

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

LUIZ GUILHERME DE OLIVEIRA APPEL

FERRAMENTA EM CÓDIGO ABERTO PARA GERAÇÃO DE GEOMETRIA DE CASCO

Joinville
2023

LUIZ GUILHERME DE OLIVEIRA APPEL

FERRAMENTA EM CÓDIGO ABERTO PARA GERAÇÃO DE GEOMETRIA DE CASCO

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Coorientador: Dr. Lucas Weihmann

Joinville
2023

LUIZ GUILHERME DE OLIVEIRA APPEL

FERRAMENTA EM CÓDIGO ABERTO PARA GERAÇÃO DE GEOMETRIA DE CASCO

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

Joinville (SC), 30 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

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

Dr. Vitor Takashi Endo
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos para quem ele se mostrar útil.

AGRADECIMENTOS

Estendo os mais sinceros agradecimentos, primeiramente, a meus pais, Marcia e Jeferson, ao meu irmão, João, e à minha namorada, Lívia, por todo o amor, companheirismo e incansável apoio ao meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Agradeço à minha grande amiga Thais Gaino e ao Pipoca (in memoriam), por toda a alegria e acolhimento durante os períodos mais difíceis dessa graduação.

Agradeço à UFSC e seus docentes, em especial, Thiago Pontin e Lucas Weihmann, pelo acolhimento na orientação desse trabalho, Vitor Endo, Ricardo Aurélio e Vanessa Lima, pela atenção dada à leitura e correção do texto, Andrea Piga e André Fugarra, por toda a confiança e tempo dedicado ao meu aprendizado.

Aos meus colegas de Curso, Leonardo Gabrielli, Pedro Quirinus, Giovanna Ambrósio, Eduardo de Bittencourt, Samra Bahmad, Matheus Alves Beatriz Chow, amigos que, por muitas vezes tornaram a difícil jornada da graduação mais alegre.

Agradeço aos meus amigos da turma 2012.1 do Curso Técnico Integrado da UTFPR, Gabriel Kuhnen, Jaqueline Rocha, Luís Hatashita, Thomas Reckelberg e Fernanda Batori, João Hartmann, Ygor Berlin, Weigle Martins, Gabriel Borges, Gustavo Bório, Faruk Hammoud, Juliana Rodrigues e Maria Fernanda Azolin, por todos os momentos felizes que vivemos juntos e a duradoura amizade.

Mesmo que eventualmente sigamos caminhos distintos, levo todos vocês em meus pensamentos. Muito obrigado!

“Life is the art of drawing sufficient conclusions
from insufficient premises.”

Samuel Butler

RESUMO

O presente documento se dedica à apresentação de uma rotina para geração de geometrias de casco para embarcações deslocantes de superfície, utilizadas em transportes e serviços marítimos. Detalhes de implementação e orientações sobre o uso são fornecidos ao longo do texto, juntamente com a rotina na íntegra em anexo, em formato de linha de código de linguagem aberta Octave. O trabalho se inicia contextualizando o processo de geração de geometria de casco e sua função na grande tarefa de projeto de embarcações. A seguir discorre-se sobre os conceitos físicos relevantes ao algoritmo e suas respectivas representações matemáticas. É fornecido então detalhamento a respeito da metodologia aplicada na implementação da rotina, juntamente com as oportunas orientações ao usuário na utilização da mesma. Por fim são visitados alguns casos para fins de validação do funcionamento da ferramenta e discussão de seus limites de aplicação.

Palavras-chave: Projeto de Navio. Geometria de Casco. Embarcações Deslocantes. Método de Curvas Paramétricas. Octave.

ABSTRACT

This document is dedicated to the presentation of a routine for generating hull geometries for surface-going displacing hulls used for maritime transportation and services. Implementation details and usage guidance are provided throughout the text, with full routine attached, written in the Octave open source language. The text begins by contextualizing the hull geometry generation process and its function in the great task of a ship design. Thereafter, physical concepts relevant to said algorithm and their respective mathematical representations are presented. Following, details are provided regarding the methodology applied in the implementation of the routine, together with guidance to the user in its use. Finally, some cases are visited in order to validate the tool's operation and establish its application limits.

Keywords: Ship Design. Hull Geometry. Displacement Ships. Parametric Curves Method. Octave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de embarcações de acordo com suas formas de sustentação.	18
Figura 2 – Espiral de Projeto, etapas em destaque.	20
Figura 3 – Diferentes comprimentos em embarcações.	23
Figura 4 – Diferentes definições da posição da Perpendicular de Ré.	23
Figura 5 – Coordenadas transversais e verticais em embarcações.	24
Figura 6 – Linhas de carregamento em norma (à esquerda) e marcadas no casco de embarcação (à direita).	25
Figura 7 – Representação gráfica de medidas relevantes para cálculo de Coeficientes de Forma e Função.	26
Figura 8 – Faixas de ocorrência para C_D	28
Figura 9 – Elementos de Curva de Área Seccional.	29
Figura 10 – Elementos de Plano de Linha D'água.	29
Figura 11 – Plano de Linhas de embarcação deslocante. Plano de Balizas (acima), Plano do Alto (centro) e de Linhas D'água (abaixo).	30
Figura 12 – Tabela de cotas típica.	32
Figura 13 – Aproximação de integral via Regra do Trapezoide.	33
Figura 14 – Método da Bisseção.	35
Figura 15 – Fluxograma de funcionamento da rotina principal.	38
Figura 16 – Valores de Contorno para controle das Curvas Paramétricas.	41
Figura 17 – Baliza para a faixa de coeficientes de seção. Balizas esbeltas em azul, balizas bojudas em vermelho.	44
Figura 18 – Reflexão da equação 13 nos 4 quadrantes do plano cartesiano unitário. Curvas de interesse em destaque.	46
Figura 19 – Evolução de C_X para faixa de parâmetros característicos de cada baliza (esbelta à esquerda, bojuda à direita).	47
Figura 20 – Distribuições e evolução de $\bar{\delta}^2$ e δ_{max}^2 para seleção de C_X para transição entre balizas.	48
Figura 21 – Elementos de área para cálculo da Área Molhada S	51
Figura 22 – $\phi(\eta)$ para várias derivadas no contorno. Curva de derivada crítica em realce.	55
Figura 23 – Resultado de primeira iteração para Embarcação Mercante.	60
Figura 24 – Resultado para geometria ajustada de embarcação mercante.	61
Figura 25 – Geometria de embarcação mercante exportada para MaxSurf®.	62

Figura 26 – Características geométricas relevantes para definição de parâmetros de rotina.	63
Figura 27 – Resultado para geometria ajustada de rebocador.	64
Figura 28 – Geometria de rebocador AHTSV exportada para MaxSurf®.	66
Figura 29 – Plano de Linhas para embarcação pesqueira.	67
Figura 30 – Modelagem de embarcação pesqueira (1º ajuste).	67
Figura 31 – Modelagem de embarcação pesqueira (2º ajuste).	68
Figura 32 – Geometria de embarcação pesqueira exportada para MaxSurf®.	68
Figura 33 – Evolução de inclinação do costado com C_X para baliza em plano unitário.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Simbologia e descrição funcional de entradas e parâmetros	39
Tabela 2 – Dados relevantes para modelagem geométrica de embarcação mercante.	60
Tabela 3 – Comparativo de resultado para embarcação mercante.	62
Tabela 4 – Dados relevantes para modelagem geométrica de rebocar tipo AHTSV.	63
Tabela 5 – Comparativo de resultado para rebocar tipo AHTSV.	64
Tabela 6 – Dados relevantes para modelagem geométrica de embarcação pesqueira.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

L_{BP}	Comprimento entre Perpendiculares
B	Boca
$W, W(x)$	Perfil de Plano de Linha D'Água
T	Calado
$K, K(x)$	Curva de Altura de Quilha
C_B	Coeficiente de Bloco
∇	Deslocamento Volumétrico
C_M	Coeficiente de Seção Mestra
$SAC, SAC(x)$	Curva de Área Seccional
C_P	Coeficiente Prismático Longitudinal
C_{WP}	Coeficiente de Plano de Linha D'Água
A_{WP}	Área do Plano de Linha D'Água
C_D	Coeficiente de Peso Morto
Δ	Deslocamento Mássico
dwt	Peso Morto
ρ	Densidade da água salgada.
x	Coordenada Longitudinal
LCB	Coordenada Longitudinal de Centro de Carena
LCF	Coordenada Longitudinal do Baricentro do Plano de Linha D'água.
f	Função polinomial genérica.
a_0, a_1, \dots, a_n	Coeficientes de função polinomial genérica.
ξ	Erro de aproximação.
$k_{L,PMB}$	Coeficiente paramétrico de Comprimento de Corpo Médio Paralelo

$k_{X,PMB}$	Coeficiente paramétrico de Centro Longitudinal do Corpo Médio Paralelo
X_{PMB}	Centro Longitudinal do Corpo Médio Paralelo
X_{aft}	Coordenada longitudinal de fronteira entre Corpo de Ré e Corpo Médio Paralelo
X_{fwd}	Coordenada longitudinal de fronteira entre Corpo Médio Paralelo e Corpo de Vante
F_i, F	Curva paramétrica genérica.
$k_{i,aft}$	Coeficiente paramétrico de ré para curva paramétrica genérica.
$k_{i,aft}$	Coeficiente paramétrico de derivada à ré para curva paramétrica genérica.
$k_{i,aft}$	Coeficiente paramétrico de vante para curva paramétrica genérica.
$k_{i,aft}$	Coeficiente paramétrico de derivada à vante para curva paramétrica genérica.
C_X	Coeficiente de Área de Seção Transversal
N	Número de Pontos na Baliza.
$\phi, \phi(eta)$	Coordenada transversal de retângulo unitário (1×1).
η	Coordenada vertical de retângulo unitário (1×1).
A, B, C, D	Coeficientes polinomiais.
ϕ'_0	Derivada primeira de coordenada transversal unitária na fronteira inferior de seção interpolada.
η_n	n-ésima entrada do vetor de coordenada vertical unitária (η).
x_{n+1}	Próxima (" $n + 1$ -ésima) entrada do vetor de coordenada vertical unitária (η).
y	Coordenada transversal.
z	Coordenada vertical.
s	Ordem (expoente) de equação de Baliza bojuda.
δ^2	Diferença transversal quadrática.

$\overline{\delta^2}$	Diferença transversal quadrática média.
δ_{max}^2	Diferença transversal quadrática máxima.
ϕ_s	Coordenada transversal unitária para baliza esbelta.
ϕ_b	Coordenada transversal unitária para baliza bojuda.
x_n	n-ésima entrada do vetor de coordenada longitudinal (x).
x_{n+1}	Próxima (" $n + 1$ -ésima) entrada do vetor de coordenada longitudinal (x).
$LCB_{\%}$	Coordenada longitudinal de Centro de Carena (percentual, relativa à meia-nau).
$I_{zx,WP}$	Momento de Inércia de Área do Plano de Linha D'Água em torno do eixo longitudinal.
S	Área Molhada.
\vec{P}_1	1º vetor coordenada para cálculo de elemento de área.
\vec{P}_2	2º vetor coordenada para cálculo de elemento de área.
\vec{P}_3	3º vetor coordenada para cálculo de elemento de área.
\vec{P}_4	4º vetor coordenada para cálculo de elemento de área.
$x_{m,n}$	Coordenada longitudinal do n-ésimo ponto ao longo da m-ésima baliza.
$y_{m,n}$	Coordenada transversal do n-ésimo ponto ao longo da m-ésima baliza.
$z_{m,n}$	Coordenada vertical do n-ésimo ponto ao longo da m-ésima baliza.
$x_{m+1,n}$	Coordenada longitudinal do n-ésimo ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
$y_{m+1,n}$	Coordenada transversal do n-ésimo ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
$z_{m+1,n}$	Coordenada vertical do n-ésimo ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
$x_{m,n+1}$	Coordenada longitudinal do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da m-ésima baliza.

$y_{m,n+1}$	Coordenada transversal do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da m -ésima baliza.
$z_{m,n+1}$	Coordenada vertical do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da m -ésima baliza.
$x_{m+1,n+1}$	Coordenada longitudinal do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
$y_{m+1,n+1}$	Coordenada transversal do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
$z_{m+1,n+1}$	Coordenada vertical do próximo (" $n + 1$ -ésimo) ponto ao longo da próxima (" $m + 1$ -ésima) baliza.
\vec{P}_l	Vetor longitudinal de elemento de área.
\vec{P}_t	Vetor transversal de elemento de área.
\vec{P}_d	Vetor diagonal de elemento de área.
\vec{S}_1	Vetor de 1ª fração elemento de área.
A_1	Módulo de 1ª fração elemento de área.
\vec{S}_2	Vetor de 2ª fração elemento de área.
A_2	Módulo de 2ª fração elemento de área.
VCB	Coordenada Vertical de Centro de Carena.
C_0	Símbolo classificatório para Continuidade.
C_1	Símbolo classificatório para Continuidade de Derivada.
F_0	Condição de contorno inferior de ordenada para Spline.
F_1	Condição de contorno superior de ordenada para Spline.
x_0	Condição de contorno inferior de abcissa para Spline.
x_1	Condição de contorno superior de abcissa para Spline.
F'_0	Condição de contorno inferior de derivada de ordenada para Spline.
F'_1	Condição de contorno superior de derivada de ordenada para Spline.
Δ_ϕ	Discriminante de equação característica para derivada adimensionalizada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO TEÓRICA	20
2.1	Projeto de Navio	20
2.2	Caracterização Geométrica	21
2.2.1	Dimensões Principais	22
2.2.1.1	Comprimento	22
2.2.1.2	Boca	22
2.2.1.3	Calado	24
2.2.2	Corpos de Ré, Médio Paralelo e de Vante	25
2.2.3	Coeficientes de Forma e Função	26
2.2.3.1	Coeficiente de Bloco	26
2.2.3.2	Coeficiente de Seção Mestra	27
2.2.3.3	Coeficiente Prismático Longitudinal	27
2.2.3.4	Coeficiente Plano de Linha D'Água	27
2.2.3.5	Coeficiente de Peso Morto	27
2.2.4	Distribuições Longitudinais	28
2.2.4.1	Curva de Área de Seção Transversal	28
2.2.4.2	Perfil de Plano de Linha D'água	28
2.2.4.3	Curva de Altura de Quilha	29
2.3	Plano de Linhas e Tabela de Cotas	30
2.3.1	Plano de Linhas D'água	30
2.3.2	Plano do Alto	31
2.3.3	Plano de Balizas	31
2.3.4	Tabela de Cotas	31
2.4	Metodologias de Desenho de Casco	31
2.5	Métodos Numéricos	32
2.5.1	Interpolação e a Spline Cúbica	32
2.5.2	Integração Numérica e a Regra do Trapezoide	33
2.5.3	Busca de Raízes e o Método da Bisseção	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Arquitetura Geral da Rotina	36

3.1.1	Descritivo de Procedimento	36
3.1.2	Curvas Paramétricas	36
3.1.3	Entradas e Parâmetros do Algoritmo	37
3.2	Cálculo das Curvas Paramétricas	40
3.2.1	Divisão do Domínio Longitudinal	40
3.2.2	Valores de Contorno	41
3.2.3	Interpolação	42
3.2.4	Distribuição de Coeficiente de Seção	42
3.3	Desenho e Justaposição de Balizas	42
3.3.1	Tipos de Baliza	43
3.3.1.1	Baliza Esbelta	43
3.3.1.2	Baliza Bojuda	45
3.3.2	Transição	46
3.4	Ajuste e Critérios e Parada	48
3.4.1	Aderência a Requisitos de Projeto e Grandezas Derivadas	49
3.4.2	Resultados Incoerentes ou não-Físicos:	53
3.4.2.1	Supressão dos corpos de ré e vante	53
3.4.2.2	Problema de extrapolação nas seções interpoladas e limites para derivadas da Spline nos contornos	54
3.4.3	Extrapolação do limite superior do coeficiente de seção	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Aplicação em exemplo	59
4.1.1	Embarcação Mercante	59
4.1.2	AHTSV	61
4.1.3	Pesqueiro	65
4.2	Limitações da Ferramenta e Mitigação de Problemas	66
4.2.1	Resolução longitudinal unitária	69
4.2.2	Descontinuidade do ângulo de costado na Linha D'Água	69
4.2.3	Acoplamento SAC-Perfil de Linha D'Água-Quilha	69
4.2.4	Ausência de Controle Local	70
4.2.5	Modelagem de Casco Singelo	71
4.2.6	Formato de Arquivo de Saída	71
4.3	Melhorias e Trabalhos Futuros	71
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	73
A	APÊNDICE - FERRAMENTA, EM LINGUAGEM OCTAVE (.M)	75

A.1	Rotina Principal	75
A.1.1	geometriaDeCasco.m	75
A.2	Rotinas Secundárias	80
A.2.1	Baliza bojuda unitária - buntSec.m	80
A.2.2	Baliza bojuda ajustada - buntSecIt.m	81
A.2.3	Baliza esbelta unitária - slimSec.m	81
A.2.4	Baliza esbelta ajustada - slimSecIt.m	82
A.2.5	Coor. Vert. de Centro de Carena (<i>VCB</i>) - f_VCB.m	82
A.2.6	Área Molhada (<i>S</i>) - surfArea.m	83
A.3	Rotinas para geração de figuras	84
A.3.1	Figura 14 - bissecMethod.m	84
A.3.2	Figura 17 - sec4Cx.m	85
A.3.3	Figura 18 - nOrderCircle.m	86
A.3.4	Figura 19 - Cx4param.m	86
A.3.5	Figura 20 - switchCx.m	87
A.3.6	Figura 22 - critPhi_0.m	88
A.3.7	Figura 33 - vSlope4Cx.m	89

1 INTRODUÇÃO

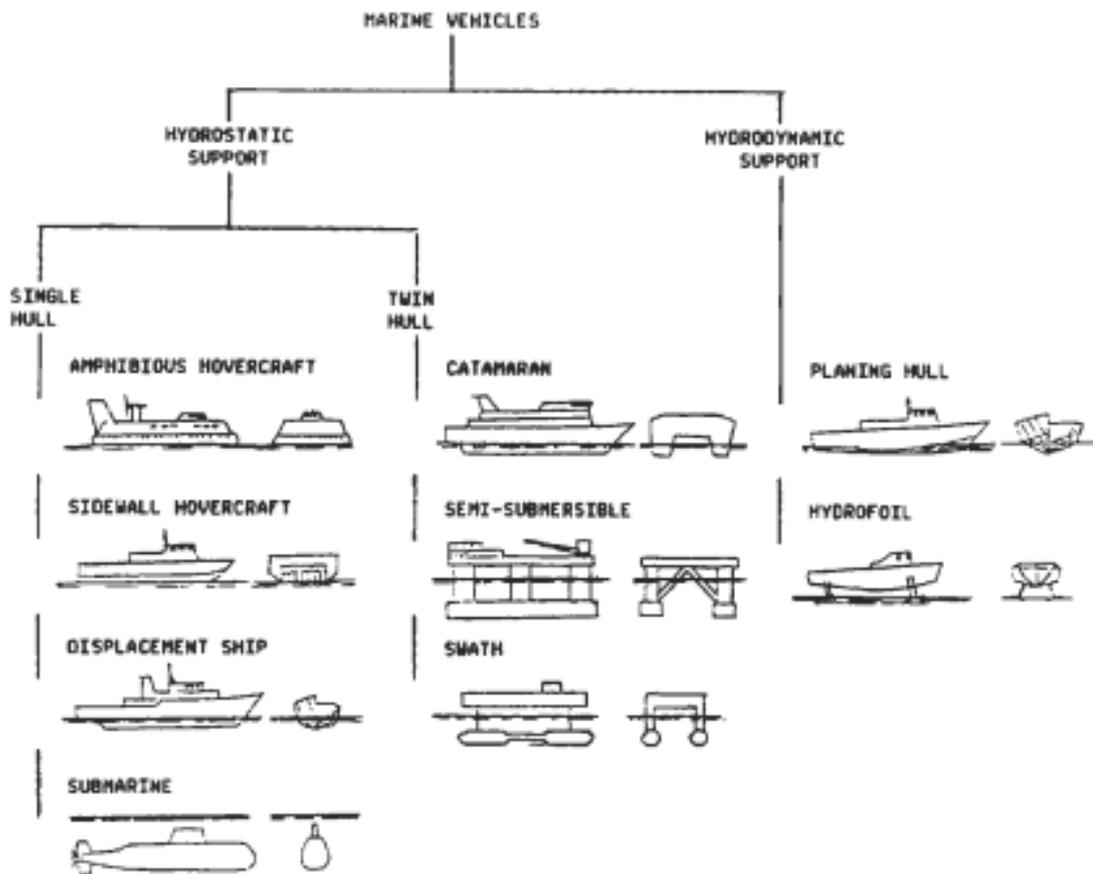
Todo projeto tem por meta a apresentação de uma solução para um problema relevante, considerando os recursos temporais, humanos, intelectuais e materiais disponíveis. Para o caso de sistemas complexos, recorrentemente são necessárias múltiplas etapas ante a conclusão. Isso decorre da necessidade que a solução proposta cumpra funções interdependentes ou, a depender da perspectiva adotada, antagônicas. O projeto de embarcações se enquadra nessa descrição. No contexto do transporte marítimo, objetiva-se realizar a movimentação de cargas em grandes distâncias, geralmente maximizando uma eficiência global estipulada pelos interessados no sucesso projeto: o armador, o projetista e, possivelmente, a sociedade como um todo. Uma solução globalmente eficiente para a solução do problema de transporte de grandes quantidades de mercadorias a grandes distâncias a médio prazo é a embarcação mercante. De acordo com UNCTAD (2022), "mais de 80% do volume de bens de comércio internacional é transportado pela via marítima, e esse percentual é ainda maior para países em desenvolvimento".

Tratando em termos etimológicos, embarcações mercantes são estruturas estanques de casco rígido, cuja sustentação estática se dá pela imersão deste em água doce ou salgada, mais especificamente, como enunciado no Princípio de Arquimedes, pela força de restauração oriunda do deslocamento do respectivo volume do fluido na interação desse com o casco, na medida em que um campo de pressão hidrostática é criado, com contribuição média vertical para cima. Refere-se portanto à essas embarcações como deslocantes. Na Figura 1 são mostrados diversos outros tipos de embarcações, como classificadas por Watson (1998).

Uma das etapas no projeto dessas estruturas é a tradução das estimativas iniciais em uma descrição preliminar, mas exata, da geometria do casco. Aqui a ferramenta de modelagem apresentada no presente trabalho busca se fazer útil. Historicamente, o processo de projeto de embarcação e, por extensão, do desenho de casco, gradualmente evoluíram de procedimentos dependentes quase que exclusivamente da experiência e percepções individuais dos arquitetos, para métodos semiempíricos com embasamento estatístico gerado de embarcações reais bem-sucedidas (PAPANIKOLAOU, 2014). Concomitantemente, o advento e difusão de novas tecnologias e ferramentas, com exemplo mais notório sendo o computador pessoal, facilitou o acesso de cientistas, engenheiros e estudantes a esse arcabouço intelectual.

Nesse contexto então é fundamentado um dos objetivos desse trabalho, mais especificamente, a facilitação do acesso e uso de tecnologias oriundas do ambiente

Figura 1 – Classificação de embarcações de acordo com suas formas de sustentação.



Fonte: Watson (1998).

técnico-acadêmico-científico. O cumprimento dessa meta é feito pelo fornecimento da ferramenta em sua plenitude, implementada em programa de código aberto (Octave), disponibilizada a todo e qualquer interessado gratuitamente.

1.1 OBJETIVOS

A fim de facilitar o projeto de embarcações deslocantes, em particular na definição de geometria de casco, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Fornecer uma metodologia acessível para a geração de geometria de casco de embarcações deslocantes, utilizando algoritmos implementados em software de código aberto (Octave).

1.1.2 Objetivos Específicos

O cumprimento o objetivo acima definido é dependente da execução bem sucedida das seguintes tarefas:

1. Fornecer uma ferramenta de geração de geometria de casco funcional, isenta de erros de implementação, com limites de aplicação definidos, disponível para uso imediato e gratuito.
2. Apresentar a metodologia em detalhe suficiente, possibilitando ao usuário compreensão do funcionamento e capacidade de uso da ferramenta em sua plenitude.
3. Validar o resultado do uso do método com aplicação deste na remodelagem de cascos de embarcações conhecidas.

2 REVISÃO TEÓRICA

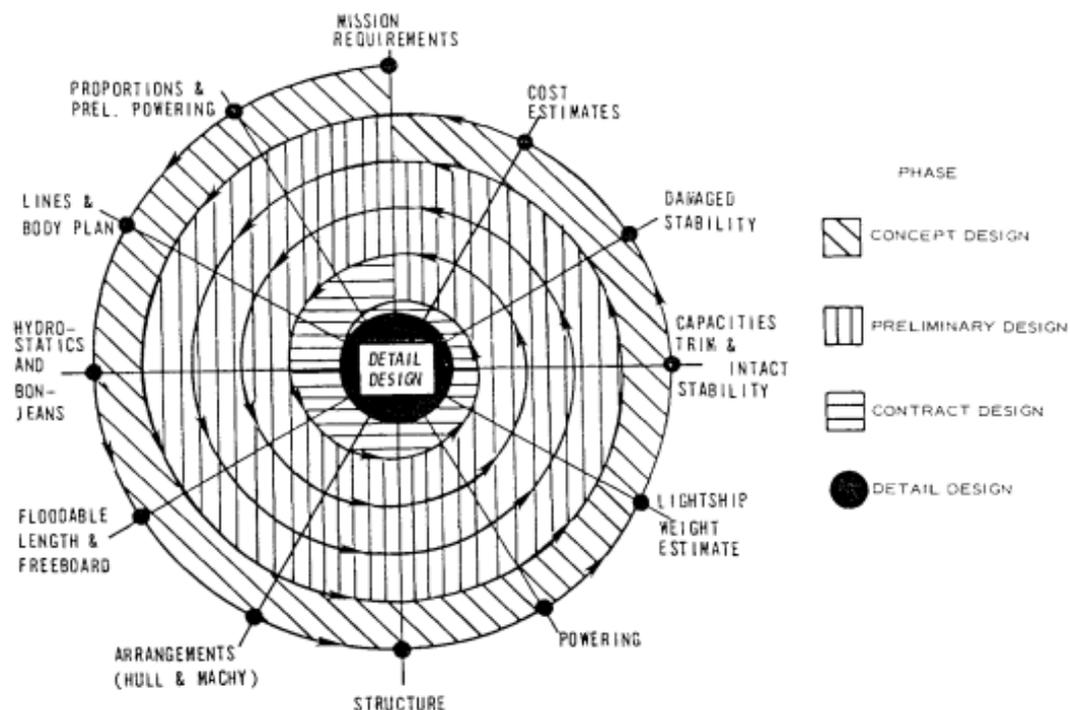
Esta seção se dedica à apresentação dos conceitos e grandezas relevantes ao entendimento da implementação da ferramenta fornecida, bem como estabelecer o contexto onde ela se insere e é aplicável.

