

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

JEFFERSON FLOR

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DESENHO
DE CASCO A PARTIR DE TABELA DE COTAS E CÁLCULO DO RAO DE HEAVE**

Joinville

2017

JEFFERSON FLOR

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DESENHO DE CASCO A PARTIR DE TABELA DE COTAS E CÁLCULO DO RAO DE HEAVE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Phd. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2017

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DESENHO DE CASCO A PARTIR DE TABELA DE COTAS E CÁLCULO DO RAO DE HEAVE

JEFFERSON FLOR

Esta monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Phd. Eng.

Presidente

Prof. André Luís Condino Fugarra, Phd. Eng.

Membro

Prof. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade, Phd. Eng.

Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Roseli e Nilton Flor, por serem meus exemplos e por se dedicarem tanto para dar o melhor para mim e meus irmãos.

A meu irmão Robson, pelo apoio e por aturar o mal humor e falta de paciência durante todos esses anos na faculdade. A minha irmã Natali, por todas as “puxadas de orelha” necessárias para esse TCC ser concluído e também por seu suporte.

A meu namorado Caio, por toda sua ajuda e incentivo durante todo o processo de elaboração desse trabalho.

A todo o corpo docente e servidores que se dedicaram para minha formação ser a melhor possível. Agradeço especialmente meu orientador Thiago Pontin Tancredi, por toda sua ajuda no trabalho e empenho demonstrado para o crescimento do curso de Engenharia Naval na UFSC durante os semestres que atuou como coordenador.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo do movimento de *heave* de embarcações descritas por meio da tabela de cotas. A ferramenta desenvolvida permite a importação de dados fornecidos pelo usuário e salvos em formato texto. Outra funcionalidade do código computacional é a possibilidade de representar o casco da embarcação. A modelagem do casco da embarcação permite que a ferramenta calcule e apresente a curva de áreas seccionais, a área molhada do casco, o deslocamento e a área de flutuação para qualquer valor de calado desejado. Para o cálculo do RAO, as forças e demais componentes hidrodinâmicos, tais como massa adicional e amortecimento, são calculados e apresentados. A avaliação hidrodinâmica é realizada usando o método *Strip Theory* linear, utilizado para formular o movimento do fluido como um problema bidimensional para corpos delgados. Por fim, a ferramenta desenvolvida é utilizada em estudos de casos cujos resultados são comparados àqueles obtidos utilizando o programa MAXSURF.

Palavras-chave: RAO. Heave. Tabela de cotas. Strip Theory.

ABSTRACT

This paper aims to present the development of a computational tool designed for the calculation of heave motions in ships from table of offsets. The tool allows the user to import data in .csv format. Another feature of the computer code is the possibility of designing the ship's hull. Graphs for the section areas as a function of the ship's length, wetted surface area, volume and flotation area as functions of the ship's draft are also plotted. For the calculation of the RAO, the forces and other hydrodynamics components, such as added mass and damping, are calculated and plotted. A method known as linear strip theory is used to formulate fluid motion as a two-dimensional problem for slender bodies. Results obtained by the tool are compared with results calculated using the softwares AQWA and MAXSURF.

Keywords: RAO. Heave. Table of offsets. Strip Theory.

LISTA DE SÍMBOLOS

Fr	número de Froude
x	posição longitudinal
y	posição transversal
z	posição vertical
λ	comprimento de onda
T	período entre ondas
ζ_a	amplitude da onda
κ	número de onda
ω	frequência das ondas
t	tempo
ζ	perfil de onda
η_3	movimento na direção heave
φ_w	potencial de onda
g	aceleração da gravidade
F	forças de excitação
F_1	força nas ondas incidentes e não perturbadas
F_2	força em fase com a aceleração das partículas
F_3	força em fase com a velocidade das partículas
F_{FK}	força de Froude-Krylov
$\frac{d\phi}{dt}$	derivada do potencial de onda em relação ao tempo (campo de pressões)
dS	diferencial da área de superfície molhada
n	vetor normal do diferencial de área e que aponta em direção à água

F_D	força de difração
a_{33}	massa adicional da seção transversal
b_{33}	amortecimento da seção transversal em <i>heave</i>
\bar{z}	plano na baliza do navio;
γ	plano no círculo unitário;
a_{-1}	1
a_{2n-1}	coeficientes do mapeamento ($n = 1, \dots, N$)
N	número de parâmetros.
x_0	coordenada transversal mapeada
y_0	coordenada vertical mapeada
M_s	fator de escala do mapeamento
a_1	coeficiente de Lewis
a_3	coeficiente de Lewis
θ	ângulo do mapeamento
L_{pp}	comprimento entre perpendiculares
B_s	boca na linha d`água
D_s	calado na linha d`água
H_0	razão meia boca/calado
σ_s	coeficiente de área seccional
ρ	massa específica
k_2	coeficiente de mapeamento
k_4	coeficiente de correção da superfície livre em <i>heave</i>
$A(x)$	área seccional submersa
Ξ_0	frequência adimensional

\bar{A}	razão entre a amplitude da oscilação forçada e a amplitude da onda gerada
β	dispersão da onda
A33	massa adicional total em <i>heave</i>
B33	amortecimento total em <i>heave</i>
C33	força de restauração em <i>heave</i>
M	deslocamento
K	rigidez
ω_n	frequência natural de oscilação
ξ_a	fator de amortecimento
CB	coeficiente de bloco
A_{WL}	área de flutuação
A_{baliza}	área da seção transversal
V	volume
A_{WS}	área de superfície molhada
P_{baliza}	perímetro da seção transversal
d	pontal

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes métodos Strip Theory.	19
Tabela 2 - Coeficiente de superfície livre em função da frequência adimensional.....	31
Tabela 3 - Parâmetros iniciais das geometrias.	48
Tabela 4 - Comparação entre valores calculados e analíticos para o cilindro.....	48
Tabela 5 - Parâmetros do navio.....	53
Tabela 6 - Comparação dos valores da Série 60 com os obtidos pelo programa.	53
Tabela 7 - Comparativo entre valores calculados pelo programa e valores da Série 60.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comércio Marítimo (evolução do comércio de TEUs ao longo dos anos).....	16
Figura 2 - Embarcação em mar crítico.	16
Figura 3 - Comparação das respostas de diversos programas.	20
Figura 4 - Representação de uma onda no espaço e no tempo.	21
Figura 5 - Sistema de coordenadas em um navio (ITTC).....	22
Figura 6 - Resposta de uma plataforma as forças de excitação.	24
Figura 7 - Modelo de um prisma forçado a oscilar.	26
Figura 8 - Mapeamento entre dois planos.	27
Figura 9 - Mapeamento entre dois planos.	27
Figura 10 - Limites para a transformação de Lewis.	30
Figura 11 - Coeficiente de superfície livre em função da frequência adimensional.	32
Figura 12 - Variação da frequência de ressonância devido ao amortecimento.	35
Figura 13 - Regiões para a resposta de um movimento.....	36
Figura 14 - Comparação entre os métodos de programação existentes.....	39
Figura 15 - Exemplo de código em HTML.	39
Figura 16 - Interface da ferramenta utilizada na programação.....	40
Figura 17 - Layout da ferramenta computacional.	41
Figura 18 - Instruções para utilização da ferramenta e modelo de tabela de cotas.	41
Figura 19 - Cilindro representado tridimensionalmente.....	42
Figura 20 - Plano de balizas gerado pela ferramenta.....	43
Figura 21 - Plano de linhas d`água gerado pela ferramenta.	44
Figura 22 – Comparação entre curva real e pontos monótonos.	45
Figura 23 - Geometria gerada pela ferramenta para o cilindro.....	47
Figura 24 - Comparação dos resultados obtidos para a força de Froude-Krylov.....	49
Figura 25 - Comparação dos resultados obtidos para a força de difração.	49
Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos para a massa adicional.....	50
Figura 27 - Comparação dos resultados obtidos para o amortecimento.....	50
Figura 28 - Comparação entre os RAOs.....	51
Figura 29 - Geometria gerada pela ferramenta para o navio.	52
Figura 30 - Movimento de heave calculado e plotado para o navio da Série 60.....	54
Figura 31 - Comparação dos resultados obtidos para a força de Froude-Krylov.....	61

Figura 32 - Comparação dos resultados obtidos para a força de difração.....	62
Figura 33 - Comparação dos resultados obtidos para a massa adicional.....	62
Figura 34 - Comparação dos resultados obtidos para o amortecimento.....	63
Figura 35 - Comparação entre os RAOs.....	63
Figura 36 - Tabela de cotas Série 60 (CB = 0,70).....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1. 1 Objetivos	17
1. 2 Estrutura do documento	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2. 1 Revisão bibliográfica	19
2. 2 Definições hidrodinâmicas e sistema de coordenadas	20
2. 3 Potencial das ondas	22
2. 3. 1 <i>Relação de dispersão</i>	<i>23</i>
2. 4 Forças	24
2. 4. 1 <i>Força de Froude-Krylov</i>	<i>25</i>
2. 4. 2 <i>Forças de difração</i>	<i>25</i>
2. 5 Coeficientes hidrodinâmicos	25
2. 5. 1 <i>Técnicas de mapeamento das seções</i>	<i>26</i>
2. 5. 2 <i>Transformação de Lewis</i>	<i>28</i>
2. 5. 3 <i>Massa adicional</i>	<i>30</i>
2. 5. 4 <i>Amortecimento</i>	<i>32</i>
2. 6 RAO.....	33
2. 7 Método Strip Theory linear	36
3 DESENVOLVIMENTO	38
3. 1 Linguagens e ferramentas utilizadas.....	38
3. 1. 1 <i>JavaScript.....</i>	<i>38</i>
3. 1. 2 <i>HTML.....</i>	<i>39</i>
3. 1. 3 <i>Ferramenta de texto</i>	<i>40</i>
3. 2 Passo a passo.....	40
3. 2. 1 <i>Dados de entrada</i>	<i>41</i>
3. 2. 2 <i>Processamento</i>	<i>42</i>
3. 2. 2. 1 <i>Representação 3D</i>	<i>42</i>

3. 2. 2. 2 Plano de balizas e plano de linhas d`água	43
3. 2. 2. 4 Área de superfície molhada	44
3. 2. 2. 3 Área das balizas e volume	45
3. 2. 2. 5 Área de flutuação.....	46
3. 2. 3 Pós processamento.....	46
3. 3 Ressalvas e restrições.....	46
4 RESULTADOS E VERIFICAÇÕES.....	47
4. 1 Estudo de caso 1: Cilindro	47
4. 1. 1 Geometria.....	47
4. 1. 2 Áreas e volume	48
4. 1. 3 Resultados	48
4. 1. 3. 1 Forças, massa adicional e amortecimento	48
4. 1. 3. 2 RAO.....	51
4. 2 Estudo de caso 2: Série 60 (CB = 0,70).....	52
4. 2. 1 Geometria.....	52
4. 2. 2 Áreas e volume	53
4. 2. 3 Resultados	53
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	55
5. 1 Recomendações para trabalhos futuros.....	56
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A: Estudo de caso: triângulo	61
ANEXO A: Requisitos para o potencial de velocidades.....	64
ANEXO B: Tabela de cotas da embarcação da Série 60 com CB 0,70.....	68

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais metas do estudo sobre o desempenho de navios é a avaliação de um critério quantitativo que permita determinar os efeitos dos movimentos desenvolvidos por uma embarcação em operação (GRAHAM, 1990). Pedersen (2000) discorre sobre a importância desses critérios serem levados em conta no projeto de novas embarcações e também na operação de navios e barcos já existentes.

Journée (1992) alerta sobre a importância em se pré-determinar o comportamento de um navio ou estrutura flutuante quando sujeito a um estado de mar¹ extremo; cuja avaliação pode ser feita através de modelos físicos ou ainda medindo-se os movimentos diretamente a bordo do navio (SKANDALI, 2015).

Para embarcações que apresentam formas simples (como barcas retangulares), os cálculos podem ser analíticos, mas, para geometrias complexas, deve-se recorrer a métodos numéricos usando ferramentas computacionais desenvolvidas especialmente para essa aplicação.

Em geral, a resposta de uma embarcação, quando submetida a ondas regulares, é expressa por meio de suas funções de transferência; conhecidas como RAO (*Response Amplitude Operator*). Para uma estrutura flutuante, essas funções precisam ser calculadas para os seis graus de liberdade (*surge, sway, heave, pitch, roll e yaw*), para diferentes velocidades de avanço e para ondas oriundas de diferentes direções.

O comércio através de embarcações e a utilização de estruturas responsáveis pela exploração de recursos naturais são responsáveis por uma movimentação considerável de carga, e conseqüentemente de dinheiro. Na Figura 1 é mostrada a evolução da movimentação de TEUs² no mundo ao longo dos anos. Já na Figura 2, é mostrada a queda de contêineres de embarcação devido ao comportamento no mar.

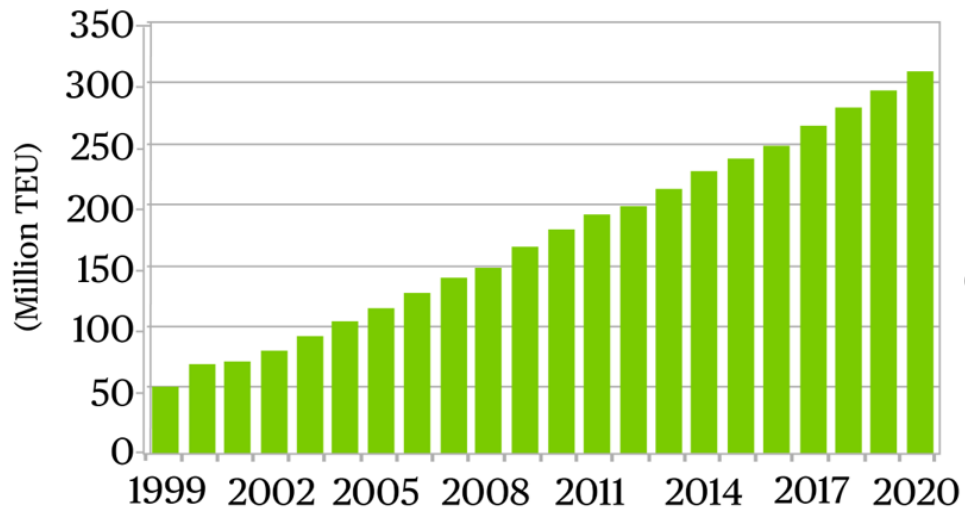
Dessa maneira, há a necessidade de simular de forma cada vez mais precisa as condições de mar as quais essas estruturas estarão sendo solicitadas, evitando assim danos estruturais que

¹ Condição geral da superfície livre numa grande massa de água, em determinada posição e instante.

² *Twenty-foot equivalent unit*: unidade usada para medir a capacidade de carga de contêineres.

possam representar prejuízos financeiros indesejáveis, além de danos ecológicos e o risco à vida humana.

Figura 1 - Comércio Marítimo (evolução do comércio de TEUs ao longo dos anos).



Fonte: CHUBB (2017)

Figura 2 - Embarcação em mar crítico.



Fonte: SINCOMAN (2014)

Movimentos demasiados podem ser prejudiciais para a estrutura da embarcação, para a carga, para a tripulação, para os sistemas a bordo e para os passageiros (em cruzeiros, por exemplo). Esses movimentos podem reduzir o desempenho e, inclusive, inviabilizar a

embarcação de completar sua tarefa. Navios PSV, por exemplo, só podem transferir carga para plataformas em determinados estados de mar, do contrário, o alto nível de movimentos pode resultar em graves acidentes para ambas as embarcações.

Alguns programas comerciais como AQWA e MAXSURF apresentam os cálculos de *seakeeping*³. Porém, códigos acadêmicos são difíceis de encontrar. Nesse escopo, o presente trabalho se dedica a detalhar o processo de criação de um código para calcular o RAO na direção *heave* de uma embarcação descrita a partir da tabela de cotas. Outra funcionalidade do código é o desenho em três dimensões da embarcação, gerando balizas e planos interpolados a partir dos dados originais descritos na tabela de cotas.

