

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

SAMANTHA BORGSMANN DA ROCHA

**VERIFICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE
COEFICIENTES DE FORMA DE EMBARCAÇÕES**

Joinville

2018

SAMANTHA BORGMANN DA ROCHA

**VERIFICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE
COEFICIENTES DE FORMA DE EMBARCAÇÕES**

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2018

SAMANTHA BORGMANN DA ROCHA

**VERIFICAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE
COEFICIENTES DE FORMA DE EMBARCAÇÕES**

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.

Banca Examinadora:

Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador

Dr. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela minha vida e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais Nildo e Sandra e irmão Rodrigo, por sempre acreditarem em mim e não me deixarem desistir, e por não medirem esforços para tornar mais agradável meu caminho até aqui.

Ao meu namorado Sérgio, por sempre me apoiar e me ajudar no que fosse preciso, e por toda paciência, compreensão, carinho e amor.

Aos meus amigos, pelas noites de estudos, tornando tudo sempre mais divertido.

Ao meu orientador Thiago, que sempre esteve disposto a ajudar e orientar, e contribuiu de forma fundamental na minha formação.

Aos meus professores, que contribuíram com seus ensinamentos durante todo o curso.

RESUMO

A elaboração de um procedimento eficiente é de extrema importância em todas as etapas da construção de um navio, essencialmente na fase de projeto, visto que é nesta etapa que todas as considerações e ajustes são realizados. Tendo em vista a complexidade de se projetar uma embarcação e as diversas iterações que são executadas no decorrer do projeto, é indiscutível que o tempo e os gastos referentes às modificações influenciam no projeto final. Sendo assim, verificar se as formulações empíricas, nas quais os coeficientes de forma das embarcações são baseadas na fase inicial, garantem precisão e são eficientes ao serem utilizadas para diversos tipos de navios, é altamente relevante para assegurar um bom resultado final. Paradoxalmente, poucos são os estudos recentes que visam verificar ou revisar tais modelos empíricos, desenvolvidos, eventualmente, há mais de 100 anos. Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho consiste na análise da eficácia dessas formulações, verificando a confiabilidade desses modelos. O estudo abordou diversos métodos para a estimativa de diferentes características de embarcações deslocantes, comparando tais resultados com aqueles obtidos na análise numérica realizada a partir do modelo tridimensional do casco. Além disso, é importante considerar que esses resultados foram obtidos a partir de uma pequena amostra de cascos, cujo desempenho pode ser afetado por características particulares presentes nas embarcações analisadas. Os resultados demonstraram que a utilização desses modelos, ainda hoje, é uma estratégia importante a ser utilizada nas fases iniciais de projeto, com raras exceções, desde que as indicações dos modelos sejam atendidas, oferecem respostas bastante precisas.

Palavras-chave: Projeto conceitual. Coeficientes de forma. Navios deslocantes. Modelos empíricos. Embarcações semelhantes.

ABSTRACT

It is extremely important to elaborate an efficient proceeding in all stages of a ship's construction, especially on design stage, since all the considerations and adjustments are done on this stage. Due to the complexity of designing a vessel and the several recurrences executed during this stage, the time and expenses related to the modifications influence the final project. Thus, the good result is based on the verification of empirical formulations which guarantee precision and efficiency if used in many types of ships. However, there are few studies aiming to verify or review empirical models, possibly developed over a hundred years ago. In this context, the main objective of this article is to analyze the efficiency of these formulations, certifying their reliability. The study approached various methods to estimate distinct characteristics of vessels, comparing these results with those obtained on the numerical analysis observed from the hull's tridimensional model. Besides, it is important to consider that these results were taken from a small sample of hulls and they can be affected by specific characteristics of the vessels. The results showed that the use of these models is an important strategy of the initial phases and they offer very precise responses.

Keywords: Conceptual project. Coefficient of form. Dislocating ships. Empirical models. Similar vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espiral de Evans geral de um projeto.	16
Figura 2 - Curva de custos devido ás mudanças pelo tempo de projeto.....	17
Figura 3 - Navio graneleiro Sunrise Jade.	21
Figura 4 - Navio tanque Unique Fidelity.....	21
Figura 5 - Navio Containeiro Hanover Express.	22
Figura 6 – Navio de carga geral Gouraya. Fonte: Marine Traffic (2017c).	22
Figura 7 - Navio cruzeiro Norwegian Sun.....	22
Figura 8 - Navio pesquisa Ciências do Mar I.	22
Figura 9 – Fragata Niterói (F40).....	22
Figura 10 – Navio polivalente Siroco.....	23
Figura 11 - Navio Liberty Arthur M. Huddell.....	23
Figura 12 - Vista lateral de uma embarcação com algumas dimensões principais.	25
Figura 13 - Vista frontal de uma embarcação com as dimensões de boca, calado, pontal e borda livre.....	25
Figura 14 - Vista em perspectiva de uma embarcação mostrando a relação do casco com um paralelepípedo.....	26
Figura 15 - Definição do coeficiente de secção mestra.	27
Figura 16 – Planos de linhas traçados no casco de uma embarcação.....	29
Figura 17 - Plano de linhas de uma embarcação.	29
Figura 18 - Intersecção gráfica proposta por Barrass.....	31
Figura 19 - Equações propostas por Alexander.....	31
Figura 20 – Valores de f para cada tipo de navio.	33
Figura 21 - Relação de CB e Froude proposta por Jensen (1994).....	33
Figura 22 – Gráfico de Watson and Gilfillan.	34
Figura 23 – Seções transversais nos formatos “U” e “V” com a mesma área seccional abaixo da linha d’água.....	37
Figura 24 - Curvas recomendadas por Benford para estimativa de LCB.....	43
Figura 25 - Representação da área molhado no casco de uma embarcação.	44
Figura 26 – Curva de áreas seccionais usando método do trapézio.	46
Figura 27 – Navio petroleiro USS Saugatuck.	52
Figura 28 – Vista em perspectiva do casco modelado do navio Saugatuck.....	52

Figura 29 - Navio de pesquisa oceanográfico Hespérides.....	52
Figura 30 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Hespérides.....	52
Figura 31 – Navio transatlântico Andrea Doria.....	53
Figura 32 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Andrea Doria.	53
Figura 33 – Cruzador Aurora em 1903.....	53
Figura 34 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Aurora.	53
Figura 35 – Navio quebra gelo Angara no lago Baikal.	53
Figura 36 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Angara.....	53
Figura 37 – Navio USS Bolster (ARS-38) em 1945.	53
Figura 38 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Bolster ARS-38.....	53
Figura 39 - Navio SS Private Frederick C. Murphy em 1945.	54
Figura 40 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Frederick C. Murphy.	54
Figura 41 – Navio Edwin D. Patrick.	54
Figura 42 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Edwin D. Patrick.....	54
Figura 43 – Navio USNS Comet.	54
Figura 44 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio USNS Comet.	54
Figura 45 - Vista em perspectiva do casco modelado do modelo 4277.	54
Figura 46 – Plano de balizas original do navio Saugatuck.....	55
Figura 47 – Plano de balizas do navio Saugatuck modelado.	55
Figura 48 – Plano de balizas original do navio Hesperides.....	55
Figura 49 – Plano de balizas do navio Hesperides modelado.	55
Figura 50 - Plano de balizas original do navio 4277 da Serie 60.....	55
Figura 51 – Plano de balizas do navio 4277 da Serie 60 modelado.....	55
Figura 52 - Plano de balizas original do navio Andrea Doria.	56
Figura 53 – Plano de balizas do navio Andrea Doria modelado.	56
Figura 54 – Plano de balizas original do navio Aurora.	56
Figura 55 – Plano de balizas do navio Aurora modelado.....	56
Figura 56 - Plano de balizas original do navio Angara.	56
Figura 57 - Plano de balizas do navio Angara modelado.	56
Figura 58 - Plano de balizas original do navio Bolster.....	57
Figura 59 - Plano de balizas do navio Bolster.....	57
Figura 60 - Plano de balizas original do navio Frederick.....	57
Figura 61 - Plano de balizas do navio Frederick modelado.	57

Figura 62 - Plano de balizas original do navio Edwin.....	57
Figura 63 - Plano de balizas do navio Edwin modelado.	57
Figura 64 - Plano de balizas original do navio Comet.	58
Figura 65 - Plano de balizas do navio Comet modelado.	58
Figura 66 – Modelo de um caixote.....	60
Figura 67 – Vistas do caixote modelado no <i>Rhinoceros</i>	62
Figura 68 – Gráfico da curva da Relação de CB e Fn com a marcação dos navios estudados.	64
Figura 69 – Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de CB.	67
Figura 70 – Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de CM.	70
Figura 71 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de CWP.	72
Figura 72 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de KB.....	74
Figura 73 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de BMT.....	75
Figura 74 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de LCB.....	76
Figura 75 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de S.	77
Figura 76 – Gráfico das SAC's obtidas para o navio Saugatuck.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de navios indicadas por Katsoulis para utilização da Equação 8.	66
Quadro 2 - Restrições indicadas pelos autores para estimativas dos coeficientes de bloco.	67
Quadro 3 - Navios classificados de acordo com Papanikolaou para L/B comuns.	68
Quadro 4 - Seções transversais indicadas para as Equações 20 a 24.	70
Quadro 5 – Restrições indicadas para as Equações 27 a 30 para estimativa de CWP.....	72
Quadro 6 – Restrições de CM para estimativa de KB para as Equações 31 e 32.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos médios para CB e velocidade para determinados tipos de navios..	32
Tabela 2 - Valores para os coeficientes K1, K2 e K3 de acordo com cada autor.....	35
Tabela 3 – Valores comuns para L/B para alguns tipos de navios.....	36
Tabela 4 - Formulações para determinação do coeficiente CI.....	41
Tabela 5 – Informações obtidas dos navios estudados.....	52
Tabela 6 - Comparação das dimensões obtidas pela modelagem com os dados originais dos navios.....	58
Tabela 7 – Informações do caixote obtidas através dos cálculos analíticos e pelo <i>Maxsurf</i>	62
Tabela 8 – Valores de “K” para cada navio utilizado na Equação 6.....	65
Tabela 9 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do CB.....	65
Tabela 10 – Comparação das velocidades típicas com as velocidades dos navios estudados..	66
Tabela 11 – Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do CM.....	68
Tabela 12 – Valores típicos do raio de bojo para navios.....	69
Tabela 13 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do CWP.....	71
Tabela 14 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do KB.....	73
Tabela 15 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do BMT.....	74
Tabela 16 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do LCB.....	76
Tabela 17 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo de S.....	77
Tabela 18 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos da SAC para cálculo de LCB e volume deslocado.....	79
Tabela 19 – Porcentagens obtidas para corpos de popa, paralelo e proa dos navios.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

C_B	Coeficiente de bloco
C_M	Coeficiente da seção mestra
C_{WP}	Coeficiente da área do plano de flutuação
BM_T	Raio metacêntrico transversal
KB	Altura do centro de carena
LCB	Posição longitudinal do centro de carena
S	Área molhada
SAC	Curvas de áreas seccionais
L_{OA}	Comprimento total
L_{WL}	Comprimento de linha d'água
L_{PP}	Comprimento entre perpendiculares
AP	Posição longitudinal da perpendicular de ré
FP	Posição longitudinal da perpendicular de vante
B	Boca
T	Calado
D	Pontal
BL	Borda livre
LWT	Peso leve
DWT	Peso morto
Δ	Deslocamento
F_n	Número de Froude
∇	Volume deslocado
A_M	Área submersa da seção mestra
A_W	Área do plano de flutuação
C_P	Coeficiente prismático
C_{VP}	Coeficiente prismático volumétrico
C_D	Coeficiente de peso morto
V	Velocidade da embarcação
L	Comprimento
V_T	Velocidade de ensaio

r_B	Raio de bojo
I_T	Momento de inércia transversal
A_{BT}	Área transversal do bulbo
L_R	Comprimento do corpo de popa
P	Comprimento do corpo paralelo
L_E	Comprimento do corpo de proa
E_R	Erro relativo
V_N	Valor obtido numericamente
V_{MP}	Valor obtido pelo modelo empírico
g	Aceleração da gravidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1. Objetivo geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. TIPOS DE EMBARCAÇÕES.....	21
2.2. DIMENSÕES PRINCIPAIS	23
2.3. COEFICIENTES DE FORMA.....	26
2.4. PLANO DE LINHAS	28
2.5. MODELOS EMPÍRICOS	30
2.5.1. Coeficiente de Bloco (<i>CB</i>)	30
2.5.2. Coeficiente da seção mestra (<i>CM</i>)	35
2.5.3. Coeficiente da área de flutuação (<i>CWP</i>)	37
2.5.4. Altura do centro de carena (<i>KB</i>)	39
2.5.5. Raio Metacêntrico Transversal (<i>BMT</i>)	41
2.5.6. Posição longitudinal do centro de carena (<i>LCB</i>)	42
2.5.7. Área molhada (<i>S</i>)	44
2.5.8. Curva de áreas Seccionais (<i>SAC</i>)	45
3. METODOLOGIA	48
4. DESENVOLVIMENTO	50
4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	50
5. VERIFICAÇÃO	60
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6.1. COEFICIENTE DE BLOCO (<i>CB</i>).....	64
6.2. COEFICIENTE DA SEÇÃO MESTRA (<i>CM</i>).....	68
6.3. COEFICIENTE DA ÁREA DE FLUTUAÇÃO (<i>CWP</i>).....	70
6.4. ALTURA DO CENTRO DE CARENA (<i>KB</i>)	73
6.5. RAO METACENTRICO TRANSVERSAL (<i>BMT</i>)	74
6.6. POSIÇÃO LONGITUDINAL DO CENTRO DE CARENA (<i>LCB</i>).....	75

6.7. ÁREA MOLHADA (S).....	77
6.8. CURVAS DE ÁREA SECCIONAIS (SAC).....	78
7. CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A – NUMERAÇÃO DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS	88
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS NAVIOS ESTUDADOS	90
APÊNDICE C – NUMERAÇÃO DOS NAVIOS.....	98
APÊNDICE D – VALORES NUMÉRICOS ENCONTRADOS PARA CADA COEFICIENTE	99
APÊNDICE E – CURVAS SAC GERADAS PARA OS NAVIOS ESTUDADOS	102
ANEXO A - PLANO DE LINHAS DO SAUGATUCK.....	105
ANEXO B – PLANO DE LINHAS DO HESPERIDES.....	106
ANEXO C – TABELA DE COTAS DA SÉRIE 60 PARA CB = 0,75 E LINHAS DE CONTORNO.....	107
ANEXO D – PLANO DE LINHAS ANDREA DORIA	108
ANEXO E – PLANO DE BALIZAS AURORA	109
ANEXO F – PLANO DE LINHAS ANGARA.....	110
ANEXO G – PLANO DE LINHAS BOLSTER.....	111
ANEXO H – PLANO DE LINHAS FREDERICK.....	112
ANEXO I – PLANO DE LINHAS EDWIN	113
ANEXO J – PLANO DE LINHAS COMET.....	114

1. INTRODUÇÃO

A história mostra que embarcações são construídas desde os primórdios da civilização. Segundo Papanikolaou (2014), descobertas arqueológicas apontam que os primeiros dispositivos flutuantes semelhantes a navios operaram no Mar Egeu 7000 a. C. Além disso, sabe-se que ainda hoje embarcações de pequeno porte são construídas sem um projeto racional, sendo fortemente baseadas em experiências adquiridas ao longo dos anos.

No entanto, para navios de grande porte, a mera aplicação de conhecimentos tácitos, pode não assegurar a qualidade do produto final, sendo essencial a aplicação de uma metodologia racional para o projeto da embarcação.

Embarcações são sistemas altamente complexos, cuja análise não pode ser feita de maneira desacoplada, exigindo uma metodologia iterativa de projeto. Um exemplo dessa iteratividade é o projeto estrutural de uma embarcação, pois o casco é pensado para uma determinada quantidade de carga. No entanto após o projeto estrutural, pode ser que o casco não seja mais capaz de carregar a carga planejada, reiniciando o ciclo de projeto.

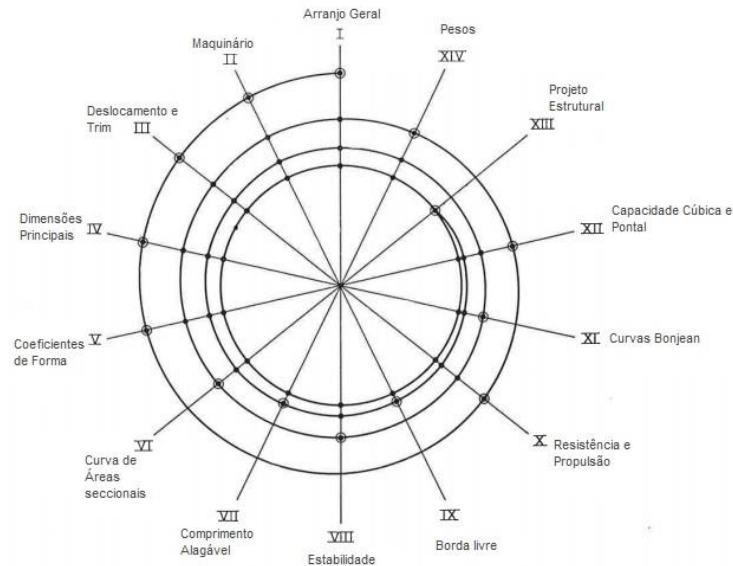
Uma metodologia iterativa que permite revisões durante todo o processo do projeto, tradicionalmente é representada pela Espiral de Evans (EVANS, 1959), um modelo que ilustra esse processo enumerando as diversas etapas (Figura 1). Tal processo prossegue de forma sequencial e iterativa, com o refinamento dos cálculos a cada volta, até a convergência para um projeto viável da embarcação.

É importante observar que um navio é projetado a fim de atender as demandas do armador, visando maximizar diferentes atributos conflitantes de projeto. Desse modo, define-se como solução viável, aquela que atende as demandas do armador e aos requisitos estabelecidos pelas diferentes normativas existentes.

Nessa abordagem, na primeira volta da espiral, poucas são as informações conhecidas do projeto e a solução conceitual é descrita apenas pelas características principais da embarcação. Nesse caso, os modelos empíricos se mostram técnicas muito importantes para a determinação das características funcionais do navio, uma vez que técnicas numéricas

mais refinadas não podem ser empregadas devido ao alto custo computacional e a ausência de informações disponíveis no projeto.

Figura 1 - Espiral de Evans geral de um projeto.



Fonte: Adaptado de Evans (1959).

Entende-se por modelo empírico, as formulações analíticas que interpolam um conjunto de dados experimentais ou situações reais, permitindo que um determinado resultado seja estimado com base na tendência observada nos dados utilizados na construção do modelo. É importante observar que muitas vezes não se dispõe de uma justificativa ou interpretação física para tais equações, e a qualidade da estimativa depende fortemente da quantidade, confiabilidade e representatividade dos dados utilizados na construção do modelo.

A construção de modelos empíricos destinados ao projeto conceitual de embarcações deslocantes é tópico bastante importante na Engenharia Naval, sendo visto em diversos autores, destacando-se Barrass (2004), Parsons (2003), Papanikolaou (2014), Lewis (1988), Watson (1998) e Schneekluth e Bertran (1998). Observa-se que muitos dos modelos empíricos propostos por importantes nomes da arquitetura naval são utilizados até os dias de hoje, apesar de alguns deles serem antigos, datando de até 100 anos atrás.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é a verificação da metodologia de projetos navais baseada em formulações empíricas, buscando quantificar os erros encontrados pelos modelos mais utilizados no projeto conceitual de embarcações.

Assim, os coeficientes abordados neste trabalho estão relacionados diretamente com a geometria do casco, como coeficiente de bloco (C_B), coeficiente da seção mestra (C_M),

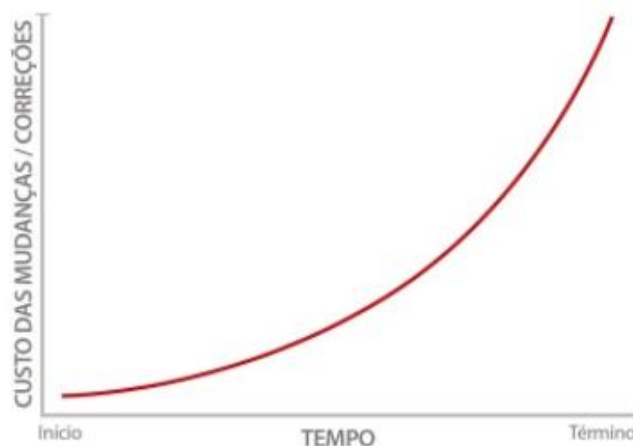
coeficiente da área do plano de flutuação (C_{WP}), raio metacêntrico transversal (BM_T), altura do centro de carena (KB), posição longitudinal do centro de carena (LCB), área molhada (S), e a partir deles criar as curvas de áreas seccionais (SAC).

Conforme já mencionado, esses coeficientes podem ser estimados para uma primeira iteração (aceitáveis na fase inicial do projeto) por meio de métodos empíricos. No entanto, durante o projeto há a necessidade de recalculá-los levando-se em consideração os outros subsistemas calculados ao longo do processo, em especial, a geometria do casco.

É importante observar que, a modificação de tais coeficientes não só é possível, como de fato ocorre na maioria dos projetos. No entanto, deve-se entender que a cada modificação realizada, o projeto requer uma nova iteração de análise, aumentando a duração e os custos associados ao processo de projeto da embarcação.

Além disso, é importante ressaltar que os custos devido às mudanças no projeto, são menores nas fases iniciais, aumentando exponencialmente com o progresso do projeto, podendo chegar ao custo total ou até mesmo superá-lo (VARGAS, 2016). Na Figura 2 é mostrada a variação dos custos relacionada às mudanças realizadas em diferentes estágios do projeto.

Figura 2 - Curva de custos devido às mudanças pelo tempo de projeto.



Fonte: Vargas (2016).

Por fim, além dos custos diretos, o retrabalho e o tempo adicional (oriundos das modificações) devem ser considerados no planejamento do projeto. Tais fatos justificam e motivam trabalhos que visem verificar a confiabilidade dos modelos empíricos tradicionalmente usados para estimar os coeficientes e parâmetros na fase inicial do projeto de

novas embarcações. É nesse contexto que se insere o presente trabalho, cujos objetivos e metodologia são apresentados a seguir.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Verificar de forma quantitativa a precisão dos diferentes modelos empíricos tradicionalmente usados para a estimativa dos coeficientes de forma de embarcações deslocantes.

1.1.2. Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, diversas etapas devem ser cumpridas ao longo do estudo, as quais destacam-se:

- Conceituar os coeficientes e parâmetros a serem estudados;
- Definir os tipos de embarcações a serem analisadas;
- Descrever as formulações empíricas;
- Modelar um conjunto de cascos que representam, em linhas gerais, as embarcações deslocantes;
- Aplicar os diferentes modelos empíricos considerados às diferentes embarcações selecionadas para análise;
- Comparar os valores estimados a partir da aplicação dos diferentes modelos empíricos com aqueles obtidos com auxílio de programas de arquitetura naval, os quais realizam a análise numérica do casco;
- Quantificar a exatidão dos modelos analisados indicando as melhores e piores aplicações para cada caso estudado.

1.2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento é constituído de 7 capítulos, dos quais o primeiro descreve a introdução que motiva o trabalho, o segundo apresenta a fundamentação teórica onde os

principais aspectos são trabalhados, em especial os modelos empíricos estudados. O terceiro capítulo consiste na metodologia empregada com as ferramentas técnicas utilizadas na elaboração das análises, o quarto apresenta o levantamento de dados realizado para o desenvolvimento da pesquisa. No quinto capítulo é demonstrada a verificação dos coeficientes propostos, e então no sexto é realizada a análise dos modelos apresentados na fundamentação teórica. Por fim, o sétimo capítulo descreve as conclusões constatadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No passado, o projeto de um navio podia ser considerado mais arte do que ciência, onde múltiplas soluções foram obtidas por métodos decorrentes de processos de tentativa e erro realizados ao longo de décadas (PAPANIKOLAOU, 2014).

Ao longo dos anos, os métodos de tentativa e erro permitiram a construção de uma base de dados estatísticos de projetos de sucesso, permitindo a criação de formulações destinadas a auxiliar os arquitetos e projetistas nas fases iniciais do projeto. Segundo Papanikolaou (2014), tais formulações gradativamente passaram a substituir as abordagens baseadas na tentativa e erro, sendo denominados de métodos empíricos.

Conforme descrito na introdução, o projeto de uma embarcação envolve um sistema iterativo, e segundo Gale (2003), o motivo das iterações deve-se ao fato desse tipo de projeto ser muito complexo para ser descrito por um conjunto de equações ou análises sequenciais.

Mesmo o primeiro ciclo do projeto de um navio (projeto conceitual), é suficientemente complexo para ser sintetizado na prática. Pois de acordo com Papanikolaou (2014), além da iteração, esse tipo de projeto envolve um rigoroso balanço entre os requisitos impostos pelo armador e as restrições associadas a diversos parâmetros do projeto.

Uma vez que não é possível estabelecer uma sequência linear que permita a cada etapa determinar um conjunto de parâmetros do projeto, eventuais alterações exigem novas iterações e reanálises. Assim, conforme mostrado na Figura 2, de autoria de Vargas (2016), entende-se que se for possível evitar as alterações de projeto decorrentes de parâmetros mal estimados, a quantidade de gastos adicionais e de retrabalho será reduzida.

Com o objetivo de quantificar os erros na fase inicial do projeto, os quais poderão resultar em alterações, o presente trabalho irá analisar os principais modelos empíricos tradicionalmente utilizados na determinação das características do projeto e a aderência desses modelos a diferentes tipos de embarcações.

De modo semelhante, Labes (2015) buscou avaliar quantitativamente as formulações existentes, principalmente para a estimativa dos coeficientes de bloco, da seção mestra e da área de flutuação, de modo a aumentar a precisão nas estimativas realizadas na primeira etapa do projeto, visando diminuir os custos associados ao projeto.

Diante de tal estudo, Labes (2015) constatou um aumento nos coeficientes de bloco das embarcações a cada 15 anos, devido à necessidade de expandir o espaço de carga nos porões, o que pôde justificar a imprecisão nos resultados obtidos com os modelos analisados.

Por fim o autor reforça a necessidade de respeitar as indicações dos respectivos autores ao se utilizar os modelos empíricos.

No entanto, este trabalho se diferencia da proposta de Labes (2015), pois, enquanto Labes utilizou informações obtidas diretamente da ficha técnica das embarcações estudadas, este trabalho realiza a modelagem do plano de linha, obtendo os parâmetros através da análise numérica dos cascos modelados.

2.1. TIPOS DE EMBARCAÇÕES

Navios são construídos para serviços específicos, sejam comerciais ou não. De acordo com Papanikolaou (2014), os navios comerciais têm como objetivo obtenção de lucro, já os não comerciais estão relacionados com algum serviço público, cujo custo, usualmente, é mantido por alguma autoridade governamental.

Existem diversas classificações possíveis para os tipos de navios existentes, a classificação descrita a seguir envolve os navios de transporte de mercadorias, navios de transporte de pessoas, navios da marinha, outras embarcações autopropulsadas, e barcas e embarcações costeiras, sendo essa classificação proposta por Colton (2003).

Navios de carga: tem como função principal o transporte de cargas, seja sólida ou líquida. Navios de carga representam o modal que transporta o maior volume de carga no mundo (PAPANIKOLAOU, 2014). Alguns exemplos desse tipo de embarcação são os graneleiros (Figura 3) que realizam o transporte de carga em granel como minérios de ferro, soja; os petroleiros (Figura 4) que transportam petróleo e seus derivados, os contêineres (Figura 5) que carregam contêineres e os navios de carga geral (Figura 6), que são embarcações flexíveis destinadas a cargas diversas e que não possuem especialização definida.

Figura 3 - Navio graneleiro Sunrise Jade.



Fonte: Marine Traffic (2017a).

Figura 4 - Navio tanque Unique Fidelity.



Fonte: Marine Traffic (2017b).

Figura 5 - Navio contêineiro Hanover Express.



Fonte: Vessel Finder (2017).

Figura 6 – Navio de carga geral Gouraya.



Fonte: Marine Traffic (2017c).

Figura 7 - Navio cruzeiro Norwegian Sun.



Fonte: Marine Traffic (2017d).

Navios de passageiros: são embarcações comerciais, com o objetivo principal de transportar passageiros. Entre eles destacam-se os *ferry boats* e os navios de cruzeiro (Figura 7), que possuem função de transportar pessoas, oferecendo-lhes atividades de lazer.

Embarcações da marinha: são operadas pela marinha, guardas costeiras e outras agências militares. Possuem funções variadas, como por exemplo, os navios de pesquisas (Figura 8), que como o próprio nome já diz, são embarcações utilizadas para objetivos científicos. Além das embarcações para fins de estudos, os navios de guerra também podem ser inseridos nessa classe, os quais são divididos em navios de combate (Figuras 9 e 10) e navios auxiliares, como o navio Arthur M. Huddell (Figura 11), utilizado durante a Segunda Guerra para transporte de cargas.

Figura 8 - Navio pesquisa Ciências do Mar I.



Fonte: Portal Marítimo (2018).

Figura 9 – Fragata Niterói (F40).



Fonte: Wiltgen (2016).

Figura 10 – Navio polivalente Siroco.



Fonte: Poder naval (2015).

Figura 11 - Navio Liberty Arthur M. Huddell.



Fonte: The Model Ship Wright (2018).

Outras embarcações autopropulsadas: são utilizados para captura e transporte de peixes; embarcações para exploração de petróleo e gás, e rebocadores.

Barcaças e outros navios costeiros: barcaças, embarcações de pesca fluvial e estruturas flutuantes diversas.

2.2. DIMENSÕES PRINCIPAIS

As dimensões principais de uma embarcação são fundamentais para determinar o desempenho do navio e, conseqüentemente do projeto. Segundo Schneekluth e Bertran (1998), estão relacionadas com todas as etapas, tais como, o cálculo da resistência ao avanço, da estabilidade, da navegabilidade, da velocidade de serviço, entre outros.