2.1 PROJETO DE NAVIO

A literatura utilizada é convergente em termos da metodologia de projeto de embarcações deste tipo. Variações de apresentação ocorrem na apresentação global do procedimento, mas existe coerência em relação às etapas de projeto, seus respectivos objetivos e da natureza iterativa do ajuste ou reprojeção dos diversos subsistemas no desenvolvimento de uma embarcação capaz de atender de forma suficiente aos seus requisitos. Essa convergência iterativa é comumente representada por meio das Espirais de Projeto, como proposto por Evans (1959).

O projeto de embarcações é comumente dividido em três fases, ilustradas sobre a Espiral na Figura 2.

Figura 2 – Espiral de Projeto, etapas em destaque.



Fonte: Taggart (1980)

A primeira etapa é o Projeto Conceitual. Taggart (1980) define esta fase como a tradução recepção das pretensões do armador e dos requerimentos de missão em características de engenharia. Isso se dá com a definição dos requisitos funcionais e primeiras estimativas dimensionais, de arranjo, forma e estrutura, disposição de carga, potência instalada e equipamentos à bordo, e análise de viabilidade econômica, tecnológica, construtiva e, esta cada vez mais recorrente, ambiental (MOLLAND, 2008). Eventualmente, um conjunto de diversas soluções pode ser criado via combinação de diversos valores para cada parâmetro dentro de suas respectivas restrições. O mérito dessas soluções é avaliado a partir da condução das análises mencionadas, as melhores soluções são então destinadas às próximas etapas de projeto.

Do Projeto Conceitual segue-se ao Projeto Preliminar, onde ocorre o refino iterativo das estimativas e descrição mais exata das características dos subsistemas da embarcação, permitindo avaliação mais exata de seus impactos nas diversas funções globais da embarcação. Nesse contexto se insere a ferramenta proposta, permitindo a obtenção da geometria do casco singelo abaixo da linha d'água e análises subsequentes em função desta. É comum na literatura que essas duas etapas sejam condensadas e referidas como Projeto Básico, como apresentado por Taggart (1980), Papanikolaou (2014).

O resultado do projeto preliminar é a definição das grandezas características cada um dos subsistemas da embarcação solução mais promissora, não necessitando esta de alterações. Remanesce apenas rigor e plenitude de especificação, de forma que seja gerada uma caracterização inequívoca do resultado final (TAGGART, 1980). Essa é a etapa final do projeto da embarcação, denominada Projeto Detalhado ou Projeto Contratual. Aqui são gerados os planos de construção e montagem de todas as estruturas do navio, tanto acima quanto abaixo da linha d'água bem como descrições de instalação de todo o equipamento embarcado, possibilitando, como o nome sugere, a redação de contratos para concretização do projeto.

2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

Observando a literatura, rapidamente chega-se à conclusão que todas as funções da embarcação são diretamente influenciadas pela sua geometria. Uma racionalização simples que leva a esse resultado advém da percepção que os elementos responsáveis pelo cumprimento dessas funções (tripulação, motores, tanques de carga e lastro, etc) ou são fisicamente limitados pelo espaço interno definido pelos interstícios das placas que compõe a casca da estrutura e da grelha ortogonal que a reforça, ou interagem com a superfície que a delimita, através do surgimento de campos de pressão advindos do contato da embarcação com sua vizinhança (a água, o ar, estruturas de ancoragem e atracamento).

Em meio a essa complexidade são tecidas as estimativas iniciais a serem refinadas durante o processo de projeto da embarcação. Para tanto uma intuição e posterior capacidade de análise precisam ser desenvolvidas para avaliar a sensibilidade dos requisitos e grandezas intermediárias relevantes às dimensões principais que definem a geometria da embarcação, aqui, especificamente, das obras vivas, porção submersa do casco.

2.2.1 Dimensões Principais

Observando os diversos exemplos de Espirais de Projeto apresentadas na literatura, a definição das assim chamadas dimensões principais é recorrentemente uma das primeiras tarefas a serem atendidas.

Da perspectiva da determinação da geometria do casco, essa priorização se justifica, haja vista que essas quantidades definem os limites das embarcação nas 3 direções de interesse: longitudinal, transversal e vertical.

Essas medidas máximas recorrentemente são definidas de acordo com as restrições da rota que a embarcação deverá cumprir em seu tempo de serviço, estimativas de viabilidade econômica (considerando potência instalada e capacidade de carga) e resoluções normativas (considerando estabilidade estática, dinâmica e avariada, borda livre, duplos cascos, manobrabilidade e comportamento em onda).

2.2.1.1 Comprimento

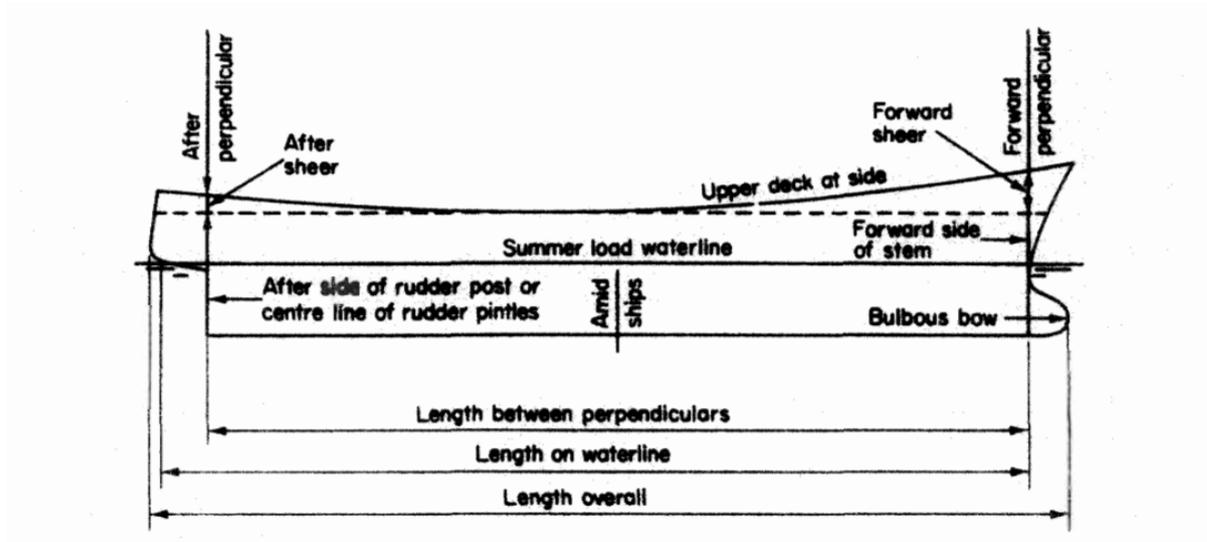
Por comprimento entende-se uma distância linear característica da maior dimensão da embarcação. Aqui diversas definições podem ser aplicadas: Comprimento total, comprimento de linha D'água, entre outros.

Para o presente trabalho, o mais relevante dentre essas definições é o comprimento entre perpendiculares, denotado L_{BP} . Em uma embarcação finalizada, é medida linear longitudinal entre as coordenadas da madre do leme - Perpendicular de Ré - e da coordenada mais a vante do plano de linha d'água para o calado de projeto - Perpendicular de Vante - (PAPANIKOLAOU, 2014). Pequenas diferenças de definição podem existir (ver Figura 4), mas todas são características da embarcação e, portanto, aplicáveis à modelagem do casco.

2.2.1.2 Boca

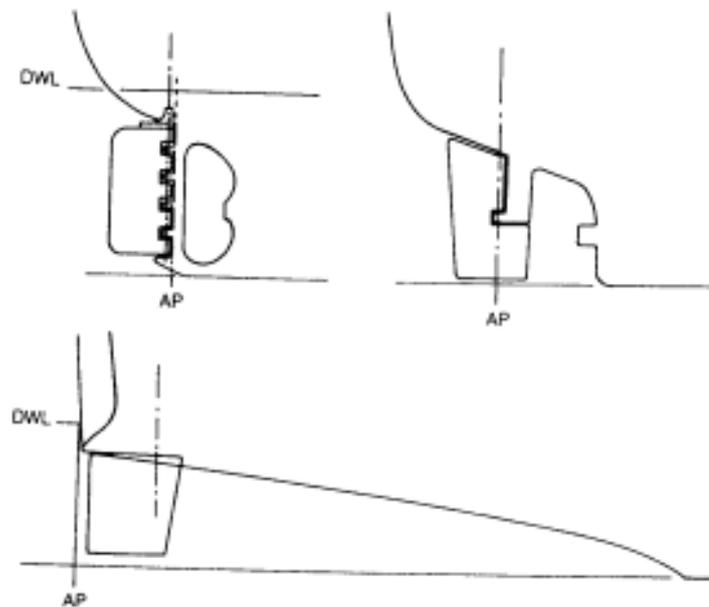
Seguindo o raciocínio aplicado à dimensão longitudinal, a boca (B) é a dimensão de referência para a dimensão transversal máxima da embarcação. Novamente, a depender da etapa de projeto em questão, definições diferentes são pertinentes. As definições mais comuns são boca máxima e boca moldada, como ilustrado na Figura 5.

Figura 3 – Diferentes comprimentos em embarcações.



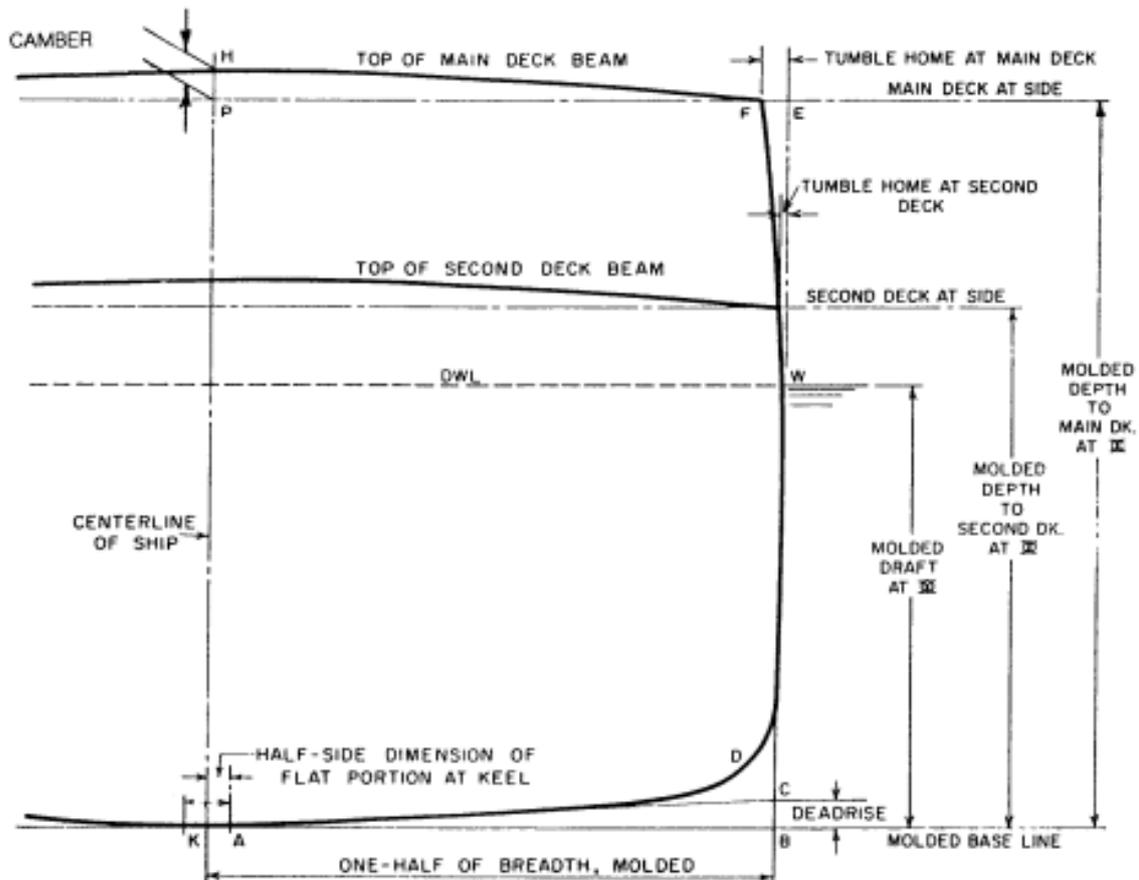
Fonte: Tupper (2000).

Figura 4 – Diferentes definições da posição da Perpendicular de Ré.



Fonte: Lewis (1988).

Figura 5 – Coordenadas transversais e verticais em embarcações.



Fonte: Lewis (1988)

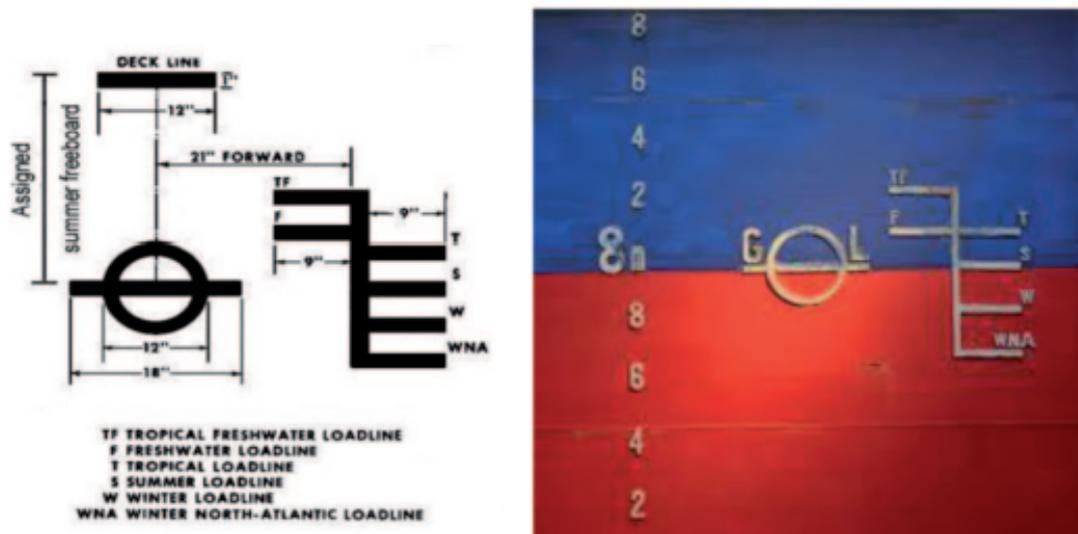
No entanto, nenhuma dessas definições descreve exatamente a medida relevante para o presente trabalho. A boca moldada designa largura do volume interno ao casco, é a dimensão do gabarito para construção; e a largura máxima é aplicável à geometria completa da embarcação, incluindo apêndices e estruturas acima da linha d'água. Para o algoritmo e cálculos aqui apresentados, define-se a boca como a dimensão transversal máxima da porção submersa da embarcação, na superfície de interface entre o casco e o fluido. Essa distância máxima para o trabalho em questão há de estar no plano de linha d'água e sua distribuição longitudinal ao longo do bordo esquadro da embarcação é denominado Perfil de Plano de Linha d'Água (denotado W , $W(x)$).

2.2.1.3 Calado

Analogamente à boca, a relevância das diferentes cotas verticais da embarcação varia de acordo com a análise requerida. Para a determinação da geometria aqui proposta a medida relevante a ser referida por "calado" (T) é a máxima distância vertical normal ao plano de linha d'água e a superfície de interface fluido-

casco, na condição de calado de projeto (comumente referida como linha d'água de verão, ver Figura 6). Para cada baliza em sua coordenada longitudinal, essa cota há de estar sobre o plano diametral e sua distribuição define a quilha da embarcação (denotada K , $K(x)$).

Figura 6 – Linhas de carregamento em norma (à esquerda) e marcadas no casco de embarcação (à direita).



Fonte: Papanikolaou (2014).

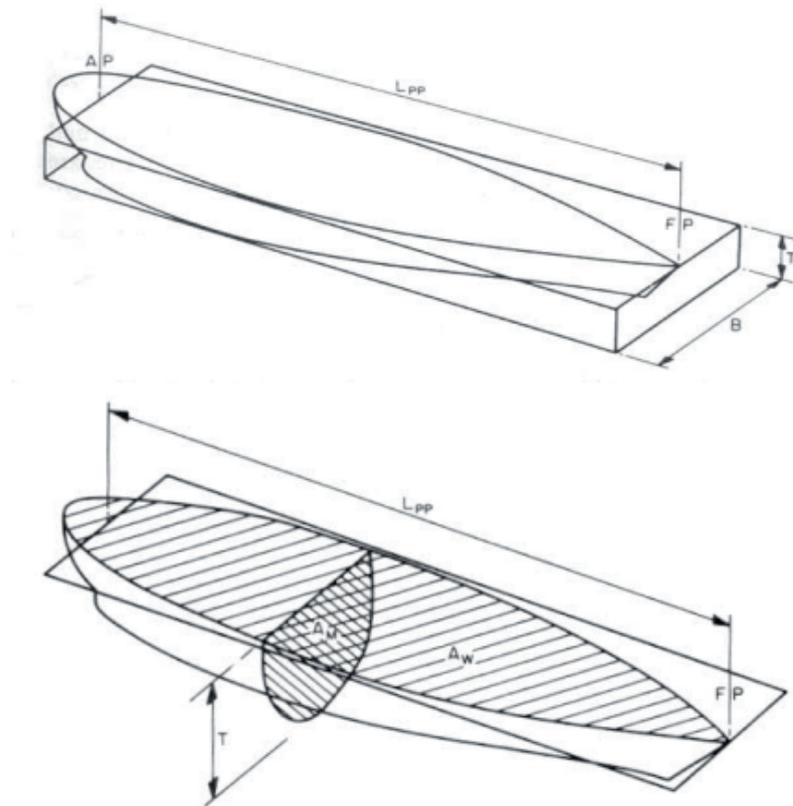
2.2.2 Corpos de Ré, Médio Paralelo e de Vante

De diversas perspectivas, a interpretação da embarcação como a concatenação longitudinal de três volumes é interessante. A porção mais à frente - o Corpo de Vante - em geral possui geometria mais afilada, a fim de promover o deslocamento do volume de água adiante da embarcação para os bordos, minimizando a energia desprendida ao fluido em forma de ondas gravitacionais ou dissipação viscosa, energia esta quantificada na convolução velocidade-resistência em avanço.

A porção central prismática em torno da meia-nau, o Corpo Médio Paralelo, destinada à alocação de passageiros ou carga, preenchendo a seção transversal maneira praticamente constante ao longo do seu comprimento. Em embarcações mercantes, compõe a maior porção do comprimento.

Por fim, na seção na parte posterior da embarcação, o Corpo de Ré, a seção transversal da embarcação passa a exibir variação geométrica considerável ao longo da direção longitudinal. Assim como na porção à vante, ocorre um afilamento da boca, mas também uma elevação da quilha. Essa variação geométrica é projetada a fim de, novamente, evitar a formação de campos de pressão adversos que contribuam para o aumento da resistência ao avanço, bem como acomodar o propulsor acima da linha de

Figura 7 – Representação gráfica de medidas relevantes para cálculo de Coeficientes de Forma e Função.



Fonte: Papanikolaou (2014)

base e promover um perfil de escoamento favorável ao seu desempenho.

2.2.3 Coeficientes de Forma e Função

A seguir são apresentadas algumas grandezas que auxiliam na descrição geométrica e funcional da embarcação. Diversas metodologias de avaliação de capacidade de carga, resistência ao avanço e requerimentos de potência instalada, estabilidade e flutuação e, logicamente, modelagem estrutural e geométrica, utilizam dessas definições para seus cálculos e definição dos seus limites de aplicação.

2.2.3.1 Coeficiente de Bloco

Denotado C_B , é definido como a razão entre o deslocamento volumétrico (∇) e o volume do paralelepípedo definido pelas 3 dimensões principais.

$$C_B \doteq \frac{\nabla}{L_{BP} \cdot B \cdot T} \quad (1)$$

2.2.3.2 Coeficiente de Seção Mestra

Denotado C_M , apresenta variações de definição a depender da análise proposta. Arquitetonicamente é considerada a seção à meia-nau. Em análises estruturais, é definida na seção de maior esforço interno. Aqui, é definido como a máxima razão de preenchimento do retângulo composto da Boca e Calado pela seção transversal, esta quantificada pela curva de área seccional (SAC , ver seção 2.2.4.1):

$$C_M \doteq \frac{SAC(x)_{max}}{B \cdot T} \quad (2)$$

2.2.3.3 Coeficiente Prismático Longitudinal

Denotado C_P , é quantificado pela razão entre o deslocamento volumétrico e o prisma definido pela seção mestra estabelecida em 2.2.3.2.

$$C_P \doteq \frac{\nabla}{L_{BP} \cdot B \cdot T \cdot C_M} = \frac{C_B}{C_M} \quad (3)$$

2.2.3.4 Coeficiente Plano de Linha D'Água

Denotado C_{WP} , é quantificado a razão entre a área do plano de linha d'água (A_{WP}) e o retângulo circunscrito a ela, definido pela boca e o comprimento entre perpendiculares.

$$C_{WP} \doteq \frac{A_{WP}}{L_{BP} \cdot B} \quad (4)$$

2.2.3.5 Coeficiente de Peso Morto

Denotado C_D , é quantificado pela razão entre o deslocamento mássico total (Δ) e o peso morto (dwt , do inglês Deadweight) da embarcação, soma das massas não aderidas ao casco (combustível, lastro, lubrificantes e demais consumíveis, passageiros e tripulação e, claro, a carga paga). Pode ser interpretado como uma eficiência de transporte.

No presente trabalho, não é utilizado como parâmetro de cálculo, porém é uma medida que induz entendimento a respeito da viabilidade e coerência interna da solução proposta. Faixas de ocorrência para cada tipo de embarcação são fornecidas por Schneekluth e Bertram (1998) (ver Figura 8).

$$C_D \doteq \frac{dwt}{\Delta} \quad , \quad \Delta \doteq \rho \nabla \quad (5)$$

Figura 8 – Faixas de ocorrência para C_D .

		dw/Δ [%]	W_{SI}/Δ_L [%]	W_o/Δ_L [%]	W_M/Δ_L [%]
cargo ship	5000–15 000 tdw	60–80	55–64	19–33	11–22
coastal cargo ship	499–999 GT	70–75	57–62	30–33	9–12
bulker	20 000–50 000 tdw	74–80	68–79	10–17	12–16
bulker	50 000–150 000 tdw	80–87	78–85	6–13	8–14
tanker	25 000–120 000 tdw	65–83	73–83	5–12	11–16
	$\geq 200 000$ tdw	83–88	75–83	9–13	9–16
containership	10 000–15 000 tdw	60–76	58–71	15–20	9–22
	20 000–50 000 tdw	60–70	62–72	14–20	15–18
ro-ro ship	$\leq 16 000$ tdw	50–60	65–78	12–19	10–20
reefer	300 000–600 000 cu ft	45–55	51–62	21–28	15–26
ferry		16–33	56–66	23–28	11–18
trawler	44–82 m	30–58	42–46	36–40	15–20
tug	500–3000 kW	20–40	42–56	17–21	38–43

Fonte: Schneekluth e Bertram (1998).

2.2.4 Distribuições Longitudinais

A seguir são definidas as curvas a partir das quais, na rotina apresentada neste trabalho, a geometria do casco é completamente definida e propriedades de interesse são calculadas. Todas as curvas são unidimensionais expressas como funções da coordenada longitudinal (x) na qual são avaliadas.

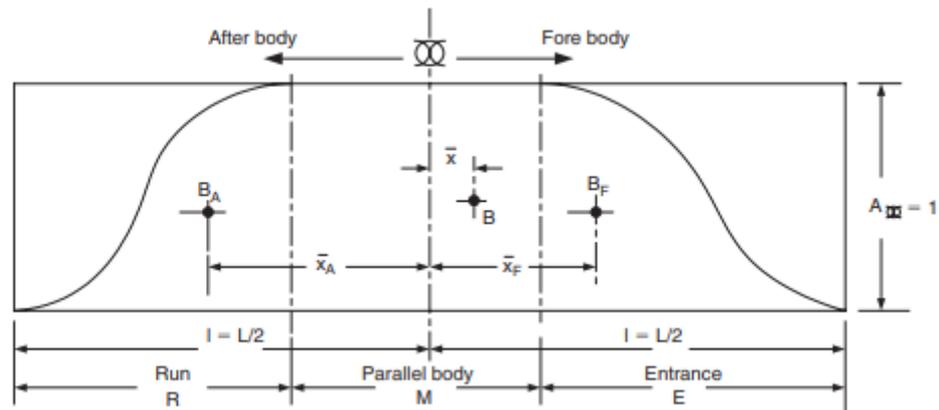
2.2.4.1 Curva de Área de Seção Transversal

Caracteriza a distribuição da área de seção transversal das obras vivas da embarcação ao longo do comprimento da embarcação. Denotada SAC ou $SAC(x)$, explicitamente como função da coordenada longitudinal, esta curva define então a distribuição do volume submerso. Os principais valores característicos derivados dessa curva são o Deslocamento (em massa ou em volume), o Centro Longitudinal de Carena (denotado LCB , do inglês - Longitudinal Centre of Buoyancy) e o Coeficiente de Bloco (C_B). Como mencionado anteriormente, essas grandezas são de grande utilidade para o projetista, pois são necessárias para inferir características da embarcação relativas a Resistência ao Avanço, Equilíbrio, Estabilidade Longitudinal e Transversal e Capacidade de Carga.

