uma avaliação crítica dos limites dos critérios de estabilidade intacta aplicados a transportes oceânicos. In: *Anais do 28º Congresso Internacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore*. 2020.

PETACCO, N.; GUALENI, P. The influence of ship stability in waves on naval vessel operational profiles. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, v. 9, p. 681–695, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40722-023-00291-0>.

PETACCO, N.; GUALENI, P. IMO Second Generation Intact Stability Criteria: General Overview and Focus on Operational Measures. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 8, p. 494, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse8070494>.

PETACCO, N.; PITARDI, D.; PODENZANA BONVINO, C.; GUALENI, P. Application of the IMO Second Generation Intact Stability Criteria to a Ballast-Free Containership. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, p. 1416, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse9121416>.

PETERS, W.; BELENKY, V.; BASSLER, C.; SPYROU, K.; UMEDA, N.; BULIAN, G.; ALTMAYER, B. The second generation intact stability criteria: An overview of development. *Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers*, v. 121, 2011.

REAY, B.; ENSHAEI, H. Implications of the Second Generation Intact Stability Criteria when applied to a NZ offshore patrol vessel. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, v. 7, n. 1, p. 57-62, Jan. 2017.

RENILSON, M. R. *The broaching of ships in following seas*. 1981. PhD Thesis – University of Glasgow.

RINAURO, B. *Surf-riding/Broaching Assessment within Second Generation Intact Stability Criteria*. 2020. 176 f. Tese (Doutorado em Arquitetura Naval) – University of Naples Federico II, Naples, Itália, 2020.

ROSANO, G.; BEGOVIĆ, E.; BOCCADAMO, G.; RINAURO, B. Second Generation Intact Stability Criteria Fallout on Naval Ships Limiting KG Curves. In: BEGOVIC, E. (Ed.). *Progress in Marine Science and Technology*. IOS Press, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/PMST200047>.

SHIN, D.; SUNG, Y.; JEONG, H.; KIM, D.; MOON, B. Evaluation of Parametric Roll Mode Applying the IMO Second Generation Intact Stability Criteria for 13K Chemical Tanker. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, p. 1462, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse11071462>.

SNAME. *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*. Technical and Research Bulletin 1-5. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950.

SÖDING, H. Prediction of ship steering capabilities. *Schiffstechnik*, p. 3–29, 1982.

SÖDING, H. Kräfte am Ruder. *Handbuch der Werften XVIII*, Hansa-Verlag, p. 47–56, 1986.

SPYROU, K. J. Asymmetric surging of ships in following seas and its repercussions for safety. *Nonlinear Dynamics*, v. 43, p. 149–172, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11071-006-0758-6>.

SZOZDA, Z.; KRATA, P. Towards evaluation of the second generation intact stability criteria - Examination of a fishing vessel vulnerability to surf-riding, based on historical capsizing. *Ocean Engineering*, v. 248, p. 110796, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110796>.

THIEME, H. Zur Formgebung von Schiffsrudern. *Jahrbuch Schiffbautechnische Gesellschaft*, Springer, p. 381–426, 1962.

TOMASZEK, H. A.; BASSLER, C. C. Dynamic stability assessment of naval ships in early-stage design. *Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, p. 1-7, 14-19 June 2015.

TRISTAN, P.; FOSSEN, T. Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels. *Modeling, Identification and Control*, v. 28, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4173/mic.2007.1.3>.

UMEDA, N. On the Surf-riding of a Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan (SNAJ)*, v. 1982, p. 192–201, 1982. Disponível em: https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1982.152_192.

UMEDA, N. Nonlinear dynamics of ship capsizing due to broaching in following and quartering seas. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 4, p. 16–26, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s007730050003>.

WHICKER, L. F.; FEHLNER, L. F. Free stream characteristics of a family of low aspect ratio control surfaces for application to ship design. *DTMB Report 933*, David Taylor Model Basin, Washington, 1958.

XU, J.; GONG, J.; LI, Y.; FU, Z.; WANG, L. Surf-riding and broaching prediction of ship sailing in regular waves by LSTM based on the data of ship motion and encounter wave.

Ocean Engineering, v. 297, p. 117010, 2024. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117010>.

Apêndice A: Surf-riding e guinada brusca

Este apêndice tem por objetivo prover uma descrição mais detalhada da física acerca da ocorrência do surf-riding e da guinada brusca de acordo com as notas explanatórias da IMO-MSC.1-Circ.1652.

Quando um navio avança em ondas, três forças principais atuam na direção axial: o empuxo do propulsor; a resistência ao avanço; e a força da onda, que pode empurrar o navio contra ou a favor da direção de avanço, dependendo se o navio está a vante ou a ré da crista da onda. Essas forças são ilustradas na Figura 58.

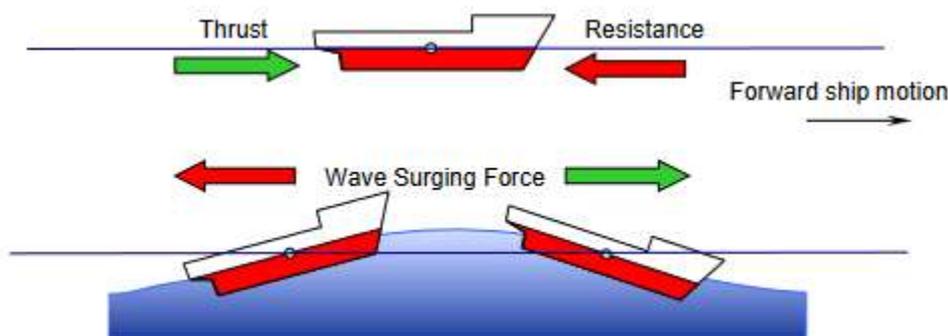


Figura 58 - Forças axiais que atuam em um navio navegando em ondas de popa. Fonte: IMO-MSC.1/Circ.1652.

Quando um navio é submetido a ondas periódicas, a força de surge gerada pelas ondas desequilibra o balanço de forças no eixo longitudinal do navio (em relação ao cenário de águas calmas), resultando em acelerações e variações de velocidade nessa direção.

A alteração da velocidade de surge implica, por sua vez, em alterações nas forças de propulsão e de resistência ao avanço. Como consequência, a relação entre a magnitude das forças de propulsão, resistência ao avanço e a força de surge da onda pode levar a três possíveis cenários abordados a seguir, a depender das condições de operação (carregamento, velocidade de serviço e aproamento) e das características da onda:

- Movimento de “surging”;
- Movimento de “surf-riding” estável; e
- Movimento de “surf-riding” instável.

A.1. Movimento de “Surging”

A influência da força da onda no equilíbrio entre as forças de propulsão e resistência ao avanço é ilustrada na Figura 59.

Conforme mencionado no capítulo 2, as forças de excitação de onda são calculadas considerando a superfície molhada instantânea do casco e, dessa forma, passa a variar de acordo com a posição do navio na onda.

De acordo com a IMO-MSC.1/Circ.1652, quando o navio se encontra a ré da crista, a força da onda se opõe ao seu movimento, diminuindo sua velocidade. Nesse cenário, a resistência torna-se menor do que o empuxo gerado pelo propulsor, resultando em uma força que atua no sentido oposto à força da onda e contribui para o navio a retornar à velocidade de serviço.

Por outro lado, quando o navio está a vante da crista, a força da onda o impulsiona para frente, aumentando sua velocidade instantânea e fazendo com que a resistência seja maior do que o empuxo do propulsor, resultando novamente em uma força que atua no sentido oposto à força da onda e contribuindo para o navio retornar à velocidade de serviço.

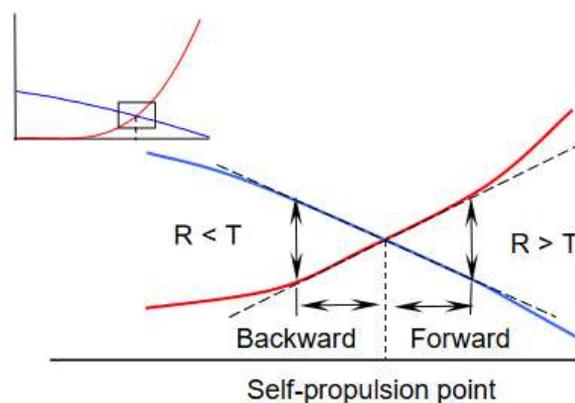


Figura 59 – Pequenos movimentos de surging entorno do ponto de autopropulsão.

Fonte: IMO-MSC.1/Circ.1652.

Como no surging as ondas estão ultrapassando o navio, ele é submetido a ciclos de aceleração e desaceleração e começa a descrever um movimento oscilatório na direção longitudinal (de avanço e recuo), chamado de movimento de surging. Segundo a IMO-

MSC.1-Circ.1652, este primeiro cenário ocorre quando a força da onda é insuficiente para superar a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço que o navio experimentaria se estivesse navegando com velocidade igual a celeridade da onda em águas calmas.

No surging, como o empuxo gerado pelo propulsor não é suficiente para impulsioná-lo a uma velocidade igual à celeridade da onda em águas calmas, ver Figura 60a, e como não há posição na onda em que a diferença entre a força de propulsão e resistência na celeridade da onda seja completamente compensada pela força da onda, ver Figura 60a b, o único movimento que ocorre é o avanço e o recuo do navio, a depender da sua posição na onda.

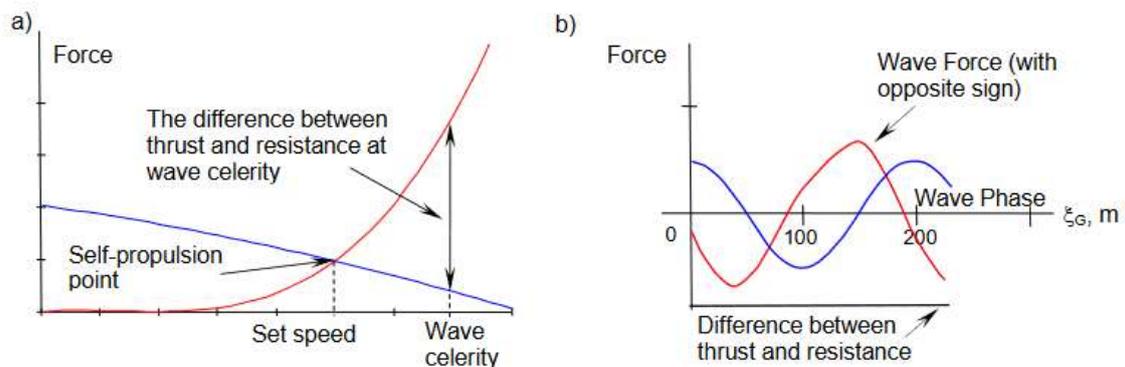


Figura 60 – a) Curvas de integração casco-propulsor indicando o ponto de propulsão e a diferença entre a força do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda em águas calmas e b) força da onda para diferentes posições do navio na onda. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.

A.2. Movimento de Surf-Riding

Os outros dois cenários possíveis estão associados aos dois tipos de limite de ocorrência de surf-riding, chamados de primeiro e segundo limites de ocorrência.

Conforme comentado anteriormente, a força que a onda impõe ao navio depende da posição do navio em relação à onda, bem como da altura e do comprimento de onda. Ocorre que existem pontos próximos à crista e ao vale onde, se a onda tiver comprimento e altura adequados, sua força será suficiente para compensar a diferença entre o empuxo

do propulsor e a resistência ao avanço na celeridade da onda. Isso cria dois pontos de equilíbrio, como mostrado na Figura 61.

Os pontos de equilíbrio estável e instável são, respectivamente, o primeiro e segundo limite de ocorrência de surf-riding.

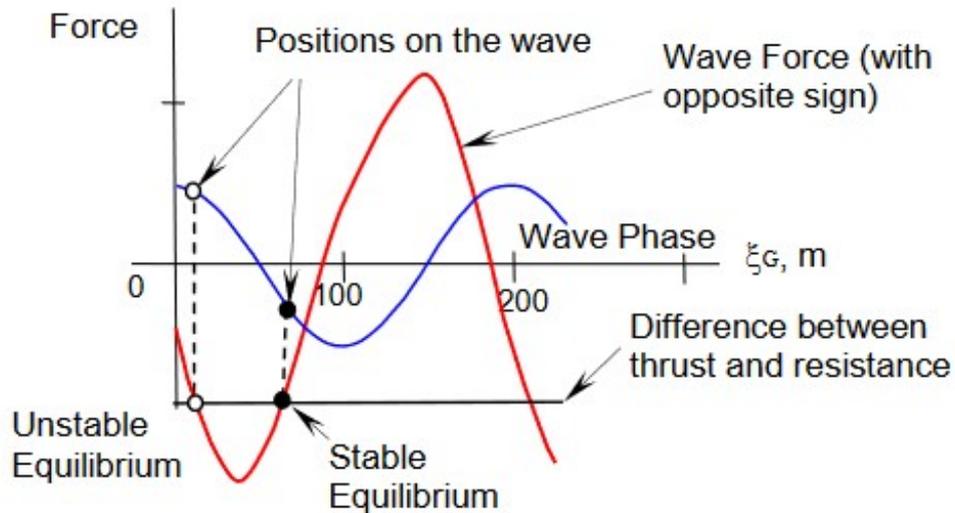


Figura 61 – Forças da onda e equilíbrio entre o empuxo do propulsor e a resistência ao avanço para diferentes posições do navio na onda. Fonte: IMO-MS.C.1/Circ.1652.

Quando o surf-riding ocorre com a meia nau do navio próximo ao vale da onda, o equilíbrio é chamado de estável. Nessa situação, o navio passa a ter velocidade igual a celeridade da onda e, se for deslocado pra vante (ver Figura 62), em direção ao vale da onda, a força da onda diminui e a resultante negativa da diferença entre a propulsão e a resistência na celeridade fará com que o navio retorne ao ponto de equilíbrio estável.

Por outro lado, caso o navio se mova para ré (ver Figura 63), a força da onda aumenta e empurra o navio de volta para o equilíbrio estável, o que faz desse ponto um equilíbrio estável.

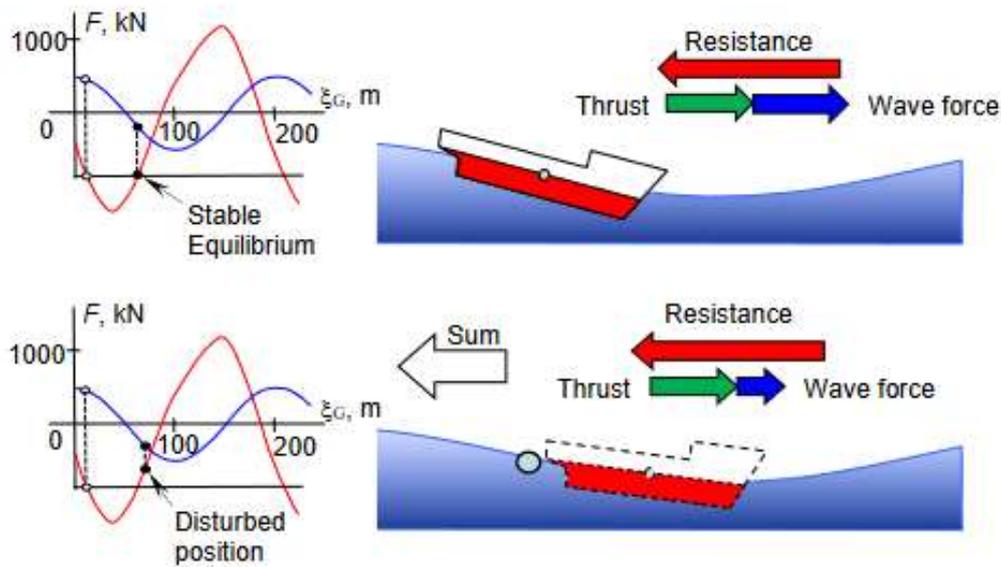


Figura 62 – Perturbação para vante a partir do equilíbrio estável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.

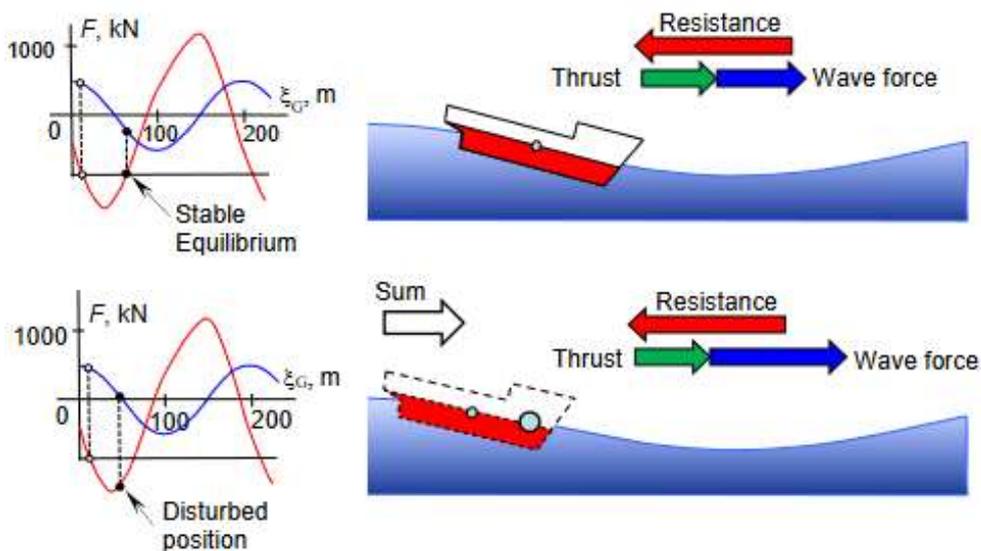


Figura 63 – Perturbação para ré a partir do equilíbrio estável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.

Já quando o equilíbrio de surf-riding ocorre com a meia nau do navio próximo a crista da onda, é chamado de equilíbrio instável. Nesse caso, qualquer deslocamento do navio, pra vante ou pra ré (conforme ilustrado na Figura 64 e na Figura 65), a resultante das forças longitudinais fará com que o navio se desloque ainda mais até alcançar o equilíbrio estável próximo ao vale. Como em nenhum cenário possível, a partir desse

equilíbrio, o navio retorna a esse ponto, esse equilíbrio próximo à crista da onda é tido como instável.

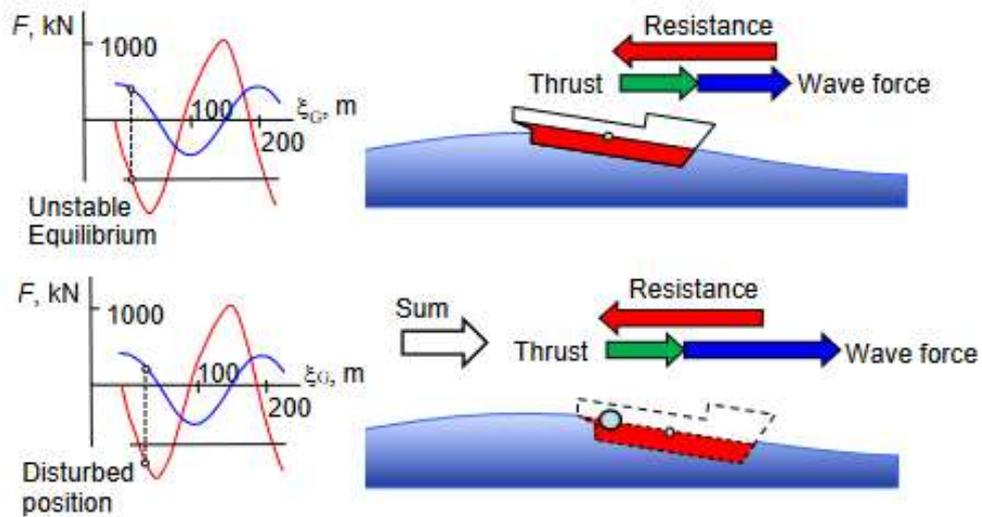


Figura 64 – Perturbação para vante a partir do equilíbrio instável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.