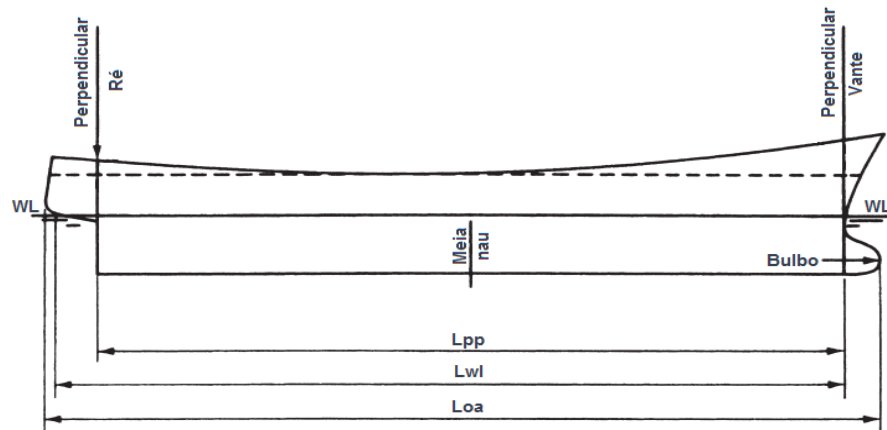
Embora seja um conhecimento absolutamente básico para um engenheiro naval, a definição das dimensões principais é de extrema importância no contexto deste trabalho, assim a seguir são descritos os principais parâmetros analisado, os quais são mostrados nas Figuras 12 e 13.

- Comprimento total (L_{OA}) – corresponde à distância medida entre os pontos extremos embarcação. O ponto medido a vante do navio pertence ao castelo de proa ou ao bulbo, dependendo do tipo de navio (TUPPER, 2004);
- Comprimento de linha d'água (L_{WL}) – corresponde ao comprimento da embarcação medido na linha d'água;
- Comprimento entre perpendiculares (L_{PP}) – corresponde ao comprimento medido ao longo da linha d'água entre as perpendiculares de vante e de ré. Ou seja, medido da madre do leme (AP) até a linha vertical que intercepta o casco com a água (FP). Em

muitos casos não se conhece a posição da madre do leme e, portanto, tal comprimento é aproximado pelo comprimento de linha d'água;

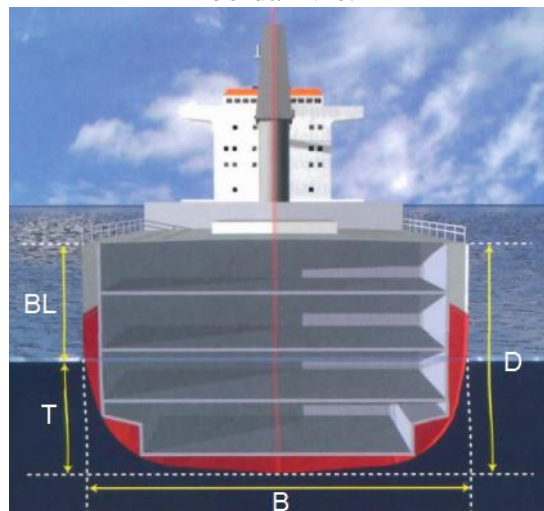
- Boca (B) – corresponde à distância transversal medida na meia nau da embarcação. A boca máxima compreende os extremos, ou seja, inclui as espessuras do chapeamento;
- Calado (T) – corresponde à distância vertical da quilha à linha d'água, sendo que se considera calado médio, como sendo a medida tomada a meia nau. No entanto, pode-se definir também o calado de proa e de popa, que podem sofrer variação devido ao trim do navio. Toda embarcação possui diferentes valores de calado (projeto, máximo, mínimo, etc.) em função das diferentes condições de carga definidas nos critérios de estabilidade;
- Pontal (D) – corresponde à altura vertical do casco, incluindo as espessuras do chapeamento, medido do ponto mais baixo da quilha até o último convés contínuo. O pontal também pode variar ao longo do navio, mas geralmente é medido a meia nau, sendo denominado de pontal máximo;
- Borda livre (BL) – corresponde à distância vertical medida a partir da linha d'água até o convés principal da embarcação;
- L/B – Relação do comprimento do navio com a boca;
- B/T – Relação da boca do navio com o calado;
- Peso leve (LWT) – corresponde ao peso do navio completo, pronto para o serviço sob todos os aspectos, mas sem carga, munição, mantimentos, combustível, água potável, água de alimentação de reserva, tripulantes, passageiros e lastro (FONSECA, 2005);
- Peso morto (DWT) – “É o peso que um navio carrega. Sendo constituído por óleo combustível, água doce, mantimentos, óleo lubrificante, água de lastro, tripulação, carga e passageiros” (BARRASS, 2004, p. 4, tradução nossa);
- Deslocamento (Δ) – corresponde ao peso do volume de água que o navio desloca em um determinado calado. Para navios deslocantes, navegando em águas profundas, corresponde a soma do LWT e do DWT;
- Número de Froude (F_n) – Número adimensional que relaciona a velocidade pelo comprimento do navio, podendo também ser descrito como relação da energia cinética com a energia potencial gravitacional (FONSECA, 2002).

Figura 12 - Vista lateral de uma embarcação com algumas dimensões principais.



Fonte: Adaptado de Tupper (2004).

Figura 13 - Vista frontal de uma embarcação com as dimensões de boca, calado, pontal e borda livre.



Fonte: Adaptado de Dokkum [2007?].

As relações entre as dimensões citadas (L/B e B/T) possuem elevada importância no projeto e devem estar compreendidas entre determinados limites que irão indicar as boas proporções do casco (FONSECA, 2002).

Apenas como exemplo, observa-se que o coeficiente L/B varia em função do tipo de navio. De acordo com Dokkum [2007?] para embarcações de passageiros ($6 \leq L/B \leq 8$), para rebocadores ($3 \leq L/B \leq 5$) e para navios de carga ($5 \leq L/B \leq 7$). Valores de L/B altos costumam ser favoráveis para a velocidade, mas reduzem a manobrabilidade e estabilidade transversal do navio.

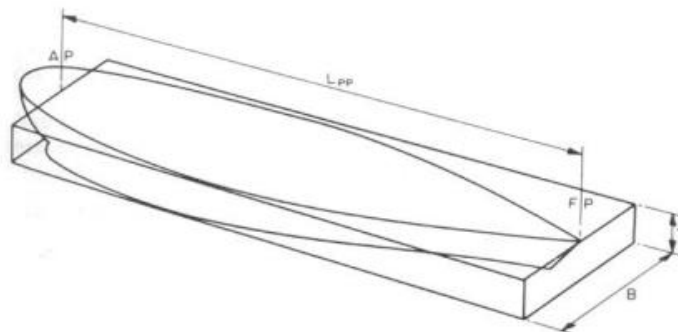
2.3. COEFICIENTES DE FORMA

São adimensionais que exprimem a relação entre as diversas áreas e volumes submersos do casco e as áreas e volumes das figuras planas ou sólidas circunscritas, tendo grande utilidade para o projeto do navio, pois definem a finura do casco e de suas seções (FONSECA, 2002).

- **Coefficiente de Bloco (C_B)**

O coeficiente de bloco representa a proporção do volume deslocado da embarcação em relação a um paralelepípedo (Figura 14) com dimensões do comprimento do navio (L), boca (B) e calado (T), conforme a Equação (1).

Figura 14 - Vista em perspectiva de uma embarcação mostrando a relação do casco com um paralelepípedo.



Fonte: Papanikolau (2014).

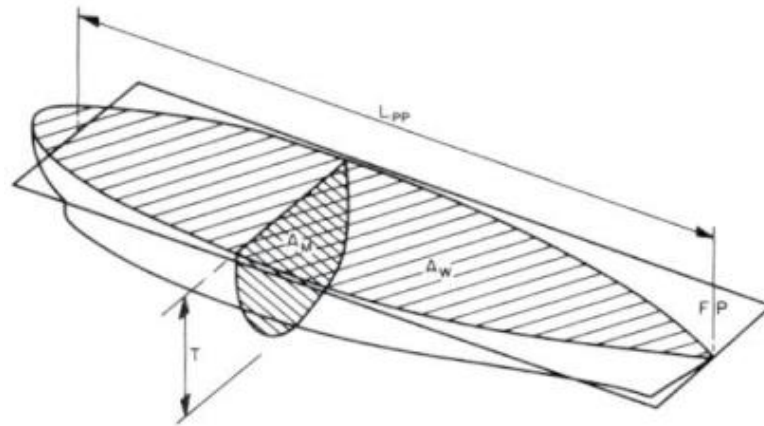
$$C_B = \frac{\nabla}{L_{PP} \cdot B \cdot T} \quad (1)$$

Valores altos de C_B significam uma maior resistência ao avanço, e são ideais para navios cargueiros visto que proporcionam bastante espaço para carga (TUPPER, 2004).

- **Coefficiente da seção mestra (C_M)**

O coeficiente da seção mestra representa a proporção da área submersa da seção a meia nau para o retângulo que a envolve (Figura 15), sendo expressa pela Equação 2.

Figura 15 - Definição do coeficiente de secção mestra.



Fonte: Papanikolaou (2014).

$$C_M = \frac{A_M}{B \cdot T} \quad (2)$$

Similar ao coeficiente de bloco, o aumento do coeficiente da secção mestra representa um balanço entre a capacidade de carga da embarcação e a resistência ao avanço desenvolvida pelo casco. Novamente, observa-se valores altos em navios cargueiros, os quais demandam maiores volumes para armazenamento das cargas transportadas.

Segundo Papanikolaou (2014), para navios porta contêineres, não é recomendado selecionar o C_M com base apenas na carga, mas sim, perceber o efeito que altos valores desse coeficiente podem gerar na resistência e na propulsão do navio.

- **Coeficiente da área do plano de flutuação (C_{WP})**

O coeficiente da área do plano de flutuação relaciona a área do plano de flutuação com a área do retângulo definido pela linha d'água e pela boca da embarcação, podendo ser calculado de acordo com a Equação (3).

$$C_{WP} = \frac{A_W}{L_{WL} \cdot B} \quad (3)$$

Segundo Schneekluth e Bertran (1998), elevados valores de C_{WP} garantem alta estabilidade transversal, primeiro, pois o momento de inércia transversal do plano de

flutuação aumenta com a tendência do casco com formato em V, e segundo, pois o KB move-se para cima.

- **Coefficiente prismático (C_P)**

É o coeficiente que relaciona o volume deslocado pelo volume de um sólido com comprimento do navio na linha d'água e a área submersa da seção a meia nau (Equação 4), conforme definido na Figura 15.

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M \cdot L_{WL}} \quad (4)$$

Este coeficiente representa a distribuição longitudinal do deslocamento do navio, e é utilizado principalmente para os cálculos de potência e velocidade (FONSECA, 2002).

- **Coefficiente Prismático Volumétrico (C_{VP})**

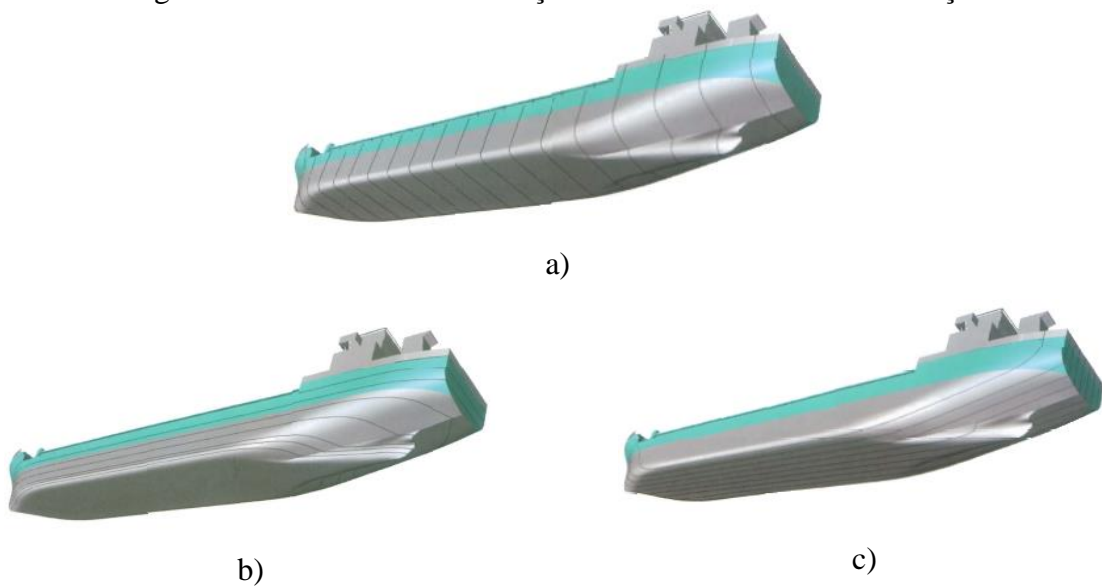
Coefficiente que relaciona o volume do casco submerso, com o volume em forma de prisma dados pelas dimensões da área de flutuação e calado do navio, conforme Equação 5.

$$C_{VP} = \frac{\nabla}{A_W \cdot T} \quad (5)$$

2.4. PLANO DE LINHAS

O plano de linhas de uma embarcação é um conjunto de planos bidimensionais que juntos representam o desenho do casco, sendo eles: plano de balizas, plano de linhas d'água e o plano de alto. A forma do casco é definida pela intersecção desses planos ortogonais no casco, conforme mostrado na Figura 16, gerando uma serie de linhas que são projeções da curvatura do navio.

Figura 16 – Planos de linhas traçados no casco de uma embarcação



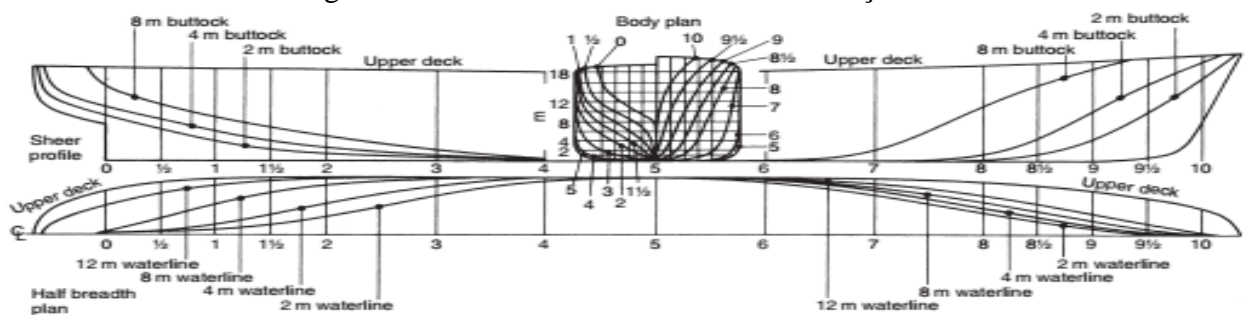
a) Plano de balizas, b) Plano de linha d'água e c) Plano de alto.

Fonte: Dokkum [2007?].

O plano de balizas é o plano frontal que contém as seções transversais igualmente espaçadas ao longo do navio. O plano de linhas d'água apresenta a intersecção do casco com planos paralelos à superfície da água. E, por fim, o plano de alto apresenta linhas paralelas de intersecção do casco com seu plano de simetria longitudinal.

A planificação das linhas obtidas pelos três planos resulta no plano de linhas da embarcação, conforme exemplo apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Plano de linhas de uma embarcação.



Fonte: Tupper (2004).

2.5. MODELOS EMPÍRICOS

Usualmente a estimativa das dimensões principais e coeficientes de forma de uma embarcação baseiam-se em dados de embarcações semelhantes, ou seja, embarcações que possuam a mesma função, mesmo tipo de propulsão, entre outras semelhanças.

Conforme já mencionado, uma abordagem comumente utilizada nos ciclos iniciais do projeto de um navio consiste no uso de modelos empíricos, cujas formulações são geradas interpolando-se os dados obtidos na análise das embarcações semelhantes.

De acordo com Papanikolaou (2014), para obter sucesso através da utilização de modelos empíricos, presume-se que as informações comparativas disponíveis e/ou as relações empíricas, sejam suficientemente confiáveis para o tipo e tamanho de navio a ser projetado. Ou seja, a coerência dos resultados obtidos por tais modelos dependerá justamente da semelhança entre a embarcação em projeto e aquelas utilizadas na construção do modelo.

Algumas formulações, como a Fórmula de Alexander, indicada por Watson (1998), para dimensionamento do C_B , por exemplo, são bastante antigas, datando da década de 60. Por essa razão, eventualmente já foram reformuladas para se ajustarem as mudanças das características das embarcações ao longo dos anos.

É importante destacar que existe um grande número de formulações existentes para estimativa dos coeficientes de forma, e que devem ser analisadas não apenas em relação à precisão dos resultados. Pois, em alguns casos, o modelo empírico exige parâmetros específicos do projeto, os quais muitas vezes não podem ser corretamente calculados nas fases iniciais, levando a ocorrência de erros associados não ao modelo em si, mas a estimativa dos parâmetros utilizados pelo modelo.

2.5.1. Coeficiente de Bloco (C_B)

Segundo Barrass (2004), para uma primeira estimativa de embarcações de carga geral, os valores de C_B e C_D (coeficiente de peso morto) podem ser considerados iguais. Mas, além disso, há outras maneiras de encontrar o coeficiente de bloco, entre elas destacam-se:

- Fórmula de Alexander

De acordo com Watson (1998), em 1962, Alexander propôs um modelo para estimar o coeficiente de bloco em função do Número de Froude (Equação 6).

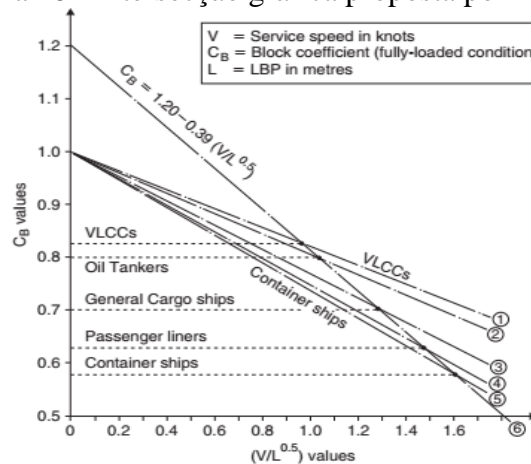
$$C_B = K - 0,5 \frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \quad (6)$$

Onde K varia de 1,03 para embarcações de *alta velocidade* a 1,12 para embarcações de *baixa velocidade*. A velocidade (V) é dada em nós e L_{WL} em pés.

- Fórmula de Alexander reformulada por Barrass

Em 1992 Barrass propôs uma reformulação na equação de Alexander, pelo método da intersecção gráfica (Figura 18), onde através de uma fórmula global relacionou as variações das fórmulas propostas por Alexander para cada tipo de navio (Figura 19).

Figura 18 - Intersecção gráfica proposta por Barrass.



Fonte: Barrass (2004).

Figura 19 - Equações propostas por Alexander.

- CBB and via Alexander's research
- ① $C_B = 1 - 0.182 (V/L^{0.5})$ For VLCCs, 50 000 to 200 000 tonnes dwt
 - ② $C_B = 1 - 0.195 (V/L^{0.5})$ For Oil Tankers, 25 000 to 50 000 tonnes dwt
 - ③ $C_B = 1 - 0.234 (V/L^{0.5})$ For General Cargo ships
 - ④ $C_B = 1 - 0.254 (V/L^{0.5})$ For Passenger liners
 - ⑤ $C_B = 1 - 0.265 (V/L^{0.5})$ For Container ship

Fonte: Barrass (2004).

A equação global proposta por Barrass em 1992 é expressa a seguir.

$$C_B = 1,20 - 0,39 \left(\frac{V}{L^{0,5}} \right) \quad (7)$$

Para o autor, a Equação 7 representa de maneira adequada as equações da Figura 19 pois, segundo ele as embarcações possuem velocidades de projetos específicas para cada tipo de navio (Tabela 1), como por exemplo, um navio do tipo carga geral terá velocidade de serviço de 14 a 16 nós, um petroleiro normalmente terá velocidade de 15 a 15,75 nós, podendo assim conforme mostrado na Figura 18, substituir as 5 linhas do gráfico de Alexander.

Tabela 1 – Valores típicos médios para C_B e velocidade para determinados tipos de navios.

Tipo de navio	Típicos valores de C_B	Típicos valores de velocidade (nós)
VLCCs	0,825	15,50
Petroleiro	0,800	15,50
Carga Geral	0,700	14,75
Passageiros	0,625	22,00
Porta contêiner	0,575	22,00

Fonte: Traduzido de Barrass (2004).

- Katsoulis

Segundo Watson (1998), em 1975 Katsoulis otimizou o coeficiente de bloco através de uma equação exponencial (Equação 8), para Katsoulis as relações de L/B e B/T deveriam ser estudadas para determinação desse coeficiente, pois afetam na resistência e no fluxo de água que chega ao hélice.

$$C_B = 0,8217 \cdot f \cdot L_{PP}^{0,42} \cdot B^{-0,3072} \cdot T^{0,1721} \cdot V^{-0,6135} \quad (8)$$

Onde os valores de f variam de acordo com o tipo de navio. Segundo Ventura [2018?] atualmente, a utilização dos valores de f descritos na Figura 20 oferecerá bons resultados na aplicação do modelo empírico proposto por Katsoulis.

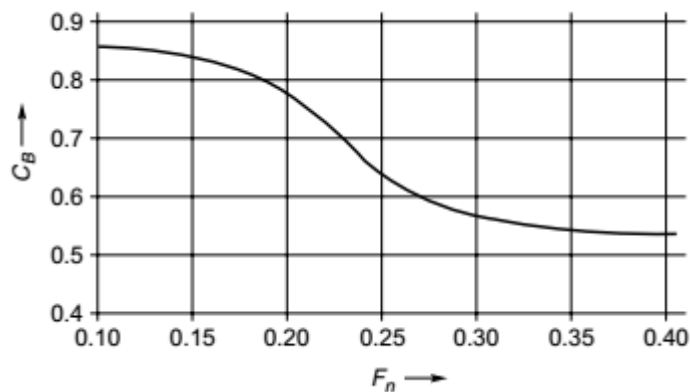
Figura 20 – Valores de f para cada tipo de navio.

Ro/Ro Reefers	Gen. Cargo Tankers	Containers	OBO	Bulk	Gas	Products Chemicals	Ferry
0.97	0.99	1.00	1.03	1.04	1.05	1.06	1.09

Fonte: Ventura [2018?].

- Schneekluth e Bertran

Em seu livro, Schneekluth e Bertran (1998) apresentam um modelo para estimar o coeficiente de bloco, bastante similar ao proposto por Jensen em 1994. Na Figura 21 é mostrada a representação gráfica do modelo proposto por Jensen, e cuja formulação é apresentada na Equação 9.

Figura 21 - Relação de C_B e Froude proposta por Jensen (1994).

Fonte: Schneekluth e Bertran (1998).

$$C_B = -4,22 + 27,8\sqrt{F_n} - 39,1F_n + 46,6F_n^3 \quad (9)$$

Para $0,15 < F_n < 0,32$, caso $F_n \geq 0,3$ utiliza-se $F_n = 0,3$.

Seguindo a mesma abordagem desenvolvida por Jensen, Schneekluth e Bertran (1998) sugerem as Equações 10 e 11 para estimativa do coeficiente de bloco.

$$C_B = \frac{0,14}{F_n} \cdot \frac{L}{B+20} \quad (10)$$

$$C_B = \frac{0,23}{F_n^{2/3}} \cdot \frac{L}{B+20} \quad (11)$$

Para $0,14 \leq F_n \leq 0,32$ e limitado para embarcações com $0,48 \leq C_B \leq 0,85$.

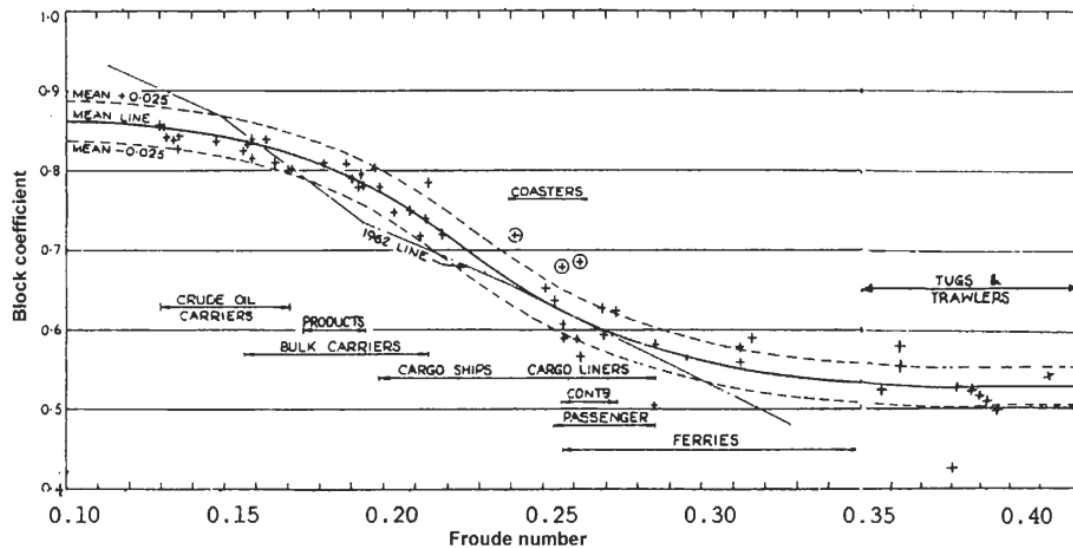
- Towsin

De acordo com Watson (1998), em 1975, Watson and Gilfillan criaram curvas que relacionavam o coeficiente de bloco com o número de Froude para vários tipos de navios. Anos depois em 1991, Towsin baseando-se nestas curvas, e com auxílio de um programa de computador elaborou uma fórmula (Equação 12) que correspondesse à linha média do gráfico de Watson and Gilfillan (Figura 22).

$$C_B = 0,70 + 0,125 \arctg \frac{(23 - 100F_n)}{4} \quad (12)$$

Onde o ângulo deve ser calculado em radianos.

Figura 22 – Gráfico de Watson and Gilfillan.



Fonte: Watson (1998).

Em seu livro, Papanikolaou (2014) enumerou outros modelos para estimar C_B , os quais foram formulados por diferentes autores a partir da Equação 13. Os dados referentes aos diferentes modelos enumerados por Papanikolaou (2014) são descritos na Tabela 2.

$$C_B = K_1 - K_2 F_n - K_3 F_n^2 \quad (13)$$

Tabela 2 - Valores para os coeficientes K_1 , K_2 e K_3 de acordo com cada autor.

Autor	K_1	K_2	K_3	Restrição
Horn	1,06	1,68	0	1 propulsor, velocidade de serviço
Ayre	1,08	1,68	0	1 propulsor, velocidade de ensaio
Ayre	1,09	1,68	0	2 propulsores, velocidade de ensaio
Heckser	1,00	1,44	0	1 propulsor, velocidade de ensaio
Van Lammeren	1,08	1,68	0,224	1 propulsor, velocidade de ensaio

Fonte: Adaptado de Papanikolaou (2014).

Onde a velocidade de ensaio é dada por ($V_T \approx V / 0,94$).

2.5.2. Coeficiente da seção mestra (C_M)

Os modelos empíricos para cálculo do coeficiente da seção mestra, segundo Papanikolaou (2014) são listados a seguir.

- Van Lammeren

$$C_M = 0,9 + 0,1C_B \quad (14)$$

- Kerlen (1979)

$$C_M = 1,006 - 0,0056C_B^{-3,56} \quad (15)$$

- Laboratory HSVA (Hamburg)

$$C_M = \frac{1}{[1 + (1 - C_B)^{3,5}]} \quad (16)$$

Ainda segundo Papanikolaou (2014), as formulações acima podem ser utilizadas para embarcações com relação L/B típicos, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores comuns para L/B para alguns tipos de navios.

Ship type	L/B
<i>Fast seagoing cargo ships</i>	5,7 - 7,8
<i>Slow seagoing cargo ships</i>	4,8 - 8,5
<i>Coastal cargo ships</i>	4,5 - 5,5
<i>Small short sea passenger ships</i>	5,8 - 6,5
<i>Bulk carriers (L > 100m)</i>	5,0 - 7,1
<i>Tankers (Fn = 0,15)</i>	5,1 - 6,8
<i>Tankers (Fn = 0,16 a 0,18)</i>	5,0 - 6,5

Fonte: Adaptado de Papanikolaou (2014).

De acordo com Parsons (2003), o coeficiente da seção mestra pode ser estimado através de generalizações desenvolvidas a partir do formato de casco existentes (Equação 18), ou então de séries sistemáticas como proposto na Equação 17.

- Benford (A partir da serie 60)

$$C_M = 0,977 + 0,085(C_B - 0,6) \quad (17)$$

- Schneekluth and Bertran (C_M com relação ao raio de bojo).

$$C_M = 1 - \frac{r_B^2}{2,33 \cdot B \cdot T} \quad (18)$$

onde

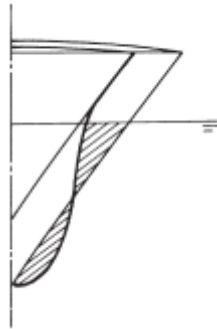
$$r_B = \frac{B \cdot C_k}{(L/B + 4)C_B^2}; \quad C_k = 0,5 - 0,6. \quad (19)$$

Nesse contexto, Parsons (2003) complementa que para a maioria dos navios comerciais, a seção mestra do casco está localizada próxima à meia-nau.

2.5.3. Coeficiente da área de flutuação (C_{WP})

Em geral, os coeficientes de forma relacionam-se entre si e, segundo Schneekluth e Bertran (1998), o C_{WP} possui influência na resistência da embarcação e na estabilidade, pois está geometricamente ligado com as formas transversais do navio e com o C_B , conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Seções transversais nos formatos “U” e “V” com a mesma área seccional abaixo da linha d’água.



Fonte: Schneekluth e Bertran (1998).

Por isso, Schneekluth and Bertran (1998) desenvolveram formulações para o cálculo preliminar do C_{WP} em função do desenho da seção transversal, conforme listadas a seguir.

- Seção transversal em formato “U”

$$C_{WP} = 0,95C_P + 0,17^3\sqrt{1 - C_P} \quad (20)$$

- Seção transversal média

$$C_{WP} = \frac{(1 + 2C_B)}{3} \quad (21)$$

- Seção transversal em formato “V”

$$C_{WP} = \sqrt{C_B} - 0,025 \quad (22)$$

$$C_{WP} = C_P^{2/3} \quad (23)$$

$$C_{WP} = \left(1 + \frac{2C_B}{\sqrt{C_M}}\right)/3 \quad (24)$$

- Seção de petroleiros e graneleiros

$$C_{WP} = \frac{C_B}{(0,471 + 0,551C_B)} \quad (25)$$

Ainda de acordo com Schneekluth and Bertran (1998), as equações acima não são indicadas para embarcações com popa transom, mas sim com popa cruiser.

Além dessas formulações, Parsons (2003) enumera outros modelos para cálculo do coeficiente do plano de flutuação de acordo, os quais são listados a seguir.