1. 1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral detalhar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo do RAO de *heave* de embarcações usando a técnica *Strip Theory*, sem velocidade de avanço e com ondas vindo de proa (*head sea*), a partir de tabelas de cotas.

Para a realização do objetivo geral, estabelece-se os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar uma rotina para o desenho tridimensional do casco;
- Desenvolver um modelo de interpolação de dados de maneira a gerar pontos intermediários ao longo da baliza, de modo a respeitar a forma do casco;
- Elaborar uma rotina para calcular características geométricas, como a área das balizas, volume, área de superfície molhada e área de flutuação;
- Elaborar um modelo para determinar o potencial em função da passagem de uma onda regular ao longo do casco;
- Determinar a massa adicional e o fator de amortecimento do casco usando a transformação de Lewis;
- Aplicar o método *Strip Theory* linear para a determinação das forças de excitação sofridas pelo navio e calcular o RAO de *heave* do casco.

³ A habilidade de um navio de resistir a condições extremas do mar

1. 2 Estrutura do documento

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho com a definição da problemática, a justificativa e os objetivos.

O Capítulo 2 conta com uma revisão bibliográfica e com a fundamentação teórica necessária para os cálculos a serem desenvolvidos.

No capítulo 3 é mostrado o desenvolvimento da ferramenta computacional e suas funcionalidades.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para dois estudos de caso e traz uma comparação dos valores obtidos pela ferramenta computacional com valores obtidos pelos programas AQWA e MAXSURF.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações dos resultados, assim como sugestões para melhorias e refinamentos do programa desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos fundamentais utilizados no desenvolvimento do código, bem como uma breve revisão bibliográfica sobre o assunto.

2.1 Revisão bibliográfica

Skankali (2015) calcula o RAO de algumas embarcações e compara os valores encontrados com os dados reais obtidos para os navios de carga da companhia *Heerema Marine Contractors* (HMC). Como a empresa monitora os movimentos de suas embarcações regularmente, foi possível fazer uma comparação entre os valores previstos e os dados reais observados. O autor conclui que o RAO calculado para o movimento de alguns navios não corresponde aos valores reais e sugere alguns motivos para essa inexatidão, tais como: velocidade de avanço, forças oriundas do amortecimento viscoso e até variações na distribuição de massa⁴ das embarcações durante a operação.

Pedersen (2000) desenvolveu uma ferramenta computacional para o cálculo das forças induzidas pelas ondas, chamada *I-ship*, com o objetivo de ser usada no projeto conceitual de navios. Após fazer uma pesquisa dos métodos teóricos disponíveis para a determinação das cargas no navio, e usar critérios como tempo computacional dispendido, precisão dentro das práticas da engenharia e a robustez dos métodos para a maior gama de embarcações possíveis, o autor decidiu trabalhar com três métodos. Na Tabela 1 encontram-se os métodos utilizados pelo autor.

Tabela 1 - Diferentes métodos *Strip Theory*.

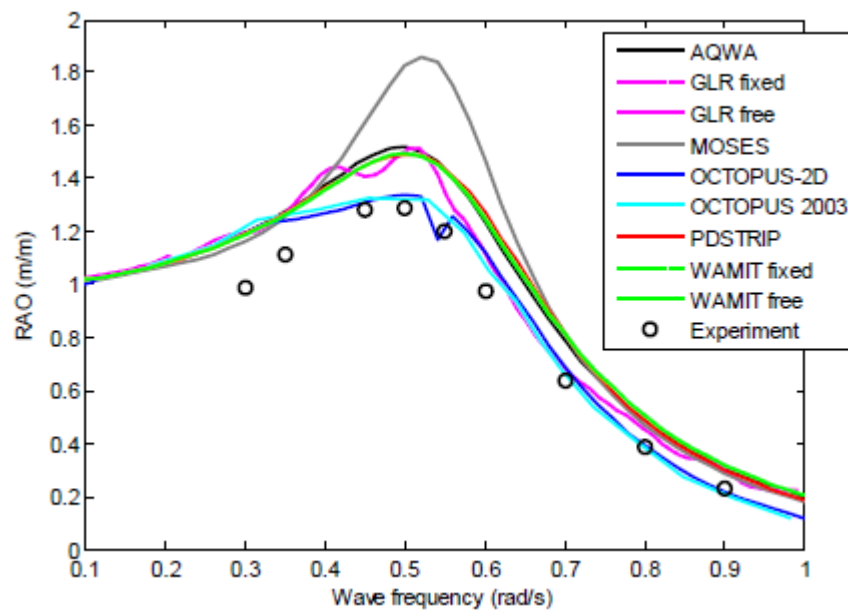
Método	Autores
<i>Strip Theory</i> linear	Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970)
<i>Strip Theory</i> quadrático	Jensen e Pedersen (1978)
<i>Strip Theory</i> não linear e no domínio do tempo.	Petersen (1992)

Fonte: Autor (2017), Adaptado de Pedersen (2000).

⁴ A distribuição de massa modifica o momento de inércia, afetando os movimentos nos graus de liberdade de rotação (*yaw*, *roll* e *pitch*).

Gourley *et al* (2015) desenvolvem um estudo para comparar as respostas de alguns programas comerciais na área de *seakeeping*. O estudo é desenvolvido considerando águas rasas e programas como AQWA, MOSES e OCTUPUS tem seus resultados confrontados com os resultados obtidos de experimentos. Na Figura 3 são mostrados os resultados obtidos para um estudo de caso desenvolvido pelos autores para *heave*.

Figura 3 - Comparação das respostas de diversos programas.



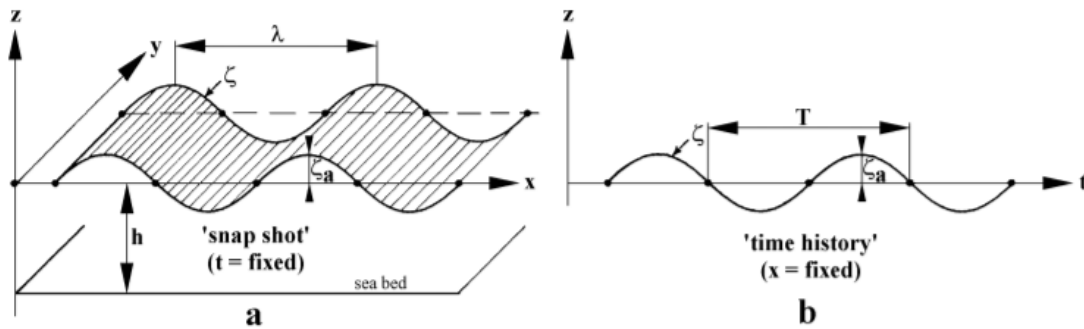
Fonte: Gourlay *et al* (2015).

2. 2 Definições hidrodinâmicas e sistema de coordenadas

Na Figura 4 são mostradas duas perspectivas para uma onda harmônica⁵. Na Figura 4-a é mostrado o que seria visto caso alguém tirasse uma foto instantânea em um escoamento com ondas; o perfil das ondas é mostrado em função da distância x ao longo do escoamento em um instante de tempo t . Já a Figura 4-b, é um registro de tempo do nível da água observado em uma posição constante no escoamento.

⁵ Onda que pode ser representado por uma função seno ou cosseno.

Figura 4 - Representação de uma onda no espaço e no tempo.



Fonte: Journée (2001).

É importante observar que o sistema de coordenadas adotado neste trabalho possui origem na superfície da água, com o eixo z direcionado para cima. O nível da superfície é definido como o nível médio do fluido, ou ainda, o nível caso as ondas não estivessem presentes. O eixo x é positivo na direção da propagação da onda e a profundidade h é dada pela distância da superfície da água até o leito do mar.

A distância horizontal medida entre duas cristas sucessivas é denominada comprimento de onda, λ . O tempo entre uma crista e outra é o período, T . Se a onda é descrita por uma onda harmônica, a amplitude da onda, ζ_a , é definida como a distância entre a crista e o nível médio.

Se a onda se move positivamente na direção x , o perfil da onda – o formato da superfície da água (ou elevação) – pode ser descrito como uma função da posição x e do tempo t (Equação 1):

$$\zeta = \zeta_a * \cos(\kappa x - \omega t) \quad (1)$$

κ = número de onda⁶ (rad/m);

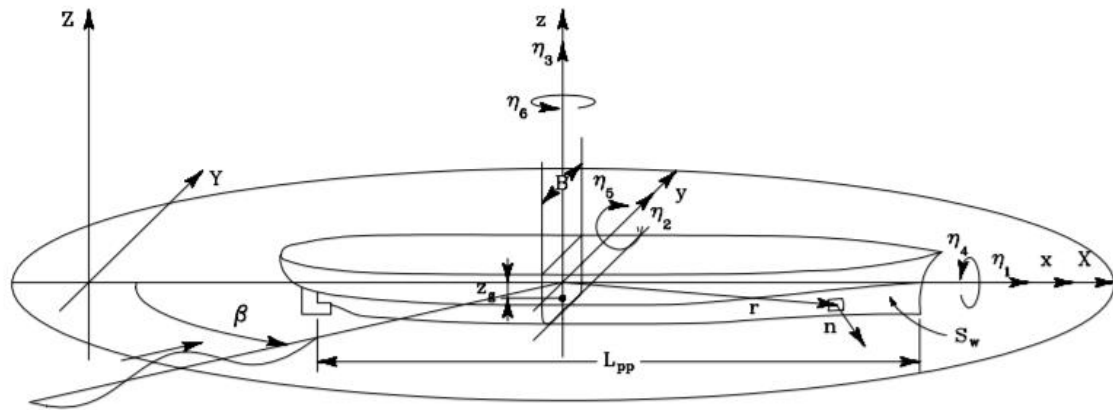
ω = frequência das ondas (rad/s).

Na Figura 5 é mostrado o sistema de coordenadas definido em relação a geometria típica de um navio. É importante observar que o sistema está de acordo com as recomendações feitas pela ITTC⁷ e é considerado fixo e com origem no centro de massa da embarcação.

⁶ Grandeza física inversamente proporcional ao comprimento de onda.

⁷ *International Towing Tank Conference*.

Figura 5 - Sistema de coordenadas em um navio (ITTC).



Fonte: Pedersen (2000).

O movimento de *heave* é denotado por η_3 e acontece transversalmente na direção z .

2.3 Potencial das ondas

Para usar a teoria potencial linear com ondas, é necessário assumir que o declive é pequeno. Isso significa dizer que a inclinação das ondas é tão pequena, que os termos da equação do movimento das ondas que dependem da magnitude da inclinação ao quadrado podem ser desprezados.

Supondo uma onda se movendo no plano x - z . O perfil de uma onda com uma inclinação pequena se assemelha a uma função seno ou cosseno e o movimento de uma partícula de água nessa onda depende da profundidade da partícula (JOURNÉE, 2001). Assim, o potencial pode ser descrito de acordo com a Equação 2, onde $P(z)$ representa uma função ainda desconhecida.

$$\varphi_{\omega}(x, z, t) = P(z) * \text{sen}(\kappa x - \omega t) \quad (2)$$

O potencial de velocidades das ondas deve atender quatro requisitos:

1. Equação de Laplace;
2. Condição de contorno no leito do mar;
3. Condição de contorno dinâmica na superfície livre;
4. Condição de contorno cinemática na superfície livre.

As fórmulas que descrevem os requisitos podem ser vistas no Anexo A.

Esses requisitos levam a uma expressão mais completa para o potencial das ondas, cuja simplificação para águas profundas pode ser vista na Equação 3:

$$\varphi_w = \frac{-\zeta_a * g}{\omega} * e^{\kappa z} * \text{sen}(\omega t - \kappa x) \quad (3)$$

φ_w = potencial da onda (m^2/s);

ζ_a = elevação da onda (m);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

e = base do logaritmo natural;

κ = número de onda (rad/m);

z = distância vertical (m);

ω = frequência da onda (rad/s);

t = tempo (s);

x = distancia horizontal (m)

2. 3. 1 Relação de dispersão

É possível encontrar uma relação entre a frequência e o número da onda, ou ainda entre o período e o comprimento da onda. Essa relação chama-se dispersão e é dada pela Equação 4:

$$\omega^2 = \kappa * g * \text{tgh}(\kappa h) \quad (4)$$

Em muitas situações, ω ou T serão conhecidos, e a partir dessa relação, κ e λ podem ser calculados. Para águas profundas [$\text{tgh}(\kappa h)=1$], a Equação 5 toma uma forma consideravelmente mais simples (JOURNÉE, 2001):

$$\omega^2 = \kappa * g \quad (5)$$

2.4 Forças

As forças atuantes em um corpo rígido flutuante podem ser divididas em três parcelas (Equação 6): F_1 é a força resultante das ondas incidentes e não perturbadas (hipótese de Froude-Krylov). As outras duas forças provem da perturbação das ondas geradas pela oscilação do corpo, sendo que F_2 ocorre em fase com a aceleração das partículas de água e F_3 em fase com a velocidade (JOURNÉE, 2001).

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (6)$$

De maneira análoga, Skandali (2015) propõe que as forças hidrodinâmicas são expressas em termos de ondas não perturbadas (Froude-Krylov) e difratadas (Equação 7).

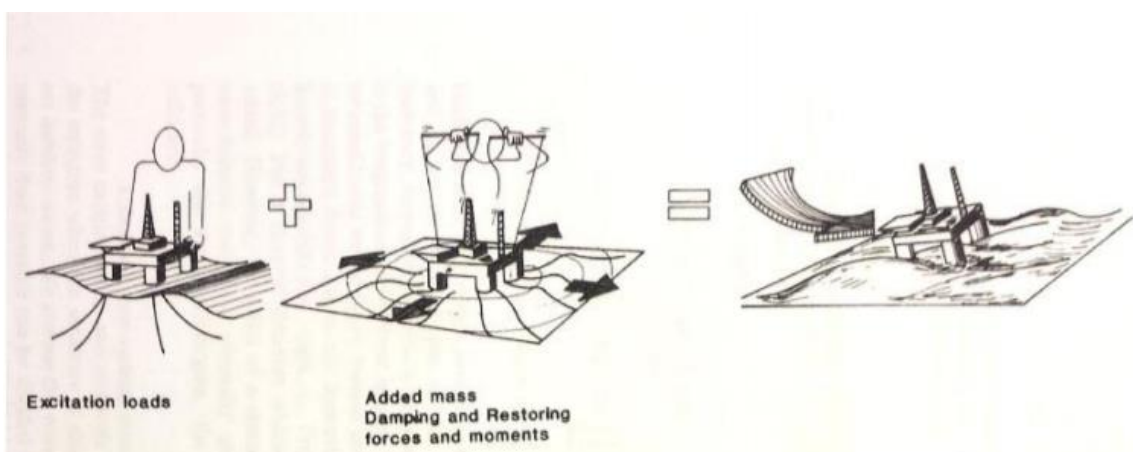
$$F = F_{FK} + F_D \quad (7)$$

F_{FK} = força de Froude-Krylov;

F_D = forças de difração;

Por fim, Faltinsen (1993) divide as forças em forças de excitação e forças de radiação. Uma representação das forças de excitação pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 - Resposta de uma plataforma as forças de excitação.



Fonte: Faltinsen (1993).