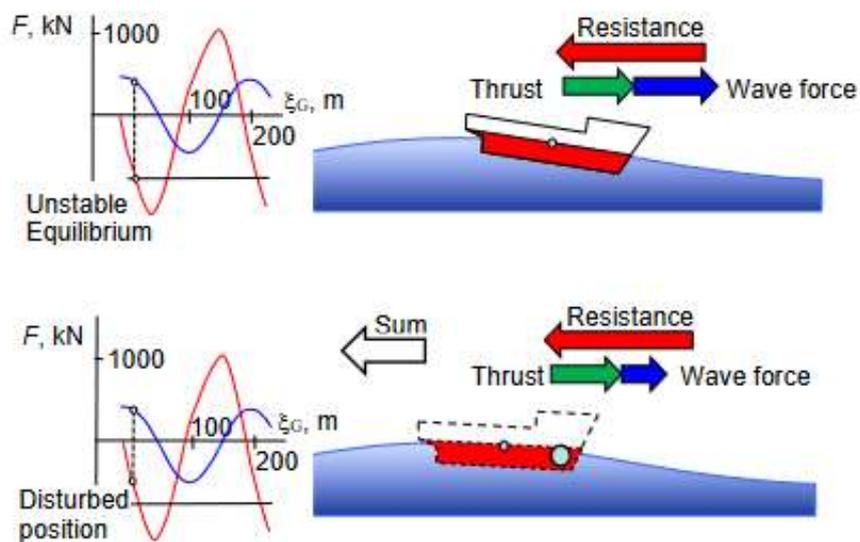


Figura 65 – Perturbação para ré a partir do equilíbrio instável. Fonte: IMO- MSC.1/Circ.1652.

A.3. Caracterização do Surf-Riding e Broaching

A.3.1. Nível 1 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching

De acordo com a IMO-MSC.1/Circ.1652, a velocidade considerada como o limite inferior para a ocorrência do surf-riding em navios convencionais, sob quaisquer condições iniciais, é dada pela expressão 2.1:

$$V_S \geq \frac{1,8\sqrt{L}}{\cos(180^\circ - \chi)} \quad (2.8)$$

Onde V_S é a velocidade do navio em nós e χ é o ângulo de incidência da onda em graus. Supondo que o navio esteja navegando em mar de popa ($\chi = 180^\circ$), a expressão acima é transformada substituindo V_S (em m/s) pelo número de Froude, resultando na equação 2.2:

$$F_n \geq \frac{1,8 \cdot 0,5144}{\sqrt{g}} \approx 0,3 \quad (2.9)$$

Comparações com exemplos de navios avaliados por meio da análise de Melnikov, utilizada no critério de nível 2, demonstram que o comprimento de onda crítico para o surf-riding é comparável ao comprimento do navio. Isso implica que navios mais longos necessitam de ondas mais compridas para entrar em surf-riding.

Como o comprimento de uma onda íngreme é limitado, a probabilidade de surf-riding diminui significativamente para navios de grande comprimento. Em função disso, os critérios de vulnerabilidade de nível 1 estabelecem um comprimento mínimo para avaliação, fixado em 200 metros.

Portanto, de acordo com o nível 1, um navio que possuir comprimento superior a 200 metros ou operar com número de Froude inferior a 0,3 não é considerado vulnerável ao fenômeno de surf-riding.

A.3.2. Nível 2 de vulnerabilidade para o Surf-riding/Broaching

O procedimento da IMO para avaliar o nível 2 de vulnerabilidade ao surf-riding, conforme SHIN *et al.* (2021), pode ser dividido em quatro partes.

A primeira parte considera o cálculo da rotação crítica do hélice, n_{cr} , obtido pela aplicação do método de Melnikov na equação de movimento de surge do navio em ondas de popa, conforme demonstrado por MAKI *et al.* (2010). O n_{cr} é obtido pela solução da seguinte equação:

$$2\pi \frac{T_e(c_i, n_{cr}) - R(c_i)}{f_{ij}} + 8a_0 n_{cr} + 8a_1 - 4\pi a_2 + \frac{64}{3} a_3 - 12\pi a_4 + \frac{1024}{15} a_5 = 0 \quad (2.10)$$

O empuxo do propulsor (T_e) e a resistência ao avanço (R) são calculados para o navio navegando em águas calmas, com velocidade igual a celeridade da onda c_i , e são aproximados através de polinômios do tipo:

$$T_e(c_i, n_{cr}) = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 \{k_0 + k_1 J + k_2 J^2\} \quad (2.11)$$

$$R(c_i) = r_1 c_i + r_2 c_i^2 + r_3 c_i^3 + r_4 c_i^4 + r_5 c_i^5 \quad (2.12)$$

Conforme apresentado no decorrer desta pesquisa, o polinômio para a resistência ao avanço foi construído a partir dos resultados dos ensaios de reboque feitos com um modelo de um casco representativo. Já o polinômio para o empuxo do propulsor foi construído a partir dos resultados dos ensaios de águas abertas. Além disso, o fator de redução do empuxo t_p e o fator de esteira w_p também foram avaliados através de ensaios de autopropulsão.

A celeridade da onda é dada pela expressão:

$$c_i = \sqrt{g/k_i} \quad (2.13)$$

Onde k_i é o número de onda:

$$k_i = \frac{2\pi}{r_i L} \quad (2.14)$$

Onde L é o comprimento do navio e r_i a razão entre os comprimentos da onda e do navio. Os outros coeficientes são dados pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
a_0 &= -\frac{\tau_1}{\sqrt{f_{tj} \cdot k_i \cdot (M + M_x)}} & a_5 &= \frac{r_5}{\sqrt{k_i^5 (M + M_x)^5}} \sqrt{f_{ij}^3} \\
a_1 &= \frac{r_1 + 2r_2 c_i + 3r_3 c_i^2 + 4r_4 c_i^3 + 5r_5 c_i^4 - 2\tau_2 c_i}{\sqrt{f_{ij} \cdot k_i \cdot (M + M_x)}} & \tau_0 &= \kappa_0 (1 - t_p) \rho D_p^4 \\
a_2 &= \frac{r_2 + 3r_3 c_i + 6r_4 c_i^2 + 10r_5 c_i^3 - \tau_2}{k_i \cdot (M + M_x)} & \tau_1 &= \kappa_1 (1 - t_p) (1 - w_p) \rho D_p^3 \\
a_3 &= \frac{r_3 + 4r_4 c_i + 10r_5 c_i^2}{\sqrt{k_i^3 (M + M_x)^3}} \cdot \sqrt{f_{ij}} & \tau_2 &= \kappa_2 (1 - t_p) (1 - w_p)^2 \rho D_p^2 \\
a_4 &= \frac{r_4 + 5r_5 c_i}{k_i^2 (M + M_x)^2} f_{ij} & & (2.15)
\end{aligned}$$

Onde M é a massa do navio, M_x é a massa adicional do navio na direção de surge, e f_{ij} é a amplitude da força da onda atuando na direção de surge. A amplitude da força da onda é dada por:

$$f_{ij} = \rho g k_i \frac{H_{ij}}{2} \sqrt{F c_i^2 + F s_i^2} \quad (2.16)$$

As componentes de Froude-Krylov F_{c_i} e F_{s_i} da força de surge da onda são:

$$F_{c_i} = \sum_{m=1}^N \delta x_m S(x_m) \sin(k_i x_m) \exp(-0.5 k_i \cdot d(x_m)) \quad (2.17)$$

$$F_{s_i} = \sum_{m=1}^N \delta x_m S(x_m) \cos(k_i x_m) \exp(-0.5 k_i \cdot d(x_m)) \quad (2.18)$$

Onde: x_m é a posição longitudinal em metros da baliza m em relação à meia nau do navio; δx_m é a distância entre balizas; $d(x_m)$ é o calado na seção m em águas calmas; $S(x_m)$ é a área da porção submersa na seção m em águas calmas; e H_{ij} é a altura da onda.

$$H_{ij} = s_j r_i L \quad (2.19)$$

O nível 2 é analisado para combinações de ondas com diferentes declividades s_j e razões de comprimento r_i com incrementos Δs e Δr :

$$0,03 \leq s_j = \frac{H_{ij}}{\lambda} \leq 0,15 \quad \Delta s = 0,0012 \quad (2.20)$$

$$1,0 \leq r_i = \frac{\lambda_i}{L} \leq 3,0 \quad \Delta r = 0,025 \quad (2.21)$$

A segunda parte da aplicação do nível 2 de vulnerabilidade de surf-riding consiste em calcular o número de Froude crítico, obtido a partir da velocidade crítica do navio. A velocidade crítica do navio (u_{cr}) é calculada a partir da solução da equação de equilíbrio entre o empuxo (T_e) e a resistência (R):

$$T_e(u_{cr}; n_{cr}) - R(u_{cr}) = 0 \quad (2.22)$$

Onde $T_e(u_{cr}; n_{cr})$ é o empuxo entregue pelo propulsor do navio em águas calmas, na velocidade u_{cr} e na rotação crítica n_{cr} . $R(u_{cr})$ é a resistência ao avanço, também em águas calmas, na velocidade u_{cr} .

Determinada a velocidade u_{cr} que equilibra a equação acima, é calculado o número de Froude crítico Fn_{cr} correspondente ao limite de ocorrência de surf-riding:

$$Fn_{cr} = u_{cr}/\sqrt{gL} \quad (2.23)$$

Para cada combinação ij de onda, em função da declividade e do comprimento, é calculado um número de Froude crítico para a ocorrência de surf-riding. Esse Froude é então comparado com o Froude da embarcação calculado na velocidade de serviço.

A partir dessa comparação é definido o coeficiente $C2_{ij}$, calculado para cada combinação de onda e que recebe o valor unitário 1 se a onda ij em questão implicar em um número de Froude crítico inferior ao Froude na velocidade de serviço. Caso contrário, $C2_{ij}$ recebe o valor 0, excluindo a onda ij do cálculo do índice C da probabilidade de ocorrência do surf-riding:

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } Fn > Fn_{cr}(r_i, s_j) \\ 0 & \text{if } Fn \leq Fn_{cr}(r_i, s_j) \end{cases} \quad (2.24)$$

A terceira parte refere-se ao cálculo do peso estatístico de uma onda (w_{ij}) com declividade s_j e a razão de comprimento r_i , como função da altura significativa da onda, H_s , e do período de cruzamento zero, T_z . A fórmula de cálculo de w_{ij} é a função de densidade de probabilidade conjunta da inclinação local e do comprimento de onda local

no estado estacionário de onda, utilizando um espectro de onda do tipo Pierson-Moskowitz.

$$w_{ij} = 4 \frac{\sqrt{g} L^{5/2} T_{01}}{\pi v (H_s)^2} s_j^2 r_i^{3/2} \left(\frac{\sqrt{1+v^2}}{1+\sqrt{1+v^2}} \right) \Delta r \Delta s \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{L \cdot r_i \cdot s_j}{H_s} \right)^2 \left\{ 1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \sqrt{\frac{g T_{01}^2}{2\pi r_i L}} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.25)$$

Onde $v = 0,425$ e $T_{01} = 1,086T_z$.

Por último, a quarta parte consiste em obter o resultado da vulnerabilidade do navio através do cálculo do índice de probabilidade C, feito através da média dos valores de C_{2ij} obtidos. Um navio é considerado como não vulnerável à perda de estabilidade devido ao fenômeno de surf no nível 2 se:

$$C \leq R_{SR} \quad (2.26)$$

Onde $R_{SR} = 0,005$. O valor de C é calculado da seguinte forma:

$$C = \sum_{H_s} \sum_{T_z} (W2(H_s, T_z) \sum_{i=0}^{N_\lambda} \sum_{j=0}^{N_a} W_{ij} C_{2ij}) \quad (2.27)$$

$W2(H_s, T_z)$ é fator de ponderação do estado do mar de curto prazo, especificado na Tabela 14, como uma função da altura significativa das ondas, H_s , e do período de ondas de cruzamento zero, T_z , em que $W2(H_s, T_z)$ é igual ao número de ocorrências da combinação dividido pelo número total de ocorrências na tabela.

Tabela 14 - Tabela de dispersão de onda (IMO-MS.C.1-Circ.1627)

Number of occurrences: 100 000 / T_z (s) = average zero-crossing wave period / H_s (m) = significant wave height																
T_z (s) ▶	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
H_s (m) ▼																
0.5	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.0	29.3	988.0	4976.0	7738.0	5589.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
2.5	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4880.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0
3.5	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0
4.5	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0
5.5	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1
6.5	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1
7.5	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1
8.5	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	298.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1
9.5	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0

Apêndice B: Código de forças externas do AQWA

Este código é responsável pelo cálculo e aplicação das forças externas atuantes na embarcação durante a simulação no software AQWA, incluindo forças de propulsão, resistência ao avanço, manobra e leme. Para isso, ele lê os parâmetros das condições de onda, como amplitude e período, a partir dos cartões .dat, e fornece essas informações para a simulação. Durante a execução, o código recebe os vetores de posição e velocidade gerados pelo AQWA, realiza os cálculos das forças mencionadas e retorna os valores ao software, fazendo as transformações entre referenciais necessárias durante este processo. Além disso, os resultados das simulações são armazenados em arquivos .csv, que posteriormente são processados pela rotina de pós-processamento, responsável pela geração dos gráficos das séries temporais.

```
from AqwaServerMgr import *
import numpy as np
import math
import csv
import os
import glob
import re

# Variáveis globais para a onda (valores serão sobrescritos pelo .dat)
aw = 0.0 # Amplitude da onda
Tw = 0.0 # Período da onda

#Constantes
po = 1025
visc = 1.35e-6
pi = math.pi
g = 9.81
# Obter o diretório em que o código está sendo executado
save_directory = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))

# Angulo do leme (+ p/ BE)
max_delta = 0

#Velocidade inicial do navio em kt (Escolher entre 21, 20, 19, 18, 17.5, 17 ou 14.3)
Velocidade_servico = 19
```

```

# Dados de rotação do propulsor, coeficientes de esteira e empuxo
dados = {
    21: {"n": 9.26772, "we": 0.01300, "tp": 0.08600},
    20: {"n": 8.74185, "we": 0.02300, "tp": 0.08800},
    19: {"n": 8.22553, "we": 0.03450, "tp": 0.09340},
    18: {"n": 7.71369, "we": 0.04600, "tp": 0.10000},
    17.5: {"n": 7.45821, "we": 0.05650, "tp": 0.09775},
    17: {"n": 7.20255, "we": 0.05300, "tp": 0.09850},
    14.3: {"n": 5.81286, "we": 0.05960, "tp": 0.09223},
}
if Velocidade_servico in dados:
    n = dados[Velocidade_servico]["n"]
    we = dados[Velocidade_servico]["we"]
    tp = dados[Velocidade_servico]["tp"]

# Dados do navio
L = 55.08
B = 9.00
T = 2.57
C_b = 0.444
Dp = 1.75

# Características do leme
x = 1.2
b_R = 2
A_R = 2.13
c = 0.920
x_R = -25.656
y_R_BB = +1.935
y_R_BE = -1.935
z_R = - 2.402
e_R = 8.25

# Parâmetros do ângulo do leme
inicial = 0
tempo_inicial = 60 #tempo até o navio atingir a velocidade de cruzeiro.

# Taxa de giro do leme
if max_delta > 0:
    vel_delta = 2.3
elif max_delta < 0:
    vel_delta = -2.3
else:
    vel_delta = 0

# Criar listas para armazenar os dados
leme_data = []
FRA_data = []
LSA_data = []

```

```

MAN_data = []

def ler_wamp_perd_dat(file_path):
    """Lê o arquivo .dat e extrai os valores de amplitude (WAMP) e período (PERD)."""
    WAMP, PERD = None, None
    with open(file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            if 'WAMP' in line:
                valores_wamp = re.findall(r"[-+]?[d*\\.d+|d+", line)
                if valores_wamp:
                    WAMP = float(valores_wamp[0])
            if 'PERD' in line:
                valores_perd = re.findall(r"[-+]?[d*\\.d+|d+", line)
                if valores_perd:
                    PERD = float(valores_perd[0])
    return WAMP, PERD

def ler_parametros_onda(dat_file_path):
    """ Lê os parâmetros de onda (WAMP e PERD) de um arquivo .dat. """
    global aw, Tw # Tornar as variáveis globais acessíveis
    try:
        with open(dat_file_path, 'r') as file:
            for line in file:
                if "WAMP" in line:
                    aw = float(line.split()[-1])
                elif "PERD" in line:
                    Tw = float(line.split()[-1])

    # Imprimir os valores lidos
    print(f"Parâmetros de onda lidos do arquivo {dat_file_path}:")
    print(f" Amplitude da onda (aw): {aw} m")
    print(f" Período da onda (Tw): {Tw} s")
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao ler parâmetros do arquivo {dat_file_path}: {e}")
        aw = 0.0 # Valor padrão se falhar
        Tw = 0.0 # Valor padrão se falhar
        print("Usando valores padrão:")
        print(f" Amplitude da onda (aw): {aw} m")
        print(f" Período da onda (Tw): {Tw} s")

#Funcao da matriz de transformacao do referencial LSA para o FRA
def matriz_transformacao(phi, theta, psi):
    cz = math.cos(psi)
    sz = math.sin(psi)
    cy = math.cos(theta)
    sy = math.sin(theta)
    cx = math.cos(phi)
    sx = math.sin(phi)
    ty = math.tan(theta)

```

```

# Rotation matrix R_b^n
R_bn = np.array([
    [cz * cy, -sz * cx + cz * sy * sx, sz * sx + cz * cx * sy ],
    [sz * cy, cz * cx + sx * sy * sz, -cz * sx + sy * sz * cx],
    [-sy , cy * sx , cy * cx ]
])

# Transformation matrix T_Theta
T_theta = np.array([
    [1, sx * ty, cx * ty],
    [0, cx , -sx ],
    [0, sx / cy, cx / cy]
])
T_theta_inv = np.array([
    [1, 0, -sy ],
    [0, cx, cy * sx],
    [0, -sx, cy * cx]
])

# 3x3 zero matrix
zero_3x3 = np.zeros((3, 3))

# Assemble the full J_Theta matrix
J_theta = np.block([
    [R_bn, zero_3x3],
    [zero_3x3, T_theta]
])
R_theta = np.block([
    [R_bn, zero_3x3],
    [zero_3x3, R_bn]
])
return R_bn, T_theta, T_theta_inv, J_theta, R_theta

def calculate_resistance_force(u):
    r0, r1, r2, r3, r4, r5 = 0, 28.37, -17.25, 3.69, -0.296, 0.00887
    Xresist = -(r0 + r1*u + r2*u**2 + r3*u**3 + r4*u**4 + r5*u**5)*1000/(1 - tp)
    return Xresist

def calculate_propulsion_force(u):
    KT0, KT1, KT2, KT3, KT4 = 0.47773, -0.44164, -0.3866, 0.72396, -0.46766
    Va = u * (1 - we)
    J = Va / (n * Dp)
    Xprop = 2 * po * (n**2) * (Dp**4) * (KT0 + KT1*J + KT2*J**2 + KT3*J**3 +
    KT4*J**4)
    return Xprop, Va

def calculate_manoeuvring_forces(u, v, r):
    Yv_ad = -pi * (T / L)**2 * (1 + 0.40 * C_b * B / T) *2.5
    Yr_ad = -pi * (T / L)**2 * (-0.5 + 2.2 * B / L - 0.08 * B / T) *2.5 - 0.002345
    Nv_ad = -pi * (T / L)**2 * (0.5 + 2.4 * T / L) *2.0 + 0.002345