- Serie 60

A Serie 60, criada em 1963, também apresenta um modelo para determinar o coeficiente, conforme Equação 26.

$$C_{WP} = 0,18 + 0,860C_P \quad (26)$$

- Eames

Para navios de guerra com popa transom, propõe-se a equação 27.

$$C_{WP} = 0,444 + 0,520C_P \quad (27)$$

- Parsons

Embarcações com um propulsor e popa cruiser, propõe-se a Equação 28. Já para embarcações com 2 propulsores e popa cruiser, a Equação 29. E por fim, para embarcações com 2 propulsores e popa transom, a Equação 30.

$$C_{WP} = 0,175 + 0,875C_P \quad (28)$$

$$C_{WP} = 0,262 + 0,760C_P \quad (29)$$

$$C_{WP} = 0,262 + 0,810C_P \quad (30)$$

Ao se utilizar modelos empíricos para a determinação do C_{WP} nas fases iniciais do projeto, Papanikolaou (2014) sugere que se evitem valores elevados para esse coeficiente, pois tais valores podem ser reduzidos ao longo do projeto, podendo resultar em uma embarcação com estabilidade menor do que a estimada nas fases iniciais do projeto.

2.5.4. Altura do centro de carena (KB)

A altura do centro de carena corresponde à distância vertical da quilha ao centro do volume descolado pelo casco, sendo uma propriedade hidrostática extremamente importante para calcular a estabilidade da embarcação.

De acordo com Parsons (2003), existe uma forte correlação inversa entre KB e C_{VP} . Logo, o coeficiente volumétrico prismático pode ser usado para fazer estimativas efetivas do KB. Os diferentes modelos empíricos propostos para a estimativa do KB são descritos abaixo.

- Moorish e Normand

$$KB = \frac{(2,5 - C_{VP})T}{3} \quad (31)$$

Recomendada para cascos com $C_M \leq 0,9$.

- Posdumine e Lackenby

$$KB = T(1 + C_{VP})^{-1} \quad (32)$$

Recomendada para cascos com $C_M > 0,9$.

Schneekluth e Bertram (1998) enumeram outros modelos para estimativa do KB, os quais são descritos a seguir.

- Normand

$$KB = T(0,9 - 0,36C_M) \quad (33)$$

- Schneekluth

$$KB = T(0,9 - 0,3C_M - 0,1C_B) \quad (34)$$

- Wobig

$$KB = T \left[0,78 - \frac{0,285C_B}{C_{WP}} \right] \quad (35)$$

- Barrass (2004)

$$KB = \frac{T}{(1 + C_B/C_{WP})} \quad (36)$$

$$KB = 0,535T \quad (37)$$

- Normand II apud Barrass (2004).

$$KB = T \left(\frac{5}{6} - \frac{C_B}{3C_{WP}} \right) \quad (38)$$

2.5.5. Raio Metacêntrico Transversal (BM_T)

As dimensões e a forma do plano de flutuação determinam os momentos de inércia do plano em relação ao eixo longitudinal e transversal do navio, os quais podem ser utilizados para obtenção do raio metacêntrico, conforme definição mostrada na Equação 39.

$$BM_T = \frac{I_T}{\nabla} \quad (39)$$

Visto que, nas fases iniciais do projeto, determinar a forma exata do plano de linha d'água e o correspondente momento de inércia não é uma tarefa simples, Parsons (2003) expõe formulações de diversos autores para a estimativa desse parâmetro, as quais têm como base a Equação 40.

$$I_T = C_I \cdot L \cdot B^3 \quad (40)$$

As formulações correspondentes à estimativa do coeficiente C_I , segundo os diversos autores analisados, são enumeradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Formulações para determinação do coeficiente C_I .

Equação	Autor	
$C_I = 0,1216C_{WP} - 0,0410$	D'Arcangelo	(41)
$C_I = 0,0727C_{WP}^2 + 0,0106C_{WP} - 0,003$	Eames	(42)
$C_I = 0,04(3C_{WP} - 1)$	Murray	(43)
$C_I = (0,096 + 0,89C_{WP}^2)/12$	Normand	(44)
$C_I = [0,0372(2C_{WP} + 1)^3]/12$	Bauer	(45)
$C_I = (1,04C_{WP}^2)/12$	McCloghrie	(46)
$C_I = (0,13C_{WP} + 0,87C_{WP}^2)/12$	Dudszus and Danckwardt	(47)

Fonte: Adaptado de Parsons (2003).

Além desses autores, Barrass (2004) também sugere uma formulação (Equação 48) para determinar o raio metacêntrico transversal, para embarcações mercantes com $0,692 \leq C_{WP} \leq 0,893$.

$$BM_T = \frac{0,084 \cdot (C_{WP})^2 \cdot B^2}{T \cdot C_B} \quad (48)$$

Assim como, Schneekluth e Bertran (1998) sugerem a Equação 49.

$$BM = C_{WP}^{1,8} \frac{B^2}{12 \cdot T \cdot C_B} \quad (49)$$

2.5.6. Posição longitudinal do centro de carena (LCB)

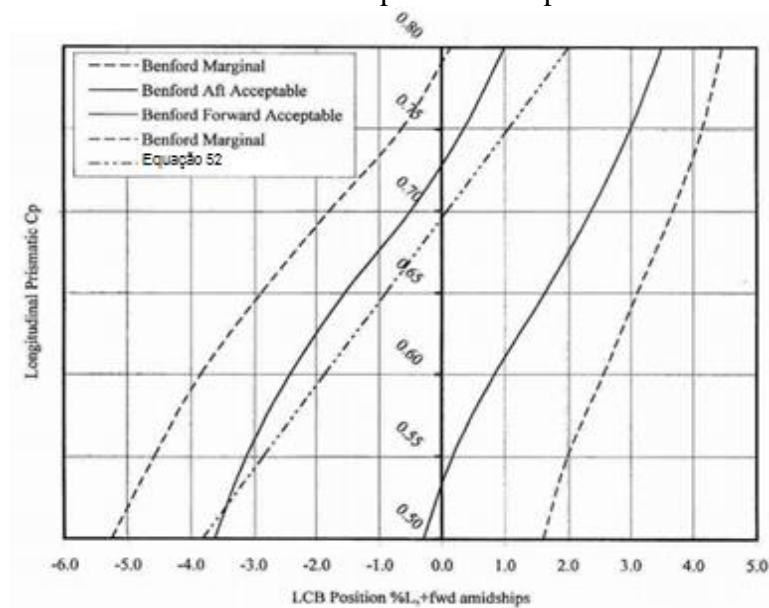
A posição longitudinal do centro de carena é o centroide da parte submersa da embarcação, e geralmente é medida a partir da meia-nau. Assim como os outros parâmetros geométricos, a posição do LCB depende do tipo de navio, tendo relação direta com a forma da proa e da popa do casco.

Segundo Parsons (2003), o LCB afeta a resistência ao avanço e o trim da embarcação. Por esse motivo, a estimativa inicial do LCB torna-se necessária para a aplicação de alguns modelos empíricos de estimativa de resistência ao avanço da embarcação. Além disso, o desenho do casco e as verificações iniciais do ângulo de trim do navio requerem uma boa estimativa do LCB.

Os valores de LCB, C_P e C_B afetam diretamente o sistema de ondas gerado pelo casco, pois, conforme descrito por Papanikolaou (2014), um LCB localizado muito a frente da embarcação desencadeia uma geração de ondas intensas na proa, enquanto um LCB mais a ré cria vórtices no hélice, causando efeitos negativos no sistema propulsivo.

Parsons (2003) descreve diferentes formulações para a estimativa do LCB nas fases iniciais do projeto propostas por diversos autores. Entre elas, cita-se o modelo de Benford, construído a partir dos dados de resistência ao avanço da Serie 60 e que possibilitou estabelecer o intervalo aceitável de LCB como uma função C_P (Figura 24).

Figura 24 - Curvas recomendadas por Benford para estimativa de LCB.



Fonte: Adaptado de Parsons (2003).

Na Figura 24 são mostradas as faixas aceitáveis e marginais sugeridas por Benford para o LCB como um percentual do comprimento a partir da meia nau. Além disso, segundo Parsons (2003), esse modelo reflete a correlação do C_p com F_n , resultando em valores a vante para valores baixos de F_n , a meia nau para F_n moderados ($C_p \approx 0,65$, $F_n \approx 0,25$) e a ré para altos valores do número de Froude.

Da mesma maneira, Parsons (2003) sugere outros modelos para estimar o valor do LCB na fase inicial de projeto, os quais são enumerados a seguir.

- Harvard

$$LCB = 9,7 - 45F_n \pm 0,8 \quad [\%L] \quad (50)$$

- Schneekluth e Bertram

$$LCB = 8,8 - 38,9F_n \quad (51)$$

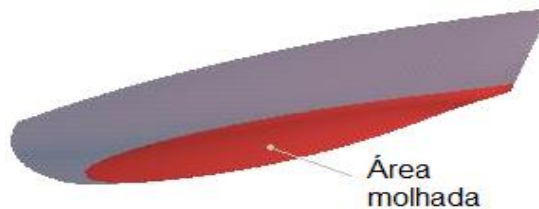
$$LCB = -0,135 + 0,194C_p \quad (52)$$

As equações correspondem à um percentual do comprimento do navio, medido a partir da meia nau. Além disso, a Equação 52 é indicada para petroleiros e graneleiros, e a curva que representa essa Equação foi representada na Figura 24.

2.5.7. Área molhada (S)

A área molhada corresponde à área da superfície do casco que está abaixo da água (Figura 25), sendo utilizada para obtenção da resistência de fricção, a qual compõe a resistência ao avanço da embarcação.

Figura 25 - Representação da área molhada no casco de uma embarcação.



Fonte: Project Sail Boat Wayra (2009).

Watson (1998) enumera algumas formulações para estimativa da área molhada de um navio, as quais são apresentadas a seguir.

- Mumford

$$S = 1,7L.T + C_B.L.B \quad (53)$$

- Taylor

Em 1910, o oficial da marinha dos Estados Unidos, Taylor, propôs um método para estimar a potência necessária para navios, e concomitante a isso, sugere a Equação 54 para estimar a superfície molhada de uma embarcação.

$$S = C\sqrt{\Delta L} \quad (54)$$

Onde C pode ser considerado igual a 2,55 para navios mercantes.

- Holtrop e Mennen

O método para estimativa da resistência ao avanço de Holtrop e Mennen (1982), ainda é bastante utilizado por arquitetos navais, em sua formulação os autores também sugerem que o cálculo da área molhada seja realizado através da Equação 55.

$$S = L(2T + B) \cdot C_M^{1/2} \left(0,453 + 0,4425C_B - 0,2862C_M - \frac{0,003467B}{T} + 0,3696C_{WP} \right) + 2,38 \frac{A_{BT}}{C_B} \quad (55)$$

Onde A_{BT} é a Área seccional transversal do bulbo.

Por fim, Schneekluth e Bertran (1998) propõem a equação 56 para a estimativa da área molhada de uma embarcação mercante.

- Schneekluth and Bertram

$$S = (3,4\nabla^{1/3} + 0,5L_{WL}) \cdot \nabla^{1/3} \quad (56)$$

2.5.8. Curva de áreas Seccionais (SAC)

Segundo Schneekluth e Bertran (1998) os desenhos das linhas do casco são, até certo ponto, uma arte, onde convencionalmente, as linhas são criadas "livremente", ou seja, a partir do zero, ou elaboradas a partir de linhas de outras embarcações. De maneira geral, as linhas referidas pelos autores, correspondem a:

1. Forma da curva de área seccional;
2. Contorno da seção mestra;
3. Formato da proa e das seções a vante;
4. Formato do bulbo;
5. Formas da popa e das seções a ré.

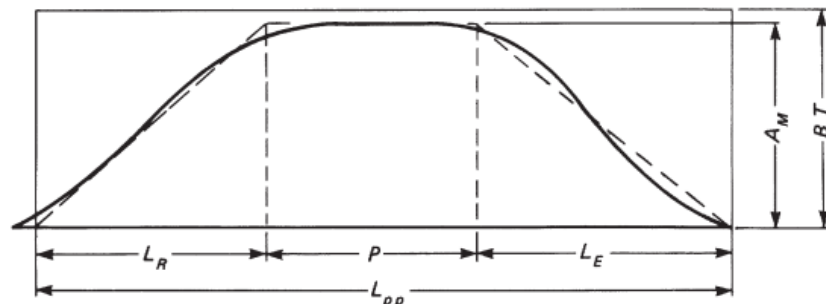
A curva de área seccional representa a distribuição da área da seção transversal da embarcação em cada baliza ao longo do comprimento do navio. Assim, no eixo horizontal é

representada a posição longitudinal da baliza, enquanto o eixo vertical define a área da seção na posição x .

Elaborar a curva da área seccional corresponde a uma das etapas iniciais de um projeto, para qual Schneekluth e Bertran (1998) sugerem duas abordagens:

1. Representar a SAC por um trapézio, cuja área corresponde ao volume deslocado do casco. Essa abordagem é vista na curva tracejada mostrada na Figura 26.
2. Utilizando um *diagrama auxiliar* para plotar a curva da área seccional.

Figura 26 – Curva de áreas seccionais usando método do trapézio.



Fonte: Schneekluth e Bertran (1998).

Os parâmetros L_R , P e L_E apresentados na Figura 26, correspondem aos comprimentos do corpo de popa, comprimento do corpo paralelo e comprimento do corpo de proa, respectivamente. Segundo Schneekluth e Bertran (1998) a relação entre a área do trapézio e o retângulo de altura A_M corresponde ao coeficiente prismático da embarcação, assim como, o valor de C_B é obtido a partir da razão entre a área do trapézio e o retângulo de altura B_T .

Além dessas informações, a partir da SAC é possível calcular o deslocamento do navio, o qual corresponde à área abaixo da curva, calculado a partir da integral descrita na Equação 57.

$$\nabla = \int_0^L SAC(x) dx \quad (57)$$

Analogamente, o respectivo valor do LCB, o qual correspondente ao centroide da área abaixo da curva pode ser obtido por meio da Equação 58.

$$LCB = \frac{\int_0^L SAC(x) \cdot x \, dx}{\nabla} \quad (58)$$

Para a construção da SAC a partir do método do trapézio, Schneekluth e Bertran (1998) sugerem as equações a seguir para estimar os valores de L_R e L_E , as quais são recomendadas pelos autores Baker e Alsen, respectivamente.

- Baker

$$L_R = 4,08\sqrt{A_M} \quad (59)$$

$$L_E = 0,1694 \cdot V^2 \quad (60)$$

- Alsen

$$L_R = 3,2\sqrt{B \cdot T} / C_B \quad (61)$$

$$L_E = 0,1694 \cdot V^2 \quad (62)$$

Onde a velocidade é dada em nós nas duas equações acima.

Por fim, pode-se dizer que os comprimentos L_R , P e L_E e a posição longitudinal do centro de empuxo (LCB) influenciam fortemente nos coeficientes de resistência ao avanço do navio (SCHNEEKLUTH E BERTRAN, 1998).

Para melhor visualização os modelos empíricos e seus respectivos autores estão listados no APÊNDICE A.

3. METODOLOGIA

Tendo em vista que, o objetivo principal deste trabalho consiste na verificação da precisão dos modelos empíricos utilizados para determinação das dimensões principais e coeficientes de forma nos projetos navais, a metodologia abordada consistiu em recriar os cascos de algumas embarcações reais e a seguir, verificar se os modelos empíricos sugeridos por diferentes autores correspondem aos valores calculados numericamente por meio da integração do modelo tridimensional do casco.

Grande parte da pesquisa consistiu no levantamento bibliográfico, o qual, segundo Koche (1997 apud ZANELLA, 2009, p. 82) “[...] tem a finalidade de ampliar o conhecimento na área, de dominar o conhecimento para depois utilizá-lo como modelo teórico que dará sustentação a outros problemas de pesquisa e para descrever e sistematizar o estado da arte na área estudada”.

Assim, o primeiro passo foi definir quais modelos empíricos seriam analisados e quais autores seriam estudados. Como citado anteriormente, as referências principais deste trabalho são nomes conhecidos no setor de projetos navais, autores clássicos como Barrass (2004), Lewis (1988), Watson (1998), Parsons (2003), Papanikolaou (2014) e Schneekluth e Bertran (1998), cuja leitura foi condição *sine qua non* para o desenvolvimento proposto.

Tais autores expõem modelos empíricos e semi-empíricos para estimar as dimensões principais e os coeficientes de forma de embarcações, não somente de autoria própria, mas também descrevendo modelos propostos por outros autores. Algumas dessas formulações são consideravelmente antigas, motivando ainda mais a verificação da aderência de tais modelos a aos projetos navais.

A fase inicial do desenvolvimento consistiu na busca por planos de linhas de embarcações reais, que permitissem a modelagem tridimensional do casco. Tal busca utilizou a Internet, bem como livros e artigos; tendo como objetivo encontrar planos de linhas completos correspondendo a embarcações de diferentes tipos e tamanhos. Considerou-se navios projetados e construídos após 1899.

Uma vez completado o levantamento bibliográfico, os modelos empíricos e as tabelas de cotas referentes aos planos de linhas consultados foram implementados em uma planilha eletrônica do tipo Excel.

A seguir realizou-se a modelagem dos cascos com o auxílio do programa *Rhinoceros*, o qual é amplamente utilizado na área de modelagem naval. Os modelos foram

construídos por meio da geração de superfícies suaves, que interpolavam os pontos das tabelas de cotas obtidas no levantamento bibliográfico.

Com as modelagens dos cascos finalizadas, utilizou-se o programa *Maxsurf*, para realizar os cálculos numéricos referentes aos diferentes coeficientes de forma analisados.

Por fim, os resultados numéricos foram então comparados com aqueles obtidos a partir dos modelos empíricos, conforme estabelecido nos objetivos propostos.

4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvido realizado na pesquisa. O texto descreve o processo de levantamento do plano de linhas e modelagem das embarcações reais que serão utilizadas no estudo comparativo proposto nos objetivos deste trabalho.

4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

Conforme descrito na metodologia, inicialmente é necessário que os cascos a serem estudados sejam modelados tridimensionalmente.

Devido às dificuldades de obtenção de plano de linhas de embarcações reais, optou-se por analisar um total de dez embarcações, cujos dados foram obtidos através de buscas na internet. Alguns modelos foram encontrados em sites que fornecem planos de linhas de embarcações que não se encontram mais em navegação.

Inicialmente tentou-se utilizar o periódico *Significant Ships*, no qual as embarcações são descritas em detalhes, apresentando inclusive, o contorno de vários conveses, os quais podem ser interpretados como o plano de alto do navio. No entanto, esse método resultou em cascos irregulares, pois os números de pontos das balizas se restringiram ao número de conveses, ou seja, no máximo 5 pontos para cada baliza, gerando curvas com poucas informações. Logo, percebeu-se a necessidade de se obter planos de balizas completos para que a modelagem ficasse a mais verossímil possível.

A maior parte das embarcações estudadas fazem parte de um projeto realizado pelo *Historic American Engineering Record* (HAER) juntamente com a Administração Marítima dos Estados Unidos (MARAD), um programa que visa documentar obras industriais e de engenharia historicamente importantes nos Estados Unidos, o qual é administrado pelo *The Heritage Documentation Programs of the National Park Service*. A partir de tal programa, obtiveram-se inúmeros relatórios de navios da marinha dos EUA construídos na Primeira e Segunda Guerra Mundial.

Além disso, outros sites que fornecem planos de linhas gratuitos foram consultados. No entanto, é importante salientar que, embora diversos planos foram obtidos, a grande maioria não foi utilizada neste trabalho, pois o critério adotado para considerar a utilização de um navio foi a verificação de que o casco modelado apresentasse um erro de até 5% em relação ao deslocamento estabelecido na ficha técnica da embarcação. A não verificação desse

critério indica a existência de informações não confiáveis no levantamento de dados realizado para essa embarcação, implicando no descarte dos dados.

Sendo assim, embora a intenção inicial fosse analisar dez tipos diferentes de embarcações, em consequência das poucas opções disponíveis, a amostragem final contém alguns tipos de navios repetidos. Porém, no caso de navios de mesmo tipo, procurou-se utilizar embarcações com deslocamentos consideravelmente diferentes, o que também representa um importante aspecto a ser analisados.

Ainda em virtude da limitação de informações disponíveis para as análises dos coeficientes de forma, não foram considerados nas modelagens os bulbos das embarcações, bem como eventuais superestruturas e outros apêndices. Tais inclusões influenciariam os resultados, visto que os modelos empíricos, em geral, se referem à análise do casco nu.

As embarcações analisadas variam em relação ao ano de construção, com navios construídos desde 1898 a 1990. Evidentemente pretendeu-se analisar navios mais atuais, no entanto, se a obtenção de planos de linhas confiáveis já pode ser considerada uma tarefa difícil, a obtenção de tais planos para embarcações atualmente em operação, pode ser considerada uma tarefa quase impossível, em virtude do óbvio segredo industrial associado às linhas do casco.

Por fim, as embarcações efetivamente utilizadas neste trabalho estão descritas no APÊNDICE B e listadas a seguir.

- 1 – Navio tanque Saugatuck (Figura 27);
- 2 – Navio de pesquisa Hesperides (Figura 29);
- 3 – Navio modelo 4277 da serie 60;
- 4 – Cruzeiro Andrea Doria (Figura 31);
- 5 – Navio cruzador Aurora (Figura 33);
- 6 – Navio de carga quebra-gelo Angara (Figura 35);
- 7 – Navio de salvamento Bolster (Figura 37);
- 8 – Navio transporte de tropas Frederick Murphy (Figura 39);
- 9 – Navio transporte de tropas Edwin D. Patrick (Figura 41);
- 10 – Navio Ro-Ro Comet (Figura 43).

Com os planos de linhas e com as informações completas dos navios (Tabela 5), foi possível modelar os cascos, conforme o procedimento descrito na metodologia, e cujo resultado final é apresentado nas figuras a seguir.

Tabela 5 – Informações obtidas dos navios estudados.

Navios Dados	Saugatuck	Hesperides	Serie 60	Andrea Doria	Aurora	Angara	Bolster	Frederick	Edwin	Comet
L_{OA} (m)	159,26	82,5	-	213,36	126,7	61	65,07	138,76	185,6	152,1
B (m)	20,73	14,3	18,06	27,43	16,8	10,7	13,11	18,9	23	25,3
T (m)	9,14	4,42	5,16	9,14	6,2	4,7	4,19	8,54	8,08	6,71
Ano	1942	1990	1963	1951	1900	1898	1944	1945	1945	1958
Vel (nós)	15,5	13	13	23	20	12	16	17	19	18
Δ (t)	21880	2750	8606	29083	6731	1400	2048	15200	20120	16489
Nº Hélices	1	2	1	2	3	1	2	1	2	2
Tipo	Tanque	Pesquisa	Mercante	Cruzeiro	Cruzador	Carga/ Quebra gelo	Salvamento	Carga/Tropas	Carga/Tropas	Ro/Ro

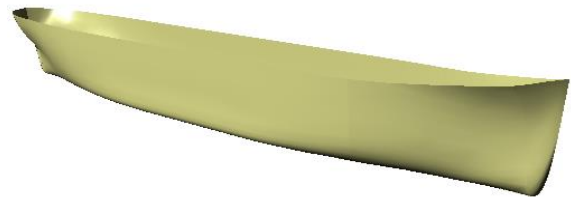
Fonte: Autor (2018).

Figura 27 – Navio tanque USS Saugatuck.



Fonte: Croteau (2009a).

Figura 28 – Vista em perspectiva do casco modelado do navio Saugatuck.



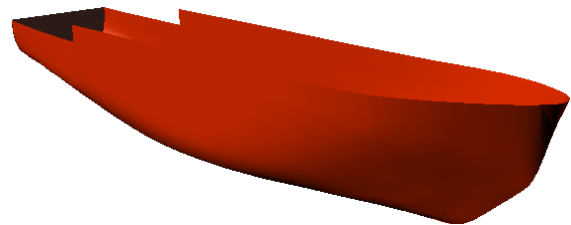
Fonte: Autor (2018).

Figura 29 - Navio de pesquisa oceanográfico Hesperides.



Fonte: Euro Fleets (2018).

Figura 30 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Hesperides.



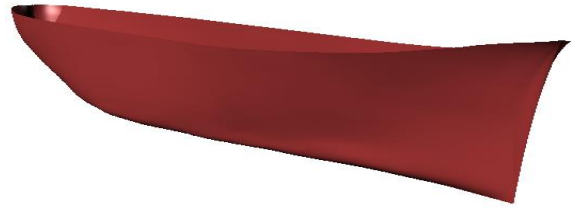
Fonte: Autor (2018).

Figura 31 – Navio transatlântico Andrea Doria.



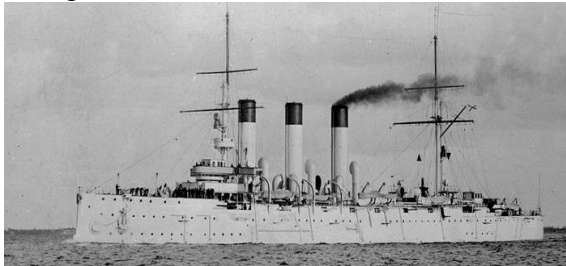
Fonte: Grace (2011).

Figura 32 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Andrea Doria.



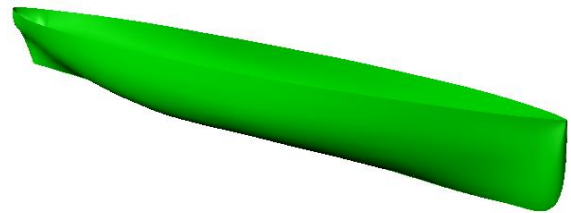
Fonte: Autor (2018).

Figura 33 – Cruzador Aurora em 1903.



Fonte: Museu Naval Central (2018).

Figura 34 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Aurora.



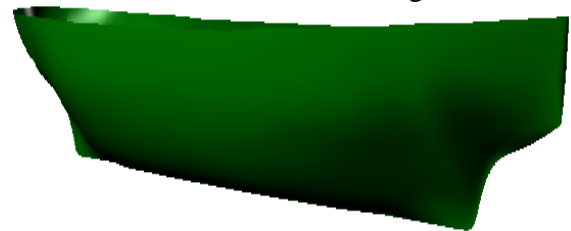
Fonte: Autor (2018).

Figura 35 – Navio quebra gelo Angara no lago Baikal.



Fonte: Icebreaker Angara (2001).

Figura 36 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Angara.



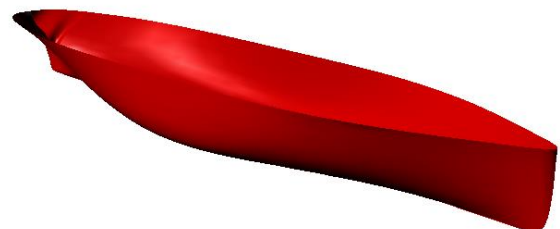
Fonte: Autor (2018).

Figura 37 – Navio USS Bolster (ARS-38) em 1945.



Fonte: Priolo (2018).

Figura 38 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Bolster ARS-38.



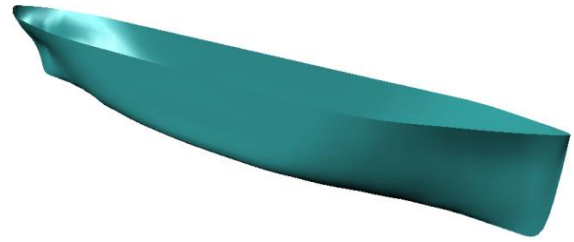
Fonte: Autor (2018).

Figura 39 - Navio SS Private Frederick C. Murphy em 1945.



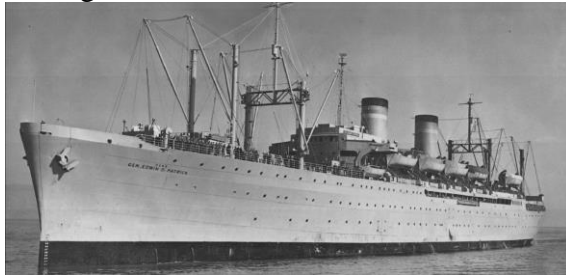
Fonte: Croteau (2009b).

Figura 40 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Frederick C. Murphy.



Fonte: Autor (2018).

Figura 41 – Navio Edwin D. Patrick.



Fonte: Croteau (2009c).

Figura 42 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio Edwin D. Patrick.



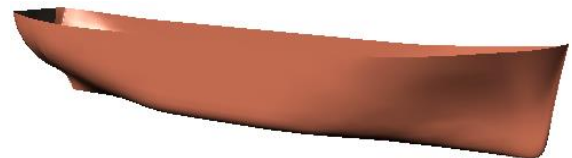
Fonte: Autor (2018).

Figura 43 – Navio USNS Comet.



Fonte: Maritime Administration (2018).

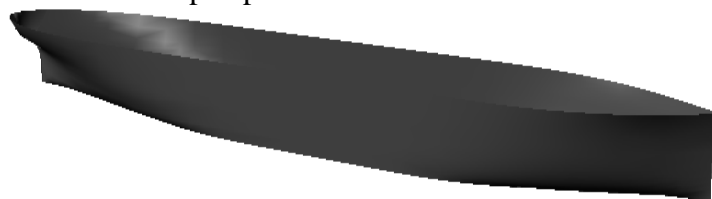
Figura 44 - Vista em perspectiva do casco modelado do navio USNS Comet.



Fonte: Autor (2018).

Quanto ao navio utilizado a partir da Serie 60, neste trabalho optou-se aleatoriamente por analisar a embarcação filha 4277, proveniente do modelo mãe 4213W com $C_B = 0,75$. A modelagem está apresentada na Figura 45.

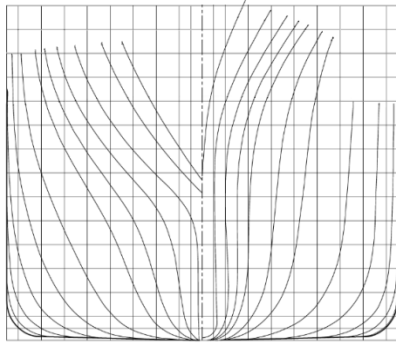
Figura 45 - Vista em perspectiva do casco modelado do modelo 4277.



Fonte: Autor (2018).

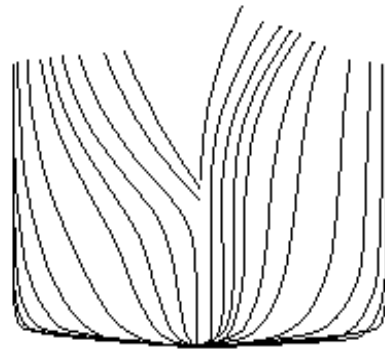
Uma vez que as embarcações tenham sido modeladas, é possível comparar os planos de balizas originais com aqueles gerados a partir dos cascos modelados, conforme as figuras a seguir.

Figura 46 – Plano de balizas original do navio Saugatuck.