2.2.4.2 Perfil de Plano de Linha D'água

Essa curva descreve a evolução da distância do casco normal ao plano diametral (meia-boca), na cota vertical da linha d'água indeformada, no intervalo longitudinal entre a perpendicular de ré. Essa distribuição define o perfil de fólio com simetria bilateral característico de embarcações deslocantes, para o algoritmo aqui apresentado, então, estabelece, junto com o calado de projeto, um dos dois pontos de extremidade da curva da meia-baliza. Analogamente ao LCB , calculado da SAC , o Centro Longitudinal de Flutuação (LCF), baricentro do PLano de Linha D'Água é calculado da integração ponderada de $W(x)$. Ademais, essa geometria plana descreve o

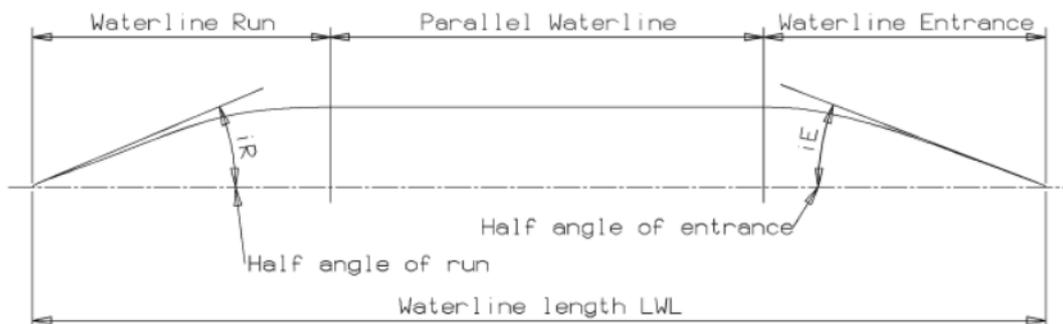
Figura 9 – Elementos de Curva de Área Seccional.



Fonte: Molland (2008).

contorno da embarcação próximo à superfície do fluido, regendo localmente a interação entre ambos na medida em que influencia o comportamento do campo de pressão à ré e a vante da embarcação junto à linha d'água.

Figura 10 – Elementos de Plano de Linha D'água.



Fonte: ITTC (2008).

2.2.4.3 Curva de Altura de Quilha

Define a cota vertical extrema inferior do casco no plano diametral, medida em relação à linha d'água indeformada (ITTC, 2008). Similar ao Perfil de Plano de Linha D'água, esta curva define a distribuição longitudinal do calado da embarcação e, estando sobre o plano diametral, estabelece o segundo ponto de extremidade da meia-baliza. Para a embarcação em avanço, essa curva rege o perfil do escoamento na região à vante do propulsor e do leme, características preliminares destes devem então ser levadas em consideração para a descrição da quilha do corpo de ré da embarcação projetada.

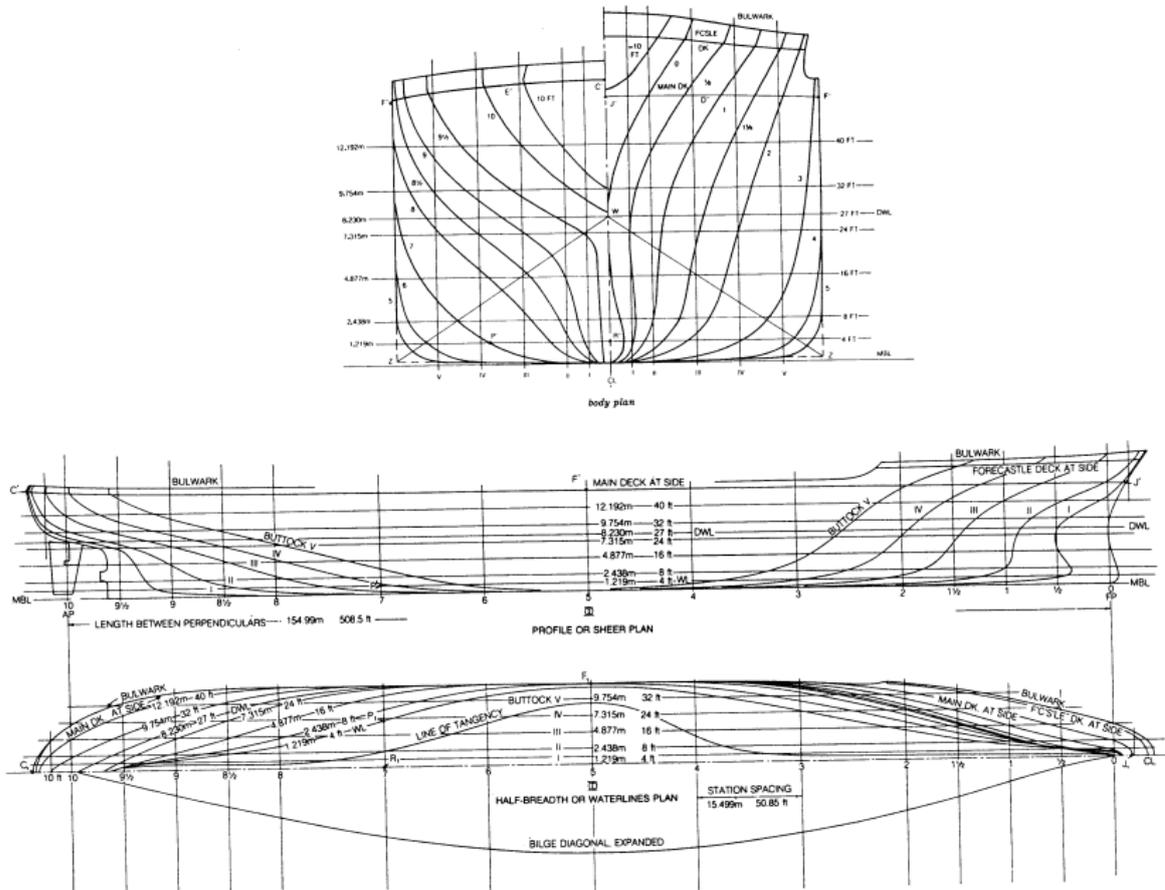
2.3 PLANO DE LINHAS E TABELA DE COTAS

Lewis (1988) define o Plano de Linhas como "projeções ortográficas das interseções da forma do casco com três conjuntos de planos mutuamente perpendiculares, desenhados na escala apropriada". Para o sistema ortogonal cartesiano, cada curva desses conjuntos de planos representa a distribuição de uma dimensão em relação a outra, para um valor fixo da terceira. Os três conjuntos são exemplificados na Figura 11. A cada um dos conjuntos coordenada de referência-coordenada avaliada refere-se por nomenclatura específica:

2.3.1 Plano de Linhas D'água

Aplicando o conceito delineado há pouco, o Plano de Linhas D'água é o conjunto de distribuições da boca ao longo do comprimento para diversos valores de calado. Cada curva é definida para seu respectivo valor de calado.

Figura 11 – Plano de Linhas de embarcação deslocante. Plano de Balizas (acima), Plano do Alto (centro) e de Linhas D'água (abaixo).



Fonte: Lewis (1988).

2.3.2 Plano do Alto

De maneira análoga, o Plano do Alto é o conjunto de distribuições da altura da quilha em relação à Linha de Base (coordenada extrema inferior do casco) ao longo do comprimento, para diversos valores fixos da meia-boca entre o plano diametral e a meia-boca máxima, haja vista a simetria bilateral.

2.3.3 Plano de Balizas

Por fim, o Plano de balizas contempla a distribuição da altura ao longo da boca para diversas posições ao longo do comprimento da embarcação. A fim de evitar a sobreposição excessiva de curvas e aproveitando-se novamente da simetria bilateral das embarcações, comumente as balizas para coordenadas entre a proa e a meia-nau são projetadas à direita do plano diametral e para aquela entre a meia-nau e a popa, à esquerda.

2.3.4 Tabela de Cotas

No contexto de definição da geometria de embarcação, para fins de modelagem fenomenológica e construção, o conjunto de curvas do plano de linhas por si só não fornece exatidão suficiente. Tais procedimentos necessitam de quantidades mensuráveis para sua execução. A fim de traduzir a informação do Plano de Linhas em formato numérico, as dimensões da superfície (moldada ou externa) da embarcação são reorganizadas e compõe o documento conhecido como Tabela de Cotas (Table of Offsets, em inglês, ver Figura 12).

2.4 METODOLOGIAS DE DESENHO DE CASCO

É ponto pacífico na literatura que o processo de desenvolvimento de geometria casco é uma tarefa iterativa e interdependente para com as demais etapas de projeto. A definição geométrica completa da embarcação, bem como de suas partes, seja através de Plano de Linhas, Tabela de Cotas ou deve ser sensível a diversos requisitos de projeto e estimativas feitas ao longo do projeto de forma a gerar uma solução suficiente. Nesse contexto, algumas metodologias para determinação de geometria de casco foram desenvolvidas.

As metodologias e aplicadas e resultados obtidos de cada técnica são variados. Dentre elas podem ser citadas as Séries Sistemáticas, oriundas de séries extensas de ensaios com modelos em tanque, onde a seleção de características geométricas permite a estimativas de resistência ao avanço e propulsão, como apresentado por Savitsky (1964), Todd (1963), Wright e Pantullo (1971); Transformadas de Curva de Área Seccional (Molland (2008), apud Lackenby (1950)), onde a nova geometria é obtida do

Figura 12 – Tabela de cotas típica.

Station	Halfbreadths, m								Station
	Half Siding	Bottom tangent	4-ft WL 1.219 m	8-ft WL 2.438 m	16-ft WL 4.877 m	24-ft WL 7.315 m	27-ft WL 8.230 m	32-ft WL 9.754 m	
0, FP	0	—	0.759	0.581	0.108	—	—	0.133	0, FP
½	0.394	—	1.308	1.432	1.270	1.172	1.245	1.613	½
1	0.483	—	1.968	2.438	2.730	2.962	3.140	3.610	1
1½	0.571	—	2.978	3.848	4.626	5.102	5.359	5.886	1½
2	0.660	—	4.324	5.534	6.575	7.315	7.597	8.093	2
3	"	0.860	7.509	8.909	10.173	10.792	10.956	11.195	3
4	"	3.832	10.293	11.208	11.830	11.986	12.007	12.033	4
5	"	9.144	11.417	11.916	12.039	12.039	12.039	12.039	5
6	"	6.268	10.344	11.338	11.983	12.039	12.039	12.039	6
7	"	2.324	6.833	8.490	10.627	11.703	11.899	12.033	7
8	"	0.679	3.314	4.423	6.788	9.458	10.271	11.246	8
8½	"	0.660	2.207	2.896	4.518	7.306	8.417	9.976	8½
9	0.660	—	1.445	1.778	2.508	4.677	5.962	7.973	9
9½	0.432	—	0.549	0.568	0.600	1.553	3.057	5.410	9½
10, AP	—	—	—	—	—	—	—	2.130	10, AP
10-ft aft (3.048m)	—	—	—	—	—	—	—	—	10-ft aft (3.048m)

Table 1 (continued)

Station	Halfbreadths, m			Buttock Heights, m					Station
	40-ft WL 12.192 m	Main Deck	Foc'sle Deck	I 4-ft 1.219 m	II 8-ft 2.438 m	III 16-ft 4.877 m	IV 24-ft 7.315 m	V 32-ft 9.754 m	
0, FP	0.879	2.337	4.477	12.872	14.967	—	—	—	0, FP
½	2.775	4.483	6.674	0.911	11.586	15.335	—	—	½
1	4.823	6.518	8.477	0.378	2.438	12.284	15.888	—	1
1½	6.988	8.404	9.934	0.178	0.787	6.401	12.808	17.066	1½
2	8.979	9.966	11.011	0.083	0.368	1.654	7.315	14.167	2
3	11.484	11.716	11.944	0.019	0.089	0.359	1.111	3.810	3
4	12.039	12.039	—	0.016	0.048	0.117	0.251	0.851	4
5	"	"	—	"	"	0.111	0.178	0.279	5
6	"	"	—	"	"	0.111	0.213	0.835	6
7	12.039	"	—	0.016	0.048	0.394	1.524	3.708	7
8	11.932	12.039	—	0.044	0.517	2.953	5.347	7.630	8
8½	11.389	11.890	—	0.175	1.600	5.264	7.325	9.503	8½
9	10.252	11.370	—	0.676	4.712	7.461	9.223	11.510	9
9½	8.236	10.001	—	7.074	7.852	9.389	11.271	14.478	9½
10, AP	4.861	6.826	—	9.093	9.989	12.211	—	—	10, AP
10-ft aft (3.048m)	2.658	4.553	—	10.598	11.919	—	—	—	10-ft aft (3.048m)

Fonte: Lewis (1988).

ajuste de um casco conhecido; Projeto Paramétrico (LAMB, 2003), onde uma descrição da embarcação é criada e os parâmetros que a geram são selecionados de forma a maximizar uma medida de mérito; e Otimização de Linhas de Fluxo (PAPANIKOLAOU, 2014), onde a geometria de casco é iterativamente ajustada a partir de simulações hidrodinâmicas.

2.5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Ao longo da execução da rotina, diversos estimativas e ajustes são executados. Esta seção se dedica á apresentação dos arcabouço teórico matemático utilizado para tal.

2.5.1 Interpolação e a Spline Cúbica

Internamente, o algoritmo apresentado neste trabalho necessita com frequência de tornar contínuos conjuntos de informações discretos, ou, no contexto de avaliação numérica, ser capaz de refinar o quanto for necessário a resolução dessa informação. A esse processo refere-se como interpolação.

Para isso, por muitas vezes são utilizadas funções polinomiais, da forma:

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

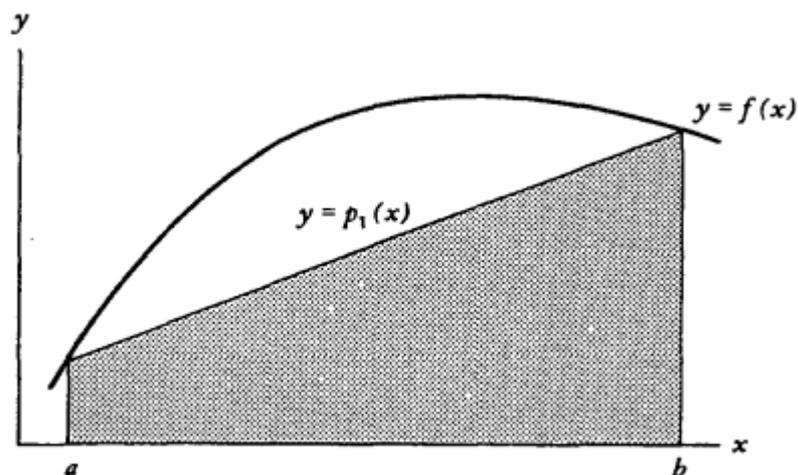
De acordo com Burden e Faires (2010) seu uso na interpolação se deve ao fato de elas se aproximarem uniformemente de funções contínuas. Isso significa que, dada qualquer função, definida e contínua em um intervalo fechado e limitado, é possível definir um polinômio arbitrariamente próximo a ela.

Aqui, a função polinomial mais recorrente é de terceira ordem, ou seja, cujo expoente de maior ordem é 3. Este polinômio é obtido a partir da aplicação de um interpolador Spline Cúbico de fronteira fixa. Essa função específica define o polinômio a partir do conhecimento dos valores e das primeiras derivadas nos contornos do intervalo a ser interpolado. Aplicação específica dessa determinação pode ser vista na seção 3.4.2.2.

2.5.2 Integração Numérica e a Regra do Trapezoide

Como observado ao longo desse capítulo, diversas quantidades físicas relevantes á modelagem de embarcações são definidas em termos de integrais definidas. Assim, é interessante que a rotina seja capaz de aproximar os valores dessas operações e estimar as quantidades relevantes. O método implementado para tal é a Regra do Trapezoide, onde a integral definida é aproximada pela área do trapézio definido sob a curva, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Aproximação de integral via Regra do Trapezoide.



Fonte: Atkinson (1989).

Para a rotina aqui apresentada, a aplicação do Regra do Trapezoide se dá

entre diversas coordenadas que subdividem o intervalo de interesse. Isso implica na aproximação da integral por um somatório. Considerando um intervalo fechado qualquer $[x_1 = a, x_N = b]$ contendo N pontos onde uma função conhecida f é aplicada, a integral se dá por:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} + x_n}{2} (f(x_{n+1}) + f(x_n)) \quad (6)$$

Atkinson (1989) demonstra que o erro ξ associado a essa aproximação é diretamente proporcional ao cubo do tamanho de intervalo h , aqui constante e igual a $(b - a)/(N - 1)$, e a derivada segunda da função f , f'' . Aqui, certifica-se que h é suficiente pequeno para que o erro seja desprezível e a rotina produza estimativas razoáveis.

$$\xi = -\frac{(b - a)h^2}{12} f''(x) \quad , \quad x \in [a, b] \quad (7)$$

2.5.3 Busca de Raízes e o Método da Bisseção

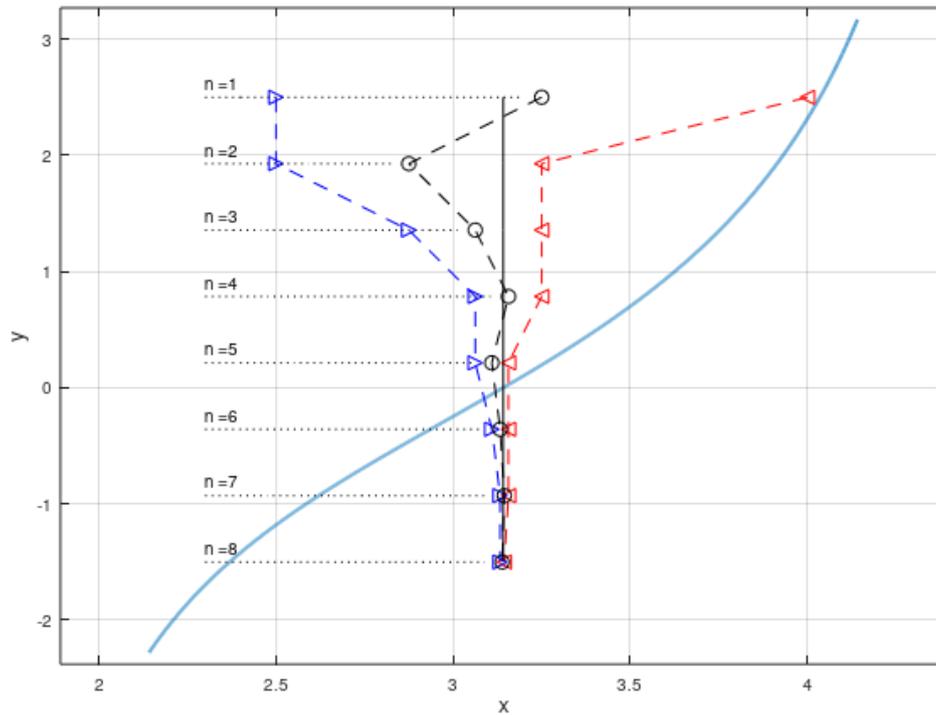
Como comentado, algumas tarefas executadas pelo algoritmo dependem da aplicação de ajustes iterativos de variáveis para que as funções dependentes dessas variáveis assumam o valor desejado. É recorrente que as inversas dessas funções não estejam disponíveis. Assim, é preciso que uma busca pela entrada correta seja conduzida.

Esse problema pode ser expresso como a busca por raízes de uma função (EPPERSON, 2013). De forma mais explícita, para uma função contínua $f(x)$ busca-se X para o qual $f(X) = 0$. Ao longo da rotina, a determinação da equação característica das 2 possíveis balizas se configura dessa maneira. O método de escolha para determinação da solução é o Método da Bisseção.

Para ser aplicado, esse método necessita de um intervalo fechado $[a, b]$ onde f se aplique, onde $a < X < b$ e $f(a) \cdot f(b) < 0$, ou seja, que os sinais de $f(a)$ e $f(b)$ sejam opostos. A busca se inicia com a avaliação de f no ponto central (c) do intervalo. Caso $f(a) \cdot f(c) < 0$, pela continuidade de f , X pertence ao intervalo $[a, c]$. Caso $f(a) \cdot f(c) > 0$, a função não troca de sinal entre a e c , X então pertence ao intervalo $[c, b]$.

O procedimento se repete para o intervalo contendo X , o intervalo então incondicionalmente converge em torno de X , com erro de ordem $(a - b) \cdot 2^{-n}$. Esse resultado é demonstrado por Epperson (2013). A Figura 14 ilustra a aplicação do método, explicitando a evolução do intervalo de busca e convergência em torno da raiz para 8 iterações.

Figura 14 – Método da Bisseção.



Fonte: O autor (2023).

3 METODOLOGIA

Esta seção se dedica ao detalhamento de todas as etapas realizadas na execução da rotina, bem como os cálculos executados em cada uma delas, visando possibilitar ao usuário plena capacidade de uso da ferramenta.

3.1 ARQUITETURA GERAL DA ROTINA

O procedimento para geração da geometria de casco a ser detalhado aqui é composto de duas grandes etapas: a geração e ajuste das Curvas Paramétricas e o desenho e justaposição das balizas. A racionalização de implementação detalhada de cada uma dessas etapas é apresentada a seguir e compõe o desenvolvimento principal do presente trabalho.

3.1.1 Descritivo de Procedimento

O algoritmo se inicia com a declaração das Entradas e dos Parâmetros de ajuste geométrico pelo usuário. Com esses dados a rotina então calcula as curvas paramétricas e a partir delas a distribuição de coeficiente de seção. A rotina então retorna ao usuário os gráficos das 4 curvas e procede à geração da geometria do casco. Para cada coordenada longitudinal é calculada uma baliza, cuja equação característica é dependente do coeficiente de seção. Calculadas todas as balizas a rotina então retorna ao usuário na janela de comando as grandezas derivadas e cria uma segunda janela, onde algumas dessas balizas são plotadas, permitindo ao usuário visualizar a geometria gerada. A partir dessa saída o usuário interpreta através dos critérios de parada a necessidade de ajuste da geometria, feita através da alteração dos parâmetros declarados anteriormente.

Uma representação visual das etapas desse algoritmo é mostrada em fluxograma na Figura 15

3.1.2 Curvas Paramétricas

Aqui refere-se como Curvas Paramétricas às três distribuições a partir das quais é completamente definida a geometria da porção submersa da embarcação. São elas a Curva de Área de Seção Transversal (*SAC*, do inglês Sectional Areas Curve), o Perfil de Plano de Linha D'água (*W*, do inglês Waterplane Profile) e a Curva da Quilha (*K*, do inglês Keel). A elas cabe a descrição "paramétricas" pois suas respectivas definições matemáticas são dependentes de informações fornecidas pelo usuário (os denominados "parâmetros"), e pelo fato de existirem infinitas combinações destes

que, quando aplicados às mesmas dimensões características iniciais da embarcação, resultem em soluções fisicamente significantes para a geometria de casco.

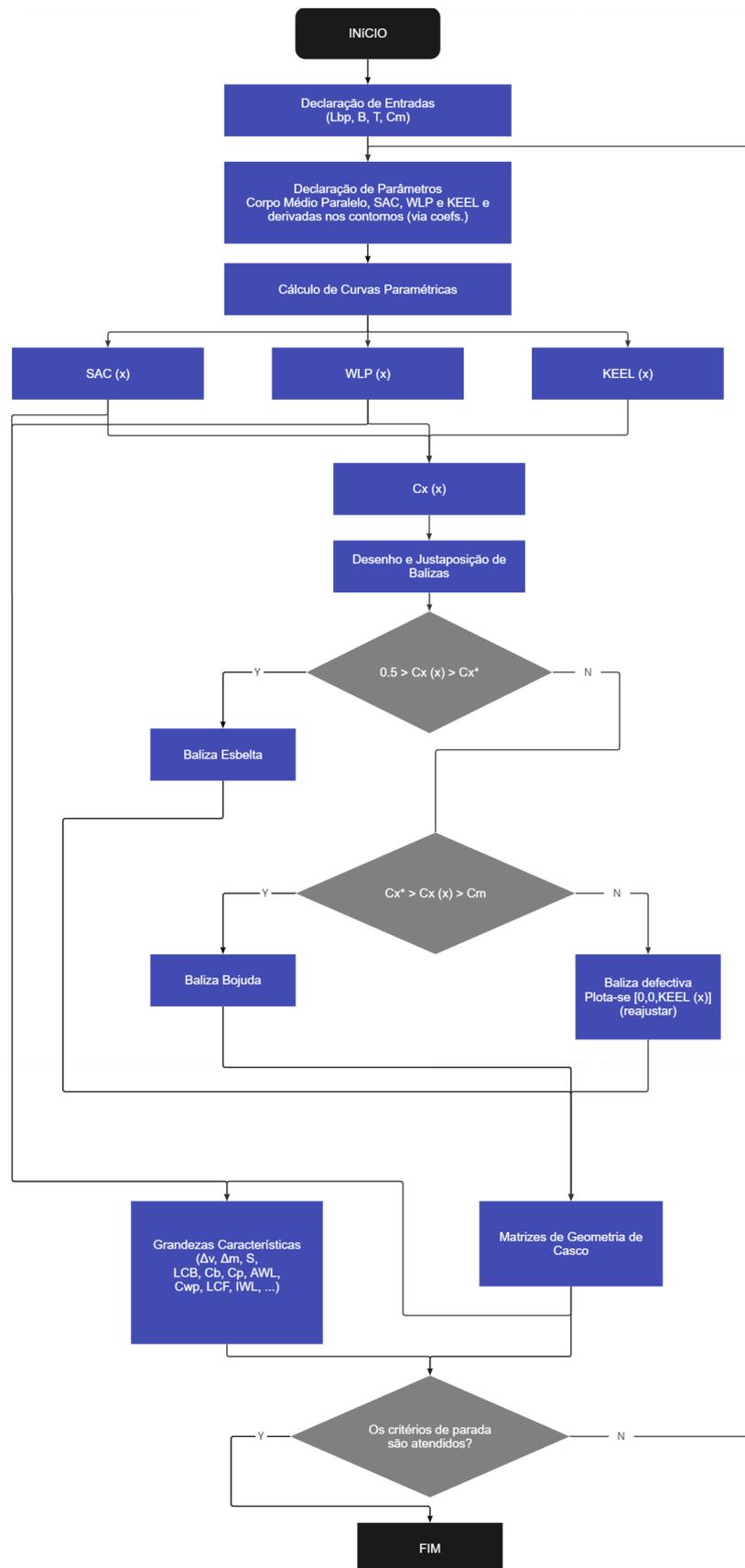
3.1.3 Entradas e Parâmetros do Algoritmo

Como comentado anteriormente, o funcionamento do algoritmo é dependente do fornecimento de alguns dados pelo usuário e declaração de alguns parâmetros para a primeira iteração. A entrada ou parâmetro em questão e sua respectiva função na rotina estão dispostas na Tabela 1.