```

$$Nr_ad = -\pi * (T / L)**2 * (0.25 + 0.039 * B / T - 0.56 * B / L) * 4.5$$

"Velocidades adimensionalizadas"

$$v_ad = v / u \text{ if } u \neq 0 \text{ else } 0$$

$$r_ad = r * L / u \text{ if } u \neq 0 \text{ else } 0$$

$$Y_man = (1/2) * \rho * L**2 * u**2 * (Yv_ad * v_ad + Yr_ad * r_ad)$$

$$N_man = (1/2) * \rho * L**3 * u**2 * (Nv_ad * v_ad + Nr_ad * r_ad)$$

return Y_man, N_man

def calculate_rudder_forces(u, v, r, delta, psi, X_FRA, Time, theta, phi, Z_FRA, aw, Tw):

$$Va = u * (1 - we)$$

if Va == 0:

$$Cth = 0$$

else:

$$Cth = \text{calculate_propulsion_force}(u)[0] / (0.5 * \rho * (Va**2) * \pi * ((Dp**2)/4))$$

$$V_inf = Va * \text{math.sqrt}(1 + Cth)$$

$$r_0 = Dp / 2$$

$$r_inf = r_0 * \text{math.sqrt}(0.5 * (1 + Va / V_inf)) \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$r_ = r_0 * ((0.14 * (r_inf / r_0)**3 + (r_inf / r_0) * (x / r_0)**1.5) / (0.14 * (r_inf / r_0)**3 + (x / r_0)**1.5))$$

$$Vx = V_inf * (r_inf / r_)**2 \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$\text{delta_r} = 0.15 * x * ((Vx - Va) / (Vx + Va)) \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$V_corr = (Vx - Va) * (r_ / (r_ + \text{delta_r}))**2 + Va \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$Vx2 = -(V_corr**2 + tp * u**2) / V_corr \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$d = \text{math.sqrt}(\pi / 4) * (r_ + \text{delta_r})$$

$$f = 2 * (2 / (2 + d / c))**8$$

$$L_corr = (Va / V_corr)**f \text{ if } Va \neq 0 \text{ else } 0$$

$$Vy_R = -(0.36 * v + 0.66 * r * x_R)$$

$$\text{razao_aspecto} = b_R**2 / A_R$$

$$z_R_top = z_R + 1$$

$$\text{wfreq} = 2 * \pi / Tw$$

$$\text{wdir} = 0$$

$$\text{w_encontro} = \text{wfreq} - ((\text{wfreq**2} * u) / g) * \text{math.cos}(\text{psi} - \text{wdir})$$

$$k_w = \text{wfreq**2} / g$$

$$Xi = \text{psi} - \text{wdir}$$

Distancia vertical entre a linha dagua media e a superficie da onda no ref FRA na posicao longitudinal do leme

$$\begin{aligned} \text{elevacao_w_bb} = & aw * \text{math.cos}(k_w * (X_FRA + x_R * \text{math.cos}(Xi) * \text{math.cos}(\text{theta})) \\ & + y_R_BB * (\text{math.cos}(Xi) * \text{math.sin}(\text{theta}) * \text{math.sin}(\text{phi}) - \\ & \text{math.sin}(Xi) * \text{math.cos}(\text{phi})) \\ & + z_R_top * (\text{math.cos}(Xi) * \text{math.sin}(\text{theta}) * \text{math.cos}(\text{phi}) + \\ & \text{math.sin}(Xi) * \text{math.sin}(\text{phi})) \\ & - \text{wfreq} * \text{Time} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{elevacao_w_be} = & aw * \text{math.cos}(k_w * (X_FRA + x_R * \text{math.cos}(Xi) * \text{math.cos}(\text{theta})) \\ & + y_R_BE * (\text{math.cos}(Xi) * \text{math.sin}(\text{theta}) * \text{math.sin}(\text{phi}) - \\ & \text{math.sin}(Xi) * \text{math.cos}(\text{phi})) \\ & + z_R_top * (\text{math.cos}(Xi) * \text{math.sin}(\text{theta}) * \text{math.cos}(\text{phi}) + \\ & \text{math.sin}(Xi) * \text{math.sin}(\text{phi})) \\ & - \text{wfreq} * \text{Time} \end{aligned}$$

```

# Distancia vertical do centro do leme a linha dagua media no sistema FRA
leme_lwl_bb      =      Z_FRA      -      x_R*math.sin(theta)      +
y_R_BB*math.cos(theta)*math.sin(phi) + z_R_top*math.cos(theta)*math.cos(phi)
leme_lwl_be      =      Z_FRA      -      x_R*math.sin(theta)      +
y_R_BE*math.cos(theta)*math.sin(phi) + z_R_top*math.cos(theta)*math.cos(phi)

#distancia vertical do leme a superficie da onda no sistema FRA
hr_bb = - leme_lwl_bb + elevacao_w_bb
hr_be = - leme_lwl_be + elevacao_w_be

# Emersão do leme
if hr_bb >= 0:
    A_R_corr_bb = A_R
    razao_aspecto_bb_corr = razao_aspecto
else:
    razao_aspecto_bb_corr = (math.sqrt(A_R*razao_aspecto) + hr_bb) /
(math.sqrt(A_R/razao_aspecto))
    A_R_corr_bb = max(0, A_R + hr_bb * math.sqrt(A_R/razao_aspecto))
if hr_be >= 0:
    A_R_corr_be = A_R
    razao_aspecto_be_corr = razao_aspecto
else:
    razao_aspecto_be_corr = (math.sqrt(A_R*razao_aspecto) + hr_be) /
(math.sqrt(A_R/razao_aspecto))

    A_R_corr_be = max(0, A_R + hr_be * math.sqrt(A_R/razao_aspecto))
V_R = math.sqrt(Vx2**2 + Vy_R**2) if Va != 0 else 0
gama = math.atan(Vy_R/Vx2) if Va != 0 else 0
alfa = abs(abs(delta) - abs(gama))
Rn_R = V_R * c / visc if Va != 0 else 0
C_D0 = 2.5 * 0.075 / (math.log10(Rn_R) - 2)**2 if Va != 0 else 0
Cq = 1
C_L_BB = (2 * pi * razao_aspecto * (razao_aspecto + 1) / ((razao_aspecto + 2)**2))
* math.sin(alfa) + Cq * math.sin(alfa) * abs(math.sin(alfa)) * math.cos(alfa)
C_L_BE = (2 * pi * razao_aspecto * (razao_aspecto + 1) / ((razao_aspecto + 2)**2))
* math.sin(alfa) + Cq * math.sin(alfa) * abs(math.sin(alfa)) * math.cos(alfa)
C_D_BB = 1.1 * (C_L_BB**2) / (pi * razao_aspecto) + Cq * (abs(math.sin(alfa)))**3
+ C_D0
C_D_BE = 1.1 * (C_L_BE**2) / (pi * razao_aspecto) + Cq * (abs(math.sin(alfa)))**3
+ C_D0
Lift_BB = 0.5 * po * C_L_BB * A_R_corr_bb * V_R**2
Lift_BE = 0.5 * po * C_L_BE * A_R_corr_be * V_R**2
Drag_BB = 0.5 * po * C_D_BB * A_R_corr_bb * V_R**2
Drag_BE = 0.5 * po * C_D_BE * A_R_corr_be * V_R**2
a_H = 1 / (1 + (4.9 * (e_R / T) + 3 * (c / T))**2)
delta_x = 0.3 * T / (e_R / T + 0.46)
signal = +1 if delta > 0 else (-1 if delta < 0 else 0)
X_leme_BB = - (Lift_BB * math.sin(gama) + Drag_BB * abs(math.cos(gama)))
X_leme_BE = - (Lift_BE * math.sin(gama) + Drag_BE * abs(math.cos(gama)))

```

```

    Y_leme_BB = signal * (1 + a_H) * L_corr * (Lift_BB * math.cos(gama) - Drag_BB *
abs(math.sin(gama)))
    Y_leme_BE = signal * (1 + a_H) * L_corr * (Lift_BE * math.cos(gama) - Drag_BE *
abs(math.sin(gama)))
    X_leme = (X_leme_BB + X_leme_BE)
    Y_leme = (Y_leme_BB + Y_leme_BE)
    N_leme_BB = (x_R + delta_x) * (Y_leme_BB)
    N_leme_BE = (x_R + delta_x) * (Y_leme_BE)
    N_leme = (N_leme_BB + N_leme_BE)
    return Y_leme, N_leme, Va, Cth, V_inf, r_inf, r_, Vx, delta_r, V_corr, Vx2, d, f,
L_corr, Vy_R, V_R, \
        gama, delta, alfa, C_D0, C_L_BB, C_D_BB, Lift_BB, Drag_BB, a_H, delta_x,
razao_aspecto_bb_corr, razao_aspecto_be_corr, \
        A_R_corr_bb, A_R_corr_be, Z_FRA, hr_bb, leme_lwl_bb, elevacao_w_bb,
elevacao_w_be, u_wp_bb, X_leme

```

```

current_dat_file = None

```

```

def UF1(Analysis, Mode, Stage, Time, TimeStep, Pos, Vel):

```

```

    global aw, Tw

```

```

    if not hasattr(UF1, 'parametros_lidos'):

```

```

        # Obter o nome do arquivo .dat processado

```

```

        dat_file_path = os.getenv('AQWA_DAT_FILE', "")

```

```

        if dat_file_path:

```

```

            ler_parametros_onda(dat_file_path)

```

```

        else:

```

```

            print("Erro: Caminho do arquivo .dat não fornecido.")

```

```

        UF1.parametros_lidos = True

```

```

    Error = 0

```

```

    AddMass = BlankAddedMass(Analysis.NOfStruct)

```

```

    Force = BlankForce(Analysis.NOfStruct)

```

```

    for s in range(Analysis.NOfStruct):

```

```

        #Le as velocidades, posicao e angulos de Euler decompostos em FRA

```

```

        X_FRA = Pos[s][0]

```

```

        Y_FRA = Pos[s][1]

```

```

        Z_FRA = Pos[s][2]

```

```

        phi = Pos[s][3]

```

```

        theta = Pos[s][4]

```

```

        psi = Pos[s][5]

```

```

        Vel_FRA = Vel[s]

```

```

        u_FRA = Vel[s][0]

```

```

        v_FRA = Vel[s][1]

```

```

        w_FRA = Vel[s][2]

```

```

        p_FRA = Vel[s][3]

```

```

        q_FRA = Vel[s][4]

```

```

        r_FRA = Vel[s][5]

```

```

        vel_linear_FRA = np.array([u_FRA, v_FRA, w_FRA])

```

```

        vel_angular_FRA = np.array([p_FRA, q_FRA, r_FRA])

```

```

#Converte as velocidades do referencial FRA para o referencial LSA
R_bn, T_theta, T_theta_inv, J_theta, R_theta = matriz_transformacao(phi, theta, psi)
vel_linear_LSA = R_bn.T @ vel_linear_FRA
vel_angular_LSA = T_theta_inv @ vel_angular_FRA

#Le as velocidades decompostas no referencial LSA
u = vel_linear_LSA[0]
v = vel_linear_LSA[1]
w = vel_linear_LSA[2]
p = vel_angular_LSA[0]
q = vel_angular_LSA[1]
r = vel_angular_LSA[2]

# Controle do leme
# Após 60s, o leme se move se max_delta não for 0
if max_delta > 0:
    delta = math.radians(min(inicial + vel_delta * (Time - tempo_inicial),
max_delta))
elif max_delta < 0:
    delta = math.radians(max(inicial + vel_delta * (Time - tempo_inicial),
max_delta))
else:
    delta = 0

#Calcula as forças que serão aplicadas no Aqwa no referencial LSA
Xresist = calculate_resistance_force(u)
Tau_resist = np.array([Xresist, 0, 0, 0, 0, 0])
Xprop, Va = calculate_propulsion_force(u)
Tau_prop = np.array([Xprop, 0, 0, 0, 0, 0])
Y_man, N_man = calculate_manoeuvring_forces(u, v, r)
Tau_man = np.array([0, Y_man, 0, 0, 0, N_man])
Y_leme, N_leme, Va, Cth, V_inf, r_inf, r_, Vx, delta_r, V_corr, Vx2, \
d, f, L_corr, Vy_R, V_R, gama, delta, alfa, C_D0, C_L_BB, C_D_BB, Lift_BB, \
Drag_BB, a_H, delta_x, razao_aspecto_bb_corr, razao_aspecto_be_corr, \
A_R_corr_bb, A_R_corr_be, Z_FRA, hr_bb, leme_lwl_bb, elevacao_w_bb, \
elevacao_w_be, \
u_wp_bb, X_leme = calculate_rudder_forces(u, v, r, delta, psi, X_FRA, Time, theta,
phi, Z_FRA, aw, Tw)
Tau_leme = np.array([X_leme, Y_leme, 0, 0, 0, N_leme])

#Calcula as forças que serão aplicadas no Aqwa no referencial FRA
Tau_prop_FRA = R_theta @ Tau_prop
Tau_resist_FRA = R_theta @ Tau_resist
Tau_leme_FRA = R_theta @ Tau_leme
Tau_man_FRA = R_theta @ Tau_man

Force[s] = Tau_prop_FRA + Tau_resist_FRA + Tau_leme_FRA + Tau_man_FRA

#Armazena os dados

```

```

FRA_data.append([Time, X_FRA, Y_FRA, Z_FRA, phi, theta, psi,
                Vel_FRA[0], Vel_FRA[1], Vel_FRA[5],
                Tau_prop_FRA[0], Tau_prop_FRA[1], Tau_prop_FRA[2],
                Tau_prop_FRA[3], Tau_prop_FRA[4], Tau_prop_FRA[5],
                Tau_resist_FRA[0], Tau_resist_FRA[1], Tau_resist_FRA[2],
                Tau_resist_FRA[3], Tau_resist_FRA[4], Tau_resist_FRA[5],
                Tau_leme_FRA[0], Tau_leme_FRA[1], Tau_leme_FRA[2],
                Tau_leme_FRA[3], Tau_leme_FRA[4], Tau_leme_FRA[5],
                Tau_man_FRA[0], Tau_man_FRA[1], Tau_man_FRA[2],
                Tau_man_FRA[3], Tau_man_FRA[4], Tau_man_FRA[5]])
LSA_data.append([Time, u, v, w, p, q, r, phi, theta,
                psi, Xprop, Xresist, Y_man, Y_leme, N_man, N_leme])
leme_data.append([Time, u, v, r, Va, Cth, V_inf, r_inf, r_, Vx,
                delta_r, V_corr, Vx2, d, f, L_corr, Vy_R, V_R, gama,
                delta, alfa, C_D0, C_L_BB, C_D_BB, Lift_BB, Drag_BB, a_H,
                delta_x, Y_leme, N_leme, razao_aspecto_bb_corr,
                razao_aspecto_be_corr,
                A_R_corr_bb, A_R_corr_be, Z_FRA, hr_bb, leme_lwl_bb,
                elevacao_w_bb, elevacao_w_be, u_wp_bb, X_leme])
return Force, AddMass, Error

```

```

def save_LSA_data():
    file_path = os.path.join(save_directory, "LSA_data.csv")
    with open(file_path, mode='w', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(["Tempo", "u", "v", "w", "p", "q", "r", "phi", "theta",
                        "psi", "Xprop", "Xresist", "Y_man", "Y_leme",
                        "N_man", "N_leme"])
        writer.writerows(LSA_data)

```

```

def save_leme_data():
    file_path = os.path.join(save_directory, "leme_data.csv")
    with open(file_path, mode='w', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(["Tempo", "u", "v", "r", "Va", "Cth", "V_inf", "r_inf",
                        "r_", "Vx", "delta_r", "V_corr", "Vx2", "d", "f",
                        "L_corr", "Vy_R", "V_R", "gama", "delta", "alfa",
                        "C_D0", "C_L_BB", "C_D_BB", "Lift_BB", "Drag_BB", "a_H",
                        "delta_x", "Y_leme", "N_leme", "razao_aspecto_bb_corr",
                        "razao_aspecto_be_corr", "A_R_corr_bb", "A_R_corr_be", "Z_FRA",
                        "hr_bb", "leme_lwl_bb", "elevacao_w_bb", "elevacao_w_be",
                        "u_wp_bb", "X_leme"])
        writer.writerows(leme_data)

```

```

def save_FRA_data():
    # Caminho do arquivo CSV
    file_path = os.path.join(save_directory, "FRA_data.csv")
    with open(file_path, mode='w', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        # Cabeçalhos do CSV

```

```

writer.writerow(["Tempo", "X_FRA", "Y_FRA", "Z_FRA", "phi", "theta", "psi",
                "X_dot", "Y_dot", "PSI_dot", "Xprop", "Yprop", "Zprop",
                "Kprop", "Mprop", "Nprop",
                "Xresist", "Yresist", "Zresist",
                "Kresist", "Mresist", "Nresist",
                "Xleme", "Yleme", "Zleme",
                "Kleme", "Mleme", "Nleme",
                "Xman", "Yman", "Zman",
                "Kman", "Mman", "Nman",])
# Escrevendo os dados de força (tempo, Fx, Fy, N)
writer.writerows(FRA_data)
Server = AqwaUserForceServer()
try:
    Server.Run(UF1)
finally:
    save_LSA_data()
    save_FRA_data()
    save_leme_data()