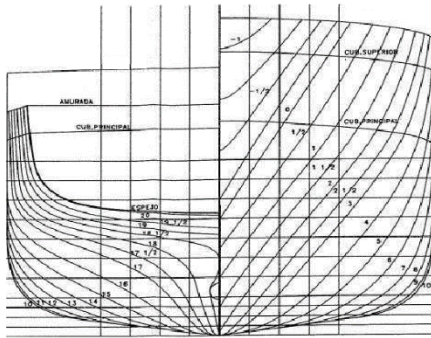
Fonte: Croteau (2009a).

Figura 47 – Plano de balizas do navio Saugatuck modelado.



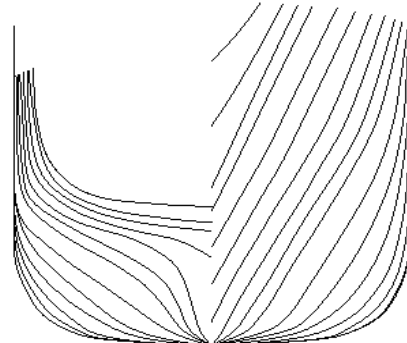
Fonte: Autor (2018).

Figura 48 – Plano de balizas original do navio Hesperides.



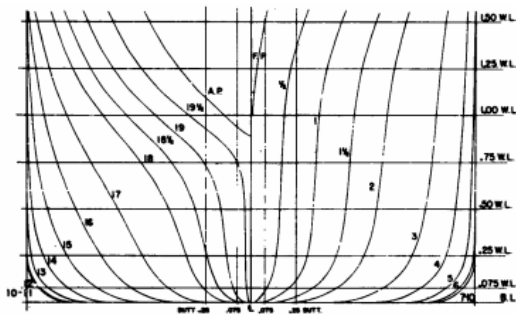
Fonte: Captain (2013a).

Figura 49 – Plano de balizas do navio Hesperides modelado.



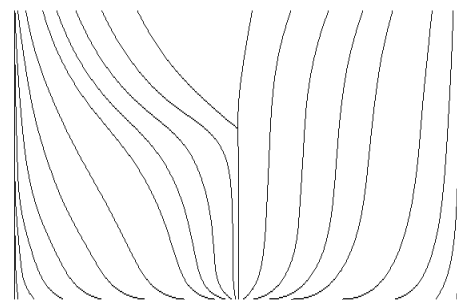
Fonte: Autor (2018).

Figura 50 - Plano de balizas original do navio 4277 da Serie 60.



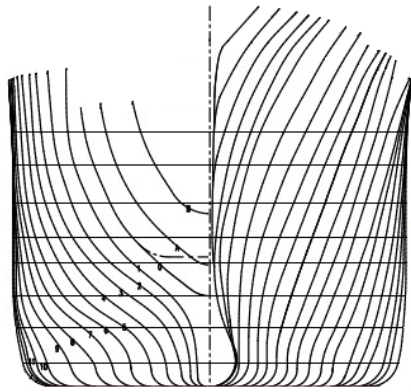
Fonte: Todd (1963).

Figura 51 – Plano de balizas do navio 4277 da Serie 60 modelado.



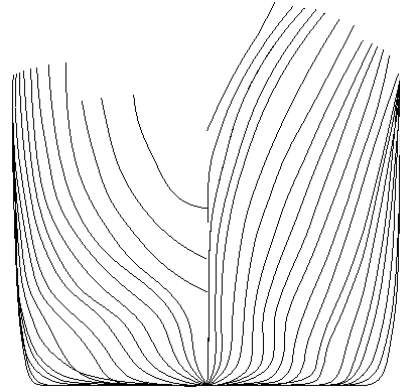
Fonte: Autor (2018).

Figura 52 - Plano de balizas original do navio Andrea Doria.



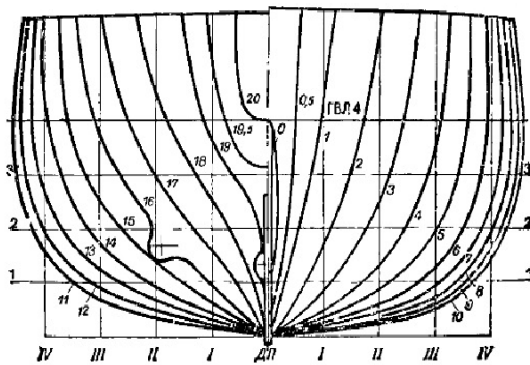
Fonte: Captain (2014).

Figura 53 – Plano de balizas do navio Andrea Doria modelado.



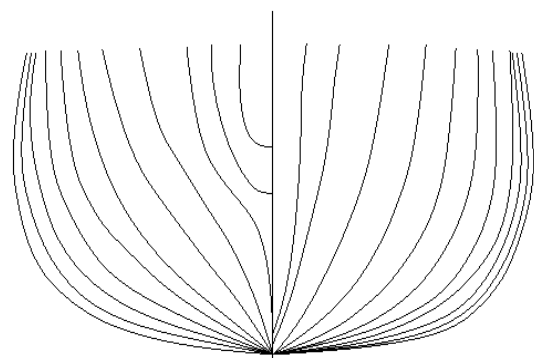
Fonte: Autor (2018).

Figura 54 – Plano de balizas original do navio Aurora.



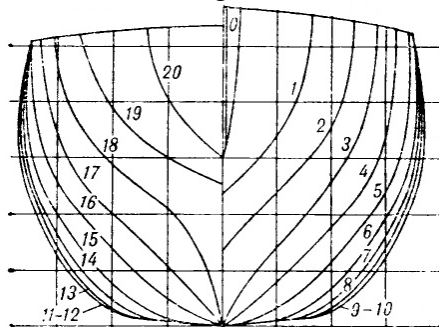
Fonte: Captain (2013b).

Figura 55 – Plano de balizas do navio Aurora modelado.



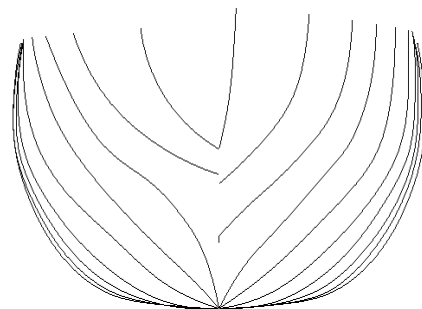
Fonte: Autor (2018).

Figura 56 - Plano de balizas original do navio Angara.



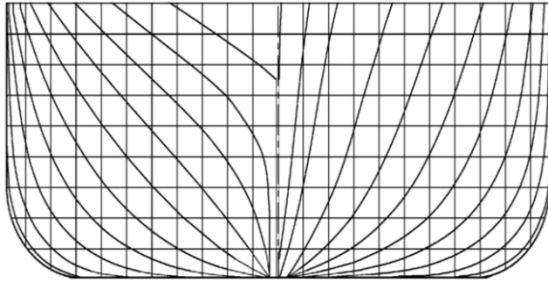
Fonte: Captain (2013c).

Figura 57 - Plano de balizas do navio Angara modelado.



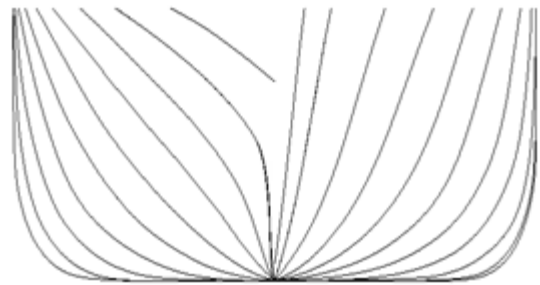
Fonte: Autor (2018).

Figura 58 - Plano de balizas original do navio Bolster.



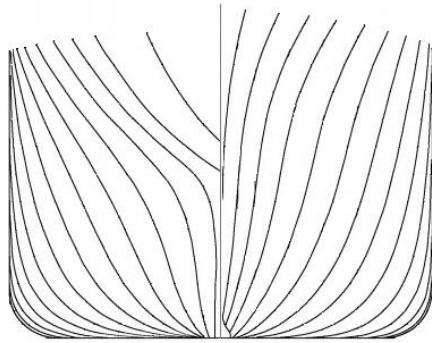
Fonte: Croteau (2010a).

Figura 59 - Plano de balizas do navio Bolster.



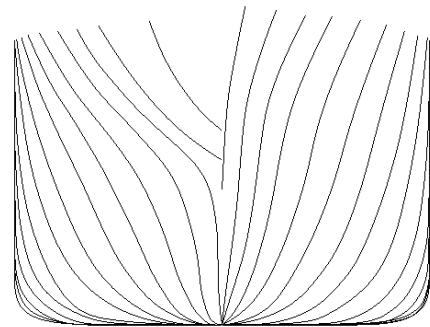
Fonte: Autor (2018).

Figura 60 - Plano de balizas original do navio Frederick.



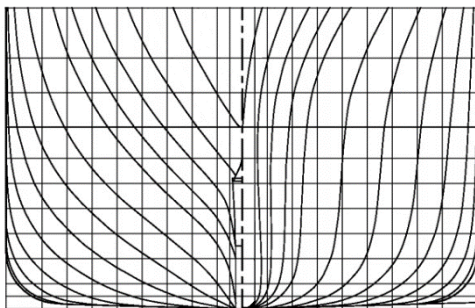
Fonte: Croteau (2009b).

Figura 61 - Plano de balizas do navio Frederick modelado.



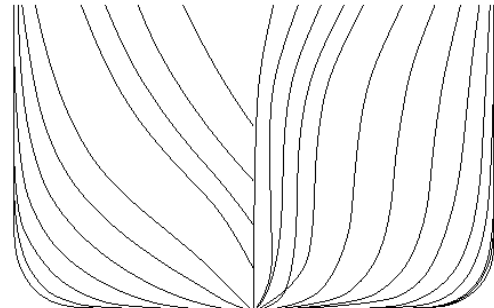
Fonte: Autor (2018).

Figura 62 - Plano de balizas original do navio Edwin.



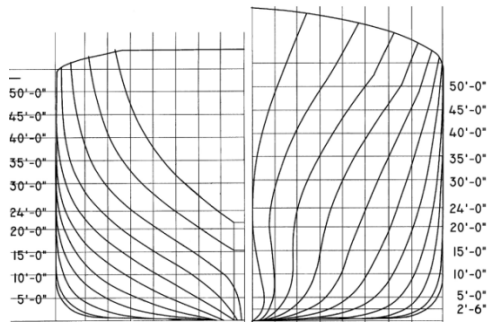
Fonte: Croteau (2009c).

Figura 63 - Plano de balizas do navio Edwin modelado.



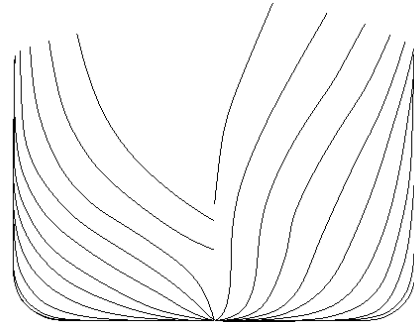
Fonte: Autor (2018).

Figura 64 - Plano de balizas original do navio Comet.



Fonte: Croteau (2010b).

Figura 65 - Plano de balizas do navio Comet modelado.



Fonte: Autor (2018).

Além das semelhanças observadas nas análises dos planos de balizas, as dimensões principais também devem ser criteriosamente verificadas, como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação das dimensões obtidas pela modelagem com os dados originais dos navios.

Navios	Navio original				Navio modelado				Erros Δ (%)
	L_{OA} (m)	B (m)	T (m)	Δ (t)	L_{OA} (m)	B (m)	T (m)	Δ (t)	
Saugatuck	159,26	20,73	9,14	21880	159,26	20,74	9,14	21434	2,04
Hesperides	82,50	14,30	4,42	2750	80,64	14,30	4,42	2621	4,70
Serie 60	-	18,06	5,16	8606	123,96	18,06	5,16	8749	1,63
Andrea Doria	213,36	27,43	9,14	29083	212,31	27,03	9,14	28128	3,28
Aurora	126,70	16,80	6,20	6731	123,74	16,80	6,20	6562	2,51
Angara	61,00	10,70	4,70	1400	61,00	10,50	4,60	1466	5,00
Bolster	65,07	13,11	4,19	2048	65,07	13,12	4,19	2040	0,40
Frederick	138,76	18,90	8,54	15200	138,73	18,91	8,54	14404	5,00
Edwin	185,60	23,00	8,08	20120	182,55	23,02	8,08	20058	0,30
Comet	152,10	25,30	6,71	16489	149,58	25,30	6,71	15615	5,00

Fonte: Autor (2018).

Conforme dados apresentados na Tabela 6, os deslocamentos apresentaram erros relativos de no máximo 5%, o que atende ao critério estabelecido para considerar a embarcação adequada à metodologia proposta.

Além disso, a maioria dos navios apresentaram diferenças entre o valor do comprimento total (L_{OA}) do navio e do modelo. Isso deve-se ao de fato de que alguns dos modelos foram gerados para representar apenas a parte submersa do casco, e portanto não consideram o avanço existente no castelo de proa.

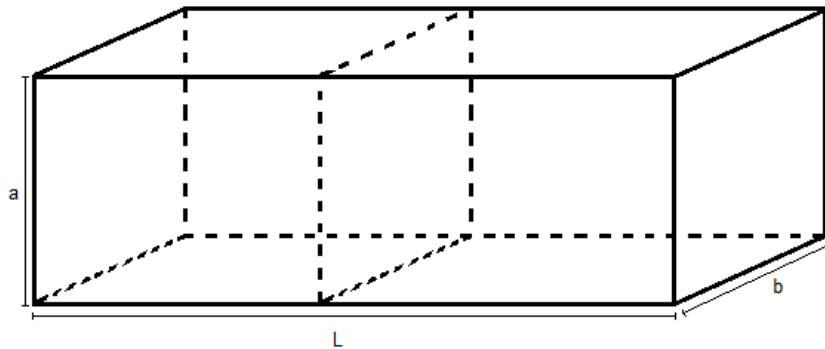
Dentro deste contexto, é importante ressaltar que, após modelagem da embarcação Angara, percebeu-se um erro maior de 5% em relação ao deslocamento do navio. Parâmetro que pôde ser melhorado alterando o calado da embarcação em 2%, ou seja, de 4,7 m para 4,6 m, visto que no próprio artigo *Project Baikal* de Dulov (2013), a informação do calado é dada como: “calado a ré sob carga total”. Assim, com essa alteração, o deslocamento entrou na margem de erro de 5% do original.

Por fim, no APÊNDICE C estão listados os navios estudados de acordo com as suas numerações.

5. VERIFICAÇÃO

Com o objetivo de verificar a metodologia de modelagem e análise numérica desenvolvida neste trabalho, será utilizado como estudo de caso a análise de um navio no formato de caixote (Figura 66), com comprimento (L), altura (a) e largura (b).

Figura 66 – Modelo de um caixote.



Fonte: Autor (2018).

A área pontilhada a “meia nau” corresponde à seção mestra do caixote, enquanto a altura (a) corresponde ao calado. Através dessa geometria, é possível avaliar se a modelagem e análise numérica oferecem resultados realistas.

As equações a seguir estabelecem os valores de referência para os cálculos do coeficiente de bloco, coeficiente da seção mestra, coeficiente da área do plano de flutuação e do coeficiente prismático, respectivamente.

$$C_B = \frac{\nabla}{L_{PP} \cdot B \cdot T} = \frac{L \cdot b \cdot a}{L \cdot b \cdot a} = 1 \quad (63)$$

$$C_M = \frac{A_M}{B \cdot T} = \frac{a \cdot b}{b \cdot a} = 1 \quad (64)$$

$$C_{WP} = \frac{A_W}{L_{WL} \cdot B} = \frac{L \cdot b}{L \cdot b} = 1 \quad (65)$$

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M \cdot L_{WL}} = \frac{L \cdot b \cdot a}{a \cdot b \cdot L} = 1 \quad (66)$$

Além disso, a altura do centro de carena (KB), o raio metacêntrico (BM) e a posição longitudinal do centro de empuxo também podem ser calculados.

O KB pode ser calculado através da Equação 67, pois em casos onde o corpo estudado é um caixote com altura igual ao calado, a altura do centro de carena se localiza na metade do calado.

$$KB = \frac{T}{2} = \frac{a}{2} [m] \quad (67)$$

O raio metacêntrico transversal depende do momento de inércia do plano em relação ao eixo longitudinal e do volume do navio. Para o exemplo do navio caixote, o BM_T pode ser calculado por meio da Equação 68.

$$BM_T = \frac{I_T}{\nabla} = \frac{L \cdot B^3 / 12}{L \cdot B \cdot T} = \frac{B^2}{12 \cdot T} = \frac{b^2}{12 \cdot a} [m] \quad (68)$$

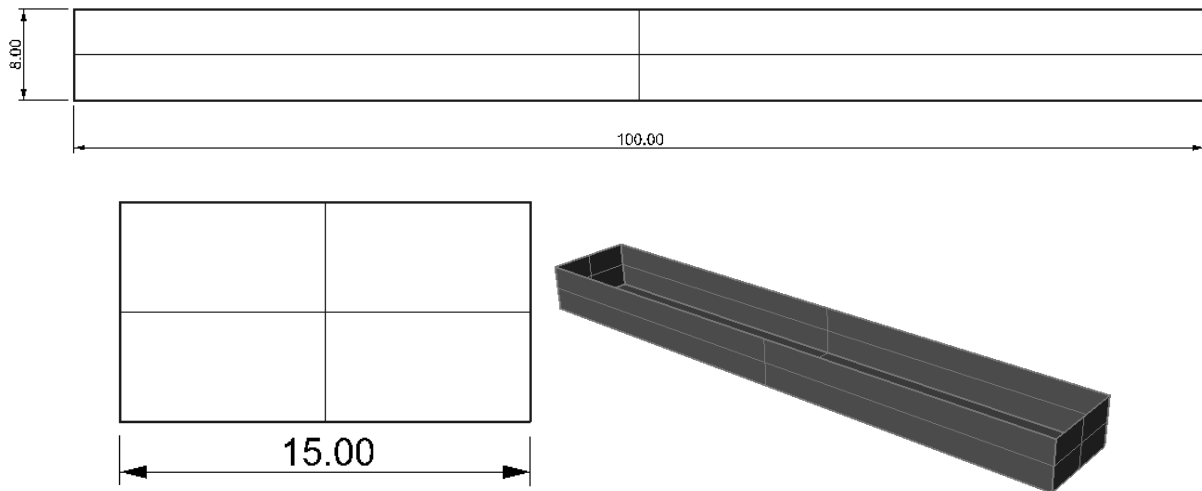
Para o cálculo de LCB, observando que o caixote está inteiramente imerso na água (a = calado), a posição longitudinal do centro de empuxo se localiza exatamente a meia nau, logo:

$$LCB = \frac{L}{2} [m] \quad (69)$$

A área molhada corresponde à área do casco submersa, logo para o modelo do caixote equivale às áreas laterais somadas à área inferior, conforme Equação 70.

$$S = 2 \cdot a \cdot L + 2 \cdot a \cdot b + L \cdot b \quad (70)$$

Esta verificação pode ser reforçada ao modelar um caixote no *Rhinoceros* (Figura 67), de modo que as informações obtidas de maneira analítica sejam exatamente iguais aos valores encontrados no *Maxsurf*.

Figura 67 – Vistas do caixote modelado no *Rhinoceros*.

Fonte: Autor (2018).

Os dados utilizados para a modelagem, os cálculos analíticos dos coeficientes, assim como os valores obtidos pelo *Maxsurf* estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações do caixote obtidas através dos cálculos analíticos e pelo *Maxsurf*.

Parâmetro	Analítico	<i>Maxsurf</i>
L (m)	100	100
B (m)	15	15
T (m)	8	8
C_B	1	1
C_M	1	1
C_{WP}	1	1
C_P	1	1
KB (m)	4	4
BM_T (m)	2,34	2,34
LCB (m) a partir da meia nau	0	0
S (m ²)	3340	3340

Fonte: Autor (2018).

Como era previsto, a partir da Tabela 7, verificou-se que a utilização do método numérico é confiável.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a comparação dos resultados obtidos a partir da análise numérica dos cascos modelados e os resultados estimados com base nos diferentes modelos empíricos descritos na fundamentação teórica deste trabalho. Os valores numéricos calculados para cada parâmetro por meio de cada modelo estão apresentados no APÊNDICE D.

Para avaliar o grau de confiabilidade dos diferentes modelos empíricos analisados, calculou-se o erro relativo (Equação 71) entre o valor estimado pelo modelo empírico e o valor obtido através da análise numérica dos diferentes cascos modelados.

$$E_R (\%) = \left| \frac{(V_N - V_{MP})}{V_N} \right| \quad (71)$$

Onde

V_N = Valor obtido numericamente no casco modelado tridimensionalmente;

V_{MP} = Valor obtido pelo modelo empírico.

É importante ressaltar a necessidade de realizar algumas considerações quando da aplicação dos diferentes modelos utilizados, que surgem em decorrência da falta de informações sobre as equações em si ou sobre os navios analisados.

Considerações específicas serão detalhadas ao longo deste capítulo, no entanto, de maneira geral destaca-se que:

- Durante o levantamento de dados das embarcações, o comprimento do navio “L”, foi sempre assumido como sendo o comprimento total da embarcação, ou seja, o L_{OA} ;
- Os valores encontrados para a boca foram considerados como correspondendo à boca máxima da embarcação;
- Em todos os modelos empíricos utilizou-se o L_{WL} , mesmo que a fórmula utilize L_{PP} , pois segundo Watson e Gilfillan (1976 apud LABES, 2015, p.40) a diferença entre esses comprimentos é pequena, onde $0,96L_{WL} < L_{PP} < 0,97L_{WL}$;
- Os cálculos de F_n estão no SI, e adotou-se a aceleração da gravidade (g) como 9,81 m/s²;
- O programa *Maxsurf* utiliza a densidade da água salgada igual a 1,025 ton/m³ para os cálculos hidrostáticos;

- Além disso, vale ressaltar que para realizar os cálculos a partir do programa *Maxsurf*, optou-se por utilizar a precisão dada como média pelo programa, é o tipo de precisão sugerida para projetos com maiores curvaturas, ou com descontinuidades, onde utiliza-se malha paramétrica de 32 por 32 (MAXSURF MODELER, 2016).

Após as considerações realizadas, foi possível analisar cada modelo empírico descrito na fundamentação teórica, cujos resultados são descritos a seguir.

6.1. COEFICIENTE DE BLOCO (C_B)

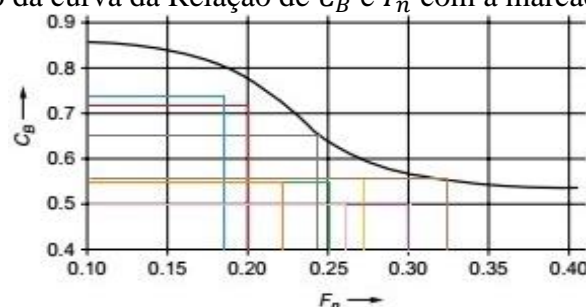
Os modelos para cálculo do coeficiente de bloco estão apresentados na Seção 2.5.1, cada equação analisada possui restrições, e as considerações utilizadas serão descritas a seguir.

O autor da Equação 6, Alexander, sugere que “K” varie de 1,03 para embarcações de baixa velocidade à 1,12 para embarcações de alta velocidade. No entanto, devido à falta de informações referentes ao que se defina *alta e baixa* velocidade, optou-se por utilizar o gráfico da Figura 21 como base para determinação desses valores.

Desta forma, as embarcações que ficaram abaixo da linha do gráfico, foram consideradas embarcações de baixa velocidade, enquanto as que ficaram acima do gráfico alta velocidade, e para embarcações que ficaram sobre a linha, considerou a média dos valores propostos pelo autor para K, ou seja, 1,075.

A maioria das embarcações estudadas encontrou-se abaixo da curva no gráfico, conforme pode ser visto na Figura 68, enquanto os navios Bolster e Frederick mantiveram-se sobre a curva. Assim, os valores utilizados na Equação 6 para cada navio são mostrados na Tabela 8.

Figura 68 – Gráfico da curva da Relação de C_B e F_n com a marcação dos navios estudados.



Fonte: Adaptado de Schneekluth e Bertran (1998).

Tabela 8 – Valores de “K” para cada navio utilizado na Equação 6.

Nº navio	Navio	K
1	Saugatuck	1,03
2	Hesperides	1,03
3	Serie 60	1,03
4	Andrea Doria	1,03
5	Aurora	1,03
6	Angara	1,03
7	Bolster	1,075
8	Frederick	1,075
9	Edwin	1,03
10	Comet	1,03

Fonte: Autor (2018).

Ao analisar a média dos erros obtidos para cada equação, observou-se que as Equações 6 e 11 apresentaram os melhores resultados. No entanto, é importante salientar novamente que cada equação estudada possui restrições, por este motivo, optou-se por analisar os modelos individualmente levando em consideração as suas restrições e os navios para os quais se destinam.

A Equação 6 apresentou erros relativamente baixos, exceto para o navio Angara, para o qual resultou em um erro de aproximadamente 15%, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do C_B .

Navios	Equações											
	6	7	8	9	10	11	12	13a	13b	13c	13d	13e
Saugatuck	3%	31%	65%	6%	2%	1%	9%	1%	1%	2%	3%	1%
Hesperides	9%	56%	1%	13%	4%	0%	14%	14%	13%	15%	10%	10%
Serie 60	4%	29%	5%	7%	3%	3%	8%	0%	0%	1%	4%	1%
Andrea Doria	2%	49%	62%	3%	4%	2%	6%	7%	5%	7%	3%	2%
Aurora	5%	61%	31%	7%	2%	8%	13%	11%	9%	11%	8%	5%
Angara	15%	68%	10%	17%	2%	8%	20%	21%	19%	21%	17%	16%
Bolster	7%	36%	18%	8%	28%	18%	2%	10%	13%	11%	12%	17%
Frederick	2%	35%	52%	0%	8%	6%	1%	0%	1%	0%	4%	3%
Edwin	8%	51%	59%	15%	8%	10%	17%	13%	12%	14%	9%	10%
Comet	1%	41%	13%	3%	10%	7%	5%	4%	3%	4%	0%	0%

Fonte: Autor (2018).

As tabelas com os erros relativos possuem a mesma escala de cores para os mapas de calor, onde definiu-se que erros de até 5% estão realçados em verde, de 6% a 10% em amarelo claro, de 11% a 15% em amarelo, 16 a 20% alaranjado, 21 a 25% “vinho”, e por fim, a partir de 26% vermelho.

A Equação 7 apresentou elevada discrepância quando comparada aos outros modelos. O que pode ser explicado, em consequência de ser uma equação reformulada, onde o autor Barrass generalizou a equação de Alexander para uma gama maior de navios.

Além disso, Barrass (2004) destaca através da Tabela 1, os valores considerados típicos para alguns tipos de navios, entretanto, conforme apresentado na Tabela 10, percebe-se que apenas os navios Saugatuck e Andrea Doria coincidem com os tipos apresentados, e com as velocidades típicas sugeridas.

Tabela 10 – Comparação das velocidades típicas com as velocidades dos navios estudados.

Tipo de navio	Navios Estudados	Velocidade (nós) dos navios estudados	Velocidade (nós) típica sugerida por Barrass (2004).
Petroleiro	Saugatuck	15,5	15,50
	Angara	12	
Carga Geral	Frederick	17	14,75
	Edwin	19	
Passageiros	Cruzeiro	23	22

Fonte: Autor (2018).

A equação 8, proposta por Katsoulis, apresenta uma variável “ f ”, onde os valores foram exibidos na Figura 20. No entanto, os valores dessa variável abrangem uma determinada classe de navios (Quadro 1), não compreendendo todos os tipos de navios aqui analisados. Por esse motivo, ao calcular C_B pelo modelo de Katsoulis, algumas das embarcações estudadas apresentaram erros grosseiros, quando comparados aos valores numéricos, conforme apresentado na Tabela 9.

Quadro 1 - Classes de navios indicadas por Katsoulis para utilização da Equação 8.

Navio	Classe	Classes indicadas por Katsoulis
Saugatuck	Tanque	Ro/Ro
Hesperides	Pesquisa	Reefers
Serie 60	Mercante	Carga Geral
Andrea Doria	Cruzeiro	Tanque
Aurora	Cruzador	Porta container
Angara	Carga/Quebra gelo	OBO
Bolster	Salvamento	Graneleiro
Frederick	Carga/tropas	Gaseiro
Edwin	Carga/tropas	Produtos Químicos
Comet	Ro/Ro	Ferrys

Fonte: Autor (2018).

As equações propostas por Schneekluth e Bertran apresentam restrição de uso em função do número de Froude da embarcação, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Restrições indicadas pelos autores para estimativas dos coeficientes de bloco.

Equações	Restrição	Navios adequados às equações
9	$0,15 < F_n < 0,32$	Todos exceto Bolster
10 e 11	$0,14 \leq F_n \leq 0,32$	Todos exceto Bolster
13a, 13b, 13d e 13e	Navios com 2 hélices	Andrea Doria, Bolster, Edwin e Comet.
13b	Navios com 1 hélice	Saugatuck, Serie 60, Angara e Frederick

Fonte: Autor (2018).

Dos casos analisados, apenas um ficou fora da faixa estipulada, o navio Bolster que apresentou $F_n = 0,33$, podendo justificar o maior erro obtido para as equações 9 e 10.

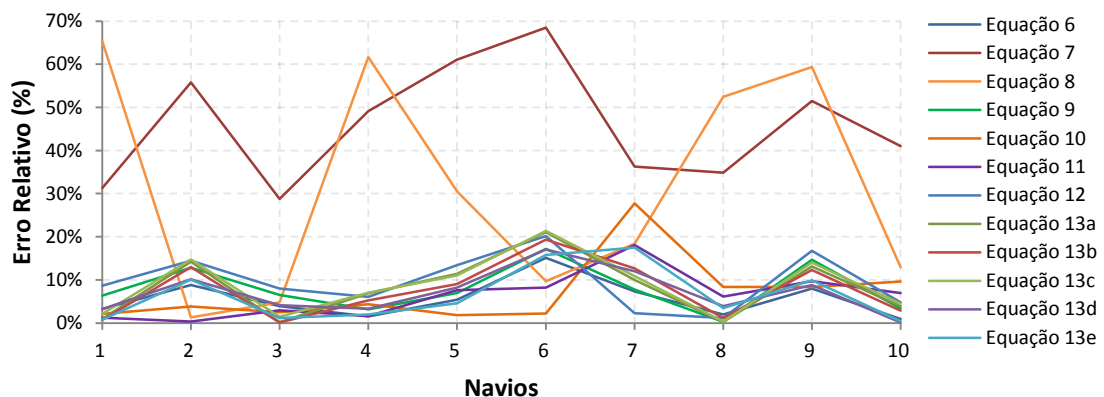
A Equação 13 pode ser utilizada considerando diferentes valores de K_1 , K_2 e K_3 , os quais foram definidos a partir da Tabela 2 como: 13a, 13b, 13c, 13d e 13e, respectivamente.

