

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA



MARIA EDUARDA FELIPPE CHAME

PROJETO CONCEITUAL OTIMIZADO DE  
EMBARCAÇÕES UTILIZANDO FÓRMULAS  
EMPÍRICAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENGENHARIA NAVAL

JOINVILLE, 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA



MARIA EDUARDA FELIPPE CHAME

PROJETO CONCEITUAL OTIMIZADO DE  
EMBARCAÇÕES UTILIZANDO FÓRMULAS  
EMPÍRICAS

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Apresentado para a obtenção do título  
de Engenheiro Naval na  
Universidade Federal de Santa Catarina

ENGENHARIA NAVAL

JOINVILLE, 2014



## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

As três pessoas que me incentivam a melhorar a cada dia, Olavo, Maria Antônia e Luiz Renato. Espero cumprir a função de irmã mais velha e ser um exemplo à vocês.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a conclusão desta etapa de formação profissional e pessoal. Em especial os professores Alexandre Mokowski, Cristiano Vasconcellos Ferreira, Viviane Lilian Soethe e Hazim Ali Al-Qureshi, que de alguma forma contribuíram para meu crescimento e proporcionaram oportunidades únicas de pesquisa e extensão. Também meu sincero agradecimento ao professor Ricardo Aurélio Quinhões por granjear minha vaga de estágio junto ao TPN. E ao coordenador de curso Lucas Weihmann por toda sua dedicação em melhorar nosso curso.

Ao meu querido ex-diretor de centro Acires Dias, por ser minha referência como profissional e pessoa.

Ao meu orientador Thiago Pontin Tancredi, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Agradeço por sua imensa paciência na orientação que tornou possível a conclusão desta monografia.

Aos meus avós Maria, Noêmia (em memória) e Sebastião, meus pais, Claudia e Evandro, meu padrasto, Daniel, e madrasta, Elaine, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Assim como meus padrinhos Cássio e Elaine e minha tia Rô por me apoiarem quando necessário. À minha segunda mãe, Amarilis Laurenti, obrigada por todo o aprendizado e respaldo.

Aos colegas do centro acadêmico, Barco Solar, Aerodesign e PET por contribuírem para meu amadurecimento. Aos guerreiros que me acompanharam na aventura de organizar o 1º CONEMB, em especial meus grandes amigos, Amanda, Davi, Evelyne, Fabiano, Flávia, Leonardo, Marcus, Marina, Pedro Bundy, Pedro Paludetto, Pedro Pastorelli e Rodrigo Michels.

Aos colegas de trabalho do TPN e IPT, em especial minha amiga Aline, meus chefes Rodolfo e Fajarra por toda paciência e entenderem a dificuldade de realizar o TCC à distância, permitindo que eu pudesse concluir este trabalho.

Por fim, agradeço a contribuição e colaboração para a conclusão deste trabalho dos meus estimados amigos, Pedro Paludetto, Pedro César Sciarini e Rodrigo Michels. E a todos amigos pelo incentivo e pelo apoio constantes.

## RESUMO

O presente trabalho desenvolve um modelo de otimização do casco utilizando o software Excel e a ferramenta Solver. Esse modelo é multiobjetivo e busca minimizar a potência do motor e maximizar a carga transportada a partir da variação das dimensões principais e dos atributos do hélice.

Também é proposto um modelo de síntese baseado no Método da Raiz Cúbica, utilizando o software MatLab, a ser empregado na fase conceitual do projeto de embarcações mercantes do tipo *bulk carriers*, tanque, porta contêiner e navio de cruzeiro. Esse procedimento irá utilizar dados de embarcações semelhantes que compõem o banco de dados construído para este trabalho.

Como resultado do modelo de otimização, um modelo paramétrico é proposto. Esse propõe equações que podem ser empregadas para determinar as dimensões principais e o coeficiente de bloco de um navio em função do tipo, *bulk carrier*, tanque ou porta contêiner, da velocidade de serviço e da capacidade de carga.

A metodologia proposta no trabalho foi aplicada em estudos de caso, cuja análise permitiu apresentar uma discussão sobre o modelo e avaliar a adequação para exemplos reais.

Palavras chaves: Projeto conceitual; Embarcações mercantes; Otimização.

## ABSTRACT

This work develops a hull optimization model using Excel software and the Solver tool. This model is multi-objective and seeks to minimize engine power and maximize cargo transported from the variation of the main dimensions and propeller attributes.

It is also proposed a synthesis model based on the Method of Cubic Root using the MatLab software, to be employed in the conceptual phase of the bulk, tank, container carrier and cruise ship merchant vessels' projects. This procedure will use data from similar vessels that compose the database built for this work.

As result of the optimization model, a parametric model is proposed. This proposes equations that can be employed to determine the ship's key dimensions and block's coefficient as a function of the type *bulk carrier*, tank, or container carrier, of the service speed and load capacity.

The proposed methodology was applied on case studies, whose analysis allowed to present a discussion about the model and evaluate the suitability for real-world examples.

Key-words: Conceptual project; Merchant ships; Optimization.

## LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1-** Etapas do processo de desenvolvimento de uma embarcação
- Figura 2-** Número de *Bulk carriers* no mundo de 1980 a 2010
- Figura 3 -** Boca em função do Comprimento
- Figura 4 -** Velocidade em função do comprimento
- Figura 5 -** Coeficiente de bloco em função do comprimento
- Figura 6 -** Entradas do projeto conceitual
- Figura 7 –** Correção do Cb: a) Bulk b) Tanque
- Figura 8-** Interação do usuário com o modelo automático do projeto conceitual
- Figura 9-** Função BL (L): a) Tipo A b) Tipo B
- Figura 10 -** LOA em função do LBP
- Figura 11 –** Comparação entre os métodos para obter Cm
- Figura 12-** TEU em função do DWT
- Figura 13 -** Variação de Rf/Rt com o n° de Froude para *Bulk carrier*
- Figura 14 -** Variação de Rf/Rt com o n° de Froude para Tanque
- Figura 15 -** Variação de Rf/Rt com o n° de Froude para Porta Contêiner
- Figura 16 -** Variação de Rf/Rt com o n° de Froude para Cruzeiro
- Figura 17-** Polinômios Kt e Kq
- Figura 18-** Razão LBP/B: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro
- Figura 19-** Razão LBP/T: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro
- Figura 20-** Razão B/T: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro
- Figura 21 –** Gráfico de eficiência para uma embarcação genérica
- Figura 22 –** Resultado do modelo de otimização do projeto conceitual
- Figura 23 –** Rt em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 24 –** SHP em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 25 –** Deslocamento em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 26 –** LBP em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 27 –** B em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 28 –** T em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 29–** Cb em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner
- Figura 30 –** Exemplo do modelo de otimização do projeto conceitual

## LISTAS DE TABELAS

- Tabela 1** - Contratação de Navios pela Transpetro no PROMEF
- Tabela 2** - Ranking de construção naval mundial
- Tabela 3** – Classificação de navios graneleiros
- Tabela 4** – Classificação de navios tanques
- Tabela 5** – Principais características de navios tanques
- Tabela 6**– Síntese das embarcações semelhantes
- Tabela 7** – Valores do coeficiente  $m$
- Tabela 8** – Comparação  $C_b$
- Tabela 9** – Dimensões principais e custos
- Tabela 10** – Variáveis do modelo de otimização multiobjetivo acoplado
- Tabela 11** – Valores de  $C_{kg}$
- Tabela 12** – Valores de  $K$
- Tabela 13** – Valores de  $K_{eo}$
- Tabela 14** – Análise dos parâmetros do propulsor
- Tabela 15** – Validação do modelo de DWT para Cruzeiros
- Tabela 16** – Restrições do modelo de otimização do propulsor
- Tabela 17** – Variáveis do modelo de otimização do PC
- Tabela 18** – Restrições do modelo de otimização do PC
- Tabela 19** – Comparação das dimensões empregando o modelo de otimização
- Tabela 20** – Comparação dos pesos empregando o modelo de otimização
- Tabela 21**– Comparação do dimensionamento do propulsor
- Tabela 22**– Comparação do uso das equações empíricas

## LISTAS DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>ANTAQ</b>	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
<b>Ao</b>	Área do disco
<b>Ae</b>	Área expandida
<b>S</b>	Área molhada
<b>GT</b>	Arqueação bruta
<b>ABENAV</b>	Associação Brasileira das Empresas de Construção Naval
<b>B</b>	Boca
<b>Bmld</b>	Boca moldada
<b>BL</b>	Borda livre
<b>T</b>	Calado
<b>Hmld</b>	Calado moldado
<b>Keo</b>	Coefficiente cálculo do Weo
<b>Cf</b>	Coefficiente da resistência friccional
<b>Cm</b>	Coefficiente da seção mestra
<b>CWL</b>	Coefficiente de área de flutuação
<b>J</b>	Coefficiente de avanço
<b>Cb</b>	Coefficiente de bloco
<b>Cd</b>	Coefficiente de <i>deadweight</i>
<b>t</b>	Coefficiente de empuxo
<b>w</b>	Coefficiente de esteira
<b>Kt</b>	Coefficiente de força propulsiva
<b>Kq</b>	Coefficiente de torque
<b>Cs</b>	Coefficiente para cálculo de peso em aço
<b>m</b>	Coefficiente para determinar Cb
<b>Cp</b>	Coefficiente prismático
<b>LWL</b>	Comprimento da linha d'agua
<b>LBP</b>	Comprimento entre perpendiculares
<b>L</b>	Comprimento para cálculo da borda livre
<b>LOA</b>	Comprimento total
<b>Ckg</b>	Constante para cálculo de KG
<b>DWT</b>	<i>Deadweight</i>
<b><math>\Delta</math>, W</b>	Deslocamento
<b>DNV</b>	<i>Det norske veritas</i>
<b>Dh</b>	Diâmetro do hélice
<b>KG</b>	Distância entre a quilha e o centro de gravidade
<b>BM</b>	Distância entre centro de flutuação e metacentro
<b>KM</b>	Distância entre quilha e metacentro
<b><math>\eta_h</math></b>	Eficiência do Casco
<b><math>\eta_b</math></b>	Eficiência do hélice
<b><math>\eta_o</math></b>	Eficiência do Hélice em águas abertas
<b><math>\eta_s</math></b>	Eficiência do sistema de transmissão
<b><math>\eta_{rr}</math></b>	Eficiência rotativa relativa

<b><math>\eta</math>t</b>	Eficiência total
<b>E</b>	Empuxo E
<b>F<sub>n</sub></b>	Número de Froude
<b>FURG</b>	Fundação Universidade Federal do Rio Grande
<b>IPEA</b>	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
<b>SOLAS</b>	<i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>
<b>IMO</b>	<i>International maritime organization</i>
<b><math>\rho</math></b>	Massa específica da água
<b>F<sub>n</sub></b>	Número de Froude
<b>Z</b>	Número de pás
<b>P</b>	Passo
<b>Weo</b>	Peso de equipamento e outfit
<b>W<sub>st</sub></b>	Peso do aço
<b>W<sub>m</sub></b>	Peso do maquinário
<b>TRANSPETRO</b>	Petrobras transporte s/a
<b>PSV</b>	<i>Platform Supply vessel</i>
<b>D</b>	Pontal
<b>P<sub>t</sub></b>	Potência de empuxo
<b>SHP</b>	Potência do Motor/ <i>shaft horsepower</i>
<b>P<sub>e</sub></b>	Potência efetiva
<b>DHP ou P<sub>d</sub></b>	Potência entregue
<b>PAC</b>	Programa de Aceleração do Crescimento
<b>PROMEF</b>	Programa de Modernização e Expansão da Frota
<b>PROREFAM</b>	Programa de Renovação da Frota de Embarcações de Apoio Marítimo
<b>PMBOK</b>	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
<b>PC</b>	Projeto conceitual
<b>R<sub>f</sub></b>	Resistência friccional
<b>R<sub>t</sub></b>	Resistência total
<b>R<sub>n</sub></b>	Número de Reynolds
<b>n</b>	Rotação do Hélice
<b>TEU</b>	<i>Twenty feet equivalent unit</i>
<b>ULCC</b>	<i>Ultra large crude carriers</i>
<b>UFPE</b>	Universidade Federal de Pernambuco
<b>UFSC</b>	Universidade Federal de Santa Catarina
<b>UFPA</b>	Universidade Federal do Pará
<b>V<sub>a</sub></b>	Velocidade de Avanço
<b>V</b>	Velocidade de serviço
<b>VEL<sub>m</sub></b>	Velocidade em metros
<b>VEL</b>	Velocidade em pés
<b>VLBC</b>	<i>Very large bulk carrier</i>
<b>VLCC</b>	<i>Very large crude carriers</i>
<b><math>\nu</math></b>	Viscosidade cinemática

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. Revisão Bibliográfica .....	15
2.1. Indústria Naval Brasileira .....	15
2.2. Projeto Conceitual.....	17
2.3. Restrições de Projeto .....	18
3. LEVANTAMENTO DE DADOS: Embarcações semelhantes .....	19
3.1. Bulk carriers (Graneleiros) .....	19
3.2. Tanques .....	20
3.3. Navio Porta Contêiner .....	21
3.4. Navios de cruzeiro .....	21
3.5. Supply vessel .....	22
3.6. Análise de navios semelhantes.....	22
4. MODELO PARA O PROJETO CONCEITUAL de embarcações .....	27
4.1. Modelo de síntese baseado no Método Raiz Cúbica .....	27
i. Dimensões principais .....	28
ii. Coeficientes de forma .....	29
iii. Estabilidade.....	33
4.2. Modelo de síntese baseado em Otimização Multiobjetivo .....	35
i. Variáveis .....	37
ii. Atributos do Modelo: Dimensões .....	37
iii. Atributos do Modelo: Coeficientes de forma.....	40
iv. Atributos do Modelo: Estabilidade .....	40
v. Atributos do Modelo: Estimativa do DWT.....	41
vi. Quantidade de TEU's em Navios Porta Contêiners.....	44
vii. Atributos do Modelo: Resistência ao avanço e potência .....	44
viii. Atributos do Modelo: Integração casco-hélice / Determinação do SHP .....	48
ix. Restrições.....	51
4.3. Validação dos métodos propostos no modelo de otimização .....	54
i. Validação do modelo de estimativa de DWT .....	54
ii. Modelo de otimização da eficiência do propulsor .....	55
iii. Modelo de otimização do projeto conceitual .....	58
5. RESULTADOS .....	61

5.1. Modelo paramétrico para o projeto conceitual otimizado .....	65
6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO .....	74
7. CONCLUSÃO.....	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78
9. ANEXOS .....	80

# 1. INTRODUÇÃO

O moderno paradigma de engenharia está sempre buscando projetos mais eficientes, redução de custos, maior confiabilidade, maior velocidade, melhor desempenho; maximizando lucros ou outros atributos de desempenho de interesse. A engenharia naval acompanha essa busca. Nos últimos anos, os navios mercantes tem apresentado uma tendência de aumento das dimensões principais buscando maximizar a capacidade de carga transportada. Como consequência, o projeto estrutural, a instalação propulsora e outras etapas de projeto devem ser reavaliadas para se adaptar a essa tendência.

O projeto conceitual automático proposto neste trabalho visa aumentar a agilidade da etapa conceitual do desenvolvimento de uma nova embarcação, permitindo o aprimoramento do projeto. Além de contribuir para que projetistas e engenheiros, tenham uma ferramenta eficiente para comparar diferentes soluções para o projeto conceitual de uma embarcação descrita por meio de suas dimensões principais e coeficientes de forma.

Por fim, o presente trabalho visa difundir o conhecimento quanto à elaboração do projeto conceitual de uma embarcação, visto a recente expansão de novos estaleiros e cursos de engenharia naval no país, como por exemplo, os cursos da UFSC, FURG, UFPA e UFPE.

Do ponto de vista estratégico, é importante que países em busca de competitividade tecnológica detenham condições de desenvolver e aprimorar seus projetos de engenharia internamente. O projeto básico de embarcação é uma atividade pouco realizada no Brasil, que tradicionalmente importa seus projetos navais de outros países, como pode ser visto nos dados apresentados na Tabela 1.

A respeito da importância do projeto conceitual de embarcações ser feito no Brasil, o diretor da Oceânica Offshore, Marcos Cueva, concedeu ao Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) entrevista em fevereiro de 2013 onde comenta sobre a carência de projetos conceituais desenvolvidos no país e a ineficiência de se utilizar esses projetos.

“O que se tem hoje são projetos conceituais que vêm de fora do país e muitas vezes com detalhamento sendo feito no Brasil. Para um navio projetado para cabotagem, não tem sentido pegar um projeto norueguês do Mar do Norte, utilizá-lo aqui e esperar o mesmo efeito”.  
(CUEVA, 2014, p. 40).

Os dados da Petrobras Transporte (Transpetro), apresentados na Tabela 1, mostram que poucos navios que desfrutam do Programa de Modernização e Expansão da Frota (PROMEF) encomendaram seus projetos de empresas locais.

**Tabela 1** - Contratação de Navios pela Transpetro no PROMEF

<b>Tipo de navio</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Empresa do Projeto</b>	<b>País da empresa</b>
Panamax	4	Projemar	Brasil
Suezmax CON	10	Samsung	Coréia
Suezmax DP	4	IHI	Japão
Aframax CON	5	IHI	Japão
Aframax DP	3	IHI	Japão
Gazeiro	8	Ghenova	Espanha

Fonte: (TRANSPETRO, 2014), adaptada pelo autor.

O presente trabalho se insere justamente neste contexto, propondo uma metodologia para o desenvolvimento automático do projeto conceitual de embarcações mercantes. O escopo apresentado inclui uma revisão dos tipos de navios com grande demanda no país, os requisitos do armador com maior influência no projeto naval e as normas propostas por sociedades classificadoras para novas embarcações produzidas.

Tradicionalmente, o projeto dessas embarcações baseia-se em um procedimento cíclico e iterativo que utiliza formulações empíricas e semi-empíricas necessárias e procedimentos normativos estabelecidos pelas Sociedades Classificadoras.

Assim, um dos objetivos deste trabalho é avaliar qualitativamente as diversas formulações existentes visando diminuir os custos associados ao navio e reduzir a quantidade de iterações feitas em um projeto conceitual de embarcações.

A eficiência do projeto de uma embarcação mercante, pode ser medida considerando-se a capacidade de carga da embarcação (DWT<sup>1</sup>) em relação ao custo de construção (eventualmente associados ao porte da embarcação) e ao custo operacional (eventualmente associado a potência SHP exigida para a velocidade de serviço).

O modelo de projeto desenvolvido visa maximizar a capacidade de carga (DWT) e minimizar a potência instalada (SHP), obtendo-se assim, projetos com a maior eficiência. Tradicionalmente essa abordagem é feita minimizando-se a Resistência ao Avanço da embarcação. No entanto, o presente trabalho se diferencia por propor uma abordagem que inclui o projeto do propulsor no projeto conceitual da embarcação.

É importante observar que o custo operacional do navio pode ser associado ao consumo de combustível e, eventualmente, pode ser reduzido aumentando a eficiência do propulsor ou reduzindo a resistência ao avanço do casco.

---

<sup>1</sup> A rigor, o valor de DWT corresponde a capacidade de carga mais a quantidade de combustível, óleo e água armazenadas na embarcação. No entanto, para os navios estudados, esses valores são pequenos quando comparados a capacidade de carga e podem ser desconsiderados.

Dentro deste contexto são estudados apenas os atributos principais da embarcação e, por essa razão, o escopo deste trabalho não inclui o desenvolvimento do arranjo, geração da superfície do casco e apêndices da embarcação, bem como eventuais análises associadas à fabricação, *seakeeping*, avaria, projeto estrutural, entre outros.

Para realizar esse objetivo, foi desenvolvido um procedimento para o projeto conceitual de embarcações, por meio de uma planilha Excel que reúne as formulações para estimativas iniciais das dimensões principais, coeficientes de forma e verificação da estabilidade, bem como restrições para os coeficientes de forma, obtidas por meio do estudo de embarcações semelhantes.

O início do trabalho conta com uma ampla revisão bibliográfica do novo cenário da construção naval no Brasil e as expectativas para a projeção de novos navios, bem como a caracterização das diferentes fases do projeto de uma embarcação.

A seguir apresenta-se o banco de dados de navios semelhantes elaborado e que contém as dimensões principais, deslocamento, capacidade de carga e ano de lançamento de diversos navios pesquisados na literatura. Os dados obtidos foram tratados eliminando eventuais discrepâncias e descartando os dados de embarcações com mais de 15 anos de construção.

O quarto capítulo apresenta a construção do modelo de síntese do projeto conceitual baseado no método da raiz cúbica e o modelo de otimização multiobjetivo. Também neste capítulo, este modelo é validado em três etapas: validação do modelo de estimativa de carga transportada, validação do modelo de otimização da eficiência do propulsor e validação do modelo de otimização do projeto conceitual.

No capítulo 5, testa-se o modelo de otimização desenvolvido e os resultados do trabalho são exibidos, ou seja, as equações que correlacionam as dimensões principais e o coeficiente de forma ao DWT são apresentadas.

Por fim, um estudo de caso é realizado empregando o modelo desenvolvido e as equações geradas, esses são então comparados as características de uma embarcação real e o resultado avaliado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Indústria Naval Brasileira

O início dos anos 2000 apresentou uma expansão na construção naval, que por décadas esteve estagnada no país. As recentes políticas públicas e a exploração do pré-sal incentivaram o reaquecimento da indústria naval brasileira.

Estudos realizados pelo IPEA (2014) apontaram alguns fatores importantes que contribuíram para o crescimento do setor naval no Brasil.

“Em 2007, a indústria naval foi inserida nos objetivos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), do governo federal, como um dos setores de maior relevância para o cumprimento dos objetivos estratégicos do país de geração de emprego e renda. Foram assegurados, assim, os recursos necessários para os investimentos em infraestrutura e para a expansão e a modernização dos estaleiros nacionais, uma condição indispensável para o atendimento da demanda por navios e plataformas.” (IPEA, 2014, p. 8).

O reaquecimento da indústria naval coloca o país em posição relevante na indústria naval mundial. Com 144 navios em construção, o Brasil ocupa a quarta posição no *ranking* da construção naval mundial divulgado pela *Clarksons Shipping Intelligence* em março de 2014. É importante observar que, neste *ranking*, o Brasil está à frente de experientes e tradicionais construtores navais como Estados Unidos, Holanda e Noruega, como pode ser visto nos dados apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Ranking de construção naval mundial**

<b>País</b>	<b>Navios em Construção</b>
China	2293
Coréia do Sul	890
Japão	850
Brasil	144
EUA	119
Filipinas	87
Bangladesh	65
Holanda	62
Vietnam	61
Noruega	60

Fonte: Clarksons Shipping Intelligence, 2014, elaborada pelo autor.

A Associação Brasileira das Empresas de Construção Naval e Offshore (ABENAV, 2014) acredita que o mercado naval está aquecido e a expectativa é de movimentar mais de US\$ 100 bilhões até 2020, gerando mais de 40 mil empregos até 2017.

Como resultado deste cenário, novos estaleiros (como o Atlântico Sul e o Rio Grande) estão em construção no país para atender a essa demanda e o setor busca agora atingir nível de competitividade equiparado com os seus competidores globais.

Outra questão relevante é a idade média da frota de navios que operam no país. Segundo o anuário estatístico de 2013 da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), essa idade média é de 17,4 anos. Considerando que a vida média de um navio mercante é de 25 anos, existe, portanto, uma expectativa de renovação de grande parte da frota nos próximos 10 anos.

Uma das instituições que fomenta a indústria naval é o Fundo da Marinha Mercante. Criado em 2004 destina-se a prover recursos para o desenvolvimento da indústria naval brasileira. Outro programa que incentiva a construção de navios é o PROMEF que se iniciou em 2007 e tem como objetivo obter um índice de nacionalização de 70%, desenvolvendo e modernizando os estaleiros brasileiros.

Por fim, o Programa de Renovação da Frota de Apoio Marítimo (PROREFAM), objetiva reduzir a dependência dos afretamentos de embarcações estrangeiras, promovendo a construção de embarcações no Brasil com índice de nacionalização de 75%. Esse programa prevê a construção de 146 embarcações entre 2008 e 2014, de acordo com dados de 2011 da superintendência de navegação marítima e de apoio.

Um dos principais setores que propulsionaram o mercado naval foi o de óleo e gás. A Petrobras, maior investidora na área, afirmou em discurso realizado no início de 2014 que comprará no exterior sempre que não for atendida pela indústria local, o que demonstra a fragilidade da indústria naval brasileira.

Outra citação do IPEA (2014) que comprova a importância de aumentar a quantidade de escritórios especializados em projetos navais no país é apresentada a seguir:

“Para atender de maneira eficiente a tais investimentos, faz-se necessária a existência de empresas especializadas em engenharia de projetos navais no Brasil. Assim como em outras áreas, os serviços de desenvolvimento de projetos navais demandam trabalho intelectual muito intenso, em que a experiência, a qualificação e a criatividade dos engenheiros e dos projetistas tornam-se os principais ativos competitivos da empresa. Esta atividade envolve risco, uma vez que a responsabilidade pelas especificações, a eficiência e a segurança do equipamento recaem, em grande medida, sobre as empresas de projetos”. (IPEA, 2014, p. 9)

Esse novo cenário da construção naval exige que os projetos de novas embarcações sejam desenvolvidos no país e apresentem um maior índice de nacionalização. Esta nova década é favorável para o desenvolvimento de novos navios e para isso é preciso fomentar estudos na área, qualificar a mão de obra e modernizar os estaleiros brasileiros.

## 2.2. Projeto Conceitual

O *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK, 2013) define projeto como um esforço empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo. No âmbito da engenharia, “projetar”, é entendido como uma atividade humana, intelectual e que a partir do atendimento das restrições e necessidades, gera uma solução utilizando como recursos a criatividade, experiência e conhecimento técnico.

O termo *project* refere ao projeto de uma nova embarcação inclui desde a construção do escopo e recolhimento dos requisitos do armador até o planejamento de descarte desse produto. Desta forma o projeto é união de várias atividades a serem planejadas e executadas com um propósito específico de um novo produto. Já o *design* remete a um ciclo de ações para melhoria de uma ou mais características do produto, por exemplo, o projeto estrutural de uma embarcação abrange a definição do problema, a análise, busca, tomada de decisão, definir especificações, modificar parâmetros e solucionar o problema. O qual, neste exemplo, consiste em reduzir a quantidade de material empregado na construção do casco, satisfazendo as normas das Sociedades Classificadoras.

Rozenfeld et al. (2006) defende que o custo das modificações é cada vez maior conforme se avança nas etapas do desenvolvimento do produto. Com base no trabalho de Gale (2008, p. 4), pode-se representar as fases do projeto de uma embarcação por meio do fluxograma mostrado na Figura 1.

**Figura 1-** Etapas do Processo de Desenvolvimento de uma Embarcação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o projeto conceitual é uma fase inicial da concepção do produto e, portanto, decisões equivocadas nessa fase, eventualmente, irão comprometer o custo final do produto. Por outro lado, uma concepção do produto mais adequada irá resultar em menor retrabalho ao decorrer das novas etapas e com isso uma economia, eventualmente, significativa.

No projeto conceitual, o projetista se depara com vários *trade-off* e um grande número de combinações dos parâmetros para a determinação das características da embarcação. Segundo Rozenfeld et al. (2006) na fase de concepção do produto, soluções de projeto são geradas e estudadas detalhadamente até encontrar a melhor solução possível que seja capaz de atender às especificações concebidas na fase informacional.

Na fase informacional são recolhidos os dados do armador e definidas as restrições do projeto. No projeto conceitual estes dados são processados, analisados e utilizados para a definição das características principais da embarcação a ser projetada. Também é feito um estudo da viabilidade econômica que é determinante para o processo de tomada de decisão do armador.

O IPEA (2014) define o projeto básico de uma embarcação como a união de três etapas, o projeto informacional, conceitual e contratual. Na metodologia proposta no presente trabalho, essas especificações serão obtidas por meio de um processo iterativo visando a maximização da eficiência da embarcação mercante representada por uma função objetivo. A função objetivo é um conjunto de parâmetros de desempenho da embarcação para os quais se deseja obter a melhor solução.

### **2.3. Restrições de Projeto**

Existem diversas organizações que fornecem aos projetistas procedimentos para o desenvolvimento de uma embarcação. No presente trabalho, esses procedimentos normativos definem as restrições de projeto incorporadas ao modelo de otimização proposto.

A *International Maritime Organization* (IMO) é uma importante organização e auxilia na comunicação da navegação global. No site da IMO são listadas as responsabilidades dessa organização: estabelecer medidas que visam melhorar a segurança do transporte marítimo internacional; prevenção da poluição gerada por embarcações, desenvolver regras que visam facilitar o tráfego marítimo internacional e questões legais à cerca da navegação. Quando um governo se torna signatário de uma convenção da IMO esse concorda em inserir tal convenção em sua própria legislação. Uma das convenções da IMO de maior interesse para projeto de embarcação é a *International Convention for the Safety of Life at Sea* (SOLAS), responsável por estabelecer aspectos acerca da estrutura, da estabilidade, de máquinas, de instalações elétricas, de meios de salvamento e de diversas outras características associadas ao projeto de navios.

Também existem os regulamentos as Sociedades Classificadoras, responsáveis por estabelecerem e fiscalizarem a aplicação de normas técnicas antes, durante e depois de uma embarcação ser lançada. Se o armador exige um determinado certificado é importante que o projetista siga as instruções da norma e que a construção atenda e seja supervisionada pela Sociedade Classificadora escolhida. Por fim, existem os regulamentos da autoridade marítima que no caso brasileiro são emitidos pela Marinha Brasileira (NORMAM).

### 3. LEVANTAMENTO DE DADOS: EMBARCAÇÕES SEMELHANTES

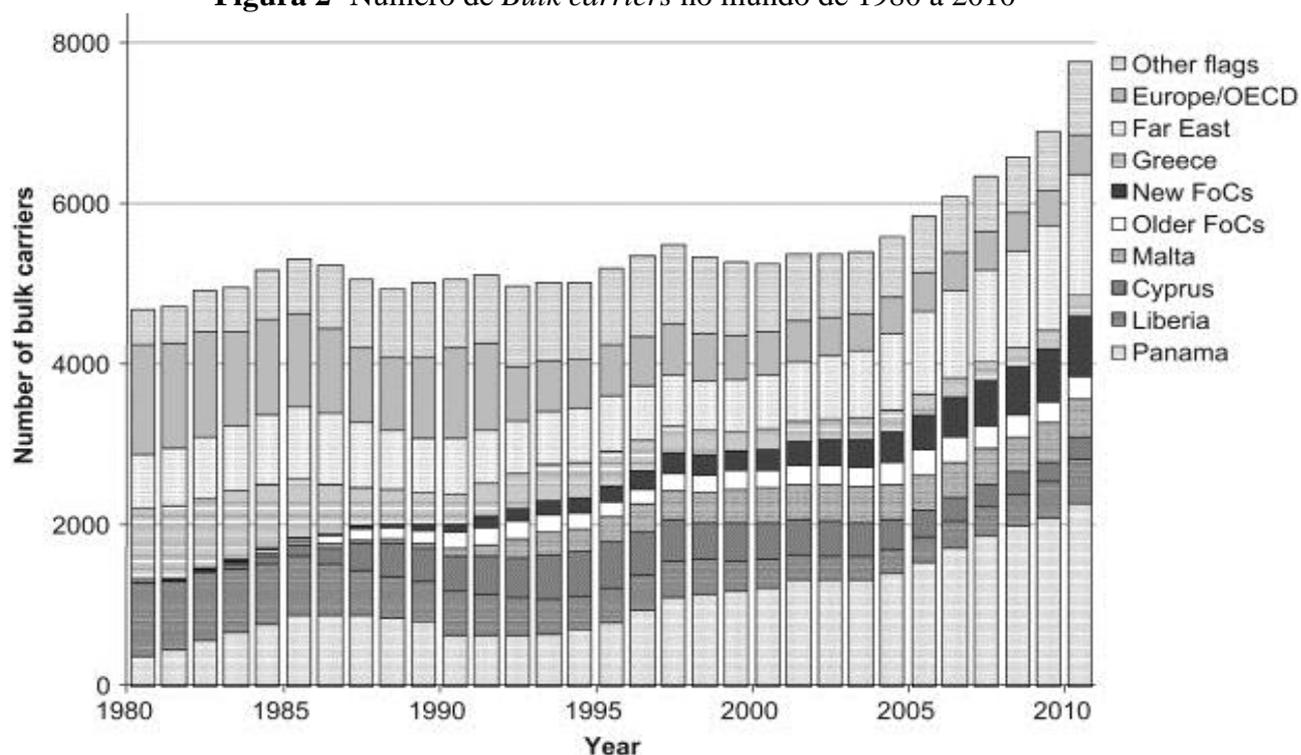
Neste trabalho será apresentado o levantamento de dados realizado acerca do cinco tipos de embarcações mercantes, cuja principal característica é o transporte de pessoas e cargas. Entre os tipos de navios considerados, destacam-se os *Bulk carriers*, Porta-Contêineres, Tanques, Navios de passageiros e *Supply Vessel*.