```

Apêndice C: Código para automação do solver do AQWA com forças externas

Esse código executa as simulações no solver do AQWA. Ele inicia o servidor de forças externas, que executa o script de cálculo de forças, e processa todos os arquivos .dat disponíveis. Além disso, o código monitora a execução do solver, aguarda a geração dos arquivos de saída (.LIS), renomeia arquivos de dados gerados e remove arquivos desnecessários, garantindo que apenas os resultados relevantes sejam mantidos.

```
import os
import subprocess
import time
import psutil

def iniciar_servidor_forcas(script_path, bat_path, dat_file_path):
    """ Inicia o servidor de forças externas usando o script de cálculo de forças e o arquivo
    .bat do AQWA. """

    # Configurar variável de ambiente para o nome do arquivo .dat
    env = os.environ.copy()
    env['AQWA_DAT_FILE'] = dat_file_path
    subprocess.Popen(
        ["python", script_path], # Chama diretamente o script Python
        env=env,
        stdout=subprocess.DEVNULL, # Suprimir saída no terminal
        stderr=subprocess.DEVNULL, # Suprimir erros no terminal
        creationflags=subprocess.CREATE_NO_WINDOW # Ocultar janela
    )
    print(f"Servidor de forças externas iniciado para o arquivo: {dat_file_path}")

def run_solver(solver_path, dat_file_path):
    """ Executa o solver AQWA para o arquivo .dat e espera o término do processo. """
    # Montar o comando para executar o solver com o modelo correto
    command = f"{solver_path} /nowind "{dat_file_path}"

    # Executar o comando no cmd e esperar a execução terminar
    print(f"Executando: {command}")
    try:
        process = subprocess.Popen(command, shell=True)
        return process
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao iniciar o solver: {e}")
        return None
```

```

def renomear_lsa_e_leme_csv(dat_file_path):
    """Renomeia os arquivos LSA_data.csv e leme_data.csv para nomes baseados no
arquivo .dat."""
    base_name = os.path.splitext(os.path.basename(dat_file_path))[0]
    directory = os.path.dirname(dat_file_path)
    # Arquivos originais
    lsa_file = os.path.join(directory, "LSA_data.csv")
    leme_file = os.path.join(directory, "leme_data.csv")

    # Novos nomes baseados no nome do arquivo .dat
    new_lsa_file = os.path.join(directory, f"LSA_data_{base_name}.csv")
    new_leme_file = os.path.join(directory, f"leme_data_{base_name}.csv")
    # Renomear LSA_data.csv
    if os.path.exists(lsa_file):
        try:
            os.rename(lsa_file, new_lsa_file)
            print(f"Arquivo renomeado para: {new_lsa_file}")
        except Exception as e:
            print(f"Erro ao renomear {lsa_file}: {e}")
    else:
        print(f"Arquivo {lsa_file} não encontrado.")

    # Renomear leme_data.csv
    if os.path.exists(leme_file):
        try:
            os.rename(leme_file, new_leme_file)
            print(f"Arquivo renomeado para: {new_leme_file}")
        except Exception as e:
            print(f"Erro ao renomear {leme_file}: {e}")
    else:
        print(f"Arquivo {leme_file} não encontrado.")

def monitorar_processos(process):
    """Monitora o processo para garantir que ele e seus subprocessos sejam completamente
finalizados."""
    if process is None:
        print("O processo não foi iniciado corretamente.")
        return
    print("Monitorando processo...")
    try:
        # Esperar até que o processo principal termine
        process.wait()
        print("Processo principal finalizado.")

        # Verificar se existem subprocessos rodando
        proc = psutil.Process(process.pid)
        children = proc.children(recursive=True) # Obter subprocessos
        if children:

```

```

        print(f"Encontrados subprocessos: {children}")
        for child in children:
            print(f"Aguardando subprocesso {child.pid}")
            child.wait() # Esperar até que cada subprocesso seja finalizado
        print("Processo e subprocessos finalizados.")
    except psutil.NoSuchProcess:
        print("O processo principal já foi finalizado antes da monitoração.")
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao monitorar o processo: {e}")

def aguardar_termino_solver(dat_file_path, timeout=300):
    """Aguarda a criação e a conclusão do arquivo .LIS correspondente ao arquivo .dat até
    que o arquivo tenha um tamanho final ou o tempo limite seja atingido. """
    base_file_path = os.path.splitext(dat_file_path)[0]
    lis_file_path = base_file_path + '.LIS'
    start_time = time.time()
    initial_size = 0
    while time.time() - start_time < timeout:
        if os.path.exists(lis_file_path):
            current_size = os.path.getsize(lis_file_path)

            # Verificar se o arquivo aumentou de tamanho (processo de escrita concluído)
            if current_size > initial_size:
                initial_size = current_size
                print(f"Arquivo .LIS encontrado e com tamanho de {current_size} bytes.
                Aguardando...")
            else:
                print(f"Arquivo .LIS com tamanho final: {current_size} bytes.")
                return True
            time.sleep(5) # Espera de 5 segundos antes de verificar novamente
        print(f"Tempo limite atingido para o arquivo .LIS: {lis_file_path}")
        return False

def remover_arquivos_nao_lis(dat_file_path):
    """Remove os arquivos gerados pelo solver que não são arquivos .LIS """
    # Extensões de arquivos a serem removidos
    file_extensions_to_remove = ['.MES', '.PLD', '.PLS', '.PLT', '.POS', '.PRS', '.RES']
    # Caminho base do arquivo .dat (sem extensão)
    base_file_path = os.path.splitext(dat_file_path)[0]
    # Remover os arquivos gerados com as extensões especificadas
    for ext in file_extensions_to_remove:
        file_to_remove = base_file_path + ext
        if os.path.exists(file_to_remove):
            try:
                os.remove(file_to_remove)
                print(f"Arquivo removido: {file_to_remove}")
            except Exception as e:
                print(f"Erro ao remover {file_to_remove}: {e}")

def processar_todos_dat(script_path, bat_path, solver_path, input_dir, wait_time=10):

```

```
"""Processa todos os arquivos .dat, iniciando o servidor, rodando o solver e limpando os arquivos gerados."""
```

```
# Listar todos os arquivos .dat no diretório de entrada
dat_files = [f for f in os.listdir(input_dir) if f.endswith('.dat')]
for dat_file in dat_files:

    # Caminho completo para o arquivo .dat
    dat_file_path = os.path.join(input_dir, dat_file)

    # Iniciar o servidor de forças externas antes de cada arquivo .dat
    iniciar_servidor_forcas(script_path, bat_path, dat_file_path)

    # Aguardar alguns segundos para o servidor ser iniciado
    time.sleep(wait_time)

    # Iniciar o solver AQWA com o arquivo .dat
    process = run_solver(solver_path, dat_file_path)

    # Monitorar o término do processo principal e subprocessos
    monitorar_processos(process)

    # Aguardar até que o arquivo .LIS seja gerado e concluído
    if aguardar_termino_solver(dat_file_path):
        renomear_lsa_e_leme_csv(dat_file_path)
        print(f"Processo concluído para {dat_file}.")

    # Remover arquivos gerados que não são .LIS
    remover_arquivos_nao_lis(dat_file_path)

    # Adicionar um tempo de espera extra antes de passar para o próximo arquivo .dat
    time.sleep(15)
    print("-" * 50)

# Caminhos para os arquivos
script_path = r'C:\caminho\prop_resist_man_leme.py' # Caminho completo para o
script de cálculo de forças
bat_path = r'C:\caminho\StartAqwaPythonUserForceServer.bat' # Caminho
completo para o arquivo .bat
solver_path = r'C:\caminho\aqwa.exe' # Caminho completo para o solver AQWA
input_dir = r'C:\caminho' # Caminho completo para a pasta com os arquivos .dat
# Processar todos os arquivos .dat na pasta
processar_todos_dat(script_path, bat_path, solver_path, input_dir, wait_time=10)
```

Apêndice D: Código de pós processamento de dados do AQWA

Este código analisa os resultados das simulações armazenados nos arquivos de saída LIS do AQWA. Ele lê as séries temporais de posição, velocidade e forças hidrodinâmicas, originalmente expressas no referencial *LSA*, e realiza as transformações necessárias para representá-las no referencial *b*. Além disso, o código gera gráficos das séries temporais, facilitando a visualização dos resultados e a interpretação dos fenômenos analisados.

```
# Diretório onde os arquivos .LIS estão localizados
directory = r'C:\caminho'
import os
import re
import math
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import tkinter as tk
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

def matriz_transformacao(phi, theta, psi):
    cz = math.cos(psi)
    sz = math.sin(psi)
    cy = math.cos(theta)
    sy = math.sin(theta)
    cx = math.cos(phi)
    sx = math.sin(phi)
    ty = math.tan(theta)

    # Rotation matrix R_b^n
    R_bn = np.array([
        [cz * cy, -sz * cx + cz * sy * sx, sz * sx + cz * cx * sy ],
        [sz * cy, cz * cx + sx * sy * sz, -cz * sx + sy * sz * cx],
        [-sy, cy * sx, cy * cx ]
    ])

    # Transformation matrix T_Theta
    T_theta = np.array([
        [1, sx * ty, cx * ty],
        [0, cx, -sx ],
        [0, sx / cy, cx / cy]
```

```

])

T_theta_inv = np.array([
    [1, 0, -sy ],
    [0, cx, cy * sx],
    [0, -sx, cy * cx]
])

# 3x3 zero matrix
zero_3x3 = np.zeros((3, 3))

# Assemble the full J_Theta matrix
J_theta = np.block([
    [R_bn, zero_3x3],
    [zero_3x3, T_theta]
])
R_theta = np.block([
    [R_bn, zero_3x3],
    [zero_3x3, R_bn]
])
return R_bn, T_theta, T_theta_inv, J_theta, R_theta

def process_lis_file(filepath):
    z_wave = []
    diffraction_force = []
    FK_force = []
    radiation_force = []
    hydrostatic_force = []
    posicao = []
    velocidade = []
    with open(filepath, 'r') as file:
        time_steps = []
        current_line = 0

        # Encontrar ocorrências de TIME(SECS)
        for line in file:
            if 'TIME(SECS)' in line:
                time_steps.append(current_line)
                current_line += 1
        file.seek(0)
        lines = file.readlines()
        for t in range(len(time_steps)):
            start = time_steps[t]

            # Capturar o tempo (8 linhas abaixo do marcador TIME(SECS))
            time_line = lines[start + 8].strip()
            try:
                current_time = float(time_line) # Extrair o tempo atual
            except ValueError:
                current_time = None

```

```

# Captura de dados de posição (10 linhas abaixo de TIME(SECS))
position_line = lines[start + 10].strip()
position_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?", position_line)
if len(position_data) >= 8:
    posicao.append([current_time] + list(map(float, position_data[2:8])))

# Captura de dados de velocidade (11 linhas abaixo de TIME(SECS))
velocity_line = lines[start + 11].strip()
velocity_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?", velocity_line)
if len(velocity_data) >= 6:
    velocidade.append([current_time] + list(map(float, velocity_data[:6])))

# Captura de dados de elevacao da onda (51 linhas abaixo de TIME(SECS))
wave_line = lines[start + 51].strip()
wave_data = re.findall(r"[-+]?d*\.\d+|\d+", wave_line)
if len(wave_data) >= 3:
    # z_wave.append([current_time] + list(map(float, wave_data[2:8])))
    z_wave.append([current_time] + list(map(float, wave_data[1:4])))

# Captura de dados da força de radiação (35 linhas abaixo de TIME(SECS))
radiation_force_line = lines[start + 35].strip()
radiation_force_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?",
radiation_force_line)
if len(radiation_force_data) >= 6:
    radiation_force.append([current_time] + list(map(float,
radiation_force_data[:6])))

# Captura de dados da força de difração (34 linhas abaixo de TIME(SECS))
diffraction_force_line = lines[start + 34].strip()
diffraction_force_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?",
diffraction_force_line)
if len(diffraction_force_data) >= 6:
    diffraction_force.append([current_time] + list(map(float,
diffraction_force_data[:6])))

# Captura de dados da força de FK (25 linhas abaixo de TIME(SECS))
FK_force_line = lines[start + 25].strip()
FK_force_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?", FK_force_line)
if len(FK_force_data) >= 6:
    FK_force.append([current_time] + list(map(float, FK_force_data[:6])))

# Captura de dados da força de restauracao (22 linhas abaixo de TIME(SECS))
hydrostatic_force_line = lines[start + 22].strip()
hydrostatic_force_data = re.findall(r"[-+]?[\d.]+(?:[Ee][-+]?\d+)?",
hydrostatic_force_line)
if len(hydrostatic_force_data) >= 6:
    hydrostatic_force.append([current_time] + list(map(float,
hydrostatic_force_data[:6])))

```

```

# Converter para arrays NumPy
z_wave      = np.array([row for row in z_wave if len(row) == 4])
radiation_force = np.array(radiation_force) if radiation_force else np.array([])
diffraction_force = np.array(diffraction_force) if diffraction_force else np.array([])
FK_force     = np.array(FK_force) if FK_force else np.array([])
hydrostatic_force = np.array(hydrostatic_force) if hydrostatic_force else np.array([])
posicao      = np.array(posicao) if posicao else np.array([])
velocidade  = np.array(velocidade) if velocidade else np.array([])
return z_wave, radiation_force, diffraction_force, FK_force, hydrostatic_force,
posicao, velocidade

def ler_wamp_perd_lis(file_path):
    """ Lê o arquivo .LIS e extrai os valores de WAMP e PERD. """
    WAMP, PERD = None, None
    with open(file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            if 'WAMP' in line:
                # Pegando o terceiro valor não-zero da linha
                valores_wamp = re.findall(r"[-+]?d*\.\d+|\d+", line)
                if len(valores_wamp) >= 3:
                    WAMP = float(valores_wamp[2]) # Terceiro valor da linha é o WAMP
            if 'PERD' in line:
                # Pegando o terceiro valor não-zero da linha
                valores_perd = re.findall(r"[-+]?d*\.\d+|\d+", line)
                if len(valores_perd) >= 3:
                    PERD = float(valores_perd[2]) # Terceiro valor da linha é o PERD
    return WAMP, PERD

def processar_todos_lis(directory):

    # Lista para armazenar os resultados de C2
    resultados_C2ij = []

    # Loop sobre todos os arquivos .LIS na pasta
    for filename in os.listdir(directory):
        if filename.endswith('.LIS'):
            filepath = os.path.join(directory, filename)

            # Ler WAMP e PERD do arquivo .LIS
            WAMP, PERD = ler_wamp_perd_lis(filepath)
            H = 2 * WAMP # Altura da onda H
            T = PERD # Período da onda
            g = 9.81
            lamb_w = (g * PERD**2) / (2 * math.pi) # Comprimento da onda [m]
            k_w = (2 * math.pi) / lamb_w # Numero de onda [1/m]
            c_w = lamb_w / PERD
            print(f"Processando {filename} - Altura: {H}, Período: {T}")

            # Chamar a função para processar o arquivo e exibir os gráficos

```

```

z_wave, radiation_force, diffraction_force, FK_force, hydrostatic_force, posicao,
velocidade = process_lis_file(filepath)

```

```

# Le a posicao e os angulos de euler no referencial FRA do arquivo LIS
X_LIS = posicao[:, 1]      #[m]
Y_LIS = posicao[:, 2]      #[m]
Z_LIS = posicao[:, 3]      #[m]
phi_LIS = np.radians(posicao[:, 4]) #[rad]
theta_LIS = np.radians(posicao[:, 5]) #[rad]
psi_LIS = np.radians(posicao[:, 6]) #[rad]
tempo = velocidade[:, 0] # Tempo
#Le a velocidade no referencial FRA
u_FRA_LIS = velocidade[:, 1]      # Velocidade em Surge [m/s]
v_FRA_LIS = velocidade[:, 2]      # Velocidade em Sway [m/s]
w_FRA_LIS = velocidade[:, 3]      # Velocidade em Sway [m/s]
p_FRA_LIS = velocidade[:, 4]*math.pi/180 # Velocidade em Yaw [rad/s]
q_FRA_LIS = velocidade[:, 5]*math.pi/180 # Velocidade em Yaw [rad/s]
r_FRA_LIS = velocidade[:, 6]*math.pi/180 # Velocidade em Yaw [rad/s]

```

```

# Le as forças de FK, difração, radiação e restauracao no referencial FRA do
arquivo LIS

```

```

X_FK_FRA_LIS = FK_force[:, 1]
Y_FK_FRA_LIS = FK_force[:, 2]
Z_FK_FRA_LIS = FK_force[:, 3]
X_DIFF_FRA_LIS = diffraction_force[:, 1]
Y_DIFF_FRA_LIS = diffraction_force[:, 2]
Z_DIFF_FRA_LIS = diffraction_force[:, 3]
X_RAD_FRA_LIS = radiation_force[:, 1]
Y_RAD_FRA_LIS = radiation_force[:, 2]
Z_RAD_FRA_LIS = radiation_force[:, 3]
X_REST_FRA_LIS = hydrostatic_force[:, 1]
Y_REST_FRA_LIS = hydrostatic_force[:, 2]
Z_REST_FRA_LIS = hydrostatic_force[:, 3]

```

```

# Converte o vetor de velocidade e de força do LIS (LSA) para o ref b

```

```

# Loop sobre cada instante de tempo

```

```

u_LSA_LIS = []
v_LSA_LIS = []
w_LSA_LIS = []
p_LSA_LIS = []
q_LSA_LIS = []
r_LSA_LIS = []
X_FK_LSA_LIS = []
Y_FK_LSA_LIS = []
Z_FK_LSA_LIS = []
X_DIFF_LSA_LIS = []
Y_DIFF_LSA_LIS = []
Z_DIFF_LSA_LIS = []
X_RAD_LSA_LIS = []
Y_RAD_LSA_LIS = []

```

```

Z_RAD_LSA_LIS = []
X_REST_LSA_LIS = []
Y_REST_LSA_LIS = []
Z_REST_LSA_LIS = []
for i in range(len(tempo)): # 'tempo' representa o número de instantes de tempo
na série

```

```

# Leitura dos ângulos de Euler e velocidades no instante i
phi_loop = phi_LIS[i]
theta_loop = theta_LIS[i]
psi_loop = psi_LIS[i]
u_FRA_loop = u_FRA_LIS[i]
v_FRA_loop = v_FRA_LIS[i]
w_FRA_loop = w_FRA_LIS[i]
p_FRA_loop = p_FRA_LIS[i]
q_FRA_loop = q_FRA_LIS[i]
r_FRA_loop = r_FRA_LIS[i]
X_FK_FRA_loop = X_FK_FRA_LIS[i]
Y_FK_FRA_loop = Y_FK_FRA_LIS[i]
Z_FK_FRA_loop = Z_FK_FRA_LIS[i]
X_DIFF_FRA_loop = X_DIFF_FRA_LIS[i]
Y_DIFF_FRA_loop = Y_DIFF_FRA_LIS[i]
Z_DIFF_FRA_loop = Z_DIFF_FRA_LIS[i]
X_RAD_FRA_loop = X_RAD_FRA_LIS[i]
Y_RAD_FRA_loop = Y_RAD_FRA_LIS[i]
Z_RAD_FRA_loop = Z_RAD_FRA_LIS[i]
X_REST_FRA_loop = X_REST_FRA_LIS[i]
Y_REST_FRA_loop = Y_REST_FRA_LIS[i]
Z_REST_FRA_loop = Z_REST_FRA_LIS[i]
# Cria o vetor de velocidades no referencial FRA para o instante i
Vel_lin_FRA = np.array([u_FRA_loop, v_FRA_loop, w_FRA_loop])
Vel_ang_FRA = np.array([p_FRA_loop, q_FRA_loop, r_FRA_loop])

# Cria o vetor de força no referencial FRA para o instante i
TAU_FK_FRA = np.array([X_FK_FRA_loop, Y_FK_FRA_loop,
Z_FK_FRA_loop])
TAU_DIFF_FRA = np.array([X_DIFF_FRA_loop, Y_DIFF_FRA_loop,
Z_DIFF_FRA_loop])
TAU_RAD_FRA = np.array([X_RAD_FRA_loop, Y_RAD_FRA_loop,
Z_RAD_FRA_loop])
TAU_REST_FRA = np.array([X_REST_FRA_loop, Y_REST_FRA_loop,
Z_REST_FRA_loop])

# Calcula a matriz de transformação J_Theta para o instante i
R_bn, T_theta, T_theta_inv, J_theta, R_theta =
matriz_transformacao(phi_loop, theta_loop, psi_loop)

# Converte a velocidade e força do referencial FRA para LSA
Vel_lin_LSA = R_bn.T @ Vel_lin_FRA
Vel_ang_LSA = T_theta_inv @ Vel_ang_FRA