Além disso, cada equação tem a validade restrita em função do número de propulsores do navio, conforme apresentado no Quadro 2. No entanto, para fins de análise, as equações foram aplicadas em todos os navios estudados, independentemente do número de hélices. De modo geral, as 5 equações apresentaram resultados semelhantes.

A embarcação Hesperides possui dois propulsores, sendo um a vante e um a ré, e Aurora possui 3 propulsores, não se adequando à nenhum dos modelos, ainda assim apresentaram erros médios de 12% e 9% respectivamente para os modelos da equações 13.

O gráfico da Figura 69 apresenta o comportamento dos erros para cada navio estudado.

Figura 69 – Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de C_B .



Fonte: Autor (2018).

Através do gráfico da Figura 69 é possível perceber com clareza a divergência dos resultados obtidos pelas Equações 7 e 8 com raras exceções, além da similaridade na precisão observada para os demais modelos empíricos.

6.2. COEFICIENTE DA SEÇÃO MESTRA (C_M)

De forma análoga ao item anterior, as equações 14 a 18 foram utilizadas para calcular o coeficiente da seção mestra. Os três primeiros modelos, Equações 14, 15 e 16, segundo Papanikolaou (2014), servem para embarcações com L/B típicos, conforme exposto anteriormente na Tabela 3.

No entanto o autor não define o conceito de embarcações rápidas e lentas, conforme referido na Tabela 3, por este motivo, analisaram-se os navios individualmente na tentativa de encaixá-los em algum dos tipos de navios propostos por Papanikolaou (2014), as classificações realizadas podem ser vistas no Quadro 3.

Quadro 3 - Navios classificados de acordo com Papanikolaou para L/B comuns.

Navios	Classificação para as Equações 14, 15 e 16
Saugatuck, Frederick	<i>Slow seagoing cargo ships</i>
Andrea Doria e Edwin	<i>Fast seagoing cargo ships</i>

Fonte: Autor (2018).

As demais embarcações não se enquadraram na classificação exposta por Papanikolaou (2014). Porém com objetivo de viabilizar a análise comparativa proposta, os modelos empíricos foram aplicados igualmente a todos os navios considerados, os erros relativos encontrados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do C_M .

Navios	Equações				
	14	15	16	17	18
Saugatuck	2%	3%	3%	3%	4%
Hesperides	8%	9%	8%	11%	8%
Serie 60	3%	1%	1%	1%	2%
Andrea Doria	1%	0%	2%	1%	1%
Aurora	10%	10%	8%	13%	12%
Angara	17%	20%	17%	23%	21%
Bolster	1%	0%	1%	1%	1%
Frederick	2%	1%	1%	1%	0%
Edwin	1%	0%	1%	1%	1%
Comet	1%	0%	1%	1%	1%

Fonte: Autor (2018).

A equação de Benford (Equação 17) não foi bem representada para o navio Angara, assim como para os navios Aurora e Hesperides. Entretanto, o resultado obtido para o navio Hesperides é aceitável, visto que o modelo da Equação 17 é baseado na Serie 60, elaborada a partir de navios mercantes, e o navio em questão não se trata de um navio mercante.

Além disso, os navios Angara e Aurora possuem os menores valores de C_B dentre os navios estudados ($C_B = 0,50$), logo é importante ressaltar que a Serie 60 tem como parâmetro principal em seu estudo o coeficiente de bloco variando de 0,6 a 0,8.

A equação 18 proposta por Schneekluth e Bertran tem relação com o raio de bojo (r_B) e os autores sugerem a Equação 19 para estimar esse valor, onde o valor de C_k pode variar de 0,5 a 0,6. Não há na referência esclarecimentos a respeito desse coeficiente, logo optou-se por utilizar a Tabela 12, onde Papanikolaou (2014) expõe os valores típicos do raio de bojo para cada tipo de embarcação. Assim para alcançar este valor típico, variou-se C_k de 0,5 a 0,6, e para os navios que não se adequaram a essas classificações de r_B , utilizou-se $C_k = 0,55$.

Tabela 12 – Valores típicos do raio de bojo para navios.

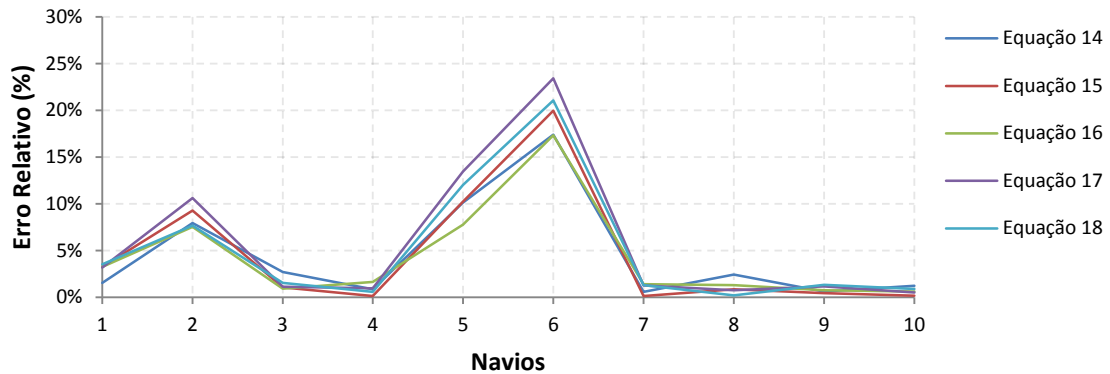
Tipo de Navio	r_B[m]
<i>Cargo</i>	2.0-2.7
<i>Tankers and bulk-carriers</i>	2.0-3.0
<i>Reefers</i>	2.0-2.7
<i>Pessenger ships</i>	3.5-5.5
<i>Ferries</i>	3.5

Fonte: Adaptado de Papanikolaou (2014).

Novamente os navios Angara, Aurora e Hesperides obtiveram os piores resultados respectivamente. Pois, os valores de C_k não foram apropriados, resultando em um raio de bojo menor do que realmente existente na embarcação, visto que, ao aumentar o valor de r_B , a resposta se aproxima do valor original de C_M .

O gráfico da Figura 70 apresenta os erros relativos para cada equação de acordo com cada navio analisado.

Figura 70 – Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de C_M .



Fonte: Autor (2018).

Através da Figura 70, é possível perceber que houve homogeneidade dos resultados para todos os navios analisados. Ou seja, todos os modelos empíricos destinados a estimar o valor de C_M a princípio, apresentam a mesma precisão.

Os elevados erros obtidos pelos modelos para os três navios (Hesperides, Aurora e Angara) faz-se pensar que devido ao baixo valor de C_M dessas embarcações, as equações não são apropriadas a esse tipo de geometria.

6.3. COEFICIENTE DA ÁREA DE FLUTUAÇÃO (C_{WP})

Para calcular o coeficiente da área de flutuação utilizou-se as equações 20 a 30. Os três primeiros modelos são baseados na seção transversal da embarcação, para isso, as seções mestras de cada navio devem ser analisadas. O Quadro 4 apresenta as seções transversais indicadas para as Equações 20 a 24.

Quadro 4 - Seções transversais indicadas para as Equações 20 a 24.

Equação 20	Seção transversal em “U”
Equação 21	Seção transversal média
Equações 22, 23 e 24	Seção transversal em “V”

Fonte: Autor (2018).

De maneira geral, as equações apresentaram resultados semelhantes, como é possível verificar na Tabela 13.

Tabela 13 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do C_{WP} .

Navios	Equações										
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Saugatuck	1%	0%	1%	2%	1%	2%	1%	3%	2%	2%	6%
Hesperides	6%	9%	7%	4%	5%	7%	6%	0%	5%	4%	0%
Serie 60	0%	2%	3%	1%	2%	4%	1%	2%	1%	2%	6%
Andrea Doria	1%	2%	5%	1%	3%	4%	1%	8%	1%	2%	6%
Aurora	1%	3%	1%	2%	1%	3%	1%	9%	0%	3%	7%
Angara	3%	11%	9%	1%	6%	11%	3%	3%	2%	1%	3%
Bolster	5%	2%	1%	3%	1%	0%	5%	4%	5%	2%	2%
Frederick	2%	1%	3%	0%	1%	3%	2%	3%	1%	0%	4%
Edwin	1%	2%	4%	1%	3%	4%	1%	7%	1%	2%	6%
Comet	3%	1%	1%	1%	0%	2%	3%	3%	3%	1%	3%

Fonte: Autor (2018).

Há casos que destoaram dos demais, como por exemplo, o navio Hesperides, que apresentou o maior erro relativo para a Equação 20.

Isso se deve ao fato de que o navio Hesperides não é um navio mercante, e como para navios mercantes predominam-se seção transversal em “U” (LABES, 2015), logo entende-se que a Equação 20 foi desenvolvida para esse tipo de embarcação, apesar de desse fato não ser mencionado nas referências.

Nas Equações 22, 23 e 24, apesar dos navios não apresentarem seção transversal em “V”, seção que costuma ser típica em embarcações planantes, os erros encontrados foram relativamente baixos, principalmente para a Equação 23, com erros menores que 4%.

A Equação 25 é válida para navios cargueiros, petroleiros e graneleiros. Novamente, os maiores erros encontrados foram para os navios Angara e Hesperides.

É possível perceber que para essas equações propostas para cálculo do coeficiente da área de flutuação os navios Angara e Hesperides apresentaram os piores resultados. O que pode ser justificado visto que o navio Hesperides não é navio mercante, gerando assim resultados ineficazes, mesmo os modelos propostos não justificam esse tipo de classificação, exceto o modelo da Equação 26, criado a partir da Serie 60.

Da mesma maneira, Angara é um navio de carga, no entanto pode ser considerado um navio “pequeno”, quando comparado aos demais, além de ser um navio com um raio de bojo elevado.

As Equações 27, 28, 29 e 30 foram criadas com base na forma da popa da embarcação e no número de propulsores, conforme pode ser visto no Quadro 5. Para fins de análise, aplicou-se os quatro modelos em todas as embarcações independentes do número de hélices e do tipo de popa.

Quadro 5 – Restrições indicadas para as Equações 27 a 30 para estimativa de C_{WP} .

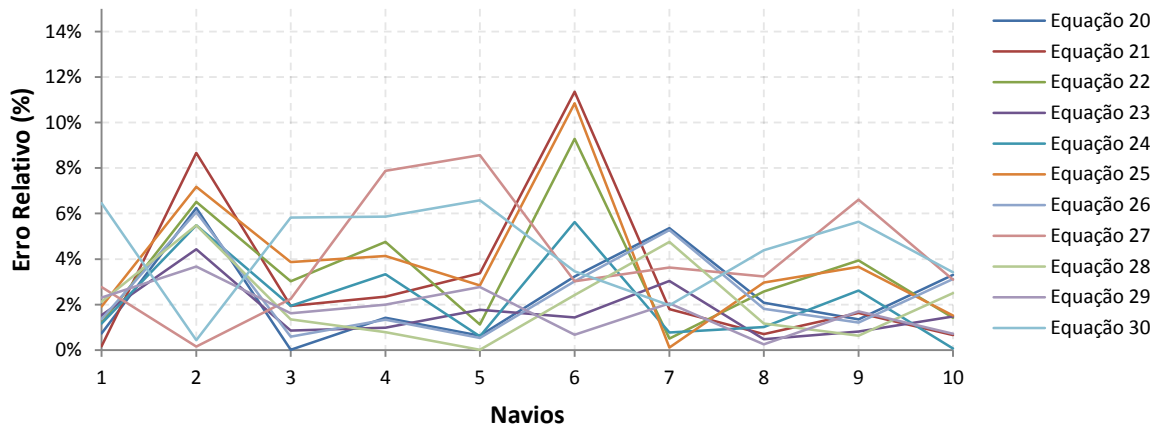
Equações	Restrição	Navios adequados às equações	Erro médio
27	Navios de guerra com popa transom	Nenhum	4%
28	Navios de popa cruiser com 1 propulsor	Saugatuck, Serie 60, Angara e Frederick	2%
29	Navios de popa cruiser com dois propulsores	Andrea Doria, Bolster, Edwin.	2%
30	Popa transom e dois propulsores	Nenhum	4%

Fonte: Autor (2018).

Através do Quadro 5 pode-se perceber que apesar de nenhum dos navios estudados pertencerem às recomendações para as Equações 27 e 30, ainda assim o erro relativo médio obtido para todas as embarcações foi de 4%.

Já as Equações 28 e 29, não são adequadas a todos os navios, mas sim, a uma classe específica, entretanto os erros médios encontrados foram de 2%.

Os erros relativos cada navio estão expostos na Figura 71.

Figura 71 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de C_{WP} .

Fonte: Autor (2018).

Através da Tabela 13 e do gráfico da Figura 71 pode-se perceber que os erros encontrados não são superiores a 11%.

6.4. ALTURA DO CENTRO DE CARENA (KB)

Para estimar a altura do centro de carena das embarcações, 8 modelos empíricos foram analisados, os quais foram apresentados na Seção 2.5.4.

Conforme apresentado no Quadro 6, as Equações 31 e 32, não englobam todos os navios analisados, entretanto, obtiveram-se erros médios para todos os navios de 2% e 1%, respectivamente.

Quadro 6 – Restrições de C_M para estimativa de KB para as Equações 31 e 32.

Equações	Restrição	Navios adequados às equações	Erro médio
31	$C_M \leq 0,9$,	Hesperides, Aurora e Angara	2%
32	$C_M > 0,9$	Saugatuck, Serie 60, Andrea Doria, Bolster, Frederick, Edwin e Comet	1%

Fonte: Autor (2018).

Os outros modelos empíricos para estimar KB não possuem restrições.

De forma geral todas as equações apresentaram resultados excelentes (Tabela 14), apenas a Equação 37, proposta por Barrass obteve valores discordantes das demais.

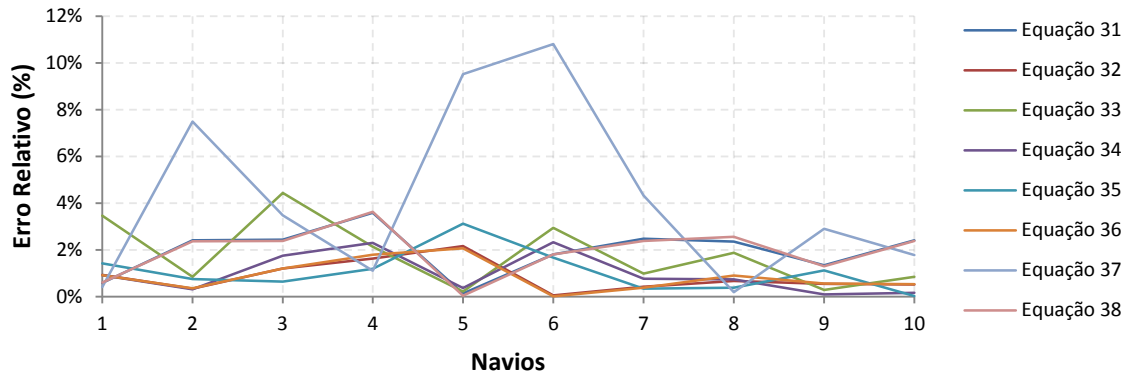
Tabela 14 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do KB.

Navios	Equações							
	31	32	33	34	35	36	37	38
Saugatuck	1%	1%	3%	1%	1%	1%	0%	1%
Hesperides	2%	0%	1%	0%	1%	0%	7%	2%
Serie 60	2%	1%	4%	2%	1%	1%	3%	2%
Andrea Doria	4%	2%	2%	2%	1%	2%	1%	4%
Aurora	0%	2%	0%	0%	3%	2%	10%	0%
Angara	2%	0%	3%	2%	2%	0%	11%	2%
Bolster	2%	0%	1%	1%	0%	0%	4%	2%
Frederick	2%	1%	2%	1%	0%	1%	0%	3%
Edwin	1%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	1%
Comet	2%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	2%

Fonte: Autor (2018).

Através do gráfico da Figura 72 pode-se perceber o contraste entre a Equação 37 das demais.

Figura 72 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de KB.



Fonte: Autor (2018).

Logo, de modo geral os modelos propostos para cálculo do KB apresentaram erros relativos inferiores a 4%, com exceção para os navios Hesperides, Aurora e Angara para o modelo empírico descrito pela Equação 37.

6.5. RAI0 METACENTRICO TRANSVERSAL (BM_T)

O raio metacêntrico é calculado através do momento de inércia da embarcação, que por sua vez pode ser calculado em função de um coeficiente C_I (Equação 40). Conforme exposto na Seção 2.5.5, diversos autores sugeriram modelos para estimar tal coeficiente, os quais são descritos pelas equações 41 a 47.

Conforme exposto na Tabela 15, a Equação 41 apresentou erros de até 4%, com exceção para o navio Aurora que destoou dos demais. Por sua vez, na Equação 42, o navio Aurora foi o que apresentou melhor resultado. No entanto, de acordo com Parsons (2003), a Equação 42 é indicada para embarcações com popa transom, não sendo o caso de Aurora.

Tabela 15 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do BM_T .

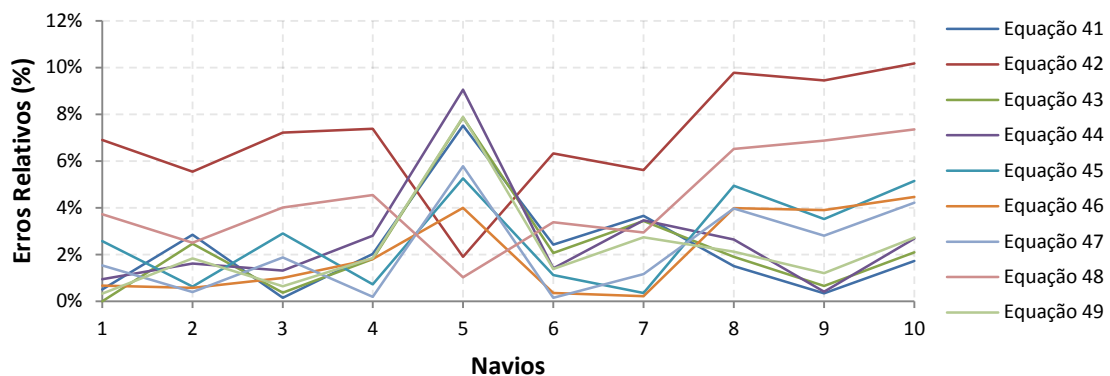
Navios	Equações								
	41	42	43	44	45	46	47	48	49
Saugatuck	1%	7%	0%	1%	3%	1%	2%	4%	0%
Hesperides	3%	6%	2%	2%	1%	1%	0%	2%	2%
Serie 60	0%	7%	0%	1%	3%	1%	2%	4%	1%
Andrea Doria	2%	7%	2%	3%	1%	2%	0%	5%	2%
Aurora	8%	2%	8%	9%	5%	4%	6%	1%	8%
Angara	2%	6%	2%	1%	1%	0%	0%	3%	1%
Bolster	4%	6%	3%	3%	0%	0%	1%	3%	3%
Frederick	2%	10%	2%	3%	5%	4%	4%	7%	2%
Edwin	0%	9%	1%	0%	4%	4%	3%	7%	1%
Comet	2%	10%	2%	3%	5%	4%	4%	7%	3%

Fonte: Autor (2018).

A Equação 48 (BARRASS, 2004) apresentou resultados semelhantes aos demais, com erros relativos máximos de 7% para os navios Frederick, Edwin e Comet. Importante ressaltar que o autor sugere que esse modelo seja utilizado para navios com $0,692 \leq C_{WP} \leq 0,893$, porém, todos os navios analisados possuem C_{WP} na faixa estipulada, incluindo os três navios mencionados, não justificando a variação encontrada.

A partir do gráfico da Figura 73, é possível perceber o comportamento dos resultados para cada equação.

Figura 73 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de BM_T .



Fonte: Autor (2018).

Novamente, é possível verificar a partir do gráfico da Figura 73 que as equações resultaram em erros muito semelhantes, conforme foi possível ver também na Tabela 15.

6.6. POSIÇÃO LONGITUDINAL DO CENTRO DE CARENA (LCB)

Os modelos utilizados para estimar o LCB são descritos pelas Equações 50 a 52 apresentadas anteriormente. Para realizar a análise de tais modelos, buscou-se cuidadosamente manter todas as referências e resultados usando o mesmo padrão, pois o LCB pode ser calculado a partir da meia nau, da perpendicular de ré ou até mesmo da perpendicular de vante do navio. Além disso, os valores podem ser expressos como uma porcentagem do comprimento da embarcação ou de forma absoluta (em metros).

A partir da Tabela 16, é possível perceber que os modelos utilizados para estimar a posição longitudinal do centro de empuxo não representaram os valores obtidos numericamente. Todos os modelos resultaram em erros exorbitantes, com raras exceções.

Tabela 16 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo do LCB.

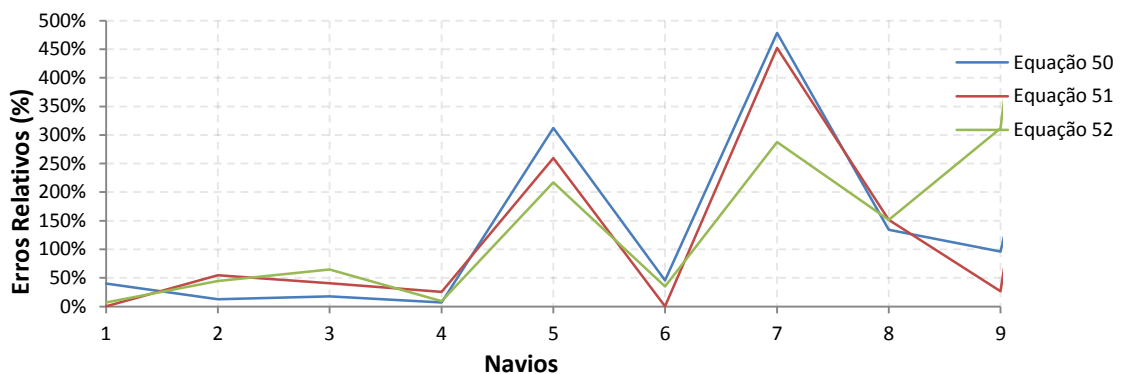
Navios	Equações				
	50	50 (+0,8)	50 (-0,8)	51	52
Saugatuck	40%	54%	119%	0%	7%
Hesperides	25%	250%	13%	55%	44%
Serie 60	53%	17%	88%	41%	65%
Andrea Doria	7%	303%	42%	26%	9%
Aurora	312%	340%	358%	259%	217%
Angara	46%	257%	95%	0%	35%
Bolster	550%	479%	621%	452%	287%
Frederick	199%	134%	264%	152%	152%
Edwin	106%	96%	309%	27%	312%
Comet	2364%	935%	3792%	1289%	1870%

Fonte: Autor (2018).

Outro ponto a se evidenciar é que a Equação 52 é indicada para navios tanques e graneleiros, onde obteve-se erro de 7% e 9% para os navios Saugatuck e Andrea Doria respectivamente. Importante ressaltar, que o navio Saugatuck é um navio do tipo tanque podendo justificar o resultado, no entanto, o navio Andrea Doria é um navio cruzeiro.

Como é possível perceber no gráfico da Figura 74, os erros encontrados para o navio Comet (Número 10) não foram plotados, com o intuito de não afetar a visualização através da escala irregular.

Figura 74 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de LCB.



Fonte: Autor (2018).

Na equação 50 o autor sugere um intervalo de erro de 0,8 para mais ou para menos, por esse motivo, no gráfico estão plotados os menores erros obtidos na Equação 50 dentro dessa faixa de erro. Porém, ainda assim, os erros relativos obtidos foram bastante elevados.

6.7. ÁREA MOLHADA (S)

Para estimativa da área molhada das embarcações, as equações 53 a 56 foram utilizadas. Conforme Tabela 17, os modelos empíricos resultaram em erros de até 7%.

A Equação 54 possui uma constante “C”, a qual o autor sugere utilizar o valor de 2,55 para navios mercantes. No entanto, vale ressaltar que o navio Hesperides não é considerado um navio mercante e ainda assim apresentou erro relativo de apenas 1%.

Sugerida por Holtrop e Mennen, a Equação 55 possui, em sua formulação, a área seccional do bulbo, no entanto, essa parcela da equação foi considerada igual a zero para todos os navios, pois conforme dito anteriormente, o bulbo não será considerado nas modelagens e conseqüentemente nas análises.

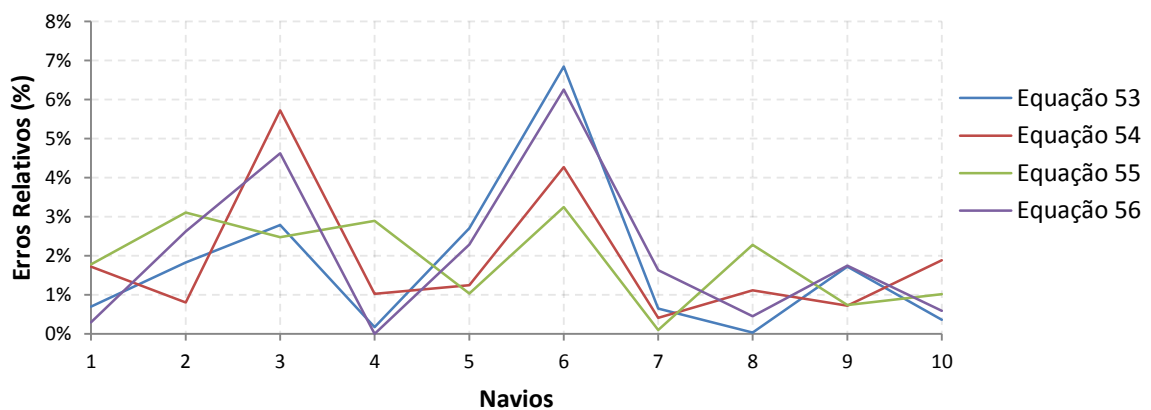
Tabela 17 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos para cálculo de S.

Navios	Equações			
	53	54	55	56
Saugatuck	1%	2%	2%	0%
Hesperides	2%	1%	3%	3%
Serie 60	3%	6%	2%	5%
Andrea Doria	0%	1%	3%	0%
Aurora	3%	1%	1%	2%
Angara	7%	4%	3%	6%
Bolster	1%	0%	0%	2%
Frederick	0%	1%	2%	0%
Edwin	2%	1%	1%	2%
Comet	0%	2%	1%	1%

Fonte: Autor (2018).

A partir do gráfico da Figura 75 é possível observar o comportamento dos erros relativos das equações para cada navio estudado.

Figura 75 - Gráfico dos navios x erros relativos para cada modelo de S.



Fonte: Autor (2018).

Logo, de modo geral os modelos propostos para cálculo da área molhada apresentaram desempenho similar para todos os navios analisados, com erros relativos de no máximo 7%.

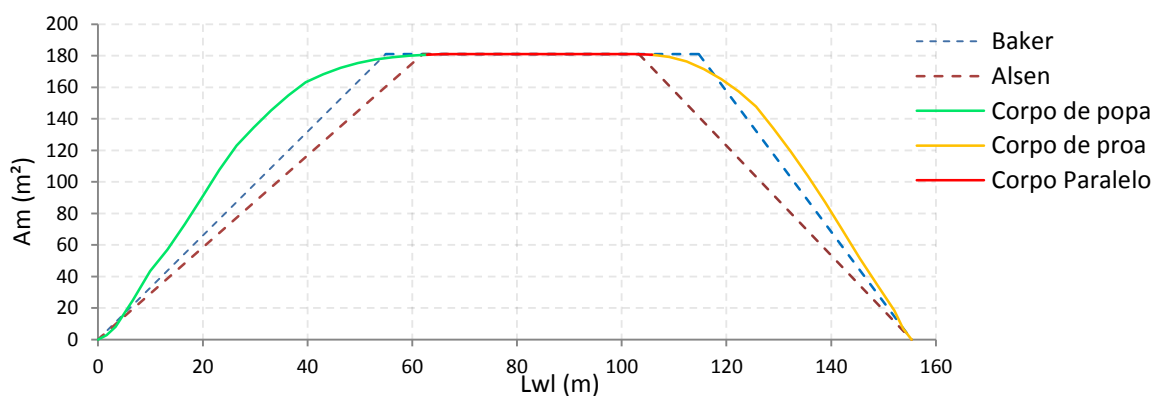
6.8. CURVAS DE ÁREA SECCIONAIS (SAC)

A partir das Equações 59 a 62 apresentadas anteriormente, foram construídas as SAC para cada navio estudado. No entanto, em alguns casos, o valor obtido na soma dos comprimentos de proa e popa foi maior que o comprimento do navio, se tornando então, inadequada à utilização das equações propostas para esses casos.

O navio Bolster apresentou tal comportamento para ambos os modelos analisados. Enquanto que os navios Hesperides, Andrea Doria, Aurora e Angara não se adequaram ao modelo proposto por Alsen. Logo não foi possível plotar a SAC para esses casos.

As curvas obtidas para o navio Saugatuck estão apresentadas na Figura 76, e para os demais navios no APÊNDICE E. É importante destacar que tipicamente a SAC é gerada com o L_{PP} no eixo das abscissas, mas neste caso, foi utilizado o L_{WL} , conforme já descrito nas considerações gerais.

Figura 76 – Gráfico das SAC's obtidas para o navio Saugatuck.



Fonte: Autor (2018).

Conforme o gráfico da figura acima, as linhas nas cores verde, vermelho e laranja contínuas, correspondem à curva gerada pelo *Maxsurf* obtida através da modelagem, em azul e vermelho pontilhadas, as curvas obtidas pelo método do trapézio pelos autores Baker e Alsen, respectivamente.

A partir dos gráficos gerados, e através das integrais das equações 57 e 58 calculou-se os volumes e as posições longitudinais do centro de carena de cada navio. Concomitante a isso, calculou-se também as áreas abaixo das SAC geradas pelo *Maxsurf* pelo método de integração numérica, através das Fórmulas de Simpson, obtendo então o volume e posteriormente o LCB.

A Tabela 18 apresenta os erros encontrados em relação aos valores obtidos pelo *Maxsurf* para cada curva SAC construída, tanto para o cálculo analítico da curva encontrada pelo *Maxsurf* como a partir dos modelos de Baker e Alsen.

Tabela 18 - Erros relativos obtidos através dos modelos empíricos da SAC para cálculo de LCB e volume deslocado.