Ao longo desse documento são recorrentes as referências a entradas e parâmetros. Em vista disso faz-se aqui relevante a diferenciação entre a definição de cada um deles. Ambos são variáveis da função global que a rotina executa, ou seja, ambos interferem em maior ou menor grau na saída retornada ao usuário ao final da execução do algoritmo. Porém, as entradas são grandezas relevantes à embarcação definidas à priori da execução da rotina, são intrínsecas da solução conceitual para a qual deseja-se gerar uma geometria de casco. Mudando-se as entradas muda-se efetivamente a embarcação em análise. Assim, da perspectiva da interação do usuário com a ferramenta, as entradas são fornecidas ante à primeira iteração e devem permanecer inalteradas durante as rodadas de ajuste.

Os parâmetros por sua vez são grandezas que complementam a descrição da solução conceitual, servindo o propósito de fornecer o detalhamento exato da geometria do casco. Para tal, devem ser ajustados de maneira a garantir que a solução para a superfície das obras vivas seja fisicamente coerente e atenda aos critérios estabelecidos para esta etapa do projeto. Orientações relativas ao procedimento de ajuste são fornecidas na seção 3.4.

Figura 15 – Fluxograma de funcionamento da rotina principal.



Fonte: O autor (2023).

Tabela 1 – Simbologia e descrição funcional de entradas e parâmetros

Grandeza e Classificação	Símbolo (relatório)	Função na rotina	Símbolo (rotina)
Comprimento entre perpendiculares (Dado Inicial)	L_{BP}	Define o limite superior do vetor domínio contendo as coordenadas longitudinais nas quais as curvas paramétricas serão calculadas.	Lbp
Boca (Dado inicial)	B	Define o limite superior para a cota transversal máxima da geometria.	B
Calado (Dado Inicial)	T	Define o limite superior para a cota vertical máxima da geometria.	T
Coefficiente de Seção-Mestra (Dado Inicial)	C_M	Define o limite superior da razão de preenchimento da baliza em relação ao retângulo circunscrito a ela.	Cm
Comprimento e Coord. Longitudinal do Centro do Corpo Médio Paralelo (Parâmetro)	L_{PMB} X_{PMB}	Definem as coordenadas de início e fim das seções à ré (Corpo de Ré), central (Corpo Médio Paralelo) e à vante (Corpo de Vante) da embarcação. Essas são as regiões do domínio longitudinal nas quais as respectivas interpolações serão implementadas, estabelecendo as características geométricas de cada seção.	Lpmb Xpmb
Coefficientes de SAC, Meia-boca e Altura de Quilha, à Ré e à Vante (Parâmetros)	$k_{SAC,(aft,fwd)}$ $k_{W,(aft,fwd)}$ $k_{K,(aft,fwd)}$	Definem as cotas horizontal e vertical, respectivamente, nas extremidades dos corpos de ré e de vante mais afastadas da meia-nau.	k_{SAC_aft} , k_{SAC_fwd} k_{W_aft} , k_{W_fwd} k_{K_aft} , k_{K_fwd}
Derivadas da SAC, Quilha e Perfil de Linha d'Água à Ré e a Vante (Parâmetros)	$k_{s,SAC,(aft,fwd)}$ $k_{s,W,(aft,fwd)}$ $k_{s,K,(aft,fwd)}$	Definem as angulações das extremidades da embarcação nas direções vertical e horizontal respectivamente. São informadas à rotina via seus respectivos coeficientes (prefixo "K").	ks_{SAC_aft} , ks_{SAC_fwd} ks_{W_aft} , ks_{W_fwd} ks_{K_aft} , ks_{K_fwd}

Fonte: O autor (2023).

O formato de declaração dos dados iniciais e dos parâmetros na interface da rotina principal é mostrado abaixo.

```

1  % Grandezas Iniciais e Parametros para ajuste geometrico
2
3  Lbp  = 200;
4  B    = 32;
5  T    = 10;
6  Cm   = 0.98;
7
8  kL_pmb      = 0.04;
9  kX_pmb      = 0.365;
10
11 k_SAC_aft    = 16/(B*T*Cm);
12 k_SAC_fwd    = 0.1;
13 ks_SAC_aft   = 0.15;
14 ks_SAC_fwd   = 1;
15
16 k_K_aft      = 8.2/T;
17 k_K_fwd      = 0;
18 ks_K_aft     = 0.75;
19 ks_K_fwd     = 0;
20
21 k_W_aft      = 0.5;
22 k_W_fwd      = 0.1;
23 ks_W_aft     = 2.5;
24 ks_W_fwd     = 1.5;

```

3.2 CÁLCULO DAS CURVAS PARAMÉTRICAS

Após a declaração de todas as entradas e parâmetros pelo usuário, a primeira tarefa executada pela rotina é o cálculo das Curvas Paramétricas. O procedimento visa a conversão dos dados fornecidos nas três distribuições longitudinais que definirão a geometria das obras vivas: a Curva de Áreas Seccionais, o Perfil do Plano de Linha D'Água e a Curva de Altura de Quilha.

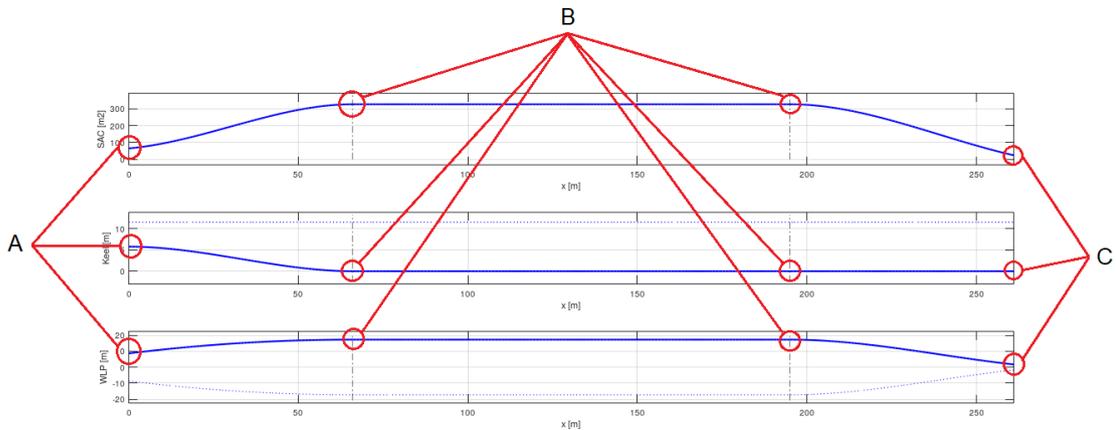
3.2.1 Divisão do Domínio Longitudinal

As distribuições das quantidades relevantes para a definição da geometria da embarcação (SAC, Perfil de Plano de Linha d'água e Altura de Quilha) são divididas em 3 domínios distintos, calculadas separadamente e então concatenadas. Cada domínio corresponde a uma das seções da embarcação:

- Corpo de Ré
- Corpo Médio Paralelo
- Corpo de Vante

As coordenadas de fronteira entre as seções são definidas a partir do comprimento total, da coordenada longitudinal de centro do corpo médio paralelo

Figura 16 – Valores de Contorno para controle das Curvas Paramétricas.



Fonte: O autor (2023).

e do seu comprimento. Essas quantidades são determinadas pela declaração dos respectivos coeficientes $k_{L,PMB}$ e $k_{X,PMB}$ (ver Tabela 1).

$$\begin{aligned}
 L_{PMB} &= k_{L,PMB} \cdot L_{BP} \\
 X_{PMB} &= k_{X,PMB} \cdot L_{BP} \\
 X_{aft} &= \left\lfloor X_{PMB} - \frac{1}{2}L_{BP} \right\rfloor \\
 X_{fwd} &= \left\lceil X_{PMB} + \frac{1}{2}L_{BP} \right\rceil
 \end{aligned} \tag{8}$$

L_{BP} é um inteiro positivo fornecido pelo usuário. Os valores de X_{aft} e X_{fwd} podem não ser inteiros, assim, para a geração do vetor coluna de coordenada longitudinal x com resolução $1m$, X_{aft} é arredondada para o inteiro inferior e X_{fwd} para o inteiro superior.

3.2.2 Valores de Contorno

Para os corpos nas extremidades (de Ré e Vante) as curvas paramétricas são calculadas a partir de quatro valores de contorno, duas medidas da quantidade calculada e duas derivadas, como ilustrado na Figura 16. A quantidade e a derivada nas extremidades da embarcação são parâmetros fornecidos pelo usuário (A e C), para a coordenada adjacente ao corpo médio paralelo (B) os valores são aqueles do corpo médio paralelo, e as derivadas são nulas (ver Tabela 1).

Em síntese, para uma curva paramétrica de interesse F_i , onde $i = 1$ (SAC), 2 (K), 3 (W):

- Em A:

$$F_i(0) = k_{i,aft} \cdot F_i(X_{aft})$$

$$\frac{dF_i}{dx}(0) = k_{s,i,aft} \frac{F_i(X_{aft}) - F_i(0)}{X_{aft}}$$

- Em B:

$$\begin{aligned}
 i = 1 (SAC) & : F_1(X_{aft}) = F_1(X_{fwd}) = C_M \cdot B \cdot T \\
 i = 2 (K) & : F_2(X_{aft}) = F_2(X_{fwd}) = 0 \\
 i = 3 (W) & : F_3(X_{aft}) = F_3(X_{fwd}) = \frac{1}{2}B \\
 i = 1, 2, 3 & : \frac{dF_i}{dx}(X_{aft}) = \frac{dF_i}{dx}(X_{fwd}) = 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

- Em C:

$$F_i(L_{BP}) = k_{i,fwd} \cdot F_i(X_{fwd})$$

$$\frac{dF_i}{dx}(L_{BP}) = k_{s,i,fwd} \frac{F_i(X_{fwd}) - F_i(0)}{L_{BP} - X_{fwd}}$$

3.2.3 Interpolação

Definidos os valores das curvas paramétricas nos contornos dos corpos de Ré, Médio Paralelo e de Vante, bem como de suas derivadas, passa-se ao cálculo do valor das curvas paramétricas para os pontos intermediários. Essa interpolação é feita através de Splines Cúbicas.

Como mencionado na seção 2.5.1, esses polinômios são de 3ª ordem. O algoritmo de Spline busca definir os 4 coeficientes desse polinômio. A declaração de 4 condições de contorno (2 valores e 2 derivadas) garante a unicidade das funções polinomiais nos seus respectivos intervalos.

3.2.4 Distribuição de Coeficiente de Seção

A partir das curvas paramétricas é calculado o Coeficiente de Seção Transversal para cada coordenada longitudinal da embarcação. Similar ao coeficiente de Seção Mestra (C_M), esse coeficiente quantifica o preenchimento do retângulo circunscrito à baliza. Dessa razão é selecionada a equação característica para o desenho da baliza.

$$C_X(x) \doteq \frac{SAC(x)}{2W(x)(T - K(x))} \tag{10}$$

3.3 DESENHO E JUSTAPOSIÇÃO DE BALIZAS

Calculadas as Curvas Paramétricas e a Distribuição do Coeficiente de Seção, diversas características geométricas das obras vivas já podem ser determinadas (ver

seção 3.4.1). Remanesce apenas a especificação dos pontos na superfície de interface entre estrutura e fluido.

O procedimento para desenho das balizas é composto de 3 etapas:

1. Seleção da equação característica da baliza a partir de $C_X(x)$.
2. Ajuste iterativo da equação característica em plano unitário.
3. Aplicação de transformação à baliza em plano unitário para obtenção da baliza nas dimensões definidas a priori para boca e calado.

3.3.1 Tipos de Baliza

A depender do preenchimento do retângulo circunscrito à baliza, duas equações características podem ser aplicadas, gerando duas geometrias distintas de baliza.

A primeira equação é um polinômio, gerado através do Algoritmo de Spline Cúbica, nos mesmos moldes das interpolações aplicadas aos corpos de Ré e de Vante. Aqui desenha-se uma baliza mais afilada, de preenchimento menor. A essa baliza refere-se como "esbelta".

A segunda equação característica é uma adaptação da equação de circunferência e desenha uma baliza de preenchimento maior, denominada "bojuda". Uma varredura da faixa de aplicação de C_X para a rotina com a respectiva baliza plotada em plano unitário é mostrada na Figura 17.

O número de pontos (N) é constante para todas as balizas é igual a $\lceil B/2 + T \rceil$. Essa definição mantém o máximo incremento em comprimento de arco entre pontos próximo a $1m$, similar à resolução do domínio longitudinal. Ademais, a rotina é definida de forma que os pontos possuam distribuição uniforme ao longo da coordenada vertical de cada baliza, entre a quilha e a linha d'água.

3.3.1.1 Baliza Esbelta

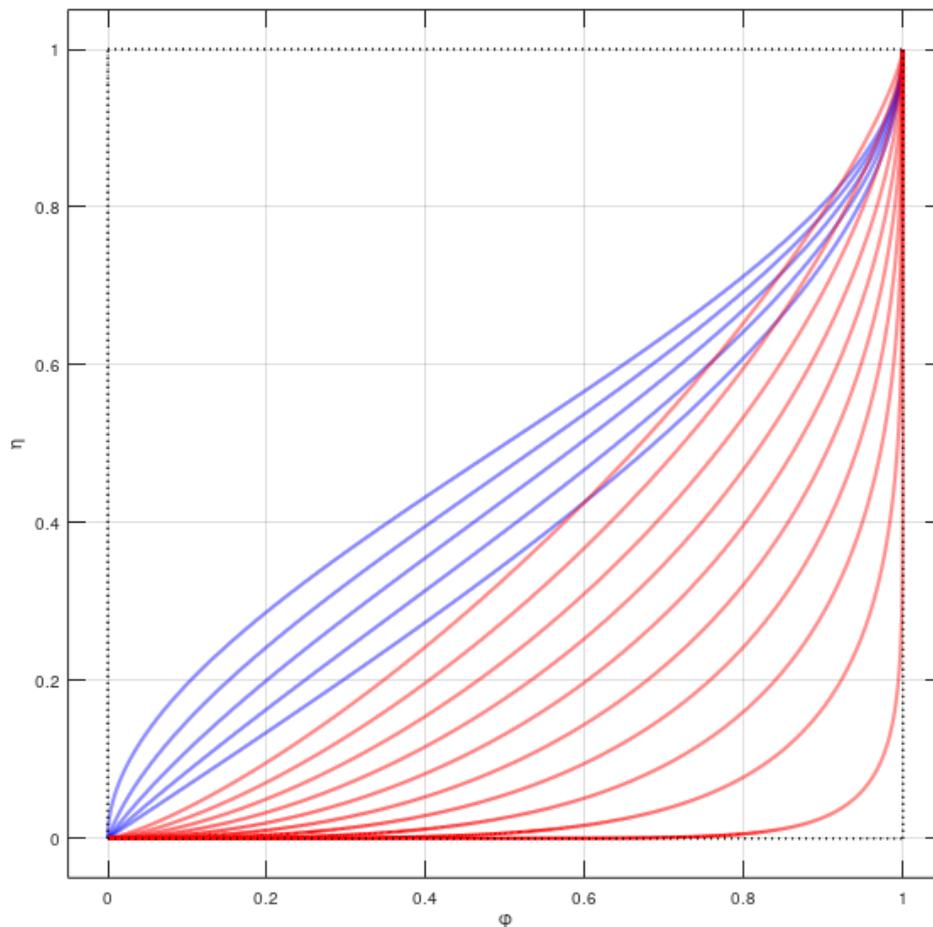
Como mencionado, a equação que define a baliza esbelta é polinomial, aplicada a um retângulo unitário, da forma:

$$\phi(\eta) = A\eta^3 + B\eta^2 + C\eta + D \quad 0 \leq \phi, \eta \leq 1$$

Aqui, ϕ é uma coordenada transversal, referente à meia boca da baliza na seção em questão, e η a coordenada vertical de incremento constante, referente ao calado da seção, nula na quilha e unitária na linha d'água do calado.

Para retângulo unitário, as condições de contorno são:

Figura 17 – Baliza para a faixa de coeficientes de seção. Balizas esbeltas em azul, balizas bojudas em vermelho.



Fonte: O autor (2023).

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(0) = 0 \quad \therefore D = 0 \\ \phi(1) = 1 \quad \therefore A + B + C = 1 \\ \frac{d\phi}{d\eta}(0) = \phi'_0 \quad \therefore C = \phi'_0 \\ \frac{d\phi}{d\eta}(1) = 0 \quad \therefore 3A + 2B + C = 0 \end{array} \right.$$

Observa-se que os coeficientes formam um sistema de equações parametrizado pela derivada da baliza junto à quilha em relação ao eixo vertical (ϕ'_0).

Essa derivada é então ajustada iterativamente através do Método da Bisseção até a obtenção de um erro relativo de ordem inferior a $1 \cdot 10^{-9}$ para o coeficiente de seção.

Para uma baliza em retângulo unitário com N pontos em incremento vertical

constante, C_X é igual à área da meia baliza, calculada via Método do Trapezoide:

$$C_X = \int_0^1 \phi(\eta) d\eta \quad (11)$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \frac{1}{2} (\phi(\eta_{n+1}) + \phi(\eta_n))$$

Ajustada a geometria da baliza no plano unitário, a obtenção dos vetores para as coordenadas transversal (y) e vertical (z) para as dimensões reais se dá pela transformação:

$$y = W(x) \cdot \phi \quad (12)$$

$$z = (T - K(x)) \cdot \eta + K(x)$$

Essa baliza é definida para C_X no intervalo $[0.5, 0.6244]$. O limite inferior desse intervalo se dá para derivada nula (vertical) na quilha e o limite superior é o coeficiente de transição da baliza esbelta para bojuda. O Detalhamento para seleção desses limites são apresentados nas seções 3.4.2.2 e 3.3.2, respectivamente.

3.3.1.2 Baliza Bojuda

A segunda geometria possível para o desenho da seção transversal possui equação característica, no plano unitário, similar ao quarto quadrante de uma circunferência de raio unitário. Aqui, porém, a ordem da equação é parametrizada de forma a ajustar o coeficiente de seção. A equação geral mostrada em 13 e se aplica a coeficientes de seção no intervalo $(0.6244, 1]$. Assim como para a baliza esbelta, discussões sobre esses limites são apresentadas em 3.4.2.2 e 3.3.2.

$$\phi^s + \eta^s = 1^s \quad (13)$$

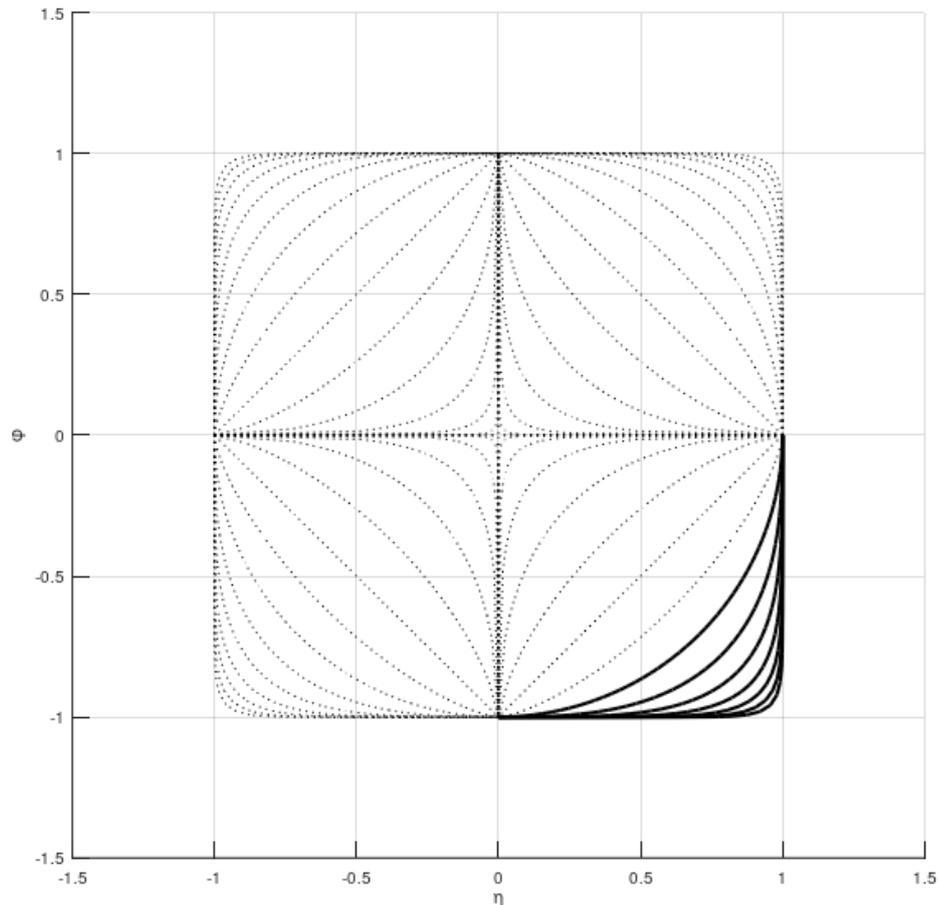
O resultado da reflexão dessa equação nos quatro quadrantes é mostrado na Figura 18. Observa-se que, para ordem s pequena, a curva é hiperbólica, tornando-se uma reta em $s = 1$, circular em $s = 2$ e preenche o quadrado de área unitária com $s \rightarrow \infty$.

A equação específica para a baliza em plano unitário se dá pelo deslocamento da reflexão mostrada no quarto quadrante para o primeiro quadrante. Dessa mudança resulta:

$$(1 - \phi)^s + \eta^s = 1^s \quad (14)$$

Analogamente à baliza esbelta, o ajuste paramétrico da ordem da equação é feito via aplicação do Método da Bisseção. Assim, o cálculo do coeficiente de seção

Figura 18 – Reflexão da equação 13 nos 4 quadrantes do plano cartesiano unitário. Curvas de interesse em destaque.



Fonte: O autor (2023).

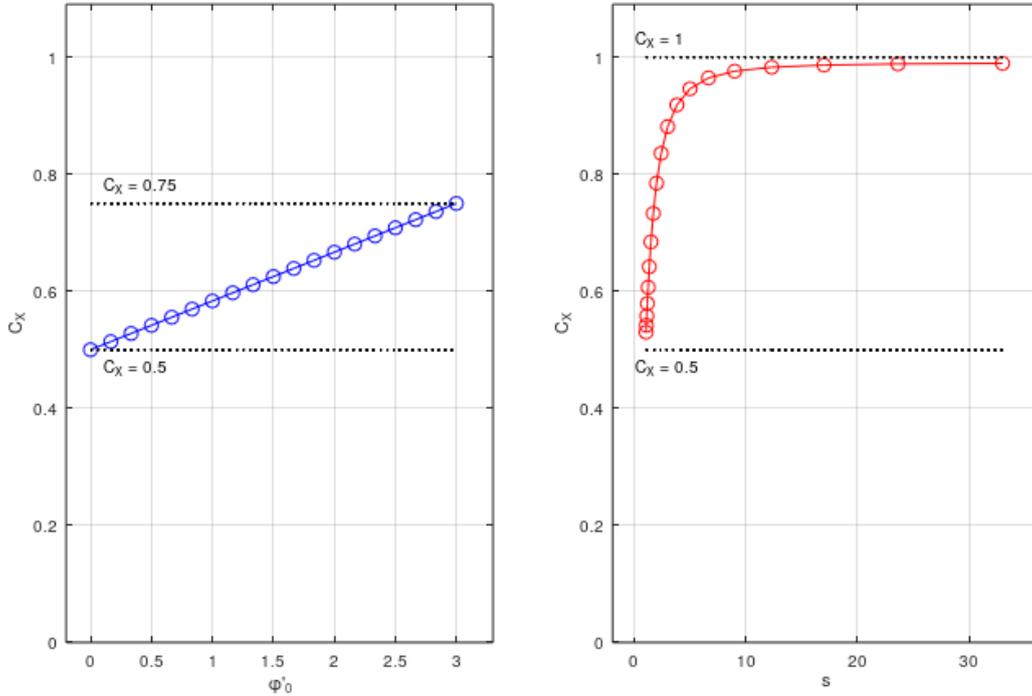
entre iterações é obtido aplicando-se a equação 11 e a transformação do traço do plano unitário para o plano nominal na embarcação aplicando-se a equação 12 subsequente.