```

```

TAU_FK_LSA = R_bn.T @ TAU_FK_FRA
TAU_DIFF_LSA = R_bn.T @ TAU_DIFF_FRA
TAU_RAD_LSA = R_bn.T @ TAU_RAD_FRA
TAU_REST_LSA = R_bn.T @ TAU_REST_FRA

```

```

# Armazena os resultados
u_LSA_LIS.append(Vel_lin_LSA[0])
v_LSA_LIS.append(Vel_lin_LSA[1])
w_LSA_LIS.append(Vel_lin_LSA[2])
p_LSA_LIS.append(Vel_ang_LSA[0])
q_LSA_LIS.append(Vel_ang_LSA[1])
r_LSA_LIS.append(Vel_ang_LSA[2])
X_FK_LSA_LIS.append(TAU_FK_LSA[0])
Y_FK_LSA_LIS.append(TAU_FK_LSA[1])
Z_FK_LSA_LIS.append(TAU_FK_LSA[2])
X_DIFF_LSA_LIS.append(TAU_DIFF_LSA[0])
Y_DIFF_LSA_LIS.append(TAU_DIFF_LSA[1])
Z_DIFF_LSA_LIS.append(TAU_DIFF_LSA[2])
X_RAD_LSA_LIS.append(TAU_RAD_LSA[0])
Y_RAD_LSA_LIS.append(TAU_RAD_LSA[1])
Z_RAD_LSA_LIS.append(TAU_RAD_LSA[2])
X_REST_LSA_LIS.append(TAU_REST_LSA[0])
Y_REST_LSA_LIS.append(TAU_REST_LSA[1])
Z_REST_LSA_LIS.append(TAU_REST_LSA[2])

```

```

# Converte as listas para arrays
u_LSA_LIS = np.array(u_LSA_LIS)
v_LSA_LIS = np.array(v_LSA_LIS)
w_LSA_LIS = np.array(w_LSA_LIS)
p_LSA_LIS = np.array(p_LSA_LIS)
q_LSA_LIS = np.array(q_LSA_LIS)
r_LSA_LIS = np.array(r_LSA_LIS)
X_FK_LSA_LIS = np.array(X_FK_LSA_LIS)
Y_FK_LSA_LIS = np.array(Y_FK_LSA_LIS)
Z_FK_LSA_LIS = np.array(Z_FK_LSA_LIS)
X_DIFF_LSA_LIS = np.array(X_DIFF_LSA_LIS)
Y_DIFF_LSA_LIS = np.array(Y_DIFF_LSA_LIS)
Z_DIFF_LSA_LIS = np.array(Z_DIFF_LSA_LIS)
X_RAD_LSA_LIS = np.array(X_RAD_LSA_LIS)
Y_RAD_LSA_LIS = np.array(Y_RAD_LSA_LIS)
Z_RAD_LSA_LIS = np.array(Z_RAD_LSA_LIS)
X_REST_LSA_LIS = np.array(X_REST_LSA_LIS)
Y_REST_LSA_LIS = np.array(Y_REST_LSA_LIS)
Z_REST_LSA_LIS = np.array(Z_REST_LSA_LIS)

```

```

def plotar_trajetoria_velocidades(directory, H, PERD):
    # Criar a figura com todos os plots
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 10))
    # 1) Trajetória no plano X-Y (Surge vs Sway)
    ax.plot(X_LIS, Y_LIS, label='Trajetória')

```

```

# axs[0, 0].set_title('Trajetória Desenvolvida pelo Navio')
ax.set_xlabel('X [m]')
ax.set_ylabel('Y [m]')
ax.legend()
ax.grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_trajetoria.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

```

```
def plotar_posicao():
```

```

    phi_LIS_deg = np.degrees(phi_LIS) # Roll
    theta_LIS_deg = np.degrees(theta_LIS) # Pitch
    psi_LIS_deg = np.degrees(psi_LIS) # Yaw
    # Criar a figura com todos os plots
    fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(10, 15))
    # 1) Série temporal da velocidade em surge
    axs[0, 0].plot(tempo, X_LIS, label='x')
    axs[0, 0].set_title('Posição Surge', fontsize=16)
    axs[0, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[0, 0].set_ylabel('(m)', fontsize=16)
    axs[0, 0].legend(fontsize=16)
    axs[0, 0].grid()

```

```

    # 3) Série temporal da velocidade em sway
    axs[1, 0].plot(tempo, Y_LIS, label='y')
    axs[1, 0].set_title('Posição Sway', fontsize=16)
    axs[1, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[1, 0].set_ylabel('(m)', fontsize=16)
    axs[1, 0].legend(fontsize=16)
    axs[1, 0].grid()

```

```

    # 3) Série temporal da velocidade em sway
    axs[2, 0].plot(tempo, Z_LIS, label='z')
    axs[2, 0].set_title('Posição Heave', fontsize=16)
    axs[2, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[2, 0].set_ylabel('(m)', fontsize=16)
    axs[2, 0].legend(fontsize=16)
    axs[2, 0].grid()

```

```

    # 4) Série temporal da velocidade em roll
    axs[0, 1].plot(tempo, phi_LIS_deg, label='φ')
    axs[0, 1].set_title('Ângulo de Roll', fontsize=16)
    axs[0, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[0, 1].set_ylabel('(°)', fontsize=16)
    axs[0, 1].legend(fontsize=16)
    axs[0, 1].grid()

```

```

    # 4) Série temporal da velocidade em yaw

```

```

axs[1, 1].plot(tempo, theta_LIS_deg, label='θ')
axs[1, 1].set_title('Ângulo de Pitch', fontsize=16)
axs[1, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[1, 1].set_ylabel('(°)', fontsize=16)
axs[1, 1].legend(fontsize=16)
axs[1, 1].grid()

```

```

# 4) Série temporal da velocidade em roll
axs[2, 1].plot(tempo, psi_LIS_deg, label='ψ')
axs[2, 1].set_title('Ângulo de Yaw', fontsize=16)
axs[2, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[2, 1].set_ylabel('(°)', fontsize=16)
axs[2, 1].legend(fontsize=16)
axs[2, 1].grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_posicao.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

```

```
def plotar_velocidades():
```

```

# Criar a figura com todos os plots
fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(10, 15))

```

```

# 1) Série temporal da velocidade em surge
axs[0, 0].plot(tempo, u_LSA_LIS, label='u')
axs[0, 0].set_title('Velocidade Surge', fontsize=16)
axs[0, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[0, 0].set_ylabel('(m/s)', fontsize=16)
axs[0, 0].legend(fontsize=16)
axs[0, 0].grid()

```

```

# 3) Série temporal da velocidade em sway
axs[1, 0].plot(tempo, v_LSA_LIS, label='v')
axs[1, 0].set_title('Velocidade Sway', fontsize=16)
axs[1, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[1, 0].set_ylabel('(m/s)', fontsize=16)
axs[1, 0].legend(fontsize=16)
axs[1, 0].grid()

```

```

# 3) Série temporal da velocidade em sway
axs[2, 0].plot(tempo, w_LSA_LIS, label='w')
axs[2, 0].set_title('Velocidade Heave', fontsize=16)
axs[2, 0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[2, 0].set_ylabel('(m/s)', fontsize=16)
axs[2, 0].legend(fontsize=16)
axs[2, 0].grid()

```

```

# 4) Série temporal da velocidade em roll

```

```

axs[0, 1].plot(tempo, p_LSA_LIS, label='p')
axs[0, 1].set_title('Velocidade Roll', fontsize=16)
axs[0, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[0, 1].set_ylabel('(rad/s)', fontsize=16)
axs[0, 1].legend(fontsize=16)
axs[0, 1].grid()

```

```

# 4) Série temporal da velocidade em yaw
axs[1, 1].plot(tempo, q_LSA_LIS, label='q')
axs[1, 1].set_title('Velocidade Pitch', fontsize=16)
axs[1, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[1, 1].set_ylabel('(rad/s)', fontsize=16)
axs[1, 1].legend(fontsize=16)
axs[1, 1].grid()

```

```

# 4) Série temporal da velocidade em roll
axs[2, 1].plot(tempo, r_LSA_LIS, label='r')
axs[2, 1].set_title('Velocidade Yaw', fontsize=16)
axs[2, 1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
axs[2, 1].set_ylabel('(rad/s)', fontsize=16)
axs[2, 1].legend(fontsize=16)
axs[2, 1].grid()
plt.tight_layout()

```

```

# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_velocidades.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

```

```

def plotar_elevacao_onda(directory, H, PERD, z_wave):
    # Criar a figura
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

    # Elevação da onda no CG
    ax.plot(z_wave[:, 0], z_wave[:, 3], label='ζ-CG')
    ax.set_title('Elevação da superfície da onda em relação ao CG', fontsize=16)
    ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    ax.set_ylabel('(m)', fontsize=16)
    ax.legend(fontsize=16)
    ax.grid()
    plt.tight_layout()
    # Salvar a figura com um nome apropriado
    fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_elevacao_onda.png'
    plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
    plt.close()

```

```

def plotar_velocidade_surge(directory, H, PERD, tempo, u_LSA_LIS):
    # Criar a figura
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    # Velocidade em surge

```

```

ax.plot(tempo, u_LSA_LIS, label='u', color='blue')
# Velocidade constante Vs
ax.axhline(y=9.77, color='red', linestyle='--', label='Vs = 9.77 m/s (19 Kt)')
ax.axhline(y=round(c_w, 2), color='green', linestyle='--', label=f'c =
{round(c_w, 2)} m/s')
# Configurações do gráfico
ax.set_title('Velocidade - Surge (u)', fontsize=16)
ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
ax.set_ylabel('(m/s)', fontsize=16)
ax.legend(fontsize=16)
ax.grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_velocidade_surge.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

def plotar_broaching(directory, H, PERD):
    # Criar a figura com todos os plots
    fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(10, 10))
    # 1) Elevação da onda no CG
    axs[0].plot(tempo, np.degrees(psi_LIS), label='Ψ')
    axs[0].set_title('Ângulo de Yaw', fontsize=16)
    axs[0].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[0].set_ylabel('(°)', fontsize=16)
    axs[0].legend(fontsize=16)
    axs[0].grid()
    # 2) Série temporal da velocidade em surge
    axs[1].plot(tempo, r_LSA_LIS, label='r')
    axs[1].set_title('Velocidade - Yaw (r)', fontsize=16)
    axs[1].set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    axs[1].set_ylabel('(rad/s)', fontsize=16)
    axs[1].legend(fontsize=16)
    axs[1].grid()
    plt.tight_layout()
    # Salvar a figura com um nome apropriado
    fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_broaching.png'
    plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
    plt.close()

def plotar_wave_surge_force(directory, H, PERD):
    # Força de surge da onda no referencial FRA
    wave_surge_force = X_FK_FRA_LIS + X_DIFF_FRA_LIS +
X_RAD_FRA_LIS + X_REST_FRA_LIS
    # Base do nome para encontrar o LSA_data correto
    base_name = os.path.splitext(filename)[0]
    lsa_file = os.path.join(directory, f'LSA_data_{base_name}.csv")
    if not os.path.exists(lsa_file):
        print(f'Arquivo {lsa_file} não encontrado. Pulando plotagem de forças para
este caso.")

```

```

    return
# Carregar dados do LSA
LSA = pd.read_csv(lsa_file)
tempo = LSA['Tempo']
Xprop_LSA = LSA['Xprop']
Xresist_LSA = LSA['Xresist']
# Chamar a função para obter os valores no instante desejado
# instante_desejado = 300 # Tempo em segundos
# obter_valores_no_tempo_completo(
#     tempo,
#     X_FK_FRA_LIS, X_DIFF_FRA_LIS, X_RAD_FRA_LIS,
X_REST_FRA_LIS,
#     tempo, Xprop_LSA, Xresist_LSA,
#     instante_desejado
# )
# Criar a figura com todos os plots
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
# 1) Elevação da onda no CG
ax.plot(tempo, wave_surge_force, label='Força Hidrodinâmica')
ax.plot(tempo, Xresist_LSA+Xprop_LSA, label='Xprop-Xresist')
ax.set_title('Forças na direção X', fontsize=16)
ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
ax.set_ylabel('(N)', fontsize=16)
ax.legend(fontsize=16)
ax.grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_surge_force.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

def plotar_leme(directory, H, PERD):
# Base do nome para encontrar o LSA_data correto
base_name = os.path.splitext(filename)[0]
leme_file = os.path.join(directory, f'leme_data_{base_name}.csv")
if not os.path.exists(leme_file):
    print(f"Arquivo {leme_file} não encontrado. Pulando plotagem de forças
para este caso.")
    return
# Carregar dados do LSA
LEME = pd.read_csv(leme_file)
tempo = LEME['Tempo']
hr_bb = LEME['hr_bb']
# Criar a figura com todos os plots
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
# 1) Elevação da onda no CG
ax.plot(tempo, hr_bb, label='Zr-w')
ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
ax.set_ylabel('(m)', fontsize=16)
ax.legend(fontsize=16)

```

```

ax.grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_leme_Zr-w.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

def plotar_area_leme(directory, H, PERD):
    # Base do nome para encontrar o LSA_data correto
    base_name = os.path.splitext(filename)[0]
    leme_file = os.path.join(directory, f'leme_data_{base_name}.csv')
    if not os.path.exists(leme_file):
        print(f"Arquivo {leme_file} não encontrado. Pulando plotagem de forças
para este caso.")
        return
    # Carregar dados do LSA
    LEME = pd.read_csv(leme_file)
    temposs = LEME['Tempo']
    hr_bb = LEME['A_R_corr_bb']
    # Criar a figura com todos os plots
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    # 1) Elevação da onda no CG
    ax.plot(temposs, hr_bb, label='AR')
    ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    ax.set_ylabel('(m²)', fontsize=16)
    ax.legend(fontsize=16)
    ax.grid()
    plt.tight_layout()
    # Salvar a figura com um nome apropriado
    fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_leme_area.png'
    plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
    plt.close()

def plotar_leme_force(directory, H, PERD):
    # Base do nome para encontrar o LSA_data correto
    base_name = os.path.splitext(filename)[0]
    lsa_file = os.path.join(directory, f'LSA_data_{base_name}.csv')
    leme_file = os.path.join(directory, f'leme_data_{base_name}.csv')
    if not os.path.exists(lsa_file):
        print(f"Arquivo {lsa_file} não encontrado. Pulando plotagem de forças para
este caso.")
        return
    # Carregar dados do LSA
    LSA = pd.read_csv(lsa_file)
    LEME = pd.read_csv(leme_file)
    temposs = LSA['Tempo']
    Y_man_LSA = LSA['Y_man']
    Y_leme_LSA = LSA['Y_leme']
    X_leme_LSA = LEME['X_leme']
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

```

```

# 1) Elevação da onda no CG
ax.plot(tempo, Y_man_LSA, label='Força de manobra Y')
ax.plot(tempo, Y_leme_LSA, label='Força do leme Y')
# ax.plot(tempo, X_leme_LSA, label='Força do leme X')
ax.set_title('Forças do leme e manobra', fontsize=16)
ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
ax.set_ylabel('(N)', fontsize=16)
ax.legend(fontsize=16)
ax.grid()
plt.tight_layout()
# Salvar a figura com um nome apropriado
fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_leme_force.png'
plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
plt.close()

def plotar_leme_momento(directory, H, PERD):
    # Base do nome para encontrar o LSA_data correto
    base_name = os.path.splitext(filename)[0]
    lsa_file = os.path.join(directory, f'LSA_data_{base_name}.csv')
    if not os.path.exists(lsa_file):
        print(f'Arquivo {lsa_file} não encontrado. Pulando plotagem de forças para
este caso.")
        return
    # Carregar dados do LSA
    LSA = pd.read_csv(lsa_file)
    tempo = LSA['Tempo']
    N_man_LSA = LSA['N_man']
    N_leme_LSA = LSA['N_leme']
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    # 1) Elevação da onda no CG
    ax.plot(tempo, N_man_LSA, label='Momento de manobra')
    ax.plot(tempo, N_leme_LSA, label='Momento do leme')
    ax.set_title('Momento no eixo Z', fontsize=16)
    ax.set_xlabel('(s)', fontsize=16)
    ax.set_ylabel('(N.m)', fontsize=16)
    ax.legend(fontsize=16)
    ax.grid()
    plt.tight_layout()
    # Salvar a figura com um nome apropriado
    fig_filename = f'H_{H}_T_{PERD}_leme_momento.png'
    plt.savefig(os.path.join(directory, fig_filename))
    plt.close()

# Chamar as funções de plotagem
plotar_trajetoria_velocidades(directory, H, PERD)
plotar_posicao()
plotar_velocidades()
plotar_elevacao_onda(directory, H, PERD, z_wave)
plotar_velocidade_surge(directory, H, PERD, tempo, u_LSA_LIS)
plotar_broaching(directory, H, PERD)

```

```
plotar_wave_surge_force(directory, H, PERD)
plotar_leme(directory, H, PERD)
plotar_area_leme(directory, H, PERD)
plotar_leme_force(directory, H, PERD)
plotar_leme_momento(directory, H, PERD)
```

```
# Chamar a função para processar todos os arquivos .LIS
processar_todos_lis(directory)
```

Apêndice E: Código do critério de vulnerabilidade de nível 2 da IMO

```
import math
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import ListedColormap
from numba import jit
from tqdm import tqdm

#####Particulars #####
pi = math.pi          # Pi constant
po = 1025             # Density of saltwater [kg/m³]
g = 9.807             # Gravity [m/s²]
Cb = 0.444           # Block coefficient
L = 55.08            # Ship length [m]
B = 9                # Ship breadth [m]
T = 2.57             # Ship draft [m]
m = 567980           # Ship mass [kg]
mx = 1.7057E+04      # Added mass of the ship in surge [kg]
Dp = 1.75            # Propeller diameter [m]
tp = 0.0934          # Approximate thrust deduction factor
                    # tp = 0.325*Cb - 0.1185*Dp/math.sqrt(B*T)
wp = 0.0345          # Approximate wake fraction

# DataFrame with the ship sections characteristics

import pandas as pd

ship = pd.DataFrame({
    "Xm": [-29.25, -28.125, -27, -25.875, -24.75, -23.625, -22.5, -21.375,
          -20.25, -19.125, -18, -16.875, -15.75, -14.625, -13.5, -12.375,
          -11.25, -10.125, -9, -7.875, -6.75, -5.625, -4.5, -3.375, -2.25,
          -1.125, 0, 1.125, 2.25, 3.375, 4.5, 5.625, 6.75, 7.875, 9, 10.125,
          11.25, 12.375, 13.5, 14.625, 15.75, 16.875, 18, 19.125, 20.25,
          21.375, 22.5, 23.625, 24.75],
    "dXm": [1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125,
            1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125,
            1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125,
            1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125, 1.125,
            1.125, 1.125, 1.125, 1.125],
    "T(Xm)": [0.389, 0.393, 0.478, 0.574, 0.681, 0.799, 0.929, 1.070, 1.221,
              1.381, 1.381, 1.707, 1.864, 2.012, 2.148, 2.267, 2.369, 2.451,
```

```

2.511, 2.548, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565,
2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565,
2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.565, 2.557,
2.557, 2.435, 2.044, 1.241],
"S(Xm)": [1.431, 1.440, 1.934, 2.495, 3.144, 3.891, 4.734, 5.674, 6.703,
7.810, 8.982, 10.195, 11.417, 12.608, 13.726, 14.741, 15.632,
16.386, 16.991, 17.453, 17.798, 17.961, 17.980, 17.891, 17.616,
17.203, 16.752, 16.283, 15.777, 15.225, 14.613, 13.957, 13.256,
12.525, 11.770, 11.021, 10.266, 9.477, 8.636, 7.806, 6.997,
6.196, 5.390, 4.494, 3.574, 2.749, 1.946, 1.134, 0.377]})