Navios	LCB			Volume		
	Baker	Alsen	Maxsurf (Simpson)	Baker	Alsen	Maxsurf (Simpson)
Saugatuck	2%	1%	0%	7%	15%	0%
Hesperides	5%	-	1%	7%	-	4%
Serie 60	4%	2%	5%	1%	7%	0%
Andrea Doria	1%	-	0%	4%	-	1%
Aurora	12%	-	0%	4%	-	0%
Angara	3%	-	0%	13%	-	0%
Bolster	-	-	6%	-	-	0%
Frederick	1%	2%	0%	6%	20%	0%
Edwin	1%	0%	0%	10%	6%	0%
Comet	1%	1%	1%	2%	18%	0%

Fonte: Autor (2018).

Conforme pode ser visto na Tabela 18, os cálculos dos volumes deslocados pelas fórmulas de Simpson para as curvas geradas pelo *Maxsurf* apresentaram erros semelhantes, com valor médio de 1%. Desta forma, é possível verificar a precisão do método numérico na geração dessas curvas.

Além disso, os erros para o cálculo de LCB a partir dos modelos empíricos sugeridos por Alsen e Baker foram relativamente baixos. No entanto, para o volume deslocado, os modelos apresentaram erros maiores. Isso pode ser explicado, pois para calcular o volume, utiliza-se a área abaixo da curva, e a geometria do trapézio não compreende toda a curvatura da SAC, induzindo a erros tanto no cálculo do deslocamento quanto no LCB.

Ainda neste contexto, a partir dos resultados obtidos para os volumes, calculou-se as porcentagens correspondentes aos corpos de ré (C_{RE}), paralelo (CP) e vante (C_{VANTE}) das embarcações em função do L_{WL} e do volume deslocado (Tabela 19).

Tabela 19 – Porcentagens obtidas para corpos de popa, paralelo e proa dos navios.

Navios	Tipo de Navio	% do comprimento			% do volume		
		$C_{RÉ}$	CP	C_{VANTE}	$C_{RÉ}$	CP	C_{VANTE}
Saugatuck	Tanque	40	28	32	36	37	27
Hesperides	Pesquisa	47	4	49	46	7	47
Serie 60	Mercante	40	28	32	33	38	29
Andrea Doria	Cruzeiro	43	2	55	41	4	55
Aurora	Cruzador	49	2	49	46	3	51
Angara	Carga/Quebra gelo	40	15	45	39	21	40
Bolster	Salvamento	49	4	47	45	8	47
Frederick	Carga/Tropas	49	11	41	45	16	39
Edwin	Carga/Tropas	47	4	49	46	6	47
Comet	Ro/Ro	40	17	43	35	27	38

Fonte: Autor (2018).

Com os valores apresentados na Tabela 19, constataram-se os possíveis comprimentos típicos para $C_{RÉ}$, CP e C_{VANTE} de cada tipo de navio, assim como as porcentagens dos volumes correspondentes.

7. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma verificação quantitativa da precisão dos diferentes modelos empíricos tradicionalmente utilizados para a estimativa dos coeficientes de forma de embarcações deslocantes durante as fases iniciais do projeto de um navio.

A metodologia desenvolvida apresentou uma fundamentação acerca dos principais autores e modelos empíricos disponíveis na literatura, bem como detalhou o levantamento de dados e a modelagem tridimensional referente ao casco de 10 embarcações selecionadas para este estudo.

Por fim, os resultados estimados utilizando-se os diferentes modelos empíricos analisados foram confrontados com aqueles obtidos na análise numérica dos cascos modelados tridimensionalmente.

De modo geral, os modelos que resultaram nos maiores erros relativos para estimativa de C_B foram as Equações 7 e 8, propostas por Barrass e Katsoulis, respectivamente. No caso do modelo descrito pela equação 8, existe a dependência do cálculo de um coeficiente para o qual não se possui informações concretas durante as fases iniciais do projeto, o que pode vir a causar erros grosseiros em sua utilização. Os demais modelos analisados apresentaram resultados similares, considerando-se o conjunto de casos analisado.

Observou-se que os modelos para estimativa de C_M levam em consideração coeficientes relacionados apenas à geometria da embarcação, como o coeficiente de bloco, a boca, calado e o raio de bojo, resultando assim em erros relativamente baixos, pois as formulações dependem apenas do próprio casco e não de fatores externos. A dificuldade maior consistiu na estimativa do raio de bojo, o qual, eventualmente, está relacionado com o coeficiente de bloco do navio.

De maneira análoga ao coeficiente anterior, as equações para estimar C_{WP} , KB , BM_T e a área molhada também dependem apenas de informações obtidas através da geometria do navio, resultando assim, em erros inferiores a 11%, o que pode ser considerado um erro aceitável para estimativas realizadas ainda nas fases preliminares de um projeto.

As estimativas para determinar a posição longitudinal do centro de carena não corresponderam aos valores encontrados numericamente, apresentando erros grosseiros. Analisando o resultado, percebeu-se que essas equações dependem do número de Froude. Assim, a correta estimativa da velocidade de serviço passa a ter grande influência na estimativa do LCB, distorcendo consideravelmente os modelos empíricos analisados. Em

suma, os erros na estimativa do LCB, provavelmente, não decorrem dos modelos em si, mas sim, de distorções sofridas na definição da velocidade de serviço do projeto.

Em relação aos modelos empíricos utilizados na geração preliminar das curvas de áreas seccionais, os resultados obtidos ao calcular LCB resultaram em erros de no máximo 11% e para o volume de até 20%. Convém lembrar que em alguns casos não foi possível construir a curva através dos modelos empíricos, logo, gerando uma incerteza na eficácia de tais modelos.

Durante a análise dos resultados, notou-se a semelhança das equações 7 e 8 para estimativa de coeficiente de bloco, com as equações 50 à 52 para determinação do LCB e com as equações 61 e 62 para obtenção do comprimento do corpo de proa na construção da SAC. Pois todas levam em consideração a velocidade de serviço, seja de forma direta, ou indireta através do número de Froude. E visto que, as informações obtidas para a velocidade de cada navio são incertas, acabam distorcendo consideravelmente os resultados obtidos para esses modelos.

A incerteza na estimativa da velocidade de serviço decorre do fato de que, apesar da busca de informações ter sido criteriosamente realizada, é importante lembrar que as velocidades obtidas podem se referir a velocidades de momento (tipicamente em sites de “rastreo” de embarcações), velocidades de projeto, velocidade de cruzeiro, entre outras possibilidades; além de terem a precisão em geral limitada a 0,5 nós.

Outra observação relevante são os altos valores dos erros encontrados no estudo dos navios Hesperides, Aurora e Angara. Destaca-se que esses navios possuem semelhança em relação a forma da seção mestra, com $C_M < 0,9$, como também possuem os menores coeficientes de bloco entre os navios estudados. Por isso, pode-se concluir que a maioria dos modelos empíricos analisados não são adequados a esse tipo de embarcação mais esbeltas. Essa é inclusive uma restrição explicitada em alguns métodos, como por exemplo, aqueles descritos pelas equações 31 e 32.

Além disso, vale lembrar que os navios Aurora e Angara são embarcações construídas em 1900 e 1898, respectivamente, ou seja, embarcações muito antigas, cujos modelos empíricos eventualmente não representaram adequadamente as tendências de projeto daquela época.

Outros aspectos a serem levados em conta, referem-se ao fato de que os erros relativos obtidos nos resultados podem ser originários de diversos fatores, entre eles, as considerações realizadas durante o estudo, como a divergência de informações encontradas.

Além disso, os modelos foram comparados aos cálculos numéricos realizados com base nas modelagens, e como citado anteriormente, considerou-se aceitável modelagens com erros de até 5% no deslocamento, podendo assim, ter causada um efeito em cadeia nos resultados.

Por fim, como conclusão geral, nota-se que o uso de modelos empíricos disponíveis na literatura, ainda hoje, é uma estratégia poderosa a ser utilizada nas fases iniciais do projeto de uma embarcação de grande porte. E, com raras exceções, desde que as restrições e recomendações dos modelos sejam atendidas, tais modelos oferecem resultados bastante precisos, reduzindo o retrabalho nos ciclos posteriores do projeto.

Os resultados, em geral, são ainda mais consistentes quando são analisadas embarcações bojudas navegando com baixos números de Froude. Aliás, a estimativa da velocidade de serviço, se mostrou um dos maiores gargalos na aplicação de muitos dos modelos analisados.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar o trabalho desenvolvido, aumentando o número de cascos analisados, utilizar embarcações mais modernas, bem como aprofundando as causas de eventuais resultados observados.

REFERÊNCIAS

A VIEW ON CITIES. **Aurora**. Disponível em:

<<http://www.aviewoncities.com/stpetersburg/aurora.htm>>. Acesso em: 02 maio 2018.

BARRASS, B. C. **Ship design and performance for masters and mates**. Burlington: Elsevier Butterworth-heinemann, 2004.

CAPTAIN. Andrea Doria. **Free Ship Plans**. 2014. Disponível em:

<<http://freeshipplans.com/free-model-ship-plans/passenger-ship-plans/andrea-doria/>>. Acesso em: 27 fev. 2018.

_____. Cruiser Aurora. **Free Ship Plans**. 2013b. Disponível em:

<<http://freeshipplans.com/free-model-ship-plans/cruiser-aurora/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

_____. Hesperides Research Vessel Plans: R/V Hesperides research ship scale model plans. R/V Hesperides research ship scale model plans. **Free Ship Plans**. 2013a.

Disponível em: <<http://freeshipplans.com/free-model-ship-plans/hesperides-research-vessel-plans/>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

_____. Icebreaker Angara Scale Model Plans. **Free Ship Plans**. 2013c. Disponível em:

<<http://freeshipplans.com/free-model-ship-plans/icebreaker-angara-scale-model-plans/>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

COLTON, T. The marine industry. In: LAMB, T. **Ship design and construction**. Michigan: [S.l.], 2003. cap 3. p. 1-30.

CROTEAU, T. (Org.). **Historic American Engineering Record: Bolster (ARS-38)**. CA-355. ed. California, 2010a. 26 p. Desenhado por Ashley T. Walker. Disponível em:

<https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/Bolster_HAER_Report.pdf>. Acesso em: 06 maio 2018.

_____. (Org.). **Historic American Engineering Record: General Edwin D. Patrick**. CA-

344. ed. California, 2009c. 57 p. Desenhado e editado por Ashley T. Walker. Disponível em:

<https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/General_Edwin_D._Patrick_HAER_Survey.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

_____. (Org.). **Historic American Engineering Record: Private Frederick C. Murphy**. TX-110. ed. Texas, 2009b. 87 p. Desenhado por Sandra Heard (2006) e Ashley T. Walker (2009).

Disponível em: <https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/Private_Frederick_C_Murphy_HAER_Report.pdf>.

Acesso em: 07 maio 2018.

_____. (Org.). **Historic American Engineering Record: Saugatuck (AO-75)**. VA-128. ed.

Virginia, 2009a. 105 p. Desenhado por Ashley T. Walker. Disponível em:

<https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/Saugatuck_HAER_Report.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2018.

_____. (Org.). **Historic American Engineering Record**: USNS Comet. CA-348. ed. California, 2010b. 90 p. Editado por Todd Croteau. Disponível em: https://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/Comet_HAER_Report.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

DOKKUM, K. V. **Ship knowledge**: Ship design, construction and operation. 4. ed. [S.l.]: Dokmar, [2007?]. 384 p.

DULOV, A. The Icebreaker “Angara”. **Baikal Baikalsk**, Irkutsk, Russia, n. 37-38, p.176-183, 2013. Disponível em: <<http://www.projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/578>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

EURO FLEETS. **RV Hesperides**. Disponível em: <<http://www.eurofleets.eu/np4/282.html>>. Acesso em: 07 mar. 2018.

EVANS, J. H. Basic design concepts. **American Society of Naval Engineers Journal**. p. 671-678, nov. 1959.

FONSECA, M. M. **Arte naval**. 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002. v. 1.

_____. **Arte naval**. 7. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005. v. 1.

GALE, P.A. The ship design process. In: LAMB, T. **Ship design and construction**. Michigan: [S.l.], 2003. cap 5. p. 1-40.

GALIANO, R. **Andrea Doria**. 2016. Disponível em: <http://njscuba.net/sites/site_andrea_doria.php>. Acesso em: 08 mar. 2018.

GRACE, M. L. **SS Andrea Doria**. 2011. Disponível em: <<http://cruiselinehistory.com/ss-andrea-doria/>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

HOLTROP, J; MENNEN, G.G.J. **An approximate power prediction method**. International Shipbuilding Progress. [s.l.], p. 166-170.1982.

ICEBREAKER ANGARA. 2001. Disponível em: <<http://www.irkutsk.org/fed/icebraker.html>>. Acesso em: 23 maio 2018.

KOHLER, R. **Andrea Doria**. 2018. Disponível em: <<http://www.richiekohler.com/project-files/andrea-doria/>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

KONNER. **O lendário cruzador russo “Aurora”**. 2013. Disponível em: <<http://www.planobrazil.com/o-lendario-cruzador-russo-aurora/>>. Acesso em: 03 maio 2018.

LABES, T. A. **Modelos empíricos para estimativas preliminares dos coeficientes de forma de um navio mercante**. 2015. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

LEWIS, E. V. (Ed.). **Principles of naval architecture**: Second Revision. New Jersey: The Society Of Naval Architects And Marine Engineers, 1988. 3 v.

MARAD MARITIME ORGANIZATION (Org.). **Historic American Engineering Record Surveys**. Disponível em: <<https://www.marad.dot.gov/about-us/maritime-administration-history-program/vessels-of-the-maritime-administration/historic-american-engineering-record-surveys/>>. Acesso em: 29 maio 2018.

MARINE TRAFFIC. **Gouraya**. 2017c. Disponível em: <<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:289474/mmsi:605066012/vessel:GOURAYA>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

_____. **Norwegian Sun**. 2017d. Disponível em: <<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:374197/mmsi:311109000/vessel:NORWEGIAN%20SUN>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

_____. **Sunrise Jade**. 2017a. Disponível em: <<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:2432202/mmsi:566046000/vessel:SUNRISE%20JADE>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

_____. **Unique Fidelity**. 2017b. Disponível em: <<https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:690011/mmsi:477881800/vessel:UNIQUE%20FIDELITY>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

MARITIME ADMINISTRATION. **Comet**. Disponível em: <<https://www.marad.dot.gov/sh/ShipHistory/Detail/1077/>>. Acesso em: 03 jun. 2018.

MAXSURF MODELER ® User Manual. Bentley Systems, 2016.

MUSEU NAVAL CENTRAL (Ed.). **Forma de combate**. 2014-2018. Disponível em: <http://www.navalmuseum.ru/filials/cruiser_aurora/battleway>. Acesso em: 02 maio 2018.

PAPANIKOLAOU, A. **Ship design**: Methodologies of preliminary design. Grécia: Springer, 2014.

PARSONS, M. G. Parametric design. In: LAMB, T. **Ship design and construction**. Michigan: [S.l.], 2003. cap 11. p. 1-48.

PODER NAVAL. **Portugal desiste da compra do navio francês polivalente ‘Siroco’**. 2015. Disponível em: <<http://www.naval.com.br/blog/2015/07/30/portugal-desiste-da-compra-do-navio-frances-polivalente-siroco/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

PORTAL MARÍTIMO. NAVIO Ciências do Mar I foi inaugurado nesta quarta-feira no Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.portalmaritimo.com/2017/08/31/navio-ciencias-do-mar-i-foi-inaugurado-nesta-quarta-feira-no-rio-grande-do-sul/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

PRIOLO, G. P. **USS Bolster (ARS-38)**. Disponível em: <<http://www.navsource.org/archives/09/37/3738.htm>>. Acesso em: 06 maio 2018.

PROJECT SAILBOAT WAYRA. **Boat specifications**. 2009. Disponível em: <<http://www.sailboatwayra.com/Stability.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. **Ship design for efficiency and economy**. Oxford: Elsevier, 1998.

THE MODEL SHIPWRIGHT. Liberty Ship Arthur M. Huddell: Ship Plans for Liberty Ship Arthur M. Huddell. Ship Plans for Liberty Ship Arthur M. Huddell. Disponível em: <<http://www.themodelshipwright.com/high-resolution-ship-plans/cargo-ships/liberty-ship-arthur-m-huddell/>>. Acesso em: 23 maio 2018.

TODD, F. H. **Series 60 methodical experiments with models of single-screw merchant ships**. David Taylor Model Basin Washington DC, 1963.

TUPPER, E. C. **Introduction to naval architecture**. 4. ed. Burlington: Elsevier Butterworth-heinemann, 2004.

VENTURA, Manuel. **Estimation Methods for Basic Ship Design**: Lisboa, [2018?]. 61 slides, color. Disponível em: <<http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/EN/SD-1.3.1-Estimation-Methods.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2018.

VESSEL FINDER. **Hanover express**. Disponível em: <<https://www.vesselfinder.com/ship-photos/318827?s=1>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

VARGAS, R. **Gerenciamento de projetos: Estabelecendo diferenciais competitivos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2016.

WATSON, D. G. M. **Practical ship design**. Kidlington, Uk: Elsevier Science, 1998.

WILTGEN, G. **Fragata Niterói completa 40 anos**. 2016. Disponível em: <<http://www.defesaaereanaval.com.br/fragata-niteroi-completa-40-anos/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

WHITTAKER JUNIOR, A. D. **USS Saugatuck: The Last Navy T2 Oiler**. 1999. Disponível em: <<http://www.t2tanker.org/ships/saugatuck3.html>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de estudo e de pesquisa em administração**. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração / UFSC; [Brasília]: CAPES : UAB, 2009. 164p.

APÊNDICE A – NUMERAÇÃO DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS

Quadro A1 – Numeração das equações para estimativa de C_B e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de C_B		
Nº Equação	Ano	Autor
6	1962	Alexander
7	1992	Alexander Reformulada por Barrass
8	1975	Katsoulis
9		
10	1998	Schneekluth e Bertran
11		
12	1975	Towsin
13a	-	Horn
13b	-	Ayre
13c	-	Heckser
13d	-	Heckser
13e	-	Van Lammeren

Fonte: Autor (2018).

Quadro A2 – Numeração das equações para estimativa de C_M e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de C_M		
Nº Equação	Ano	Autor
14	-	Van Lammeren
15	1979	Kerlen
16	-	Laboratory HSVA (Hamburg)
17	-	Benford
18	1998	Schneekluth e Bertran

Fonte: Autor (2018).

Quadro A3 – Numeração das equações para estimativa de C_{WP} e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de C_{WP}		
Nº Equação	Ano	Autor
20		
21		
22	1998	Schneekluth e Bertran
23		
24		
25		
26	1963	Serie 60
27	-	Eames
28		
29	2003	Parsons
30		

Fonte: Autor (2018).

Quadro A4 – Numeração das equações para estimativa de KB e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de KB		
Nº Equação	Ano	Autor
31	-	Moorish e Normand
32	-	Posdumine e Lackenby
33	-	Normand
34	1998	Schneekluth
35	-	Wobig
36	2004	Barrass
37		
38	-	Normand II

Fonte: Autor (2018).

Quadro A5 – Numeração das equações para estimativa de BM_T e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de BM_T		
Nº Equação	Ano	Autor
41	-	D'Arcangelo
42	-	Eames
43	-	Murray
44	-	Normand
45	-	Bauer
46	-	McCloghrie
47	-	Dudszus and Danckwardt
48	2004	Barrass
49	1998	Schneekluth e Bertran

Fonte: Autor (2018).

Quadro A6 – Numeração das equações para estimativa de LCB e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de LCB		
Nº Equação	Ano	Autor
50	-	Harvard
51	1998	Schneekluth e Bertran
52		

Fonte: Autor (2018).

Quadro A7 – Numeração das equações para estimativa de S e seus respectivos autores.

Modelos para estimativa de S		
Nº Equação	Ano	Autor
53	-	Munford
54	1910	Taylor
55	1982	Holtrop e Mennen
56	1998	Schneekluth e Bertran

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS NAVIOS ESTUDADOS

1) USS Saugatuck – Navio tanque

A experiência global e a ferocidade da Primeira Guerra Mundial apontavam que a Segunda seria em maior escala, em mais lugares, envolveria mais pessoas e exigiria mais equipamentos. Logo, ao entrar na Segunda Guerra Mundial, uma das prioridades dos Estados Unidos foi a construção de navios, segundo Croteau (2009a).

Durante a Grande Depressão de 1929, muitas companhias de navios a vapor não conseguiram substituir ou atualizar seus navios mais antigos, onde mais de 90% da frota possuía mais de vinte anos e uma velocidade média entre 10 e 11 nós. Logo, em meados da década de 1930, o governo interveio com nova legislação para ajudar a indústria marítima (CROTEAU, 2009b).

Ainda de acordo com Croteau (2009a), a Comissão Marítima dos EUA tornou-se uma força fundamental no desenvolvimento e construção de navios. Criada em 1936, estabeleceu o Programa Emergencial, um plano de construção em massa de navios que utilizava estaleiros novos e existentes nos Estados Unidos.

Durante o programa emergencial, 481 petroleiros T2 foram construídos, eram utilizados para abastecer com lubrificantes e combustíveis os navios da marinha durante a guerra. O navio USS Saugatuck (AO 75) é um petroleiro da classe Suamico, construído em 1942 pela *Sun Shipbuilding*, e é provavelmente o último petroleiro T2 sobrevivente, de acordo com Whittaker (1999). Devido aos seus serviços durante a Segunda Guerra, Saugatuck ganhou sete estrelas de batalha, e após anos de serviço em apoio à Marinha, em 2008 o navio foi destruído.

Através da Administração Marítima dos EUA (MARAD MARITIME ORGANIZATION, 2018) foi possível ter acesso aos dados da embarcação como também o plano de linhas (ANEXO A).

2) Hesperides – Navio Pesquisa

Fabricado na Espanha, em 1990, o navio oceanográfico Hespérides A-33, pertencente à Armada Espanhola, é um navio de pesquisa global. Equipado com 11

laboratórios permite realizar pesquisas relacionadas à geologia, geofísica marinha, hidrografia, oceanografia física e química, biologia marinha e monitoramento oceânico.

Possui casco reforçado para navegar em áreas polares da Antártica e do Ártico, também é utilizado como suporte logístico para as bases espanholas do Polo Sul. Através do site *Free Ship Plans*, obteve-se o plano de linhas da embarcação (ANEXO B).

3) Navio modelo 4277 da Serie 60

Antes da Série 60, a maioria dos modelos de séries sistemáticas era derivada de uma única forma “mãe”, a partir da qual eram geradas variações sistemáticas das dimensões. Porém, quando as novas embarcações eram submetidas a grandes variações nos parâmetros estipulados, os modelos não apresentavam mais as características originais do casco mãe, levando a resultados incoerentes.

Para o desenvolvimento da Série 60, uma nova abordagem foi concebida. Para isto, foram compilados testes de vários modelos de navios mercantes com um propulsor, escolhidos com base em suas performances de resistência ao avanço, baseadas na comparação com a série padrão de Taylor. O parâmetro básico escolhido por membros da *Society of Naval Architects and Marine Engineers* (SNAME) para definir a série, foi o C_B visto que nos estágios preliminares de projeto o coeficiente fornece uma medida direta do deslocamento, dada as dimensões do navio. Tal consideração pode ser verificada na Equação 1

$$\Delta = L_{WL} \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \quad (1)$$

Para formulação da Serie 60, escolheu-se cinco diferentes C_B , associados preliminarmente com valores de LCB e com as relações L/B e B/T, conforme é mostrado na Figura B1.

Figura B1 - Parâmetros principais e posição do LCB com a variação do C_B dos modelos mãe.

Variation of $\frac{L}{B}$, $\frac{B}{H}$, $\frac{\Delta}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$, $\frac{L}{\nabla^{1/3}}$, and LCB Position with
 C_B for the Parent Models

C_B	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
$\frac{L}{B}$	7.50	7.25	7.00	6.75	6.50
$\frac{E}{H}$	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
$\frac{\Delta}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$	122.0	141.4	163.4	188.2	216.5
$\frac{L}{\nabla^{1/3}}$	6.165	5.869	5.593	5.335	5.092
LCB as percent of L_{BP} from $\square BP$	1.5 aft	0.5 aft	0.5 fwd	1.5 fwd	2.5 fwd

Fonte: Todd (1963).

Para a construção do casco, a tabela de cotas retirada da serie foi utilizada, assim como os contornos de proa e popa disponibilizados, apresentados no ANEXO C.

4) Andrea Doria - Cruzeiro

Lançado em 1951, na Itália, o transatlântico de luxo Andrea Doria tinha capacidade para cerca de 1.200 passageiros e 500 tripulantes. Em um momento pós Segunda Guerra, onde a Itália tentava reconstruir sua economia e reputação, Andrea Doria foi um ícone do orgulho nacional italiano (KOHELER, 2018).

Projetado pelo arquiteto italiano Minoletti, o navio de 700 pés foi todo desenvolvido para ser um navio de extremo luxo, representando o que de melhor existia em se tratando de navios de passageiro.

O navio chegou a ser considerado um dos mais seguros já construídos (GRACE, 2011), sendo equipado com duplo casco e dividido em 11 compartimentos estanques. No entanto, durante a fase de projeto, um dos testes no modelo mostrou que ao ser atingido por uma força significativa o navio apresentava um ângulo de trim considerável, conforme descreve Grace (2011).

Em julho de 1956, Andrea Doria seguia para Nova Iorque, e em virtude de um nevoeiro, colidiu com o navio Estocolmo, um pequeno navio de cruzeiro sueco-americano, que atingiu o bordo do Andrea Doria. A proa reforçada do navio Estocolmo, destinada a navegar em mares congelados, causou um grande impacto no casco, estruturas e cabines da

embarcação. Após o impacto, o navio italiano começou a afundar, e hoje encontrasse a aproximadamente 70 metros de profundidade (GALIANO, 2016).

O plano de linhas do cruzador (ANEXO D) foi obtido no site *Free Ship Plans*.

5) Aurora – Navio cruzador da Marinha

Segundo Fonseca (2005), Os cruzadores são navios de tamanho médio, de alta velocidade, grande autonomia e com excelente mobilidade. Algumas das suas principais funções são: o apoio a operações, o ataque contra alvos estratégicos e a escolta de comboios.

Aurora é um navio cruzador lançado em maio de 1900, entrou para a frota da Marinha Russa em 1903. Em maio de 1905, participou da Batalha de Tsushima, onde teve seu primeiro disparo de fogo, e foi um dos poucos navios russos que sobreviveram à batalha (A VIEW ON CITIES, 2018). Após a batalha no Báltico, retornou a São Petersburgo e tornou-se por um longo tempo um navio de treinamento de cadetes navais.

Durante a Primeira Guerra Mundial, Aurora participou como parte da 2ª brigada de cruzadores da Frota do Báltico, e passou por uma grande reforma, onde foi reequipado e atualizado, passando de 10 para 14 canhões; aumentando assim o seu poder de combate.

Em 1917 a tripulação do Aurora aderiu as Revoluções de Fevereiro e Outubro, onde teve papel importante. Segundo Konner (2013), Aurora foi um dos símbolos da Revolução Bolchevique e ficou famoso por disparar o tiro que sinalizou o ataque ao Palácio de Inverno.

Após isso, em 1922 tornou-se um dos primeiros navios de guerra no mar Báltico para ser colocado em serviço como um navio especializado para treinamento. Até 1940 estudantes de faculdades navais fizeram trabalho prático no cruzador.

De 1941 a 1944 participou da Grande Guerra Patriótica defendendo Leningrado. Permaneceu ancorado em um píer na cidade de Lomonosov, onde foi constantemente bombardeado. Terminado o conflito, foi reparado, voltando a ser utilizado como base de treinamentos para a Escola Naval.

Em 1956, o cruzador Aurora tornou-se uma filial do Museu Naval Central. Entre 1984 e 1987 passou por uma intensa reconstrução, e hoje é mantido por cadetes da Escola Naval Nakhimov na cidade de Murmansk na Rússia.

6) Angara – Navio de carga quebra gelo

A Rússia é um país cercado por mares que congelam devido às condições climáticas, motivando o desenvolvimento de meios que permitam deslocar navios através do gelo. Os primeiro exemplo de embarcações adaptadas a navegação em mares congelados datam do século XI, onde a utilizavam-se barcos adaptados para caça de animais marinhos (DULOV, 2013).

Assim que foram construídos os primeiros navios a vapor, por volta de 1815, os marinheiros russos tentaram adapta-los para enfrentar o frio e o gelo dos mares russos.

Em 1893 a construção da ferrovia Transiberiana exigiu o desenvolvimento de uma embarcação quebra gelo capaz de transportar os trens no lago Baikal. O projeto foi desenvolvido pela empresa inglesa *Armstrong and Co*, e então em 1900 o quebra gelo que foi nominado Baikal, começou suas viagens. Com 4200 toneladas foi um dos maiores navios de do lago Baikal (DULOV, 2013).

No entanto, apenas um navio não seria suficiente para atravessar o lago e em 1898 a mesma empresa inglesa recebeu a ordem para construção de um quebra gelo auxiliar, chamado Angara, o qual possuía deslocamento 3 vezes menor que o Baikal, e foi destinado ao transporte de passageiros e cargas diversas.

O quebra gelo Angara possuía cabines de primeira e segunda classe para 60 pessoas e uma sala de terceira classe para 100 pessoas. Durante a guerra russia-japão, o Angara transportou mais de 1.000 passageiros. O aço utilizado no casco era de alta qualidade, e a espessura na roda proa chegava a 25 mm, podendo atravessar camadas de gelo com até 0,5 m de espessura.

Após a construção da ferrovia, o Angara ficou fora de uso por anos devido à falta de carga, e em 1918 foi concertado e modernizado, passando a ser utilizado na frota militar soviética. Anos depois, o Angara sofreu um incêndio e afundou, sendo recuperado e restaurado em 1988. No entanto, devido às condições a qual se encontrava, foi necessária a reparação completa do navio, sendo necessário alto investimento em sua reforma. Atualmente o Angara é considerado um monumento de importância regional (DULOV, 2013) devido à sua atuação durante todos os anos desde a construção, sendo transformado em um museu da história da navegação o qual se encontra em Irkutsk, Rússia.

O plano de linhas do quebra gelo (ANEXO F) foi obtido no site *Free Ship Plans*.

7) USS Bolster ARS-38 – Navio de resgate e salvamento

Construídos no final da Segunda Guerra Mundial, os navios ARS's foram elaborados para auxiliar as embarcações de combate danificadas durante os confrontos. O navio de resgate e salvamento USS Bolster ARS – 38, foi o primeiro dos 6 navios da classe Bolster construídos em 1944 pela *Basalt Rock Company* (EUA), e participou das Guerras da Coreia, onde recebeu 7 estrelas de batalha por seus serviços e do Vietnã, onde também foi homenageado com 8 estrelas de batalha.

Depois de mais de 49 anos de serviço, o navio foi desativado da Marinha em 1994. Desde então, propriedade da Administração Marítima dos EUA, o U.S.S. Bolster é um membro da frota de reserva inativa de defesa nacional.