#### 3.1. *Bulk carriers* (Graneleiros)

Navios do tipo graneleiro transportam cargas secas e a granel. A principal característica deste tipo de embarcações é a presença de grandes escotilhas (aberturas no convés) destinadas a movimentação das cargas nos porões.

Roberts (2013) aponta um crescimento na participação de navios graneleiros no total da frota mercante mundial, passando de 27% em 1980 para 38% em 2010, em especial no período entre 2005 e 2010, como observado na Figura 2.

**Figura 2-** Número de *Bulk carriers* no mundo de 1980 a 2010



Fonte: (Lloyd's Register of Shipping, 2011).

Os navios graneleiros são classificados de acordo com o DWT. Na Tabela 3 são mostradas as características típicas de cada uma das classes.

**Tabela 3** – Classificação de navios graneleiros

	DWT [10 <sup>3</sup> T]		L [m]	B [m]	T [m]
	Min	Max	Médio	Médio	Médio
<b>SMALLSIZE</b>	5	8	101	17.1	6.3
<b>HANDYSIZE</b>	10	35	137	23.2	8.4
<b>HANDYMAX</b>	35	55	175	28.0	10.5
<b>PANAMAX</b>	60	80	227	32.2	12.3
<b>CAPE SIZE</b>	80	250	252	41.0	14.6
<b>VLBC *</b>	250	400	309	54.0	18.6
<b>VALEMAX</b>		> 400	365	66.0	23.0

(\*) VLBC significa *Very Large Bulk carrier*.

Fonte: Anpad (2013). Elaborada pelo autor.

Segundo Rubiato et al. (2011, p. 38), o graneleiro Vale Brasil, lançado em 2011, foi o primeiro de uma série chamada Chinamax ou Valemax. Essa série possuem dimensões recordes para navios graneleiros. O Vale Brasil tem 365 m de comprimento, 66 m de boca, 23 m de calado e DWT de 400 10<sup>3</sup>t.

### 3.2. Tanques

Os navios tanques são projetados para transportar cargas líquidas a granel. De acordo com Trindade (2012), a frota de tanques representa cerca de 50% da frota de navios mercantes mundial. A carga desse tipo de embarcação é principalmente os derivados de petróleo, mas também são transportadas cargas de vinho, óleos alimentares, água entre outras. Essas embarcações podem ser classificadas de acordo com a Tabela 4.

**Tabela 4** – Classificação de navios tanques

	DWT [10 <sup>3</sup> T]	
	MIN	MAX
<b>HANDYSIZE</b>	15	50
<b>PANAMAX</b>	60	80
<b>AFRAMAX</b>	80	120
<b>SUEZMAX</b>	120	170
<b>VLCC *</b>	200	300
<b>ULCC **</b>		>300

(\*) VLCC e (\*\*) ULCC significam *Very Large Crude Carriers* e *Ultra Large Crude Carriers*, respectivamente  
Fonte: Trindade, 2012, adaptada pelo autor.

Konovessis (2012) complementa a descrição de algumas dessas classes incluindo valores médios do comprimento, boca, calado, peso morto e capacidade de carga em volume, mostrado na Tabela 5.

**Tabela 5** – Principais características de navios tanques

	<b>LBP</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>D</b> [m]	<b>DWT</b> [t]
<b>PANAMAX</b>	219	32,2	19,8	70000
<b>AFRAMAX</b>	238	43,0	21,0	105357
<b>SUEZMAX</b>	264	48,0	23,1	158900
<b>VLCC</b>	318	58,0	31,3	309000

Fonte: Konovessis, 2012, adaptada pelo autor.

Em 1992 a Marpol introduziu uma importante emenda que afeta o projeto de navios tanques: a obrigatoriedade do duplo casco, a fim de evitar derramamento de líquidos no mar.

### **3.3. Navio Porta Contêiner**

O navio porta-contêiner é concebido para o transporte de contêineres<sup>2</sup>. Embarcações porta-contêineres realizam transportes regulares entre portos pré-estabelecidos com velocidade de serviço relativamente alta quando comparadas a outras embarcações mercantes, em torno de 22 nós.

É importante que o projetista esteja atento a estabilidade dessa embarcação, visto que o convés irá abrigar carga, elevando o KG e reduzindo a estabilidade transversal da embarcação.

O projeto estrutural também requer atenção, em virtude das grandes aberturas existentes no convés exigidas para a rápida movimentação dos contêineres e que se estendem de bombordo à boreste da embarcação.

Tradicionalmente a superestrutura é localizada a ré, no entanto, tendências modernas colocam a superestrutura mais avante, aumentando a altura das pilhas de contêineres localizados à ré da superestrutura.

### **3.4. Navios de cruzeiro**

Navio especializado em transporte de pessoas com opções para lazer e entretenimento. Esse tipo de navio oferece espaços variados para os passageiros, como piscina, quadra, academia, restaurante, teatro, cinema, boate, entre outros. É importante ressaltar que esse tipo de embarcação não deve cumprir apenas o transporte do ponto inicial ao final, mas deve suprir as necessidades dos passageiros dentro do próprio navio durante toda a viagem.

<sup>2</sup>Para estes há uma padronização a qual é chamada de 1 TEU para 20 pés

Segundo a Market Share (2014) a indústria mundial de cruzeiros é estimada em US\$ 37,1 bilhões em 2014, um acréscimo de 2,3% em relação a 2013. Também houve um aumento de 3% no número de passageiros anuais, sendo o dado atual de 21,6 milhões.

Assim como o navio porta contêineres, o navio de cruzeiro possui um KG elevado, em virtude do tamanho da superestrutura, exigindo uma maior atenção ao estudo da estabilidade transversal da embarcação.

### **3.5. *Supply vessel***

Os *Supply vessel* são navios imprescindíveis para o suporte logístico para a produção de petróleo em alto mar. O *Platform supply vessel (PSV)* é um tipo comum de navio de apoio à plataforma, sendo responsável pelo transporte de óleo combustível, água potável, produtos químicos, água industrial, tubulações, da costa até a plataforma, além de às vezes retornar com produção até a costa.

O crescimento da frota de PSV foi superior a 90% no período de 2000-2007, ou seja, um crescimento de 9,6% a.a. No início de 2007 a frota era de 460 embarcações, segundo relatório do BNDES (2008).

O comprimento característico varia de 60 a 100 metros. É comum que essas embarcações sejam equipadas com sistema de posicionamento dinâmico para facilitar a operação e evitar colisões com as plataformas.

### **3.6. *Análise de navios semelhantes***

Interpreta-se por navios semelhantes embarcações que exercem a mesma função. Ou seja, o banco de dados será constituído por cinco tipos de navios que exercem cinco atividades diferentes. Exemplo, navios do tipo graneleiro irão ter como função carregar granéis sólidos.

O primeiro passo para encontrar as dimensões da nova embarcação foi recolher dados de navios semelhantes àqueles propostos neste trabalho. Os dados foram recolhidos nos sites DNV Exchange (2014) e World-ships (2014) e da revista Significant Ships (2003 – 2007). As características de cada uma das embarcações pesquisadas foram: deslocamento, porte bruto (DWT), arqueação bruta (GT), comprimento total (LOA), boca (B), pontal (D), calado (T), comprimento entre perpendiculares (LBP), comprimento da linha d'água (LWL), velocidade de serviço (VEL), coeficiente de bloco (Cb), TEU's, nº de passageiros e ano de lançamento. Os anexos 1 a 5 trazem os valores pesquisados para os cinco tipos de embarcação, nota-se que

para dados não encontrados da embarcação o valor zero foi atribuído. Entretanto a análise desses dados foi realizada excluindo tais valores.

O banco de dados construído será utilizado ao longo deste trabalho como fonte de dados, fornecendo relações típicas entre os parâmetros, valores limites e regressões empíricas. Na Tabela 6 é mostrada a análise estatística simplificada dos dados para uso da rotina desenvolvida.

**Tabela 6 – Síntese das embarcações semelhantes**

	Ano	Deslocamento [10 <sup>3</sup> t]	DWT [10 <sup>3</sup> t]	GT [10 <sup>3</sup> t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vel. [knots]	CB	CD	TEU's / Passageiros	
Bulk carrier	min	2003	0.00	26.74	17.03	169.90	170.00	152.91	23.70	13.60	9.70	13.60	0.7700	0.6633	
	max	2014	109.84	206.00	106.95	299.92	294.00	269.93	50.00	24.90	18.50	17.40	0.8800	0.9401	
	med	2010	56.50	69.63	43.48	207.52	195.52	186.77	33.02	18.18	12.64	14.42	0.8390	0.8055	
	Desvio padrão		17.87	47.04	26.45	36.42	29.98	32.78	5.66	3.02	2.04	0.53	0.0255	0.0671	
	qtd.	53	38	75	53	75	67	75	75	74	67	72	35	37	
Tanque	min	2003	46.00	18.00	14.65	156.20	144.20	140.58	25.60	16.50	9.00	14.00	0.7892	0.6522	
	max	2013	364.45	318.33	160.78	333.00	320.00	299.70	60.00	31.00	22.63	25.20	0.9599	0.8782	
	med	2008.1429	165.95	136.06	75.25	250.71	238.20	225.64	43.16	22.72	15.04	15.50	0.8428	0.8283	
	Desvio padrão		113.51	98.71	48.97	55.52	54.35	49.97	11.13	4.52	4.04	1.75	0.0453	0.0638	
	qtd.	42	38	42	42	42	39	42	42	41	38	42	35	38	
Porta container	min	2000	24.39	11.50	9.83	144.10	136.10	129.69	22.00	11.20	7.30	18.70	0.6572	0.5733	1000
	max	2014	142.80	115.32	113.04	339.62	331.54	305.66	48.30	27.50	15.20	27.00	0.7887	0.7730	10000
	med	2008	71.75	48.80	42.42	235.13	232.44	211.62	32.62	18.56	12.16	22.65	0.7023	0.7236	4021.0652
	Desvio padrão		31.41	25.70	25.77	55.29	52.87	49.76	6.03	4.07	1.81	2.23	0.0537	0.0711	2468.9933
	qtd.	59	11	59	59	53	47	53	59	52	46	55	8	9	46
Cruzeiro	min	2002	6.80	1.00	11.70	113.70	99.20	102.33	20.20		5.00	16.40	0.3973	0.1471	100
	max	2014	79.50	15.00	225.28	360.00	329.89	324.00	47.00		10.00	29.60	0.6621	0.2210	5186
	med	2007	35.88	8.96	104.72	282.51	252.74	254.26	34.34		8.07	23.01	0.5674	0.1776	2889.5625
	Desvio padrão		34.40	3.67	56.82	71.60	64.74	64.44	6.89		1.29	3.17	0.1195	0.0319	1368.2898
	qtd.	20	4	20	20	20	19	20	20		20	19	4	4	16
Supply vessel	min	2005	2.40	1.66	1.60	57.95	54.90	52.16	14.00	5.50	4.30	10.00	0.7079	0.6185	
	max	2014	4.87	5.20	5.16	93.60	86.60	84.24	21.00	9.00	7.20	16.00	0.7678	0.7031	
	med	2009	3.47	3.61	3.30	78.50	71.60	70.65	17.45	7.39	6.00	12.99	0.7273	0.6643	
	Desvio padrão		1.15	0.89	1.16	10.00	8.40	9.00	1.92	0.85	0.74	1.63	0.0275	0.0335	
	qtd.	28	6	34	34	34	32	34	34	34	31	25	6	6	

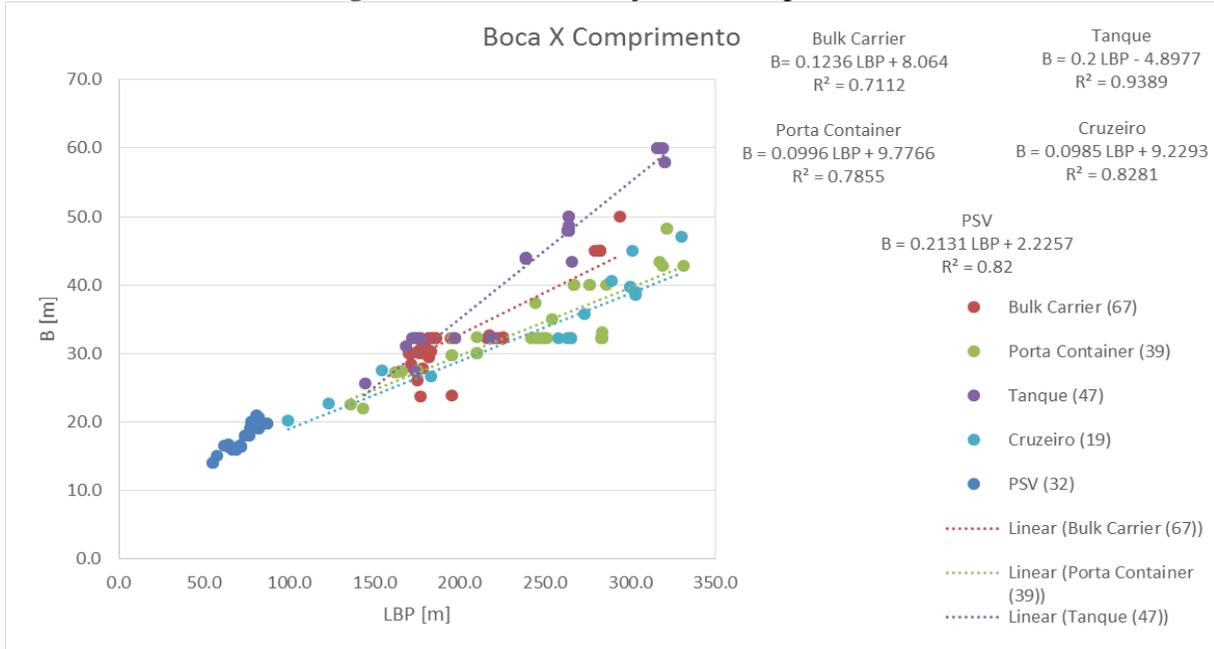
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na tabela acima, para cada parâmetro considerado, existem cinco valores estatísticos: o mínimo, o máximo, a média, o desvio padrão e a quantidade de dados obtidos para o parâmetro para cada tipo de embarcação.

Os dados recolhidos das embarcações semelhantes foram manipulados e gráficos de dispersão foram gerados com os diversos valores de X e Y. A partir dos dados levantados, tentou-se estabelecer modelos de correlação lineares para cada um dos principais coeficientes de forma.

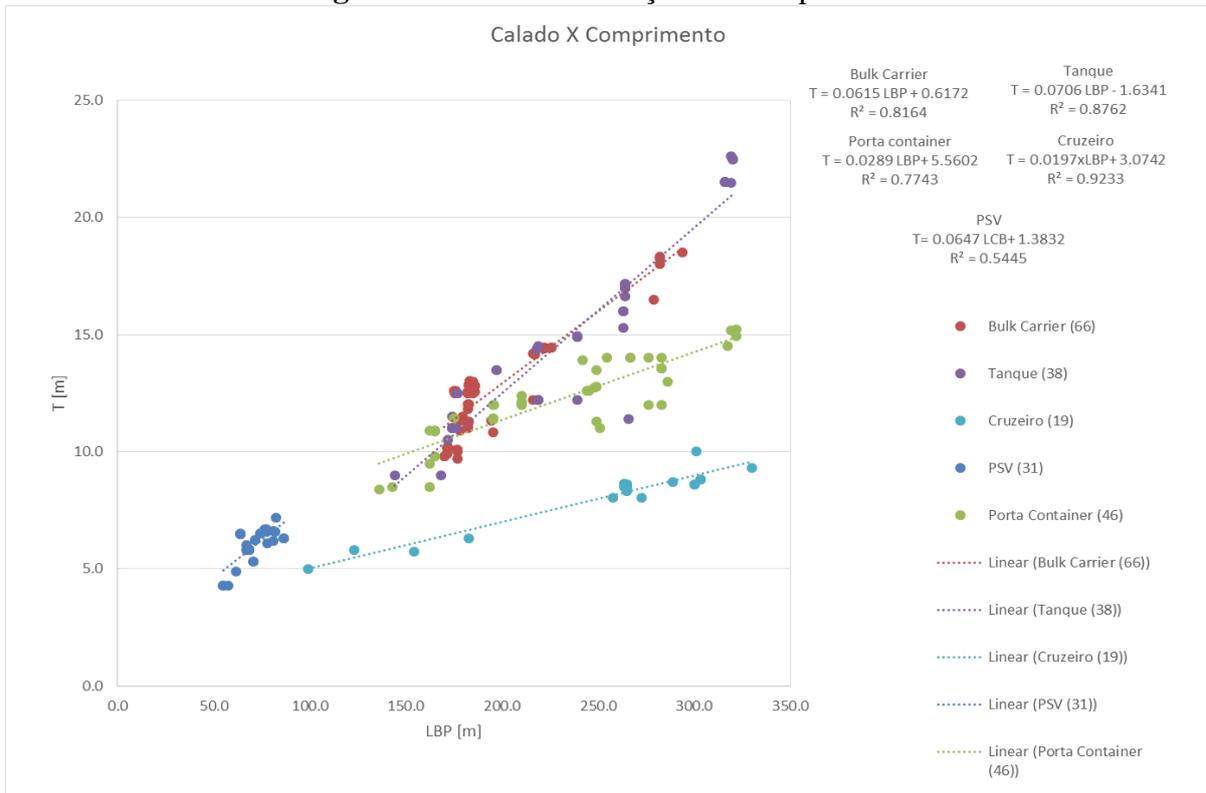
Na Figura 3 é mostrada a regressão que correlaciona a boca em função do comprimento da embarcação para cada tipo de navio considerado. Por fim, na Figura 4 são mostradas as regressões que correlacionam o calado e o comprimento da embarcação.

**Figura 3 - Boca em função do Comprimento**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 4 – Calado em função do Comprimento**



Fonte: Elaborada pelo autor.

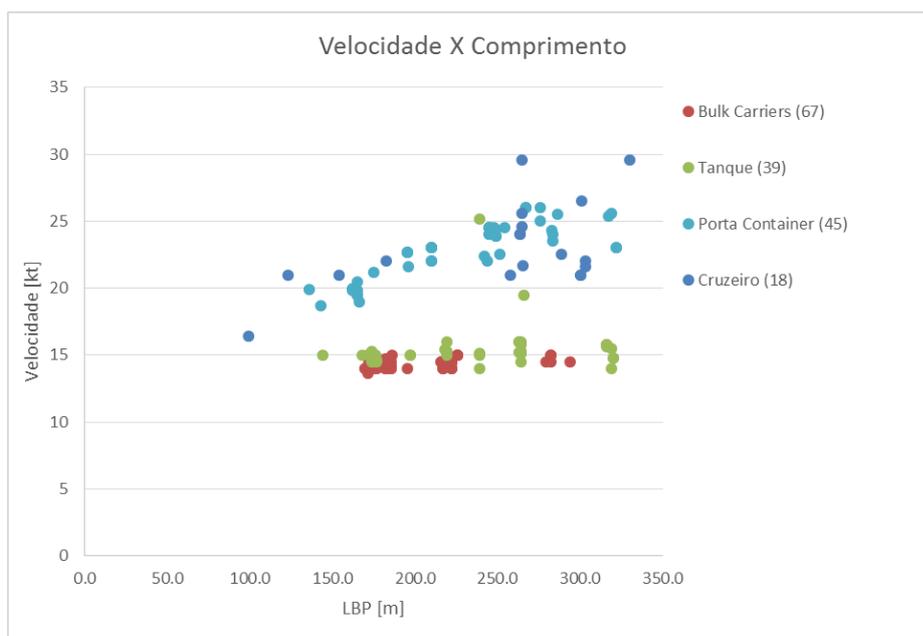
Com base nas figuras 3 e 4, pode-se observar que algumas regressões apresentaram boa aderência com os dados obtidos dos navios semelhantes, chegando a coeficientes de correlação 'R' acima de 85%.

No entanto, muitas das correlações apresentaram baixa aderência com os dados levantados, destacando-se a relação entre o calado e o comprimento dos navios *Supply Vessel*. Isto ocorre, pois os navios PSV podem, executar diferentes funções (combate a incêndio, transporte de pessoas, posicionamento de ancoragem, reboque, transporte de carga líquida, transporte de carga granel, pesquisa sísmica, combate a derramamento de óleo, entre outras), além de apresentarem hélices que ultrapassam a linha da quilha do casco, distorcendo a relação entre o calado e o comprimento do navio. Além disso, navios PSV são projetados para determinadas regiões de operação e por isso um banco de dados mais adequado deveria considerar a região de operação do navio. Por isso, esse tipo de navio será excluído do escopo deste trabalho.

Mesmo que algumas regressões tenham apresentado boa aderência com os dados levantados, a variabilidade existente, sugere que a utilização de valores médios ou regressões lineares é uma estratégia pouco adequada para a determinação dos coeficientes  $L_{bp}/B$ ,  $L_{bp}/T$  e  $C_b$  mesmo nas fases iniciais do projeto de uma embarcação.

Outra análise importante diz respeito a velocidade de serviço da embarcação. Na Figura 4 é mostrado um gráfico de dispersão da velocidade em função do comprimento da embarcação. É importante observar que essa relação está associada ao número de Froude, o qual é determinante na resistência ao avanço da embarcação devido a formação de ondas. Nesse caso, uma embarcação maior pode, eventualmente, navegar a uma velocidade maior com o mesmo número de Froude.

**Figura 4 - Velocidade em função do comprimento**





## 4. MODELO PARA O PROJETO CONCEITUAL DE EMBARCAÇÕES

### 4.1. Modelo de síntese baseado no Método Raiz Cúbica

Neste capítulo é descrito o procedimento automatizado para realização do projeto conceitual de embarcações mercantes utilizando o Método da Raiz Cúbica proposto por Barras (2004, p. 5). Neste método o comprimento de uma nova embarcação é calculado com base no comprimento de uma embarcação de referência existente no banco de dados de navios semelhantes e que possua DWT muito próximo a aquele que se deseja projetar.

Para efeitos práticos, considera-se que uma embarcação pode ser considerada uma embarcação de referência se o DWT apresentar uma diferença inferior a 10% em relação ao DWT da embarcação que se deseja projetar.

Para utilizar a rotina proposta é preciso que esta esteja localizada na mesma pasta do banco de dados dos navios semelhantes. O usuário irá interagir com a rotina apresentada no anexo 6, definindo algumas características do projeto, as quais são mostradas na Figura 6.

**Figura 6** - Entradas do projeto conceitual

Definir tipo de embarcação

- Bulk Carrier
- Tanque
- Porta Container
- Cruzeiro

Requisitos do armador

- DWT estimado
- Velocidade de serviço

Cálculo do LBP e LOA

- Valor encontrado a partir do método da raiz cúbica

Restrições da rota

- Comprimento máximo
- Calado máximo
- Boca máxima

Definir o coeficiente de segurança da borda livre.

Escolha do método para encontrar  $C_m$

- Kerlen
- HSVA

Escolha do método para encontrar CWL

- Schneekluth
- Parson

Definir KG/H (Barras sugere valores entre 0.6 e 0.7)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira entrada irá definir o tipo de embarcação a ser projetada. Ao definir essa variável o arquivo em Excel será acionado e uma matriz com os dados da embarcação do tipo escolhido será criada. Caso o usuário queira adicionar novos navios, basta incluir as informações da nova embarcação ao banco de dados.

Os dados de entrada são os requisitos de projeto comumente informados pelo armador. Já as decisões a serem tomadas envolvem métodos e coeficientes que o engenheiro deve escolher para a estimativa preliminar de desempenho da embarcação em projeto.

### *i. Dimensões principais*

Barrass (2004, p. 5) propõem estimar o comprimento do navio utilizando o Método da Raiz Cúbica, o qual é mostrado na eq. (1).

$$LBP_n = \left[ \frac{Dwt * \left( \frac{LBP_b}{Bmld} \right)^2 * \left( \frac{Bmld}{Hmld} \right)}{\rho * Cb * Cd} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Para cada navio existente no banco de dados que esteja dentro da tolerância de 10% em relação ao valor do DWT requerido, a rotina calcula o comprimento do novo navio utilizando a eq. (1). O mesmo método será utilizado para estimar o LOA da nova embarcação, enquanto o LWL é estimado como 90% do LOA.

Uma vez que o comprimento esteja definido, pode-se determinar a borda livre (BL) da embarcação, que, segundo *International Convention on Load Lines* (1966, p. 60- 65) terá o valor mínimo determinado em função do LBP da embarcação. Há duas divisões para embarcações na convenção: navio tipo A e navio tipo B. O primeiro é referente a tanques e o segundo é aplicado as demais embarcações mercantes.

A borda livre determinada é a distância medida verticalmente, a meia nau, da parte superior da linha do convés até a parte superior da linha de carga correspondente. A convenção fornece valores mínimos de borda livre para comprimentos variando de 24 a 365 m com intervalo de 1 m.

O usuário poderá escolher um coeficiente para determinar a borda livre, sendo esse multiplicado pela borda livre mínima. Essa decisão poderá ser tomada através da análise de embarcações semelhantes, da funcionalidade da embarcação ou de requisitos de projeto.

A boca e o calado da embarcação serão determinados a partir dos coeficientes de forma (LBP/B e LBP/H) da embarcação de referência utilizada na determinação do LBP. Por fim o pontal da embarcação será obtido somando-se o calado de projeto com a borda livre.

Após realizar a estimativa inicial de comprimento, boca e calado é necessário verificar se esses valores estão dentro das restrições de projeto, as quais podem ser oriundas dos portos e canais pertencentes a rota de navegação da embarcação. Caso alguma restrição seja violada, a solução é marcada como inviável.

## ii. Coeficientes de forma

O primeiro coeficiente de forma a ser determinado é o coeficiente de bloco. A eq. (2) mostra a definição do coeficiente de bloco.

$$C_b = \frac{\text{deslocamento}}{\text{densidade} * \text{LBP} * B_{mld} * H_{mld}} \quad (2)$$

Como o deslocamento ainda não foi definido o  $C_b$  será estimado por formulações empíricas propostas por dois autores, o usuário poderá optar modelo que melhor se adequa ao projeto desenvolvido. O primeiro modelo, mostrado na eq. (3), foi proposto por Alexander *apud* Barras (2004, p. 8-9).

$$C_b = 1 - m \left( \frac{VEL}{LBP^{0,5}} \right) \quad (3)$$

A velocidade deve estar em [kt] e o comprimento em [m]. O valor do coeficiente  $m$  irá variar com o tipo de embarcação escolhido, como mostrado na Tabela 7.

**Tabela 7** – Valores do coeficiente  $m$

<b>Tipo</b>	<b><math>m</math></b>
<i>Bulk carriers</i>	0.234
Tanques (20 < DWT < 50)	0.195
Tanques (50 < < 200)	0.182
Porta	0.265
Cruzeiro	0.254

Fonte: Barras, 2004. Elaborado pelo autor.

Segundo Watson (1998, p.75) e Ventura (20--?, p. 9) outra fórmula para estimar Cb foi proposta por Katsoulis para embarcações do tipo *bulk carrier*, tanque e porta contêiner, o qual é mostrado na eq. (4):

$$C_b = 0,8217 * f * LBP^{0,42} B^{-0,3072} T^{0,1721} VEL^{-0,6135} \quad (4)$$

O valor do coeficiente *f* irá variar de acordo com o tipo de embarcação, sendo 1.04 para *bulk carriers*, 0.99 para navios tanques e 1.00 para navios porta contêineres.

Para comparar os dois métodos de estimativa propostos, calculou-se o Cb pelo método de Katsoulis e pelo método de Alexander para cada uma das embarcações existentes no banco de dados de navios semelhantes. O erro médio foi calculado a partir da média da diferença no valor de Cb estimado por cada um dos métodos e o valor real de Cb da embarcação.

A Tabela 8 mostra esses dados citados acima, a quantidade de Cb calculado e quantos foram comparados para encontrar o erro. Nota-se que a embarcação tipo cruzeiro não possui nenhuma informação nas colunas referentes ao método Alexander, já que este não pode ser empregado neste tipo de navio.