3.3.2 Transição

A investigação do melhor coeficiente de seção para a transição entre as equações características das balizas se inicia pela definição de uma banda de coeficientes onde ambas as curvas produzam curvas fisicamente significativas e de interesse do ponto de vista de projeto.

Para a baliza esbelta, a discussão apresentada em 3.4.2.2 define os limites da derivada na quilha. O intervalo $[0, 3]$ de aplicação dessa derivada restringe o Coeficiente de seção ao intervalo fechado $[0.5, 0.75]$. Já para a baliza bojuda, visando que esta seja convexa, o expoente aplicado à equação 14 fica restrito ao intervalo aberto $(1, \infty)$, e o coeficiente de seção ao intervalo $(0.5, 1)$. A evolução dos coeficientes de seção para cada baliza e seus limites de aplicação podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 – Evolução de C_X para faixa de parâmetros característicos de cada baliza (esbelta à esquerda, bojuda à direita).



Fonte: O autor (2023).

Haja vista a necessidade do uso de duas balizas para a cobertura de toda a faixa proposta de Coeficientes de Seção e o interesse em minimizar variações geométricas abruptas na superfície do casco, é preciso que a transição entre as balizas ocorra da maneira mais suave possível.

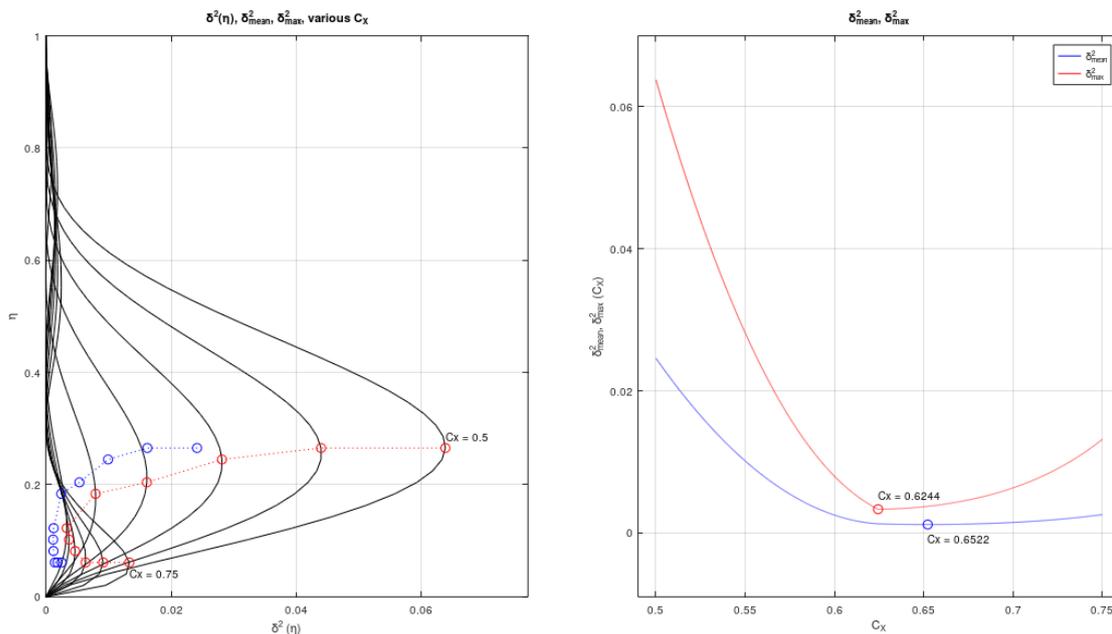
A métrica escolhida para visualização e quantificação dessa variação é a distribuição da diferença quadrática entre as coordenadas transversais para ambas as curvas, avaliadas em plano unitário para mesmo coeficiente de seção. Dessa distribuição são extraídas duas grandezas: a diferença transversal quadrática média ($\overline{\delta^2}$) e a diferença transversal quadrática máxima (δ_{max}^2). Visto que a geometria da baliza é selecionada através do Coeficiente de Seção, $\overline{\delta^2}$ e δ_{max}^2 são funções dessa variável.

$$\begin{aligned}\overline{\delta^2} &= \int_0^1 (\phi_b(\eta) - \phi_s(\eta))^2 d\eta \\ \delta_{max}^2 &= \max [(\phi_b(\eta) - \phi_s(\eta))^2]\end{aligned}\quad (15)$$

Aqui ϕ_s e ϕ_b são as coordenadas transversais em plano unitário para as balizas esbelta e bojuda, respectivamente. Numericamente, a integral em 15 é calculada via Método do Trapezoide. As distribuições da diferença quadrática e evolução de suas métricas em função do Coeficiente de Seção podem ser observadas na Figura 20.

Visto que a diferença quadrática média é muito próxima à mínima em $C_X =$

Figura 20 – Distribuições e evolução de $\overline{\delta^2}$ e δ_{max}^2 para seleção de C_X para transição entre balizas.



Fonte: O autor (2023).

0.6244 e neste o valor da diferença quadrática máxima é mínimo, é selecionado o coeficiente de seção para transição entre balizas.

3.4 AJUSTE E CRITÉRIOS E PARADA

A determinação das curvas paramétricas como funções de múltiplos parâmetros induz a existência de infinitas soluções para conjuntos destas, todas fisicamente viáveis. Nesse contexto, o procedimento de geração da geometria do casco requer alguns referenciais para indicar sua finalização.

É improvável que os resultados do primeiro cálculo das curvas paramétricas sejam suficientes para dar sequência ao projeto. Eventuais discrepâncias entre a geometria inicial e os dados de referência de etapas anteriores do projeto e expectativas em relação ao resultado final podem então ser corrigidas ajustando-se os parâmetros de entrada da rotina. O presente capítulo busca orientar o usuário em relação à convergência da rotina para um resultado aceitável para a geometria de casco.

É válido ressaltar que a congruência da geometria com estimativas feitas a priori e ausência de incoerências físicas na solução podem se mostrar insuficiente como critério de parada. Eventualmente, a avaliação a posteriori da geometria das obras vivas em simulações de arranjo, estruturais, hidrostáticas ou hidrodinâmicas indicar alguma insuficiência da solução. Nesse caso, a obtenção de uma geometria de casco satisfatória se daria não apenas por ajuste paramétrico, mas possivelmente pela

alteração dos dados de entrada.

3.4.1 Aderência a Requisitos de Projeto e Grandezas Derivadas

A comparação dos valores resultantes obtidos para as grandezas características da geometria modelada com os requisitos definidos em etapas anteriores do projeto da embarcação pode indicar possíveis ajustes a serem implementados nas curvas paramétricas.

Nesse contexto, a rotina fornece calcula as grandezas relevantes da geometria em questão e as retorna ao usuário. Devido à natureza discreta dos dados, aproximações são aplicadas. A implementação do cálculo é detalhada abaixo.

- **Deslocamentos Volumétrico (∇) e Mássico (Δ)**

Calculado integrando $SAC(x)$ via Método do Trapezoide

$$\begin{aligned}\nabla &= \int_0^{L_{BP}} SAC(x)dx \\ &\approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} (SAC(x_{n+1}) + SAC(x_n)) \\ \Delta &= \rho \nabla\end{aligned}\tag{16}$$

- **Coordenada Longitudinal do Centro de Carena (LCB)**

Calculado a integral ponderada de $SAC(x)$ via Método do Trapezoide

$$\begin{aligned}LCB &= \frac{\int_0^{L_{BP}} x SAC(x)dx}{\int_0^{L_{BP}} SAC(x)dx} \\ &= \frac{1}{\nabla} \int_0^{L_{BP}} x SAC(x)dx \\ &\approx \frac{1}{\nabla} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} (x_{n+1} SAC(x_{n+1}) + x_n SAC(x_n))\end{aligned}\tag{17}$$

É recorrente na literatura que o LCB seja expresso como percentual do comprimento em relação à meia-nau:

$$LCB\% = 100 \frac{LCB - 0.5 L_{BP}}{L_{BP}}$$

Vale ressaltar que esse valor é positivo para coordenadas à vante e negativo para coordenadas à ré da meia-nau.

- **Coeficiente de Bloco (C_B) e Coeficiente Prismático Longitudinal (C_P)**

Calculado aplicando equações 1 e 3, respectivamente.

- **Área (A_{WL}) e Coordenada Longitudinal Centróide (LCF) e Momento de Inércia de Área ($I_{zx,WP}$) do Plano de Linha D'água**

Calculadas pela integração do Perfil de Plano de Linha D'água $W(x)$ via Método do Trapezoide

$$\begin{aligned}
 A_{WL} &= \int_0^{L_{BP}} 2 W(x) dx \\
 &\approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} \left(x_{n+1} 2 W(x_{n+1}) + x_n 2 W(x_n) \right)
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 LCF &= \frac{\int_0^{L_{BP}} x 2 W(x) dx}{\int_0^{L_{BP}} 2 W(x) dx} \\
 &= \frac{1}{A_{WL}} \int_0^{L_{BP}} x 2 W(x) dx \\
 &\approx \frac{1}{A_{WL}} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} \left(x_{n+1} 2 W(x_{n+1}) + x_n 2 W(x_n) \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$LCF_{\%} = 100 \frac{LCF - 0.5 L_{BP}}{L_{BP}}$$

$$\begin{aligned}
 I_{zx,WP} &= \int_0^{L_{BP}} \frac{1}{12} [2 W(x)]^3 dx \\
 &\approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x_{n+1} - x_n}{2} \frac{1}{12} \left([2 W(x_{n+1})]^3 + [2 W(x_n)]^3 \right)
 \end{aligned} \tag{20}$$

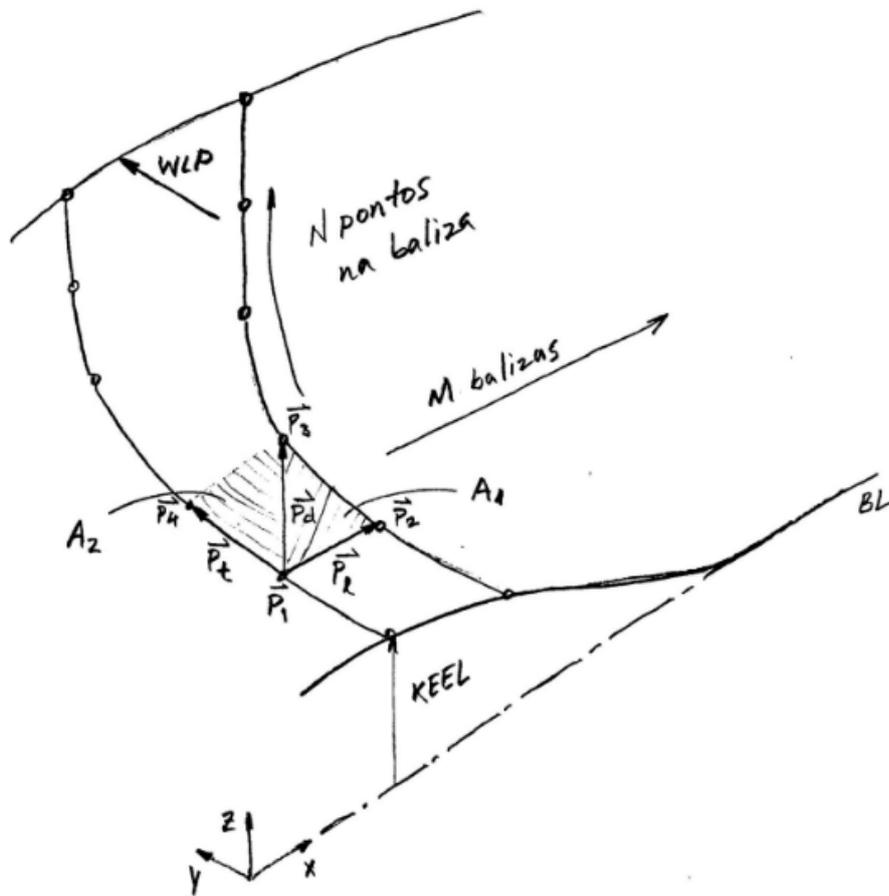
- **Coeficiente do Plano de Linha D'água (C_{WP})**

Calculado aplicando a equação 4.

- **Área Molhada (S)**

Para o caso contínuo, a área molhada seria calculada através da integral dupla de superfície. Haja vista que a informação na rotina é discretizada, uma aproximação dessa integral precisa ser aplicada.

Figura 21 – Elementos de área para cálculo da Área Molhada S .



Fonte: O autor (2023).

Para a estimativa da área de superfície, esta é então aproximada por regiões planas triangulares a partir dos pontos gerados das balizas, conforme Figura 21. Equaciona-se:

$$\begin{aligned}\vec{P}_1 &= [x_{m,n} \quad y_{m,n} \quad z_{m,n}]^T \\ \vec{P}_2 &= [x_{m+1,n} \quad y_{m+1,n} \quad z_{m+1,n}]^T \\ \vec{P}_3 &= [x_{m,n+1} \quad y_{m,n+1} \quad z_{m,n+1}]^T \\ \vec{P}_4 &= [x_{m+1,n+1} \quad y_{m+1,n+1} \quad z_{m+1,n+1}]^T\end{aligned}$$

Desses vetores coordenada nas balizas são então definidos os vetores característicos dos elementos de área:

$$\begin{aligned}\vec{P}_l &= \vec{P}_2 - \vec{P}_1 \\ \vec{P}_t &= \vec{P}_3 - \vec{P}_1 \\ \vec{P}_d &= \vec{P}_4 - \vec{P}_1\end{aligned}$$

Os elementos de área são então calculados:

$$\begin{aligned}\vec{S}_1 &= \frac{1}{2} [\vec{P}_l \times \vec{P}_d] & A_1 &= \sqrt{\vec{S}_1 \cdot \vec{S}_1} \\ \vec{S}_2 &= \frac{1}{2} [\vec{P}_d \times \vec{P}_t] & A_2 &= \sqrt{\vec{S}_2 \cdot \vec{S}_2}\end{aligned}$$

A quantidade de interesse - a área molhada S - é obtida então da soma desses elementos de área para toda a geometria. Para M balizas e N pontos por baliza, a soma de todos os elementos de área compõe a área molhada da semi-superfície à bombordo do plano diametral. A área total se dá então por:

$$S = 2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{N=1}^{N-1} (A_1 + A_2)_{m,n} \quad (21)$$

- **Coordenada Vertical de Centro de Carena (VCB)**

Analogamente ao cálculo de LCB , VCB é obtido da integração ponderada da coordenada vertical ao longo do volume deslocado. Haja vista que a rotina não gera curvas de linha d'água para diferentes calados, VCB não é obtido diretamente das curvas paramétricas, mas pode ser calculado a posteriori da geração das balizas. Equaciona-se:

$$\begin{aligned}VCB &= \frac{1}{\nabla} \iiint_{\nabla} z \, d\nabla \\ &= \frac{1}{\nabla} \iint z \, dA_X \, dx \quad dA_X = 2 y \, dz \\ &= \frac{1}{\nabla} \int_0^{L_{BP}} \left[\int_K^T 2 y z \, dz \right] dx\end{aligned}$$

A integral interna dá o momento vertical do centroide da seção transversal $\bar{z} A_x = \bar{z} SAC(x)$. Essa integral é calculada na rotina via Regra do Trapezoide.

$$\begin{aligned}\int_K^T 2 y z \, dz &= \bar{z} SAC(x) \\ &\approx \sum_{n=1}^{N-1} \frac{z_{n+1} - z_n}{2} \left[(2 y z)_{n+1} + (2 y z)_n \right]\end{aligned}$$

Avaliada essa quantidade para cada coordenada x , obtém-se o integrando da integral externa. Esta é novamente avaliada aplicando-se a Regra do Trapezoide:

$$\begin{aligned}
VCB &= \frac{1}{\nabla} \int_0^{L_{BP}} \bar{z} SAC(x) dx \\
&\approx \frac{1}{\nabla} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{x_{m+1} - x_m}{2} \left[(\bar{z} SAC(x))_{m+1} + (\bar{z} SAC(x))_m \right]
\end{aligned} \tag{22}$$

3.4.2 Resultados Incoerentes ou não-Físicos:

Como mencionado, uma possível solução para o problema de geração de geometria de casco se apresenta quando uma superfície fisicamente significativa é obtida. As condições que delimitam a significância e validade da solução são discutidas nessa seção.

Por incoerências físicas aqui entende-se qualquer circunstância observada para as curvas paramétricas que seja incompatível com definições e características primitivas das respectivas grandezas físicas.

Não são contempladas nessa interpretação características da solução que, se levadas adiante, apenas dificultariam a fabricação do casco ou fossem disruptivas às funções intrínsecas dele, como inflexões abruptas ou proporções geométricas incomuns. Essas características geralmente diminuem o mérito da solução, mas não impedem a sua realização.

Resultados ditos não-físicos são aqueles que introduzem incoerências entre o resultado da geometria e os valores de entrada e hipóteses adotada na rotina, ou que ferem direta ou indiretamente alguma Lei física, como as Leis de Newton aplicadas às equações de equilíbrio ou as Leis da Termodinâmica, aplicadas às análises energéticas. Podem ser citados como exemplos dessas inconsistências $C_B, C_M, C_D, \dots > 1$, eficiências de conversão superiores a 100%, densidades e temperaturas absolutas negativas.

3.4.2.1 Supressão dos corpos de ré e vante

O comprimento total entre perpendiculares e a imposição da existência das 3 seções da embarcação induz uma restrição ao par centro-comprimento do corpo médio paralelo. De forma geral, este não deve intersectar as extremidades da embarcação, excluindo a respectiva seção na extremidade. Disso decorre:

$$\frac{1}{2} L_{PMB} < X_{PMB} < L_{BP} - \frac{1}{2} L_{PMB} \quad , \quad 0 < L_{PMB} < L_{BP}$$

Dividindo-se por L_{BP} explicita-se restrição sobre os coeficientes paramétricos:

$$\frac{1}{2} k_{L,PMB} < k_{X,PMB} < 1 - \frac{1}{2} k_{L,PMB} \quad , \quad 0 < k_{L,PMB} < 1 \tag{23}$$

3.4.2.2 Problema de extrapolação nas seções interpoladas e limites para derivadas da Spline nos contornos

Aumentando o módulo da derivada nos pontos de controle à ré e a vante, é possível que os limites estabelecidos para as curvas paramétricas a partir das entradas sejam extrapolados.

- Aumento da boca, em excesso da boca máxima de projeto.
- Cota vertical da quilha inferior à linha de base.
- Aumento da SAC, em excesso da área de seção mestra, resultando em coeficiente de seção em excesso do coeficiente de seção mestra.

A fim de evitar incoerência com os dados de entrada, deve-se atentar para que os limites para boca e quilha sejam atendidos para todo o domínio longitudinal.

As dimensões do corpo médio paralelo são constantes e definidas unicamente a partir dos dados de entrada. A extrapolação ocorre então na interpolação para os corpos de ré e de vante. Nas coordenadas junto ao corpo médio paralelo são impostas as condições de continuidade C_0 e C_1 , e nas coordenadas de extremidade o valor da curva é dado por parâmetro.

A extrapolação pode então ocorrer a depender da seleção da derivada no contorno de extremidade. Busca-se então estabelecer um limite superior para essa derivada.

Para a análise desse caso, será considerada a interpolação de função genérica $F(x)$. No contexto desse trabalho, F tem por análogos as curvas paramétricas $SAC(x)$, $W(x)$ e $K(x)$. F e a respectiva coordenada de domínio x são definidas para os intervalos de interpolação:

$$F_0 \leq F(x) \leq F_1 \quad , \quad x_0 \leq x \leq x_1$$

A oportuna interpolação por Spline Cúbica tem por condições de contorno: x_0 , F_0 , x_1 , F_1 e as derivadas:

$$\frac{dF}{dx}(x = x_1) = F'_1 \doteq 0 \quad e \quad \frac{dF}{dx}(x = 0) = F'_0 \quad (24)$$

Aqui F'_0 é a variável do problema para a qual deseja-se definir um limite superior.

Antes de aplicar o equacionamento para interpolação cúbica, para fim de simplificar a manipulação algébrica do problema, opera-se uma adimensionalização. Define-se:

$$\eta \doteq \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad , \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad e \quad \phi \doteq \frac{F(x) - F_0}{F_1 - F_0} \quad , \quad 0 \leq \phi \leq 1 \quad (25)$$

A derivada adimensionalizada pode ser obtida através da aplicação da Regra da Cadeia:

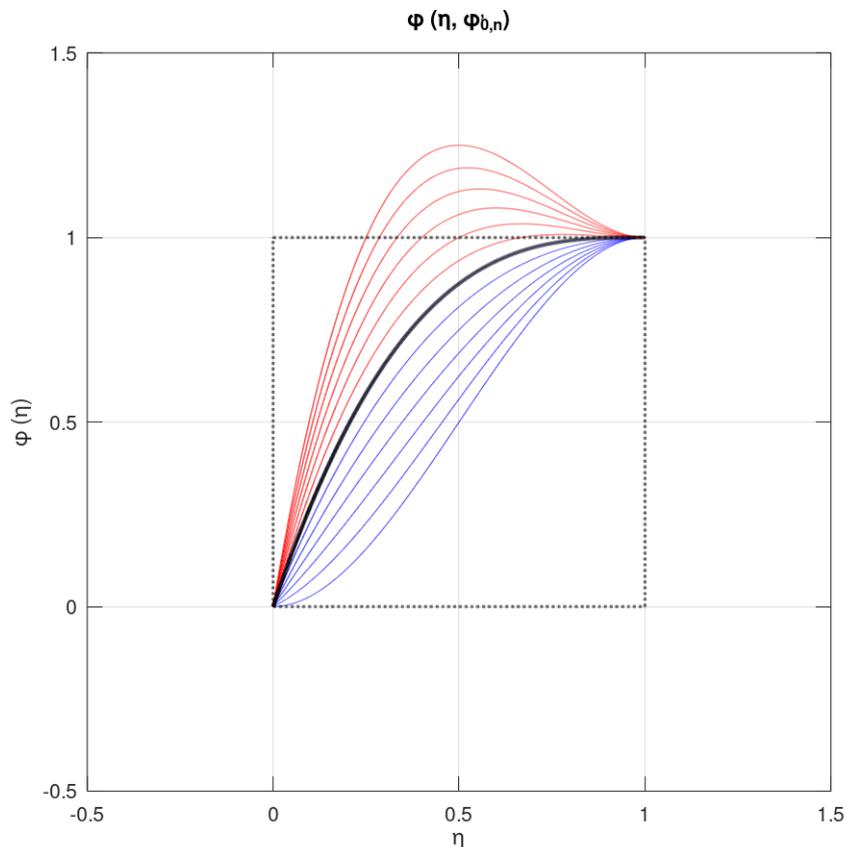
$$\frac{d\phi}{d\eta} = \frac{d\phi}{dF} \frac{dF}{dx} \frac{dx}{d\eta} \quad (26)$$

Avaliando em $\eta_0(x_0)$ a derivada central se torna F'_0 e obtém-se a forma explícita para a nova variável de interesse ϕ'_0 :

$$\phi'_0 = \frac{x_1 - x_0}{F_1 - F_0} F'_0 \quad (27)$$

A visualização do problema pode ser feita agora em termos de η e $\phi(\eta)$, na Figura 22. Observa-se que o domínio do problema agora é um retângulo unitário (demarcado em linha pontilhada), dentro do qual variando-se ϕ'_0 (derivada no ponto de controle à esquerda, embaixo) $\phi(\eta)$ extrapola a aresta superior do retângulo (curvas em vermelho). Deseja-se obter a derivada máxima para a qual $\phi(\eta)$ não extrapola a região demarcada (curva realçada).

Figura 22 – $\phi(\eta)$ para várias derivadas no contorno. Curva de derivada crítica em realce.



Fonte: O autor (2023).

As equações para as splines de $F(x)$ e, por extensão, de $\phi(\eta)$ tem forma polinomial cúbica:

$$\begin{aligned} F(x) &= ax^3 + bx^2 + cx + d \\ \phi(\eta) &= A\eta^3 + B\eta^2 + C\eta + D \end{aligned} \quad (28)$$

Aplicando as condições de contorno, obtém-se um sistema de equações para os coeficientes da equação 28:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(0) = 0 \quad \therefore D = 0 \\ \phi(1) = 1 \quad \therefore A + B + C = 1 \\ \frac{d\phi}{d\eta}(0) = \phi'_0 \quad \therefore C = \phi'_0 \\ \frac{d\phi}{d\eta}(1) = 0 \quad \therefore 3A + 2B + C = 0 \end{array} \right. \quad (29)$$

Resolvendo o sistema os coeficientes são expressos em termos da variável de interesse ϕ'_0 :

$$A = \phi'_0 - 2, \quad B = 3 - 2\phi'_0, \quad C = \phi'_0, \quad D = 0 \quad (30)$$

Obtidos os coeficientes da Spline Cúbica para $\phi(\eta)$ parametrizada pela derivada ϕ'_0 no contorno, remanesce a inclusão da informação geométrica referente à limitação do valor de máximo da função, para que a curva fique contida na região retangular unitária estabelecida anteriormente.

A adimensionalização estabelece que $(\eta = 1, \phi = 1)$ define os extremos do retângulo unitário. Para que a curva $\phi(\eta)$ seja interna a ele para todo valor de η , a ordenada desse ponto deve ser máximo global de ϕ . Essa imposição, juntamente com a condição de derivada $\phi'_1 = 0$ prescrita na extremidade oposta, restringe que $\phi(\eta)$ seja não-decrescente. Explicita-se:

$$\frac{d\phi}{d\eta} = 3A\eta^2 + 2B\eta + C \geq 0, \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (31)$$

Para que o lado esquerdo da inequação 31 (quadrática em η) atenda à condição especificada para todo o domínio, não devem haver raízes reais distintas em η . Isso incorreria de concavidade positiva ($3A > 0$) e do discriminante Δ_ϕ da inequação ser não-positivo:

$$\Delta_\phi = (2B)^2 - 4(3A)C \leq 0 \quad (32)$$

Haja vista a parametrização de A , B e C , a equação 32 limita ϕ'_0 . Substituindo os coeficientes encontrados em 30 tem-se:

$$\phi_0'^2 - 6\phi_0' + 9 \geq 0 \quad (33)$$

Esta equação possui duas raízes reais iguais, em $\phi'_{0,cr} = 3$.