```

```
##### Environmental data #####
```

```

# Significant wave height [m]
Hs_values = np.arange(0.5, 17, 1)

```

```

# Zero crossing wave period [s]
Tz_values = np.arange(3.5, 19, 1)

```

```

# Wave scatter table W2(Hs,Tz)
wi_values=np.array([
[1.3,133.7,865.6,1186,634.2,186.3,36.9,5.6,0.7,0.1,0,0,0,0,0],
[0,29.3,986,4976,7738,5569.7,2375.7,703.5,160.7,30.5,5.1,0.8,0.1,0,0,0],
[0,2.2,197.5,2158.8,6230,7449.5,4860.4,2066,644.5,160.2,33.7,6.3,1.1,0.2,0,0],
[0,0.2,34.9,695.5,3226.5,5675,5099.1,2838,1114.1,337.7,84.3,18.2,3.5,0.6,0.1,0],
[0,0,6,196.1,1354.3,3288.5,3857.5,2685.5,1275.2,455.1,130.9,31.9,6.9,1.3,0.2,0],
[0,0,1,51,498.4,1602.9,2372.7,2008.3,1126,463.6,150.9,41.9,7.2,1.0,4,0.1],
[0,0,0,2,12.6,167,690.3,1257.9,1268.6,825.9,386.8,140.8,42.2,10.9,2.5,0.5,0.1],
[0,0,0,3,52.1,270.1,594.4,703.2,524.9,276.7,111.7,36.7,10.2,2.5,0.6,0.1],
[0,0,0,0,7,15.4,97.9,255.9,350.6,296.9,174.6,77.6,27.7,8.4,2.2,0.5,0.1],
[0,0,0,0,2,4.3,33.2,101.9,159.9,152.2,99.2,48.3,18.7,6.1,1.7,0.4,0.1],
[0,0,0,0,1,2,10.7,37.9,67.5,71.7,51.5,27.3,11.4,4,1.2,0.3,0.1],
[0,0,0,0,0,3,3.3,13.3,26.6,31.4,24.7,14.2,6.4,2.4,0.7,0.2,0.1],
[0,0,0,0,0,1,1,4.4,9.9,12.8,11,6.8,3.3,1.3,0.4,0.1,0],
[0,0,0,0,0,0,3,1.4,3.5,5,4.6,3.1,1.6,0.7,0.2,0.1,0],
[0,0,0,0,0,0,1,0.4,1.2,1.8,1.8,1.3,0.7,0.3,0.1,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,1,0.4,0.6,0.7,0.5,0.3,0.1,0.1,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,1,0.2,0.2,0.2,0.1,0.1,0,0,0]])

```

```
##### The calm water resistance curve R(u) #####
```

```

#Approximation coefficients for the calm water resistance
# r0, r1, r2, r3, r4, r5 = 1052.68, -857.36, 270.26, -40.74, 2.96, -0.0819
r0, r1, r2, r3, r4, r5 = 0, 28.37, -17.25, 3.69, -0.296, 0.00887

```

```

# Calm water resistance R(u)
@jit(nopython=True)
def R(u):
    return (r0 + r1*u + r2*u**2 + r3*u**3 + r4*u**4 + r5*u**5)*1000 / (1-tp)

```

```
##### Propellers thrust in calm water T(u,n) #####
```

```
#Coefficients for the approximated propeller thrust coefficient in calm water
```

```
K0, K1, K2, K3, K4 = 0.47773, -0.44164, -0.3866, 0.72396, -0.46766
```

```
# Propeller thrust Te(u,n)
```

```
@jit(nopython=True)
```

```
def Te(u,n):
```

```
    #Advance speed
```

```
    Va = u * (1 - wp)
```

```
    #Advance ratio
```

```
    J = Va / (n * Dp)
```

```
    #Propulsor thrust
```

```
    Te_u_n = 2*po*(n**2)*(Dp**4)*(K0+K1*J+K2*J**2+K3*J**3+K4*J**4)
```

```
    return Te_u_n
```

```
##### Critical propeller rotation (ncr) #####
```

```
# Function of the ncr equation
```

```
@jit(nopython=True)
```

```
def f_ncr(ncr, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5):
```

```
    return 2*pi*(Te(ci, ncr) - R(ci))/fij + 8*a0*ncr + 8*a1 - 4*pi*a2 \
        + (64/3)*a3 - 12*pi*a4 + (1024/15)*a5
```

```
# Derivada ncr
```

```
@jit(nopython=True)
```

```
def df_ncr(ncr, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5):
```

```
    delta = 1e-8 # Pequena diferença para derivada numérica
```

```
    return (f_ncr(ncr + delta, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5) -
            f_ncr(ncr - delta, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5)) / (2 * delta)
```

```
# Método de Newton-Raphson para ncr
```

```
def newton_raphson_ncr(f, df, x0, tol=1e-6, max_iter=100):
```

```
    x = x0
```

```
    for _ in range(max_iter):
```

```
        fx = f(x)
```

```
        dfx = df(x)
```

```
        if abs(fx) < tol:
```

```
            return x
```

```
        if abs(dfx) < 1e-10:
```

```
            raise ValueError("Derivada muito próxima de zero!")
```

```
        x = x - fx / dfx
```

```
    raise ValueError("Máximo de iterações atingido!")
```

```
##### Critical Froude (Fncr) #####
```

```

# Function of the ucr equation
@jit(nopython=True)
def f_ucr(ucr, ncr):
    return R(ucr) - Te(ucr, ncr)

@jit(nopython=True)
def df_ucr(ucr, ncr):
    delta = 1e-8 # Pequena diferença para derivada numérica
    return (f_ucr(ucr + delta, ncr) - f_ucr(ucr - delta, ncr)) / (2 * delta)

# Método de Newton-Raphson para ucr

def newton_raphson_ucr(f, df, x0, tol=1e-6, max_iter=100):
    x = x0
    for _ in range(max_iter):
        fx = f(x)
        dfx = df(x)
        if abs(fx) < tol:
            return x
        if abs(dfx) < 1e-10:
            raise ValueError("Derivada muito próxima de zero!")
        x = x - fx / dfx
    raise ValueError("Máximo de iterações atingido!")

##### Wave characteristics
#####

# Wavelength to ship length ratio
ds = 0.0012
sj_values = np.arange(0.0300, 0.1501, ds)

# Wave steepness
dr = 0.025
ri_values = np.arange(1.000, 3.001, dr)

# Function to calculate Statistical weight of the wave wij(ri, sj)
@jit(nopython=True)
def wij_eq(sj, ri, Hs, Tz):

    nu = 0.425
    T01 = 1.086 * Tz

    term1 = (4*math.sqrt(g)*L**(5/2)*T01*sj**2*ri**(3/2))/(pi*nu*Hs**3)
    term2 = ((math.sqrt(1 + nu**2)) / (1 + math.sqrt(1 + nu**2)))*dr*ds
    term3 = -2*(L*ri*sj/Hs)**2
    term4 = (1 + (1/nu**2) * (1-math.sqrt(g*T01**2 / (2*pi*ri*L))))**2

    wij = term1 * term2 * math.exp(term3 * term4)

    return wij

```

```
##### Lv 2 criterion for the surf-riding/broaching failure mode #####
```

```
crit_results = []  
C_vs_Fn = []  
C2ij_results = []  
C_results = []
```

```
# Varying Froude number  
# Fn_values = [0.38, 0.40, 0.42, 0.44, 0.46]  
Fn_values = np.arange(0.32, 0.53, 0.01)  
# Fn_values = [0.46]
```

```
for Fn in Fn_values:  
    Vs = Fn * math.sqrt(g * L) # Calculate ship speed for each Froude number  
    C_total = 0 # Reset C_total for each Froude number
```

```
    for Hs in Hs_values:
```

```
        for Tz in Tz_values:
```

```
            wij_C2ij = 0 # Reset wi*C2ij sum for each combination of Hs,Tz  
            C2ij_results_unique = []
```

```
            for ri in ri_values:
```

```
                for sj in sj_values:
```

```
                    "Wave characteristics"
```

```
                    # Wave height [m]  
                    Hij = sj * ri * L
```

```
                    # Wave length [m]  
                    Lwi = ri * L
```

```
                    # Wave number [1/m]  
                    ki = 2*pi / Lwi
```

```
                    # Wave celerity [m/s]  
                    ci = math.sqrt(g/ki)
```

```
                    "The amplitude of wave surging force - Strip theory"
```

```
                    # Froude-Krylov component of the wave surging force Fc and Fs / section  
                    Fc = ship['dXm'] * ship['S(Xm)'] * np.sin(ki * ship['Xm']) \  
                        * np.exp(-0.5 * ki * ship['T(Xm)'])
```

```
                    Fs = ship['dXm'] * ship['S(Xm)'] * np.cos(ki * ship['Xm']) \  
                        * np.exp(-0.5 * ki * ship['T(Xm)'])
```

```

# Amplitude of wave surging force

Fci = Fc.sum()
Fsi = Fs.sum()

fij = po * g * ki * Hij/2 * math.sqrt(Fci**2 + Fsi**2)

"The critical propulsor revolutions corresponding to the SR threshold"

T1 = K1 * (1-tp) * (1-wp) * po * Dp**3

T2 = K2 * (1-tp) * (1-wp)**2 * po * Dp**2

a0 = - T1 / math.sqrt(fij * ki * (m + mx))

a1 = (r1 + 2*r2*ci + 3*r3*ci**2 + 4*r4*ci**3 + 5*r5*ci**4 - 2*T2*ci) \
    / math.sqrt(fij * ki * (m + mx))

a2 = (r2 + 3*r3*ci + 6*r4*ci**2 + 10*r5*ci**3 - T2) / (ki * (m + mx))

a3 = ((r3 + 4*r4*ci + 10*r5*ci**2) / math.sqrt(ki**3 * (m + mx)**3)) \
    * math.sqrt(fij)

a4 = ((r4 + 5*r5*ci) / (ki**2 * (m + mx)**2)) * fij

a5 = (r5 / math.sqrt(ki**5 * (m + mx)**5)) * math.sqrt(fij**3)

# Newton-Raphson
ncr_initial_guess = 8.0
ucr_initial_guess = 8.0

try:
    ncr = newton_raphson_ncr(
        lambda n: f_ncr(n, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5),
        lambda n: df_ncr(n, fij, ci, a0, a1, a2, a3, a4, a5),
        ncr_initial_guess
    )

    ucr = newton_raphson_ucr(
        lambda u: f_ucr(u, ncr),
        lambda u: df_ucr(u, ncr),
        ucr_initial_guess
    )
except ValueError as e:
    print(f'Erro no cálculo de ncr ou ucr: {e}')

# Calculate the critical Froude number
Fncr = ucr / math.sqrt(g * L)

```

```

"C2ij coefficient"

if Fn <= Fnrcr:
    C2ij = 0
else:
    C2ij = 1

C2ij_results.append((ri, sj, C2ij, fij))
crit_results.append((ri, sj, ncr, ucr, Fnrcr))

C2ij_results_unique.append((ri, sj, C2ij))
# df_c2ij_unique = pd.DataFrame(C2ij_results_unique, columns=['ri', 'sj',
'C2ij'])

"Statistical weight of the wave wij(ri, sj)"

# Calculate wij
wij = wij_eq(sj, ri, Hs, Tz)

# Accumulate wij_C2ij for all ri,sj combinations
wij_C2ij += wij * C2ij

"Weighting factor of short-term sea state W2(Hs,Tz)"

# 2D grid (Hs,Tz)
Hs_grid, Tz_grid = np.meshgrid(Hs, Tz, indexing='xy')

# Dictionary for mapping combinations of Hs and Ts to W2
wi_dict = {}
for x in range(len(Hs_values)):
    for y in range(len(Tz_values)):
        wi_dict[(Hs_values[x], Tz_values[y])] = wi_values[x, y]

# Access the W2 value for the chosen combination
W2 = wi_dict[(Hs, Tz)] / 100000

"The value of C"

# Accumulate the total C value for all Hs,Tz,ri,sj combinations
C_total += W2 * wij_C2ij

C_results.append((Fn, Hs, Tz, ri, sj, W2, wij_C2ij, C_total))
C_vs_Fn.append((Fn, C_total))

##### Generate curves #####

"Plot C2ij results for current Froude number"

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5))
ri_list = [res[0] for res in C2ij_results]

```

```

sj_list = [res[1] for res in C2ij_results]
C2ij_colors = [res[2] for res in C2ij_results]
scatter = ax.scatter(ri_list, sj_list, c=C2ij_colors, cmap=ListedColormap(['blue',
'red']))
legend1 = ax.legend(*scatter.legend_elements(), title="C2ij")
ax.add_artist(legend1)
plt.xlabel('ri')
plt.ylabel('sj')
plt.title(f'Limite de ocorrência de Surf-Riding - Região segura Cij = 0 (Fn = {Fn:.3f})')
plt.grid(True)
plt.show()

```

"C_SR vs Fn"

```

Fn_list, C_list = zip(*C_vs_Fn)
plt.plot(Fn_list, C_list, color='blue', label='C')
plt.scatter(Fn_list, C_list, color='red')
plt.axhline(y=0.005, color='grey', linestyle='--', label='$R_{SR}=0.005$')
plt.xlabel('Froude (Fn)')
plt.ylabel('C')
plt.title('Índice C - Nível 2 de Surf-Riding')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

```

Apêndice F: Desenvolvimento da teoria linear de onda

A teoria linear de onda, também conhecida como teoria de Airy, se baseia nas premissas de um fluido ideal, ou seja, homogêneo, incompressível, invíscido e com escoamento irrotacional. Além disso, assume-se que o escoamento pode ser descrito por meio do potencial de velocidade ϕ , que representa o vetor de velocidade do fluido $V(x, y, z, t) = (u, v, w)$ no instante t e no ponto (x, y, z) no sistema de coordenadas FRA. A formulação da teoria de ondas apresentada a seguir é baseada na abordagem de JOURNEE ET AL (2001).

$$\vec{V} = \nabla\phi \equiv \vec{i}\frac{\partial\phi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\phi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (\text{E.1})$$

Como o escoamento é irrotacional, o vetor de vorticidade é nulo ($\nabla \times \vec{V} = \vec{0}$). Além disso, para um fluido incompressível, não há expansão volumétrica do fluido e a equação da continuidade é tal que $\nabla \cdot \vec{V} = 0$. Substituindo o vetor de velocidade V na equação da continuidade chega-se à equação de Laplace que rege os escoamentos potenciais:

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{E.2})$$

A determinação de um potencial de velocidade que seja solução da equação de Laplace e que atenda a algumas condições de contorno que serão apresentadas a seguir é a base da teoria potencial.

O perfil de uma onda simples de pequena inclinação é semelhante a uma função seno ou cosseno e o movimento de uma partícula fluida em uma onda varia conforme a profundidade. Segundo JOURNEE *et al.* (2001), o potencial de velocidade pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\phi_w(x, z, t) = P(z) \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (\text{E.3})$$

Em que $P(z)$ é uma função desconhecida até o momento. O potencial de velocidade das ondas harmônicas $\phi_w(x, z, t)$ é solução da equação de Laplace e deve

satisfazer as condições de contorno do domínio fluido na superfície livre e no fundo, assim como a condição de contorno na superfície do corpo.

Considerando a onda com largura infinita, as partículas fluidas se movem apenas no plano xz , isto quer dizer que:

$$v = \frac{\partial \phi_w}{\partial y} = 0 \quad e \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{E.4})$$

Levando isto em consideração, a substituição do potencial ϕ_w na equação de Laplace resulta em uma solução homogênea para a equação:

$$\frac{d^2 P(z)}{dz^2} - k^2 P(z) = 0 \quad (\text{E.5})$$

Com a solução para $P(z)$:

$$P(z) = C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz} \quad (\text{E.6})$$

Utilizando esse resultado, o potencial da onda agora pode ser expresso com dois coeficientes desconhecidos C_1 e C_2 :

$$\phi_w(x, z, t) = (C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz}) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.7})$$

Onde k é o número de onda.

- **Condição de impenetrabilidade do fundo do mar**

A condição de contorno de impenetrabilidade do fundo do mar é aplicada ao considerar que a velocidade da partícula fluido no leito é nula:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (\text{E.8})$$

Onde h é a profundidade em relação a superfície livre média. Substituindo o potencial ϕ_w nesta condição de contorno:

$$C_1 e^{-kh} = C_2 e^{+kh} \quad (\text{E.9})$$

Por definição:

$$C/2 = C_1 e^{-kh} = C_2 e^{+kh} \quad (\text{E.10})$$

Então as constantes C_1 e C_2 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$C_1 = \frac{C}{2} e^{+kh} \text{ e } C_2 = \frac{C}{2} e^{-kh} \quad (\text{E.11})$$

Substituindo C_1 e C_2 na expressão do potencial de onda:

$$\phi_w(x, z, t) = C \cdot \cosh k(h + z) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.12})$$

- **Condição de contorno dinâmica na superfície livre**

A condição de contorno dinâmica na superfície livre do mar impõe que a pressão p na superfície ($z = \zeta$), é igual à pressão atmosférica p_0 .