O acesso ao plano de linhas do navio de salvamento (ANEXO G) foi realizado por meio do site da Administração Marítima dos EUA (MARAD MARITIME ORGANIZATION, 2018) através do projeto HAER.

8) Frederick C. Murphy (*Maritime Victory*) – Transporte de tropas

Durante a Segunda Guerra Mundial, a Comissão Marítima dos EUA propôs a construção de uma classe de navios de carga, cujo projeto possuía dois requisitos principais, alcançar a velocidade mínima de 15 nós, e o peso morto deveria ser igual ao de um navio da classe *Liberty* (15000 toneladas), os quais eram navios cargueiros construídos durante a Segunda Guerra, com baixo custo e rápidos de construir.

A comissão aprovou os projetos para o novo navio de carga rápida em 1943, e então os estaleiros dos EUA produziram 272 navios VC2-S-AP2 pertencentes à classe *Victory*, a qual pertence o navio Frederick C. Murphy (*Maritime Victory*).

Segundo Croteau (2009b), os navios da classe *Victory* possuem comprimento de 455 pés e popa cruiser, para atingir altas velocidades, além de transportar um elevado peso morto.

Assim como os demais navios da classe *Victory*, o Frederick C. Murphy foi originalmente construído como navio de carga, mas foi convertido para um navio de transportes de tropas, com espaço para transportar até 1597 pessoas. Apenas um dos porões do navio não foi convertido para transporte de tropas, podendo realizar simultaneamente o transporte de cargas. A partir do projeto HAER foi possível ter acesso ao plano de linhas da embarcação (ANEXO H) assim como suas informações.

9) General Edwin D. Patrick – Navio de transporte de tropas

A Comissão Marítima dos EUA desenvolveu duas classes de transportes, as classes *Admiral* (P2-SE2-R1) e *General* (P2-S2-R2), onde os projetos foram baseados em dois fatores: velocidade de 19 nós e um peso leve em torno de 10.000 toneladas. Os navios dessas classes eram utilizados para transportar as tropas de guerra, e após a Segunda Guerra, poderiam ser convertidos para navios de transporte de passageiros e cargas. A classe *Admiral* era utilizada para operações no Extremo Oriente, enquanto a *General* para uso na América do Sul.

O navio até então conhecido como *Admiral* C.F. Hughes foi enviado à Marinha dos EUA em 1945, e operou durante a Segunda Guerra realizando o transporte de tropas. Após a guerra, o navio foi adquirido pelo exército americano, onde foi renomeado como General Edwin D. Patrick.

O General Edwin D. Patrick é o único navio restante da classe *Admiral* e permanece notável por sua longevidade como participante na Segunda Guerra Mundial, onde atuou nas guerras da Coreia e do Vietnã (CROTEAU, 2009c).

Através do projeto HAER foi possível ter acesso ao plano de linhas da embarcação (ANEXO I) assim como os dados do navio.

10) USNS Comet – Navio Roll on/Roll off

Um navio roll-on roll-off (ou Ro-Ro) é uma embarcação na qual veículos e equipamentos autopropulsados podem ser embarcados por sua própria força, sem a necessidade de içá-los a bordo. Segundo Croteau (2010b), o manuseio de carga roll-on e roll-off reduz os tempos de carga e descarga no porto, reduz as despesas de embalagem e diminui as oportunidades de furto no porto.

O USNS Comet foi construído em 1958 pela *Sun ShipBuilding and Drydock*, e é considerado o primeiro navio oceânico do tipo *Roll On / Roll Off*. O Comet operou como parte da frota do Serviço Militar de Transporte Marítimo (MSTS). Foi um membro importante na resposta dos EUA à Crise do Líbano em 1958 (MARITIME ADMINISTRATION, 2018).

O navio é subdividido por anteparas transversais em sete compartimentos, sendo equipado com uma rampa de popa e quatro portas laterais destinadas ao carregamento dos veículos.

Durante décadas o Comet continuou realizando transporte de cargas e apenas em 2006, a MARAD transferiu o navio para a Frota de Reserva de Defesa Nacional e desde então a embarcação permanece parada na Baía de Suisun.

Através do projeto HAER foi possível ter acesso ao plano de linhas da embarcação (ANEXO J), assim como suas dimensões principais e informações.

APÊNDICE C – NUMERAÇÃO DOS NAVIOS

Quadro C1 – Numeração dos navios com seus respectivos nomes e anos.

Numeração	Nome	Tipo	Ano
1	Saugatuck	Tanque	1942
2	Hesperides	Pesquisa	1990
3	Modelo filha 4277 serie 60	Mercante	1963
4	Andrea Doria	Cruzeiro	1951
5	Aurora	Cruzador	1900
6	Angara	Carga/quebra-gelo	1898
7	Bolster	Salvamento	1944
8	Frederick	Carga/tropas	1945
9	Edwin	Carga/tropas	1945
10	Comet	Ro/Ro	1958

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE D – VALORES NUMÉRICOS ENCONTRADOS PARA CADA COEFICIENTE

Tabela D1– Valores absolutos de C_B calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico C_B	Equações dos Modelos Empíricos											
		6	7	8	9	10	11	12	13a	13b	13c	13d	13e
Saugatuck	0,71	0,69	0,93	1,17	0,75	0,72	0,70	0,77	0,72	0,71	0,72	0,69	0,70
Hesperides	0,56	0,61	0,87	0,57	0,63	0,54	0,56	0,64	0,64	0,63	0,64	0,62	0,62
Serie 60	0,74	0,71	0,95	0,70	0,78	0,76	0,72	0,80	0,74	0,74	0,75	0,71	0,73
Andrea Doria	0,57	0,58	0,85	0,92	0,58	0,54	0,58	0,60	0,61	0,60	0,61	0,59	0,58
Aurora	0,50	0,53	0,81	0,66	0,54	0,49	0,54	0,57	0,56	0,55	0,56	0,54	0,53
Angara	0,50	0,58	0,85	0,55	0,59	0,52	0,55	0,61	0,61	0,60	0,61	0,59	0,58
Bolster	0,57	0,52	0,77	0,46	0,52	0,41	0,46	0,55	0,51	0,49	0,50	0,50	0,47
Frederick	0,65	0,67	0,88	1,00	0,65	0,60	0,61	0,66	0,65	0,65	0,66	0,63	0,63
Edwin	0,59	0,64	0,89	0,94	0,68	0,64	0,65	0,69	0,67	0,66	0,67	0,64	0,65
Comet	0,62	0,62	0,88	0,70	0,64	0,56	0,58	0,65	0,65	0,64	0,65	0,62	0,62

Fonte: Autor (2018).

Tabela D2 - Valores absolutos de C_M calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico C_M	Equações dos Modelos Empíricos				
		14	15	16	17	18
Saugatuck	0,96	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
Hesperides	0,88	0,96	0,96	0,95	0,97	0,95
Serie 60	1,00	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98
Andrea Doria	0,97	0,96	0,96	0,95	0,97	0,97
Aurora	0,85	0,95	0,94	0,92	0,97	0,96
Angara	0,79	0,95	0,94	0,92	0,97	0,95
Bolster	0,96	0,96	0,96	0,95	0,97	0,95
Frederick	0,99	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99
Edwin	0,97	0,96	0,97	0,96	0,98	0,98
Comet	0,97	0,96	0,98	0,97	0,98	0,97

Fonte: Autor (2018).

Tabela D3 - Valores absolutos de C_{WP} calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico C_{WP}	Equações dos Modelos Empíricos										
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Saugatuck	0,81	0,81	0,81	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,83	0,83	0,83	0,86
Hesperides	0,77	0,72	0,71	0,72	0,74	0,73	0,72	0,73	0,77	0,73	0,74	0,78
Serie 60	0,81	0,81	0,82	0,83	0,82	0,82	0,84	0,81	0,83	0,82	0,82	0,86
Andrea Doria	0,70	0,69	0,71	0,73	0,70	0,72	0,72	0,69	0,75	0,69	0,71	0,74
Aurora	0,69	0,69	0,67	0,68	0,70	0,70	0,67	0,69	0,75	0,69	0,71	0,74

Angara	0,76	0,73	0,67	0,68	0,74	0,71	0,67	0,73	0,78	0,74	0,75	0,78
Bolster	0,72	0,68	0,71	0,73	0,70	0,72	0,72	0,68	0,75	0,69	0,71	0,74
Frederick	0,76	0,75	0,77	0,78	0,76	0,77	0,79	0,75	0,79	0,76	0,77	0,80
Edwin	0,72	0,71	0,73	0,74	0,72	0,73	0,74	0,71	0,76	0,71	0,73	0,76
Comet	0,75	0,73	0,75	0,76	0,74	0,75	0,76	0,73	0,78	0,73	0,75	0,78

Fonte: Autor (2018).

Tabela D4 - Valores absolutos de KB calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico KB	Equações dos Modelos Empíricos							
		31	32	33	34	35	36	37	38
Saugatuck	4,91	4,94	4,86	5,08	4,96	4,84	4,87	4,89	4,94
Hesperides	2,56	2,62	2,56	2,58	2,56	2,54	2,57	2,36	2,62
Serie 60	2,67	2,73	2,70	2,79	2,72	2,69	2,70	2,76	2,73
Andrea Doria	4,95	5,12	5,03	5,05	5,06	5,00	5,03	4,89	5,13
Aurora	3,67	3,66	3,59	3,67	3,68	3,55	3,59	3,32	3,66
Angara	2,76	2,81	2,76	2,84	2,82	2,71	2,76	2,46	2,81
Bolster	2,34	2,40	2,35	2,32	2,33	2,34	2,35	2,24	2,40
Frederick	4,56	4,67	4,59	4,65	4,59	4,58	4,60	4,57	4,68
Edwin	4,45	4,51	4,43	4,47	4,46	4,40	4,43	4,32	4,51
Comet	3,66	3,74	3,67	3,69	3,66	3,65	3,67	3,59	3,74

Fonte: Autor (2018).

Tabela D5 - Valores absolutos de BM_T calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico BM_T	Equações dos Modelos Empíricos								
		41	42	43	44	45	46	47	48	49
Saugatuck	3,78	3,79	3,51	3,77	3,74	3,68	3,75	3,72	3,63	3,76
Hesperides	4,26	4,38	4,02	4,37	4,33	4,23	4,28	4,28	4,15	4,34
Serie 60	4,91	4,92	4,56	4,89	4,85	4,77	4,86	4,82	4,72	4,88
Andrea Doria	5,99	6,12	5,55	6,10	6,16	5,95	5,89	5,98	5,72	6,10
Aurora	3,60	3,89	3,53	3,88	3,92	3,79	3,74	3,81	3,64	3,88
Angara	2,35	2,41	2,20	2,40	2,38	2,32	2,34	2,35	2,27	2,38
Bolster	3,29	3,41	3,10	3,40	3,40	3,30	3,30	3,33	3,19	3,38
Frederick	3,36	3,31	3,03	3,29	3,27	3,19	3,23	3,23	3,14	3,29
Edwin	5,12	5,11	4,64	5,09	5,10	4,94	4,92	4,98	4,77	5,06
Comet	7,88	7,75	7,08	7,72	7,67	7,48	7,53	7,55	7,30	7,67

Fonte: Autor (2018).

Tabela D6 - Valores absolutos de LCB calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico LCB	Equações dos Modelos Empíricos				
		50	50 (+0,8)	50 (-0,8)	51	52
Saugatuck	0,85	0,51	1,31	-0,29	0,86	0,91
Hesperides	-2,12	-1,59	-0,79	-2,39	-0,96	-1,18
Serie 60	2,28	1,08	1,88	0,28	1,35	0,80
Andrea Doria	-2,31	-2,46	-1,66	-3,26	-1,71	-2,09
Aurora	1,74	-3,68	-2,88	-4,48	-2,77	-2,03
Angara	-1,61	-2,35	-1,55	-3,15	-1,61	-1,05
Bolster	1,13	-5,07	-4,27	-5,87	-3,97	-2,11
Frederick	1,23	-1,22	-0,42	-2,02	-0,64	-0,64
Edwin	-0,40	-0,81	-0,01	-1,61	-0,29	-1,63
Comet	-0,06	-1,38	-0,58	-2,18	-0,78	-1,10

Fonte: Autor (2018).

Tabela D7 - Valores absolutos de S calculados numericamente e pelos modelos empíricos.

Navio	Valor numérico S	Equações dos Modelos Empíricos			
		53	54	55	56
Saugatuck	4735,06	4702,47	4653,78	4650,84	4721,25
Hesperides	1101,84	1122,33	1110,63	1136,08	1130,71
Serie 60	2819,90	2743,39	2658,44	2750,11	2689,49
Andrea Doria	6039,40	6028,93	5977,44	5864,70	6039,39
Aurora	2253,40	2316,01	2281,49	2230,11	2304,86
Angara	718,15	770,91	748,83	741,48	763,10
Bolster	926,04	932,01	922,26	925,16	941,14
Frederick	3561,64	3560,66	3521,88	3480,48	3577,76
Edwin	4789,02	4872,66	4823,51	4753,85	4872,55
Comet	3899,57	3913,73	3826,24	3939,02	3876,55

Fonte: Autor (2018).

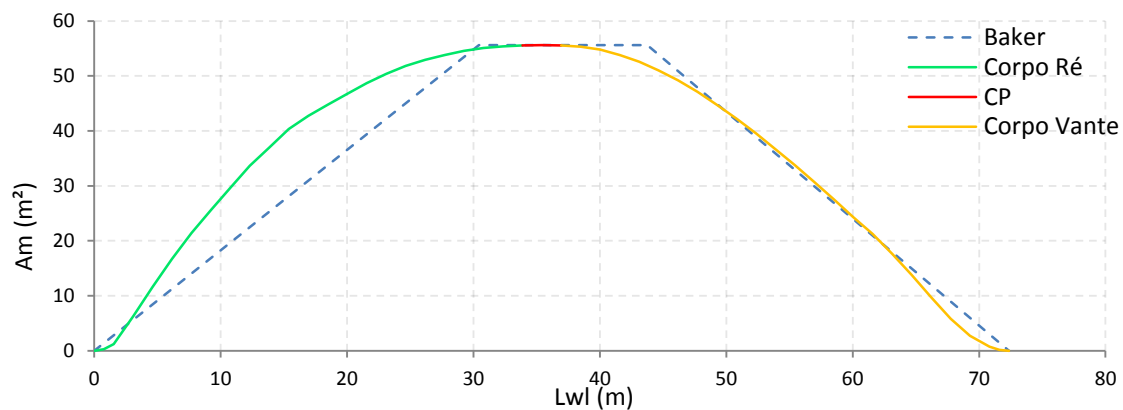
Tabela D8 – Valores absolutos do volume e LCB para cada método utilizado.

Navio	Volume				LCB			
	Numérico	Simpson	Baker	Alsen	Numérico	Simpson	Baker	Alsen
Saugatuck	20912	20898	19485	17802	79,02	78,73	80,72	79,70
Hesperides	2557	2458	2383	-	34,65	34,44	36,53	-
Serie 60	8536	8524	8408	7916	62,24	59,06	64,47	63,22
Andrea Doria	27443	27119	28413	-	93,17	92,98	92,44	-
Aurora	6402	6430	6120	-	63,12	62,88	55,55	-
Angara	1431	1428	1251	-	28,33	28,21	29,16	-
Bolster	1990	1990	-	-	32,77	34,59	-	-
Frederick	14052	14092	13146	11199	67,58	67,56	66,74	66,12
Edwin	19569	19573	21613	18339	88,50	88,40	87,83	88,37
Comet	15234	15225	14959	12479	72,01	71,56	71,61	71,52

Fonte: Autor (2018).

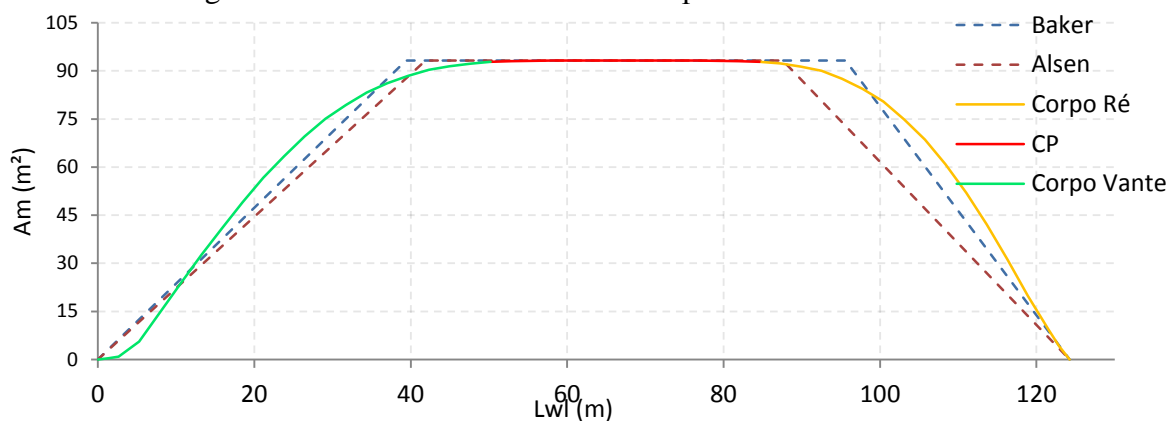
APÊNDICE E – CURVAS SAC GERADAS PARA OS NAVIOS ESTUDADOS

Figura E1 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Hesperides.



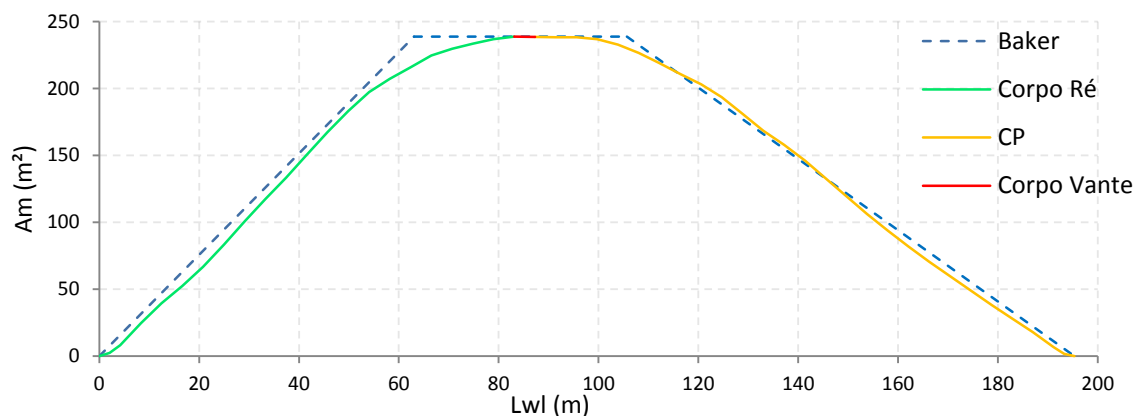
Fonte: Autor (2018).

Figura E2 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio da serie 60.



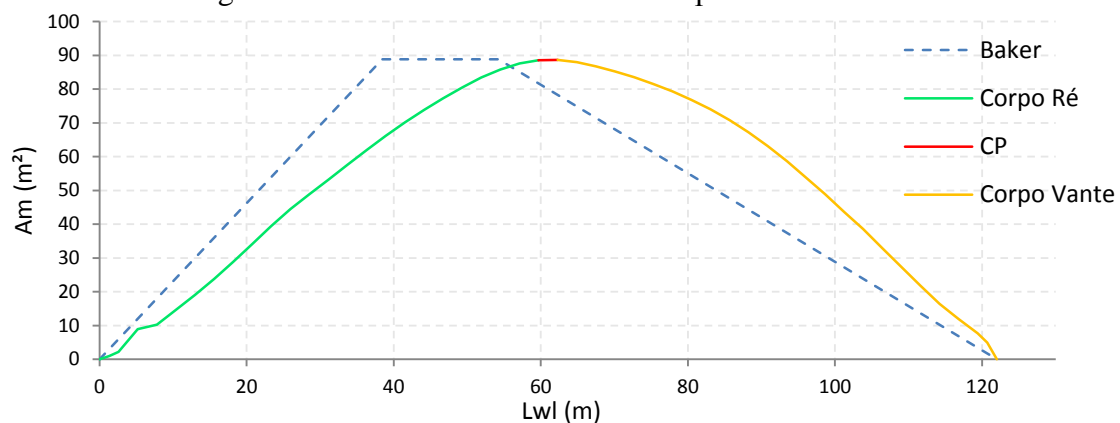
Fonte: Autor (2018).

Figura E3 Gráfico das SAC's obtidas para o navio Andrea Doria.



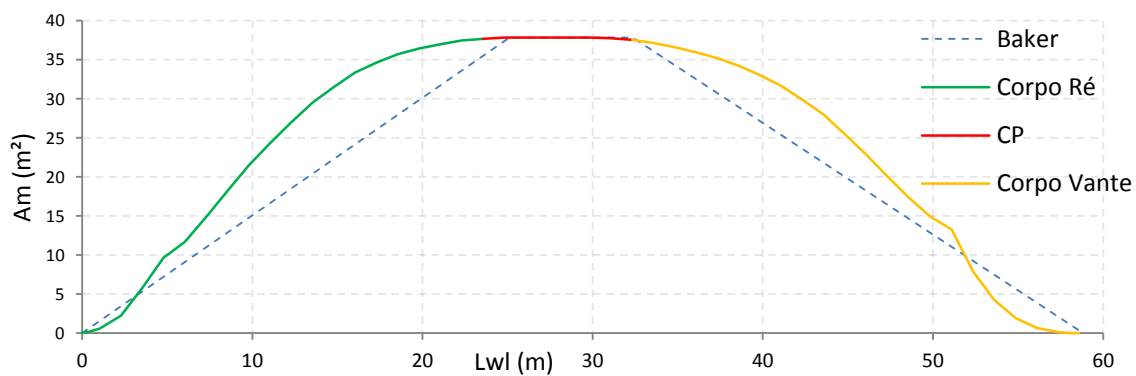
Fonte: Autor (2018).

Figura E4 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Aurora.



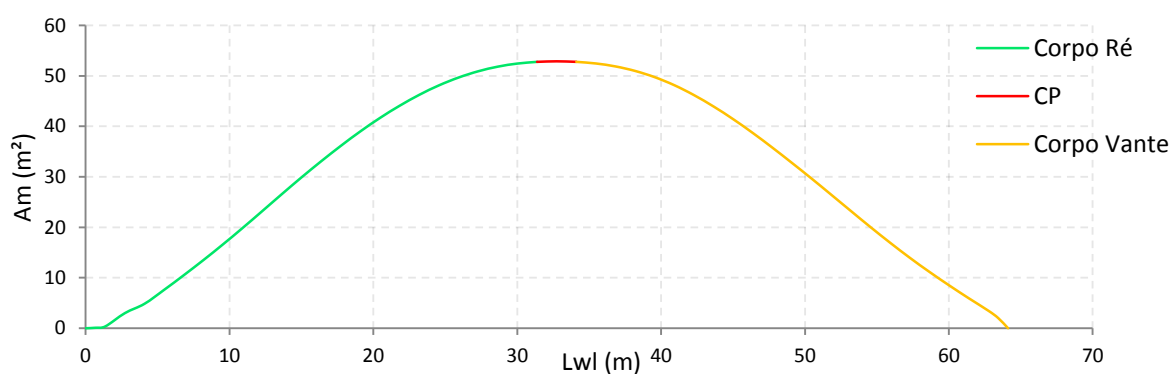
Fonte: Autor (2018).

Figura E5 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Angara.



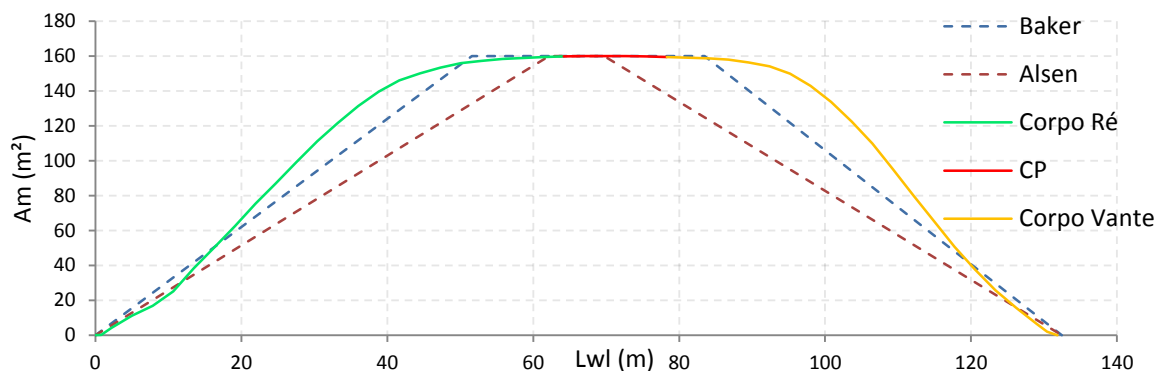
Fonte: Autor (2018).

Figura E6 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Bolster.



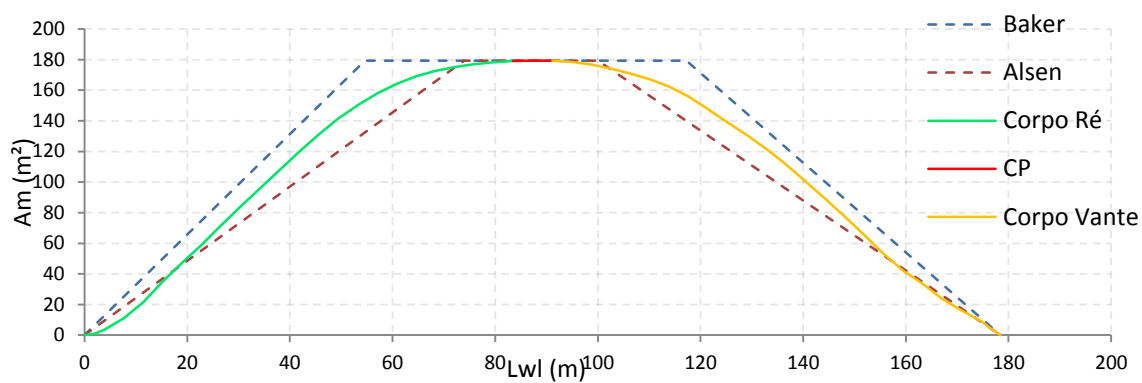
Fonte: Autor (2018).

Figura E7 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Frederick.



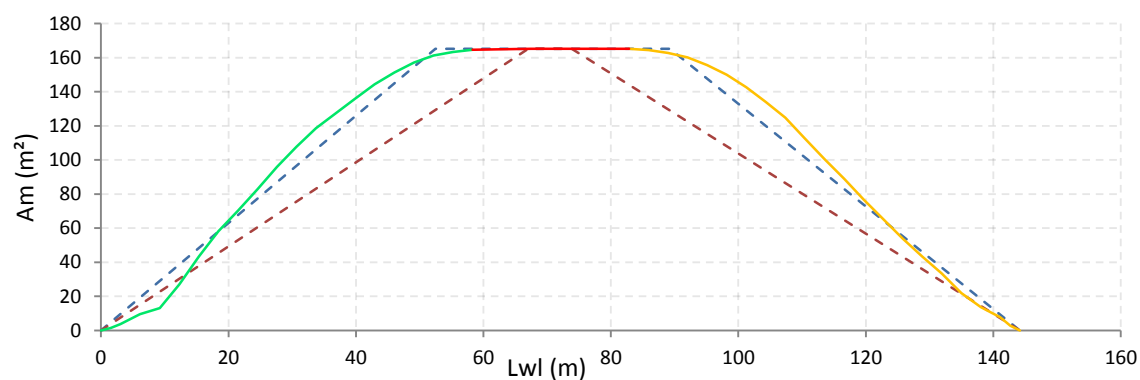
Fonte: Autor (2018).

Figura E8 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Edwin.



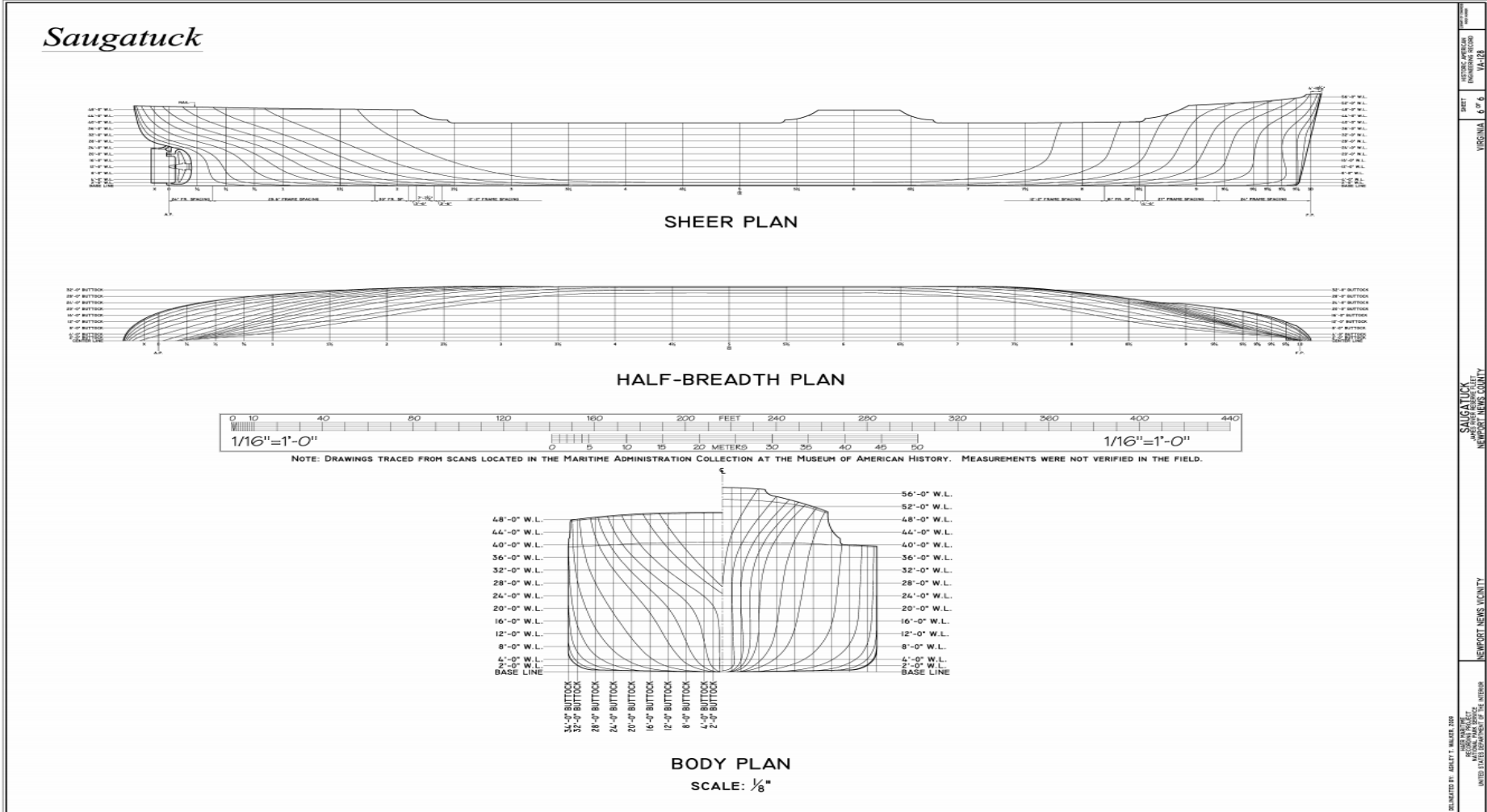
Fonte: Autor (2018).