2. 4. 1 Força de Froude-Krylov

Se for considerado que o corpo flutuante é suficientemente pequeno ao ponto de não afetar o campo de pressões da onda incidente, então os efeitos de difração podem ser desconsiderados (Equação 8). Essa suposição vem da hipótese de Froude-Krylov, e por essa razão a integral do campo de pressões da onda incidente na superfície do casco define uma força de excitação resultante equivalente, denominada força de Froude-Krylov (TECHET, 2005).

$$F_{FK} = -\rho \iint_S \frac{d\Phi}{dt} n dS \quad (8)$$

$d\Phi/dt$ = derivada do potencial de onda em relação ao tempo (campo de pressões);

dS = diferencial da área de superfície molhada.

n = vetor normal do diferencial de área e que aponta em direção à água;

2. 4. 2 Forças de difração

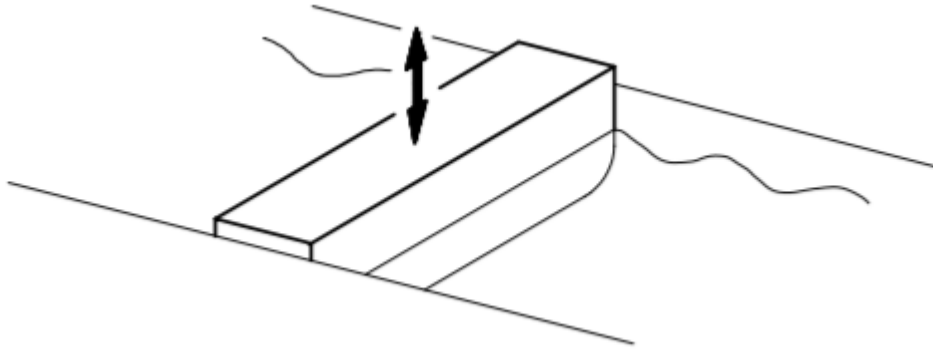
Mattos (2012) diz que a força de difração é o fenômeno que ocorre quando as ondas contornam objetos de mesma ordem de grandeza de seu comprimento. Segundo Faltinsen (1993), a força de difração é a força gerada pelo campo de pressões distante do corpo e possui um componente em fase com a aceleração e outro em fase com a velocidade. A Equação 9 representa essa força.

$$F_D = \omega^2 * \zeta_a * e^{kz} * a_{33} * \text{sen}(\omega t - \kappa x) + \omega * \zeta_a * e^{kz} * b_{33} * \text{cos}(\omega t - \kappa x) \quad (9)$$

2. 5 Coeficientes hidrodinâmicos

Os coeficientes hidrodinâmicos são encontrados ao solucionar o problema de calcular a resposta do fluido a uma oscilação harmônica forçada. O problema físico para o movimento de *heave* pode ser visto na Figura 7:

Figura 7 - Modelo de um prisma forçado a oscilar.



Fonte: Pedersen (2000).

O modelo prismático tem o formato de uma seção transversal e é forçado a oscilar senoidalmente a uma dada frequência. A força medida inclui as forças hidrodinâmicas, de restauração e inerciais. Mas nesse caso, somente as forças hidrodinâmicas são consideradas.

Pedersen (2000) define a massa adicional como o coeficiente em fase com a aceleração do movimento, e o amortecimento é o coeficiente em fase com a velocidade. Esse procedimento de oscilação forçada é repetido até todas as frequências de interesse serem ensaiadas.

Ao longo dos anos, diferentes abordagens teóricas foram aplicadas a esse problema, visando determinar a massa adicional e o amortecimento por meio de uma abordagem analítica. Um método simplificado foi proposto por Ursell (1949) e usa a solução do potencial do escoamento ao redor de um cilindro e uma correção da frequência em razão do efeito de superfície livre. O autor determinou o potencial de velocidade ao redor de um cilindro semi-submerso para o movimento de *heave* e registrou a massa adicional e o amortecimento.

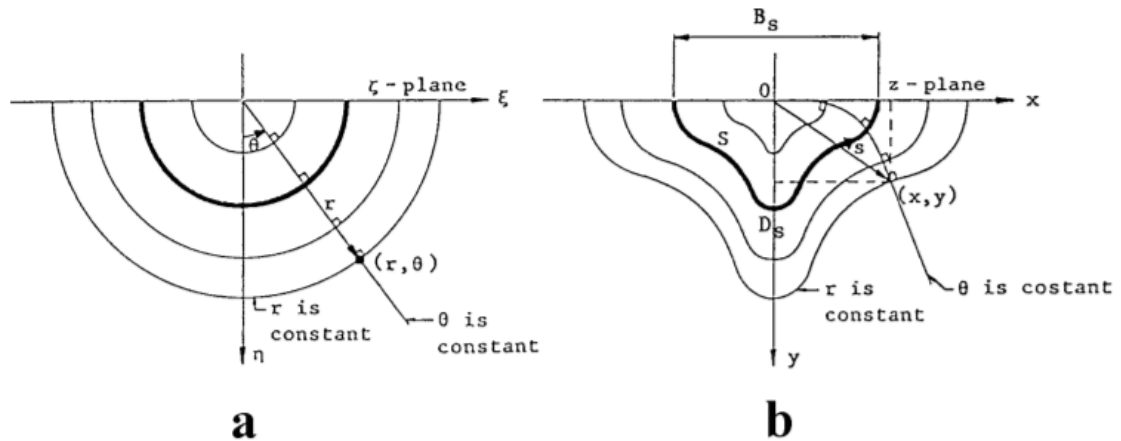
Baseado na solução encontrada para o cilindro, alguns métodos de mapeamento foram desenvolvidos para determinar o potencial ao redor de uma gama variada de geometrias. Esses métodos de mapeamento serão detalhados na próxima seção.

2. 5. 1 Técnicas de mapeamento das seções

O procedimento de mapeamento é uma transformação de um potencial conhecido ao redor de uma certa geometria através de funções de mapeamento. A transformação consiste em

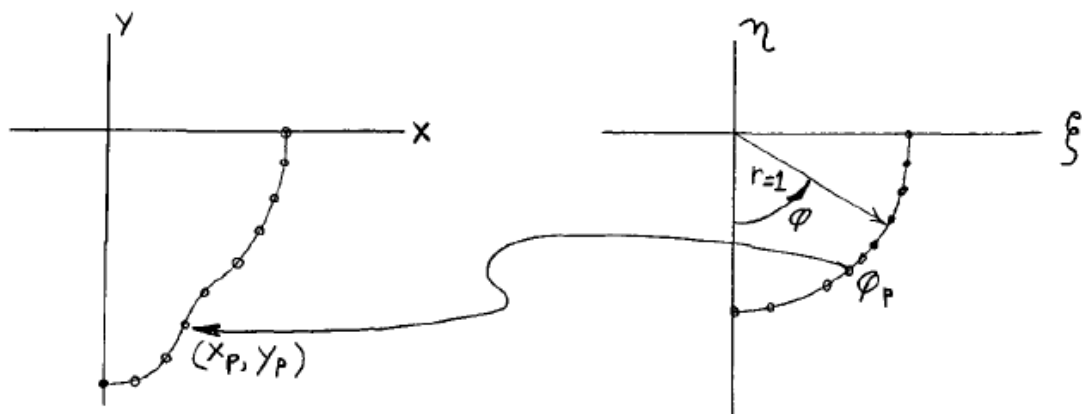
converter uma geometria no domínio real para um cilindro equivalente no domínio imaginário. As Figuras 8-9 mostram mapeamentos entre dois planos.

Figura 8 - Mapeamento entre dois planos.



Fonte: Jounée (2001).

Figura 9 - Mapeamento entre dois planos.



Fonte: Kerczek e Tuck (1969).

A equação que governa a transformação é apresentada a seguir (Equação 10):

$$\bar{z} = M_S \sum_{n=0}^N (a_{2n-1}) \gamma^{2n-1} \quad (10)$$

\bar{z} = plano na baliza do navio;

γ = plano no círculo unitário;

M_s = fator de escala entre os planos;

$$a_{-1} = 1;$$

a_{2n-1} = coeficientes do mapeamento ($n = 1, \dots, N$)

N = número de parâmetros.

Da equação anterior obtém-se a relação entre as coordenadas no plano real e as variáveis no plano imaginário (Equações 11 e 12):

$$x_0 = -M_s \sum_{n=0}^N \{(-1)^n a_{2n-1} \text{sen}((2n-1)\theta)\} \quad (11)$$

$$y_0 = +M_s \sum_{n=0}^N \{(-1)^n a_{2n-1} \text{cos}((2n-1)\theta)\} \quad (12)$$

Onde x_0 e y_0 são as coordenadas mapeadas e θ é o ângulo de mapeamento.

Ao truncar a transformação para apenas três parâmetros, têm-se as formas de Lewis, nomeadas após Lewis ser o primeiro a propor o seu uso (Lewis, 1929).

2. 5. 2 Transformação de Lewis

Como descrito por Journée (2001), a transformação de Lewis é um método consideravelmente simples e que apresenta resultados mais ou menos realistas dependendo da geometria a ser transformada, sendo especialmente preciso para geometrias de balizas sem reentrâncias.

A transformação de Lewis é definida pelas Equações 12 e 13:

$$x_0 = M_s * ((1 + a_1) * \text{sen}\theta - a_3 * \text{sen}\theta) \quad (12)$$

$$y_0 = M_s * ((1 - a_1) * \text{cos}\theta + a_3 * \text{cos}\theta) \quad (13)$$

x_0 e y_0 = coordenadas mapeadas;

a_1 e a_3 = coeficientes de Lewis;

O fator de escala é definido pelas Equações 14 e 15:

$$M_S = \frac{\frac{B_S}{2}}{1 + a_1 + a_3} \quad (14)$$

$$M_S = \frac{D_S}{1 - a_1 + a_3} \quad (15)$$

D_S = calado da seção a ser transformada;

B_S = boca da seção na linha d'água

Os coeficientes de Lewis e o fator de escala são determinados de maneira que a boca, o calado e a área da seção transformada e da seção original sejam idênticas.

A razão da meia boca para o calado é dada pela Equação 16:

$$H_0 = \frac{\frac{B_S}{2}}{D_S} = \frac{1 + a_1 + a_3}{1 + a_1 - a_3} \quad (16)$$

Uma integração da forma de Lewis resulta no coeficiente de área seccional σ_s (Equação 17):

$$\sigma_s = \frac{A_S}{B_S * D_S} = \frac{\pi}{4} * \frac{1 - a_1^2 - 3a_3^2}{(1 + a_3)^2 - a_1^2} \quad (17)$$

Onde A_S é a área da seção transversal.

Colocando a_1 , derivado da expressão de H_0 , na expressão para σ_s , obtém-se uma equação de segundo grau para a_3 (Equação 18):

$$c_1 a_3^2 + c_2 a_3 + c_3 = 0 \quad (18)$$

Os coeficientes c_1 , c_2 e c_3 são definidos pelas Equações 19, 20 e 21:

$$c_1 = 3 + \frac{4\sigma_s}{\pi} + \left(1 - \frac{4\sigma_s}{\pi}\right) * \left(\frac{H_0 - 1}{H_0 + 1}\right)^2 \quad (19)$$

$$c_2 = 2c_1 - 6 \quad (20)$$

$$c_3 = c_1 - 4 \quad (21)$$

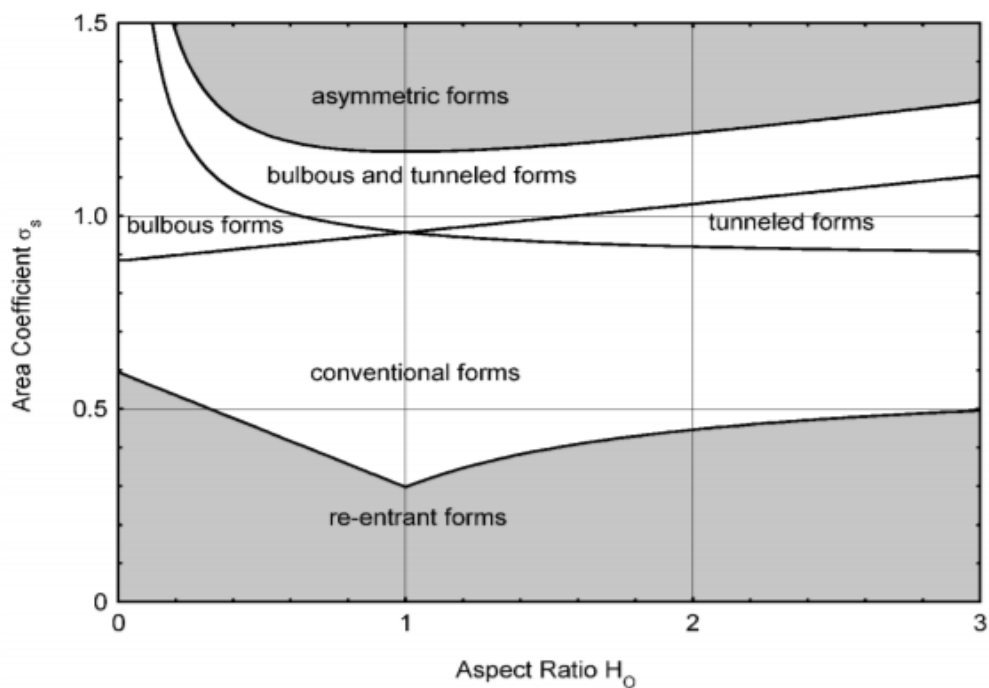
As soluções válidas para a_1 e a_3 são representadas nas Equações 22 e 23:

$$a_3 = \frac{-c_1 + 3 + \sqrt{9 - 2c_1}}{c_1} \quad (22)$$

$$a_1 = \frac{H_0 - 1}{H_0 + 1} * (a_3 + 1) \quad (23)$$

Na Figura 10 são mostrados os limites de validade recomendados para a transformação de Lewis. A parte cinza do gráfico representa formas que não são capazes de serem representadas adequadamente usando esse método.

Figura 10 - Limites para a transformação de Lewis.



Fonte: Journée (2001).

2. 5. 3 Massa adicional

A massa adicional, para o movimento de *heave*, por unidade de comprimento do navio pode ser descrita pela Equação 24:

$$a_{33} = \rho * k_2 * k_4 * A(x) \quad (24)$$

Na Equação 24, ρ é a massa específica do fluido, k_2 é um coeficiente adimensional que determina o mapeamento da geometria para o escoamento ao redor do cilindro sem superfície livre. Já o coeficiente adimensional k_4 é uma correção da frequência para a superfície livre. Por fim, o termo $A(x)$ é a área da seção transversal submersa (PEDERSEN, 2000) na posição x analisada do navio.

Segundo Lewis (1929), o coeficiente k_2 pode ser calculado por meio da Equação 25:

$$k_2 = \frac{(1 + a_1)^2 + 3a_3^2}{1 - a_1^2 - 3a_3^2} \quad (25)$$

O coeficiente k_4 reflete os efeitos de superfície livre. Esse valor depende do formato da baliza e da frequência adimensional mostrada na Equação 26.

$$\Sigma_0 = \frac{\omega^2 * BS}{2g} \quad (26)$$

Para pequenos valores de Σ_0 , menores que 0,20, Ursell (1949) demonstrou que a Equação 27 fornece boas aproximações para seções transversais elípticas:

$$k_4 = k_{4,1} = -\frac{8}{\pi} * \ln \left(0,795 \left(1 + \frac{2Ds}{BS} \right) * \Sigma_0 \right) \quad (27)$$

Tasai (1958) mostrou que essa expressão pode ser usada para seções não elípticas. Para valores maiores da frequência adimensional ($\Sigma_0 > 0,20$), k_4 não varia muito em função da forma da baliza.