Lembrando que esse resultado é generalizado para qualquer seção interpolada pela Spline Cúbica apresentada. A fim de simplificar a implementação do controle dos parâmetros definidos pelo usuário, é oportuno estabelecer que o valor para todas as derivadas de contorno seja fornecido à rotina via coeficientes $k_{\phi'_0}$ limitados ao intervalo $0 \leq k_{\phi'_0} \leq \phi'_{0,cr}$.

Manipulando a equação 27 explicitam-se a definição e os limites de aplicação do coeficiente:

$$k_{\phi'_0} = \phi'_0 = \frac{d\phi}{d\eta}(\eta = 0) = \frac{dF}{dx} \frac{x_1 - x_0}{F_1 - F_0}, \quad 0 \leq k_{\phi'_0} \leq k_{\phi'_0}|_{max} = \phi'_{0,cr} = 3 \quad (34)$$

A aplicação dessa definição pode ser facilmente identificada na rotina para o cálculo das curvas paramétricas em cada seção interpolada:

```

1 % SAC
2 SAC_aft = k_SAC_aft*B*T*Cm;
3 SAC_fwd = k_SAC_fwd*B*T*Cm;
4 s_SAC_aft = ks_SAC_aft*((B*T*Cm -SAC_aft)/X_aft);
5 s_SAC_fwd = ks_SAC_fwd*((SAC_fwd -B*T*Cm)/(Lbp -X_fwd));
6
7 % Curva da quilha
8 K_aft = k_K_aft*T;
9 K_fwd = k_K_fwd*T;
10 s_aft_keel = ks_K_aft*(-K_aft/X_aft);
11 s_fwd_keel = ks_K_fwd*(K_fwd/(Lbp -X_fwd));
12
13 % Perfil de Plano de Linha D'agua
14 W_aft = k_W_aft*B/2;
15 W_fwd = k_W_fwd*B/2;
16 s_W_aft = ks_W_aft*(B/2 -W_aft)/X_aft;
17 s_W_fwd = ks_W_fwd*(W_fwd -B/2)/(Lbp -X_fwd);

```

3.4.3 Extrapolação do limite superior do coeficiente de seção

Em termos absolutos, não há interpretação física para um coeficiente de seção superior à unidade. Isso decorre do fato de a baliza em questão sempre estar integralmente contida no retângulo circunscrito à ela, este, referência para o cálculo do coeficiente de seção.

O limite inferior do coeficiente de seção é mais restrito. Apesar de valores para C_X serem fisicamente significativos para o intervalo $(0, 1]$, devido à limitação imposta pelo método de interpolação e a imposição de costado vertical junto à linha d'água para a baliza esbelta, o mínimo preenchimento da baliza é a metade.

$$0.5 \leq C_X(x) \leq 1 \quad (35)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

o presente capítulo apresenta em maior destaque a relação entre os dados de entrada para o a metodologia apresenta e os resultados obtidos de sua aplicação. É visado instruir o usuário no uso da a partir da sua aplicação na modelagem exemplos de embarcações distintas, presentes na literatura. Os resultados de cada modelagem são apresentados oportunamente, nas suas respectivas seções.

Na sequência são abordadas as limitações da ferramenta e listadas opções para mitigação dos problemas observados na contestação das fronteiras de aplicação da metodologia.

4.1 APLICAÇÃO EM EXEMPLO

Os 3 exemplos selecionados para modelagem são distintos de diversas maneiras, tanto na função global da embarcação projetada, quanto em dimensões absolutas, quanto no formato e riqueza das informações disponíveis e o pré-processamento necessário para ajuste sintático e entrada na rotina. Busca-se observar a capacidade da rotina em gerar uma geometria ora compatível com diversas restrições, ora estimando características da embarcação quando essas são escassas.

4.1.1 Embarcação Mercante

Os dados para a primeira embarcação modelada são fornecidos por Holtrop e Mennen (1982). As informações podem ser separadas em entradas (referentes às grandezas iniciais) e referências (utilizadas como restrição para alguns parâmetros e critério de parada).

Considera-se nominais moldados e:

$$C_B = \frac{C_P}{C_M} = 0.5952$$

$$k_{SAC,aft} = \frac{A_{TS}}{B \cdot T \cdot C_M}$$

$$K_{aft} = D_P + H_P$$

$$k_{K,aft} = \frac{K_{aft}}{T}$$

Demais parâmetros são definidos do ajuste da geometria. Aplicando uma primeira estimativa, com demais coeficientes paramétricos arbitrários, mas fisicamente significativos, obtém-se o resultado da primeira iteração:

Tabela 2 – Dados relevantes para modelagem geométrica de embarcação mercante.

Entradas

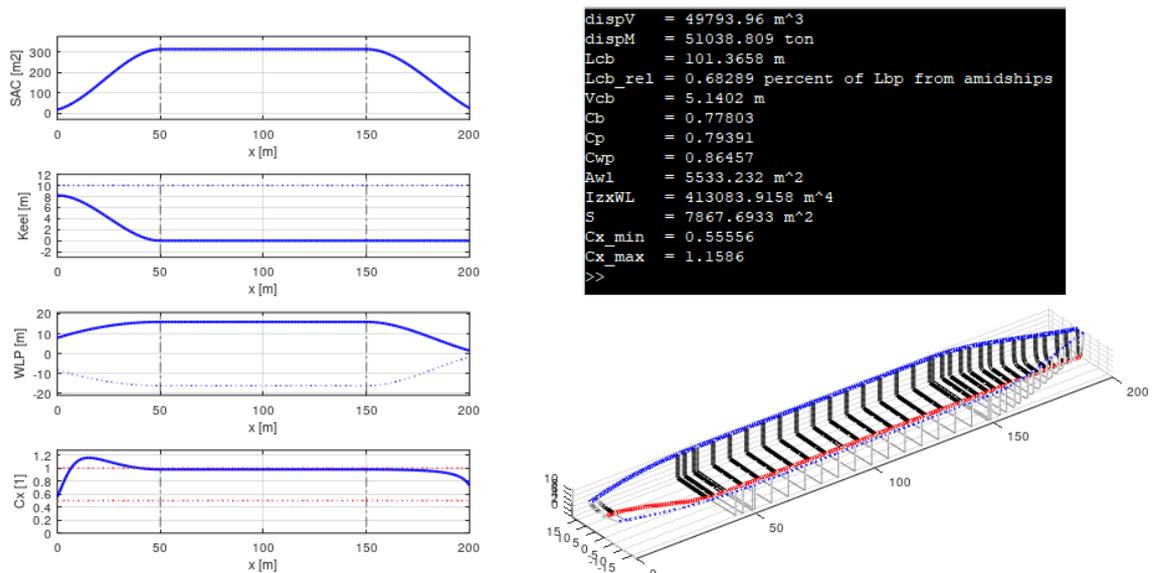
Comp. entre Perpendiculares	L_{BP}	200	m
Boca (moldada)	B	32	m
Calado (moldado, iguais à ré e à vante)	T	10	m
Coef. de Seção Mestra	C_M	0.9800	-

Referências

Desl. Volumétrico (moldado)	∇	37500	m^3
Coor. Long. C. de Carena	$LCB_{\%}$	-2.020%	-
Coef. Prismático Long.	C_P	0.5833	-
Coef. de Pl. de L. D'Água	C_{WP}	0.7500	-
Área Molhada	S	7381	m^2
Área de Popa Transom	A_{TS}	16	m^3
Diâmetro de Propulsor	D_P	8	m
Folga Propulsor-quilha	h_P	0.2	m

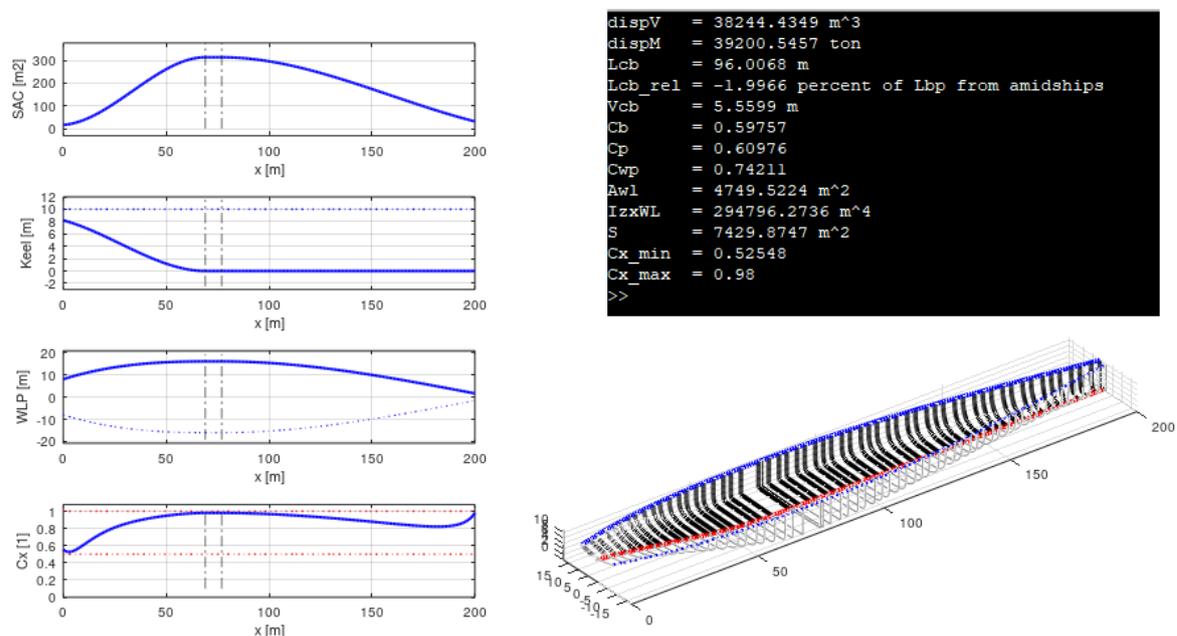
Fonte: Holtrop e Mennen (1982).

Figura 23 – Resultado de primeira iteração para Embarcação Mercante.



Fonte: O autor (2023).

Figura 24 – Resultado para geometria ajustada de embarcação mercante.



Fonte: O autor (2023).

Observa-se da Figura 23 que à ré, o coeficiente de seção supera a unidade (algumas balizas não são plotadas), bem como algumas discrepâncias com a referência. À luz do comentado na seção 3.4, essa é a circunstância esperada. Passa-se à etapa de ajuste de geometria.

Explicitando o raciocínio necessário para ajuste, interpreta-se:

1.
 - **Problema:** Excesso em ∇ .
 - **Ação:** Reduzir SAC à re e à vante e L_{PMB} .
2.
 - **Problema:** C_X superior à unidade à ré.
 - **Ação:** À ré, reduzir SAC e K , acrescer W .
3.
 - **Problema:** LCB à vante da referência.
 - **Ação:** Retroceder X_{PMB} .

Essa listagem e correlação problema-ação corretiva é feita entre iterações e guia o processo de ajuste.

A geometria e resultados numéricos da rotina para geometria ajustada finalizada é apresentada na Figura 24 e o resultado de exportação para programa MaxSurf® na Figura 25.

4.1.2 AHTSV

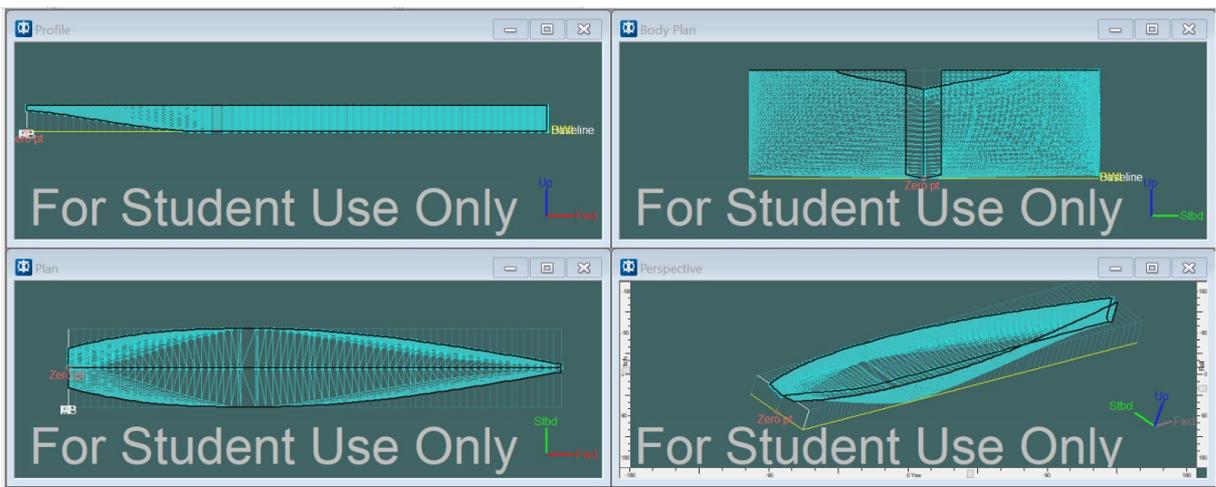
O segundo exemplo aplicado se trata de uma embarcação de apoio do tipo rebocador AHTSV (Anchor Handling Tug Support Vessel), desenvolvido por Jacoby et

Tabela 3 – Comparativo de resultado para embarcação mercante.

Grandeza	Referência	Modelagem	Erro Relativo
$\nabla [m^3]$	37500	38244	$1.9840 \cdot 10^{-2}$
$LCB\%$	-2.020%	-1.9966%	$2.6733 \cdot 10^{-2}$
C_P	0.5833	0.6097	$4.5260 \cdot 10^{-2}$
C_{WP}	0.75	0.7421	$-1.0533 \cdot 10^{-2}$
$S [m^2]$	7381	7430	$6.6387 \cdot 10^{-3}$

Fonte: O autor (2023).

Figura 25 – Geometria de embarcação mercante exportada para MaxSurf ®.



Fonte: O autor (2023).

al. (2017). Analogamente ao primeiro caso, são filtradas as informações requisitadas pela rotina como entrada, bem como possíveis restrições aos parâmetros.

Além de dados numéricos, algumas informações relevantes aos parâmetros podem ser inferidas de Plano de Linhas preliminar ou esboço da geometria, caso disponível. Na Figura 26, inclinações e comprimentos são destacados a partir das vistas lateral e superior da embarcação. Aplicando as definições dos coeficientes paramétricos (ver seção 3.4.2), pode-se inferir valores iniciais que guiarão o ajuste geométrico:

- De A: A inclinação da popa à ré se aproxima da diagonal do retângulo lateral (em azul) do corpo de ré. Isso indica que a derivada adimensional nesse ponto é próxima à unidade. Assim, aplicando 34:

$$\frac{dz}{dx}(x=0) \approx -\frac{K_{aft}}{X_{aft}} \quad \therefore k_s, K, aft \approx 1$$

- De B: A área de seção transversal na perpendicular de ré possui pequena altura, e preenche praticamente toda a boca. Infere-se:

$$\frac{SAC_{aft}}{B \cdot T \cdot C_M} \ll 1 \quad \therefore k_{SAC,aft} \ll 1$$

Tabela 4 – Dados relevantes para modelagem geométrica de rebocar tipo AHTSV.

Entradas

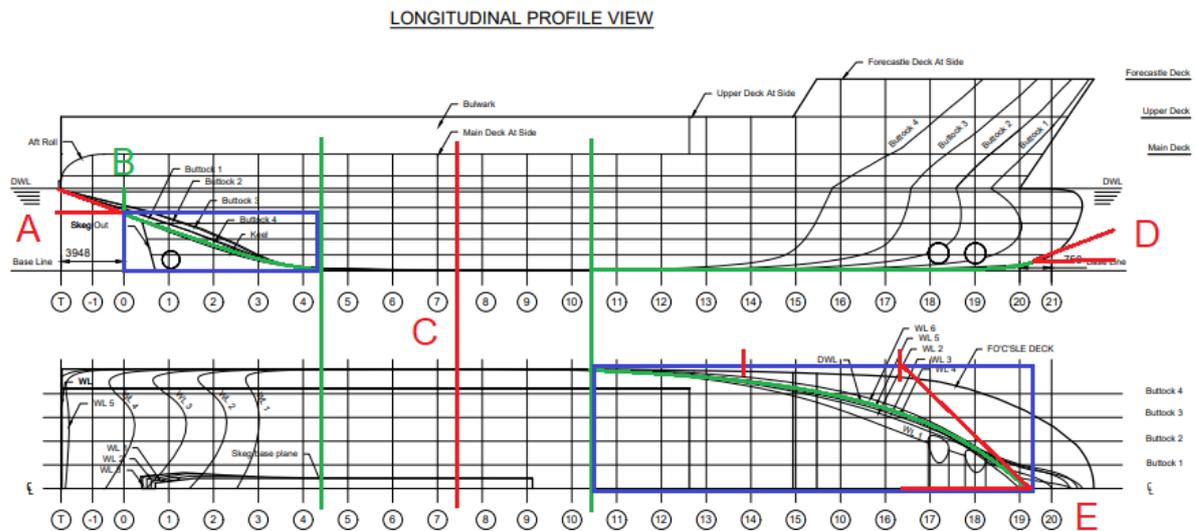
Comp. entre Perpendiculares	L_{BP}	59	m
Boca	B	15.14	m
Calado	T	5.21	m
Coef. de Seção Mestra	C_M	0.9885	-

Referências

Desl. Mássico	Δ	3616	ton
Coef. de Bloco	C_B	0.7360	-
Coor. Long. C. de Carena	$LCB_{\%}$	-0.50%	-
Coef. Prismático Long.	C_P	0.7400	-
Coef. de Pl. de L. D'Água	C_{WP}	0.7500	-
Diâmetro de Propulsor	D_P	2.9	m
Folga Propulsor-quilha	$h_{P,K}$	$0.25 \cdot D_P$	m
Folga Propulsor-L. de Base	$h_{P,BL}$	$0.25 \cdot D_P$	m

Fonte: Jacoby et al. (2017).

Figura 26 – Características geométricas relevantes para definição de parâmetros de rotina.



Fonte: Adaptado de Jacoby et al. (2017).

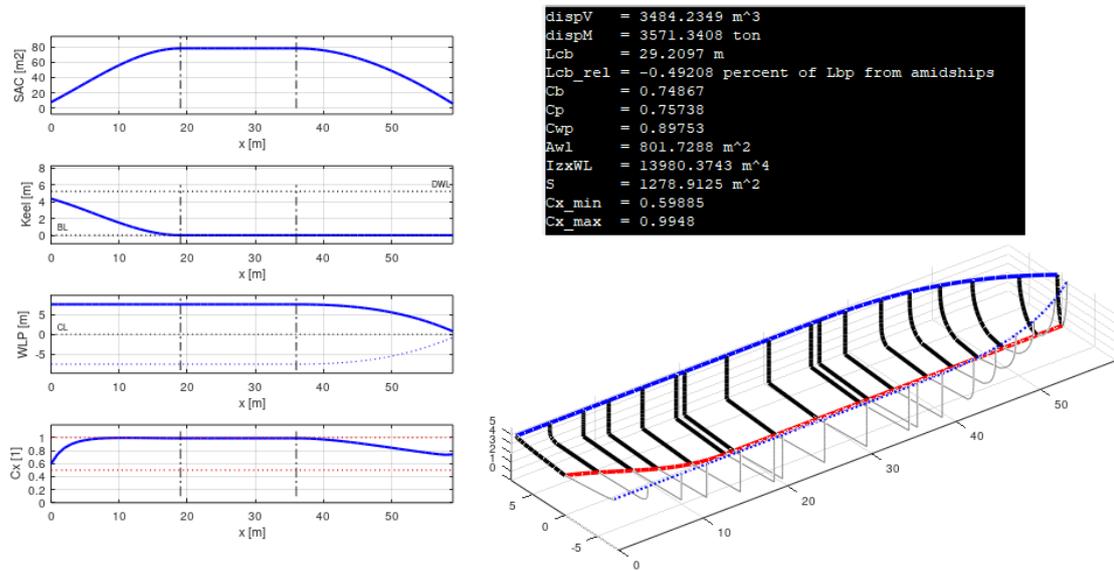
$$\frac{2W(x=0)}{B} \approx 1 \quad \therefore k_{W,aft} \approx 1 \quad \& \quad k_{s,SAC,aft} \approx 0$$

- De C: Observando as seções constantes da boca e da quilha, pode-se inferir comprimento e posição do centro do corpo médio paralelo:

$$L_{PMB} \approx \frac{LBP}{3} \quad \therefore k_{L,PMB} \approx \frac{1}{3}$$

$$X_{PMB} \approx \frac{LBP}{2} \quad \therefore k_{X,PMB} \approx \frac{1}{2}$$

Figura 27 – Resultado para geometria ajustada de rebocador.



Fonte: O autor (2023).

- De D e E: Aplicando raciocínio análogo ao visto para A (comparando a inclinação da tangente no contorno com a inclinação da diagonal do retângulo característico da seção na vista em questão:

$$\frac{dz}{dx}(x = L_{BP}) \ll 1 \quad \therefore k_s, K, fwd \approx 1$$

$$\frac{dy}{dx}(x = L_{BP}) \approx -3 \quad \therefore k_{s,W,fwd} \approx 3$$

Essas inferências não necessariamente implicam em convergência imediata da geometria do casco, mas diminuem o número de iterações e a diferença paramétrica incremental entre elas. O resultado convergido é mostrado na Figura 27, o comparativo com referência na Tabela 5, e o resultado exportado para MaxSurf® na Figura 28

Observa-se que, para uma das grandezas de referência (C_{WP}), houve erro significativo ($\sim 10\%$). Hipotetisa-se então sobre as possíveis causas dessa divergência:

Tabela 5 – Comparativo de resultado para rebocar tipo AHTSV.

Grandeza	Referência	Modelagem	Erro Relativo
Δ [ton]	3616	3571	$-1.2350 \cdot 10^{-2}$
$LCB\%$	-0.50%	-0.49%	$-1.5840 \cdot 10^{-2}$
C_B	0.7360	0.7487	$-3.6877 \cdot 10^{-5}$
C_P	0.7400	0.7574	$2.3490 \cdot 10^{-2}$
C_{WP}	0.7500	0.8975	$1.9670 \cdot 10^{-1}$

Fonte: O autor (2023).

Tabela 6 – Dados relevantes para modelagem geométrica de embarcação pesqueira.

Entradas			
Comp. entre Perpendiculares	L_{BP}	12	m
Boca	B	2.7	m
Calado	T	1.3	m

Fonte: Apriliani et al. (2021).

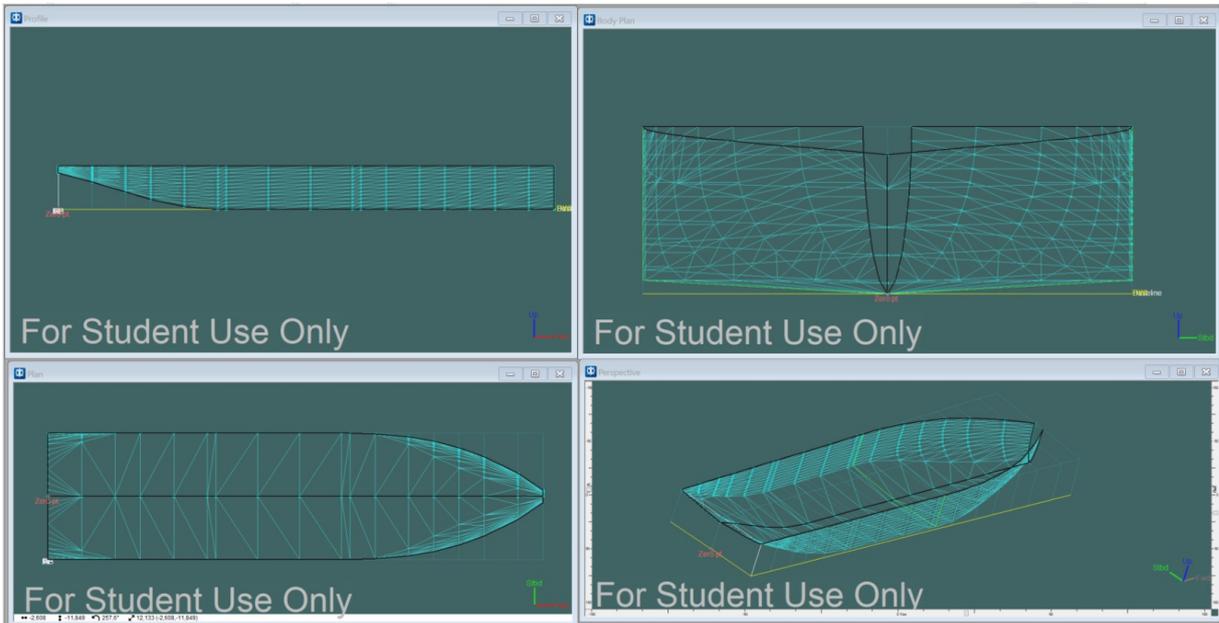
- Número insuficiente de iterações ou convergência para solução não-ótima**
 É possível que, com o investimento de tempo e esforço humano e computacional na tentativa de ajuste surtisse efeito positivo na proximidade entre a solução obtida e o almejado da referência. De maneira similar, não se descarta a possibilidade de um conjunto de parâmetros diferente do obtido gerar uma geometria mais aderida à referência.
 Observou-se do ajuste que a alteração, mesmo que pequena, de qualquer um dos parâmetros resultava em efeitos indesejados para as grandezas com erro menor, similar a um ótimo local. A investigação de ótimo global por algoritmos de varredura ou otimização para minimização do desvio é aplicável.
- Limitações da ferramenta**
 O desvio observado pode ser decorrente da insensibilidade da rotina à algumas características geométricas, em especial apêndices como bulbo ou o skeg, ou pela restrição a traçados de ordem cúbica. A construção da rotina e as metodologias de interpolação aplicadas então impediriam melhor aderência da geometria com os resultados obtidos.
- Incoerência de estimativas iniciais**
 A dificuldade na obtenção de uma geometria final com variações significativas em relação à referência pode ser sintomática propagação de incertezas nos cálculos feitos a priori. As estimativas de coeficientes de forma para o projeto em questão foram obtidas de dispersões com desvios de ordem de grandeza similar ao desvio da geometria final. A nova geometria então indicaria uma correção a ser implementada no projeto.