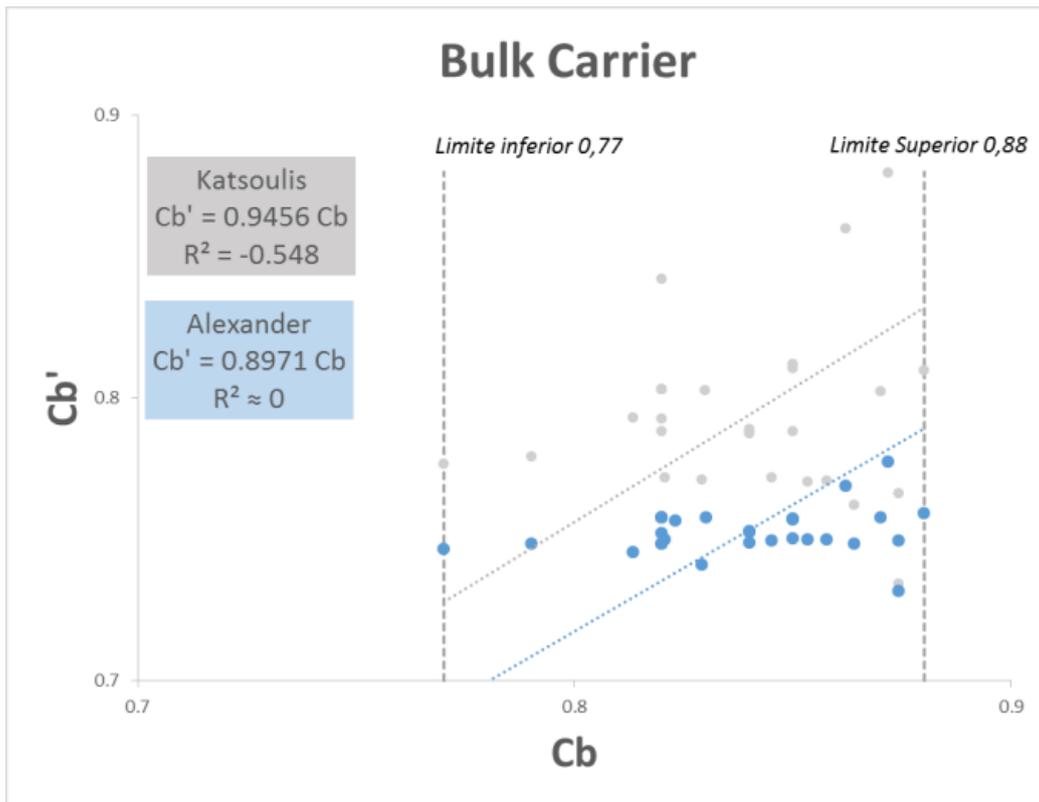
**Tabela 8 – Comparação Cb**

	Cb Katsoulis	Erro Médio	Cb Alexander	Erro Médio
	QTD.	QTD.	QTD.	QTD.
<b>Bulk carrier</b>	<b>0.80</b>	<b>6%</b>	<b>0.76</b>	<b>11%</b>
	43	27	44	28
<b>Tanque</b>	<b>0.77</b>	<b>9%</b>	<b>0.82</b>	<b>4%</b>
	38	35	39	35
<b>Porta Contêiner</b>	<b>0.62</b>	<b>7%</b>	<b>0.59</b>	<b>12%</b>
	44	6	45	6
<b>Cruzeiro</b>	<b>0.62</b>	<b>10%</b>		
	18	4		

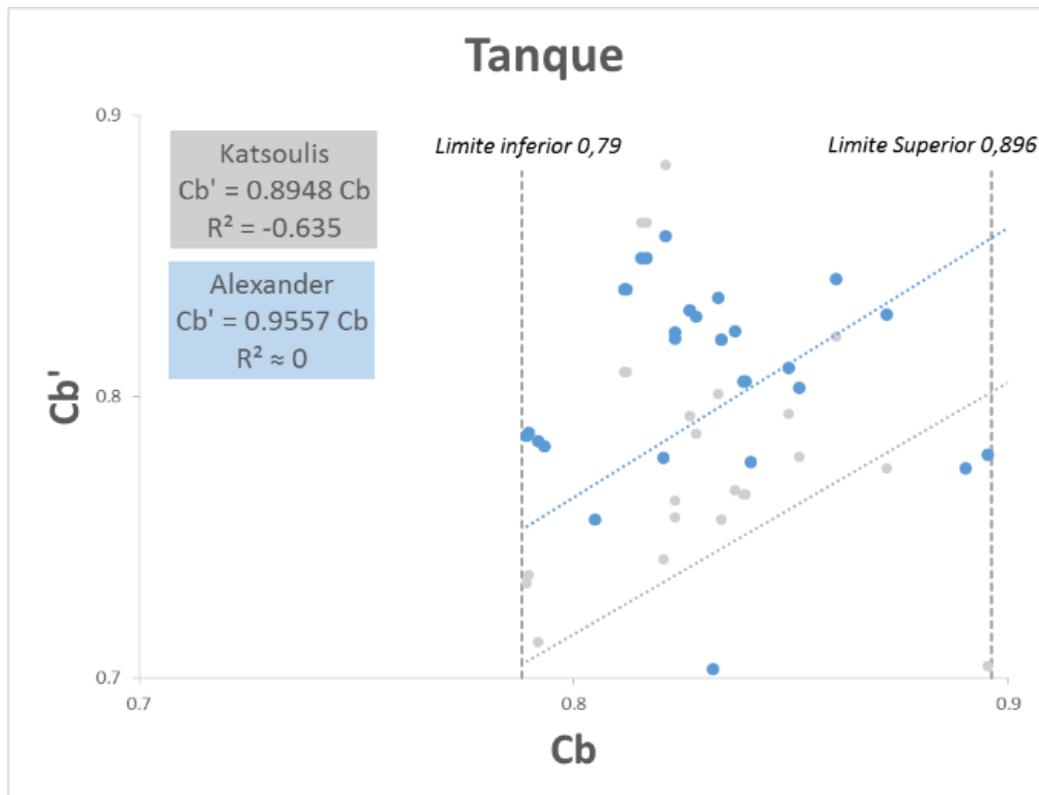
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor visualizar a aderência de ambos os métodos mencionados, na Figura 7 são apresentados os gráficos de dispersão e equações propostas para amenizar o erro para embarcações do tipo bulk (a) e tanque (b). Os gráficos foram gerados com os dados de Cb dos navios semelhantes e o Cb calculado por cada método.

**Figura 7** – Correção do Cb: a) Bulk b) Tanque



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como a aderência para a fórmula de correlação de  $C_b$  foi aproximadamente zero, optou-se por não utilizar nenhum dos métodos acima para determinar  $C_b$ . Esse será obtido a partir do  $C_d$  da embarcação e o DWT requerido pelo armador.

O coeficiente de seção mestra ( $C_m$ ) é definido pela eq. (5):

$$C_m = \frac{\text{Área da SM imersa}}{B \cdot T} \quad (5)$$

Para a estimativa do  $C_m$ , apresenta-se duas formulações, ambas são funções do  $C_b$ . Kerlen (1970) *apud* Ventura (20--?, p. 10) propôs a eq. (6) para tal estimativa.

$$C_m = 1,006 - 0,0056 C_b^{-3,56} \quad (6)$$

HSVA *apud* Ventura (20--?, p. 11) propôs a eq. (7) para estimar  $C_m$ .

$$C_m = \frac{1}{1 + (1 - C_b)^{3,5}} \quad (7)$$

O coeficiente prismático ( $C_p$ ) é determinado pela eq. (8).

$$C_p = \frac{\nabla}{\text{Área da SM imersa} \cdot LWL} \quad (8)$$

O  $C_p$  pode ser reescrito de tal forma que suas variáveis sejam o  $C_b$  e  $C_m$ , como mostra a eq. (9).

$$C_p = \frac{C_b}{C_m} \quad (9)$$

O coeficiente da área de flutuação ( $C_{wl}$ ) é definido pela eq. (10).

$$Cwl = \frac{\text{Área de flutuação}}{LWL * B} \quad (10)$$

As eq. (11-14) trazem formulações para estimativa de Cwl. As três primeiras foram sugeridas por Schneekluth *apud* Parsons (2003, p. 16) e variam com a forma do casco, as equações estão na ordem U, normal e V. Por outro lado, a última equação é proposta por Parsons (2003, p. 16) e é válida apenas para *bulks*, tanques e porta contêiners.

$$Cwl = 0,95Cp + 0,17 \sqrt[3]{(1-Cp)} \quad (11)$$

$$Cwl = \frac{(1+2Cb)}{3} \quad (12)$$

$$Cwl = \sqrt{Cb - 0,025} \quad (13)$$

$$Cwl = \frac{Cb}{0,471 + 0,551Cb} \quad (14)$$

### iii. *Estabilidade*

Por fim, o modelo irá verificar a estabilidade da embarcação. Para análise da estabilidade da embarcação a altura metacêntrica (GM) foi calculada e a embarcação é considerada instável se o valor de GM for negativo.

Conforme pode ser visto na eq. (15), para calcular o GM, três outros parâmetros foram definidos: centro de carena (KB), raio metacêntrico (BM), e centro de gravidade (KG), os quais serão estimados por meio da formulação semi-empírica descrita nesta secção.

$$GM = KB + BM - KG \quad (15)$$

A estimativa de KB e BM será realizada utilizando três autores diferentes. Segundo Schneekluth e Bertram (1998, p.10) as eq. (16-19) trazem modelos para as estimativas de KB e BM.

$$KB = T \left( \frac{5}{6} - \left( \frac{1}{3} \frac{Cb}{Cwp} \right) \right) \quad (16)$$

A eq. 16 foi proposta por Normand *apud* Schneekluth e Bertram (1998, p.10).

$$KB = T (0,9 - 0,3C_m - 0,1C_b) \quad (17)$$

A eq. 17 foi proposta Schneekluth e Bertram (1998, p.10).

$$BM = \frac{(0,096 + (0,89C_{wp}^2)) B^2}{12 T C_b} \quad (18)$$

A eq. 18 foi sugerida por Normand *apud* Schneekluth e Bertram (1998, p.11).

$$BM = \frac{0,0372 (2C_{wp} + 1)^3 B^2}{12 * T * C_b} \quad (19)$$

A eq. 19 foi o método proposto por Bauer *apud* Schneekluth e Bertram (1998, p.11).

Barrass (2004, p. 43) apresenta outras equações para cálculo do KB, BM e KG, como mostrado nas eq. (20-23).

$$KB = T \left( 1 + \frac{C_b}{C_{wp}} \right) \quad (20)$$

$$BM = \frac{0,084 C_{wp}^2 B^2}{T * C_b} \quad (21)$$

O coeficiente da área de linha d'água ( $C_{wp}$ ) utilizado para os cálculos de estabilidade pode ser estimado pela eq. (22) proposta por Schneekluth e Bertram (1998, p.11).

$$C_{wp} = (1/3) * \left( 1 + 2 \left( \frac{C_b}{C_m} \right)^{0,5} \right) \quad (22)$$

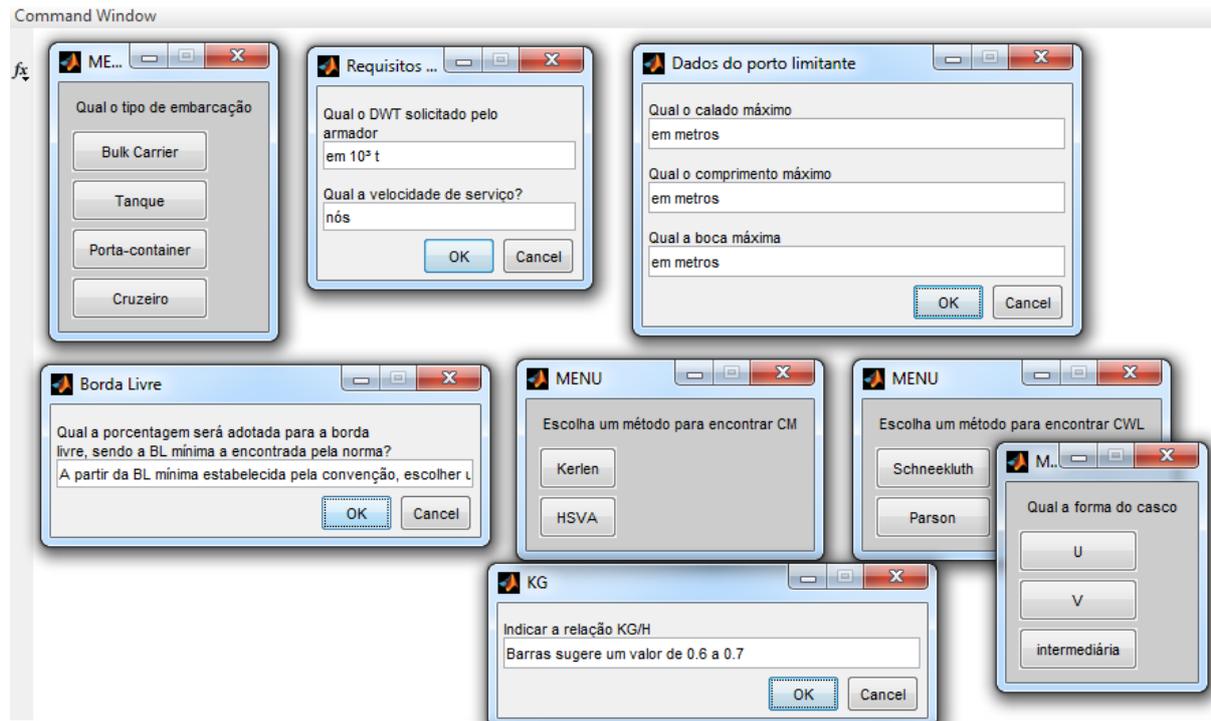
A eq. (23) é função do calado e da constante  $C_{kg}$ , que deve ser informada pelo usuário.

$$KG = C_{kg} * T \quad (23)$$

Os dados de saída calculados pela rotina desenvolvida são: deslocamento<sup>3</sup>, volume deslocado, LBP, LOA, LWL, B, pontal, T, Cb, Cm, Cp, Cwl, VEL, BL, viabilidade de comprimento, viabilidade de boca máxima, viabilidade de calado máximo, DWT, GM\_Barras, GM\_Normand e GM\_Schneekluth\_Bauer.

A Figura 8 mostra as entradas que serão solicitadas ao usuário pelo modelo automático do projeto conceitual desenvolvido e descrito neste capítulo.

**Figura 8-** Interação do usuário com o modelo automático do projeto conceitual



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este modelo pode ser facilmente manipulado pelo usuário. Em menos de um minutos é possível obter as estimativas iniciais das dimensões, coeficientes de forma e estabilidade da embarcação para todos os navios do banco de dados que estiver dentro da faixa de DWT fornecida pelo usuário.

#### 4.2. Modelo de síntese baseado em Otimização Multiobjetivo

Este capítulo irá abordar o procedimento para construção do modelo de otimização para o projeto conceitual de embarcações mercantes, que busca minimizar a potência do motor (SHP) ao mesmo tempo que maximiza a capacidade de carga (DWT).

<sup>3</sup> Medido em 10<sup>3</sup> toneladas.

É importante destacar que a minimização da potência do motor considera o processo de integração casco-hélice, determinando, simultaneamente as dimensões principais e coeficientes de forma que minimizam a resistência ao avanço do casco e a geometria do propulsor com maior eficiência propulsiva.

Para caracterizar o problema é necessário que a função objetivo, variáveis, parâmetros e restrições sejam definidas. A função objetivo refere-se a um atributo de desempenho da embarcação para o qual deseja-se otimizar o projeto, podendo ser maximizada ou minimizada.

A variável é definida como o parâmetro de projeto que pode ser alterado com o intuito de solucionar a função objetivo. Os parâmetros são dados constantes do modelo ao longo de um processo de otimização e as restrições são os limitantes da solução.

A seguir serão expostos alguns parâmetros de projeto empregados no problema. Também será feita uma discussão sobre a interferência desses sobre os custos envolvendo a embarcação.

Segundo Schneekluth e Bertram (1998, p. 25) o coeficiente de bloco afeta significativamente a resistência. Com isso há um conflito de projeto, já que aumentar o  $C_b$  significa aumentar custos operacionais e sua redução implica em uma redução da carga transportada, caracterizando de fato, um problema de otimização multiobjetivo.

A interferência do  $C_b$  na resistência exemplifica um dos vários conflitos existentes no projeto conceitual de embarcações. Na Tabela 9 é apresentada uma síntese da interferência das dimensões principais no custo de construção e operação das embarcações. Também relata a interferência no deslocamento, sendo que esse é importante para maximizar o DWT.

**Tabela 9** – Dimensões principais e custos

<b>Dimensão</b>	<b>Capacidade e Custo construção</b>	<b>Custo Operacional</b>
<b>L</b>	Estratégia mais cara para aumentar o deslocamento	Reduz
	Aumenta o custo de produção	
<b>B</b>	Aumenta o custo (menos significativo que aumento de L)	Aumenta
	Contribui para um aumento de D melhorando a estabilidade	
<b>T</b>	Estratégia mais eficaz para aumentar o deslocamento	Reduz
<b>C<sub>b</sub></b>	Estratégia com menor custo para aumentar deslocamento e DWT	Aumenta

Fonte: Watson (1998, p. 74). Adaptada pelo autor.

O projetista deve considerar as limitações impostas pela rota e os portos que o navio irá atracar, já que o calado, boca e comprimento serão dimensionados de tal forma a satisfazer essas restrições. Isso pode limitar a quantidade de carga transportada ou afetar o desempenho hidrodinâmico. Há inúmeras possibilidades a disposição do projetista para dimensionar um navio com determinado DWT, VEL e restrições de rota. Neste capítulo será proposto um modelo de otimização do projeto conceitual que almejam facilitar as decisões de projeto.

### *i. Variáveis*

Os parâmetros do modelo de otimização são o tipo de embarcação, a velocidade de serviço e os limites de comprimento, boca e calado. O modelo irá empregar as formulações já discutidas no capítulo anterior para determinar coeficientes de forma e o GM da embarcação.

Na Tabela 10 são mostradas as variáveis do problema de otimização acoplado (casco-hélice) utilizadas na maximização do DWT e minimização do SHP.

**Tabela 10** – Variáveis do modelo de otimização multiobjetivo acoplado

Comprimento	[m]	Lbp
Boca	[m]	B
Calado	[m]	T
Coeficiente de bloco		Cb
Número de pás		Z
Diâmetro do hélice	[m]	Dh
Passo/diâmetro		P/D

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante observar que a variável “número de pás” precisa ser um valor inteiro. O tratamento da variável para valores inteiro é realizado pelo algoritmo de otimização implementado no programa Excel.

Essas variáveis serão utilizadas para determinar os atributos da embarcação, os quais foram divididos em seções. Essas foram chamadas de dimensões, coeficientes de forma, estabilidade, características hidrodinâmica, pesos e características do propulsor.

### *ii. Atributos do Modelo: Dimensões*

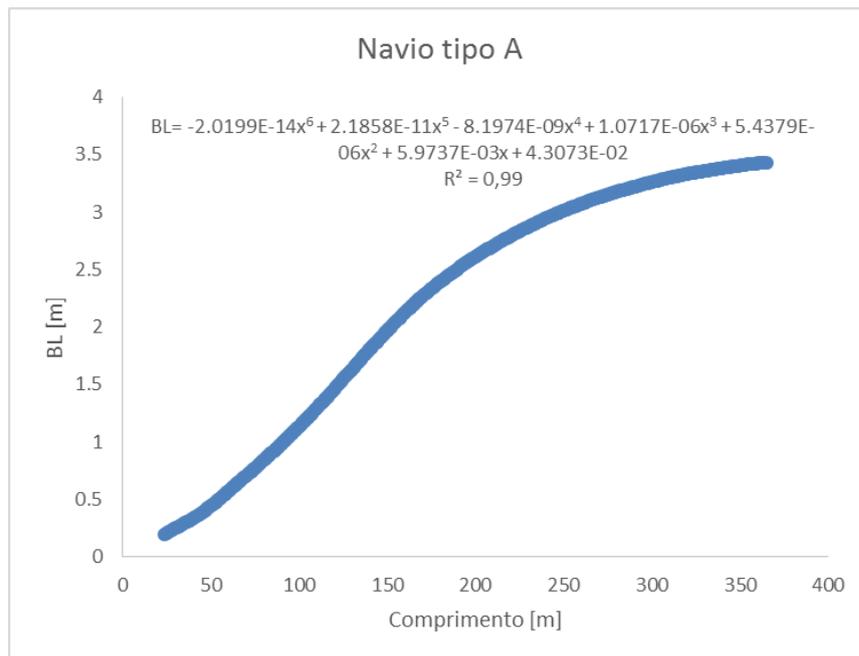
Além das dimensões definidas nas variáveis de projeto, o modelo desenvolvido estima outras características geométricas importantes da embarcação: borda livre (BL), pontal,

comprimento total (LOA) e comprimento na linha d'água (LWL), as quais serão estimadas a partir das variáveis definidas.

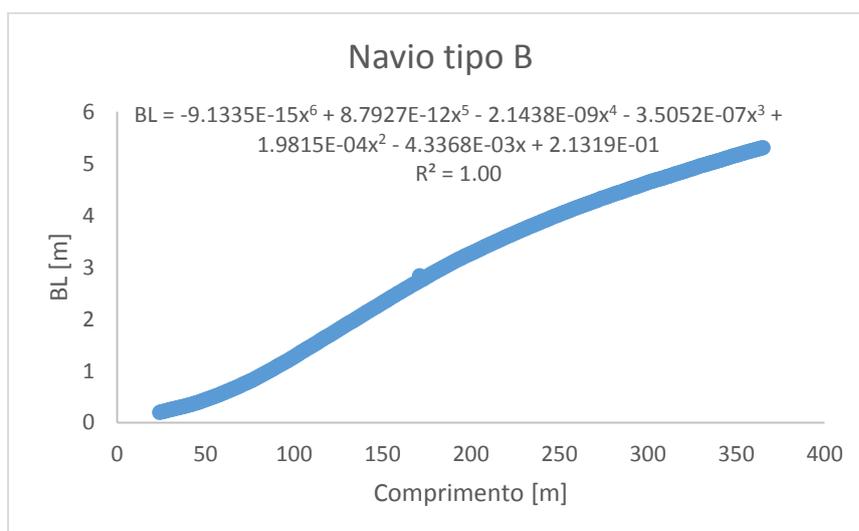
A BL será determinada de acordo com a *International Convention on Load Lines* (1966, p. 60- 65). Mas para este modelo optou-se por utilizar equações que descrevessem o comportamento da BL em função do comprimento (L), as quais são mostradas na Figura 9.

É importante observar que o comprimento (L) utilizado para encontrar a borda livre é definido como o maior valor entre 96% LOA e LBP.

**Figura 9-** Função BL (L): a) Tipo A b) Tipo B



(a)

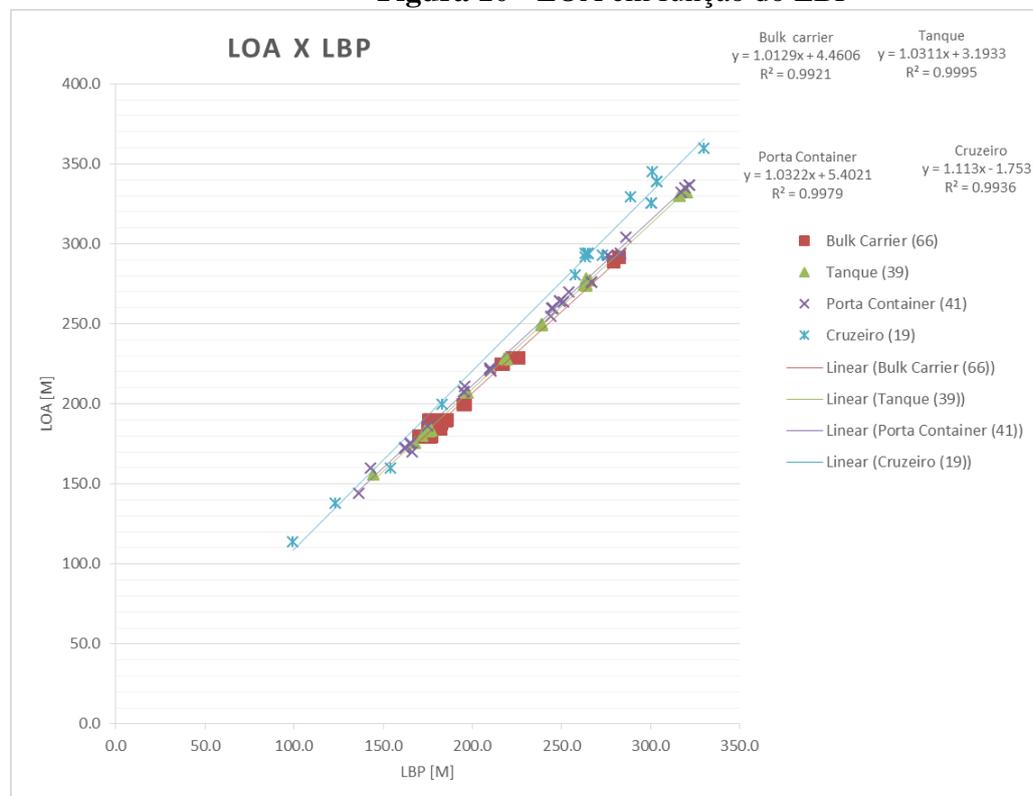


(b)

Fonte: *International Convention on Load Lines* (1966, p. 60- 65). Elaborada pelo autor.

Para estimar LOA em função de LBP, empregou-se equações lineares obtidas através dos dados das embarcações semelhantes, as quais são mostradas na Figura 10.

**Figura 10 - LOA em função do LBP**



Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico da Figura 10 apresenta a variação do LOA com LBP. Estas duas dimensões são muito próximas e, percebe-se que para os quatro tipos de embarcação o comportamento é muito semelhante e uma equação, com aderência de 99%, modela a relação entre esses parâmetros. Os navios de cruzeiro são os que apresentam maior diferença entre esses dois parâmetros. Dada a alta aderência, essa equação foi incorporada diretamente no modelo de otimização desenvolvido.

O comprimento na linha d'água (LWL) é determinado como 90% do LOA. E o pontal (D) é obtido a partir de sua definição, como mostra a eq. (24).

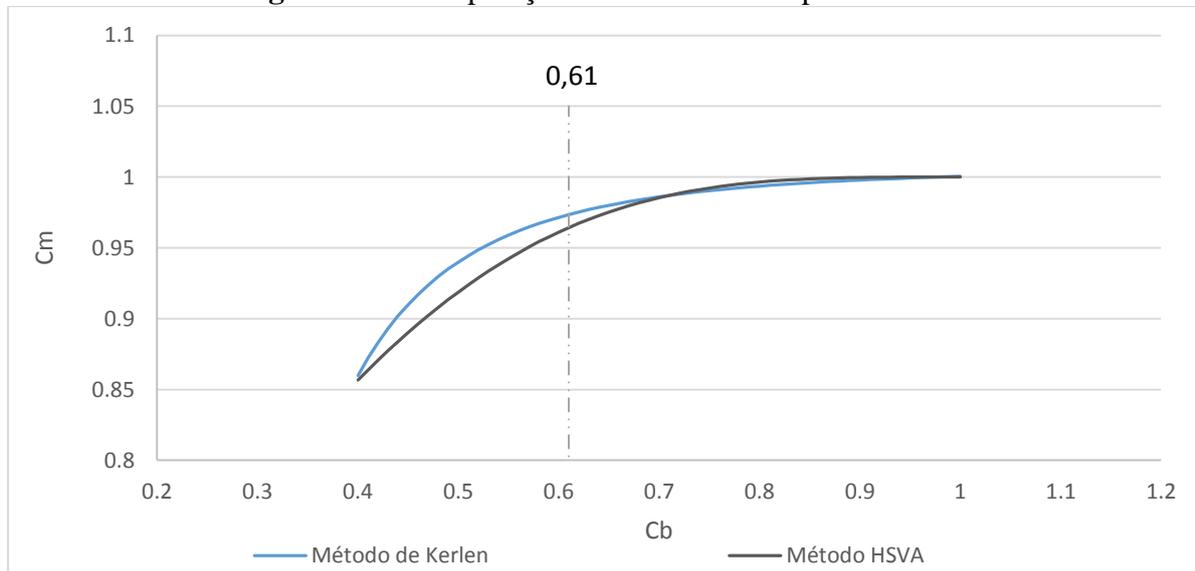
$$D = T + BL \quad (24)$$

### iii. Atributos do Modelo: Coeficientes de forma

As formulações utilizadas no subcapítulo 4.2 foram também empregadas na construção do modelo de otimização para encontrar os coeficientes de forma,  $C_m$ ,  $C_p$  e  $C_{wl}$ .

A fim de verificar qual método melhor modela a estimativa de  $C_m$ , ambos os métodos foram plotados variando-se o valor de  $C_b$ . Para valores de  $C_b$  maiores que 0,61 os dois métodos apresentam uma discrepância menor que 1%, esse  $C_b$  é comum para as embarcações *bulk carrier*, tanque e porta contêiner. O  $C_m$  empregado será a média dos dois métodos. A Figura 11 mostra a comparação realizada e discutida acima.

**Figura 11** – Comparação entre os métodos para obter  $C_m$



Fonte: Elaborada pelo autor.

O  $C_{wl}$  irá empregar a eq. (14) que é proposta por Parsons (2003, p. 16) e foi apresentada no subcapítulo 4.1.3.

### iv. Atributos do Modelo: Estabilidade

As formulações empregadas para encontrar  $GM$  serão as mesmas que as apresentadas no subcapítulo 4.3. O  $GM$  utilizado no critério de estabilidade será o mínimo obtido entre os três métodos.

A constante  $C_{kg}$  que é uma entrada do usuário no modelo anterior, neste é determinada de acordo com o tipo de navio. A Tabela 11 mostra os valores adotados neste trabalho que foram determinados a partir dos valores propostos por Schneekluth e Bertram (1998, p. 150).

**Tabela 11 – Valores de Ckg**

<i>Tipo</i>	<i>Ckg</i>
<i>Bulk carrier</i>	0.57
<b>Tanque</b>	0.53
<b>Porta Contêiner</b>	0.61
<b>Cruzeiro</b>	0.7

Fonte: Schneekluth e Bertram (1998, p. 150). Elaborada pelo autor.

v. *Atributos do Modelo: Estimativa do DWT*

Watson (1998, p. 145) define DWT como a soma de toda a carga (ex. grãos, óleos, contêiners), passageiros e bagagens, tripulação, combustível, água doce e outros. O autor também cita que é comum o armador solicitar o DWT requerido, ficando o projetista responsável por alocar as demais cargas, correspondentes ao LWT.

Para determinar o deslocamento correspondente ao DWT, deve-se utilizar o carregamento a plena carga a qual ocorre, normalmente, na saída do porto. Nessa situação o navio está com a maior capacidade de combustível e maior capacidade de carga carregada.

Para a definição da capacidade de carga foi feita uma simplificação com o objetivo de expressar DWT em função das variáveis e parâmetros de modelo. As eq. (25 – 28) apresentam a simplificação de DWT.

$$DWT = \Delta - LWT; \quad DWT [\Delta, LWT] \quad (25)$$

$$LWT [LBP, B, D, \Delta] \quad (26)$$

$$\Delta [LBP, B, T, VEL] \quad (27)$$

$$DWT [LBP, B, T, VEL, D]) \quad (28)$$

Harvald e Jensen (1992) *apud* Schneekluth e Bertram (1998, 154) analisou dados de navios de carga construídos nos estaleiros dinamarqueses de 1960 a 1990 com um número substancial construído em 1980 a 1990. A formulação sugerida por esses autores possibilita estimar o peso de aço ( $W_{st}$ ) da embarcação com uma precisão de 10% (SCHNEEKLUTH; BERTRAM, 1998), a formulação é descrita na eq. (29).

$$W_{st} = LBP * B * D * C_s \quad (29)$$

A variável  $C_s$  da fórmula acima é um coeficiente que é dependente da espessura da chapa e como esse parâmetro  $t$  é determinado em uma fase mais avançada do projeto, não sendo escopo do PC, um outro método será empregado.

O outro método é sugerido por Watson e Gilfillan *apud* Parsons (2003, p. 23) e considera que o  $W_{st}$  é composto por três parcelas, peso do casco, peso da superestrutura e peso da casaria do convés. Para este trabalho a última parcela será desconsiderada. As equações para encontrar  $W_{st}$  são mostradas nas eq. (30 - 34)

$$W_{st} = K * E^{1,36} [1 + 0,5(C_b' - 0,7)] \quad [t] \quad (30)$$

$$C_b' = C_b + (1 - C_b) \left[ \frac{0,8D - T}{3T} \right] \quad (31)$$

$$E = E_{casco} + E_{sup} \quad (32)$$

$$E_{casco} = L(B + T) + 0,85L(D - T) \quad (33)$$

$$E_{sup} = 0,85 \sum_i L_{s_i} H_{s_i} \quad (34)$$

A constante  $K$  apresentada na eq. (30) irá ser determinada a partir do tipo de navio e a faixa do coeficiente  $E$  da eq. (32). A Tabela 12 exhibe os valores de  $K$  propostos por Parsons (2003, p. 24).

**Tabela 12 – Valores de K**

<b>Tipo</b>	<b>K</b>	<b>E min</b>	<b>E max</b>
<b>Bulk carrier</b>	0.029	3000	15000
<b>Tanque</b>	0.032	1500	40000
<b>Porta Contêiner</b>	0.031	6000	13000
<b>Cruzeiro</b>	0.038	5000	15000

Fonte: Parsons (2003, p. 24). Elaborada pelo autor.