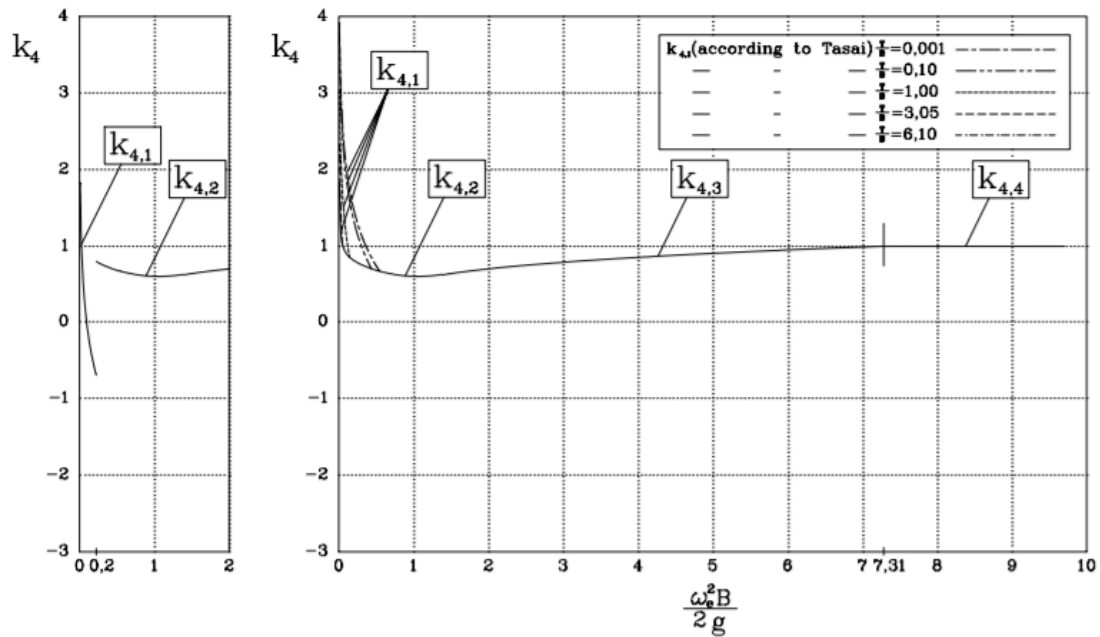
Na Tabela 2 e na Figura 11 o coeficiente k_4 é mostrado como função da razão calado/boca e da frequência adimensional Σ_0 .

Tabela 2 - Coeficiente de superfície livre em função da frequência adimensional.

$k_{4,1}$	$-\frac{8}{\pi} * \ln \left(0,795 \left(1 + \frac{2Ds}{BS} \right) * \Sigma_0 \right)$	$\Sigma_0 < -\frac{1,3503}{\frac{Ds^{-0,9846}}{BS} + 2,3567} + 0,5497$
$k_{4,2}$	$0,2367\Sigma_0^2 - 0,4944\Sigma_0 + 0,8547 + \frac{0,01}{\Sigma_0 + 0,0001}$	$-\frac{1,3503}{\frac{Ds^{-0,9846}}{BS} + 2,3567} + 0,5497 < \Sigma_0 < 1,388$
$k_{4,3}$	$0,4835 + \sqrt{-0,0484 + 0,0504\Sigma_0 - 0,001\Sigma_0^2}$	$1,388 < \Sigma_0 < 7,31$
$k_{4,4}$	1	$\Sigma_0 > 7,31$

Fonte: Pedersen (2000).

Figura 11 - Coeficiente de superfície livre em função da frequência adimensional.



Fonte: Pedersen (2000).

Para encontrar a massa adicional total de uma determinada embarcação, basta integrar o valor encontrado para cada uma das balizas ao longo de todo o comprimento da embarcação.

2. 5. 4 Amortecimento

O amortecimento em função do comprimento é dado pela Equação 28:

$$b_{33} = \rho g^2 \frac{\bar{A}^2}{\omega^3} \quad (28)$$

Onde \bar{A} é a razão de amplitude entre a amplitude da oscilação forçada e a amplitude da onda gerada. Grim (1953) derivou uma expressão para uma seção transversal circular e Tasai (1958) apresentou a Equação 29 usando a transformação de Lewis:

$$\bar{A} = \frac{2\varepsilon_0}{1 + a_1 + a_3} \int_1^\infty \left(\frac{1 + a_1}{\beta^2} + \frac{3a_3}{\beta^4} \right) * \cos \left(\varepsilon_0 \left(\frac{\beta^4 + a_1\beta^2 + a_3}{(1 + a_1 + a_3)\beta^3} - 1 \right) \right) d\beta \quad (29)$$

Onde β é uma distância do centro da baliza até o infinito, representando a dispersão da onda irradiada.

Essa expressão foi derivada da teoria potencial. Uma equação mais simples é dada por Yanamoto et al. (1986) (Equação 30).

$$\bar{A} = 2 * \text{sen} \left(\frac{\omega^2 * Bs}{2g} \right) e^{\frac{-\omega^2 * Ds}{g}} \quad (30)$$

2.6 RAO

O RAO é uma função de transferência que depende da frequência da excitação e define a relação entre o movimento de um corpo e a amplitude da excitação, sendo definida quando os movimentos de uma embarcação podem ser assumidos como lineares. (FALTINSEN, 1993)

A equação que governa o movimento de *heave* de uma embarcação é descrita na Equação 31 e pode ser representada por um sistema massa-mola-amortecedor (equação proveniente da segunda lei de Newton).

$$(M + A33(\omega))\ddot{\eta}_{33} + B33(\omega)\dot{\eta}_{33} + C33\eta_{33} = F(\omega) \quad (31)$$

η_{33} = movimento do corpo na direção de *heave*;

ω = frequência de oscilação (rad/s);

M = massa da estrutura (kg);

A33(ω) = massa adicional em *heave* (dependente da frequência) (kg);

B33(ω) = amortecimento em *heave* (dependente da frequência) (kg/s);

C33 = força de restauração em *heave* (N/m);

F(ω) = somatório de forças atuantes no sistema (N)

Resolvendo a equação para $\eta_{33} = \eta_{33a} e^{i\omega t}$ encontra-se o RAO (Equação 32):

$$RAO(\omega) = \frac{\eta_{33}}{\zeta_a} = \frac{F}{C33 - (M + A33(\omega))\omega^2 + iB(\omega)\omega} \quad (32)$$

Outra maneira de expressar o RAO é por meio da Equação 33:

$$RAO(\omega) = \frac{\eta_{33} * C33}{F} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2 * \xi_a * \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (33)$$

ω_n = frequência natural do sistema (rad/s);

ξ_a = fator de amortecimento do sistema;

A definição de frequência natural de um sistema é dada pela Equação 34 (RAO, 2008):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\text{rigidez}}{\text{massa}}} \quad (34)$$

Para um navio, a rigidez é igual ao produto da área de linha d'água da embarcação pela aceleração da gravidade e massa específica do fluido (FALTINSEN, 1993). Na Equação 35 os termos de rigidez e massa são substituídos adequadamente.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{A_{WL} * \rho * g}{M + A33}} \quad (35)$$

A_{WL} = área de flutuação na linha d'água (m^2);

ρ = densidade da água do mar (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

M = massa da embarcação (kg);

$A33$ = massa adicional em heave (kg);

Programas como o CALQLATA, consideram que a rigidez é igual ao produto do volume da embarcação pela aceleração da gravidade e massa específica da água, dividido pelo calado.

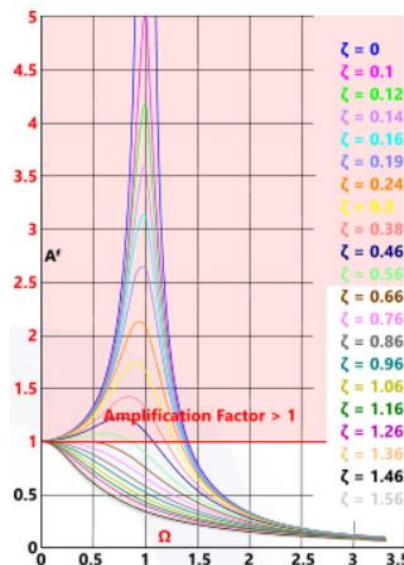
A massa considerada representa à soma da massa da embarcação mais a massa de fluido que é deslocado pelo movimento (massa adicional). Experimentalmente, observa-se que a massa adicional varia com a frequência de excitação. Uma simplificação satisfatória é considerar como a massa adicional aquela observada quando o corpo oscila a uma frequência infinita.

A definição do fator de amortecimento é dada pela Equação 36 (Rao, 2008):

$$\xi_a = \frac{B33}{2\sqrt{\text{rigidez} * \text{massa}}} = \frac{B33}{2 * \text{massa} * \omega_n} \quad (36)$$

O fator de amortecimento influi fortemente nos resultados do RAO. Na Figura 12 mostra-se a variação da frequência de ressonância do sistema em função do fator de amortecimento. É possível notar que quanto mais o amortecimento se aproxima de zero, mais próximo a frequência de ressonância se aproxima da frequência natural do sistema. Aumentando o fator de amortecimento, tem-se uma maior redução no valor da frequência e um menor pico no RAO na frequência natural.

Figura 12 - Variação da frequência de ressonância devido ao amortecimento.



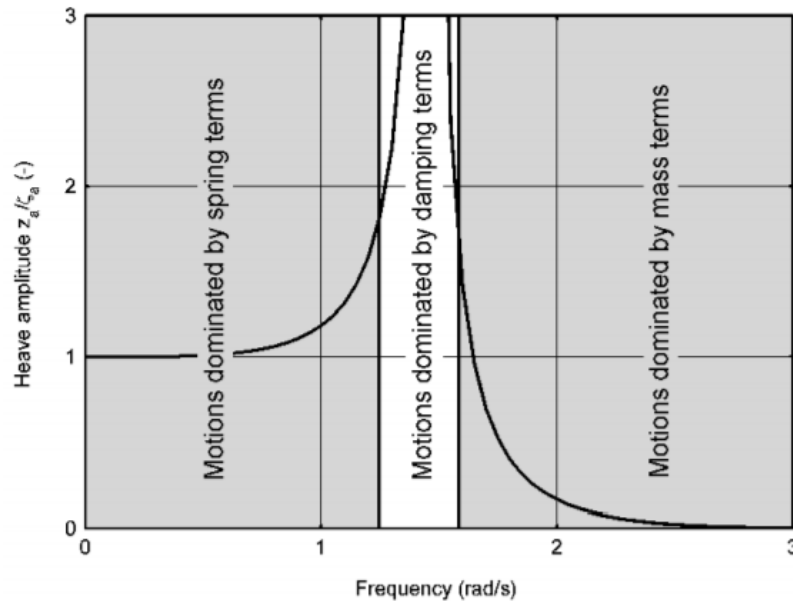
Fonte: CALQLATA (2011).

Para o movimento de *heave*, três regiões podem ser definidas no RAO:

1. A região de baixas frequências ($\omega^2 \ll C33/(M + A33)$), com os movimentos sendo dominados pela força de restauração;
2. A região da frequência natural ($\omega^2 \approx C33/(M + A33)$), onde os movimentos são dominados pelo amortecimento;
3. A região de altas frequências ($\omega^2 \gg C33/(M + A33)$), com os movimentos dominados pelo termo da massa.

A Figura 13 mostra a representação dessas regiões.

Figura 13 - Regiões para a resposta de um movimento.



Fonte: Jounée (2001).

2.7 Método *Strip Theory* linear

O método *Strip Theory* linear foi desenvolvido a partir de aspectos teóricos e até mesmo intuitivos (PEDERSEN, 2000). Gerritsma e Beukelman (1964) desenvolveram uma teoria intuitiva que usa o movimento relativo entre o navio e as ondas para determinar o movimento vertical e as forças atuantes no navio. Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970) desenvolveram um método com maior embasamento teórico.

Jounée (2001) diz que o navio é considerado um corpo rígido flutuando num fluido ideal: homogêneo, incompressível, sem tensão superficial, irrotacional e sem viscosidade. É assumido que o problema dos movimentos nesse corpo flutuante em ondas é linear ou pode ser linearizado. Como resultado disso, apenas as forças externas na parte submersa do navio são consideradas e todos os efeitos acima da linha d'água são negligenciados.

Esses métodos determinam as forças de excitação com base na soma do potencial das ondas incidentes e das ondas difratadas pela embarcação, sendo que essa abordagem é chamada de *Strip Theory* clássica. O método linear é considerado simples de implementar (Pedersen, 2000) e parte da suposição de corpo delgado (*slender body*), apresentando respostas com exatidão para forças geradas pelas ondas lineares. Essas forças compreendem uma grande parcela do total de forças sofridas por um navio.

Como o método é destinado para corpos delgados, resultados menos precisos são esperados para navios com relações comprimento sobre boca baixas. Entretanto, testes mostram que o método parece ser efetivo para relações comprimento/boca com mínimo três, e as vezes até para relações menores (JOURNÉE, 2001). Outra limitação do método, segundo Faltinsen (1993), é que o mesmo não pode ser aplicado em mares agitados. O autor aponta ainda o fato do método ser aplicável apenas para baixos números de Froude e recomenda cuidado caso o número de Froude seja maior que 0,40.

Faltinsen e Svensen (1990) discutem os vários métodos que podem ser usados para os cálculos na área de *seakeeping*. Uma visão abrangente das teorias é apresentada e os autores concluem que, apesar de algumas limitações, o método *Strip Theory* é o que apresenta maior eficiência e praticidade nos cálculos dos movimentos induzidos pelas ondas, pelo menos num estágio inicial do projeto de um navio.

O método resolve a dificuldade de uma abordagem 3D das forças hidrodinâmicas e de excitação, ao integrar as soluções 2D obtidas ao longo do comprimento do navio. As forças e coeficientes hidrodinâmicos são calculados para cada seção transversal (baliza) e então multiplicados pela distância longitudinal entre as balizas. Nessa abordagem, as interações entre os cortes transversais são ignoradas para o caso em que navio não apresenta velocidade de avanço, cada baliza é tratada como sendo parte de um cilindro com comprimento infinito (JOURNÉE, 2001).

Segundo Journée (2001), no método clássico de *Strip Theory*, os movimentos nos seis graus de liberdade são considerados desacoplados. Essa é a primeira formulação de *Strip Theory* que pode ser encontrada na literatura (KORVIN-KROUKOVSKY; JACOBS, 1957).

Como notado por Newman (1990), essa teoria geralmente obtém resultados menores do que outros métodos para o movimento de *heave*, devido a dominante e bem prevista força de restauração. O autor também salienta que resultados mais próximos aos obtidos por outros métodos são encontrados para ondas vindo de proa.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo trata sobre o passo a passo para o desenvolvimento do código destinado ao cálculo do RAO de *heave*, assim como as ferramentas utilizadas durante o processo e também as ressalvas que devem ser levadas em conta na utilização do programa.

3. 1 Linguagens e ferramentas utilizadas

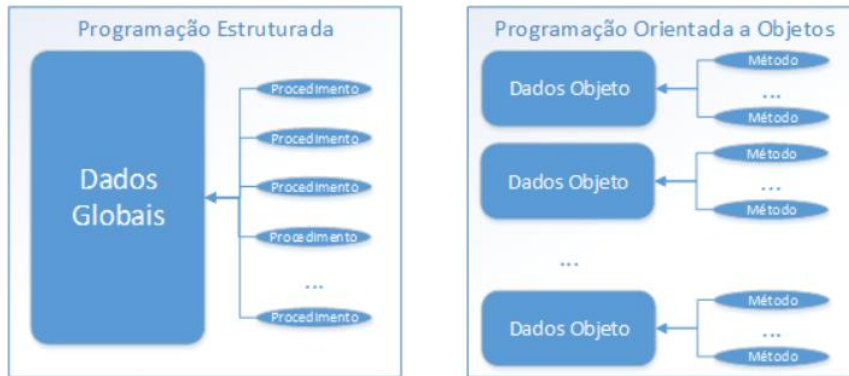
3. 1. 1 JavaScript

Flanagan (2002) salienta que JavaScript é uma linguagem de programação leve e interpretada orientada a objetos. A linguagem é amplamente utilizada por navegadores, tais como Google Chrome e Mozilla Firefox; além de permitir que o usuário interaja com o programa que está sendo utilizado.

Uma linguagem de programação interpretada é toda linguagem em que o código fonte é executado por um programa de computador chamado interpretador, e só então executado pelo sistema operacional (FISHER; GRODZINSKY, 1993).