4.1.3 Pesqueiro

O terceiro exemplo de aplicação da ferramenta busca modelar as obras vivas da embarcação para pesca KM Nelayan 2017 - 822 (APRILIANI et al., 2021). Novamente, as informações de entrada são filtradas e mostradas na Tabela 6.

Analogamente ao exemplo de modelagem de rebocador, as inclinações e proporções geométricas características relevantes são ressaltadas na Figura 29. O

Figura 28 – Geometria de rebocador AHTSV exportada para MaxSurf ®.



Fonte: O autor (2023).

coeficiente de seção mestra precisa ser estimado. o procedimento de ajuste é aplicado, obtendo-se inicialmente curvas paramétricas fisicamente significativas (ver Figura 30.)

Observa-se que, mesmo com as curvas ajustadas, a quantidade de balizas plotadas e impressas em tabela de cotas na saída da rotina, bem como os pontos na baliza, são esparsos. A mitigação da escassez de balizas é feita através do aumento da proporção em que estas são selecionadas, similar ao comentado em 4.2.2. O número de pontos na baliza pode ser feito acrescentando manualmente a variável N_{points} na linha 112 da rotina principal (em Apêndice).

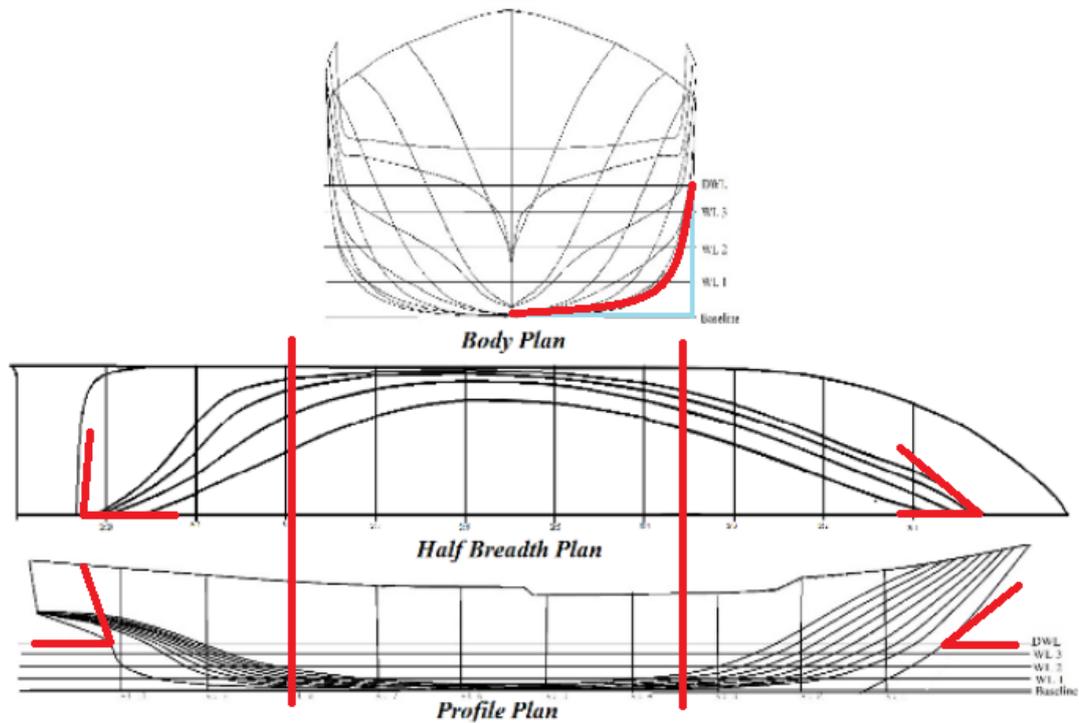
Apesar da plotagem de mais balizas, a descrição da superfície na resolução mais fina permitida pela rotina ainda deixa lacunas significativas na geometria. Essa pobreza de detalhe se dá devido à proximidade relativa entre o comprimento da embarcação e a resolução de domínio longitudinal, quando comparado às demais embarcações. Uma limitação da ferramenta é então revelada na tentativa de modelagem de embarcações de pequena dimensão.

Apesar disso, a exportação é possível, mostrada na Figura 32.

4.2 LIMITAÇÕES DA FERRAMENTA E MITIGAÇÃO DE PROBLEMAS

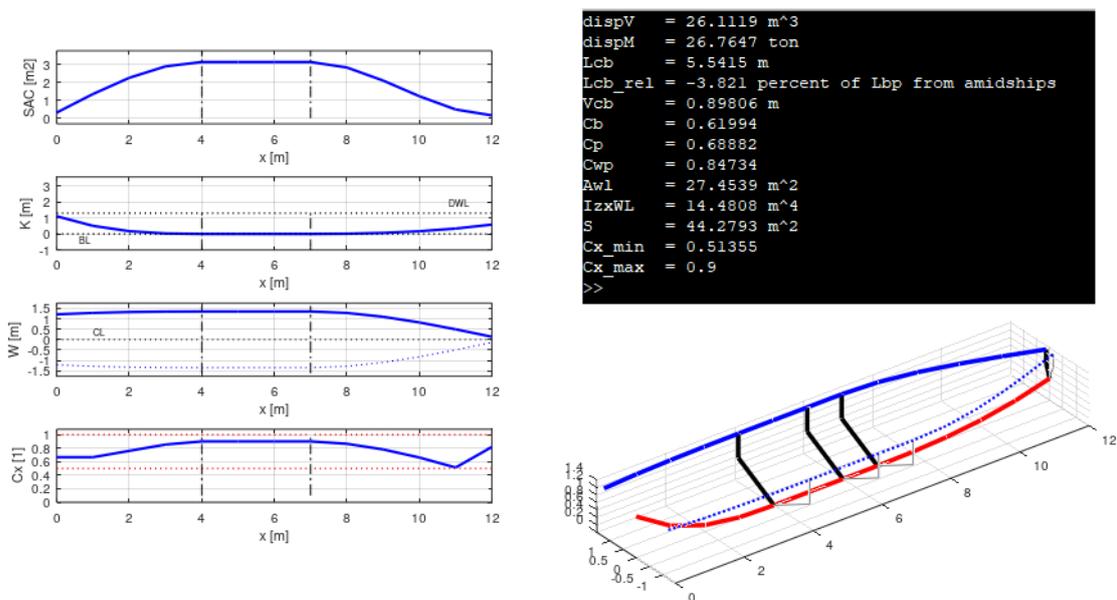
Seguindo a apresentação dos resultados de aplicação da ferramenta, a presente seção se dedica à discussão de suas limitações, bem como fornecer indicações ao usuário de como minimizar os problemas gerados por elas.

Figura 29 – Plano de Linhas para embarcação pesqueira.



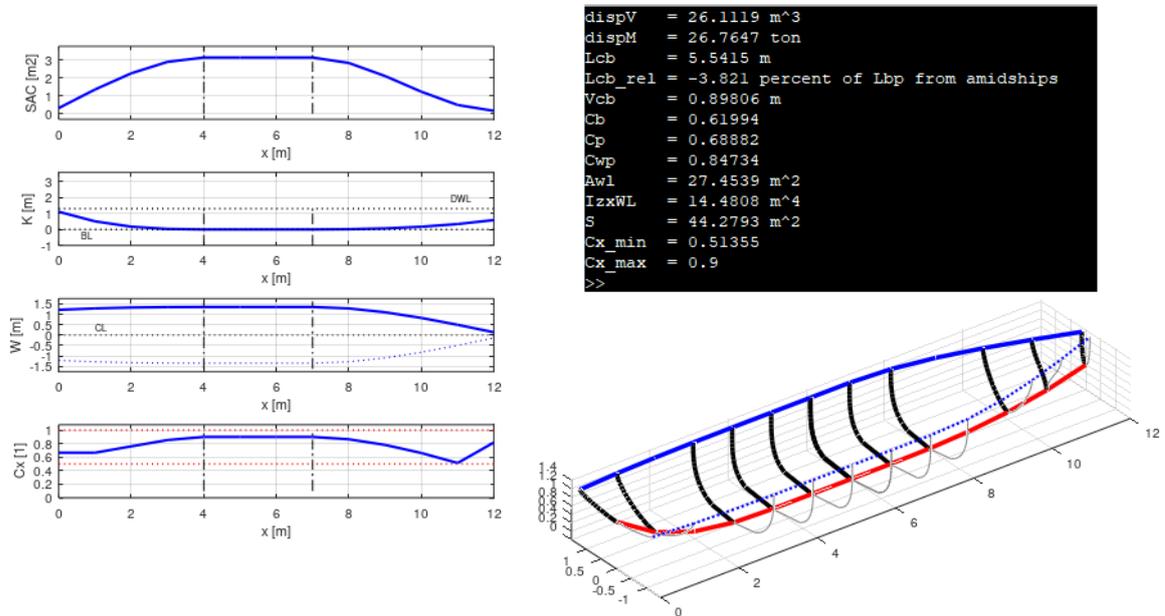
Fonte: Adaptado de Apriliani et al. (2021)

Figura 30 – Modelagem de embarcação pesqueira (1º ajuste).



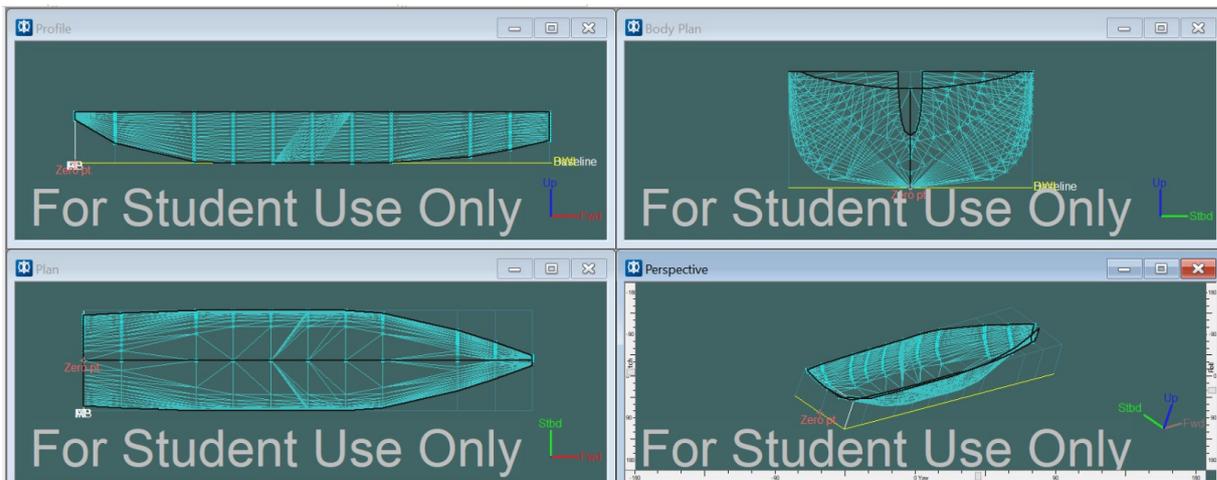
Fonte: O autor (2023).

Figura 31 – Modelagem de embarcação pesqueira (2º ajuste).



Fonte: O autor (2023).

Figura 32 – Geometria de embarcação pesqueira exportada para MaxSurf®.



Fonte: O autor (2023)

4.2.1 Resolução longitudinal unitária

Como observado para na modelagem da embarcação pesqueira, a riqueza de detalhe na modelagem da superfície se deteriora quanto menor o comprimento da embarcação modelada. Isso decorre da implementação de espaçamento unitário do vetor de coordenada longitudinal.

Esse problema pode ser mitigado na percepção da adimensionalidade dessa medida. Reduzindo-se a unidade adotada para distância linear e, conseqüentemente, aumentando a mantissa que a precede, obtém-se uma resolução mais fina. É preciso somente atentar-se que as unidades das demais grandezas também se altera.

4.2.2 Descontinuidade do ângulo de costado na Linha D'Água

A troca de equação característica de balizas induz uma variação geométrica abrupta na geometria da embarcação. Visto isso uma tentativa é feita na intenção de minimizar essa descontinuidade (ver seção 3.3.2). Porém, essa minimização não é perfeita, e essa imperfeição é intuída observando-se a Figura 17. A investigação da descontinuidade de ângulo de costado na vizinhança da linha d'água de projeto, mostrada na Figura 33, permite uma quantificação dessa intuição.

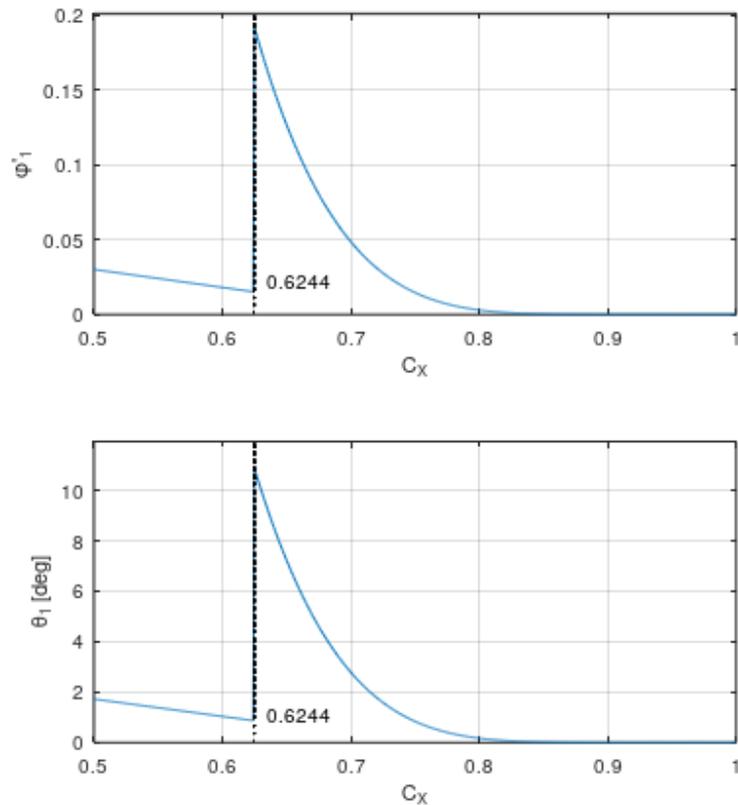
A mitigação dessa descontinuidade geométrica para os resultados de tabela de cotas e visualização é possível. Ela é feita diminuindo-se a densidade de balizas no entorno da transição. Essa operação porém não é controlada parametricamente e no estado atual da ferramenta necessita conferência e ajuste manual. Esse ajuste é feito alterando a proporção de balizas selecionadas para plotagem e exportação em cada seção (ver linhas 224, 225 e 226 da rotina principal em apêndice).

4.2.3 Acoplamento SAC-Perfil de Linha D'Água-Quilha

É possível que se deseje a modelagem de uma embarcação cujas variações de área seccional, perfil de linha d'água e quilha possuam comprimentos e domínios característicos distintos. A ferramenta apresentada não é sensível a essas variações, as interpolações das seções a ré e a vante ocorrem nas mesmas coordenadas longitudinais.

É esperado que essas diferenças sempre existam, isso não impossibilita a modelagem, como mostrado nos exemplos, porém, tais diferenças foram suficientemente pequenas de forma que o ajuste paramétrico oportuno permitisse uma modelagem suficiente. De qualquer forma, o conjunto amostral de validação não é suficientemente amplo para garantir que esse ajuste sempre exista.

Figura 33 – Evolução de inclinação do costado com C_x para baliza em plano unitário.



Fonte: O autor (2023).

4.2.4 Ausência de Controle Local

A rotina não permite alteração de pontos individuais dentro de seus procedimentos. Isso incorre na impossibilidade de ajuste local de geometria a priori da geração da matriz de superfície. Como mostrado ao longo do trabalho, ao ajuste geométrico é feito pela alteração dos parâmetros da rotina, que reflete na alteração dos valores de contorno para interpolação de seções de dimensões significativas da geometria. A alteração desses valores altera todos os pontos interpolados. Essa limitação se mostra particularmente difícil de ser mitigada no ambiente da ferramenta, visto que, na ausência de qualquer interface de usuário que permita alteração analógica de pontos individuais, remanesce ao usuário acessar as matrizes no arquivo da saída e alterar as coordenadas dos ponto de interesse manualmente, um a um. Ademais, a alteração manual das matrizes incorre em discrepâncias (mesmo que pequenas) entre as grandezas derivadas calculadas a priori do ajuste manual e aquelas efetivas da nova superfície. Felizmente, programas externos dotados de interfaces mais poderosas permitem que o usuário visualize os pontos a serem alterados e os ajuste sem maiores problemas.

4.2.5 Modelagem de Casco Singelo

Não é contemplada nessa ferramenta a modelagem de apêndices da embarcação. As alterações em grandezas derivadas decorrentes da inclusão destes pode ser aplicada externamente, porém a modelagem dessas estruturas secundárias, caso necessário, seja para fins de simulação hidrodinâmica ou detalhamento construtivo foge às capacidades da ferramenta aqui apresentada.

4.2.6 Formato de Arquivo de Saída

Da saída da rotina um arquivo-texto com as tabelas de cotas é gerado para exportação e aplicação em outros programas de análise (p. ex. MaxSurf ®, FreeShip ® e DELFTShip ®). A formatação desse arquivo, porém, não é perfeitamente compatível com a sintaxe de importação dos programas mencionados. Todavia, as discrepâncias são pequenas, sendo resolvidas por alterações de espaçamento, troca de separador decimal, alteração de resolução, entre outras, todas rapidamente executadas em programas de edição de texto disponíveis atualmente.

4.3 MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS

Á luz do discutido anteriormente são explicitadas diversas oportunidades de melhoria passíveis de implementação para a ferramenta apresentada. Elas abrangem desde implementação de métodos numéricos com menor erro, a automatização de ajustes e melhorias de interface com usuário, correção sintática para melhoria de compatibilidade de saída com programas externos e investigação mais aprofundada e completa de limites de aplicação.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho é detalhada a criação de uma ferramenta de geração de geometria de cascos deslocantes em código aberto. Esta é contextualizada e seu arcabouço teórico é introduzido. A seguir o detalhamento de implementação é explicitado e três exemplos são visitados para fins de validação. Os resultados são apresentados e as limitações metodológicas são discutidas. Dentro dos limites de aplicação estabelecidos, o desempenho da ferramenta é suficiente, tanto para criação de uma geometria compatível com diversas grandezas de referência, quanto para casos onde poucas restrições são apresentados. Na maioria dos casos, os desvios são de ordem 1% ou inferior. Das limitações discutidas são elencadas propostas de melhoria para trabalhos futuros. Finalmente, cumprindo o propósito de facilitar a reprodução do trabalho e promover o compartilhamento de conhecimento técnico-acadêmico-científico, as rotinas que compõe a ferramenta são disponibilizadas integralmente em apêndice, em linguagem de código aberto, permitindo uso público, gratuito e imediato.

REFERÊNCIAS

- APRILIANI, I. M. et al. **General Arrangement and Lines Plan of Grant Fishing Vessels by Ministry of Marine Affairs and Fisheries Based in Sukabumi, Indonesia.** 2021.
- ATKINSON, K. E. **An Introduction to Numerical Analysis.** 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Numerical Analysis.** Boston: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2010.
- EPPERSON, J. F. **An Introduction to Numerical Methods and Analysis.** 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- EVANS, J. H. **Basic Design Concepts.** 1959.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. J. **An Approximate Power Prediction Method.** 1982.
- ITTC. **Dictionary of Ship Hydrodynamics.** Zürich: International Towing Tank Conference, 2008.
- JACOBY, M. et al. **Project Of An Anchor Handler Tug Supply 100 TN Of Bollard Pull.** 2017.
- LACKENBY, H. **On The Systematic Variation Of Ship Forms.** 1950.
- LAMB, T. **Ship Design and Construction.** Nova Jersey: SNAME, 2003.
- LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture.** Jersey City: SNAME, 1988.
- MOLLAND, A. **The Maritime Engineering Reference Book: A guide to ship design, construction and operation.** 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.
- PAPANIKOLAOU, A. **Ship Design: Methodologies of Preliminary Design.** Nova Iorque: Springer, 2014.
- SAVITSKY, D. **Hydrodynamic Design of Planing Hulls.** 1964.
- SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. **Ship Design for Efficiency and Economy.** 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- TAGGART, R. **Ship Design and Construction.** Nova Iorque: SNAME, 1980.
- TODD, F. H. **Series 60 Methodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships.** 1963.
- TUPPER, E. C. **Tupper Introductions to Naval Architecture.** 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- UNCTAD. **REVIEW OF MARITIME TRANSPORT.** 2022. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf. Acesso em: 15 mai. 2023.

WATSON, D. G. M. **Practical Ship Design**. Amsterdam: Elsevier, 1998.

WRIGHT, B. D. W.; PANTULLO, R. M. N. **Methodical Series Experiments On Single-Screw Ocean_Going Merchant-Ship Forms. Extended and Revised Overall Analysis**. 1971.

A APÊNDICE - FERRAMENTA, EM LINGUAGEM OCTAVE (.M)

Esta seção contém todas as rotinas utilizadas no presente trabalho, em formato de linha de código em linguagem aberta Octave.

A obtenção da ferramenta pode ser feita transportando as linhas de código nas rotinas para diferentes arquivos, salvos em um mesmo diretório. Eventualmente, dado o formato desse trabalho, esse transporte manual pode ser moroso. As rotinas então são disponibilizadas em repositório público na plataforma GitHub, acessando o link abaixo.

<https://github.com/appeLGO/geometriaDeCasco.git>

A.1 ROTINA PRINCIPAL

A.1.1 geometriaDeCasco.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 % Rotina para Geracao de Geometria de Casco por Curvas
  Parametricas
4
5 % Grandezas Iniciais & Parametros para ajuste geometrico
6 Lbp = 12;
7 B = 2.7;
8 T = 1.3;
9 Cm = 0.9;
10
11 kL_pmb = 4/11;
12 kX_pmb = 0.45;
13
14 k_SAC_aft = 0.1;
15 k_SAC_fwd = 0.05;
16 ks_SAC_aft = 1.5;
17 ks_SAC_fwd = 0.05;
18
19 k_K_aft = 0.85;
20 k_K_fwd = 0.45;
21 ks_K_aft = 2.75;
22 ks_K_fwd = 2.5;
23
24 k_W_aft = 0.9;
25 k_W_fwd = 0.1;
26 ks_W_aft = 2.5;
27 ks_W_fwd = 1.5;
28
29 % =====
30 % Corpo Medio Paralelo e Vetor de Coord. Longitudinal
31
32 L_pmb = kL_pmb*Lbp;
33 X_pmb = kX_pmb*Lbp;
34
35 X_aft = ceil(X_pmb - 0.5*L_pmb);

```

```

36 | X_fwd = floor(X_pmb + 0.5*L_pmb);
37 |
38 | x_aft = [0:1:X_aft]';
39 | x_pmb0 = [X_aft:1:X_fwd]';
40 | x_pmb = x_pmb0(2:(length(x_pmb0)-1));
41 | x_fwd = [X_fwd:1:Lbp]';
42 |
43 | x = [x_aft; x_pmb; x_fwd];
44 |
45 | % SAC
46 | SAC_aft = k_SAC_aft*B*T*Cm;
47 | SAC_fwd = k_SAC_fwd*B*T*Cm;
48 | s_SAC_aft = ks_SAC_aft*((B*T*Cm -SAC_aft)/X_aft);
49 | s_SAC_fwd = ks_SAC_fwd*((SAC_fwd -B*T*Cm)/(Lbp -X_fwd));
50 |
51 | % Corpo de Re
52 | SAC_aft = spline([0, X_aft], ...
53 |                 [s_SAC_aft, SAC_aft, B*T*Cm, 0], ...
54 |                 x_aft);
55 |
56 | % Corpo de Vante
57 | SAC_fwd = spline([X_fwd, Lbp], ...
58 |                 [0, B*T*Cm, SAC_fwd, s_SAC_fwd], ...
59 |                 x_fwd);
60 |
61 | % Corpo Medio Paralelo
62 | SAC_pmb = B*T*Cm .+ zeros(size(x_pmb));
63 |
64 | SAC = [SAC_aft;SAC_pmb;SAC_fwd];
65 |
66 | % Curva da quilha
67 | K_aft = k_K_aft*T;
68 | K_fwd = k_K_fwd*T;
69 | s_aft_keel = ks_K_aft*(-K_aft/X_aft);
70 | s_fwd_keel = ks_K_fwd*(K_fwd/(Lbp -X_fwd));
71 |
72 | % Corpo de Re
73 | K_aft = spline([0 , X_aft], ...
74 |               [s_aft_keel, K_aft, 0, 0], ...
75 |               x_aft);
76 |
77 | % Corpo de Vante
78 | K_fwd = spline([X_fwd, Lbp], ...
79 |               [0, 0, K_fwd, s_fwd_keel], ...
80 |               x_fwd);
81 |
82 | % Corpo Medio Paralelo
83 | K_pmb = zeros(size(x_pmb));
84 |
85 | K = [K_aft;K_pmb;K_fwd];
86 |
87 | % Perfil de Plano de Linha D'agua
88 | W_aft = k_W_aft*B/2;
89 | W_fwd = k_W_fwd*B/2;
90 | s_W_aft = ks_W_aft*(B/2 -W_aft)/X_aft;
91 | s_W_fwd = ks_W_fwd*(W_fwd -B/2)/(Lbp -X_fwd);
92 |
93 | % Corpo de Re
94 | W_aft = spline([0, X_aft], ...

```