A eq. (34) é referente ao peso da superestrutura. As variáveis comprimento da superestrutura ( $L_s$ ) e altura da supestrutura ( $H_s$ ) são determinadas pelas eq. (35) e eq. (36).

$$H_s = 0,7 * LOA * \sin(\sin^{-1} \frac{BL}{500}) \quad (35)$$

$$L_s = 0,08 LOA \quad (36)$$

De acordo com a ABS (2014) a altura da superestrutura (H<sub>s</sub>) deve garantir a visibilidade no passadiço a 500 m à frente da embarcação ou duas vezes o comprimento da embarcação, o que for menor. Adota-se neste trabalho a estimativa mais conservadora, ou seja uma visibilidade de 500 m independente do comprimento da embarcação. Já o comprimento da superestrutura L<sub>s</sub> foi definido com base em embarcações semelhantes e pode ser estimado como 8% do comprimento total.

Outra componente do peso leve da embarcação é o peso do maquinário (W<sub>m</sub>) que inclui peso do motor, máquinas auxiliares, propulsor, eixo e peças. Barrass (2004, p. 30) propõe uma fórmula empírica, eq. (37), para estimar W<sub>m</sub> em função da potência do motor, SHP [kN].

$$W_m = 0,075 * SHP + 300 \quad [t] \quad (37)$$

Por fim, o último componente de LWT é o peso de equipamentos e *outfits*, o qual pode ser estimado por meio da formulação proposta por Schneekluth e Bertram (1998, p. 167 e 168), a qual é apresentada nas eq. (38) e eq. (39). É importante observar que esta formulação difere para cada tipo de navio através do coeficiente *k*.

$$W_{eo, \text{cruzeiro}} = 0,05 * \nabla \quad [t] \quad (38)$$

$$W_{eo} = K_{eo} * LBP * B \quad [t] \quad (39)$$

A Tabela 13 mostra os valores do coeficiente K<sub>eo</sub> para cálculo de W<sub>eo</sub> sugeridos por Schneekluth e Bertram (1998, p. 167-168).

**Tabela 13 – Valores de Keo**

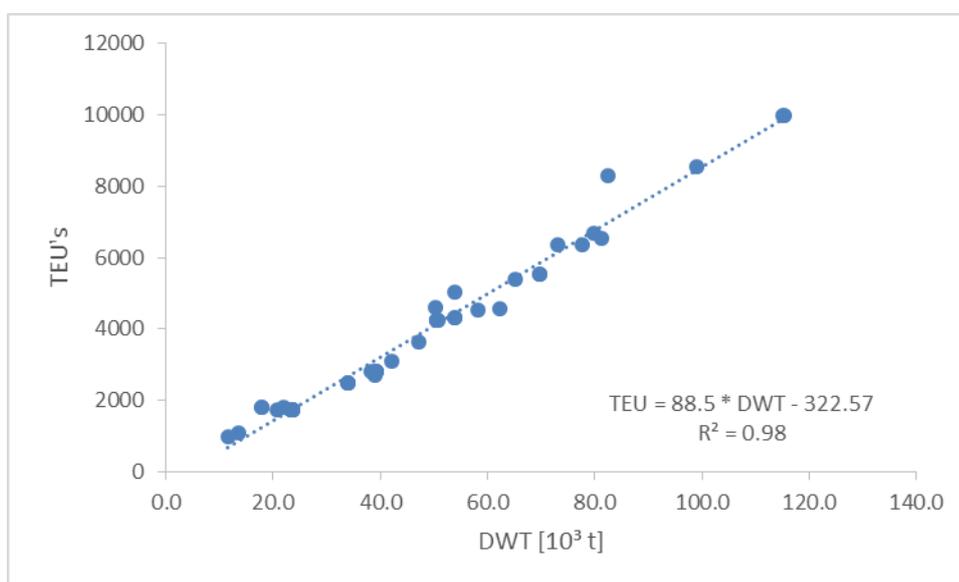
<b>Tipo</b>	<b>Keo</b>	<b>LBP</b>
<b>Bulk carrier</b>	0.25	<140
	0.18	>140
<b>Tanque</b>	0.28	<150
	0.17	>150
<b>Porta Contêiner</b>	0.38	
<b>Cruzeiro</b>	0.05	

Fonte: Schneekluth e Bertram (1998, p. 167-168). Elaborada pelo autor.

#### vi. *Quantidade de TEU's em Navios Porta Contêiners*

Navios do tipo porta contêiners tem como atributo principal a quantidade de TEU máxima que podem transportar. Para determinar tal valor é proposta uma equação linear, com aderência de aproximadamente 85%, de TEU em função de DWT. Essa equação foi obtida a partir dos navios do banco de dados. A Figura 12 exhibe o gráfico de dispersão gerado e a função obtida.

**Figura 12-** TEU em função do DWT



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### vii. *Atributos do Modelo: Resistência ao avanço e potência*

A resistência ao avanço da embarcação está diretamente relacionado ao consumo de combustível e depende da forma do casco. A determinação da resistência ao avanço ainda nas fases conceituais do projeto é importante para a determinação do peso do maquinário, empuxo necessário, potência do motor.

Tradicionalmente, a resistência ao avanço pode ser definida como uma função de Reynolds ( $R_n$ ) e Froude ( $F_n$ ), como mostra as eq. (40) e eq. (41).

$$R_t = \frac{1}{2} C_t * \rho * S * VEL^2 \quad (40)$$

$$C_t = f(R_n, F_n) \quad (41)$$

A componente mais significativa da resistência total, para embarcações de baixa velocidade, é a resistência friccional (Rf), que pode ser estimada na fase conceitual do projeto por meio da equação abaixo:

$$R_f = \frac{1}{2} C_f * \rho * S * VEL^2 \quad (42)$$

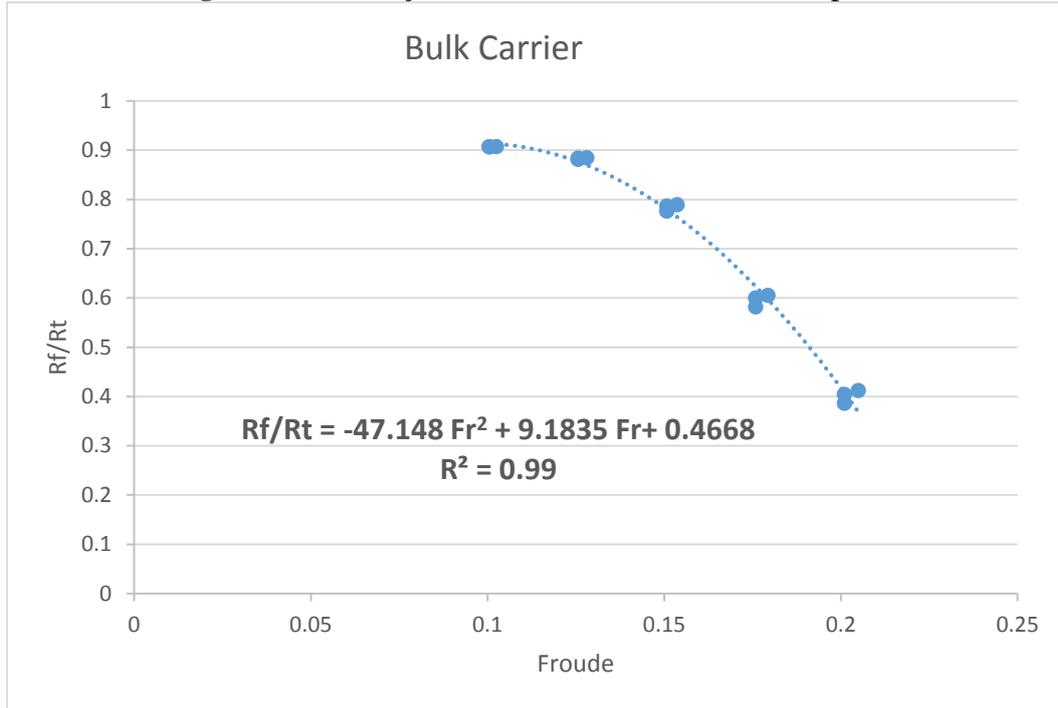
Como o interesse é obter  $R_t$ , esse será estimado a partir de uma função de  $R_f/R_t$  variando com  $Fr$ . Para obter essa função o método proposto por Holtrop e Mennen (1978) *apud* Watson (1998, p. 179) foi empregado e a resistência de onda ( $R_w$ ) e  $R_f$  foram determinados. A eq. (43) mostra a formulação utilizada para encontrar  $R_t$ , nota-se que um fator de correção de 10% foi utilizado a fim de considerar as demais parcelas da resistência, como a de apêndices e de forma.

$$R_t = 1,1 * (R_f + R_w) \quad (43)$$

Para encontrar a relação  $R_f/R_t$  em função do número de  $Fr$ , foram utilizadas embarcações do banco de dados. Para cada tipo de embarcação estudada, foram analisados três navios, sendo que cada um deles foi analisado para diferentes velocidades de avanço. No anexo 7 é mostrado o memorial de cálculo deste processo.

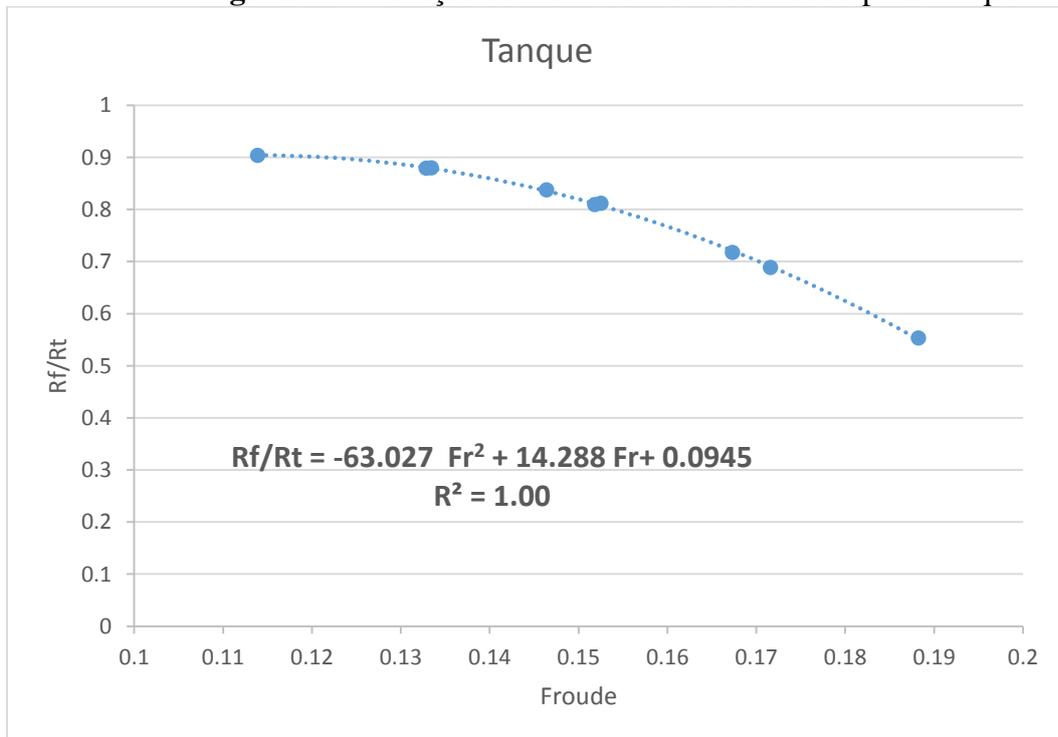
Novamente, uma regressão foi encontrada e a função polinomial de segunda ordem que descreve esse comportamento foi incluída no modelo de otimização. As Figura 13-16 exibem os gráficos gerados e as funções encontradas para a estimativa de  $R_f/R_t$  em função do número de Froude.

**Figura 13** - Variação de Rf/Rt com o nº de Froude para *Bulk carrier*



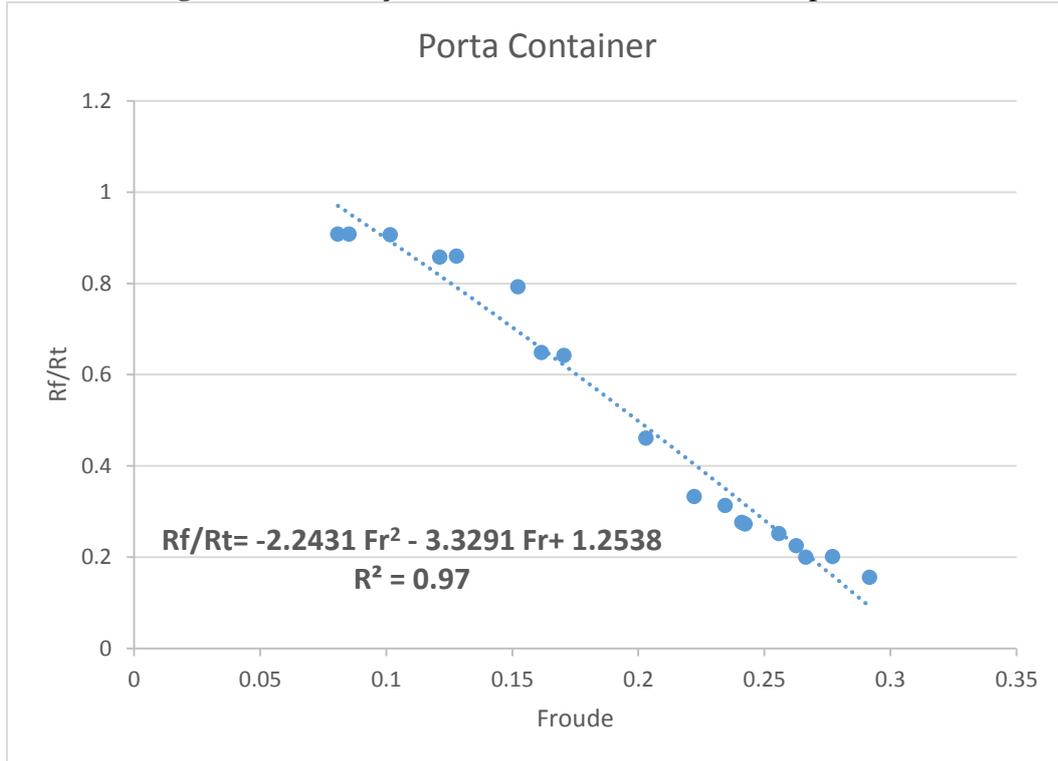
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 14** - Variação de Rf/Rt com o nº de Froude para Tanque



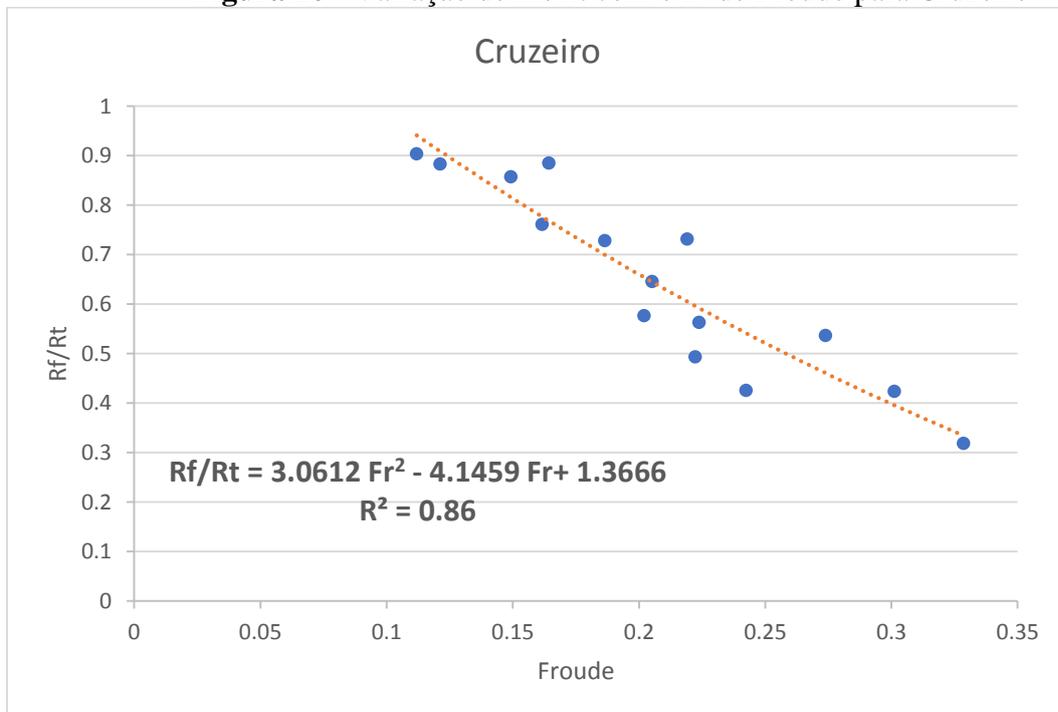
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 15** - Variação de Rf/Rt com o nº de Froude para Porta Containêr



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 16** - Variação de Rf/Rt com o nº de Froude para Cruzeiro



Fonte: Elaborada pelo autor.

A estimativa do coeficiente de resistência friccional ( $C_f$ ) é determinado em função do número de  $Rn$  pelo método proposto pela ITTC (1957) *apud* Watson (1998):

$$C_f = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (44)$$

A área molhada pode ser estimada por dois métodos, o primeiro é proposto por Holtrop e Mennen *apud* Watson (1998, p. 164), a eq. (45) mostra a formulação proposta por esse método.

$$S_{\text{holtrop}} = L (2 * T + B) \sqrt{Cm} \left( 0,453 + 0,4425 Cb - 0,2862 Cm - 0,003467 \frac{B}{T} + 0,3696 Cwp \right) + 2,38 * \frac{Abt}{Cb} \quad (45)$$

Outro método é sugerido por Taylor *apud* Watson (1998, p. 164):

$$S_{\text{taylor}} = 2,55 \sqrt{\Delta * LBP} \quad (46)$$

Como as formulações obtidas para determinar a razão  $Rf/Rt$  empregaram o método proposto por Holtrop e Mennen, optou-se pela área molhada proposta pelo mesmo método. Assim a eq. (45) será a empregada no modelo de otimização.

A partir da resistência total é possível determinar a potência efetiva ( $Pe$ ). Esta representa a potência necessária para vencer a resistência do navio a uma determinada velocidade. A eq. (47) mostra a definição da  $Pe$ .

$$Pe = VEL * Rt \quad (47)$$

A  $Pe$  é um importante atributo da embarcação, já que servirá de referência para determinar a potência do motor e definir os parâmetros do propulsor.

### **viii. Atributos do Modelo: Integração casco-hélice / Determinação do SHP**

Como já visto, a embarcação experimenta uma força contrária ao seu movimento, resistência ao avanço, e para que avance é necessário vencer tal ação. Comumente o navio

emprega um hélice convencional para gerar a força propulsiva necessária que permite o deslocamento da embarcação na velocidade de serviço estipulada pelo armador.

O responsável pela propulsão do hélice é o motor do navio, assim se o rendimento do hélice, rotação e o empuxo fornecido forem determinados, pode-se estimar a potência exigida do motor (SHP). A eq. (48) mostra a fórmula que define SHP.

$$SHP = \frac{R_t * V_m}{\eta_t} \quad (48)$$

Na eq. (48) as variáveis são a resistência, velocidade no sistema métrico ( $V_m$ ) e eficiência total ( $\eta_t$ ). A eficiência total do sistema propulsivo pode ser obtida por meio da multiplicação das diferentes eficiências descritas nas eq. (49 - 52).

$$\eta_t = \eta_b \eta_h \eta_s \quad (49)$$

A eq. (49) define a eficiência total.

$$\eta_b = \eta_o \eta_{rr} \quad (50)$$

A eficiência do hélice ( $\eta_b$ ) é definida de acordo com a eq. (50), a eq. (51) mostra a eficiência do hélice em águas abertas ( $\eta_o$ ) e a eq. (52) a eficiência do casco ( $\eta_h$ ).

$$\eta_o = \left( \frac{K_t J}{2\pi K_q} \right) \quad (51)$$

$$\eta_h = \frac{1-t}{1-w} \quad (52)$$

A eficiência rotativa relativa ( $\eta_{rr}$ ) varia de 0.95 a 1.00, de acordo com Molland (2011, p. 27). Para este trabalho foi fixada como 0.98, enquanto que a eficiência do sistema de propulsão foi arbitrada como 0.97.

Para o cálculo das eficiências mostradas acima é preciso definir alguns atributos, como o coeficiente de empuxo ( $t$ ) e coeficiente de esteira ( $w$ ). Esses são mostrados nas eq. (53) e eq. (54).

$$t = \frac{T - R_t}{T} \quad (53)$$

$$w = 0,81 * C_b - 0,34 \quad (54)$$

Os atributos principais para o dimensionamento do hélice são, diâmetro do hélice (Dh) o número de pás (Z) área expandida (Ae) e o passo (P). Almeja-se estimar os valores de tais atributos para que o rendimento do hélice seja o máximo. Ao maximizar esse atributo a potência do motor é minimizada e com isso um menor consumo de combustível pode ser alcançado.

O dimensionamento adequado do hélice apresenta um papel importante no projeto da embarcação, podendo reduzir a vibração do navio e evitar problemas de cavitação das pás. É importante definir qual o limite tecnológico de construção do hélice, podendo ser esse uma restrição adicional presente no modelo de otimização proposto neste trabalho. A Tabela 14 traz um comparativo sobre a redução e incremento de três importantes parâmetros do propulsor.

**Tabela 14 – Análise dos parâmetros do propulsor**

	<i>Reduzir</i>	<i>Aumentar</i>
<b>Número de pás</b>	Maior a eficiência propulsiva	Reduz vibração
<b>Diâmetro do hélice</b>	-	Maior a Eficiência propulsiva
<b>Área Expandida/Disco</b>	Rendimento do hélice aumenta	Maior carregamento aceitável

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que a  $\eta_0$  é função do coeficiente de avanço J, coeficiente de força propulsiva,  $K_t$ , e coeficiente de torque,  $K_q$ . Essas últimas duas variáveis podem ser determinadas através dos polinômios de  $K_t$  e  $K_q$  para a série de Wageningen B-screw (BERNITGAS; RAY; KINLEY, 1981, p.4 e 5). A Figura 17 faz alusão aos polinômios. O coeficiente J será determinado para o ponto de máximo da eficiência.

**Figura 17- Polinômios  $K_t$  e  $K_q$**

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n},$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_0)^{u_n} (z)^{v_n},$$

Fonte: Bernitgas, Ray e Kinley (1981, p. 4)

Esses atributos também podem ser escritos como função do torque (Q) e do empuxo (E), como visto nas eq. (55) e eq. (56).

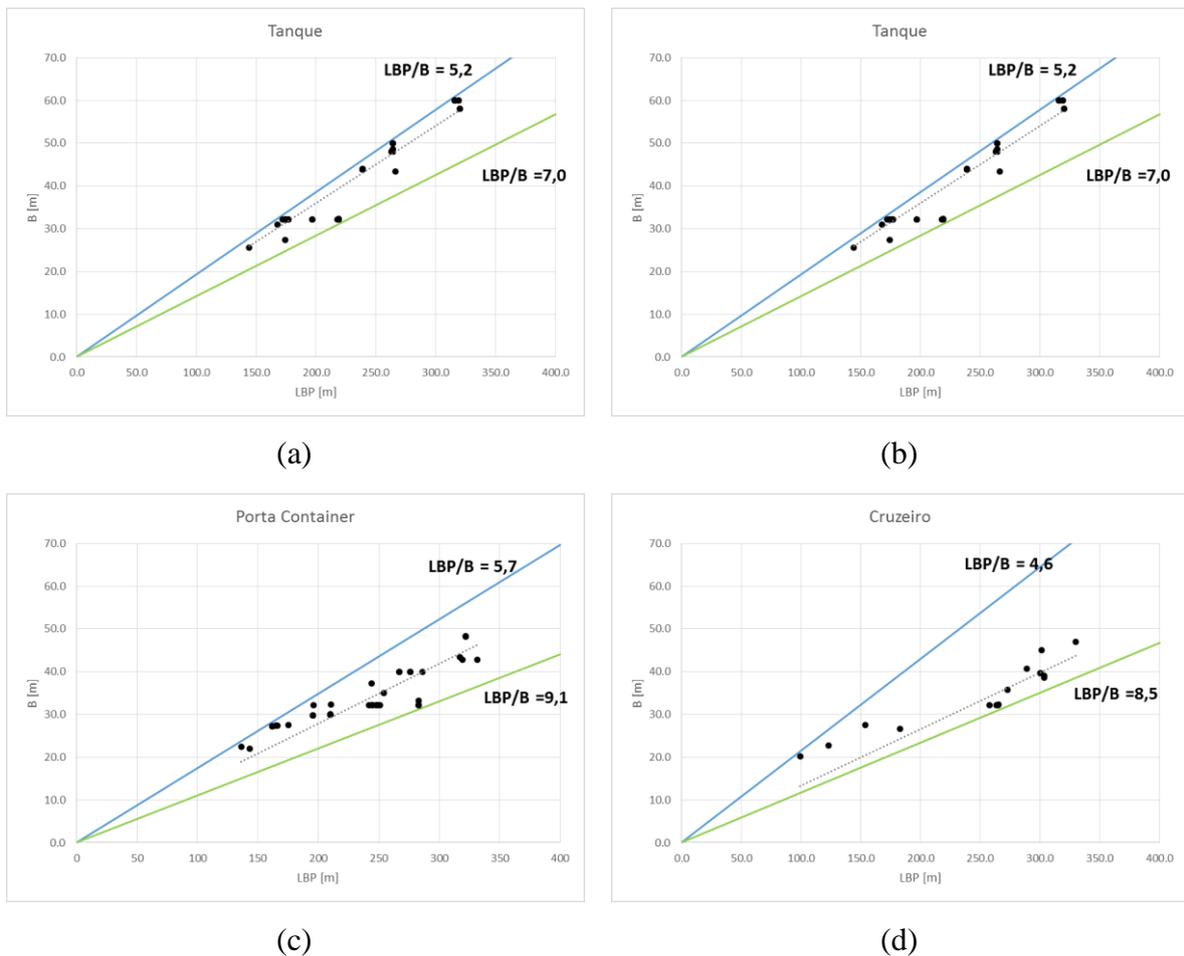
$$K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D_h^5} \quad (55)$$

$$K_t = \frac{E}{\rho n^2 D_h^4} \quad (56)$$

**ix. Restrições**

As restrições associadas as razões de LBP/B, LBP/T e B/T, foram estabelecidas a partir dos dados das embarcações semelhantes. Na Figura 18 são mostrados os gráficos de dispersão e os limites de LBP/B para os quatro tipos de embarcação.

**Figura 18-** Razão LBP/B: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro

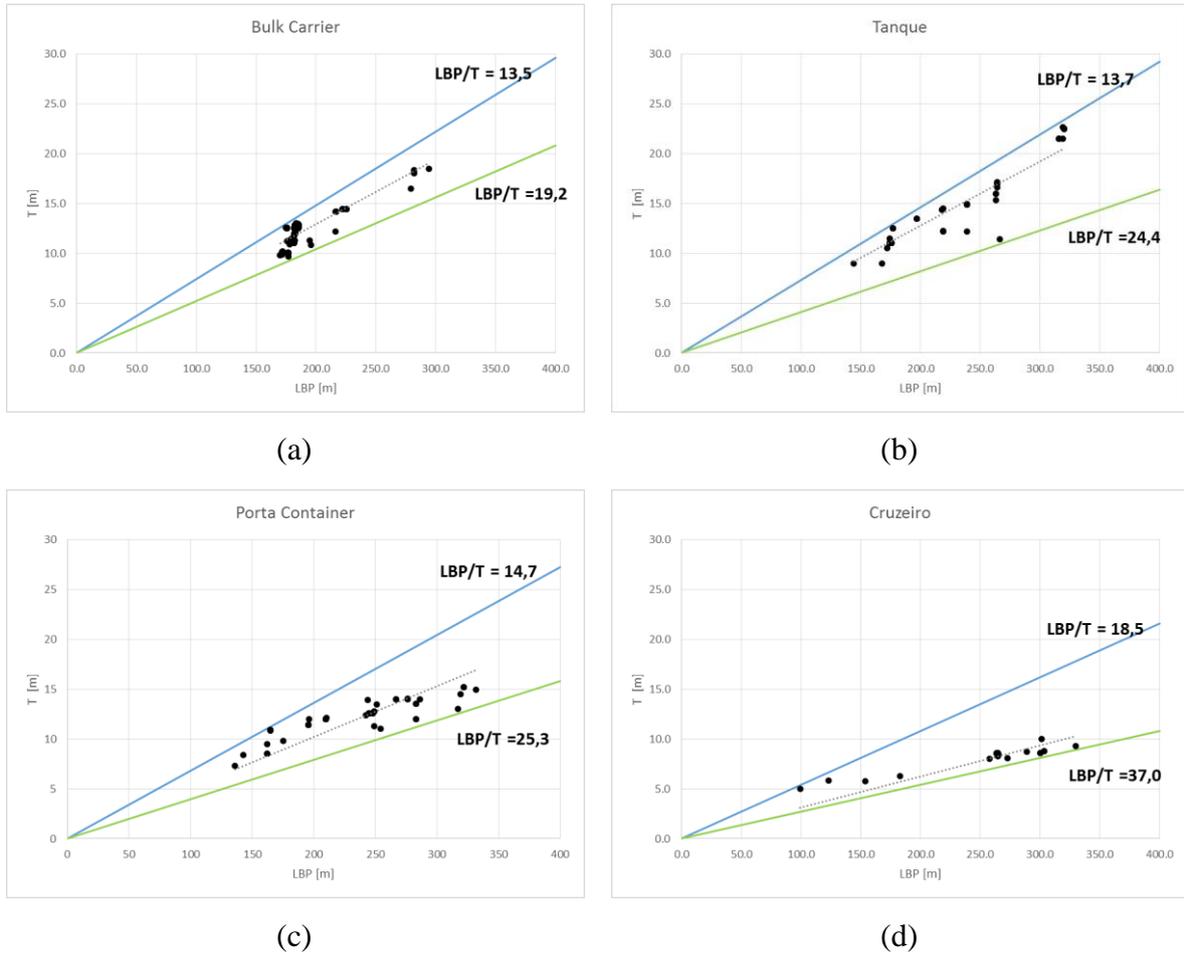


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que as embarcações do tipo tanque apresentam os maiores valores de LBP/B enquanto que os navios de cruzeiros apresentam os menores valores.

A Figura 19 mostra os limites de LBP/T para os quatro tipos de embarcação. Nota-se que a razão LBP/T para cruzeiros é mais alta e para *bulk carrier* a menor.