A equação de Bernoulli para um escoamento irrotacional, não viscoso e incompressível é dada pela expressão:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (\text{E.13})$$

No caso bidimensional e com ondas com pequena declividade, as velocidades u e w são pequenas. Então a equação de Bernoulli fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (\text{E.14})$$

Aplicando a equação de Bernoulli à superfície livre, onde $p = p_0$ e $z = \zeta$:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{p_0}{\rho} + g\zeta = C^* \quad (\text{E.15})$$

Sendo $p_0/\rho - C^*$ uma constante, ela pode ser incluída em $\partial \phi_w/\partial t$ e a equação acima se reduz a:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \text{ para } z = \zeta \quad (\text{E.16})$$

O potencial na superfície livre pode ser expandido em uma série de Taylor, considerando que o deslocamento vertical ζ é relativamente pequeno. Resultando na forma linearizada da condição de contorno dinâmica na superfície livre (JOURNEE *et al.*, 2001):

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \text{ para } z = 0 \quad (\text{E.17})$$

Com isso, a expressão para a elevação da superfície do mar se torna:

$$\zeta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \text{ para } z = 0 \quad (\text{E.18})$$

Substituindo o potencial da onda na expressão da condição de contorno dinâmica linearizada:

$$\zeta = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.19})$$

Sendo a amplitude da onda dada por:

$$\zeta_a = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \quad (\text{E.20})$$

A expressão de ζ pode ser escrita na forma:

$$\zeta = \zeta_a \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.21})$$

Combinando o resultado anterior com a expressão do potencial de onda, resulta o seguinte:

$$\phi_w = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.22})$$

Para águas profundas, o potencial da onda se torna:

$$\phi_w = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.23})$$

- **Condição de contorno cinemática da superfície livre**

A relação entre o período T e o comprimento de onda λ é derivada da condição de contorno cinemática da superfície livre, que estabelece a partícula fluida não abandona a superfície livre. Matematicamente, essa condição de contorno pode ser expressa da seguinte a partir da equação da superfície livre:

$$z = \zeta(x, t) \quad (\text{E.24})$$

A partir dela, é definida uma função tal que:

$$F(x, z, t) = \zeta(x, t) - z = 0 \quad (\text{E.25})$$

Assumindo que uma articulação fluida na superfície sempre permanecerá na superfície, significa dizer que $DF/Dt = 0$, ou seja:

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{DF}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla F = 0 \quad (\text{E.26})$$

Onde:

$$\vec{V} = \nabla \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (\text{E.27})$$

$$\nabla F = \left(-\frac{\partial \zeta}{\partial x}, 1 \right) \quad (\text{E.28})$$

$$\frac{DF}{\partial t} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (\text{E.29})$$

Substituindo em E.26:

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \cdot \left(-\frac{\partial \zeta}{\partial x}, 1 \right) = 0 \quad \text{para } z = \zeta(x, t) \quad (\text{E.30})$$

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (\text{E.31})$$

Desprezando os termos de segunda ordem:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{para } z = 0 \quad (\text{E.32})$$

De maneira análoga ao caso da condição de contorno dinâmica linearizada, a condição de contorno cinemática também é válida para $z = 0$. Derivando a equação da condição de contorno dinâmica da superfície livre no tempo:

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (\text{E.33})$$

Ou:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (\text{E.34})$$

Combinando as condições de contorno dinâmica e cinemática, resulta a condição de Cauchy-Poisson:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} = 0 \text{ para } z = 0 \quad (\text{E.35})$$

- **Relação de dispersão**

Com essas informações, é possível estabelecer a relação entre a frequência da onda ω e o número de onda k substituindo a expressão do potencial de onda na expressão da condição de contorno cinemática, obtendo a relação de dispersão para uma profundidade h :

$$\omega^2 = kg \cdot \tanh kh \quad (\text{E.36})$$

Para águas profundas ($h \rightarrow \infty$), $\tanh kh = 1$, e a relação de dispersão se reduz a:

$$\omega^2 = kg \quad (\text{E.37})$$

A relação entre o comprimento e o período de onda para águas profundas vem através da substituição do número de onda na relação de dispersão:

$$\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}, \omega = \frac{2\pi}{T}, \omega^2 = kg \right) \rightarrow \lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{E.38})$$

- **Velocidade de fase**

A velocidade de fase ($c = \lambda/T$) também é obtida a partir da relação de dispersão:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (\text{E.39})$$

Para águas profundas:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi}} \quad (\text{E.40})$$

- **Cinemática da partícula fluida**

A análise da cinemática da partícula fluida é feita a partir das componentes de velocidade nas direções x e z , derivadas do potencial de velocidade apresentado na e da

relação de dispersão. As componentes da velocidade, em sua forma mais geral, podem ser descritas pelas equações:

$$u = \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} = \frac{dx}{dt} = \zeta_a \cdot \frac{kg}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.41})$$

$$w = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = \frac{dz}{dt} = \zeta_a \cdot \frac{kg}{\omega} \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.42})$$

Substituindo a relação de dispersão nas equações acima:

$$u = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.43})$$

$$w = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\sin kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (\text{E.44})$$

- **Pressão da onda incidente**

A pressão p é obtida a partir da equação de Bernoulli linearizada, expressa como:

$$\frac{\partial \phi_w}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad \text{ou} \quad p = -\rho gz - \rho \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \quad (\text{E.45})$$

Substituindo o potencial de velocidade, a expressão para a pressão linearizada torna-se:

$$p = -\rho gz + \rho g \zeta_a \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.46})$$

Quando se considera águas profundas, a pressão linearizada da onda incidente é dada por:

$$p = -\rho gz + \rho g \zeta_a \cdot e^{kz} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (\text{E.47})$$

O primeiro termo da equação acima representa a pressão hidrostática. O segundo termo implica, no navio, as forças de onda de primeira ordem e sua contribuição média ao longo do tempo é nula.

Apêndice G: Desenvolvimento das forças hidrodinâmicas

A dedução das equações das forças hidrodinâmicas agindo no corpo serão feitas de acordo com JOURNEE *et al.* (2001).

- **Potencial de perturbação**

O potencial de perturbação Φ é composto pela soma de três componentes: uma relacionada ao potencial de radiação associado ao movimento oscilatório do corpo em água parada (Φ_{rad}); um referente ao potencial da onda incidente não perturbada (Φ_w), ou potencial de Froude-Krylov, conforme visto na equação E.23, e outra associada ao potencial de difração das ondas ao redor de um corpo mantido em posição fixa (Φ_{dif}).

$$\Phi = \Phi_w + \Phi_{dif} + \Phi_{rad} \quad (F.1)$$

Assim como para o potencial da onda incidente, cada um desses potenciais tem que atender a algumas condições de contorno. Os primeiros quatro requisitos são os mesmos descritos no Apêndice F. No entanto, há condições de contorno adicionais associadas ao corpo flutuante que agora está presente, e essas serão discutidas detalhadamente.

- 1) Condição de continuidade ou equação de Laplace

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (F.2)$$

- 2) Condição de impenetrabilidade do fundo do mar

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -h \quad (F.3)$$

- 3) Condição de contorno na superfície livre

Para a condição de contorno dinâmica na superfície livre, foi encontrada a seguinte expressão:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (F.4)$$

A velocidade vertical da partícula fluida em $z = 0$ é obtida a partir da condição de contorno cinemática na superfície livre:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{para } z = 0 \quad (\text{F.5})$$

Ao combinar as equações acima, obtemos:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (\text{F.6})$$

4) Condição de contorno cinemática na superfície livre do corpo oscilando

A condição de contorno cinemática na superfície do corpo rígido estabelece que a componente normal da velocidade de uma partícula fluida em um ponto $P(x, y, z)$ na superfície do corpo deve ser igual à componente normal da velocidade do ponto correspondente na superfície do corpo rígido.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_n(x, y, z, t) \quad (\text{F.7})$$

Onde $\partial \Phi / \partial n$ é a derivada do potencial de velocidades na direção normal à superfície do corpo e v_n é a componente normal da velocidade no ponto P.

Para simplificar o problema, assume-se que a solução do potencial será linearizada. Assim, a velocidade normal pode ser expressa como uma soma de velocidades oscilatórias generalizadas:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_n(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^6 v_j \cdot f_j(x, y, z) \quad (\text{F.8})$$

Onda $f_j(x, y, z)$ são as funções de direção generalizadas associadas às diferentes formas de oscilação do corpo.

5) Condição de radiação

A condição de radiação descreve que as ondas geradas devido aos movimentos do corpo flutuante devem irradiar para o infinito.

$$\Phi \propto e^{\pm ikx} \quad (\text{F.9})$$

7) Condição de simetria

A condição de simetria ou antissimetria aproveita a simetria típica de navios em relação ao seu plano diametral. Isso simplifica as equações do potencial de velocidade para diferentes modos de oscilação. A condição é descrita como:

$$\begin{aligned}\Phi_2(-x, y) &= -\Phi_2(+x, y) \quad \text{para sway} \\ \Phi_3(-x, y) &= -\Phi_3(+x, y) \quad \text{para heave} \\ \Phi_4(-x, y) &= -\Phi_4(+x, y) \quad \text{para roll}\end{aligned}\tag{F.10}$$

Essa condição implica que, para os movimentos de sway e roll, as velocidades horizontais da água ($\partial\Phi/\partial x$) em bordos opostos do corpo têm direções opostas, tornando os movimentos antissimétricos. Para o movimento de heave, implica que as velocidades verticais ($\partial\Phi/\partial y$) em bordos opostos do corpo têm a mesma direção, tornando o movimento simétrico.

- **Forças e momentos**

A força \vec{F} e o momento \vec{M} hidrodinâmicos é calculada integrando a pressão total exercida pelo fluido (p) na superfície molhada instantânea (S) do casco e pode ser expressa como:

$$\vec{F} = - \iint_S (p \cdot \vec{n}) \cdot dS\tag{F.11}$$

$$\vec{M} = - \iint_S p \cdot (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS\tag{F.12}$$

Onde \vec{n} é o vetor unitário normal a superfície do corpo e \vec{r} é o vetor de posição da superfície dS no referencial hidrodinâmico. A pressão total é obtida pela equação de Bernoulli, expressa por:

$$\rho \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla\Phi|^2 + gz \right) + p = C(t)\tag{F.13}$$

Como o navio se desloca com velocidade U , o potencial total de velocidades linear do fluido (Φ_T) é a soma da parte correspondente ao escoamento uniforme $U \cdot x$ e outra devido ao potencial de perturbação Φ .

$$\Phi_T = -Ux + \Phi\tag{F.14}$$

Substituindo Φ_T na equação de Bernoulli:

$$\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(U^2 - 2U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + |\nabla \Phi|^2 \right) + gz \right) + p = C(t) \quad (\text{F.15})$$

A pressão de referência ao longo (no infinito) é usada para determinar a constante $C(t)$, que representa a energia total do escoamento uniforme distante. Nesse caso, $C(t) = 1/2 \cdot \rho \cdot U^2$, uma constante que simplifica a formulação da equação de Bernoulli para o problema hidrodinâmico próximo ao navio:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} - U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 + gz \right) \quad (\text{F.16})$$

Desprezando a não linearidade $|\nabla \phi|^2$ na equação de Bernoulli a pressão se reduz a:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} - U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + gz \right) \quad (\text{F.17})$$

Substituindo os potenciais de perturbação na pressão p obtida pela equação de Bernoulli, e posteriormente nas equações de forças e momentos hidrodinâmicos:

$$\vec{F} = \rho \iint_S \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{dif}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial t} - U \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{dif}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial x} \right) + gz \right) \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (\text{F.18})$$

$$\vec{M} = \rho \iint_S \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{dif}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial t} - U \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{dif}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial x} \right) + gz \right) \cdot (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS \quad (\text{F.19})$$

As expressões acima contemplam as forças hidrodinâmicas e hidrostáticas que agem no navio, incluindo as parcelas de difração, Froude-Krylov e de radiação.

- **Forças de Froude-Krylov**

O potencial da onda incidente da equação E.23 é dependente do espaço e do tempo. Porém, pode ser escrito em termos somente do espaço ao ser multiplicado por $e^{-i\omega_e t}$.

$$\phi_w(x, y, z, t) = \phi_w(x, y, z) \cdot e^{-i\omega_e t} \quad (\text{F.20})$$

Substituindo o potencial da onda incidente nas expressões F.18 e F.19, as parcelas de força \vec{F}_{FK} e momento \vec{M}_{FK} de Froude-Krylov são então expressas como:

$$\vec{F}_{FK} = -\rho \iint_S \vec{n} \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_w \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (\text{F.21})$$

$$\vec{M}_{FK} = \rho \iint_S (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_w \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (\text{F.22})$$

- **Forças de radiação**

O potencial de radiação Φ_{rad} , associado a oscilações em águas calmas, pode ser expresso como a soma das contribuições individuais dos potenciais ϕ_j referentes aos seis graus de liberdade do navio:

$$\Phi_{rad}(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^6 \Phi_j(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^6 \phi_j(x, y, z) \cdot v_j(t) \quad (\text{F.23})$$

A dependência espacial e temporal do potencial de radiação é separada, de forma que $\phi_j(x, y, z)$ representa a parte espacial do potencial na direção j , $v_j(t)$ corresponde à velocidade oscilatória nessa mesma direção.

Isso permite reescrever a condição de contorno cinemática na superfície do corpo da seguinte forma:

$$\frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n} \sum_{j=1}^6 \Phi_j = \sum_{j=1}^6 \left\{ \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \cdot v_j \right\} \quad (\text{F.24})$$

Onda $f_j(x, y, z)$ são as funções de direção generalizadas associadas às diferentes formas de oscilação do corpo.

$$f_j = \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \quad (\text{F.25})$$

A partir dessa definição, a força de radiação pode ser escrita como:

$$\vec{F}_r = \rho \iint_S \left(\frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial t} \right) \vec{n} \cdot dS = \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) \vec{n} \cdot dS \quad (\text{F.26})$$

Analogamente, para os momentos hidrodinâmicos:

$$\vec{M}_r = \rho \iint_S \left(\frac{\partial \Phi_{rad}}{\partial t} \right) (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS = \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS \quad (F.27)$$

Seguindo essa definição, as forças e momentos de radiação podem ser expressos pelos vetores:

$$\vec{F}_{rad} = (F_{rad1}, F_{rad2}, F_{rad3}) \text{ and } \vec{M}_r = (F_{rad4}, F_{rad5}, F_{rad6}) \quad (F.28)$$

Onde:

$$F_{rad_k} = \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) f_k \cdot dS = \rho \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \phi_j v_j \right) \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \cdot dS \quad k = 1, \dots, 6 \quad (F.29)$$

Como ϕ_j e ϕ_k não dependem do tempo, a equação se simplifica para:

$$F_{rad_k} = \sum_{j=1}^6 F_{rad_{kj}}, \quad k = 1, \dots, 6 \quad (F.30)$$

Com:

$$F_{rad_{kj}} = \frac{dv_j}{dt} \rho \iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \cdot dS \quad (F.31)$$

Essa expressão representa a força de radiação $F_{rad_{kj}}$ na direção k , gerada por uma oscilação forçada do corpo na direção j , é válida para qualquer combinação de j e k . Ela expressa as componentes de força e momento em termos de potenciais ainda desconhecidos ϕ_j .

Agora, consideremos um movimento oscilatório definido em notação complexa como:

$$s_j = s_{a_j} e^{-i\omega t} \quad (F.32)$$

Assim, a velocidade e aceleração associadas a esse movimento são dadas por:

$$\begin{aligned} \dot{s}_j &= v_j = -i\omega s_{a_j} e^{-i\omega t} \\ \ddot{s}_j &= \frac{dv_j}{dt} = -\omega^2 s_{a_j} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (F.33)$$

As forças e momentos hidrodinâmicos de radiação podem então ser decompostos em componentes em fase com a aceleração e com a velocidade do corpo:

$$F_{rad_{kj}} = -A_{kj}\ddot{\xi}_j - B_{kj}\dot{\xi}_j \quad (F.34)$$

Assim, para um corpo oscilando na direção j com um potencial de velocidade ϕ_j , os coeficientes de massa adicional A_{kj} e amortecimento potencial B_{kj} são definidos como:

$$A_{kj} = -\Re e \left\{ \rho \iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \cdot dS \right\} \text{ e } B_{kj} = -\Im m \left\{ \rho \omega \iint_S \phi_j \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \cdot dS \right\} \quad (F.35)$$

De maneira similar, se a oscilação ocorre na direção k com um potencial ϕ_k , os coeficientes são expressos como:

$$A_{jk} = -\Re e \left\{ \rho \iint_S \phi_k \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \cdot dS \right\} \text{ e } B_{jk} = -\Im m \left\{ \rho \omega \iint_S \phi_k \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \cdot dS \right\} \quad (F.36)$$

Essas equações descrevem de forma geral a relação entre os potenciais de radiação e os coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional e amortecimento, fundamentais para a análise de cargas hidrodinâmicas em corpos oscilantes.

- **Forças de difração**

A força \vec{F}_{DF} e momento \vec{M}_{DF} de difração calculados de maneira análoga às forças de Froude-Krylov, porém, considerando o potencial da onda difratada.

$$\vec{F}_{DF} = -\rho \iint_S \vec{n} \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_{dif} \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (F.37)$$

$$\vec{M}_{DF} = -\rho \iint_S (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot \left(i\omega_e + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \phi_{dif} \cdot e^{-i\omega_e t} \cdot dS \quad (F.38)$$

- **Forças de restauração hidrostática**

Já a força \vec{F}_H e momento \vec{M}_H de restauração hidrostática são dados pela integral da pressão hidrostática na superfície molhada instantânea do casco.

$$\vec{F}_H = \rho g \iint_S z \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (F.39)$$

$$\vec{M}_H = \rho g \iint_S z \cdot (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS \quad (F.40)$$

Apêndice H: Escoamento incidente no leme

H.1. Influência do propulsor

O leme do navio opera na esteira do propulsor. Como consequência, as forças desenvolvidas pelo leme são substancialmente maiores do que as que seriam geradas se o leme não estivesse nesta posição. Isto ocorre porque, além da velocidade do escoamento ser maior, a esteira do propulsor altera o ângulo de ataque do escoamento no leme para valores entre 10 e 15° (com sinais opostos abaixo e acima do eixo do propulsor) quando o leme está a 0°, BERTRAM (2000).

De acordo com a teoria de momentum do propulsor, a velocidade do escoamento no sentido longitudinal muito a jusante do propulsor é dada por SÖDING (1982):

$$V_{\infty} = V_A \sqrt{1 + C_T} \quad (3.45)$$

O termo V_A é a velocidade de avanço do propulsor e C_T é o coeficiente de carregamento de empuxo, dado por:

$$V_A = u(1 - w) \quad (3.46)$$

$$C_T = \frac{T}{1/2 \rho V_A^2 \pi (D^2/4)} = \frac{8 K_T}{\pi J^2} \quad (3.47)$$

O raio teórico da esteira r_{∞} , bem a jusante do propulsor, decorre da lei da continuidade, assumindo que a velocidade axial média no propulsor é a média entre V_{∞} e V_A :

$$r_{\infty} = r_0 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_A}{V_{\infty}} \right)} \quad (3.48)$$

Onde r_0 é o raio do propulsor. A pequena distância x entre o propulsor e o leme resulta em uma esteira com raio menor do que r_{∞} e, conseqüentemente, um menor valor da velocidade axial V_x na posição do leme. Estes parâmetros são aproximados por SÖDING (1982) pelas seguintes expressões:

$$r = r_0 \frac{0.14 \left(\frac{r_\infty}{r_0}\right)^3 + \left(\frac{r_\infty}{r_0}\right) \left(\frac{x}{r_0}\right)^{1.5}}{0.14 \left(\frac{r_\infty}{r_0}\right)^3 + \left(\frac{x}{r_0}\right)^{1.5}} \quad (3.49)$$

$$V_x = V_\infty \left(\frac{r_\infty}{r}\right)^2 \quad (3.50)$$

As equações acima são aproximações baseadas na teoria potencial. Devido ao escoamento turbulento, o raio da esteira é corrigido por SÖDING (1986) acrescentando a r um valor Δr :

$$\Delta r = 0.15x \frac{V_x - V_A}{V_x + V_A} \quad (3.51)$$

Da mesma maneira, a correção da velocidade longitudinal do escoamento na esteira é:

$$V_{\text{corr}} = (V_x - V_A) \left(\frac{r}{r + \Delta r}\right)^2 + V_A \quad (3.52)$$

O raio limitado da esteira do propulsor tem um efeito de diminuir a sustentação do leme em comparação com a velocidade de um escoamento uniforme. Esse efeito é aproximado por SÖDING (1982) com base em cálculos de escoamento potencial bidimensional para pequenos ângulos de ataque, multiplicando a sustentação do leme pelo fator de correção λ_{LEME} :

$$\lambda_{LEME} = \left(\frac{V_A}{V_{\text{corr}}}\right)^f \quad (3.53)$$

Onde:

$$f = 2 \left(\frac{2}{2 + \frac{d}{c}}\right)^8 \quad (3.54)$$

$$d = \sqrt{\frac{\pi}{4}} (r + \Delta r) \quad (3.55)$$

H.2. Influência do casco

A esteira do casco reduz a velocidade do escoamento na entrada do leme e aumenta a carga no propulsor. A diferença na esteira e na carga do propulsor entre o

modelo e o navio é a principal causa dos efeitos de escala em experimentos de manobra de modelos. Enquanto a esteira devido à fricção é semelhante tanto no leme quanto no propulsor, a esteira calculada pela teoria potencial é praticamente nula no leme, mas tipicamente representa de 10% a 25% da velocidade do navio no propulsor, (BERTRAM, 2000). Isso corresponde quase ao fator de redução de empuxo t . Assim, o escoamento fora da esteira do propulsor é acelerado entre o propulsor e o leme por cerca de $t \cdot V$. Isso provoca uma queda de pressão que também acelera a esteira do propulsor para aproximadamente:

$$V_x = \frac{V_{\text{corr}}^2 + tV^2}{V_{\text{corr}}} \quad (3.56)$$

A contração da esteira é dada por:

$$r_x = (r + \Delta r) \sqrt{\frac{V_{\text{corr}}}{V_x}} \quad (3.57)$$

Para um ângulo de leme não nulo e velocidade de avanço positiva, ocorre uma interação entre o fluxo em torno do leme e do casco, o que diminui a força de sustentação no leme. No entanto, uma força transversal adicional de mesma direção é gerada na popa. Comparado à força de sustentação do leme sem interação com o casco, a força transversal total é aumentada pelo fator $(1 + a_H)$, onde a_H é aproximado por SÖDING (1982):

$$a_H = \frac{1}{1 + (4.9 \cdot e/T + 3 \cdot c/T)^2} \quad (3.58)$$

Onde T é o calado do navio, e é a distância média entre a borda frontal do leme e a extremidade traseira do casco, e c o comprimento médio da corda do leme. O centro de atuação da força transversal total é deslocado para a proa por aproximadamente:

$$\Delta x = \frac{0.3T}{e/T + 0.46} \quad (3.59)$$

H.3. Escoamento no leme

O vetor de velocidade longitudinal na entrada do leme é obtido a partir da velocidade de avanço do propulsor e depois aplicando as correções devido a influência do casco e do propulsor de acordo com Soding (1982). Isto resulta em:

$$V_x = V_{\text{corr}} \quad (3.60)$$

Desconsiderando a influência do casco e do propulsor, o vetor de velocidade transversal na entrada do leme é:

$$V_y = -(v + r \cdot x_R) \quad (3.61)$$

Onde x_R é o vetor de localização do leme em relação a origem do sistema de referência solidário ao navio, neste caso o centro de gravidade. Entretanto, os experimentos de KOSE (1982) indicaram uma velocidade transversal média na posição do leme de somente:

$$V_y = -(0,36 \cdot v + 0,66 \cdot r \cdot x_R) \quad (3.62)$$

O vetor de velocidade resultante no leme é:

$$V_R = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3.63)$$

Apêndice I: Resultados adicionais das simulações numéricas em águas calmas

- **Manobras de zig-zag**

A análise dos resultados da manobra com leme variando entre $20^\circ/-20^\circ$ é apresentada na Figura 66, onde as curvas cheias são do modelo numérico e as pontilhadas do experimento (MARINHA DO BRASIL, 2016a).