Na Figura 14 é destacada uma comparação entre os métodos de programação estruturados e os métodos de programação voltados a objetos. A principal diferença entre os métodos é que na linguagem estruturada trabalha-se com dados globais, e na linguagem voltada a objetos implementa-se um conjunto de classes que definem os objetos presentes no sistema. Cada classe determina o comportamento e estados possíveis de seus objetos.

Figura 14 - Comparação entre os métodos de programação existentes.



Fonte: Bertoletti (2015).

3. 1. 2 HTML

HTML (*HyperText Markup Language*) é uma linguagem de marcação utilizada na construção de páginas da WEB (RAGGET, 1998). Os documentos criados pelo HTML podem ser interpretados por navegadores.

Linguagem de marcação é um sistema para anotação de textos de modo que eles sejam sintaticamente distinguíveis. Na Figura 15 é exposto como exemplo um trecho de código HTML.

Figura 15 - Exemplo de código em HTML.

```

25 </head>
26 <body text="#000000
   bgcolor="#FFFFFF">
27 <table width="1000"
28   <tr>
29     <td width="200"
30     </td>
31     <td valign="top"
32     <div align="center"
33     </div>
34     <p class="BodyText">
35     <h1 class="Header">
36     <p class="Caption">
Entertainment</a>
37     | <a href="http://www.

```

Fonte: Jensen (2006).

3. 1. 3 Ferramenta de texto

A ferramenta utilizada para a escrita do código foi a Brackets, desenvolvido pela Adobe Systems (Figura 16). A ferramenta é um editor de texto criado especialmente para editar HTML e JavaScript.

Figura 16 - Interface da ferramenta utilizada na programação.



```
D:/TCC/Javascript/3dplot/lines_drawing3.html (Getting Started) - Brackets
File Edit Find View Navigate Debug Help
Working Files
lines_drawing3.html
Unit1.pas
Getting Started
screenshots
index.html
main.css
1 <html>
2
3 <head>
4 <title>Desenho do casco e cálculo do RAO de embarcação a partir de tabela de cotas</title>
5 <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.6/css/bootstrap.min.css" integrity="sha384-1q8t30Asx"
6 <link href="https://fonts.googleapis.com/css?family=Open+Sans" rel="stylesheet" type="text/css">
7 <style type="text/css">
8 body {
9 font-family: 'Open Sans', Arial, sans-serif;
10 font-size: 13px;
11 background: #fff1f1;
12 }
13
14 header {
15 width: 100%;
16 background: #ddd;
17 padding: 20px;
18 }
19
20 h1 {
21 margin-top: 0;
22 }
23
24 .credits {
25 text-align: left;
26 margin-bottom: 20px;
27 }
28
29 .container {
30 width: 100%;
31 padding: 20px;
32 }
33
34 .parameters p input {
35 width: 85%;
36 margin-top: 4px;
37 }
38
```

Fonte: Autor (2017).

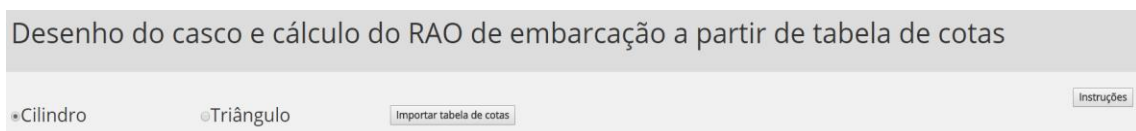
3. 2 Passo a passo

O código foi desenvolvido utilizando-se o editor de texto Brackets e as linguagens HTML e JavaScript. A utilização dessas ferramentas proporciona o uso do código em diferentes plataformas de navegação *online* através do acesso em nuvem. O HTML é responsável por todos os textos e gráficos impressos na página, assim como sua interface, enquanto que o JavaScript faz todos os cálculos necessários.

3. 2. 1 Dados de entrada

O usuário é responsável por fornecer os dados de entrada para os cálculos. Esses dados são as características geométricas da embarcação e devem estar em uma tabela de cotas salva no formato .csv⁸. Além disso, duas embarcações já estão incluídas no código e podem ser selecionadas pelo usuário para testar as funcionalidades do programa. Essas embarcações possuem formatos cilíndrico e triangular, respectivamente, e são utilizadas para a verificação dos resultados. Na Figura 17 é apresentado o trecho da interface responsável pela seleção inicial e importação da tabela de cotas a ser analisada.

Figura 17 - Layout da ferramenta computacional.



Fonte: Autor (2017).

Ao ser clicado o botão “Instruções” visto na Figura 18 é mostrado o texto visto na Figura 18.

Figura 18 - Instruções para utilização da ferramenta e modelo de tabela de cotas.

The screenshot shows a window titled "Tabela de cotas" with a "Fechar" button in the top right corner. The text inside the window explains that the program calculates hull characteristics using numerical techniques and that the draft table is a CSV file. It also provides instructions on how to use the program, including that it plots the hull plan, waterline, and 3D view, and calculates areas, buoyancy, and RAO. Below the text is a table of draft data.

Como usar o programa

O programa lê uma tabela de cotas na extensão .csv e plota o plano de balizas, plano de linhas d'água e vista 3d do casco. Além disso, as áreas das balizas, flutuação, superfície molhada e volume são calculadas. Para o cálculo do RAO, as forças de Froude-Krylov e difração das ondas, a massa adicional e o amortecimento são calculados e plotados em função da frequência da onda incidente. Abaixo segue exemplo de uma tabela de cotas:

half-breadths	0	10.2	20.4	30.6	40.8	51	61.2	71.4	81.6	91.8	102
18 Waterli	3.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	3.21	7.92	10.13	11.15	-	-	-	-	-	-	-
14	2.41	7.36	9.93	11.1	11.39	11.4	11.26	11.07	10.84	10.53	10.09
12	1.58	6.26	9.2	10.7	11.19	11.32	11.21	11.02	10.76	10.45	10.02
10	0.97	5.19	8.39	10.21	10.93	11.17	11.05	10.84	10.59	10.27	9.84
8	0.46	4.07	7.43	9.63	10.64	10.98	10.87	10.66	10.41	10.07	9.65
6	0	2.94	6.25	8.81	10.15	10.65	10.56	10.32	9.97	9.56	9.04
4	-	1.8	4.6	7.23	8.88	9.65	9.67	9.25	8.5	7.27	3.08
2	-	0.72	2.44	4.44	5.85	6.39	5.46	0.8	-	-	-
0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2017).

⁸ Comma-separated values. Converte tabelas em textos.

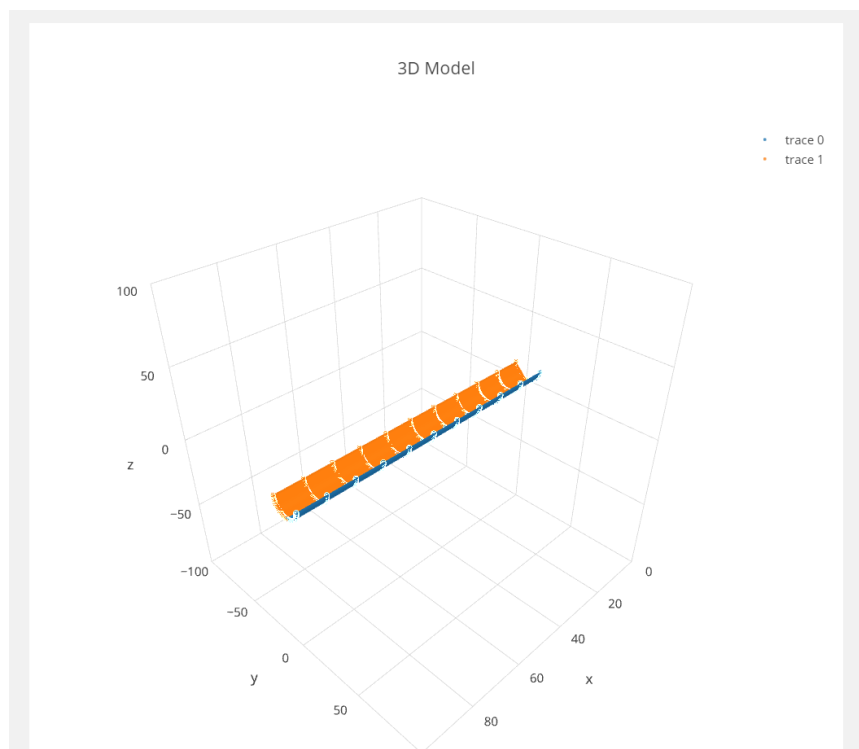
3. 2. 2 Processamento

Após o código fazer a leitura dos dados de entrada, o processamento é iniciado. Nesta etapa, vetores com as coordenadas da embarcação (respeitando o sistema de coordenadas apresentado no Capítulo 2; x para a posição longitudinal, y para a posição transversal e z para a posição vertical) são criados para o desenho 3D; além da representação do plano de balizas e plano de linhas d'água.

3. 2. 2. 1 Representação 3D

O desenho 3D da embarcação se torna possível graças a uma biblioteca disponibilizada para JavaScript, chamada Plotly.js, que se destina justamente a representar gráficos e superfícies 3D. Na Figura 19 é mostrada a representação do cilindro descrito por meio de tabela de cotas e representado usando a biblioteca Plotly.js.

Figura 19 - Cilindro representado tridimensionalmente.



Fonte: Autor (2017).

3. 2. 2. 2 Plano de balizas e plano de linhas d`água

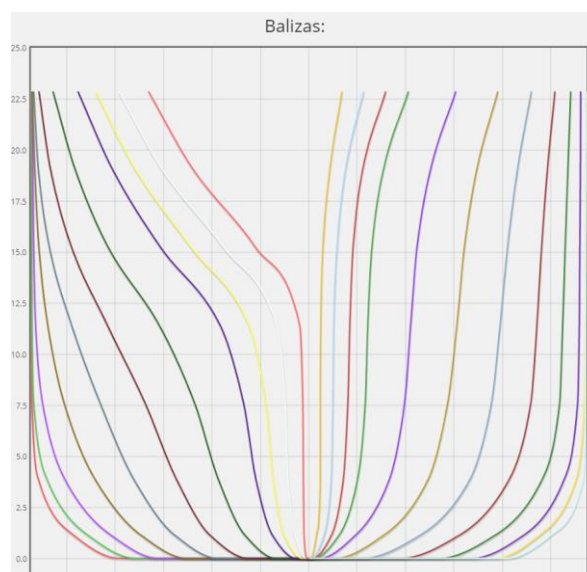
Somente utilizando as coordenadas presentes na tabela de cotas, os cálculos realizados para as áreas de superfície molhada, área das balizas, área de flutuação e volume apresentariam resultados com pouca exatidão, pois as distâncias entre os pontos são consideravelmente grandes e muitas curvas presentes no navio seriam desconsideradas. Para contornar esse problema, um método de ajuste utilizando funções monótonas cúbicas foi utilizado.

Na área da matemática, uma função monótona é toda função que não apresenta inversão de tendência, ou seja, sempre cresce ou sempre decresce (GRÄTZER, 1971). Na análise numérica, a interpolação monótona cúbica é uma variante da interpolação cúbica que preserva a não inversão dos dados a serem interpolados (FRITCH; CARLSON, 1980).

Em um navio, dificilmente o contorno de uma baliza apresentará inversão (exceto nas seções dos bulbos), o que sinaliza que o método pode ser utilizado para uma vasta gama de embarcações. A biblioteca *CurvedLines.js* é utilizada para a interpolação do contorno das balizas (ZINSMAIER, 2017).

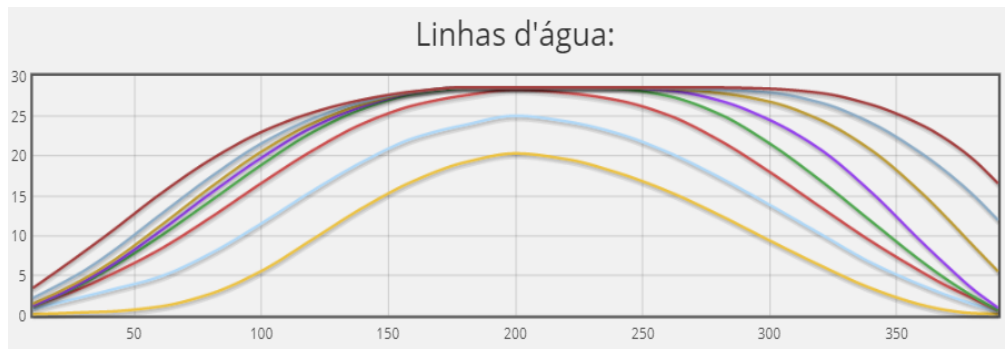
As Figuras 20-21 mostram o plano de balizas e o plano de linhas d`água, respectivamente, para a embarcação da Série 60 com CB de 0,70, gerado a partir do programa desenvolvido. A tabela de cotas pode ser vista no Anexo B.

Figura 20 - Plano de balizas gerado pela ferramenta.



Fonte: Autor (2017).

Figura 21 - Plano de linhas d'água gerado pela ferramenta.



Fonte: Autor (2017)

3. 2. 2. 4 Área de superfície molhada

A área de superfície molhada (Equação 37) é calculada pelo somatório do produto do perímetro de cada baliza pela distância entre balizas.

$$A_{WS} = \sum_0^{n_{balizas}-1} P_{baliza} * (x_{baliza+1} - x_{baliza}) \quad (37)$$

O número de balizas utilizado é igual ao número de balizas presente na tabela de cotas a ser importada.

Süli e Mayers (2003) apresentam uma introdução para a análise e solução de problemas utilizando integração numérica. A Regra dos Trapézios é usada para o cálculo do perímetro de cada baliza. O perímetro é representado pela Equação 38.

$$P_{baliza} = 2 \sum_0^{i-1} \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (38)$$

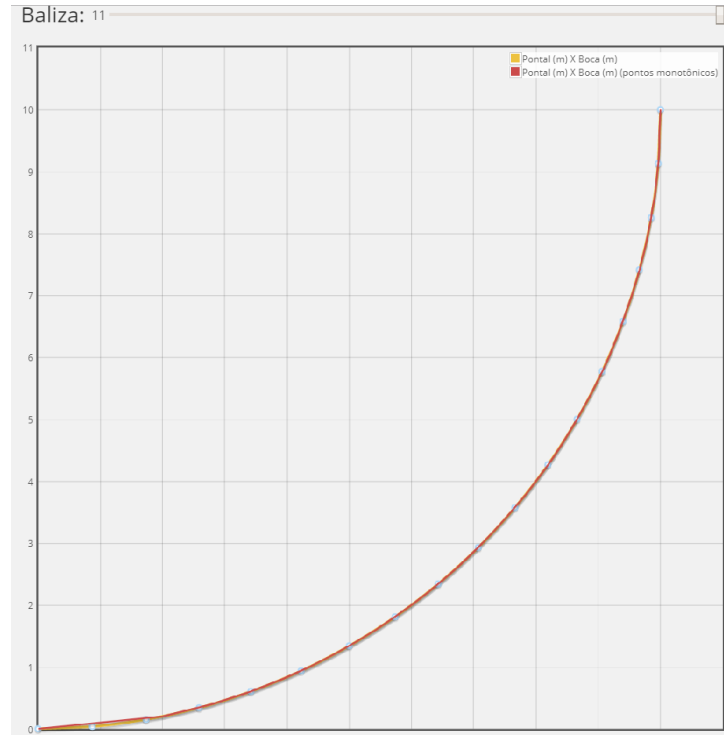
A partir do método de interpolação monótona cúbica, 500 pontos são criados entre cada duas linhas d'água sucessivas. Após a criação desses pontos para todo o perímetro da baliza, um número final de cinquenta cotas z é varrido para cada baliza. Essas cotas são varridas respeitando a Equação 39:

$$z_i = z_{i-1} + \frac{d}{50} \quad (39)$$

Onde d é o pontal da embarcação.