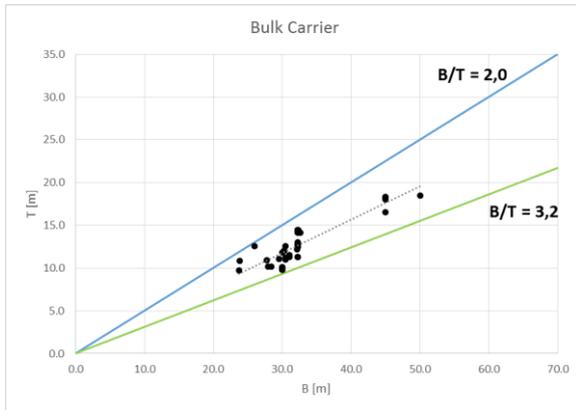
**Figura 19-** Razão LBP/T: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro



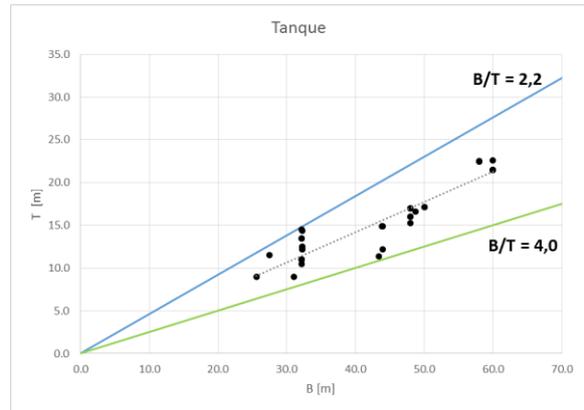
Fonte: Elaborada pelo autor.

Por último a razão B/T é exibida na Figura 20. A qual é máxima para embarcações de cruzeiro e mínima para *bulk carrier*.

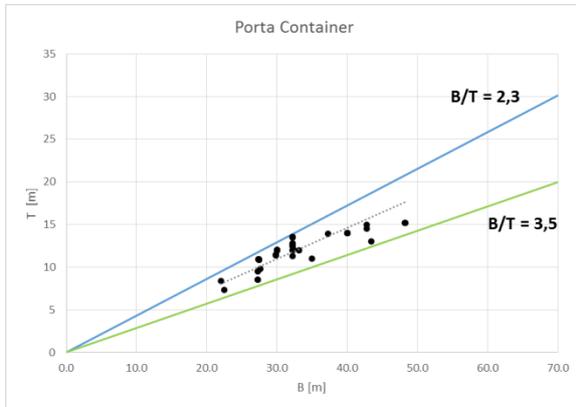
**Figura 20-** Razão B/T: a) *Bulk carrier* b) Tanque c) Porta Contêiner d) Cruzeiro



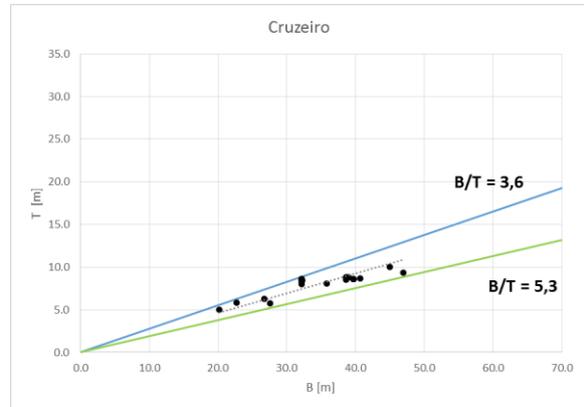
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Um último ponto relevante para o dimensionamento do propulsor é conferir se a razão entre área expandida ( $A_e$ ) e área do disco ( $A_o$ ) é suficiente para evitar a cavitação no hélice. A eq. (57) é proposta por Kuiper (1992) e estabelece o valor da razão para evitar esse fenômeno.

$$\frac{A_e}{A_o} = k + \frac{(1,3 + 0,3 * Z) * E}{\left(P_{atm} + \rho * g * \left(\frac{Dh}{2}\right) - P_v\right) Dh^2} \quad (57)$$

### 4.3. Validação dos métodos propostos no modelo de otimização

#### i. Validação do modelo de estimativa de DWT

A partir das informações do DWT contidas no banco de dados foi possível gerar intervalos com variação de  $\pm 10\%$  para 10 valores equidistantes de DWT com os limites de máximo e mínimo desse valor para cada tipo de embarcação. Para cada embarcação contida nesse intervalo os valores de L, B, T e Cb foram calculados.

O comprimento foi determinado a partir da fórmula da raiz cúbica, a boca e calado foram obtidas igualando a razão L/B e L/T do navio base com o novo navio e o coeficiente de bloco foi obtido igualando o Cd do navio base com o novo navio.

Para automatizar o processo uma rotina em MatLab foi criada para cada tipo de embarcação. A matriz resultados contém os dados da embarcação de base empregada no cálculo e as estimativas calculadas para o novo navio. O anexo 8 apresenta uma das rotinas empregadas no processo, neste caso para uma embarcação tipo *bulk carrier*.

Com posse de dados que descrevem as dimensões principais de embarcações dos quatro tipos é possível comparar os valores de referência com os resultados obtidos de DWT utilizando o modelo de otimização multiobjectivo implementado na planilha do Excel. Para cada embarcação o novo DWT foi obtido e o erro em relação ao valor de referência foi calculado utilizando a eq. (58).

$$Erro = \frac{DWT_{referência} - DWT_{calculado}}{DWT_{referência}} \quad (58)$$

As tabelas geradas com os erros estão no anexo 9. É importante observar que os dados obtidos apresentaram boa aderência com o modelo desenvolvido, apresentando um erro médio inferior a 5%.

No entanto, conforme pode ser visto na Tabela 15, os resultados obtidos para os navios de cruzeiro apresentaram erros superiores a 160%. Esse resultado indica que o modelo desenvolvido não consegue prever adequadamente o comportamento do DWT para embarcações de cruzeiro. Uma das possíveis causas é a estimativa do peso de aço da embarcação que afeta diretamente o peso leve (LWT). Nota-se que o LWT foi subestimado para todos os casos, dessa forma valores maiores de DWT foram estimados.

Como o resultado para navios de cruzeiro não foi satisfatório, esse tipo de embarcação foi retirada do modelo de otimização multiobjetivo desenvolvido.

**Tabela 15 – Validação do modelo de DWT para Cruzeiros**

TIPO DE EMBARCAÇÃO			CRUZEIRO						
VELOCIDADE [kt]			22						
DWT			7.83						
Qtd.			4.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
264.80	268.67	32.2	32.67	8.60	8.73	0.5619	0.5619	26.62	-240%
264.80	268.67	32.2	32.67	8.60	8.73	0.5619	0.5619	26.62	-240%
257.59	253.08	32.207	31.64	8.02	7.88	0.6822	0.6822	22.34	-185%
265.00	266.75	32.29	32.50	8.45	8.51	0.6375	0.6375	24.52	-213%
DWT			9.57						
Qtd.			5.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
303.21	293.95	39	37.81	8.80	8.53	0.5543	0.5543	24.94	-161%
303.17	293.91	38.6	37.42	8.80	8.53	0.5601	0.5601	25.08	-162%
263.50	259.64	32.2	31.73	8.63	8.50	0.7507	0.7507	29.04	-203%
264.80	260.92	32.2	31.73	8.30	8.18	0.7762	0.7762	28.77	-201%
DWT			11.30						
Qtd.			7.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
263.500	267.845	32.200	32.731	8.500	8.640	0.820	0.820	36.137	-220%
303.213	310.726	39.000	39.966	8.800	9.018	0.554	0.554	29.611	-162%
303.171	310.683	38.600	39.556	8.800	9.018	0.560	0.560	29.771	-163%
DWT			13.03						
Qtd.			1.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
301.000	291.837	45.000	43.630	10.000	9.696	0.573	0.573	38.154	-193%
DWT			14.76						
Qtd.			2.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
329.887	328.168	47.000	46.755	9.322	9.273	0.570	0.570	41.103	-178%
301.000	304.239	45.000	45.484	10.000	10.108	0.573	0.573	44.284	-200%
DWT			16.50						
Qtd.			1.00						
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
329.887	340.536	47.000	48.517	9.322	9.623	0.570	0.570	47.048	-185%

Fonte: Elaborada pelo autor.

## ii. Modelo de otimização da eficiência do propulsor

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do modelo de otimização do para determinação das características otimizadas do propulsor, o qual irá utilizar o modelo de DWT e as formulações vistas no subcapítulo 5.1.

O processo de otimização visa maximizar a eficiência do propulsor. Usualmente a literatura tem à disposição técnicas para dimensionar o propulsor que dificulta variar parâmetros a fim de obter um resultado otimizado. Neste trabalho são utilizados os polinômios de Wageningen para este processo.

A eficiência do propulsor geralmente aumenta com o incremento do diâmetro, este é limitado por geometria da popa e calado da embarcação, bem como aspectos construtivos. O número de pás é relevante para o projeto estrutural da embarcação, sendo um fator que pode ocasionar ressonância no casco. Já a área expandida deve ser dimensionada para evitar o fenômeno de cavitação no hélice.

A função objetivo deste problema é maximizar o rendimento do hélice em águas abertas,  $\eta_0$ , definido pela eq. (59).

$$\eta_0 = \frac{K_t J}{2\pi K_q} \quad (59)$$

A série Wageningen foi a escolhida por ser adequada para embarcações mercantes. No entanto, deve-se atender as restrições para utilizar a série que são número de pás, mínimo 2 e máximo 7, razão de áreas, mínimo 0.5 e máximo 1.05, e razão passo por diâmetro, mínimo 0.5 e máximo 1.4. Outras restrições serão impostas, referentes ao calado e ao critério de cavitação. A Tabela 16 mostra as restrições deste procedimento.

**Tabela 16** – Restrições do modelo de otimização do propulsor

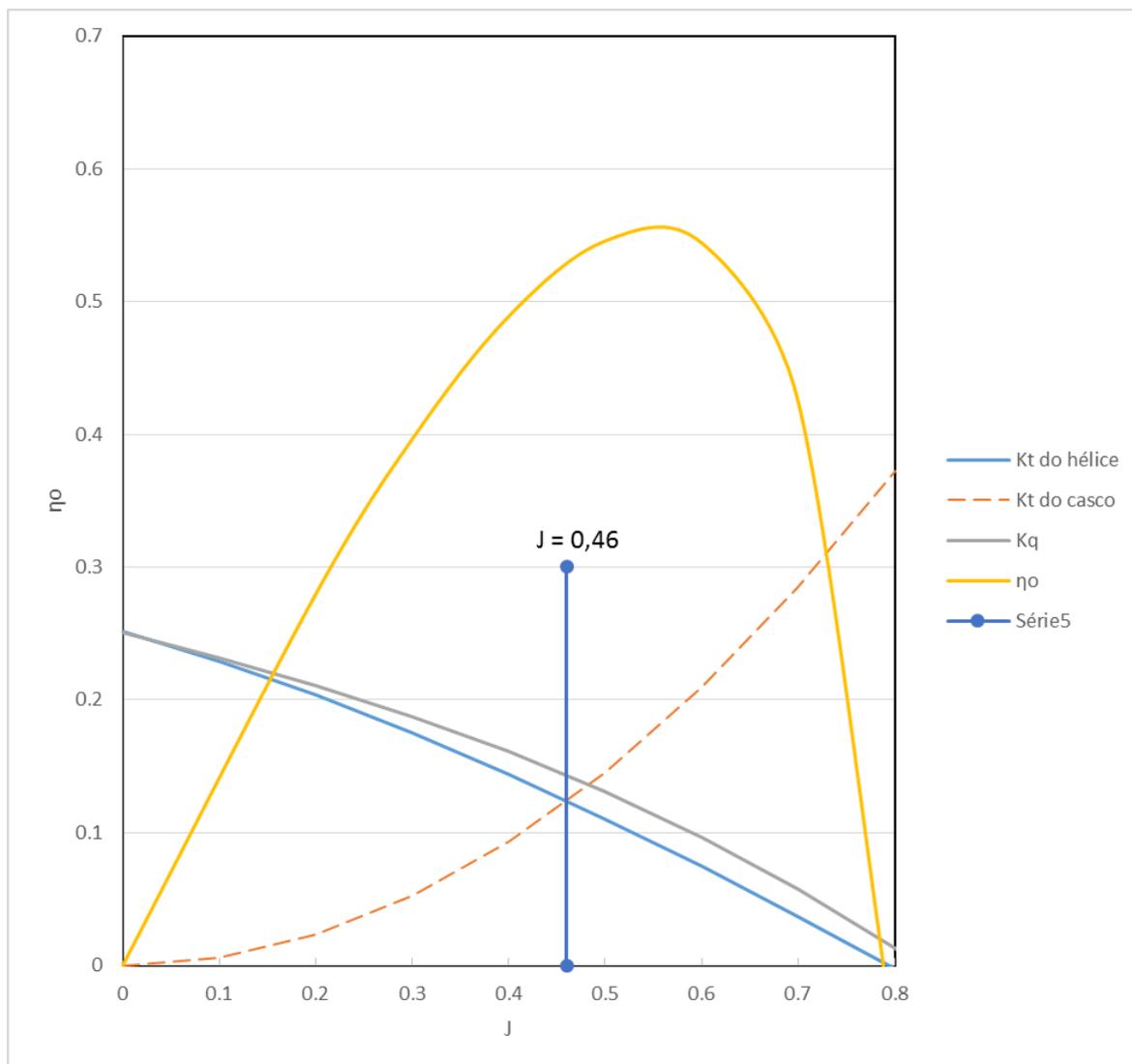
Ae/Ao	=	Ae/Ao _ Kuiper	0.320
Dprop	<=	(0.74T)/(1-0.05)	8.01
Dprop	>=	3	
Dprop	<=	12	
P/D	<=	1.4	
P/D	>=	0.5	
Z	<=	7	
Z	=	Inteiro	
Z	>=	3	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como visto no item 5.1.6. os polinômios de  $K_t$ propulsor e  $K_q$  de Wageningen B-screw podem ser determinados a partir do coeficiente de avanço (J), passo (P), diâmetro do hélice ( $D_h$ ), área expandida ( $A_e$ ), área do disco ( $A_o$ ) e número de pás (Z).

O coeficiente J será determinado de tal forma que a eficiência seja máxima, para isso é necessário encontrar o  $K_t$ casco para avaliar interação casco-hélice que promove tal cenário. Tanto  $K_t$ casco,  $K_t$ propulsor e  $K_q$  irão variar com J, busca-se o J que fornece a menor diferença de  $K_t$ casco e  $K_t$ propulsor. A Figura 21 mostra o gráfico de eficiência para uma embarcação genérica e o ponto de operação de J. Tal gráfico pode ser gerado dentro do modelo de otimização.

**Figura 21** – Gráfico de eficiência para uma embarcação genérica



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os demais parâmetros que descrevem os polinômios  $K_t$  e  $K_q$  são o diâmetro, passo e número de pás, os quais são as variáveis do processo de otimização.

Por fim, as embarcações genéricas utilizadas para validar o modelo de DWT foram empregadas para avaliar o modelo de otimização do propulsor. O que inclui verificar se o modelo estava convergindo para uma solução ótima e as restrições satisfeitas. Os anexos 10-12 mostram os resultados do processo de otimização do propulsor. As entradas para testar o procedimento foram as dimensões principais da embarcação genérica e a velocidade média para o tipo de embarcação à ser avaliado.

Para os três tipos de embarcação, todos os resultados convergiram e todas as restrições foram satisfeitas. Nota-se que embarcações do tipo porta contêiner apresentam a maior solicitação de potência do motor (SHP).

### *iii. Modelo de otimização do projeto conceitual*

A última etapa consiste em determinar quais dimensões principais fornecem a potência do motor mínima. Dessa forma o problema pode ser estruturado da seguinte forma:

- Função objetivo: minimizar SHP
- Variáveis: LBP, B, T, Cb

É importante observar que, além dessas variáveis, são consideradas também as variáveis relativas ao projeto do propulsor apresentadas na seção anterior.

A potência do motor é função da resistência total e a eficiência total, a primeira deve ser mínima e a segunda máxima. A  $R_t$  é dependente da forma do casco e por isso as dimensões principais serão determinadas de tal modo a minimizar a resistência. A eficiência total irá aumentar se o rendimento do propulsor aumentar, por isso as variáveis que descrevem o hélice serão determinadas de modo a cumprir tal objetivo. Todas as variáveis do modelo de otimização são exibidas na Tabela 17.

**Tabela 17** – Variáveis do modelo de otimização do PC

Comprimento	[m]	Lbp
Boca	[m]	B
Calado	[m]	T
Coeficiente de bloco		Cb
Número de pás		Z
Diâmetro do hélice	[m]	Dh
Passo/diâmetro		P/D

Fonte: Elaborada pelo autor.

As restrições do modelo, obtidas na análise de semelhantes, são mostradas abaixo:

**Tabela 18** – Restrições do modelo de otimização do PC

1	L/B	4.29	$\geq$	5.30
			$\leq$	8.50
2	L/T	12.50	$\geq$	13.50
			$\leq$	19.20
3	B/T	2.92	$\geq$	2.00
			$\leq$	3.20
4	GM	14.32	$>$	0
			$>$	95.00
5	DWT	40.98	$<$	105.00
6	Ae/Ao	=	Ae/Ao _ Kuiper	0.386
7	Dprop	$\leq$	$(0.74T)/(1-0.05)$	9.347
8	Dprop	$\geq$	3	
9	Dprop	$\leq$	12	
10	P/D	$\leq$	1.4	
11	P/D	$\geq$	0.5	
12	Z	$\leq$	7	
13	Z	=	Inteiro	
14	Z	$\geq$	3	

Fonte: Elaborada pelo autor.

As três primeiras restrições são referentes aos limites de L/B, L/T e B/T que foram discutidos no tópico 5.1. A 4ª restrição visa garantir que o critério de estabilidade da embarcação seja respeitado. A restrição 5 limita a variação do DWT previsto em  $\pm 5\%$ . As restrições 6 e 7 garantem a não ocorrência de cavitação e que o hélice não irá ultrapassar o calado. As restrições 8-14 limitam as dimensões do propulsor, considerando os limites da série de Wageningen B-screw.

O modelo de otimização do projeto conceitual será multiobjectivo. Como já exposto, a primeira é referente a maximização da capacidade de carga (DWT) e o segundo a redução da potência do motor (SHP). Ao rodar o solver para otimizar o casco, a cada modificação do SHP a otimização do propulsor será chamada e o subproblema resolvido. Ao fim, espera-se a solução do subproblema, propulsor, e problema, SHP.

Para avaliar o modelo de otimização do projeto conceitual as faixas de DWT obtidas para verificação do modelo de DWT foram testadas. A Figura 22 exhibe os resultados, mostrando que o algoritmo desenvolvido é robusto e eficiente.

**Figura 22** – Resultado do modelo de otimização do projeto conceitual

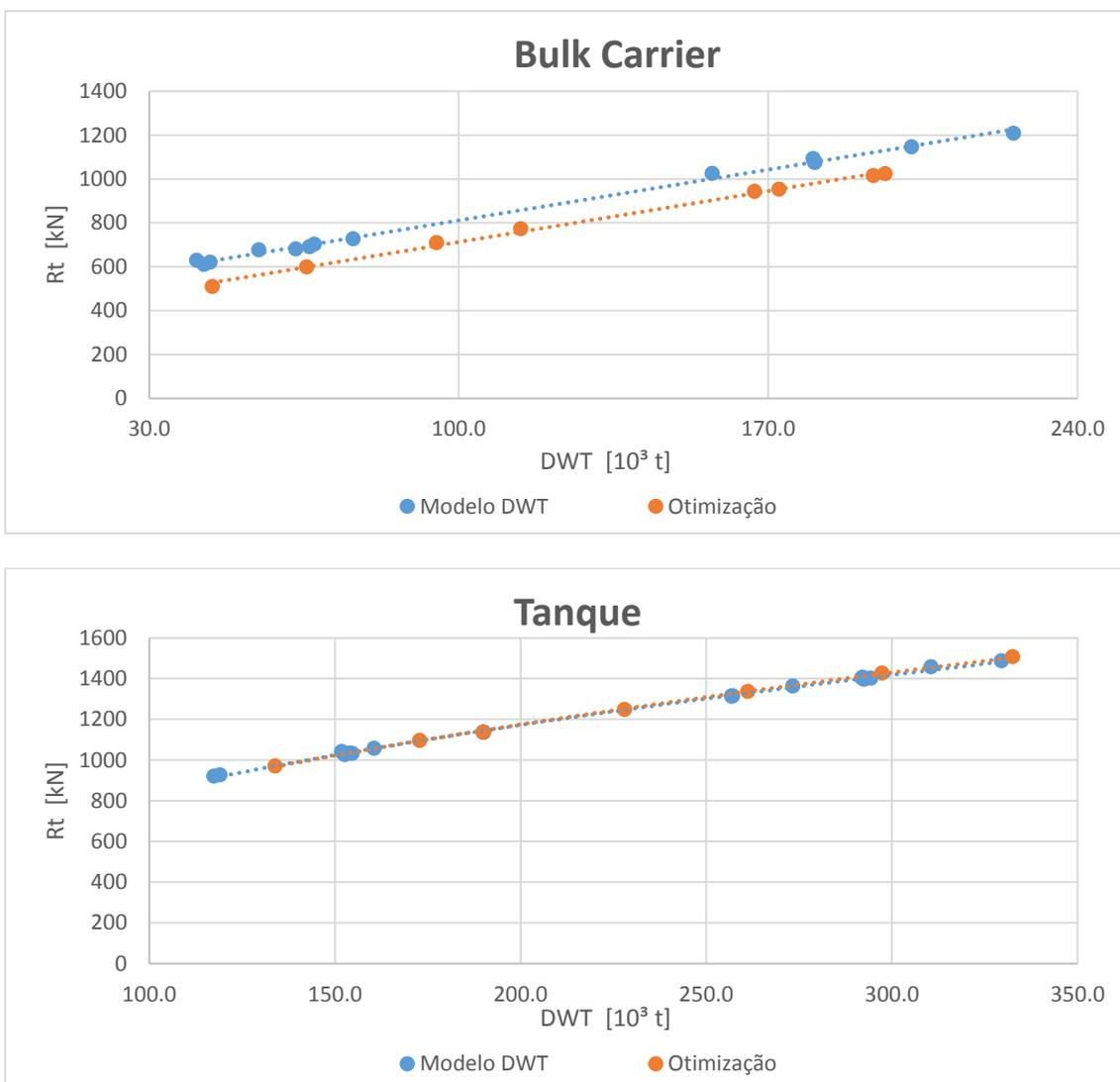
Tipo	Entradas				Saídas												
	DWT	Vel	LBP	B	T	Cb	Vel	DWT	Δ	Cd	Eficiência	Dh	rotação	SNP	Z	Ae/Ao	Rt
Bulk Carrier	46.57	14.00	209.16	24.61	12.30	0.880	14	44.24	53.17	0.832	0.627	8.68	60.85	5239.47	4	0.303	508.86
Bulk Carrier	69.07	14.00	239.88	28.22	13.79	0.880	14	65.62	78.19	0.839	0.630	9.30	67.31	6135.29	3	0.287	598.88
Bulk Carrier	159.09	14.00	262.47	49.52	17.71	0.880	14	166.95	192.46	0.867	0.580	8.99	60.35	10498.80	4	0.337	942.70
Bulk Carrier	181.59	14.00	260.39	49.13	18.50	0.880	14	172.52	197.90	0.872	0.577	8.99	60.12	10650.70	4	0.335	952.88
Bulk Carrier	204.10	14.00	289.61	50.00	18.50	0.880	14	193.80	223.63	0.867	0.630	11.20	55.89	10405.87	3	0.285	1015.74
Bulk Carrier	226.60	14.00	294.00	50.00	18.50	0.880	14	196.52	226.97	0.866	0.546	9.11	83.71	12117.27	3	0.333	1024.33
Tanque	53.31	15.00	218.79	31.26	10.61	0.960	15	55.65	67.21	0.828	0.599	8.95	70.47	7503.76	4	0.339	682.84
Tanque	90.41	15.00	233.38	36.07	12.94	0.960	15	85.50	100.76	0.849	0.581	8.99	65.04	9179.71	4	0.348	810.75
Tanque	127.52	15.00	256.27	39.17	16.61	0.960	15	133.87	154.10	0.869	0.555	9.04	84.71	11502.32	3	0.334	970.77
Tanque	164.63	15.00	263.19	45.12	17.99	0.960	15	172.83	197.33	0.876	0.542	9.06	80.26	13304.62	4	0.348	1096.65
Tanque	275.94	15.00	284.27	54.67	20.58	0.960	15	261.25	295.24	0.885	0.522	9.05	72.22	16865.16	4	0.369	1337.36
Tanque	313.05	15.00	297.60	57.23	21.35	0.960	15	297.35	335.55	0.886	0.512	9.00	69.75	18344.55	4	0.380	1426.51
Tanque	350.16	15.00	307.55	59.14	22.31	0.960	15	332.50	374.28	0.888	0.504	8.99	67.32	19671.66	4	0.384	1507.70
Porta Contêiner	23.29	22.00	233.52	25.66	9.23	0.657	22	25.09	35.39	0.709	0.545	7.19	122.52	44162.77	4	0.928	2137.99
Porta Contêiner	36.24	22.00	257.83	28.33	10.20	0.657	22	34.43	47.57	0.724	0.566	7.94	115.81	44332.33	4	0.799	2229.91
Porta Contêiner	49.18	22.00	291.05	31.98	11.68	0.657	22	51.45	69.27	0.743	0.631	9.10	92.55	43575.06	4	0.673	2441.58
Porta Contêiner	62.13	22.00	290.93	31.97	13.03	0.657	22	58.90	77.21	0.763	0.608	10.15	97.57	47480.61	3	0.535	2563.09
Porta Contêiner	75.07	22.00	307.58	33.80	13.97	0.657	22	71.32	92.45	0.771	0.614	10.88	91.65	49618.40	3	0.498	2706.81
Porta Contêiner	88.02	22.00	322.27	35.41	14.81	0.657	22	83.62	107.45	0.778	0.618	11.53	86.82	51778.90	3	0.472	2843.15
Porta Contêiner	100.96	22.00	327.44	35.98	13.59	0.782923	22	95.91	121.24	0.791	0.572	9.21	95.58	57380.40	4	0.725	3075.94
Porta Contêiner	113.91	22.00	323.98	35.60	15.20	0.788687	22	108.21	133.79	0.809	0.551	11.84	96.64	62478.37	3	0.489	3233.42
Porta Contêiner	126.85	22.00	331.54	38.75	15.20	0.788687	22	120.51	148.98	0.809	0.613	11.84	84.18	58717.40	3	0.503	3384.68

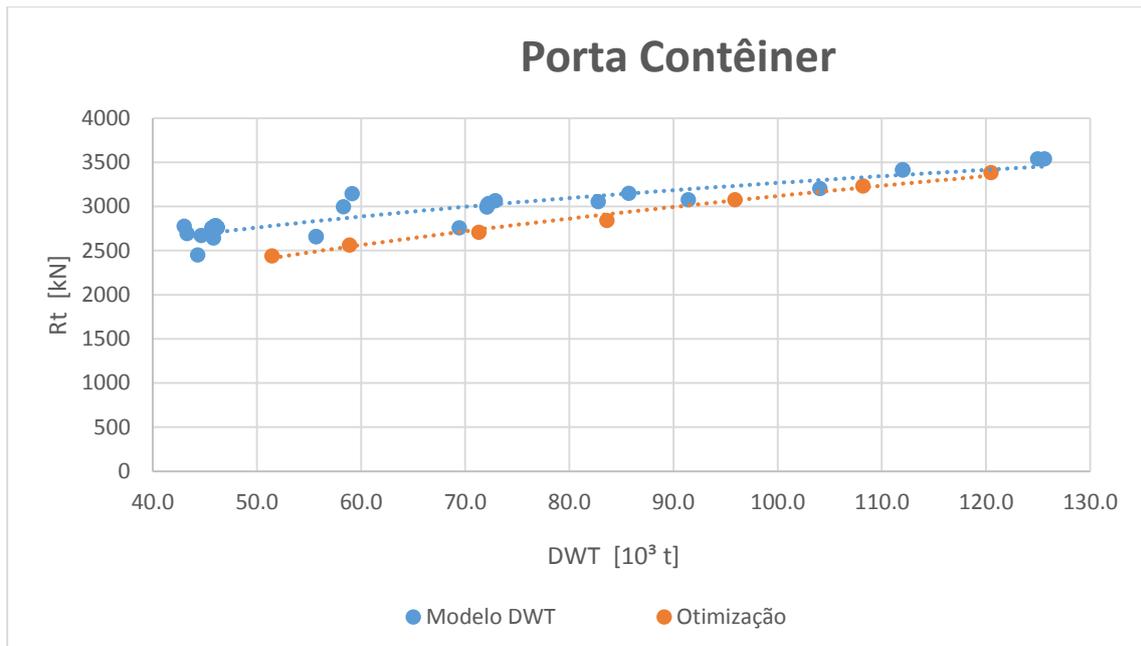
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. RESULTADOS

Para avaliar os resultados dos métodos propostos, os dados obtidos empregando o modelo de otimização multiobjectivo para o projeto conceitual de embarcações mercantes foram confrontados com os dados obtidos pelo modelo automático baseado no Método da Raiz Cúbica aplicado ao banco de dados de navio semelhantes. As Figuras 23-25 mostram os gráficos comparativos dos dois modelos.

**Figura 23** –  $R_t$  em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



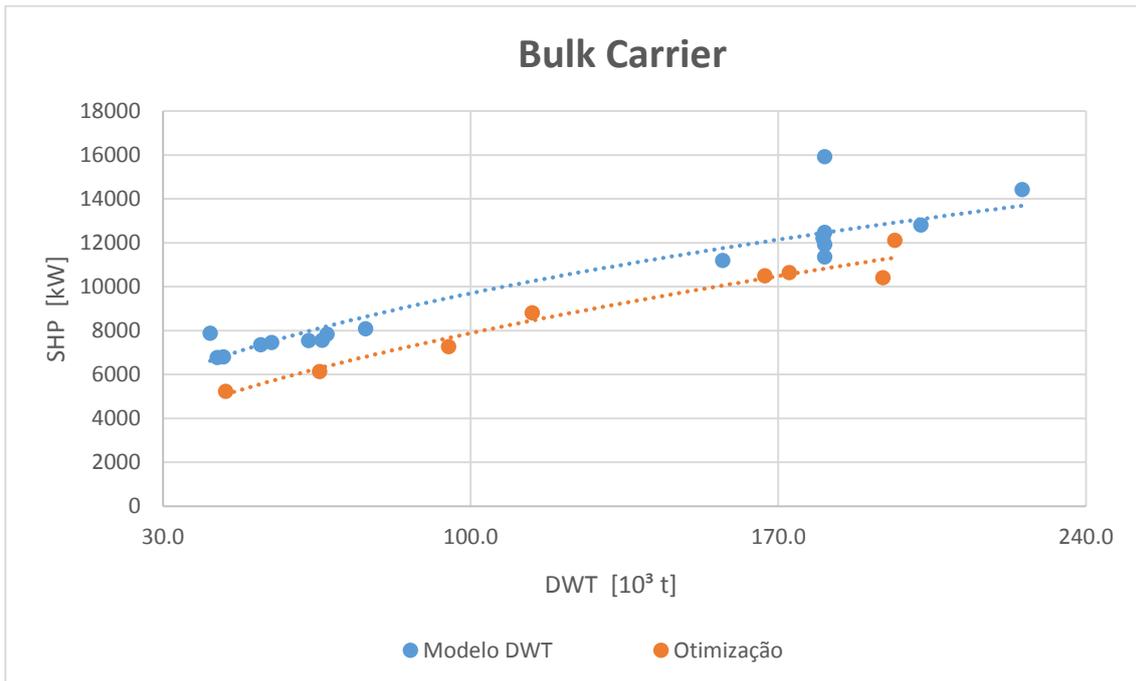


Fonte: Elaborada pelo autor.