```

95         [s_W_aft, W_aft, B/2, 0], ...
96         x_aft);
97
98     % Corpo de Vante
99     W_fwd = spline([X_fwd, Lbp], ...
100                 [0, B/2, W_fwd, s_W_fwd], ...
101                 x_fwd);
102
103     % Corpo Medio Paralelo
104     W_pmb = B/2 .+zeros(size(x_pmb));
105
106     W = [W_aft;W_pmb;W_fwd];
107
108     % Distribuicao de Coeficiente de Secao
109     Cx = SAC./(2*W.*(T.-K));
110
111     % Geracao de Superficie
112     N_points = ceil(0.5*B +T);
113
114     Cx_0 = 0.5;
115     Cx_switch = 0.6244;
116     Cx_1 = 1;
117
118     Y_surf = zeros(N_points,length(x));
119     Z_surf = zeros(N_points,length(x));
120
121     for n = 1:length(x)
122         if (Cx(n) <= Cx_1)&&(Cx(n) > Cx_switch)
123             Z_surf(:,n) = buntSectionIt(W(n),K(n),T,Cx(n),N_points)
124             (:,1);
125             Y_surf(:,n) = buntSectionIt(W(n),K(n),T,Cx(n),N_points)
126             (:,2);
127
128         elseif (Cx(n) <= Cx_switch)&&(Cx(n) >= Cx_0)
129             Z_surf(:,n) = slimSectionIt(W(n),K(n),T,Cx(n),N_points)
130             (:,1);
131             Y_surf(:,n) = slimSectionIt(W(n),K(n),T,Cx(n),N_points)
132             (:,2);
133         end
134     end
135
136     % Grandezas Derivadas
137     rho = 1025;
138
139     dispV = trapz(x,SAC);
140     dispM = rho*dispV;
141     Lcb = trapz(x,x.*SAC)/dispV;
142     Lcb_rel = (Lcb -Lbp/2)/Lbp;
143     Vcb = f_VCB(x,Y_surf,Z_surf);
144     Cb = dispV/(Lbp*B*T);
145     Cp = Cb/Cm;
146     Awl = trapz(x,2*W);
147     S = surfArea(x,Y_surf,Z_surf);
148     Cwp = Awl/(B*Lbp);
149     Lcf = trapz(x,x.*(2*W))/Awl;
150     Lcf_rel = (Lcf -0.5*Lbp)/Lbp;
151     IzxWL = trapz(x,(2*W).^3/12);
152
153     % Conferencia

```

```

150 format short
151 printf('dispV   = %s m^3 \n',          num2str(dispV))
152 printf('dispM   = %s ton \n',          num2str(1e-3*dispM))
153 printf('Lcb     = %s m \n',            num2str(Lcb))
154 printf('Lcb_rel = %s percent of Lbp from amidships \n',...
155        num2str(100*Lcb_rel))
156 printf('Vcb     = %s m \n',            num2str(Vcb))
157 printf('Cb      = %s \n',               num2str(Cb))
158 printf('Cp      = %s \n',               num2str(Cp))
159 printf('Cwp     = %s \n',               num2str(Cwp))
160 printf('Awl     = %s m^2 \n',           num2str(Awl))
161 printf('IzxBWL  = %s m^4 \n',           num2str(IzxBWL))
162 printf('S       = %s m^2 \n',           num2str(S))
163 printf('Cx_min  = %s \n',               num2str(min(Cx)))
164 printf('Cx_max  = %s \n',               num2str(max(Cx)))
165
166 figure 1
167 subplot(4,1,1)
168     plot(x,SAC,'linewidth',1.5,'b',...
169          zeros(length(x),1) + X_aft, linspace(0,1.2*max(SAC),
170          length(x)),'-.k',...
171          zeros(length(x),1) + X_fwd, linspace(0,1.2*max(SAC),
172          length(x)),'-.k')
173
174     hold on
175     grid on
176     xlim([0 Lbp])
177     ylim([-0.1 1.2 ]*max(SAC))
178     ylabel('SAC [m2]')
179     xlabel('x [m]')
180
181 subplot(4,1,2)
182     plot(x,K,'linewidth',1.5,'b',...
183          x,zeros(length(x),1),'k','linewidth',1,...
184          x,zeros(length(x),1) .+T,'k','linewidth',1,...
185          zeros(length(x),1) + X_aft, linspace(-2.5,1.15*T,
186          length(x)),'-.k',...
187          zeros(length(x),1) + X_fwd, linspace(-2.5,1.15*T,
188          length(x)),'-.k')
189     text(min([2 0.05*Lbp]), max([-1 -0.25*T]),'BL','fontsize'
190          ,7)
191     text(max([Lbp-3 0.9*Lbp]),min([1.5*T T+1]), 'DWL','
192          fontsize',7)
193     grid on
194     hold on
195     xlim([0 Lbp])
196     ylim([-1 (1.2*T+2)])
197     xlabel('x [m]')
198     ylabel('K [m]')
199
200 subplot(4,1,3)
201     plot(x,W,'linewidth',1.5,'b',...
202          x,-W,'b','linewidth',0.75,...
203          x,zeros(length(W),1),'k',...
204          zeros(length(x),1) + X_aft, linspace(-0.6*B,0.6*B,
205          length(x)),'-.k',...
206          zeros(length(x),1) + X_fwd, linspace(-0.6*B,0.6*B,
207          length(x)),'-.k')
208     text(1, min([2 0.15*B]),'CL','fontsize',7)
209     grid on

```

```

201     hold on
202     xlim([0 Lbp])
203     ylim([-0.65*B 0.65*B])
204     ylabel('W [m]')
205     xlabel('x [m]')
206
207     subplot(4,1,4)
208     plot(x,Cx,'linewidth',1.5,'b',...
209          x,zeros(length(x),1) +1,':r','linewidth',1,...
210          x,zeros(length(x),1) +0.5,':r','linewidth',1,...
211          zeros(length(x),1) + X_aft, linspace(0.1,1.1*max(Cx)
212          ,length(x)),'-.k',...
213          zeros(length(x),1) + X_fwd, linspace(0.1,1.1*max(Cx)
214          ,length(x)),'-.k')
215
216     grid on
217     xlim([0 Lbp])
218     ylim([0 1.2*max(Cx)])
219     ylabel('Cx [1]')
220     xlabel('x [m]')
221
222 % Selecao de Balizas para plotagem e Tabela de Cotas
223 aft_ratio = (X_aft)/Lbp;
224 pmb_ratio = (X_fwd -X_aft)/Lbp;
225 fwd_ratio = (Lbp -X_fwd)/Lbp;
226
227 N_sections_aft = floor(0.45*aft_ratio*length(x));
228 N_sections_pmb = floor(0.35*pmb_ratio*length(x));
229 N_sections_fwd = floor(0.45*fwd_ratio*length(x));
230 N_sections     = N_sections_aft ...
231                +N_sections_pmb ...
232                +N_sections_fwd;
233
234 X_sections0_aft = linspace(0,X_aft,N_sections_aft);
235 X_sections0_pmb = linspace(X_aft+1,X_fwd-1,N_sections_pmb);
236 X_sections0_fwd = linspace(X_fwd,Lbp,N_sections_fwd);
237
238 X_sections0 = horzcat(X_sections0_aft,X_sections0_pmb,
239                      X_sections0_fwd);
240 Y_sections  = zeros(N_points,N_sections);
241 Z_sections  = zeros(N_points,N_sections);
242
243 for m = 1:N_sections
244     x_idx = find(x == round(X_sections0(m)));
245     X_sections(m) = x(x_idx);
246     Y_sections(:,m) = Y_surf(:,x_idx);
247     Z_sections(:,m) = Z_surf(:,x_idx);
248 end
249
250 figure 2
251 for r = 1:N_sections
252     plot3(zeros(N_points,1) +X_sections(r),Y_sections(:,r),
253           Z_sections(:,r),'linewidth',2.5,'k',...
254           zeros(N_points,1) +X_sections(r),-Y_sections(:,r),
255           Z_sections(:,r),'color',[0,0,0]+0.5)
256
257     hold on
258 end
259
260 plot3(x,W,zeros(length(x),1) +T,'linewidth',2.5,'b',...
261       x,-W,zeros(length(x),1) +T,'linewidth',1.5,':b',...

```

```

255     x,zeros(length(x),1),K,'linewidth',2.5,'r')
256     xlim([0 Lbp])
257     ylim([-1.1*max(W),1.1*max(W)])
258     zlim([0,1.1*T])
259     axis("equal")
260     grid on
261
262 % Impressao de Tabela de Cotas
263 Output = zeros(N_points,4, N_sections);
264
265     for n = 1:N_sections
266         Output(:,1,n) = zeros(N_points,1) +n;
267         Output(:,2,n) = zeros(N_points,1) +X_sections(n);
268         Output(:,3,n) = Y_sections(:,n);
269         Output(:,4,n) = Z_sections(:,n);
270     end
271
272 fid = fopen('hullGeometry.txt', 'w+');
273
274 fprintf(fid, '%f', 0);
275 fprintf(fid, '\n');
276
277 for n = 1:size(Output, 3)
278     fprintf(fid, '\n');
279     for m = 1:size(Output, 1)
280         fprintf(fid, '%f ', Output(m,:,n));
281         fprintf(fid, '\n');
282     end
283 end
284
285 fclose(fid);

```

A.2 ROTINAS SECUNDÁRIAS

A.2.1 Baliza bojuda unitária - buntSec.m

```

1 function buntSec = buntSection(s,N_points)
2     z = linspace(0,1,N_points);
3     y = ((1 .-(1-z).^s).^(1/s));
4
5     buntSec(:,1) = z;
6     buntSec(:,2) = y;
7 end

```

A.2.2 Baliza bojuda ajustada - buntSecIt.m

```

1 function buntSecIt = buntSectionIt(W,K,T,Cx,N_points)
2     s0 = 1;
3     s1 = 200;
4     E = 1;
5     count = 0;
6
7     while (E > 1E-9)&&(count < 100)
8         s_mid = mean([s0,s1]);
9         section_mid = buntSection(s_mid,N_points);
10        z_mid = section_mid(:,1);
11        y_mid = section_mid(:,2);
12        Cx_mid = trapz(z_mid,y_mid);
13
14        if Cx_mid == Cx
15            break
16
17        elseif Cx_mid > Cx
18            s1 = s_mid;
19
20        elseif Cx_mid < Cx
21            s0 = s_mid;
22        endif
23
24        E = abs((Cx_mid -Cx)/Cx);
25        count += 1;
26    end
27
28    s = s_mid;
29    z0 = buntSection(s,N_points)(:,1);
30    y0 = buntSection(s,N_points)(:,2);
31
32    buntSecIt(:,1) = (T -K)*z0 +K;
33    buntSecIt(:,2) = W*y0;
34 end

```

A.2.3 Baliza esbelta unitária - slimSec.m

```

1 function slimSec = slimSection(slope_keel,N_points)
2     slope_slim_keel = slope_keel;      % [m/m] Deriv. Casco
3     na Quilha
4     z = linspace(0,1, N_points);
5
6     y = spline([0, 1],[slope_slim_keel, 0, 1, 0], z);
7
8     slimSec(:,1) = z;
9     slimSec(:,2) = y;
10 end

```

A.2.4 Baliza esbelta ajustada - slimSecIt.m

```

1 function slimSecIt = slimSectionIt(W,K,T,Cx,N_points)
2     sk0 = 0;
3     sk1 = 3;
4     E = 1;
5     count = 0;
6
7     while (E > 1E-9)&&(count < 100)
8         sk_mid = mean([sk0,sk1]);
9         section_mid = slimSection(sk_mid,N_points);
10        z_mid = section_mid(:,1);
11        y_mid = section_mid(:,2);
12        Cx_mid = trapz(z_mid,y_mid);
13
14        if Cx_mid == Cx
15            break
16        elseif Cx_mid > Cx
17            sk1 = sk_mid;
18        elseif Cx_mid < Cx
19            sk0 = sk_mid;
20        end
21
22        E = abs((Cx_mid -Cx)/Cx);
23        count += 1;
24    end
25
26    sk = sk_mid;
27    z0 = slimSection(sk,N_points)(:,1);
28    y0 = slimSection(sk,N_points)(:,2);
29
30    slimSecIt(:,1) = (T -K)*z0 +K;
31    slimSecIt(:,2) = W*y0;
32 end

```

A.2.5 Coord. Vert. de Centro de Carena (VCB) - f_VCB.m

```

1 function VCB = f_VCB(x,y,z)
2     for m = 1:length(x)
3         A(m) = trapz(z(:,m),2*y(:,m));
4         mz(m) = trapz(z(:,m),2*z(:,m).*y(:,m));
5     end
6     Vol = trapz(x,A);
7     VCB = trapz(x,mz)/Vol;
8 end

```

A.2.6 Área Molhada (S) - surfArea.m

```
1 function A = surfArea(x,y,z)
2   M = length(x);
3   N = size(y)(1);
4   a = zeros(M,1);
5
6   for m = 1:(M -1)
7     for n = 1:(N -1)
8       P1 = [x(m), y(n,m), z(n,m)]';
9       P2 = [x(m+1), y(n,m+1), z(n,m+1)]';
10      P3 = [x(m), y(n+1,m), z(n+1,m)]';
11      P4 = [x(m+1), y(n+1,m+1), z(n+1,m+1)]';
12
13      P1 = P2 -P1;
14      Pt = P3 -P1;
15      Pd = P4 -P1;
16
17      S1 = cross(P1,Pd)./2;
18      S2 = cross(Pd,Pt)./2;
19      A1 = sqrt(dot(S1,S1));
20      A2 = sqrt(dot(S2,S2));
21
22      a(m) += A1 +A2;
23    end
24  end
25  A = 2*sum(a);
26 end
```

A.3 ROTINAS PARA GERAÇÃO DE FIGURAS

A.3.1 Figura 14 - bissecMethod.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 x = [pi-1:0.001:pi+1]';
4 y = sqrt(x).*tan(x);
5
6 % Metodo da Bissecao
7
8 maxIt = 8;
9 xl = zeros(maxIt,1);
10 xu = zeros(maxIt,1);
11 xm = zeros(maxIt,1);
12
13 xl(1) = 2.5;
14 xu(1) = 4;
15
16 for n = 1:maxIt
17     xm(n) = mean([xu(n),xl(n)]);
18     yl     = sqrt(xl(n)).*tan(xl(n));
19     ym     = sqrt(xm(n)).*tan(xm(n));
20
21     if yl*ym > 0
22         xu(n+1) = xu(n);
23         xl(n+1) = xm(n);
24     elseif yl*ym < 0 ;
25         xu(n+1) = xm(n);
26         xl(n+1) = xl(n);
27     end
28 end
29
30 yh = linspace(2.5,-1.5,maxIt)';
31
32 figure
33 plot(x,y,'linewidth',1.5,...
34     xu(1:end-1),yh,'--<r',...
35     xl(1:end-1),yh,'-->b',...
36     xm,yh,'--ok',...
37     zeros(maxIt,1)+pi,1.0*yh,'k')
38 grid on
39 axis([min(x)-0.25 max(x)+0.25 min(y)-0.1 max(y)+0.1])
40 xlabel('x','fontsize',13)
41 ylabel('y','fontsize',13)
42
43 for n = 1:maxIt
44     hold on
45     plot(linspace(2.3,xm(n)-0.05,10)',zeros(10,1)+yh(n),'k')
46     text(2.3,yh(n)+0.12,strcat('n =', num2str(n)))
47 end

```

A.3.2 Figura 17 - sec4Cx.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 Cx1      = linspace(0.5,0.6244,5)';
4 Cx2      = linspace(0.6244,0.99,10)';
5 N_points = 5001;
6
7 W        = 1;
8 K        = 0;
9 T        = 1;
10
11 slim_z   = zeros(N_points,length(Cx1));
12 slim_y   = zeros(N_points,length(Cx1));
13
14 for n = 1:length(Cx1)
15     slim_z(:,n) = slimSectionIt(W,K,T,Cx1(n),N_points)(:,1);
16     slim_y(:,n) = slimSectionIt(W,K,T,Cx1(n),N_points)(:,2);
17 end
18
19 bunt_z    = zeros(N_points,length(Cx2));
20 bunt_y    = zeros(N_points,length(Cx2));
21
22 for n = 1:length(Cx2)
23     bunt_z(:,n) = buntSectionIt(W,K,T,Cx2(n),N_points)(:,1);
24     bunt_y(:,n) = buntSectionIt(W,K,T,Cx2(n),N_points)(:,2);
25 end
26
27 figure
28 plot(slim_y,slim_z,'b','linewidth',1.5,...
29      bunt_y,bunt_z,'r','linewidth',1.5,...
30      slim_y,zeros(N_points,1),':k',...
31      slim_y,zeros(N_points,1) + 1,':k',...
32      zeros(N_points,1),slim_z,':k',...
33      zeros(N_points,1) + 1,slim_z,':k')
34 axis([-0.05 1.05 -0.05 1.05],'equal')
35 xlabel('\phi')
36 ylabel('\eta')
37 grid on

```

A.3.3 Figura 18 - nOrderCircle.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 N = 2.^[-3:0.5:4]';
4 theta = [0:0.005*2*pi:pi/2]';
5
6 figure
7 hold on
8 xlabel('\eta')
9 ylabel('\phi')
10
11 for n = 1:length(N)
12     R(:,n) = (cos(theta).^N(n) + sin(theta).^N(n)).^(-1/N(n));
13     x(:,n) = real(R(:,n).*e.^(i*theta));
14     y(:,n) = imag(R(:,n).*e.^(i*theta));
15
16     plot(x(:,n),y(:,n),':k',...
17          x(:,n),-y(:,n),':k',...
18          -x(:,n),y(:,n),':k',...
19          -x(:,n),-y(:,n),':k')
20     grid on
21     hold on
22     axis([-1.5 1.5 -1.5 1.5], 'equal')
23
24     if N(n) >= 2
25         plot(x(:,n),-y(:,n), 'k', 'linewidth', 1.5)
26     end
27 end

```

A.3.4 Figura 19 - Cx4param.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 n = 1 .+ 2.^[-4:0.5:5]';
4 s = linspace(0,3,length(n))';
5
6 N_points = 50;
7
8 for m = 1:length(s)
9     z_slim = slimSection(s(m),N_points)(:,1);
10    y_slim = slimSection(s(m),N_points)(:,2);
11
12    Cx_slim(m) = trapz(z_slim,y_slim);
13 end
14
15 for m = 1:length(n)
16    z_bunt = buntSection(n(m),N_points)(:,1);
17    y_bunt = buntSection(n(m),N_points)(:,2);
18
19    Cx_bunt(m) = trapz(z_bunt,y_bunt);
20 end
21
22 figure 1
23
24 subplot(1,2,1)
25 plot(s,Cx_slim, '-ob', ...

```

```

26         s,zeros(length(s)) +0.5,':k',...
27         s,zeros(length(s)) +0.75,':k')
28     text([0.1,0.1],[0.47,0.78],{'C_X = 0.5','C_X = 0.75'})
29     grid on
30     axis([-0.2 1.1*max(s) 0 1.09])
31     xlabel('\phi''_0')
32     ylabel('C_X')
33
34 subplot(1,2,2)
35 plot(n,Cx_bunt,'-or',...
36       n,zeros(length(n)) +0.5,':k',...
37       n,zeros(length(n)) +1,':k')
38     text([0.1,0.1],[0.47,1.03],{'C_X = 0.5','C_X = 1'})
39     grid on
40     axis([min(n)-3 1.1*max(n) 0 1.09])
41     xlabel('s')
42     ylabel('C_X')

```

A.3.5 Figura 20 - switchCx.m

```

1  clear all, close all, clc
2
3  Cx = [0.5:0.025:0.75]';
4  N_points = 50;
5
6  z = linspace(0,1,N_points);
7  diff2_mean = zeros(length(Cx),1);
8  diff2_max = zeros(length(Cx),1);
9
10 for n = 1:length(Cx)
11     slim = slimSectionIt(1,0,1,Cx(n),N_points)(:,2);
12     bunt = buntSectionIt(1,0,1,Cx(n),N_points)(:,2);
13     diff2(:,n) = (bunt -slim).^2;
14     diff2_mean(n) = mean(diff2(:,n));
15     diff2_max(n) = max(diff2(:,n));
16     z_diff2_max(n) = z(find(diff2(:,n) == diff2_max(n)));
17 end
18
19 min_diff2_mean = min(diff2_mean)
20 Cx_mean = Cx(find(diff2_mean == min(diff2_mean)))
21 min_diff2_max = min(diff2_max)
22 Cx_max = Cx(find(diff2_max == min(diff2_max)))
23
24 figure 1
25 subplot(1,2,1)
26     plot(diff2,z,'k',...
27           diff2_max,z_diff2_max,':or',...
28           diff2_mean,z_diff2_max,':ob')
29     grid on
30     axis([0 0.077 0 1])
31     title('\delta^2(\eta), \delta^2_{mean}, \delta^2_{max},
32           various C_X')
32     ylabel('\eta')
33     xlabel('\delta^2 (\eta)')
34     text(diff2_max(1),z_diff2_max(1) +0.02,'Cx = 0.5')
35     text(diff2_max(length(diff2_max)),z_diff2_max(length(
36           z_diff2_max)) -0.02,'Cx = 0.75')

```

```

36
37
38 subplot(1,2,2)
39 plot(Cx,diff2_mean,'-b',...
40      Cx,diff2_max,'-r',...
41      Cx_mean, min_diff2_mean,'ob',...
42      Cx_max, min_diff2_max,'or')
43 grid on
44 axis([0.49 0.76 -0.009 0.07])
45 title('\delta^2_{mean}, \delta^2_{max}')
46 ylabel('\delta^2_{mean}, \delta^2_{max} (C_X)')
47 xlabel('C_X')
48 legend('\delta^2_{mean}', '\delta^2_{max}')
49 text(Cx_mean, min_diff2_mean -0.002, 'Cx = 0.6522')
50 text(Cx_max, min_diff2_max +0.002, 'Cx = 0.6244')

```

A.3.6 Figura 22 - critPhi_0.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 eta = [0:1e-3:1]';
4
5 E      = 1;
6 count  = 0;
7 dPdn_u = 5;
8 dPdn_l = 0;
9
10 while (E > 1e-6)&&(count < 100)
11     dPdn = 0.5*(dPdn_u +dPdn_l);
12     Phii = spline([0,1],[dPdn,0,1,0],eta);
13
14     if max(Phii)>1
15         dPdn_u = dPdn;
16     else
17         dPdn_l = dPdn;
18     end
19     E      = dPdn_u -dPdn_l;
20     count += 1;
21 end
22
23 dPdn_0 = [0:0.5:6]';
24
25 figure
26 for n = 1:length(dPdn_0)
27     Phi(:,n) = spline([0,1],[dPdn_0(n),0,1,0],eta);
28     if max(Phi(:,n)) <= 1
29         plot (eta,Phi(:,n),'b')
30     elseif max(Phi(:,n)) > 1
31         plot (eta,Phi(:,n),'r')
32     end
33     hold on
34 end
35
36 grid on
37 xlabel('\eta')
38 ylabel('\phi (\eta)')
39 title('\phi (\eta, \phi^{\{,\}_0,n})')

```

```

40 hold on
41
42 % Curva p/ derivada critica (dPdn = 3)
43 hold on
44 Phi_limit = spline([0,1],[dPdn,0,1,0],eta);
45
46 plot(eta,Phi_limit,'k','linewidth',2)
47 axis('equal')
48 axis([-0.5 1.5 -0.5 1.5])
49
50 % Contorno do Retangulo 1x1
51 hold on
52 zero_vec = zeros(length(eta),1);
53 zero2one_vec = linspace(0,1,length(eta));
54 plot(eta,zero_vec,':k','linewidth',1.5, ...
55      eta,zero_vec +1,':k','linewidth',1.5, ...
56      zero_vec,zero2one_vec,':k','linewidth',1.5, ...
57      zero_vec +1,zero2one_vec,':k','linewidth',1.5)

```

A.3.7 Figura 33 - vSlope4Cx.m

```

1 clear all, close all, clc
2
3 Cx = [0.5:0.005:1]';
4 Cx_switch = 0.6244;
5
6 W = 1;
7 K = 0;
8 T = 1;
9 N_points = 1e2;
10
11 for n = 1:length(Cx)
12     if Cx(n) > Cx_switch
13         z = buntSectionIt(W,K,T,Cx(n),N_points)(:,1);
14         y = buntSectionIt(W,K,T,Cx(n),N_points)(:,2);
15     elseif Cx(n) <= Cx_switch
16         z = slimSectionIt(W,K,T,Cx(n),N_points)(:,1);
17         y = slimSectionIt(W,K,T,Cx(n),N_points)(:,2);
18     end
19
20     y1 = y(length(y));
21     y0 = y(length(y) -1);
22     z1 = z(length(z));
23     z0 = z(length(z) -1);
24
25     v_slope(n) = (y1 -y0)/(z1 -z0);
26 end
27
28 v_angle = atan(v_slope);
29
30 figure
31 subplot(2,1,1)
32 plot(Cx, v_slope, ...
33      zeros(length(Cx)) + Cx_switch,1.05*v_slope,':k')
34 grid on
35 text(Cx_switch +0.01,0.022,num2str(Cx_switch))
36 axis([0.5 1 0 1.05*max(v_slope)])

```

```
37 | xlabel('C_X')
38 | ylabel('\phi''_1')
39 |
40 | subplot(2,1,2)
41 | plot(Cx, 180/pi*v_angle,...
42 |      zeros(length(Cx)) + Cx_switch,1.1*180/pi*v_angle,':k'
43 |      ')
44 | grid on
45 | text(Cx_switch +0.01,1.1,num2str(Cx_switch))
46 | axis([0.5 1 0 1.1*max(180/pi*v_angle)])
47 | xlabel('C_X')
47 | ylabel('\theta_1 [deg]')
```