Na Figura 22 é mostrada uma comparação entre a curva real e a aproximação por trechos de retas a partir das cotas z selecionadas para a embarcação com formato cilíndrico.

Figura 22 – Comparação entre curva real e pontos monótonos.



Fonte: Autor (2017)

3. 2. 2. 3 Área das balizas e volume

Para o cálculo da área das balizas, utilizou-se a Regra dos Trapézios (Equação 40). O volume da embarcação é calculado como sendo a integração das áreas das balizas ao longo do comprimento da embarcação (Equação 41)

$$A_{baliza} = 2 \sum_0^{i-1} \left(\frac{1}{2} * (y[i] + y[i + 1]) * (z[i + 1] - z[i]) \right) \quad (40)$$

$$V = \int_{-L/2}^{L/2} A_{baliza} * dx = \sum_0^{n_{balizas}-1} A_{baliza} * (x_{baliza+1} - x_{baliza}) \quad (41)$$

3. 2. 2. 5 Área de flutuação

A área de flutuação é necessária nos cálculos do RAO de *heave*, pois é usada no cálculo da rigidez do movimento. Para cada cota z (linha d'água), a área é calculada pela Equação 42.

$$A_{WL} = \sum_0^{j-1} \left(\frac{1}{2} * (y[j] + y[j + 1]) * (x[j + 1] - x[j]) \right) \quad (42)$$

3. 2. 3 Pós processamento

Nesta etapa, são calculados e apresentados as forças, a massa adicional, o amortecimento e o RAO de *heave* utilizando as equações discutidas no Capítulo 2.

3. 3 Ressalvas e restrições

As seguintes restrições do código devem ser observadas:

1. Todos os cálculos são feitos apenas para o movimento de *heave* da embarcação;
2. A velocidade de avanço não é considerada nos cálculos;
3. O ângulo de aproximação das ondas também não é considerado, utilizando-se apenas ondas em *head sea*⁹;
4. Para os cálculos do RAO e forças, apenas a parte submersa é considerada e apenas 1 calado é possível;
5. Para o cálculo da área de flutuação, o L_{pp} da embarcação é usado;
6. Para cada baliza, não importando o barco, 50 pontos são criados a partir dos dados fornecidos pela tabela de cotas e utilizando as funções monótonas;
7. O movimento de *heave* é considerado desacoplado.

⁹ Ondas vindo de proa.

4 RESULTADOS E VERIFICAÇÕES

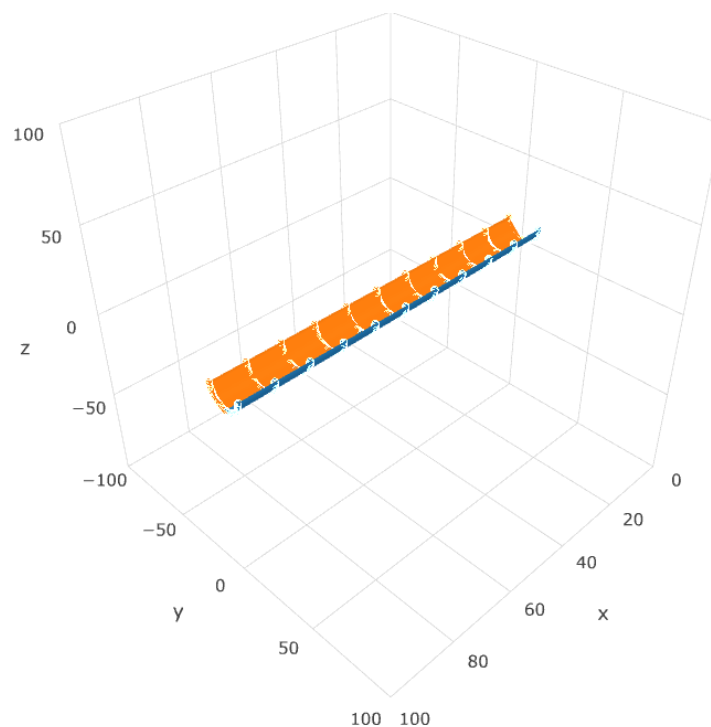
Este capítulo é dividido em duas seções. Na primeira, os resultados obtidos para o cilindro são comparados com resultados dos programas AQWA e MAXSURF. Na segunda seção, os valores do RAO obtido para uma embarcação da série 60 com CB de 0,70 são mostrados em um gráfico juntamente com os valores obtidos utilizando o programa MAXSURF. Os resultados para um terceiro estudo de caso (triângulo) estão presentes no Apêndice A.

4.1 Estudo de caso 1: Cilindro

4.1.1 Geometria

A geometria do cilindro pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 - Geometria gerada pela ferramenta para o cilindro.



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 3 mostra os parâmetros iniciais utilizados para o cilindro:

Tabela 3 - Parâmetros iniciais das geometrias.

Calado (m)	10
Boca (m)	20
Comprimento (m)	100

Fonte: Autor (2017).

4. 1. 2 Áreas e volume

Na Tabela 4 são mostrados os valores calculados e os valores analíticos para o cilindro.

Tabela 4 - Comparação entre valores calculados e analíticos para o cilindro.

Parâmetro	Valores analíticos	Valores calculados
Área das balizas (m^2)	157	156
Área superfície molhada (m^2)	3141	3141
Volume (m^3)	15707	15692
Área de flutuação (m^2)	2000	2000

Fonte: Autor (2017).

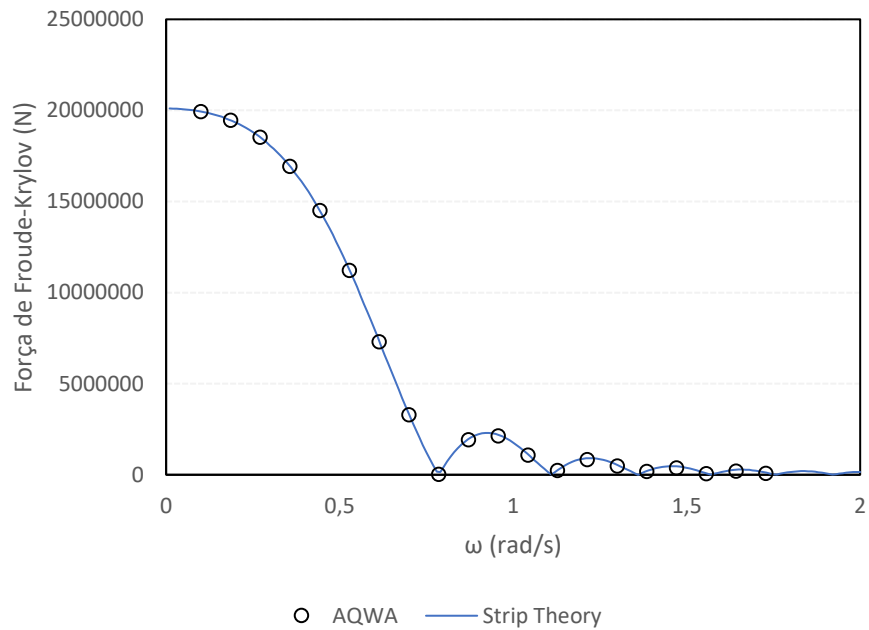
4. 1. 3 Resultados

4. 1. 3. 1 Forças, massa adicional e amortecimento

Nas Figuras 24 e 25 são mostrados os resultados obtidos pelo programa para as forças de Froude-Krylov e de difração, respectivamente. Esses resultados são comparados com valores obtidos pelo AQWA.

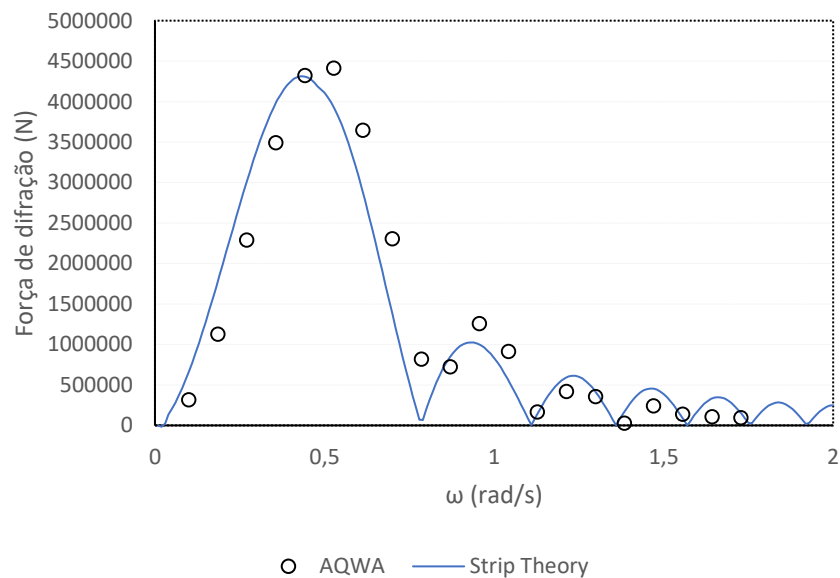
O AQWA é utilizado para essa comparação, pois divide a força total da mesma maneira que o programa desenvolvido.

Figura 24 - Comparação dos resultados obtidos para a força de Froude-Krylov.



Fonte: Autor (2017).

Figura 25 - Comparação dos resultados obtidos para a força de difração.

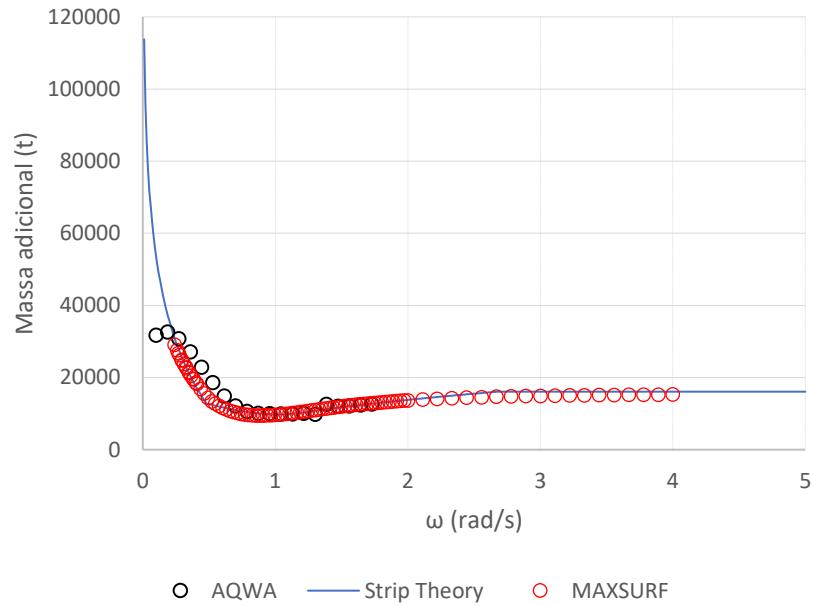


Fonte: Autor (2017).

Como era esperado, o método encontrou resultados muito bons para a força de Froude-Krylov. Resultados bem próximos aos calculados no AQWA também foram encontrados para a força de difração.

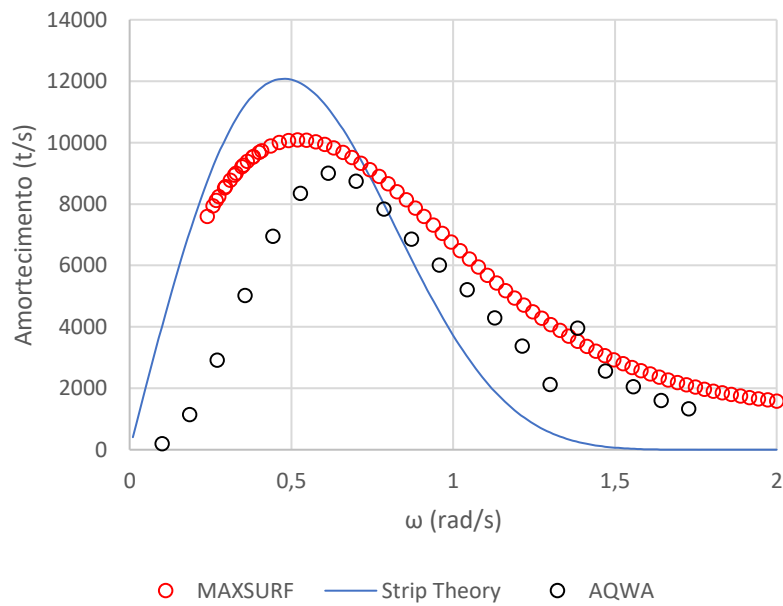
A massa adicional e o amortecimento foram comparados com os resultados obtidos pelo MAXSURF e pelo AQWA. Esses resultados podem ser vistos nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos para a massa adicional.



Fonte: Autor (2017).

Figura 27 - Comparação dos resultados obtidos para o amortecimento.

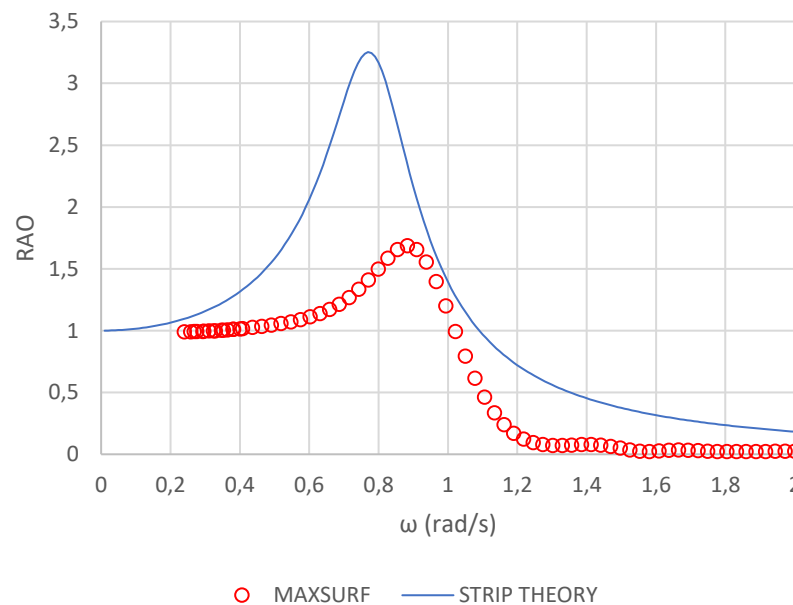


Fonte: Autor (2017).

4. 1. 3. 2 RAO

Na Figura 28 é apresentada uma comparação entre o RAO obtido através do MAXSURF com o RAO obtido pela ferramenta.

Figura 28 - Comparação entre os RAOs.



Fonte: Autor (2017).

O amortecimento possui papel importantíssimo no RAO. Ao observar a Figura 27, nota-se uma diferença entre os amortecimentos obtidos pelo código desenvolvido e pelo amortecimento obtido pelo programa MAXSURF. É possível observar também uma diferença na frequência ressonante.

O programa MAXSURF considera movimentos acoplados em seus cálculos. No caso de *heave*, o movimento está acoplado com o movimento de *pitch*. Esse pode ser outro possível motivo para a diferenças mostradas na Figura 28.