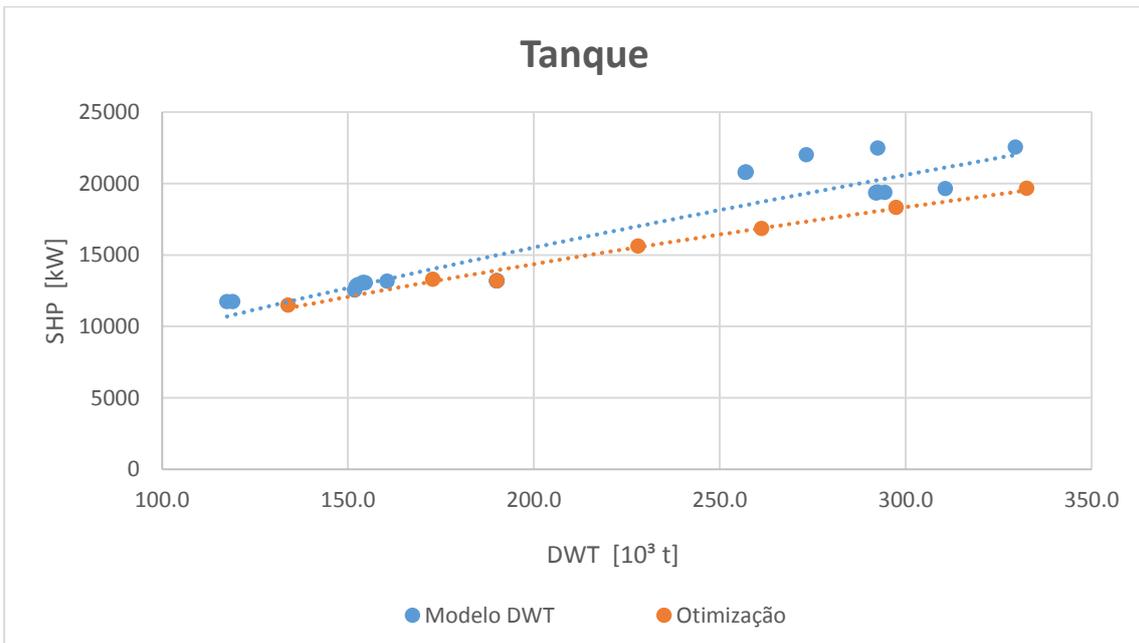
A Figura 23 mostra a comparação da função de resistência variando com DWT entre os dois métodos. Nota-se que a resistência experimentada para embarcações projetadas pelo método da raiz cúbica foi maior que as projetadas pelo método de otimização, considerando um mesmo DWT e uma mesma velocidade de serviço. No entanto, navios tanque mostraram pouca diferença, indicando que os atuais navios tanques já apresentam um projeto conceitual otimizado.

A Figura 24 mostra a variação da potência do motor (SHP) com o DWT comparando os dois modelos utilizados. De maneira análoga ao observado na Figura 23, observou-se que o modelo de otimização multiobjectivo resultou em navios com valores menores de SHP para um mesmo DWT e uma mesma velocidade de serviço.

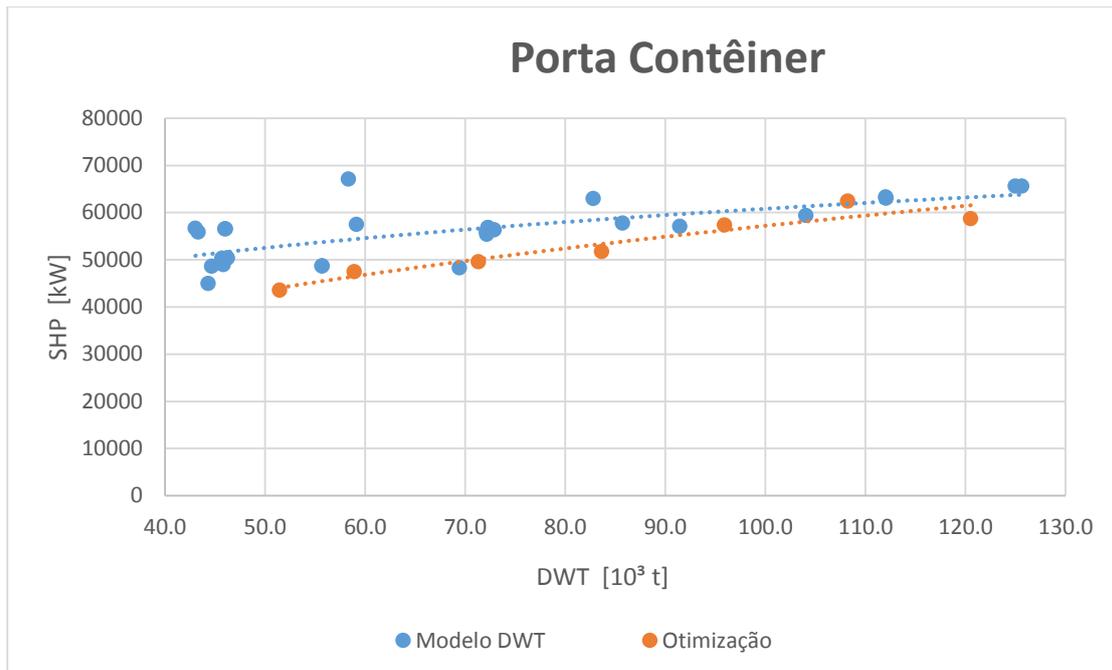
**Figura 24** – SHP em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



(b)

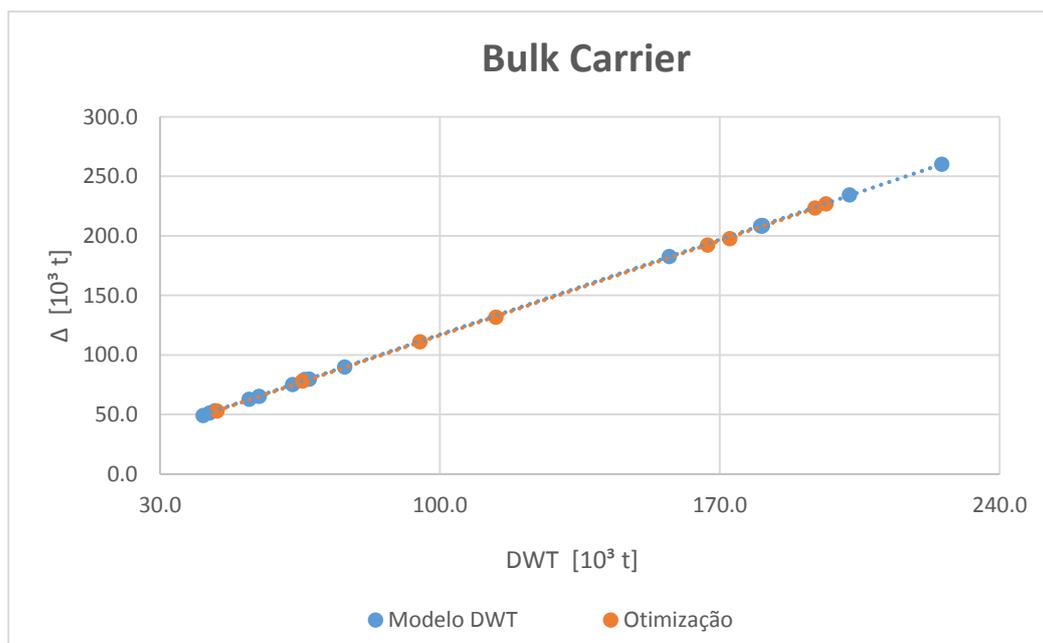


(c)

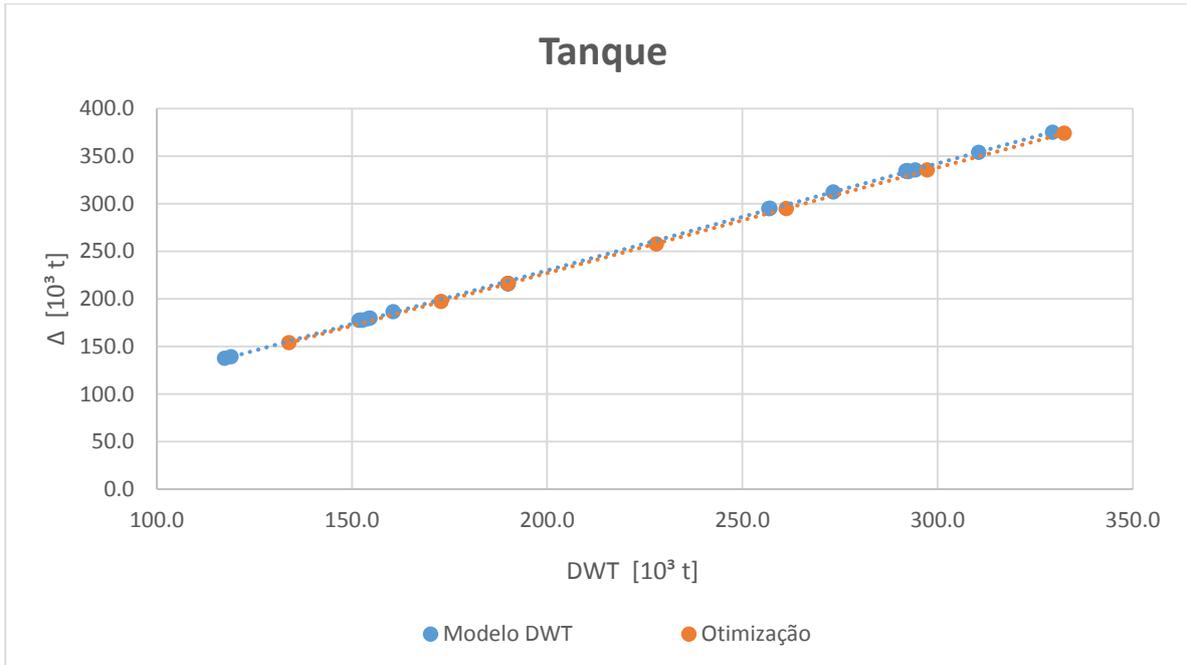
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 25 exibe o comportamento do deslocamento variando com o DWT para os dois modelos comparados. Nota-se que para os três tipos de embarcação a relação carga transporta e peso do navio foi muito próxima para ambos os modelos. O que significa que a redução do SHP obtida não comprometeu a quantidade de carga transportada por peso do navio.

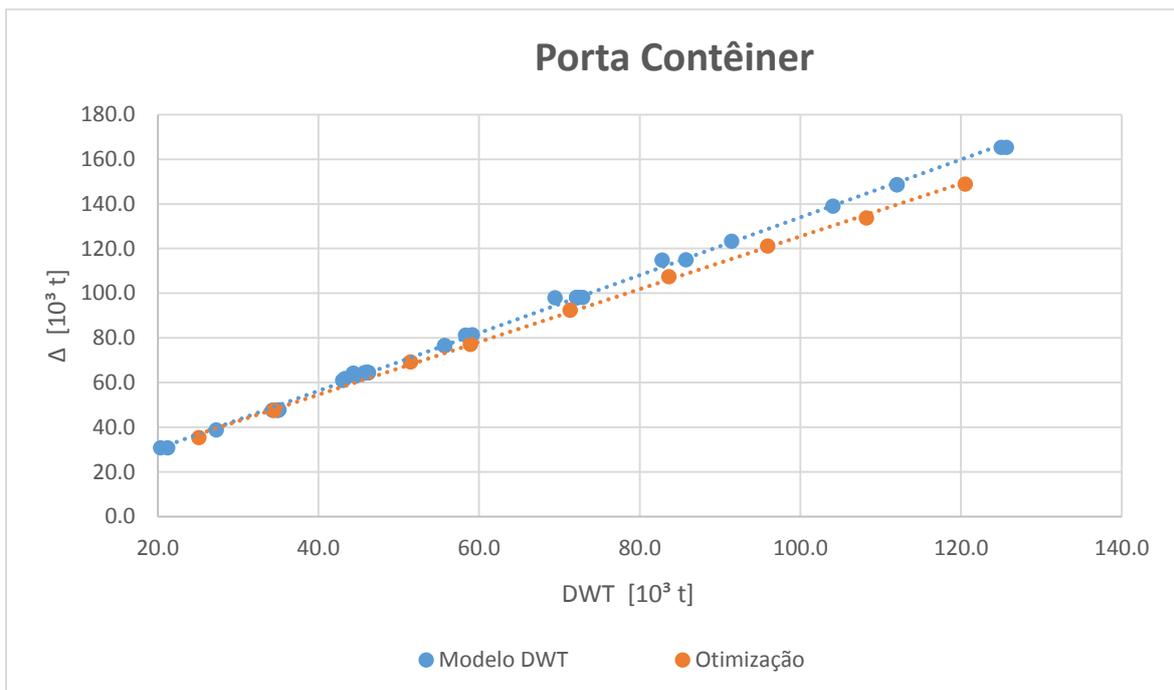
**Figura 25** – Deslocamento em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

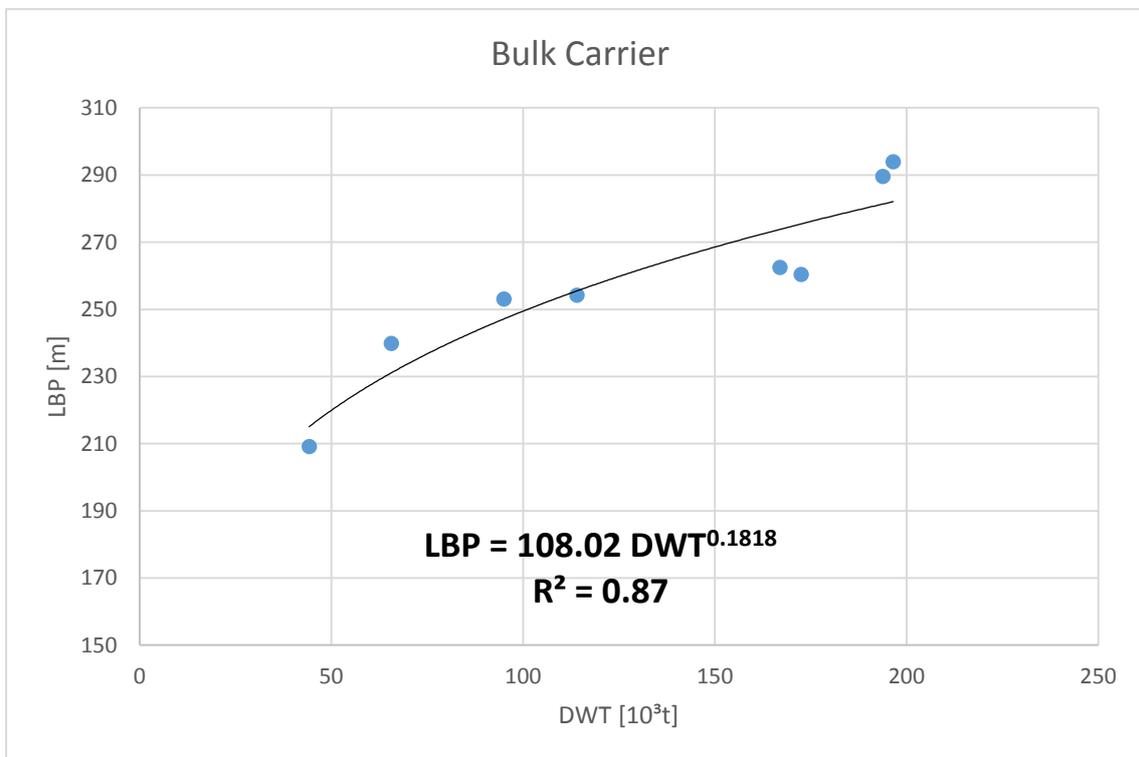
#### 5.1. Modelo paramétrico para o projeto conceitual otimizado

Nas figuras 26 a 29 são apresentados os resultados finais deste estudo que correlaciona, para as embarcações ótimas, as variáveis de projeto em função do DWT da embarcação. Essas

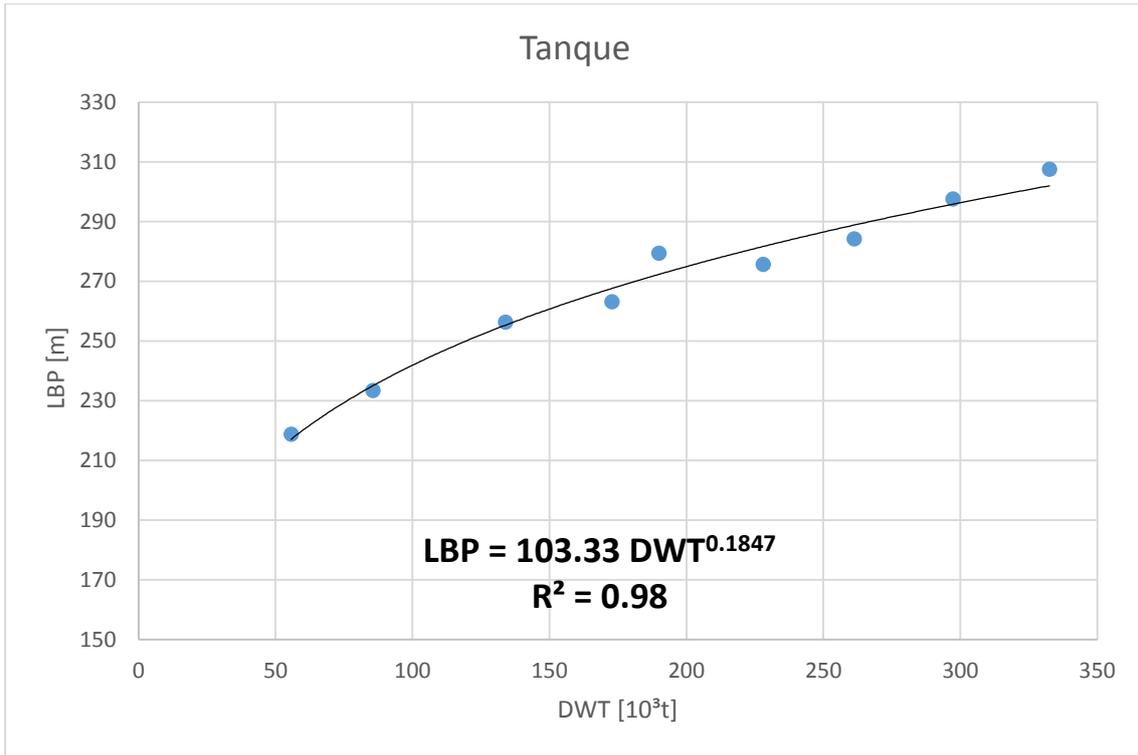
equações podem ser utilizadas para a determinação das dimensões principais e do coeficiente de bloco de um navio mercante em função da velocidade de serviço e da capacidade de carga.

As correlações obtidas foram aproximadas por um função potencial. Nota-se que as equações que descrevem o comportamento das dimensões principais em função do DWT apresentam aderência razoável, o menor  $R^2$  foi para a função LBP o qual apresentou o valor de 0.87. Já as equações obtidas para correlação de  $C_b$  apresentaram um valor médio para as embarcações do tipo *bulk carrier* e tanque e uma equação cúbica para porta contêiners com  $R^2 = 0.84$ .

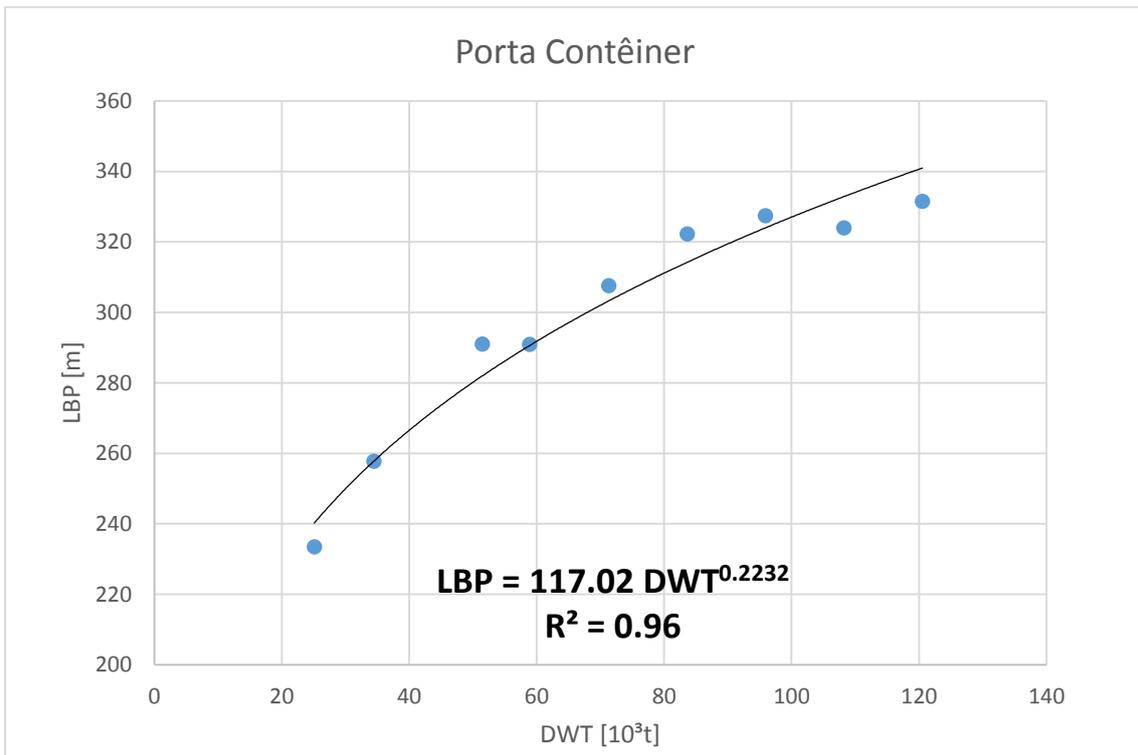
**Figura 26** – LBP em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



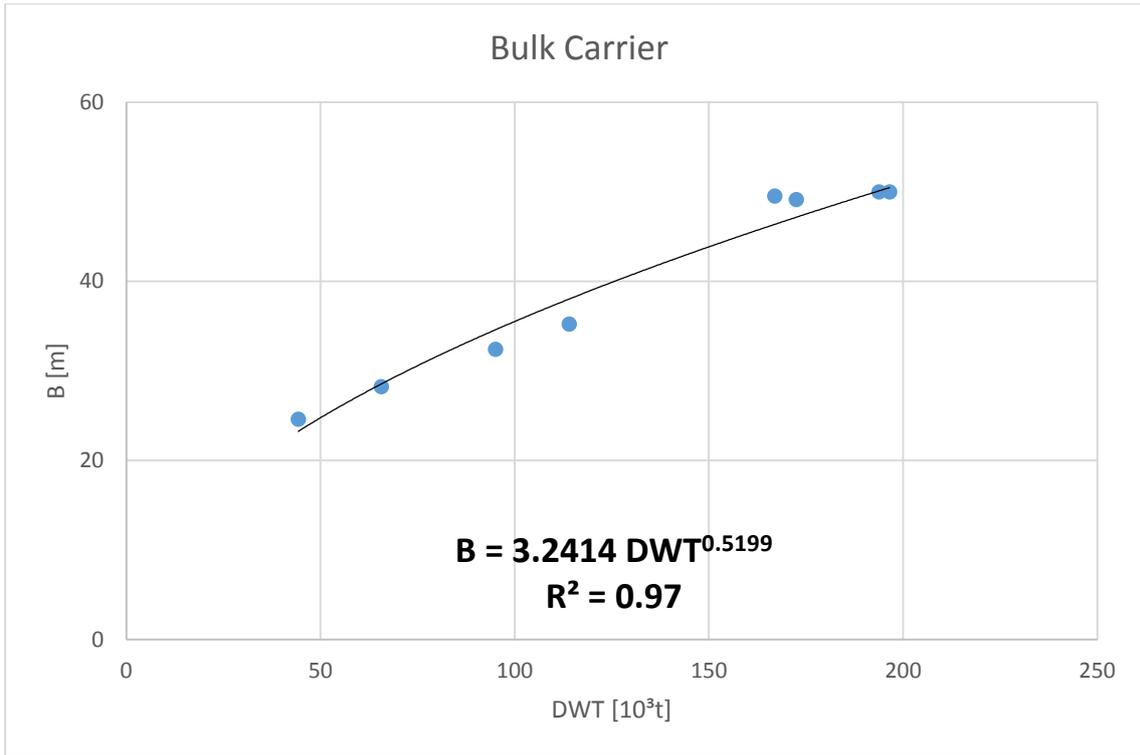
(b)



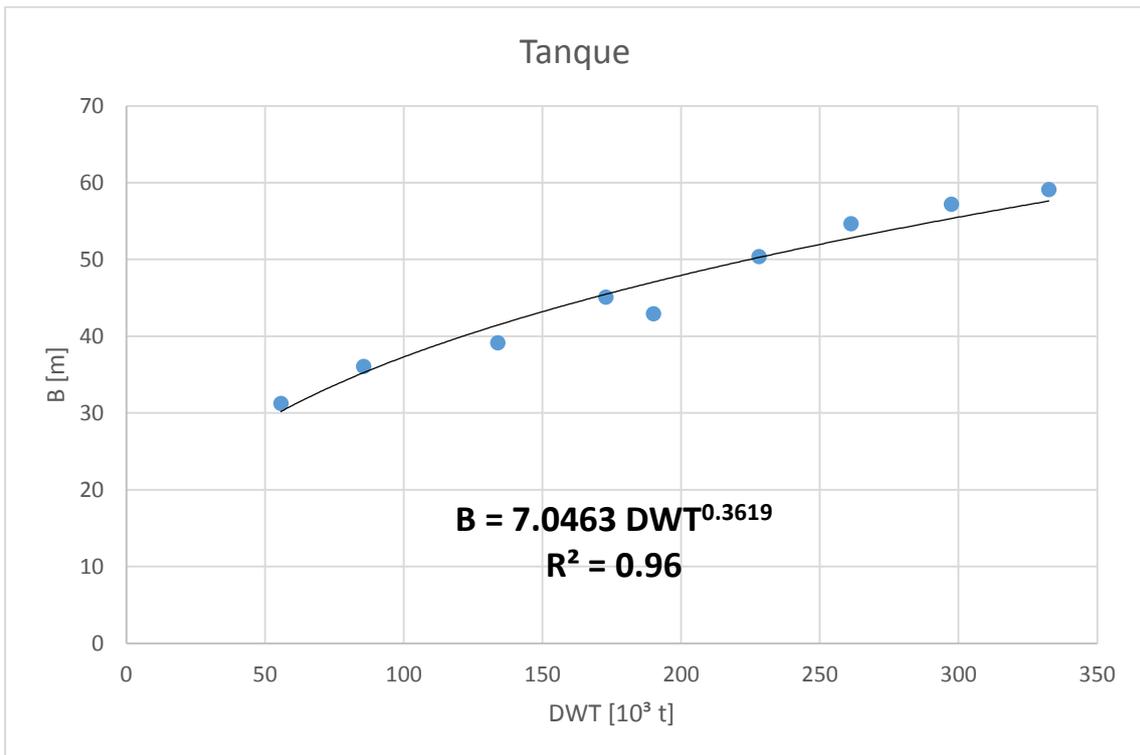
(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

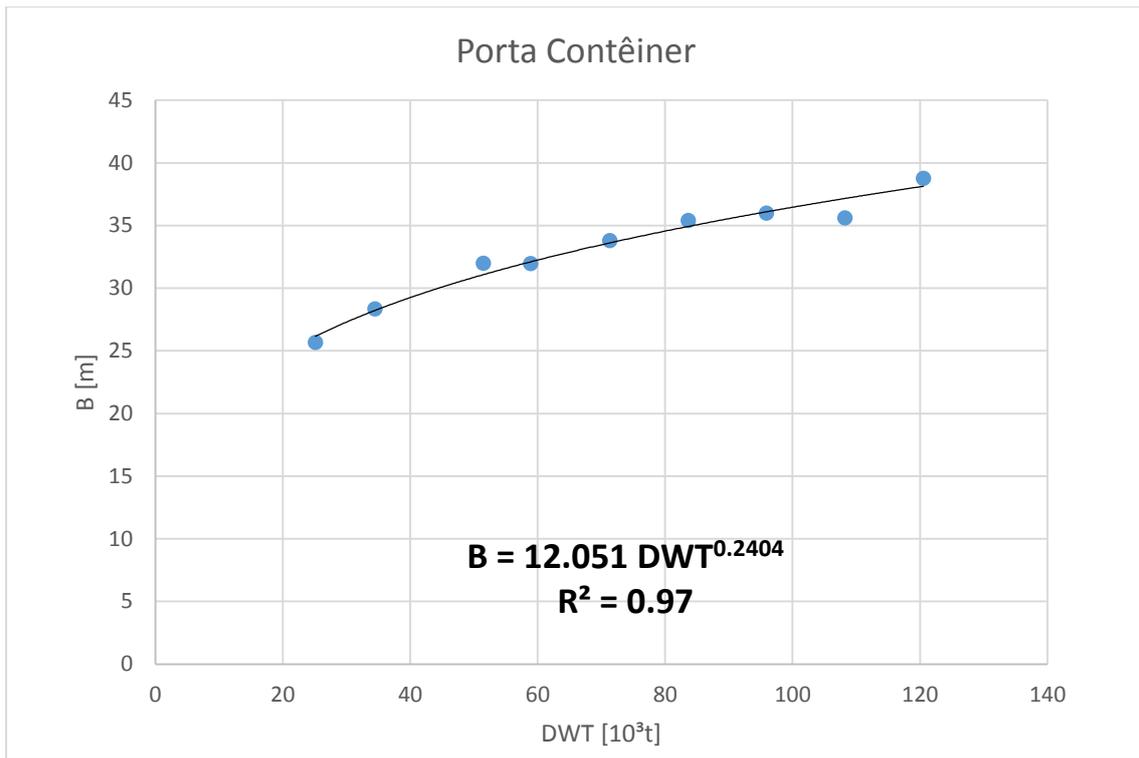
**Figura 27** – B em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



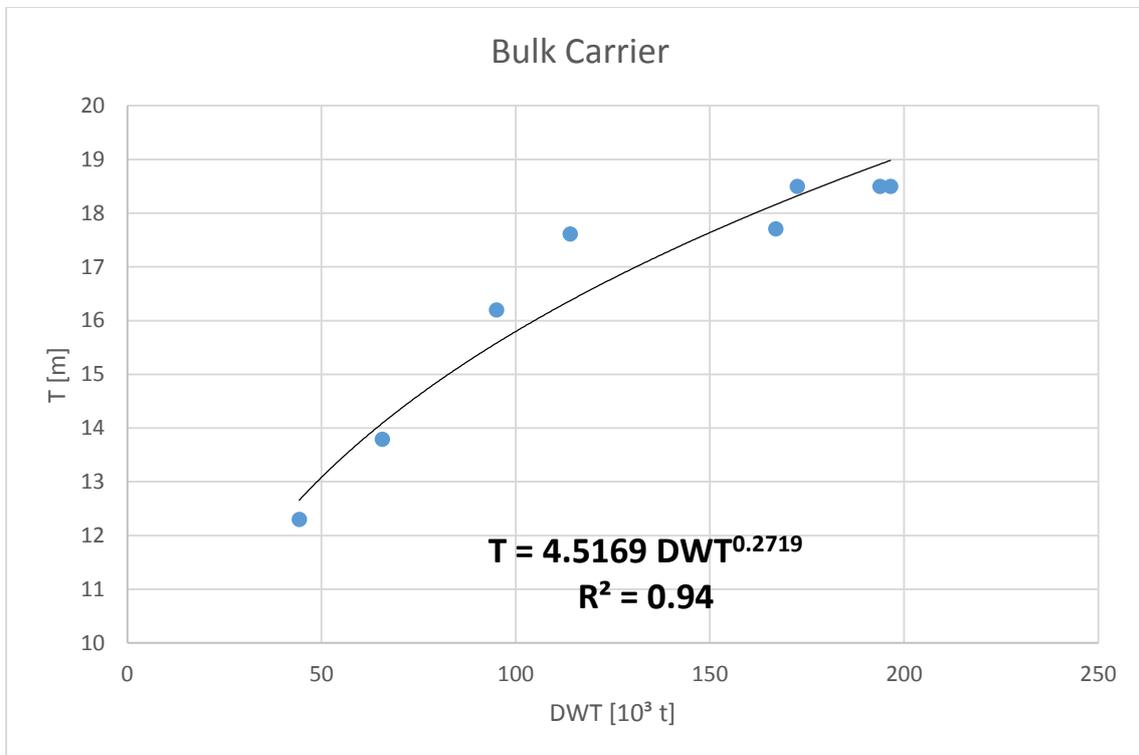
(b)