Figura E9 - Gráfico das SAC's obtidas para o navio Comet.



Fonte: Autor (2018).

ANEXO A - PLANO DE LINHAS DO SAUGATUCK



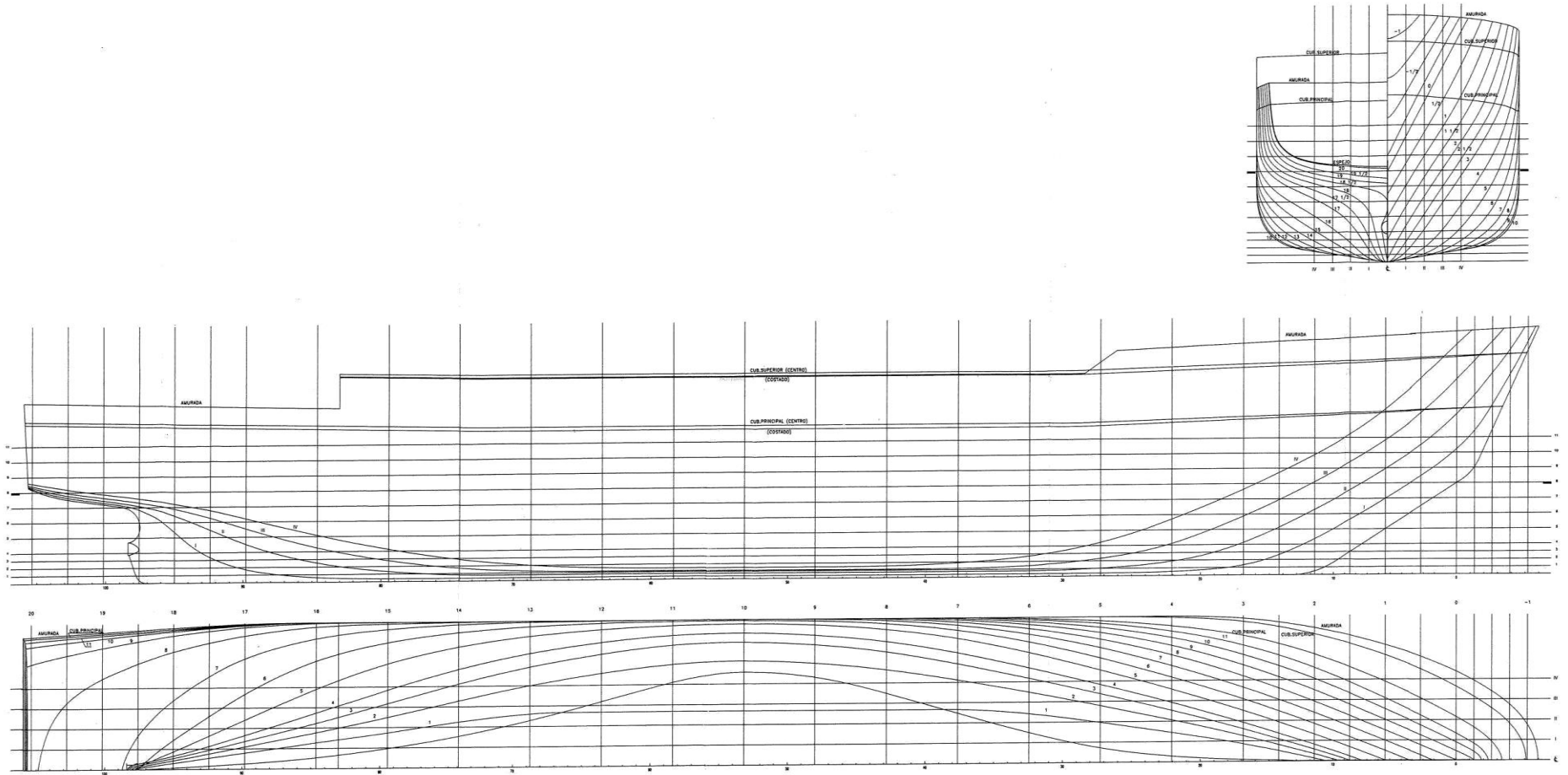
Fonte: Croteau (2009a).

REPRODUCED BY: SHEPHERD M. MILES, 2009
MARITIME ADMINISTRATION
NEWPORT NEWS, VIRGINIA
UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR

SAUGATUCK
NEWPORT NEWS, VIRGINIA
NEWPORT NEWS COUNTY

REVISION
DATE
SHEET 6 OF 6
VIRGINIA VA 23061

ANEXO B – PLANO DE LINHAS DO HESPERIDES



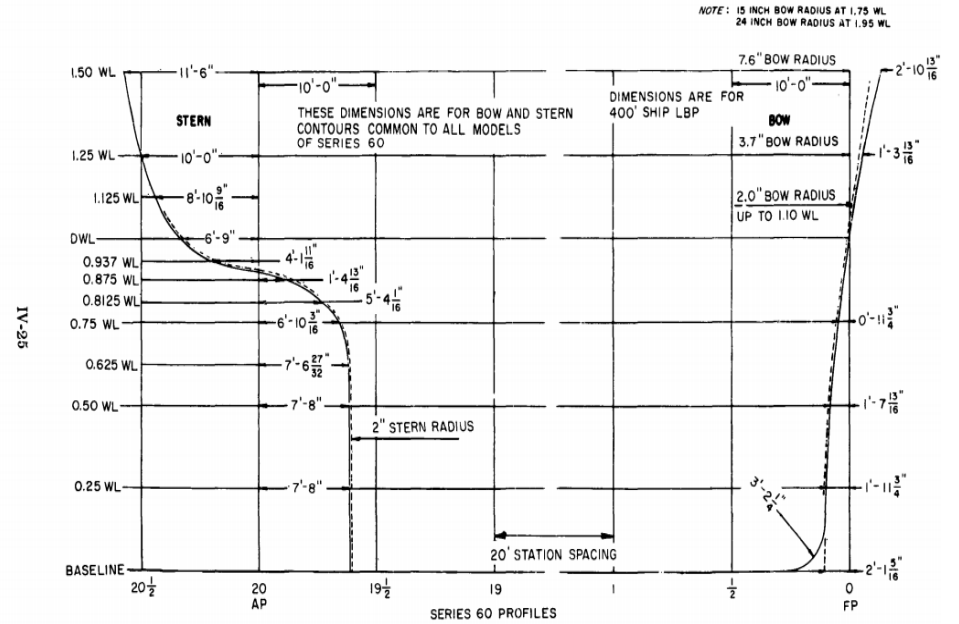
Fonte: Captain (2013a).

ANEXO C – TABELA DE COTAS DA SÉRIE 60 PARA CB = 0,75 E LINHAS DE CONTOURO

Table 6 – Table of Offsets–Parent Forms–0.75 Block Coefficient
(Half-breadths of waterlines given as fraction of maximum beam on each waterline)

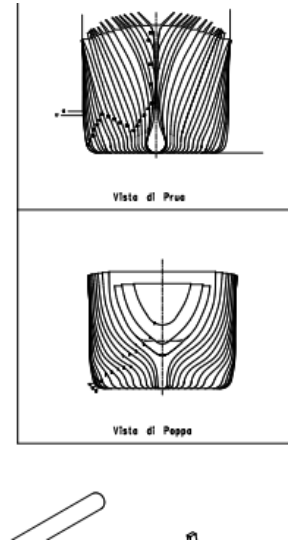
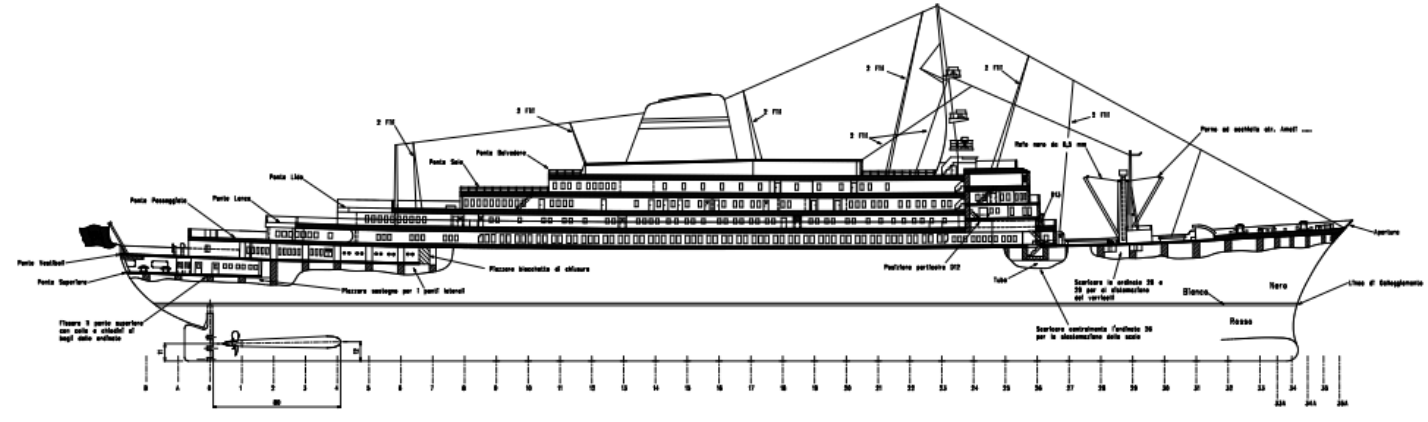
Sta.	Tan.	Waterlines							Area as fraction of max. area to 1.00 W.L.
		0.075	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	
FP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.062	0.000
1 ½	0.021	0.075	0.113	0.128	0.138	0.149	0.176	0.235	0.120
1	0.067	0.180	0.251	0.276	0.290	0.304	0.338	0.403	0.261
1 ½	0.138	0.290	0.380	0.423	0.441	0.460	0.495	0.557	0.401
2	0.235	0.406	0.504	0.560	0.585	0.608	0.639	0.690	0.535
3	0.466	0.625	0.718	0.777	0.806	0.824	0.845	0.867	0.754
4	0.700	0.800	0.870	0.911	0.930	0.943	0.954	0.962	0.845
5	0.883	0.920	0.959	0.978	0.985	0.990	0.994	0.998	0.969
6	0.979	0.983	0.994	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.995
7	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.300	1.000	1.000	1.000	1.000
11	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
12	0.985	0.992	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998
13	0.914	0.953	0.979	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	0.987
14	0.784	0.890	0.925	0.976	0.990	0.996	1.000	1.000	0.953
15	0.612	0.728	0.820	0.908	0.953	0.975	0.990	1.000	0.880
16	0.420	0.565	0.667	0.781	0.863	0.921	0.958	0.987	0.760
17	0.242	0.388	0.483	0.592	0.712	0.817	0.899	0.951	0.594
18	0.105	0.225	0.288	0.365	0.488	0.660	0.794	0.875	0.391
18 ½	0.058	0.151	0.197	0.249	0.354	0.554	0.715	0.812	0.282
19	0.028	0.084	0.109	0.135	0.211	0.427	0.614	0.726	0.172
19 ½	0.012	0.021	0.025	0.028	0.061	0.278	0.486	0.610	0.080
AP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.115	0.320	0.451	0.006
Max. half beam*	0.807	0.947	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.451	

Forebody prismatic coefficient = 0.792
 Afterbody prismatic coefficient = 0.724
 Total prismatic coefficient = 0.758



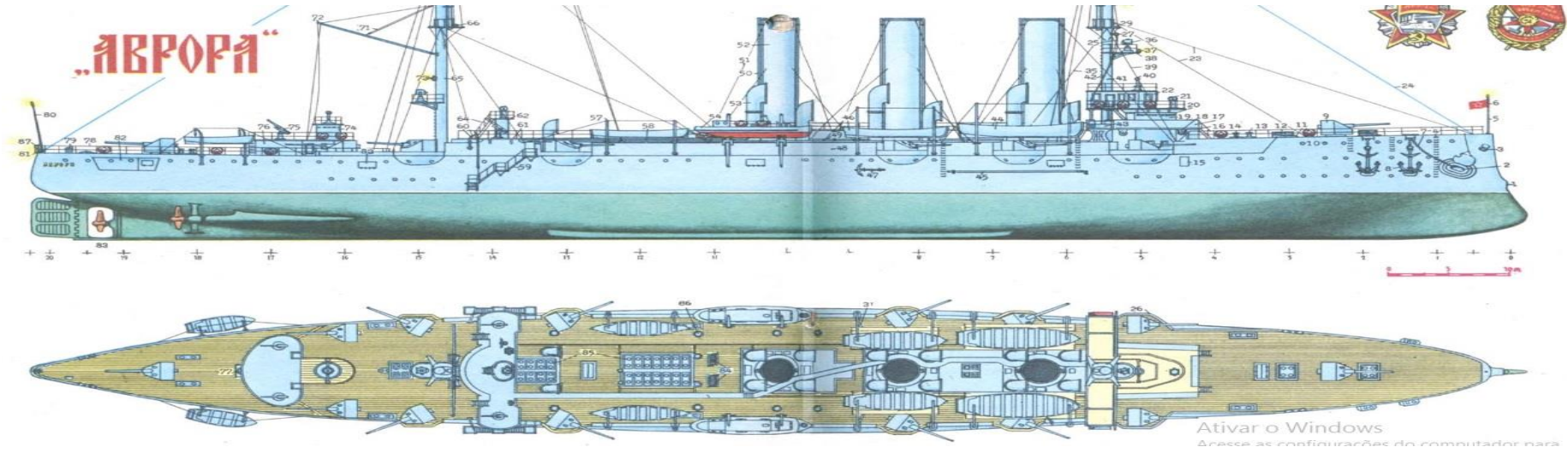
Fonte: Todd (1963).

ANEXO D – PLANO DE LINHAS ANDREA DORIA

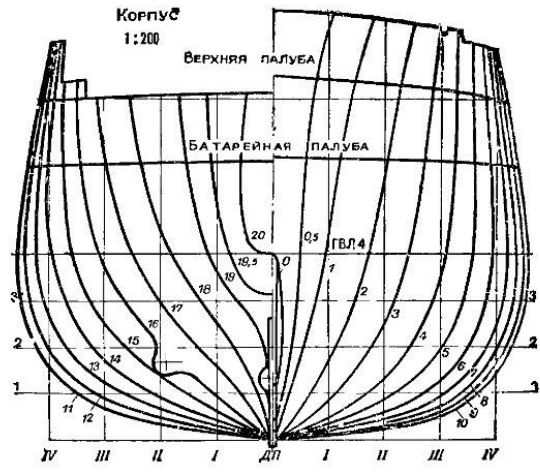


Fonte: Captain (2014).

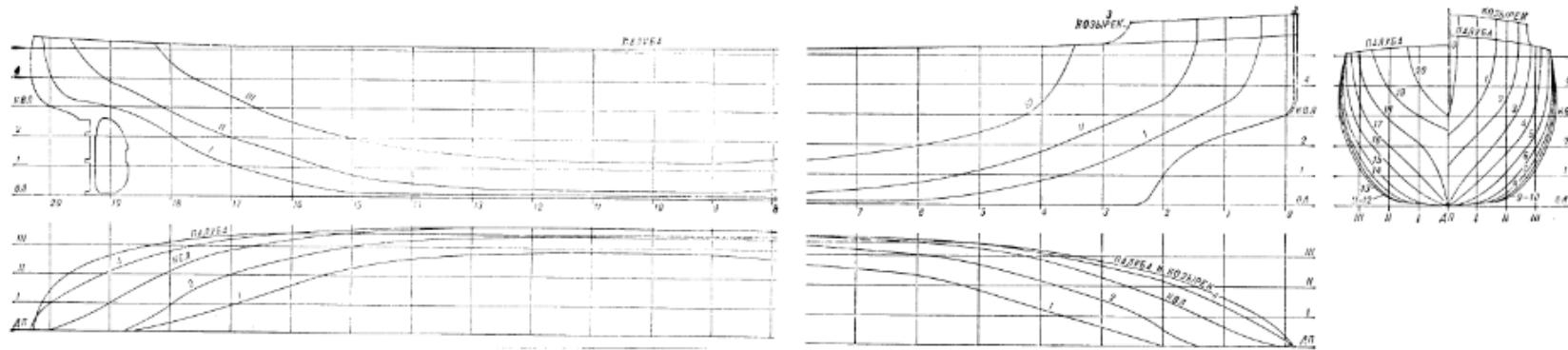
ANEXO E – PLANO DE BALIZAS AURORA



Ativar o Windows
Clique nas configurações do computador para



Fonte: Captain (2013b).

ANEXO F – PLANO DE LINHAS ANGARA

Fonte: Captain (2013c).

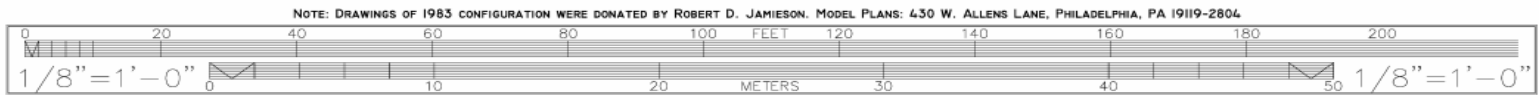
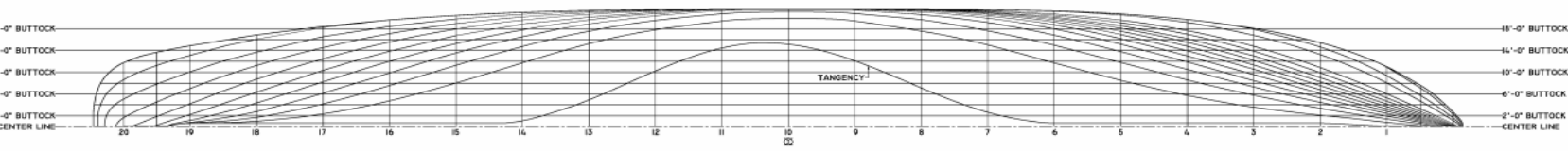
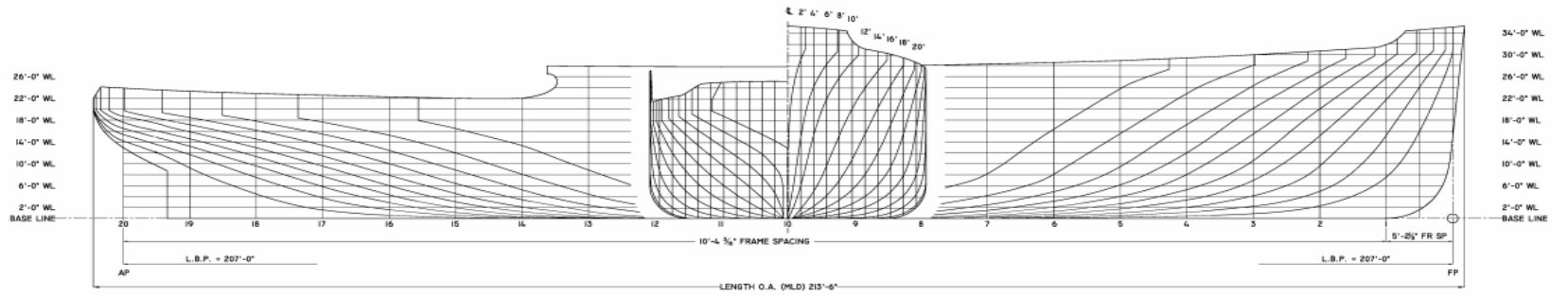
ANEXO G – PLANO DE LINHAS BOLSTER

USS Bolster (ARS-38)
(1983 Configuration)

Lines

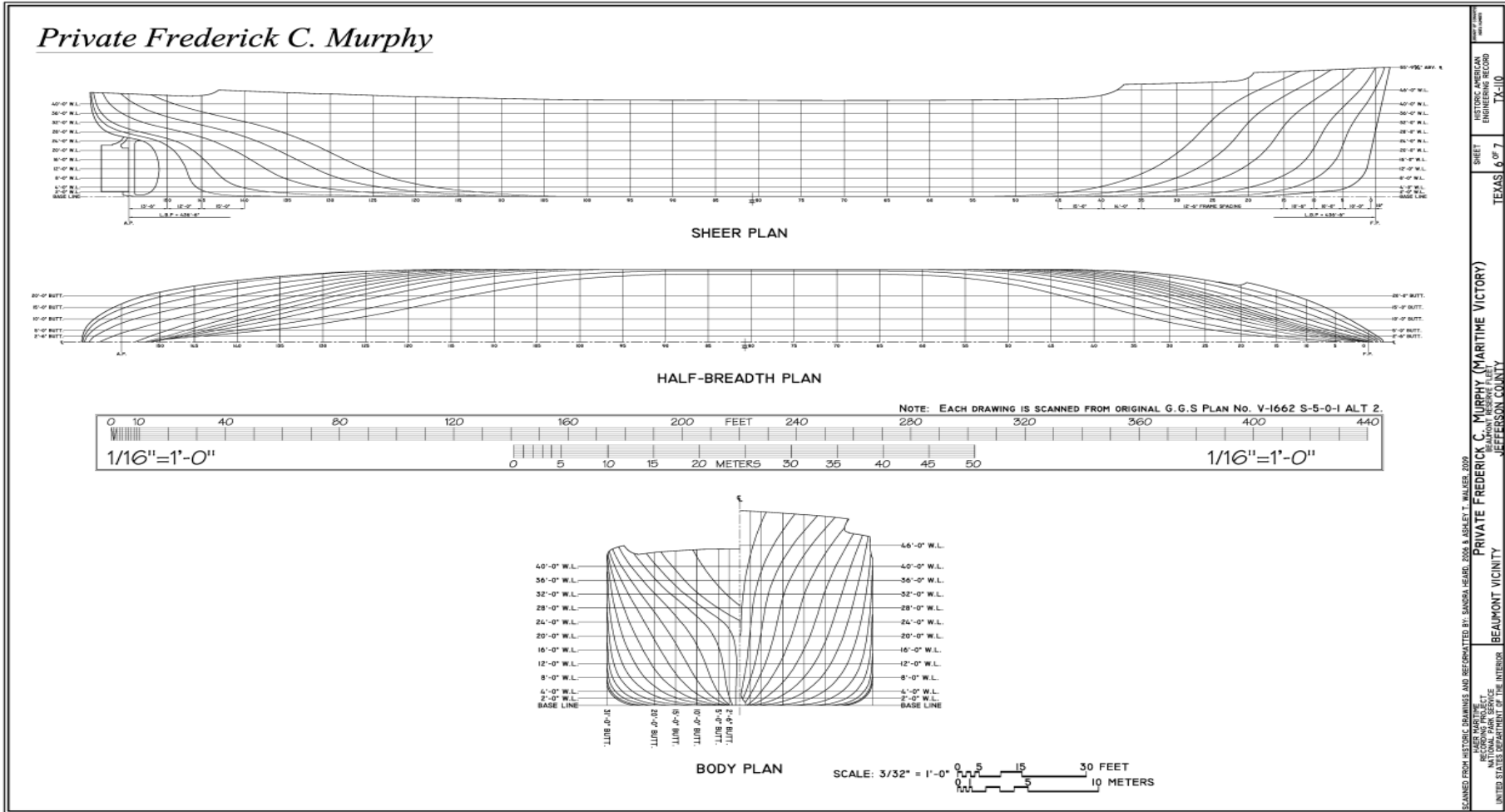
TABLE OF OFFSETS

STA	RIGHT BOWPORT DECK										MIDSHIP DECK										PORT BOWPORT DECK										STA
	1/2"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	1/2"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	1/2"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	



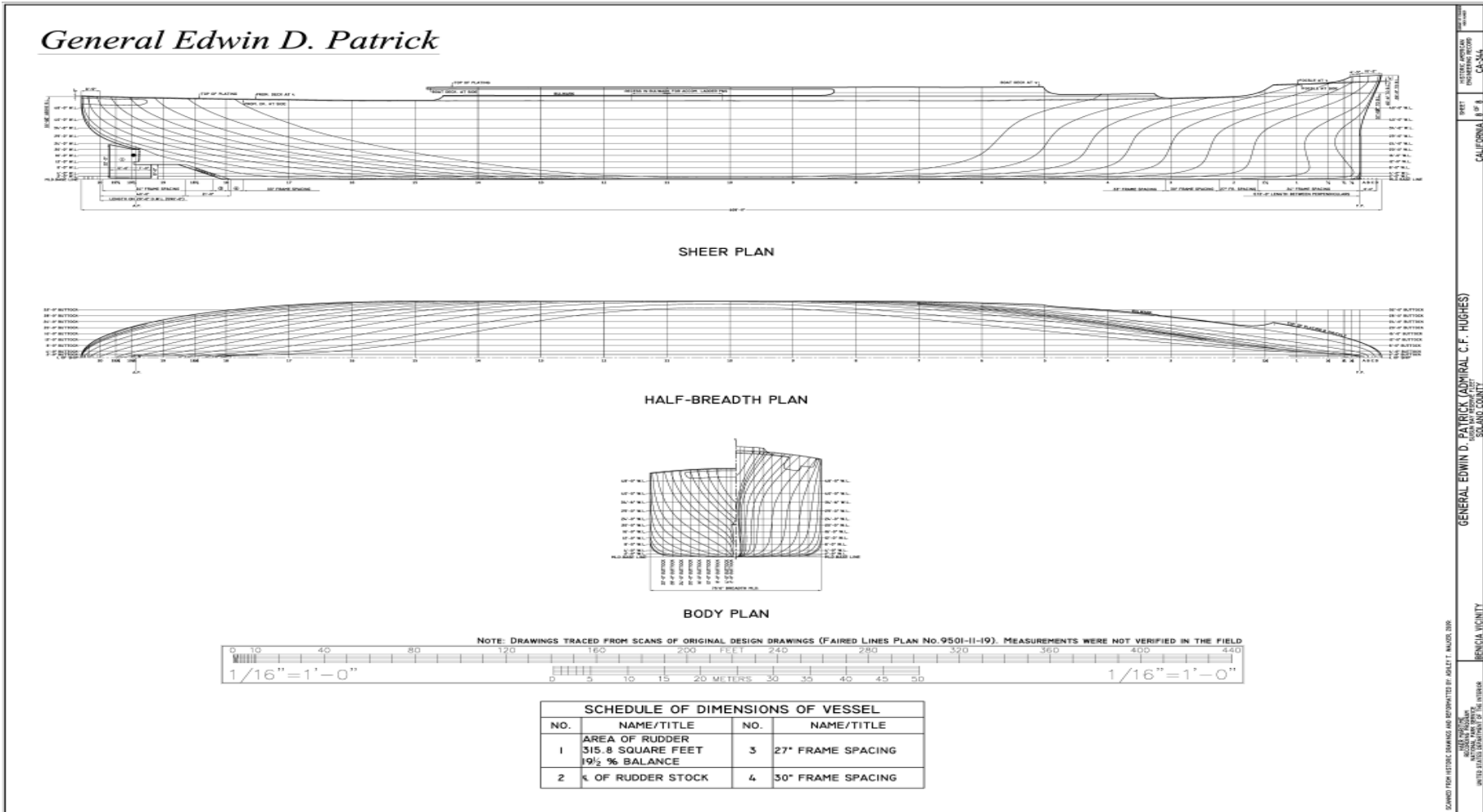
Fonte: Croteau (2010a).

ANEXO H – PLANO DE LINHAS FREDERICK



Fonte: Croteau (2009b).

ANEXO I – PLANO DE LINHAS EDWIN

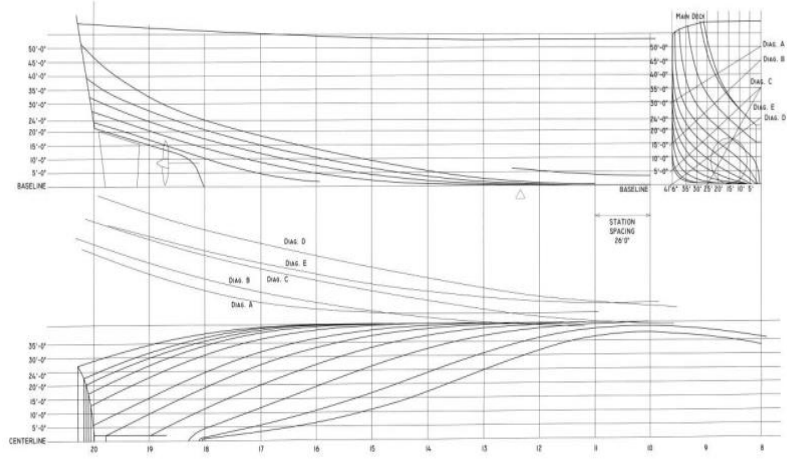


Fonte: Croteau (2009c).

ANEXO J – PLANO DE LINHAS COMET

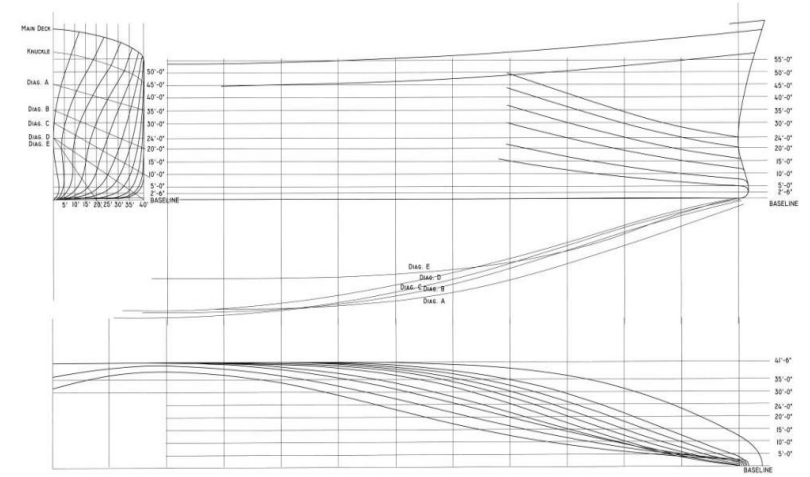
USNS Comet

Lines Plan - Aft



USNS Comet

Lines Plan - Forward



Fonte: Croteau (2010b).