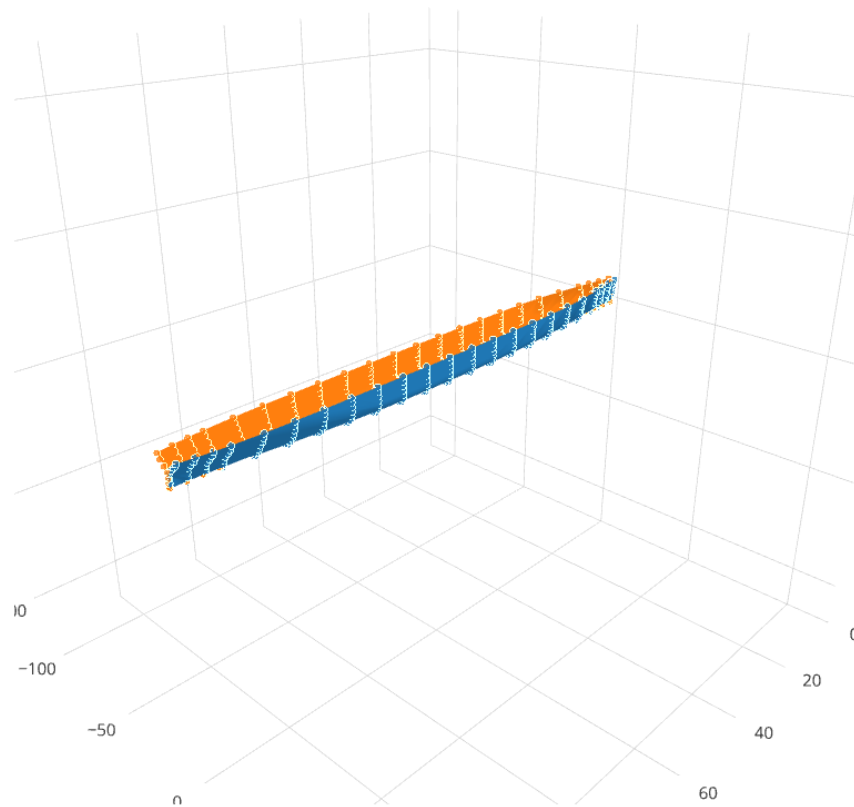
4. 2 Estudo de caso 2: Série 60 (CB = 0,70)

Nesta seção, a tabela de cotas de um navio presente na série 60 foi importada e os resultados detalhados.

4. 2. 1 Geometria

A Figura 29 mostra a geometria do navio.

Figura 29 - Geometria gerada pela ferramenta para o navio.



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 5 mostra os parâmetros iniciais:

Tabela 5 - Parâmetros do navio.

Pontal (m)	10,45
Boca (m)	17,4
Comprimento (m)	119

Fonte: Autor (2017).

4. 2. 2 Áreas e volume

A Série 60 fornece dados sobre suas embarcações. A comparação entre os valores calculados pelo programa e os valores obtidos da Série é apresentada na Tabela 6.

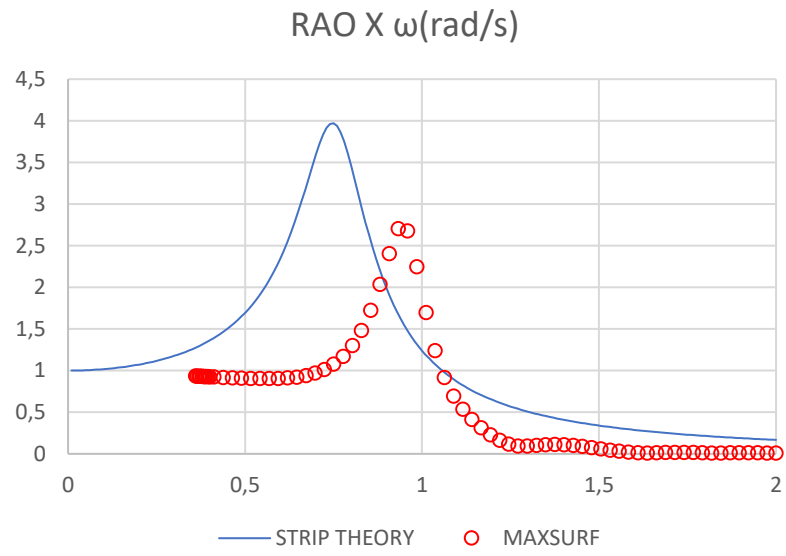
Tabela 6 - Comparação dos valores da Série 60 com os obtidos pelo programa.

Parâmetro	Valor real	Valor calculado
Volume (m^3)	10364	10373
Área superfície molhada (m^2)	3180	2884
Área flutuação (m^2)	1727	1739

Fonte: Autor (2017).

4. 2. 3 Resultados

A Figura 30 mostra o RAO de *heave* calculado para esse navio.

Figura 30 - Movimento de *heave* calculado e plotado para o navio da Série 60.

Fonte: Autor (2017).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de calcular o RAO de *heave* de embarcações a partir de suas tabelas de cotas, além de permitir a representação 3D das embarcações. Para atingir o objetivo foi utilizado o cálculo de forças e coeficientes hidrodinâmicos com base na *Strip Theory* linear e também o cálculo de características geométricas dos navios, como o volume, a área de superfície molhada e a área de flutuação. Depois de desenvolver e verificar os resultados encontrados nos capítulos anteriores, algumas conclusões podem ser feitas.

Os resultados obtidos para o RAO sofrem grande influência dos parâmetros da massa adicional e do amortecimento. Isso pode ser visto na comparação feita para os RAOs do cilindro e da embarcação da Série 60.

A utilização da *Strip Theory* mostra-se adequada para o cálculo das forças e coeficientes hidrodinâmicos. A força de Froude-Krylov e a massa adicional demonstram resultados consistentes.

As maiores diferenças podem ser observadas na comparação do amortecimento. Utilizando as fórmulas propostas por Tasai (1958) para o cálculo, os maiores valores calculados por ambos os métodos (*Strip Theory*, MAXSURF e AQWA) se aproximam, mas se distinguem na frequência de oscilação em que ocorrem.

As características geométricas do navio influenciam de forma substancial no cálculo de RAO. Percebe-se que o método utilizado para o cálculo dessas características é eficaz para formas mais complexas que um cilindro e um triângulo. O estudo de caso 2 exemplifica o navio da Série 60 com CB de 0,70. Com exceção da área de superfície molhada, as outras características apresentam erros menores que 1%. A criação de mais balizas entre as balizas importadas seria uma possível maneira de mitigar esse problema. Ao fazer isso, as formas curvas dos navios são melhor representadas.

A Tabela 7 mostra um comparativo entre os valores calculados e os valores fornecidos na Série 60.

Tabela 7 - Comparativo entre valores calculados pelo programa e valores da Série 60.

Parâmetro	Valor real	Valor calculado	Erro (%)
Volume (m^3)	10364	10373	0,001
Área superfície molhada (m^2)	3180	2884	10,3
Área flutuação (m^2)	1727	1739	0,07

Fonte: Autor (2017).

O método de mapeamento entre planos utilizado, Lewis, mostrou-se de fácil implementação e realista para balizas com formas não complexas. O uso de um método de mapeamento mais complexo, como o *close-fit*, resolveria o problema de Lewis não ser capaz de mapear formas reentrantes, assimétricas e bulbosas. O ponto negativo da utilização de um método que considera mais parâmetros é o aumento considerável no tempo de processamento.

Por fim, nota-se que o código desenvolvido pode ser uma ferramenta útil para uma estimativa do RAO de *heave* nas fases iniciais de projeto. Além disso, os resultados obtidos para as características geométricas também são consistentes e o desenho 3D é um importante diferencial.

5. 1 Recomendações para trabalhos futuros

O código desenvolvido mostra-se uma boa ferramenta para o cálculo do RAO de *heave* e para o desenho 3D das embarcações a partir de suas tabelas de cotas. As recomendações para trabalhos futuros focam em melhorias que podem ser aplicadas à ferramenta e assim expandir suas funcionalidades.

Algumas dessas melhorias incluem:

- A incorporação de velocidade de avanço nos cálculos;
- A inclusão de mais ângulos de aproximação das ondas;
- A inclusão de uma caixa de texto onde o usuário pode digitar o calado a ser considerado para os cálculos;
- A divisão da embarcação em mais balizas;
- A divisão das balizas em mais pontos para a perfeita representação de formas mais complexas;

- A utilização de um método de mapeamento com mais coeficientes;
- A consideração de diferentes profundidades de mar;

REFERÊNCIAS

- BERTOLETTI, A. P. **Engenharia de Software**. 2015. Disponível em: <
<https://www.slideshare.net/apbertoletti/engenharia-de-software-unimeppronatec-aula-14>>.
 Acesso em: 12 out. 2017.
- CALQLATA. **RAO Calculator**. 2011. Disponível em: <
<http://www.calqlata.com/productpages/00081-help.html>>. Acesso em: 01 out. 2017.
- CHUBB. **Navegando em águas seguras**. 2017. Disponível em: <
<http://chubb.lat/asegurados/pt/2017/04/08/navegando-en-aguas-seguras>>. Acesso em: 30 out
 2017
- FALTINSEN, O. M. **Sea Loads on Ships and Offshore Structures**. Cambridge: Cambridge
 University Press, 1993.
- FALTINSEN, O. M., SVENSEN, T. Incorporation of Seakeeping theories in CAD. In:
 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CFD AND CAD IN SHIP DESIGN, 1, 1990.
 Wageningen (Países Baixos). **Anais...** Amsterdã: Elsevier Science, 1990. 147 p.
- FLANAGAN, D. **JavaScript: The Definitive Guide**. 4 ed. Sebastopol (Califórnia): O`Reilly
 Media, 2002.
- FISHER, A. E., GRODZINSKY, F. S. **The Anatomy of Programming Languages**.
 Englewood Cliffs (Nova Jérsei): Prentice Hall, 1993.
- FRITCH, F. N., CARLSON, R. E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation”. **SIAM Journal
 of Numerical Analysis**. SIAM, v. 17, p. 238 – 246. 1980.
- GERRISTSMA, J., BEUKELMAN, W. **The Distribution of the Hydrodynamic Forces on
 a Heaving and Pitching Shipmodel in Still Water**. Delft: Shipbuilding Laboratory, 27 p.,
 1964. (Report 124).
- GRAHAM, R. Motion-Induced Interruptions as Ship Operability Criteria. **Naval Engineers
 Journal**, Alexandria (Virgínia), American Society of Naval Engineers, v. 102, p. 65 – 71,
 mar. 1990.
- GRÄTZER, G. **Lattice Theory: First Concept and Distributive Lattices**. Nova Iorque:
 Macmillan Learning, 1971.
- GOURLEY, T *et al.* Comparison of AQWA, GL Rankine, MOSES, OCTOPUS, PDSTRIP
 and WAMIT with model test results for cargo ship wave-induced motions in shallow water.
 In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC
 ENGINEERING, 34, 2015. St. John`s (Canadá). **Anais...** Nova Iorque: American Society of
 Mechanical Engineers, 2015. 10 p.
- GRIM, O. Berechnung der durch Schwingungen eines Schiffskörpers erzeugten
 hydrodynamischen Kräfte. **Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gessellschaft**. Berlim,
 STG, v. 47, p. 277 – 299, 1953.
- JENSEN, D. **Trecho de Código HTML**. 2006. Disponível em: <
<https://pt.wikipedia.org/wiki/HTML#/media/File:Html-source-code2.png>>. Acesso em: 20
 out. 2017.

JENSEN, J. J., PEDERSEN, P. T. Wave-induced Bending Moments in Ships – A Quadratic Theory. **Royal Institute of Naval Architects Supplementary Papers**, Londres, The Royal Institute Publishing, v. 121, p. 151 – 165, abr. 1978.

JOURNÉE, J. M. J. **Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves**. Delft: Ship Hydromechanics Laboratory, 99 p., 1992. (Report 0909).

JOURNÉE, J. M. J. **Theoretical Manual of SEAWAY**. Delft: Ship Hydromechanics Laboratory, 290 p., 2001. (Report 1216a).

KERCZEK, C., TUCK, E. O. The Representation of Ship Hulls by Conformal Mapping Functions. **Journal of Ship research**, Alexandria (Virgínia), SNAME, v. 13, p. 284 – 298, 1969.

KORVIN-KROUKOVSKY, B. V., JACOBS, W. R. Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves. In: ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS, 65, 1957. Nova Iorque. **Anais...** Nova Iorque: SNAME, 1957. 43 p.

LEWIS, F. M. The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship. In: ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS, 1929. Nova Iorque. **Anais...** Nova Iorque: SNAME, 1929. 25 p.

MATTOS, J. H. V., **Análise de Carregamento Hidrodinâmico em Estruturas Flutuantes**. 2012. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/volpini/anlise-de-carregamento-hidrodinamico-parte-ii>>. Acesso em: 25 set. 2017.

NEWMAN, J. N. The Quest for a Three-Dimensional Theory of Ship-Wave Interactions. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Londres, The Royal Society Publishing, v. 334, p 213 – 227, 1997.

PEDERSEN, P. T. **Wave Load Prediction – a Design Tool**. Tese (Doutorado) – Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 2000.

PETERSEN, J. B. **Non-Linear Strip Theories for Ship Response in Waves**. Tese (Doutorado) – Department of Ocean Engineering, Technical University of Denmark, 1992.

PLOTLY. **What is Plotly.js?** 2017. Disponível em: <<https://plot.ly/javascript/>>. Acesso em: 02 set. 2017.

RAGGET, D. **A History of HTML**. 1998. Disponível em: <<https://www.w3.org/People/Raggett/book4/ch02.html>>. Acesso em: 15 out. 2017.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SALVESEN, N., TUCK, E. O., FALTINSEN, O. M. Ship Motions and Sea Loads. In: ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS, 78, 1970. Nova Iorque. **Anais...** Nova Iorque: SNAME, 1970, 37 p.

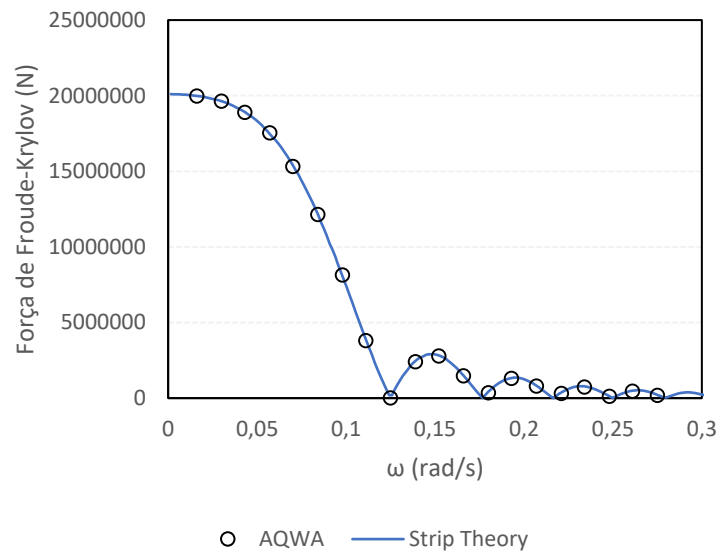
SINCOMAN. **Navio perde mais de 500 contêineres em mar agitado**. 2014. Disponível em: <<http://www.sincomam.com.br/index.php/navio-perde-mais-de-500-conteineres-em-mar-agitado/>>. Acesso em 30 out. 2017.

- SKANDALI, D. **Identification of response amplitude operators for ships based on full scale measurements**. Dissertação (Mestrado) – Department of Ship and Offshore Structures, Delft University of Technology, 2015.
- SÜLI, E., MAYERS, D. F. **An Introduction to Numerical Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- TASAI, F. **On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching**. Kyushu University: Research Institute for Applied Mechanics, 10 p., 1959. (v. VII, n. 26).
- TECHET, A. **Design Principles for Ocean Vehicles**. 2005. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-22-design-principles-for-ocean-vehicles-13-42-spring-2005/>>. Acesso em: 05 out. 2017.
- URSELL, F. On the Heaving Motion of a Circular Cylinder on the Surface of a Fluid. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**. Oxford, Oxford University Press, v. 2, p. 218 – 231, 1949.
- YANAMOTO, Y. *et al.* Wave Loads and Response of Ships and Offshore Structures from the Viewpoint of Hydroelasticity. In: ADVANCES IN MARINE STRUCTURES CONFERENCE, 1986. Dumfermline (Escócia). **Anais...** Dumfermline: Admiralty Research Establishment, maio 1986. 15 p.
- ZINSMAIER, M. **CurvedLines**. 2017. Disponível em: <<https://github.com/MichaelZinsmaier/CurvedLines>>. Acesso em: 20 set. 2017.