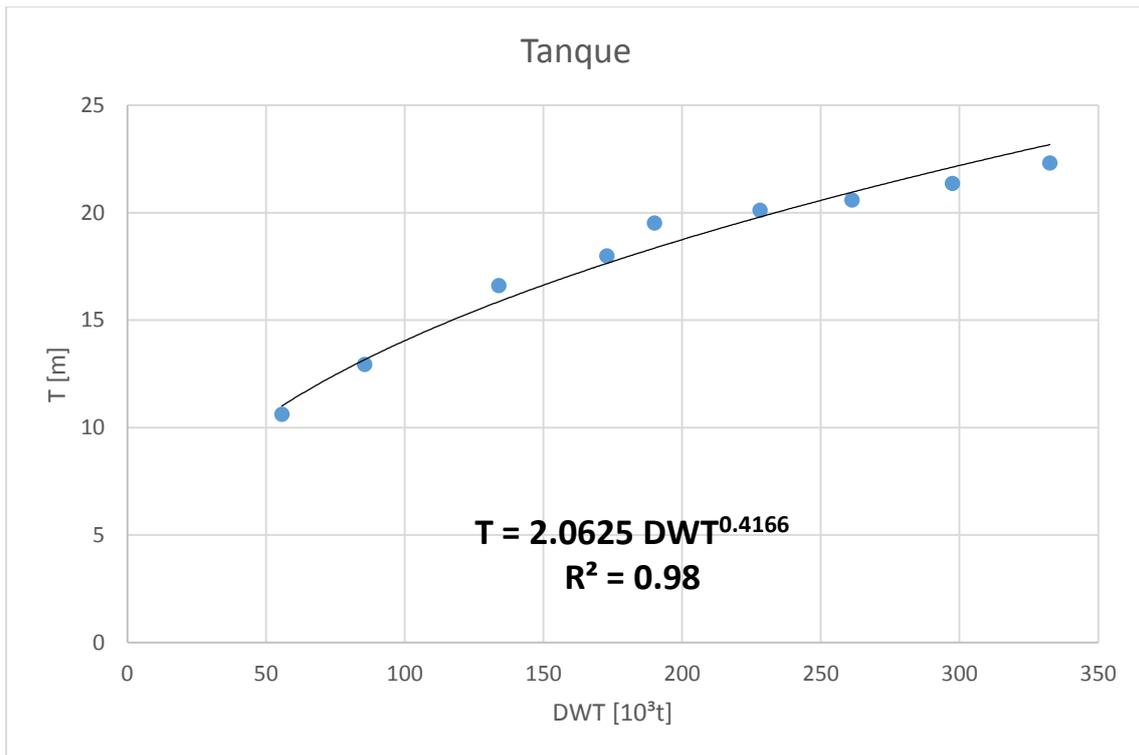
(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

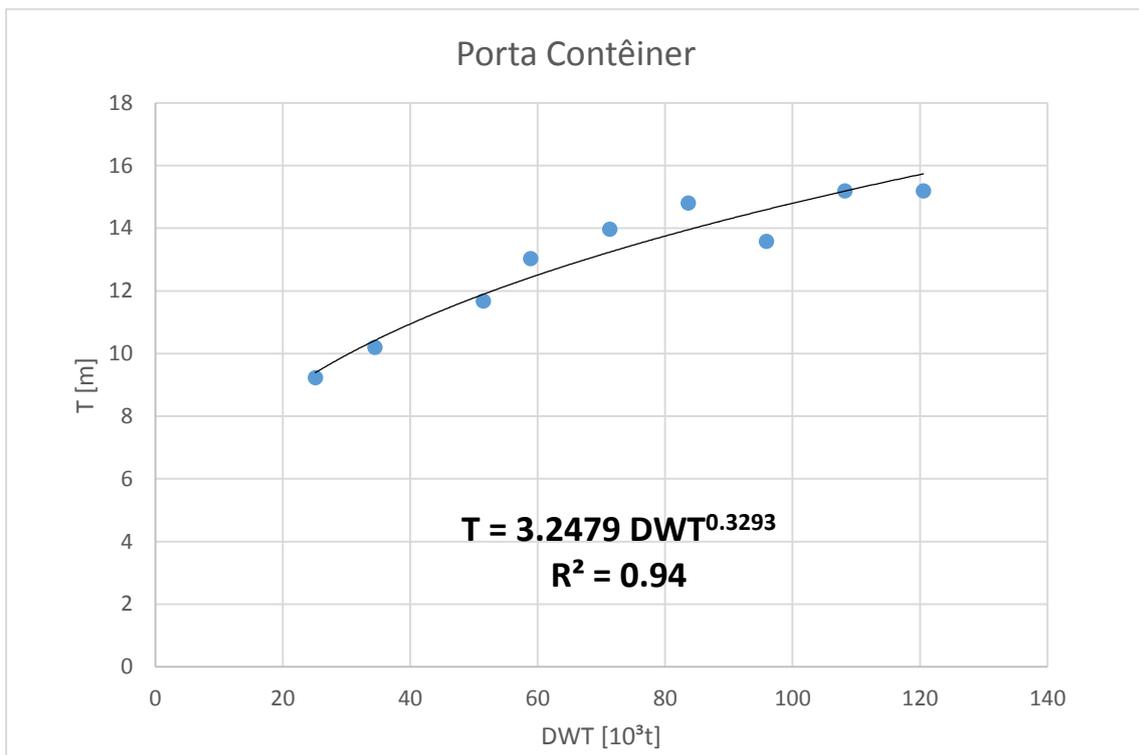
**Figura 28** – T em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



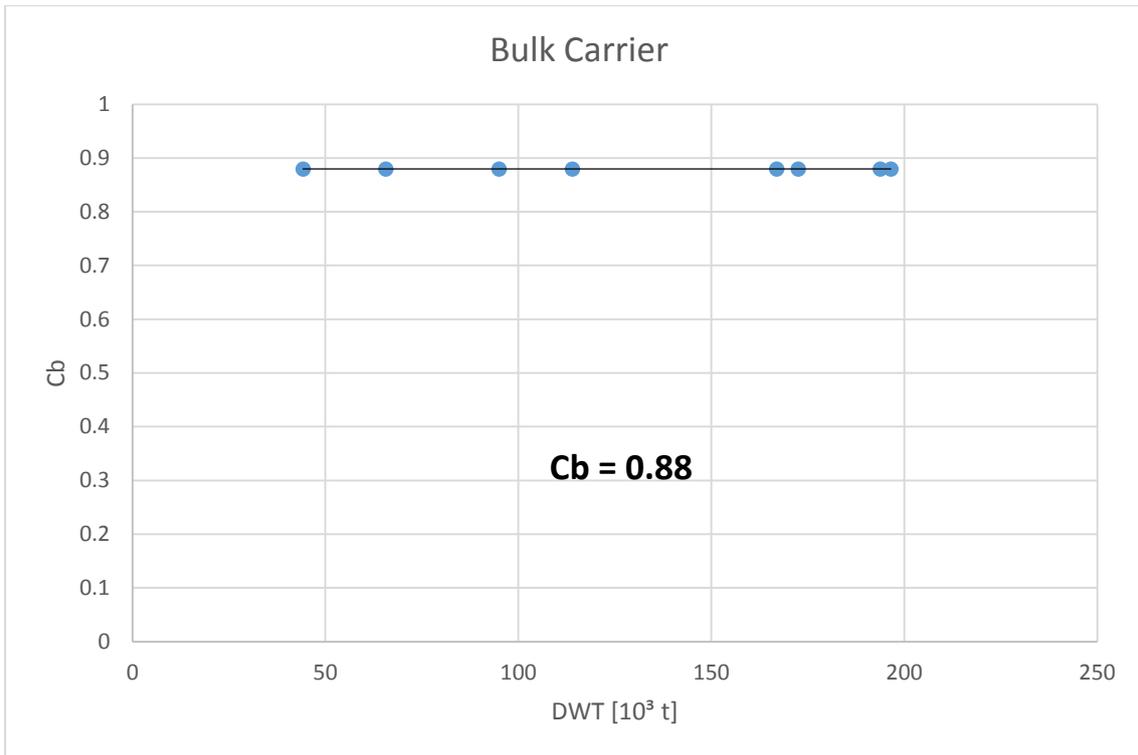
(b)



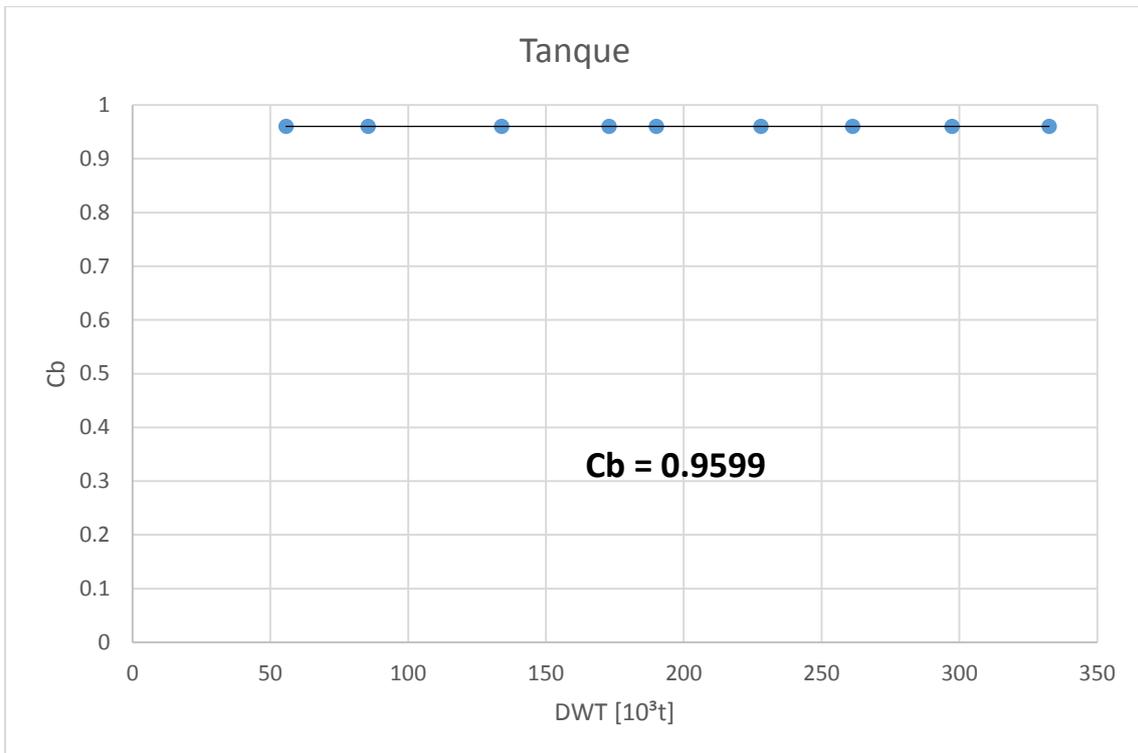
(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

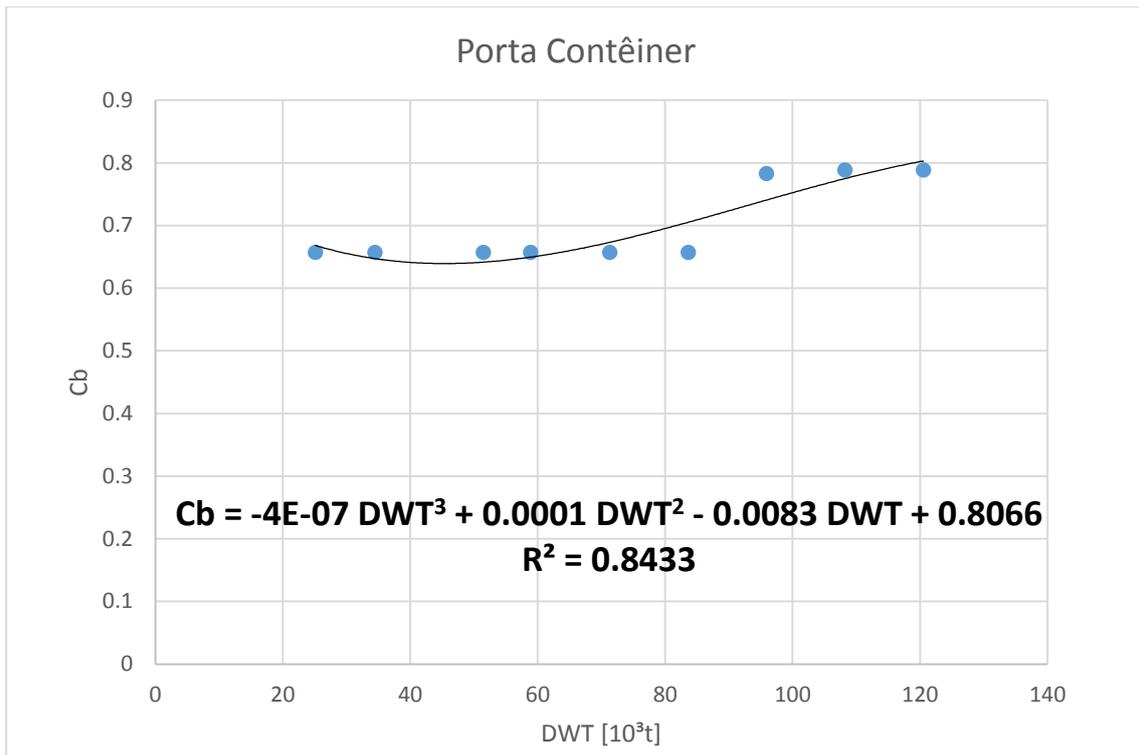
**Figura 29**– Cb em função do DWT: a) Bulk b) Tanque c) Porta Contêiner



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado deste trabalho é mostrados nas eq. (60-71). Um conjunto de correlações foi obtido para possibilitar a determinação das dimensões principais e o coeficiente de bloco em função do DWT.

- *Bulk carrier*

$$LBP = 108.02 DWT^{0.1818} \quad (60)$$

$$B = 3.2414 DWT^{0.5199} \quad (61)$$

$$T = 4.5169 DWT^{0.2719} \quad (62)$$

$$C_b = 0.88 \quad (63)$$

- *Tanque*

$$LBP = 103.33 DWT^{0.1847} \quad (64)$$

$$B = 7.0463 DWT^{0.3619} \quad (65)$$

$$T = 2.0625 DWT^{0.4166} \quad (66)$$

$$C_b = 0.9599 \quad (67)$$

- Porta Contêiner

$$LBP = 117.02 DWT^{0.2232} \quad (68)$$

$$B = 12.051 DWT^{0.2404} \quad (69)$$

$$T = 3.2479 DWT^{0.3293} \quad (70)$$

$$Cb = -4E-07 DWT^3 + 0.0001 DWT^2 - 0.0083 DWT + 0.8066 \quad (71)$$

As equações obtidas para embarcações do tipo *bulk carrier* considera a velocidade de serviço de 14 nós. Já para os tanques a velocidade é de 15 nós e porta contêiner 22 nós. Caso a velocidade de serviço estabelecida para o projeto seja outra será necessário utilizar o modelo de otimização do projeto conceitual.



**Tabela 19** – Comparação das dimensões empregando o modelo de otimização

Dimensões			IMO 9305609	Modelo obtido por otimização	Diferença
Comprimento	[m]	LBP	239.000	253.340	6%
Boca	[m]	B	44.000	36.191	-22%
Calado	[m]	T	15.400	15.241	-1%
Coeficiente de bloco		Cb	0.825	0.960	14%
L/B			5.432	7.000	22%
L/T			15.519	16.623	7%
B/T			2.857	2.375	-20%
Comprimento AO	[m]	LOA	250.000	264.412	5%
Comprimento WL	[m]	LWL	239.000	237.971	0%
Pontal	[m]	D	22.700	18.278	-24%
Borda livre	[m]	BL	7.300	3.037	-140%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 20 mostra a comparação das diferentes parcelas que compõem o peso da embarcação. A parcela que mais afetou a estimativa de peso foi o peso leve da embarcação (LWT) que é a soma do peso do maquinário, aço e equipamento. Nota-se que o LWT é estimado empregando métodos comumente utilizados na etapa conceitual, autores como Barrass, Watson, Schneekluth e Bertram propuseram tais fórmulas, como discutido no tópico 4.3.5.

**Tabela 20** – Comparação dos pesos empregando o modelo de otimização

Pesos			IMO 9305609	Modelo obtido por otimização	Diferença
Deslocamento	[t]	$\Delta$	137.00	129.15	-6%
<i>DeadWeight</i>	[t]	DWT	117.00	111.15	-5%
<i>LightWeight</i>	[t]	LWT	20.00	17.14	-17%
Peso maquinário	[t]	Wm		0.30	
Peso do aço	[t]	Wst		15.28	
Peso equipamento e outfit	[t]	Weo		1.56	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 21 mostra o dimensionamento do propulsor utilizando o método de otimização e as características do hélice e motor utilizados pela embarcação de referência.

**Tabela 21**– Comparação do dimensionamento do propulsor

Características do Propulsor		IMO 9305609	Modelo obtido por otimização	Diferença
Potência do motor	SHP	16625	10630	-56%
Eficiência do Hélice em águas abertas	$\eta_o$		0.567	
Razão área expandida e área do disco	Ae/Ao		0.283	
Rotação	[rpm] n	105.000	66.590	-58%
Empuxo	[kN] E		2647.833	
Diâmetro do hélice	[m] Dh	7.400	11.709	37%
Passo	[m] P		6.943	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como já discutido, um incremento no diâmetro do hélice ocasiona uma maior eficiência do propulsor em águas abertas. Este é limitado pelo calado da embarcação e por restrições construtivas. A embarcação de referência faz uso de um hélice 37% menor que o sugerido pelo processo de otimização.

A função objetivo tinha como interesse reduzir a potência do motor. Essa apresentou uma redução de 56% em relação à potência do motor utilizado pela embarcação de referência. É evidente que a escolha do motor irá considerar uma margem de erro sob a estimativa do SHP, optando por uma potência maior que a calculada. Ainda assim a redução é significativa e satisfatória.

Por fim, as equações obtidas na seção anterior foram empregadas para encontrar o comprimento, boca, calado e coeficiente de bloco da embarcação otimizada para o DWT e velocidade de serviço da embarcação de referência. Na tabela 22 são mostrados os resultados.

**Tabela 22**– Comparação do uso das equações empíricas

			IMO 9305609	Modelo obtido por otimização	Equações empíricas de otimização	Diferença (referência)	Diferença (modelo)
Comprimento	[m]	Lbp	239.0	253.3	249.0	4%	-2%
Boca	[m]	B	44.0	36.2	39.5	-11%	8%
Calado	[m]	T	15.4	15.2	15.0	-3%	-2%
Coeficiente de bloco		Cb	0.825	0.960	0.960	14%	0%

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 7. CONCLUSÃO

O projetista de uma nova embarcação deve estar preparado para solucionar conflitos do projeto, reduzir custos de fabricação e operação, atender aos requisitos do armador, cumprir restrições de normas, acompanhar as tendências de desenvolvimento de novos projetos, identificar os métodos mais adequados para cada dimensionamento, compreender as limitações estruturais e de manufatura, relacionar os muitos sistemas de um navio sempre buscando uma solução de compromisso que atenda aos requisitos de projeto e busque um diferencial competitivo de desempenho.

Dentro deste contexto, este trabalho apresentou um procedimento automatizado para o projeto conceitual de embarcações. O desenvolvimento do trabalho buscou comparar formulações e avaliar qualitativamente e quantitativamente os parâmetros encontrados por essas formulações, reduzindo o número de iterações ao longo do projeto.

Esses métodos foram comparados e avaliados a partir do estudo comparativos de um estudo de caso realizado. A confrontação desses dados com os dados de navios semelhantes permitiu a avaliação qualitativa dos métodos, a qual varia com o tipo de navio a ser dimensionado.

Como resultado final, apresenta-se um conjunto de 12 equações destinadas a determinar as dimensões principais e o coeficiente de bloco de um navio mercante (*bulk carrier*, tanque ou porta-contêiner) em função dos requisitos de capacidade de carga e velocidade de serviço da embarcação (14, 15 e 22 nós respectivamente).

Acredita-se que o objetivo inicial proposto por este trabalho tenha sido atingido. O método para obtenção dos parâmetros do projeto conceitual foi testado e funcionou de forma adequada. O algoritmo de otimização pode ser facilmente manipulado para o objetivo almejado, o que torna o processo robusto e eficiente.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Francisco José de. Estudo e Escolha de Metodologia para o Projeto Conceitual. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 8, n. 16, p.31-42, dez. 2000.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **PARTE 3: STEEL VESSELS UNDER 90 METERS (295 FEET) IN LENGTH**. Houston: 2014.

AMORIM, Fernando Antônio Sampaio de; SANGLARD, José Henrique; MARTINS FILHO, Protásio Dutra. Uma Abordagem Metodológica Integradora no Projeto do Navio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. **COBEM**. Rio de Janeiro: Coppe-ufrrj, 1999. p. 1 - 10.

BARRAS, C. B.. **Ship Design and Performance for Masters and Mates**. Oxford: Elsevier Limited, 2004. 265 p.

BENFORD, Harry. **General Cargo ship economics and design**. Ann Arbor: The University Of Michigan, 1965. 169 p.

BENFORD, Harry. **Status of Research into engineering economy in the design of general cargo ships**. Michigan: The University Of Michigan, 1961. 45 p.

BERNITGAS, M. M.; RAY, D.; KINLEY, P.. **Kt, Kq and efficiency curver for the wageningen B-Series Propellers**. Ann Arbor: The University Of Minchigan, 1981. 115 p.

FAVARIN, Julio. Metodologia para elaboração de projeto de estaleiro: relatório técnico. São Paulo: Cegn, 2010.

GALE, Peter A.; SLUTSKY, Jonathan. **Ship Design**. Virginia: p.1-21, jan. 2008.

KONOVESSIS, Dimitris. **An investigation on cost-effective tanker design configurations for reduced oil outflow**. Ocean Engineering. Scotland, p. 16-24. aug.2012.

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, Dominic A.. **Ship resistance and propulsion: a practical estimation of ship propulsive power**. New York: Cambridge University, 2011. 563 p.

ONIP (Org.). **Impacto Econômico da Expansão da Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro: Onip, 2000.

PARSONS, Michael G.. **PARAMETRIC DESIGN**. In: LAMB, Thomas.. **Ship design and construction**. Michigan, 2003. Cap. 11. p. 1-48.

ROBERTS, Stephen E.; PETTIT, Stephen J.; MARLOW, Peter B.. **Casualties and loss of life in *bulk carriers* from 1980 to 2010**. Marine Policy. Cardiff, p. 223-235. nov. 2013.

ROZENFELD, H., [et al.]. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: Uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva. 2006. 542 p.

SANTOS, Karla Ysla; TANCREDI, Thaigo Pontin; ANDRADE, Bernardo Luis Rodrigues de. **Projeto otimizado de um rebocador**: avaliação da fronteira de Pareto conceitual e dos barcos em operação. SOBENA, 2012, Rio de Janeiro. Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro. p. 1 – 22.

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V.. **Ship design for efficiency and economy**. Oxford: Elsevier, 1998. 226 p.

SOUSA, Filipe Lage de et al (Org.). **Bndes 60 anos: perspectivas setoriais**: A retomada da indústria naval brasileira. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. 384 p.

VENTURA, Manuel. **Estimation Methods for basic ship design**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, [20--?]. 122 slides, color.

WATSON, David G. M.. **Practical Ship Design**. Oxford: Elsevier, 1998. 556 p

## 9. ANEXOS

### Anexo 1 – Dados Tanque

	Nº IMO	Ano	Deslocamento [10 <sup>3</sup> t]	DWT [10 <sup>3</sup> t]	GT [10 <sup>3</sup> t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl* [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vserviço [knots]	CB	CD
1	0	2007	0.0	18.0	14.7	156.2	144.2	140.6	25.6	0.0	9.0	15	0.8048	0
2	0	2003	46.0	30.0	25.4	175.9	168.0	158.3	31.0	17.2	9.0	15	0.95746	0.652174
3	0	2006	46.2	35.7	24.2	183.2	174.0	164.9	27.4	16.9	11.5	15	0.820663	0.772772
4	0	2007	57.2	39.8	26.8	182.9	176.0	164.6	32.2	17.2	11.0	15.01	0.895338	0.694809
5	0	2007	57.5	39.9	27.9	183.9	174.0	165.5	32.2	18.0	11.0	14.5	0.909745	0.694275
6	0	2003	56.2	40.0	29.6	183.0	174.0	164.7	32.2	18.8	11.0	15.25	0.890116	0.711364
7	0	2007	50.1	40.4	25.8	180.0	172.0	162.0	32.2	16.5	10.5	15	0.84084	0.806864
8	0	2007	50.0	40.6	29.2	183.2	174.0	164.9	32.2	18.8	11.0	14.6	0.791812	0.811675
9	0	2006	57.7	47.5	28.1	183.3	177.0	165.0	32.3	18.0	12.5	14.6	0.78918	0.822419
10	0	2005	57.7	47.5	28.1	183.4	177.0	165.0	32.3	18.0	12.5	14.5	0.78956	0.822499
11	0	2007	60.6	50.1	30.0	183.0	174.0	164.7	32.2	19.1	11.0	14.9	0.959925	0.826187
12	0	2012	73.6	59.3	36.3	207.0	197.0	186.3	32.2	19.5	13.5	15	0.839051	0.805522
13	0	2011	73.657	59.3	36.3	207.0	197.0	186.3	32.2	19.5	13.5	15	0.839492	0.805558
14	0	2003	107.0	70.3	93.8	277.0	266.0	249.3	43.4	26.0	11.4	19.5	0.793202	0.657009
15	0	2005	84.6	70.7	42.2	228.0	219.0	205.2	32.3	20.4	12.2	15	0.955814	0.835323
16	0	2011	89.4	74.6	42.2	228.5	219.0	205.6	32.2	20.9	14.5	16	0.851961	0.834245
17	0	2008	0.0	75.0	42.4	228.3	219.0	205.5	32.2	20.9	12.2	15.3	0	0
18	0	2007	87.8	75.0	41.0	228.5	218.0	205.7	32.2	20.7	14.4	15.4	0.849371	0.853814
19	0	2003	0.0	89.0	62.6	249.9	239.0	224.9	44.0	21.0	12.2	15.1	0	0
20	0	2012	122.9	105.3	57.2	244.0	0.0	219.6	42.0	21.0	0.0	14.6	0	0.856299
21	0	2008	134.4	115.4	62.9	250.0	239.0	225.0	44.0	21.0	14.9	15	0.836994	0.85851
22	0	2011	134.3	115.7	61.3	250.0	0.0	225.0	43.8	21.0	0.0	15.3	0	0.861248
23	0	2007	133.3	115.9	61.3	249.0	239.0	224.1	43.8	21.0	14.9	25.2	0.832083	0.869384
24	0	2007	133.3	115.9	61.3	250.0	239.0	225.0	43.8	21.0	14.9	14	0.833276	0.869527
25	0	2007	172.6	149.8	79.2	274.2	263.0	246.8	48.0	22.4	16.0	16	0.833903	0.867944
26	0	2008	172.6	149.9	79.2	274.2	263.0	246.8	48.0	22.4	16.0	16	0.833903	0.868112
27	0	2006	172.6	150.2	79.2	274.2	263.0	246.8	48.0	22.4	15.3	15.2	0.872056	0.870017
28	0	2013	0.0	154.8	88.4	278.3	264.0	250.5	48.7	23.6	16.6	14.5	0	0
29	0	2010	182.5	156.7	83.8	274.5	264.0	247.1	48.0	23.7	17.0	15.1	0.826629	0.858555
30	0	2010	182.5	156.8	83.8	274.0	264.0	246.6	48.0	23.7	17.0	15.1	0.826676	0.858786
31	0	2012	182.9	159.1	81.5	274.2	264.0	246.8	48.0	23.2	17.0	15.3	0.828089	0.869882
32	0	2011	191.1	164.7	84.7	274.2	264.0	246.8	50.0	23.1	17.2	15.8	0.823356	0.862147
33	0	2010	191.1	164.7	84.7	274.2	264.0	246.8	50.0	23.1	17.2	16	0.823356	0.862152
34	0	2011	339.1	296.4	156.7	330.0	316.0	297.0	60.0	29.7	0.0	15.6	0	0.874078
35	0	2010	339.1	297.0	157.0	330.0	315.9	297.0	60.0	29.7	21.5	15.8	0.811737	0.875868
36	0	2011	339.1	297.2	157.0	329.9	316.0	296.9	60.0	29.7	21.5	15.8	0.811654	0.876432
37	0	2011	339.1	297.3	157.0	330.0	315.9	297.0	60.0	29.7	21.5	15.8	0.812013	0.876777
38	0	2009	362.4	300.0	160.6	333.0	319.0	299.7	60.0	30.4	21.5	15.5	0.860406	0.827787
39	0	2007	349.1	306.5	157.8	332.0	320.0	298.8	58.0	31.0	22.5	14.8	0.815475	0.8781
40	0	2007	349.1	306.5	157.8	332.0	320.0	298.8	58.0	31.0	22.5	14.8	0.816746	0.878206
41	0	2009	362.7	317.7	160.8	333.0	0.0	299.7	60.0	30.0	0.0	16	0	0.875925
42	0	2010	364.5	318.3	160.5	333.0	319.0	299.7	60.0	30.4	22.6	14	0.821081	0.873435

Fonte: DNV Exchange e World-Ships (2014) e Significant Ships (2003 -2007). Elaborada pelo autor.