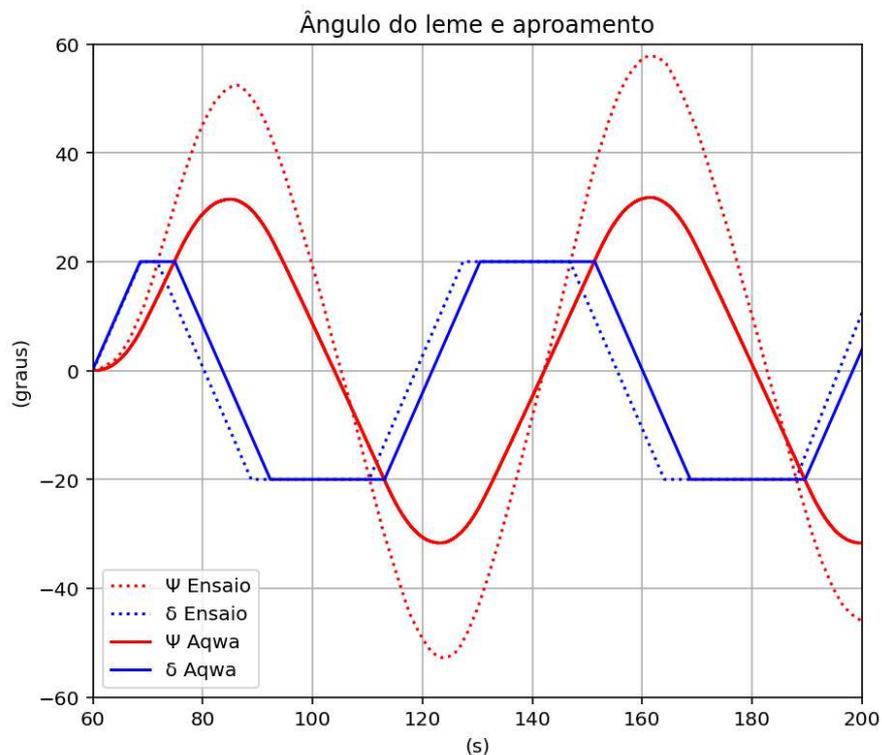


Figura 66 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a $-20^\circ/20^\circ$ começando.

A Figura 67 e a Figura 68 apresentam as séries temporais das previsões dos ângulos e velocidades durante a manobra de zig-zag. Embora não haja dados experimentais para uma comparação quantitativa, observa-se que qualitativamente os resultados numéricos estão dentro do esperado, i.e., ângulos de deriva e de roll, assim como as velocidades de surge, sway, yaw e roll, acompanham as mudanças do leme durante a manobra.

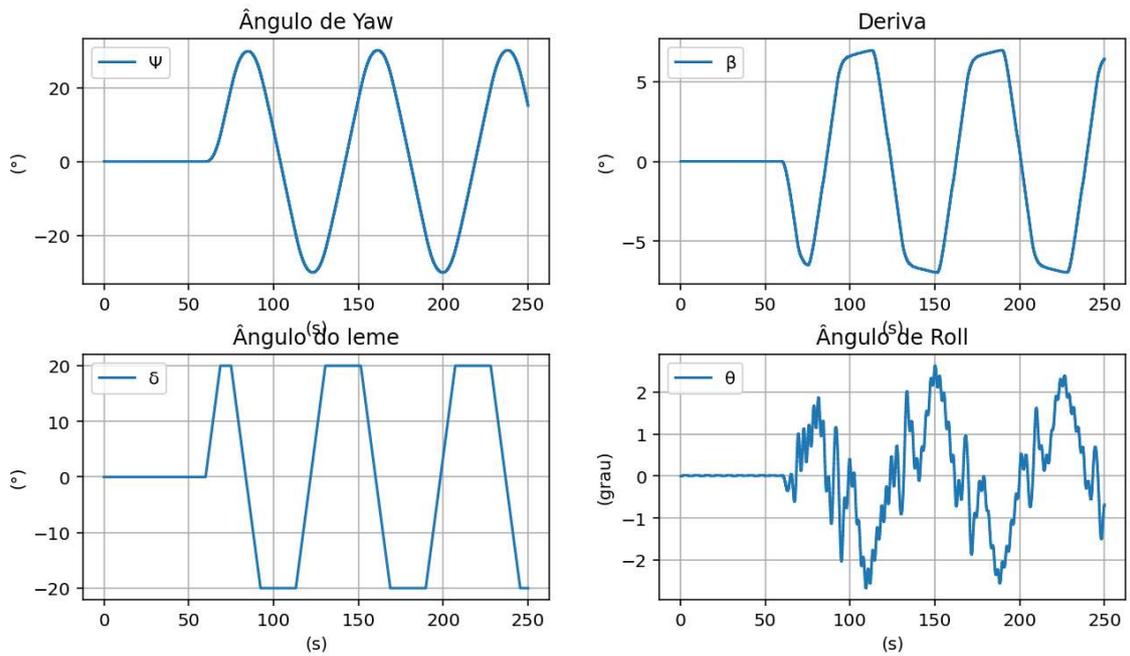


Figura 67 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt e leme entre 20°/-20°. Séries temporais dos ângulos de yaw, deriva, leme e roll.

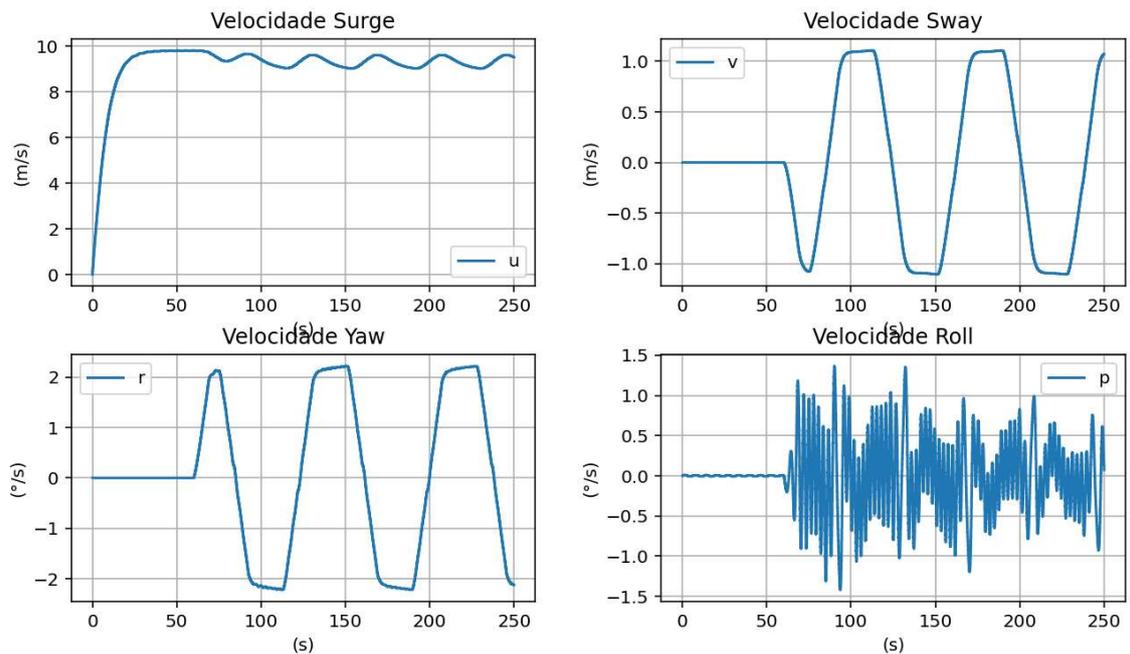


Figura 68 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt e leme entre -20°/20°. Séries temporais das velocidades de surge, sway, yaw e roll.

A Figura 69 apresenta as series temporais das forças de propulsão, resistência, do leme e de manobra (ver equação 3.24). Os valores apresentados também mostram correlação com os movimentos do navio, evidenciando a influência da interação entre as forças do leme e de manobra.

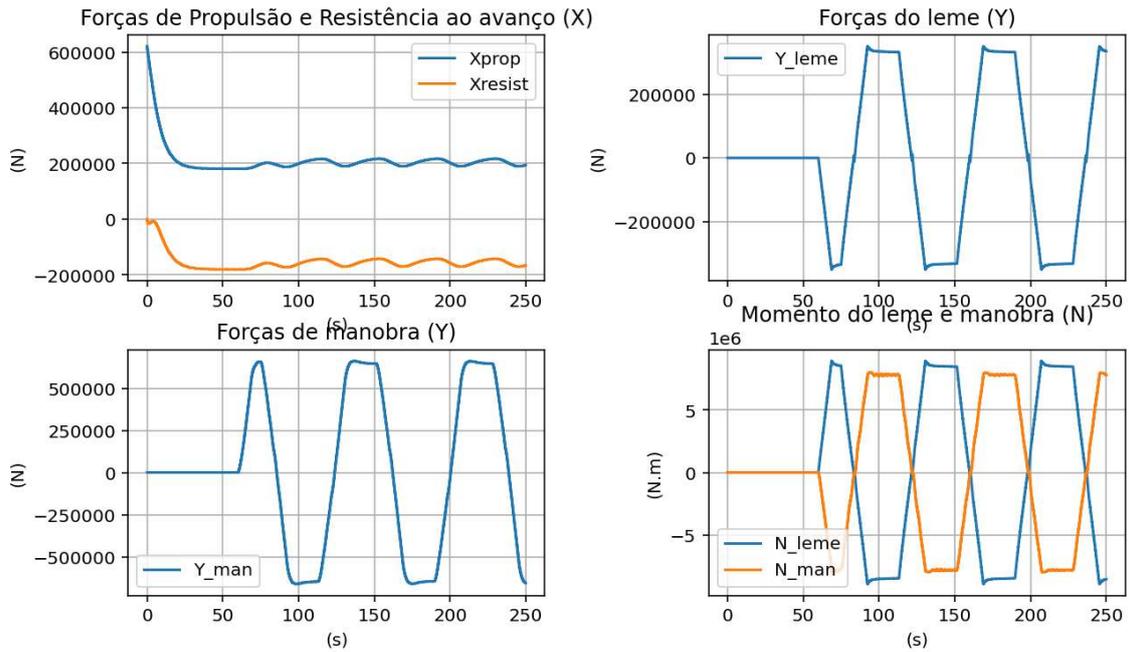


Figura 69 – Curva de zig-zag com velocidade de 19kt, iniciando por boreste e leme entre $-20^{\circ}/-20^{\circ}$. Séries temporais das forças e momentos.

Também foram realizadas manobras com o leme variando entre $10^{\circ}/-10^{\circ}$. Os resultados são apresentados na Figura 70.

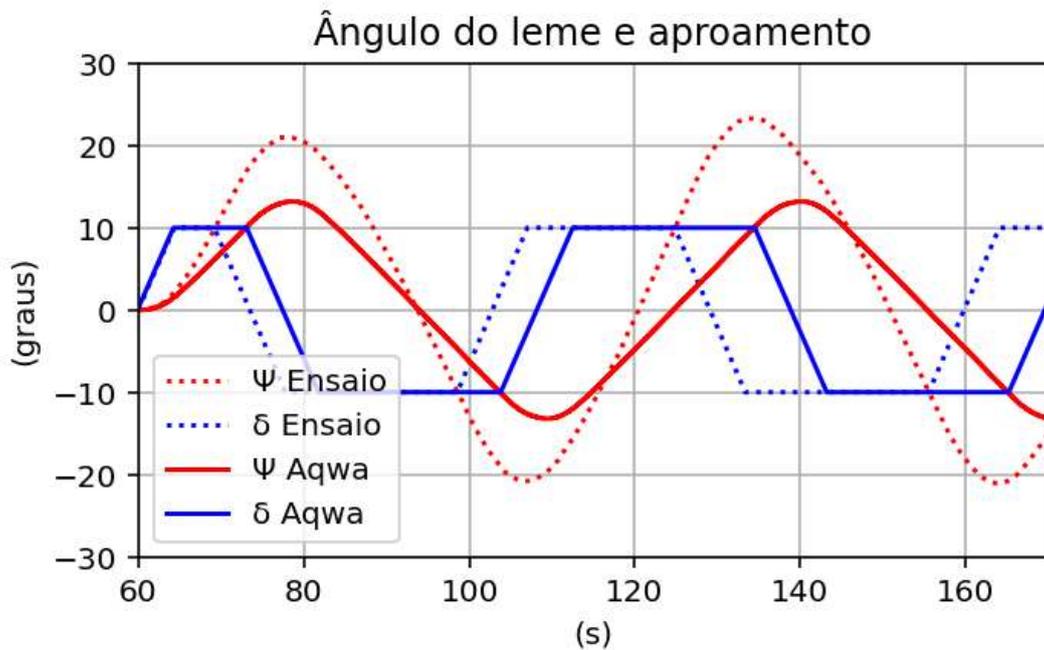


Figura 70 – Manobra de zig-zag com velocidade de 19kt e leme a $10^{\circ}/-10^{\circ}$ começando por bombordo.

- **Manobra de espiral**

A manobra de espiral direta, ou manobra de espiral de Dieudonné, é um teste utilizado para avaliar a estabilidade direcional de uma embarcação. Durante este ensaio, o navio inicialmente atinge uma velocidade constante, com o propulsor em rotação fixa. O leme é então acionado em uma sequência de ângulos predefinidos, variando de -25° a 25° , com incrementos de 5° enquanto se aguarda a estabilização da velocidade de yaw para cada ângulo de leme. Após a estabilização, a velocidade de guinada correspondente a cada ângulo de leme é registrada e plotada.

Esse procedimento visa observar o comportamento do navio em resposta ao leme, permitindo a análise de sua estabilidade direcional. Se a curva resultante apresentar um comportamento linear próximo à origem, o navio é classificado como direcionalmente estável. Por outro lado, se a curva mostrar histerese (variação não linear ou laços na resposta), indica instabilidade direcional.

Na Figura 71, observa-se que os resultados numéricos e experimentais (MARINHA DO BRASIL, 2016a) apresentam padrões coerentes e indicam que o navio é direccionalmente estável.

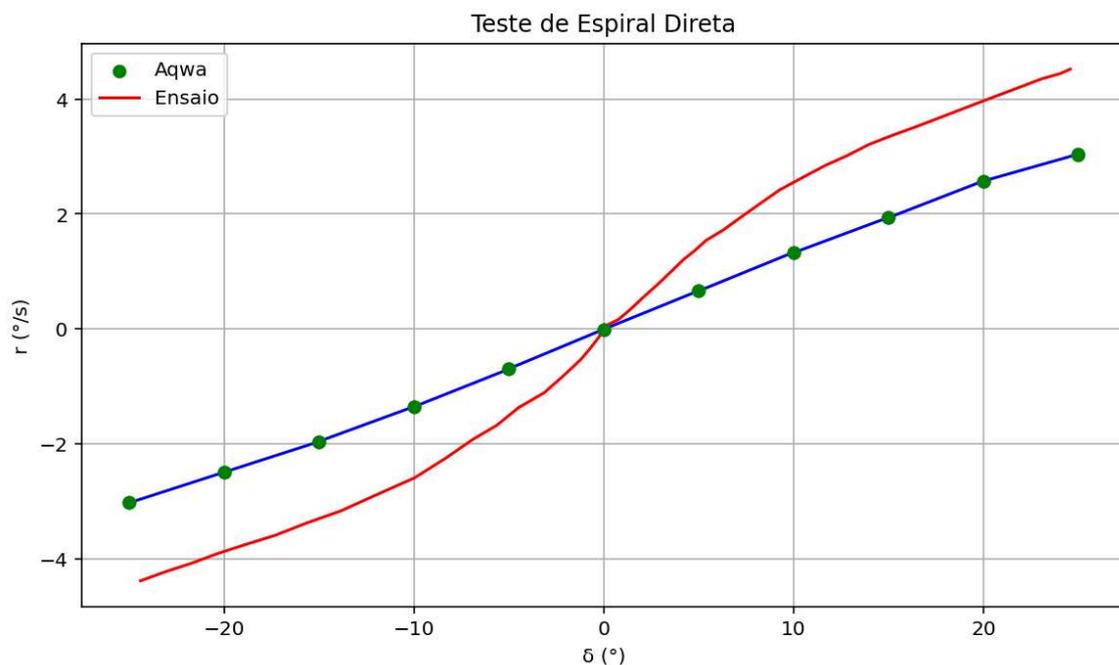


Figura 71 – Manobra de espiral direta com velocidade de 19kt. Leme variando entre $25^\circ/-25^\circ$ com incremento de 5° .