APÊNDICE A: Estudo de caso: triângulo

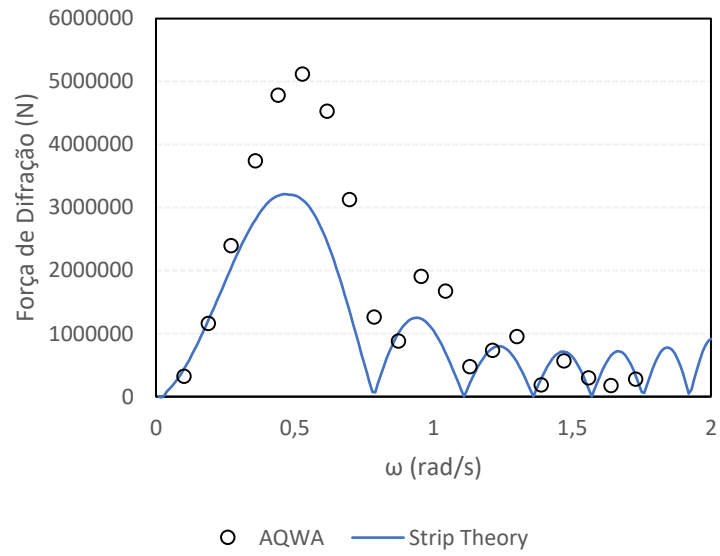
As Figuras 31-34 comparam os valores das forças de Froude-Krylov e difração, da massa adicional e do amortecimento obtidos pelo código, com valores calculados usando os programas AQWA e MAXSURF para um triângulo com mesmas dimensões e em mesmas condições ambientais (*head sea*, águas profundas e velocidade de avanço nula).

Figura 31 - Comparação dos resultados obtidos para a força de Froude-Krylov.



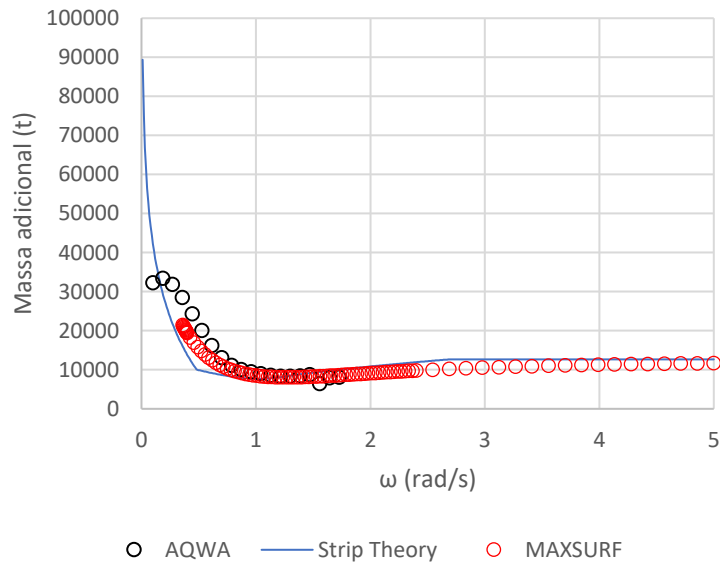
Fonte: Autor (2017).

Figura 32 - Comparação dos resultados obtidos para a força de difração.



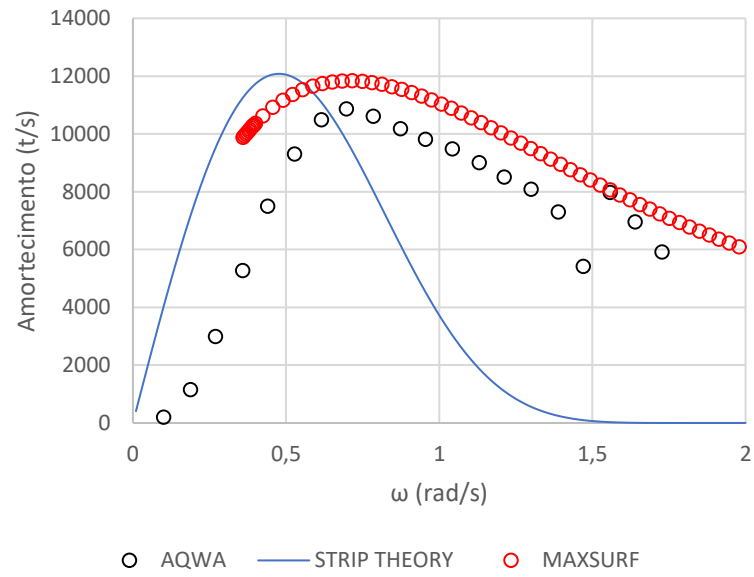
Fonte: Autor (2017).

Figura 33 - Comparação dos resultados obtidos para a massa adicional.



Fonte: Autor (2017).

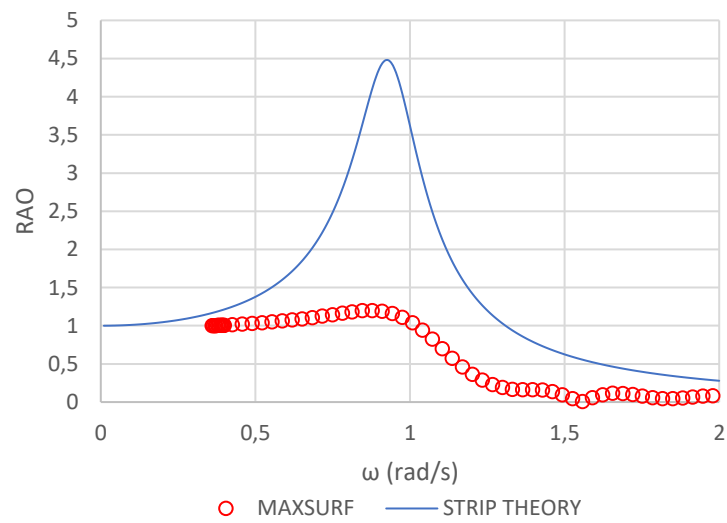
Figura 34 - Comparação dos resultados obtidos para o amortecimento.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 35 mostra os valores para o RAO.

Figura 35 - Comparação entre os RAOs.



Fonte: Autor (2017).

ANEXO A: Requisitos para o potencial de velocidades.

Texto retirado de Journée (2001).

10

CHAPTER 2. STRIP THEORY METHOD

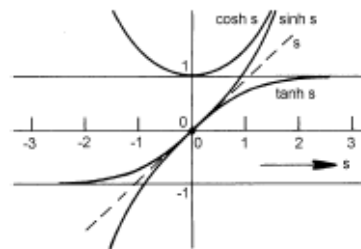


Figure 2.3: Hyperbolic Functions Limits

2.2.2 Laplace Equation

This continuity condition results in the Laplace equation for potential flows:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (2.15)$$

Water particles move here in the x - z plane only, so in the equations above:

$$v = \frac{\partial \Phi_w}{\partial y} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} = 0 \quad (2.16)$$

Taking this into account, a substitution of equation 2.10 in equation 2.15 yields a homogeneous solution of this equation:

$$\frac{d^2 P(z)}{dz^2} - k^2 P(z) = 0 \quad (2.17)$$

with as solution for $P(z)$:

$$P(z) = C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz} \quad (2.18)$$

Using this result from the first boundary condition, the wave potential can be written now with two unknown coefficients as:

$$\Phi_w(x, z, t) = (C_1 e^{+kz} + C_2 e^{-kz}) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.19)$$

in which:

$\Phi_w(x, z, t)$	=	wave potential (m^2/s)
e	=	base of natural logarithms (-)
C_1, C_2	=	as yet undetermined constants (m^2/s)
k	=	wave number ($1/\text{m}$)
t	=	time (s)
x	=	horizontal distance (m)
z	=	vertical distance, positive upwards (m)
ω	=	wave frequency ($1/\text{s}$)

2.2.3 Sea Bed Boundary Condition

The vertical velocity of water particles at the sea bed is zero (no-leak condition):

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{for: } z = -h \quad (2.20)$$

Substituting this boundary condition in equation 2.19 provides:

$$kC_1 e^{-kh} - kC_2 e^{+kh} = 0 \quad (2.21)$$

By defining:

$$C = 2C_1 e^{-kh} = 2C_2 e^{+kh} \quad (2.22)$$

or:

$$C_1 = \frac{C}{2} e^{+kh} \quad \text{and} \quad C_2 = \frac{C}{2} e^{-kh} \quad (2.23)$$

it follows that $P(z)$ in equation 2.18 can be worked out to:

$$\begin{aligned} P(z) &= \frac{C}{2} (e^{+k(h+z)} + e^{-k(h+z)}) \\ &= C \cosh k(h+z) \end{aligned} \quad (2.24)$$

and the wave potential with only one unknown becomes:

$$\Phi_w(x, z, t) = C \cdot \cosh k(h+z) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.25)$$

in which C is an (as yet) unknown constant.

2.2.4 Free Surface Dynamic Boundary Condition

The pressure, p , at the free surface of the fluid, $z = \zeta$, is equal to the atmospheric pressure, p_0 . This requirement for the pressure is called the dynamic boundary condition at the free surface.

The Bernoulli equation for an instationary irrotational flow (with the velocity given in terms of its three components) is in its general form:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (2.26)$$

In two dimensions, $v = 0$ and since the waves have a small steepness (u and w are small), this equation becomes:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (2.27)$$

At the free surface this condition becomes:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{p_0}{\rho} + g\zeta = 0 \quad \text{for: } z = \zeta \quad (2.28)$$

The constant value p_0/ρ can be included in $\partial \Phi_w / \partial t$; this will not influence the velocities being obtained from the potential Φ_w . With this the equation becomes:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{for: } z = \zeta \quad (2.29)$$

The potential at the free surface can be expanded in a Taylor series, keeping in mind that the vertical displacement ζ is relatively small:

$$\begin{aligned} \{\Phi_w(x, z, t)\}_{z=\zeta} &= \{\Phi_w(x, z, t)\}_{z=0} + \zeta \cdot \left\{ \frac{\partial \Phi_w(x, z, t)}{\partial z} \right\}_{z=0} + \dots \\ \left\{ \frac{\partial \Phi_w(x, z, t)}{\partial t} \right\}_{z=\zeta} &= \left\{ \frac{\partial \Phi_w(x, z, t)}{\partial t} \right\}_{z=0} + O(\varepsilon^2) \end{aligned} \quad (2.30)$$

which yields for the linearized form of the free surface dynamic boundary condition:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{for: } z = 0 \quad (2.31)$$

With this, the wave profile becomes:

$$\zeta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \quad \text{for: } z = 0 \quad (2.32)$$

A substitution of equation 2.10 in equation 2.32 yields the wave profile:

$$\zeta = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.33)$$

or:

$$\zeta = \zeta_a \cdot \cos(kx - \omega t) \quad \text{with: } \zeta_a = \frac{\omega C}{g} \cdot \cosh kh \quad (2.34)$$

With this the corresponding wave potential, depending on the water depth h , is given by the relation:

$$\Phi_w = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.35)$$

or when ωt is the first of the sine function arguments, as generally will be used in ship motion equations:

$$\Phi_w = \frac{-\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.36)$$

In deep water, the expression for the wave potential reduces to:

$$\Phi_w = \frac{-\zeta_a g}{\omega} \cdot e^{kz} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (\text{deep water}) \quad (2.37)$$

2.2.5 Free Surface Kinematic Boundary Condition

So far the relation between the wave period T and the wave length, λ , is still unknown. The relation between T and λ (or equivalently ω and k) follows from the boundary condition that the vertical velocity of a water particle in the free surface of the fluid is identical to the vertical velocity of that free surface itself (no-leak condition); this is a kinematic boundary condition.

Using the equation of the free surface 2.34 yields:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{for the wave surface: } z = \zeta \\ &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \cdot \frac{d\zeta}{dx} \end{aligned} \quad (2.38)$$

The second term in this expression is a product of two values, which are both small because of the assumed small wave steepness. This product becomes even smaller (second order) and can be ignored, see figure 2.4.

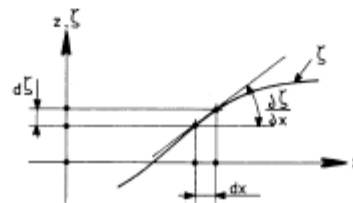


Figure 2.4: Kinematic Boundary Condition

This linearization provides the vertical velocity of the wave surface:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{for the wave surface: } z = \zeta \quad (2.39)$$

The vertical velocity of a water particle in the free surface is then:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{for } z = 0 \quad (2.40)$$

Analogous to equation 2.31 this condition is valid for $z = 0$ too, instead of for $z = \zeta$ only. A differentiation of the free surface dynamic boundary condition (equation 2.31) with respect to t provides:

$$\frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad \text{for } z = 0 \quad (2.41)$$

or after re-arranging terms:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad \text{for } z = 0 \quad (2.42)$$

Together with equation 2.39 this delivers the free surface kinematic boundary condition or the Cauchy-Poisson condition:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad \text{for: } z = 0 \quad (2.43)$$

ANEXO B: Tabela de cotas da embarcação da Série 60 com CB 0,70.

Figura 36: Tabela de cotas Série 60 (CB = 0,70)

Table 5 – Table of Offsets—Parent Forms—0.70 Block Coefficient
(Half-breadths of waterlines given as fraction of maximum beam on each waterline)

Model = 4212W
W.L. 1.00 is the designed load waterline

Forebody prismatic coefficient = 0.721
Afterbody prismatic coefficient = 0.698
Total prismatic coefficient = 0.710

Sta.	Tan.	Waterlines								Area as fraction of max. area to 1.00 W.L.
		0.075	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50		
FP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.051	0.000	
1/2	0.009	0.049	0.072	0.081	0.086	0.094	0.119	0.176	0.076	
1	0.026	0.110	0.158	0.177	0.184	0.194	0.229	0.299	0.165	
1 1/2	0.054	0.183	0.252	0.281	0.294	0.310	0.350	0.421	0.266	
2	0.100	0.266	0.350	0.389	0.407	0.430	0.472	0.536	0.370	
3	0.239	0.450	0.550	0.599	0.627	0.655	0.689	0.734	0.579	
4	0.437	0.625	0.724	0.778	0.802	0.827	0.851	0.877	0.755	
5	0.646	0.783	0.856	0.904	0.920	0.935	0.948	0.961	0.882	
6	0.830	0.896	0.942	0.971	0.980	0.985	0.990	0.992	0.958	
7	0.939	0.970	0.984	0.994	0.998	1.000	1.000	1.000	0.990	
8	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	
9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
11	1.000	0.997	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	
12	0.961	0.978	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.994	
13	0.856	0.917	0.958	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	0.977	
14	0.705	0.815	0.887	0.957	0.980	0.991	0.998	1.000	0.930	
15	0.532	0.675	0.768	0.868	0.927	0.961	0.985	0.998	0.844	
16	0.344	0.510	0.605	0.726	0.825	0.897	0.950	0.982	0.713	
17	0.186	0.338	0.427	0.533	0.658	0.788	0.881	0.939	0.543	
18	0.077	0.192	0.245	0.314	0.425	0.614	0.765	0.854	0.343	
18 1/2	0.042	0.126	0.165	0.207	0.292	0.499	0.680	0.789	0.239	
19	0.023	0.070	0.089	0.107	0.164	0.368	0.572	0.704	0.140	
19 1/2	0.014	0.022	0.022	0.024	0.043	0.228	0.444	0.589	0.047	
AP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.089	0.286	0.438	0.005	
Max. half beam*	0.771	0.926	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		

Fonte: Série 60 (1963)