## Anexo 2 – Dados Bulk carrier

	Nº IMO	Ano	Deslocamento [10³ t]	DWT [10³ t]	GT [10³ t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl* [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vserviço [knots]	CB	CD
1	9660542	2014	109.84	81.9	43.9	229.0	0	206.1	32.3	0	0	0	0	0.74522
2	9600982	2013	87.473	71.5	43.7	228.6	0	205.74	32.3	20.15	0	14	0	0.817395
3	9609835	2012	0	56.8	33.0	190.0	185.58	170.982	32.3	17.99	12.8	14.2	0	0
4	9718337	2014	0	63.8	36.3	199.9	194.487	179.91	32.3	18.5	11.32	0	0	0
5	9524683	2013	0	55.3	32.8	188.0	182.52	169.2	32.2	18.3	11.3	14.5	0	0
6	9670418	2014	0	39.0	24.9	179.9	0	161.91	30.0	14.8	0	0	0	0
7	9595395	2012	45.607	34.0	22.4	180.4	171.4	162.36	30.0	14.4	9.9	15	0.874058	0.7455
8	9642801	2014	0	81.2	44.5	229.0	225.43	206.1	32.3	20.1	14.45	15	0	0
9	9449273	2011	0	57.3	32.2	190.0	183.3	171	32.3	18.5	13.02	14.5	0	0
10	9483231	2010	0	56.0	32.7	187.8	182.5	169.02	32.3	18.3	12.85	14.5	0	0
11	9597185	2011	0	176.2	91.4	292.0	282	262.755	45.0	24.8	18.02	15	0	0
12	9497177	2010	41.748	32.7	20.8	179.9	171.5	161.91	28.4	14.1	10.15	13.6	0.823009	0.782984
13	9546203	2013	44.258	33.5	23.4	180.0	170	162	30.0	14.7	9.8	14	0.863916	0.756925
14	9546227	2012	44.532	33.8	23.4	180.0	170	162	30.0	14.7	9.8	14	0.869265	0.758421
15	9632844	2014	0	82.0	44.1	229.1	225.5	206.146	32.3	20.04	14.45	15	0	0
16	9658898	2013	0	55.3	31.6	190.0	185.79	170.991	32.3	17.87	12.55	15	0	0
17	9476977	2010	0	35.9	20.5	200.0	195.5	179.982	23.8	14.85	10.82	14	0	0
18	9330630	2007	0	53.5	32.6	190.0	183.05	171	32.3	17.5	12.6	14.7	0	0
19	9558713	2012	0	205.1	107.0	299.9	0	269.91	50.0	24.85	0	15.5	0	0
20	9528196	2012	0	205.2	107.0	299.0	0	269.1	50.0	24.85	0	15.5	0	0
21	9528201	2012	0	205.6	107.0	299.9	0	269.91	50.0	24.85	0	15	0	0
22	9592094	2013	0	81.2	44.5	229.0	225.44	206.1	32.3	20.1	14.45	15	0	0
23	9482251	2011	0	182.7	93.3	292.0	0	262.8	45.0	24.7	0	17.4	0	0
24	9368871	2007	0	58.0	32.4	190.0	185.6	171	32.3	18	12.8	14	0	0
25	9474785	2009	0	53.4	31.1	189.9	182	170.91	32.2	17.2	12.5	14.7	0	0
26	9347877	2007	0	53.5	31.1	189.9	182	170.91	32.3	17.2	12.49	14.7	0	0
27	9316165	2005	0	55.4	31.1	189.9	185	170.91	32.3	17.8	12.52	14.6	0	0
28	9330812	2007	0	76.5	41.1	225.0	217	202.5	32.3	19.6	14.2	14.4	0	0
29	9316153	2005	0	55.4	31.1	189.9	185	170.91	32.3	17.8	12.52	14.5	0	0
30	9519171	2011	45.607	34.0	22.4	180.4	171.4	162.36	30.0	14.4	9.9	14	0.874058	0.7455
31	9682904	2014	0	28.1	17.0	169.9	0	152.91	27.2	13.6	0	14	0	0
32	9437696	2009	0	169.3	89.5	289.0	279	260.1	45.0	24.2	16.5	14.5	0	0
33	9413420	2009	88.558	75.5	41.7	225.0	217	202.5	32.3	19.7	14.15	14	0.871674	0.852549
34	9438614	2011	0	74.5	41.6	224.9	217	202.41	32.7	19.7	14.17	14	0	0
35	9617674	2013	0	58.0	32.8	190.0	185	170.991	32.3	18	12.97	14.3	0	0
36	9543419	2011	44.964	36.6	22.7	187.0	178	168.3	27.8	15.6	10.9	14.5	0.813298	0.813562
37	9605176	2012	45.038	35.0	24.2	179.9	176.72	161.946	30.0	14.695	10.1	14.2	0.820591	0.777122
38	9577769	2012	46.336	34.7	24.2	179.6	176.55	161.595	30.0	14.7	10.1	14.2	0.845054	0.749288
39	9646780	2013	46.618	35.0	24.2	179.9	176.757	161.91	30.0	14.695	10	14.2	0.857693	0.750783
40	9577757	2011	46.341	34.7	24.2	179.9	176.6	161.892	30.0	14.7	10	14.2	0.853355	0.749531
41	9646845	2014	0	206.0	106.8	299.9	294	269.928	50.0	24.9	18.5	14.5	0	0
42	9597197	2011	0	176.0	91.4	292.0	282	262.755	45.0	24.8	18.32	15	0	0
43	9290878	2005	0	55.7	31.2	190.0	182	170.991	32.3	17.9	12.55	14.5	0	0
44	9434448	2010	0	176.0	92.1	291.8	282	262.62	45.0	24.75	18.25	14.5	0	0
45	9540481	2011	0	80.7	43.8	229.0	222	206.1	32.2	20.1	14.45	14.4	0	0
46	9354832	2006	0	82.2	43.2	229.0	222	206.091	32.3	20	14.4	14.5	0	0
47	9401489	2007	0	82.2	43.2	229.0	222	206.091	32.3	20	14.43	14	0	0
48	9361225	2006	0	82.3	43.2	229.0	222	206.1	32.3	20	14.43	14	0	0
49	9493975	2010	0	58.1	32.3	190.0	185.6	170.991	32.3	18	12.8	14.5	0	0
50	9321914	2007	0	62.2	40.9	225.0	216	202.5	32.2	19.7	12.2	14.5	0	0
51	9239800	2003	34.9	26.7	18.3	186.4	177	167.76	23.7	14.2	9.7	14	0.836774	0.766103
52	9260158	2003	41.74	32.7	22.0	179.3	172	161.37	28.0	15.2	10.2	14.5	0.828976	0.782942
53	Libertas	2003	87.37	62.2	40.9	225.0	216	202.5	32.2	19.7	14.2	14.5	0.861988	0.711949
54	BAAGHI	0	63.01619866	53.5	0.0	190.0	183.1	171.037	32.3	17.503	12.54	14	0.83	0.848306
55	K NAVIGA	0	62.45241496	53.0	0.0	190.0	183.41	171	32.3	17.5	12.56	14	0.82	0.848646
56	CHASTITY	0	62.2172742	43.0	0.0	190.0	183.04	171	32.3	17.5	12.54	14	0.82	0.691126
57	CHIMES	0	62.534349	53.0	0.0	190.0	183.04	171	32.3	17.5	12.6	14	0.82	0.847534
58	ARMENCIT	0	69.12877199	58.5	0.0	190.0	185.6	171	32.3	17.5	12.8	14	0.88	0.846247
59	R.BOLOGN	0	65.13786368	55.6	0.0	187.9	182.5	169.092	32.3	18.3	12.85	14.5	0.84	0.852975
60	LORENCE	0	62.53776543	53.0	0.0	190.0	183.05	171	32.3	17.5	12.6	14	0.82	0.847488
61	FASSA	0	64.9991275	55.4	0.0	190.0	184.985	170.995	32.3	17.806	12.5	14.5	0.85	0.853042
62	FAVORITA	0	57.96997956	52.3	0.0	190.0	182.87	170.991	30.3	17	12.02	14	0.85	0.902053
63	FERMITA	0	57.69418866	52.4	0.0	184.8	182	166.338	30.3	17	12.02	14	0.85	0.90789
64	CO CAVA	0	60.90189227	53.6	0.0	190.0	175.55	170.991	32.3	17.2	12.49	14	0.84	0.880383
65	UANG YIN	0	49.55478026	40.5	0.0	185.2	182	166.68	30.5	15.73	11.02	14.5	0.79	0.817298
66	GRETA	0	61.16620179	53.6	0.0	190.0	176.03	170.991	32.3	17.2	12.51	14	0.84	0.876644
67	I OF PARA	0	50.11636208	41.1	0.0	190.0	182	171.038	29.5	15.83	11.1	14.5	0.82	0.819892
68	ENE SELN	0	66.10471473	55.7	0.0	190.0	183.097	171	32.3	17.9	12.55	14	0.87	0.843223
69	HAAMI	0	48.18861848	53.0	0.0	185.5	175.01	166.95	26.0	17.495	12.6	14	0.82	1.099845
70	HAADI	0	56.8487304	53.4	0.0	182.8	176	164.52	30.5	17.5	12.6	14	0.82	0.940074
71	HOOTAN	0	50.52305581	33.9	0.0	188.3	179.5	169.497	31.0	15.5	11.5	14.5	0.77	0.67007
72	JOALMI	0	51.84679278	42.3	0.0	188.1	178	169.326	31.0	15.95	11.32	14.5	0.81	0.815152
73	DST SCHUI	0	54.33881753	45.9	0.0	189.0	182	170.1	30.0	16.3	11.83	14.5	0.82	0.844222
74	LEROS	0	63.44284183	42.1	0.0	189.9	182	170.91	32.3	17.9	12.55	14.5	0.84	0.663321
75	FRSHIDAB	0	53.69960125	47.3	0.0	183.8	176	165.42	30.5	15.95	11.22	14.5	0.87	0.881031

Fonte: DNV Exchange e World-Ships (2014) e Significant Ships (2003 -2007). Elaborada pelo autor.

### Anexo 3– Dados Porta contêiner

	Nº IMO	Ano	Deslocamento [10³ t]	DWT [10³ t]	GT [10³ t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl* [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vserviço [knots]	CB	CD
1	9603594	2013	46.24	34.1	26.4	208.9	0.0	188.0	29.8	16.4	0	0	0	0.738408
2	9504592	2014	0	34.1	25.3	208.9	0.0	188.0	29.8	16.4	0	0	0	0
3	9492701	2011	0	58.2	46.4	269.8	254.3	242.8	35.0	19.5	11.0	24.5	0	0
4	9484558	2010	0	50.3	47.9	264.0	251.0	237.6	32.2	21.5	13.5	22.5	0	0
5	9665683	2014	0	65.1	51.9	255.0	244.0	229.5	37.3	22.0	13.9	22	0	0
6	9635688	2013	0	79.9	71.1	270.0	0.0	243.0	42.8	24.8	0.0	22.5	0	0
7	9315848	2005	0	39.2	28.9	222.2	210.0	200.0	30.0	16.8	12.0	23	0	0
8	9330264	2006	0	13.6	10.0	147.8	0.0	133.0	23.3	11.5	0.0	19.6	0	0
9	9338967	2005	0	23.7	18.3	175.0	165.0	157.5	27.4	14.3	10.9	20.5	0	0
10	9309162	2005	0	23.6	18.3	175.5	165.0	158.0	27.4	14.3	10.9	19.5	0	0
11	9332860	2009	0	77.7	71.8	293.2	276.0	263.9	40.0	24.3	14.0	25	0	0
12	9630389	2014	0	115.3	113.0	337.0	321.7	303.3	48.3	27.5	15.2	23	0	0
13	9630406	2014	0	115.1	113.0	337.0	321.7	303.3	48.2	27.2	15.2	23	0	0
14	9459400	2013	0	47.1	38.4	239.6	0.0	215.6	32.2	19.2	0.0	23	0	0
15	9334820	2007	0	23.5	18.3	175.6	0.0	158.0	27.4	14.3	0.0	19	0	0
16	9459412	2012	0	47.3	38.4	239.5	0.0	215.6	32.2	19.2	0.0	22.7	0	0
17	9436082	2009	0	23.4	18.3	175.5	0.0	158.0	27.4	14.3	0.0	20.6	0	0
18	9323481	2006	0	23.6	18.3	175.5	0.0	158.0	27.4	14.3	0.0	19.5	0	0
19	9334818	2007	0	20.7	18.3	170.0	166.1	153.0	27.4	14.3	0.0	19	0	0
20	9373462	2007	0	23.4	18.3	175.0	0.0	157.5	27.4	14.3	0.0	19	0	0
21	9516753	2011	0	23.5	18.4	175.0	165.0	157.5	27.4	14.3	10.9	19.8	0	0
22	9334375	2008	0	42.2	35.8	220.4	210.2	198.4	32.3	18.7	12.2	22	0	0
23	9317925	2006	0	53.9	53.5	294.1	283.2	264.7	33.2	21.8	12.0	23.5	0	0
24	9347566	2008	0	99.1	94.5	339.6	0.0	305.7	45.6	24.6	0.0	27	0	0
25	9330707	2007	0	62.3	52.6	294.1	0.0	264.7	32.2	21.8	0.0	25.2	0	0
26	9292125	2005	0	23.7	18.3	175.0	165.0	157.5	27.4	14.3	10.9	19.5	0	0
27	9344708	2008	0	53.9	41.8	264.2	249.0	237.8	32.2	19.5	12.7	24.4	0	0
28	9348455	2008	0	53.9	41.8	264.1	249.0	237.7	32.2	19.5	12.8	23.9	0	0
29	9314997	2007	0	39.2	28.9	222.2	210.0	200.0	30.0	16.8	12.0	23	0	0
30	9389693	2008	0	50.6	40.0	260.0	244.8	234.0	32.3	19.3	12.6	24.5	0	0
31	9391268	2009	0	50.7	40.0	260.0	244.7	234.0	32.3	19.3	12.6	24.5	0	0
32	9306160	2006	0	81.2	73.9	304.1	286.0	273.7	40.0	24.5	14.0	25.5	0	0
33	9306483	2005	0	33.9	25.4	207.4	195.4	186.7	29.8	16.4	11.4	22.7	0	0
34	9332858	2008	0	73.0	71.8	293.2	276.0	263.9	40.0	24.3	14.0	26	0	0
35	9315836	2005	0	38.2	28.9	222.0	210.0	199.8	30.0	16.8	12.0	23	0	0
36	9306471	2005	0	33.9	25.4	207.4	195.4	186.7	29.8	16.4	11.4	22.7	0	0
37	9315874	2005	0	39.2	28.9	221.0	210.0	198.9	30.0	16.8	12.0	22	0	0
38	9312418	2005	0	33.9	25.4	207.4	195.4	186.7	29.8	16.4	11.4	22.7	0	0
39	9493298	2012	0	11.5	9.8	144.1	136.1	129.7	22.5	11.2	7.3	19.9	0	0
40	9493250	2011	0	17.9	16.8	172.1	162.1	154.9	27.3	13.7	8.5	20	0	0
41	9493286	2012	0	17.9	16.8	172.1	162.1	154.9	27.3	13.7	8.5	19.9	0	0
42	9327786	2007	0	69.8	66.2	276.2	266.8	248.6	40.0	20.2	14.0	26	0	0
43	9331165	2008	0	69.8	66.2	276.2	266.8	248.6	40.0	20.2	14.0	26	0	0
44	9327683	2008	0	39.0	32.2	210.9	196.0	189.8	32.3	19.0	12.0	21.6	0	0
45	9450571	2009	0	50.5	40.0	260.0	244.8	234.0	32.3	19.3	12.6	24	0	0
46	9319155	2006	0	22.0	16.5	172.7	162.1	155.4	27.3	13.5	9.5	19.8	0	0
47	9450595	2009	0	50.5	40.0	260.0	244.8	234.0	32.3	19.3	12.6	24	0	0
48	9302645	2007	0	82.3	90.4	335.0	319.0	301.5	42.8	24.6	14.5	25.6	0	0
49	Cap Palm	2007	37.94	21.8	22.9	186.4	175.0	167.7	27.6	17.1	9.8	21.2	0.781988	0.573274
50	Cosco Ne	2007	88.4	55.9	54.8	294.0	283.0	264.6	32.2	21.6	12.0	24.3	0.788687	0.632353
51	Ital Matti	2007	70.95	43.5	42.0	264.2	249.0	237.8	32.2	19.5	11.3	23.9	0	0
52	Maersk S	2007	0	89.4	94.3	332.0	317.2	298.8	43.4	24.5	13.0	25.4	0	0
53	Ruiloba	2007	24.39	14.5	14.0	159.8	143.0	143.8	22.0	0.0	8.4	18.7	0	0
54	Csav Llar	2010	67.907	50.2	40.5	0.0	248.0	0.0	32.3	0.0	12.6	24.5	0.657414	0.739968
55	Bahia Neg	2007	69.348	53.1	41.5	0.0	242.0	0.0	32.2	0.0	12.4	22.4	0.700192	0.766049
56	Cscl Brist	2005	67.27	50.7	39.9	0.0	244.8	0.0	32.3	0.0	12.6	24.5	0.65976	0.754393
57	Msc Fabienn	2004	86.933	66.694	54.774	0.0	283.2	0.0	32.2	0.0	13.55	24	0.686392	0.767189
58	rsten Maer	2000	142.8	110.381	92.182	0.0	331.54	0.0	42.8	0.0	14.94	0	0.657164	0.772976
59	Msc Poh Lin	2004	87.026	66.786	54.774	0.0	283.2	0.0	32.2	0.0	13.55	0	0.687127	0.767426

Fonte: DNV Exchange e World-Ships (2014) e Significant Ships (2003 -2007). Elaborada pelo autor.

### Anexo 4– Dados Cruzeiro

	Nº IMO	Ano	Deslocamento [10³ t]	DWT [10³ t]	GT [10³ t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl* [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vserviço [knots]	CB	CD	Passageiros
1	9195200	2002	0	10.8	90.1	292.0	263.5	262.8	32.2	0.0	8.5	24.0	0.0	0.0	2496.0
2	9304033	2006	0	10.5	154.4	338.8	303.2	304.9	39.0	0.0	8.8	21.6	0.0	0.0	4375.0
3	9331189	2007	0	10.4	28.5	200.0	182.8	180.0	26.7	0.0	6.3	22.0	0.0	0.0	0
4	9349681	2008	0	10.5	154.4	338.7	303.2	304.8	38.6	0.0	8.8	22.0	0.0	0.0	4328.0
5	9330032	2007	0	10.5	154.4	338.9	0.0	305.0	38.6	0.0	8.5	22.0	0.0	0.0	4328.0
6	9641730	2014	0	7.9	99.5	293.2	272.8	263.9	35.8	0.0	8.1		0.0	0.0	2500.0
7	9606912	2013	0	11.1	145.7	325.6	300.1	293.1	39.7	0.0	8.6	21.0	0.0	0.0	0.0
8	9410569	2010	0	10.9	155.9	329.5	288.8	296.5	40.6	0.0	8.7	22.5	0.0	0.0	5186.0
9	9355733	2007	0	10.0	93.5	294.1	263.5	264.7	32.2	0.0	8.6	24.0	0.0	0.0	3130.0
10	9606924	2014	0	11.1	145.7	325.7	300.1	293.1	39.7	0.0	8.6	21.0	0.0	0.0	0
11	9304057	2006	0	7.5	93.6	294.1	264.8	264.7	32.2	0.0	8.6	24.6	0.0	0.0	3130.0
12	9304045	2005	0	7.5	93.5	294.1	264.8	264.7	32.2	0.0	8.6	25.6	0.0	0.0	3000.0
13	9342281	2006	0	10.0	93.5	294.1	264.8	264.7	32.2	0.0	8.3	29.6	0.0	0.0	3130.0
14	9383936	2009	0	15.0	225.3	360.0	329.9	324.0	47.0	0.0	9.3	29.6	0.0	0.0	3130.0
15	9209221	2005	0	8.3	80.4	280.6	257.6	252.5	32.2	0.0	8.0	21.0	0.0	0.0	3236.0
16	9275218	2005	0	2.1	12.7	138.0	123.0	124.2	22.7	0.0	5.8	21.0	0.0	0.0	100.0
17	coastal re	2007	9.953	2.2	21.7	160.0	154.0	144.0	27.6	0.0	5.8	21.0	0.4	0.2	1650
18	MS Fram	2007	6.8	1.0	11.7	113.7	99.2	102.3	20.2	0.0	5.0	16.4	0.7	0.1	500
19	queen vic	2007	47.25	7.7	90.0	294.0	265.0	264.6	32.3	0.0	8.5	21.7	0.64	0.2	2014
20	queen ma	2003	79.5	14.3	150.0	345.0	301.0	310.5	45.0	0.0	10.0	26.5	0.6	0.2	0

Fonte: DNV Exchange e World-Ships (2014) e Significant Ships (2003 -2007). Elaborada pelo autor.

### Anexo 5– Dados Supply Vessel

	Nº IMO	Ano	Deslocamento [10³ t]	DWT [10³ t]	GT [10³ t]	Loa [m]	Lbp [m]	Lwl* [m]	B [m]	D [m]	T [m]	Vserviço [knots]	CB	CP		
1	9665102	2013	0	4.2	3.6	83.4	76.5	75.1	18.0	8.0	6.7	12.0	0	0		
2	9344332	2006	0	3.2	2.2	73.6	68.2	66.2	16.0	7.0	5.8	15.2	0	0		
3	9444364	2010	0	3.3	2.2	73.6	68.3	66.2	16.0	7.0	5.8	13.0	0	0		
4	9608740	2013	0	4.7	3.9	87.9	77.2	79.1	19.0	8.0	6.6	11.0	0	0		
5	9634347	2013	0	4.3	4.6	85.6	77.7	77.0	20.0	8.6	0.0	15.0	0	0		
6	9322188	2005	0	3.3	2.2	72.0	66.8	64.8	16.0	7.0	6.0	15.0	0	0		
7	9359208	2006	0	3.5	2.6	73.4	64.0	66.1	16.6	7.6	6.5	14.0	0	0		
8	9395446	2009	0	3.2	2.2	73.6	68.3	66.2	16.0	7.0	5.8	14.0	0	0		
9	9350240	2005	0	3.5	2.5	73.4	64.0	66.1	16.6	7.6	6.5	11.5	0	0		
10	9625504	2013	0	4.9	4.9	92.2	82.2	83.0	20.6	9.0	7.2	16.0	0	0		
11	9409730	2009	0	4.0	3.7	85.8	77.4	77.2	19.6	8.0	6.7	13.0	0	0		
12	9491422	2014	0	4.5	5.0	88.8	82.0	79.9	19.0	8.0	6.6	15.5	0	0		
13	9388950	2008	0	5.2	4.8	93.0	80.8	83.7	21.0	8.2	6.2	12.0	0	0		
14	9334129	2005	0	3.3	2.1	72.0	66.8	64.8	16.0	7.0	5.8		0	0		
15	9616187	2012	0	4.0	3.5	81.7	74.0	73.5	18.0	7.8	6.5	12.5	0	0		
16	9608738	2013	0	4.7	3.9	87.9	77.2	79.1	19.0	8.0	6.6	11.0	0	0		
17	9393852	2007	0	3.8	2.6	73.4	64.0	66.1	16.6	7.6	6.5	10.0	0	0		
18	9381691	2008	0	4.5	4.8	93.0	80.8	83.7	21.0	8.2	6.6	12.0	0	0		
19	9609988	2012	0	4.0	3.5	81.7	74.0	73.5	18.0	7.8	6.5	12.5	0	0		
20	9392846	2008	0	3.2	2.2	73.9	68.3	66.5	16.0	7.0	5.8	14.0	0	0		
21	9339129	2006	0	3.2	4.5	86.7	78.0	78.0	19.7	7.5	6.1	12.0	0	0		
22	9545479	2012	0	3.3	4.1	79.7	71.5	71.7	16.4	7.5	6.2	12.0	0	0		
23	9392834	2008	0	3.2	2.2	73.9	68.3	66.5	16.0	7.0	5.8	14.0	0	0		
24	9545481	2012	0	3.1	4.1	79.7	71.5	71.7	16.4	7.5	6.2	12.0	0	0		
25	9466465	2010	0	4.6	4.8	93.6	86.6	84.2	19.7	7.9	6.3	14.5	0	0		
26	9607344	2013	0	3.7	3.3	78.0	0.0	70.2	17.0	8.0	0.0	11.0	0	0		
27	9466465	2010	0	4.6	4.8	93.6	86.6	84.2	19.7	7.9	6.3		0	0		
28	9607344	2013	0	3.7	3.3	78.0	0.0	70.2	17.0	8.0	0.0		0	0		
29	GP 640	0	3.628	2.285	1.702	64	61.57	57.6	16.5	5.8	4.9		0	0.711040331	0.629824	
30	GP 654	0	2.398	1.686	1.6	57.95	54.9	52.155	14	5.5	4.3		0	0.707874842	0.703086	
32	GPA 670	0	4.87	3.25	5.157	73.2	70.76	65.88	16.5	6.8	5.3		0	0.76781653	0.667351	
33	PA 670 MH	0	4.803	3.25	2.57	73.2	70.76	65.88	16.5	6.8	5.3		0	0.757253141	0.67666	
34	A 654M P	0	2.398	1.655	1.6	57.95	54.9	52.155	14	5.5	4.3		0	0.707874842	0.690158	
35	GPA 254L	0		2.7	1.67	1.8	59.78	57.34	53.802	15	5.5	4.3		0	0.712233662	0.618519

Fonte: DNV Exchange e World-Ships (2014) e Significant Ships (2003 -2007). Elaborada pelo autor.

## Anexo 6– Rotina do modelo de síntese do projeto conceitual

```
clc
clear all
close all
warning off

matriz_resultados=[];
%Qual o tipo de embarcação

Dados = menu('Qual o tipo de embarcação','Bulk carrier', 'Tanque', 'Porta-
container', 'Cruzeiro');

if Dados( )== 1
    tipo_embarcacao = char('Bulk_Carrier');
elseif Dados( )== 2
    tipo_embarcacao = char('Tanque');
elseif Dados( )== 3
    tipo_embarcacao = char('Porta_Container');
else
    tipo_embarcacao = char('Cruzeiro');

end

%%% Solicitar o DWT previsto
%%% Solicitar a faixa de comprimentos desejada
entrada = inputdlg({'Qual o DWT solicitado pelo armador','Qual a
velocidade de serviço?'],'Requisitos do armador',[1 30],{'em 10³
t','nós'});
dwt_previsto = str2num(entrada{1});
densidade = 1.025;
vel = str2num(entrada{2});
dwt_min = 0.9*dwt_previsto;
dwt_max = 1.1*dwt_previsto;

%%% restrições
entrada = inputdlg({'Qual o calado máximo','Qual o comprimento
máximo','Qual a boca máxima'],'Dados do porto limitante',[1 50],{'em
metros', 'em metros','em metros'});

tmax = str2num(entrada{1});
lmax = str2num(entrada{2});
bmax = str2num(entrada{3});

BL_mul = inputdlg({'Qual a porcentagem será adotada para a borda
livre, sendo a BL mínima a encontrada pela norma?'],'Borda Livre',[1
50],{'A partir da BL mínima estabelecida pela convenção, escolher um
múltiplo. Ex: 1 para mínimo'});
BL_mul = str2num(BL_mul{1});
Cm = menu('Escolha um método para encontrar Cm','Kerlen', 'HSVA');
CWL = menu('Escolha um método para encontrar CWL','Schneekluth',
'Parson');
Forma = menu('Qual a forma do casco','U', 'V', 'intermediária');
ckg = inputdlg({'Indicar a relação KG/H'],'KG',[1 50],{'Barras sugere
um valor de 0.6 a 0.7'});
ckg = str2num(ckg{1});
[~,~, raw] = xlsread('biblioteca',tipo_embarcacao,'B2:O200');
raw(cellfun(@x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) = {'';
```

```

J = ~all(cellfun(@(x) (isnumeric(x) || islogical(x)) && ~isnan(x),raw),2);
% Find rows with non-numeric cells
raw(J,:) = [];

Matriz_tipo_embarcacao = reshape([raw{:}],size(raw));

clearvars raw J;
%% Percorrer os dados de DWT dentro da faixa
dwt_base=Matriz_tipo_embarcacao(:,4);
arquivos1 = length (dwt_base);
D= [ ];
cont =0;

for i=1:arquivos1
    if and((dwt_min <= dwt_base(i, :)),( dwt_base(i, :) <= dwt_max))
        D(i,:) =(Matriz_tipo_embarcacao(i, :));
    end
end

if Dados( )== 1
    cd_fornecido= 0.8055;
elseif Dados( )== 2
    cd_fornecido= 0.8283;
elseif Dados( )== 3
    cd_fornecido= 0.7236;
else
    cd_fornecido= 0.1776;
end

%%Cálculo do lbp_novo
%% Calado e Boca

densidade = 1.025;
arquivos = size(D,1);
restricao_loa = [];

for i=1:arquivos

    dwt_Cb = D(i, 4);
    lbp_navio =D(i,7);
    B =D(i,9);
    H =D(i,11);
    Cb =D(i,13);
    Cd =D(i,14);
    loa =(D(i,6));
    V= and (Cb>0,Cd>0);
    if V == 1
        Cb = D(i,13);
        Cd = D(i,14);
    else
        Cd = cd_fornecido;
    end
end

```

```

        Cb = dwt_Cb*10^3/(Cd*densidade*lbp_navio*B*H);
    end

L=((dwt_previsto*10^3)*((lbp_navio/B)^2)*(B/H))/(densidade*Cb*Cd)^(1/3);
;

LOA=((dwt_previsto*10^3)*((loa/B)^2)*(B/H))/(densidade*Cb*Cd)^(1/3);
    if L>0
        lbp_navio = L;
        loa = LOA;
        b = L*B/lbp_navio;
        t = H*L/lbp_navio;
        cd = Cd;
        cb = dwt_previsto*10^3/(cd*densidade*L*b*t);
        if loa < lmax
            restricao_loa=1;
        end

        if b < bmax
            restricao_b=1;
        end

        if t < tmax
            restricao_t=1;
        end

        %% definir LWL como 90% do LOA
        lwl = 0.9 * loa;

        %% encontrar a borda livre
        if Dados ( ) == 2
            [~, ~, raw] =xlsread('biblioteca','BL_tipo_A','A2:B343');
            raw(cellfun(@x) ~isempty(x) && isnumeric(x) &&
isnan(x),raw)) = {''};
            J = ~all(cellfun(@x) (isnumeric(x) || islogical(x)) &&
~isnan(x),raw),2);
            raw(J,:) = [];
            BL = reshape([raw{:}],size(raw));
            clearvars raw J;
        else
            [~, ~, raw] =
xlsread('biblioteca','BL_tipo_B','A2:B343');
            raw(cellfun(@x) ~isempty(x) && isnumeric(x) &&
isnan(x),raw)) = {''};
            J = ~all(cellfun(@x) (isnumeric(x) || islogical(x)) &&
~isnan(x),raw),2);
            raw(J,:) = [];
            BL = reshape([raw{:}],size(raw));
            clearvars raw J;
        end

        L = max(lbp_navio, 0.96*loa);

        L= ceil(L);

        arquivos = length(BL);

```

```

for k=2:arquivos
    if BL(k,1) == L
        borda_livre = BL(k,2);
    end
end

%%% borda livre não foi interpolada. Foi para o
comprimento maior.
%%% borda livre mínima exigida pela LL

borda_livre = BL_mul*borda_livre *10^-3;

%%% Pontal

pontal = borda_livre + t ;

%%% Determinar o Cm

if Cm( )== 1

    cm = 1.006 - 0.0056*(cb ^(-3.56));

else
    cm = 1/(1+((1-cb)^3.5));
end

%%% Determinar CWL
cp = cb/cm;

if CWL( )== 1

    if Forma ( ) == 1;
        cwl = 0.95*cp + 0.17*((1-cp)^(1/3));
    elseif Forma ( ) == 2
        cwl= (cb -0.025)^0.5;
    else
        cwl= (1/3)*(1+2*cb);
    end
else
    cwl = cb/ (0.471+0.551*cb);
end

%%% Determinar Fn

vel_m = vel*0.51;
fn= vel_m/(9.81*lbp_navio)^0.5;

%%% deslocamento
deslocamento = cb*densidade*lbp_navio*b*t;

%%% volume deslocado
volume= deslocamento/densidade;

```

```

%%%Estabilidade Barras
%%%KB
cwp= (1/3)*(1+(2*cb/cm^0.5));
cw =(2/3)*cb + (1/3);
kb1= t/(1+(cb/cw));   %%% Barras
kb2= t*((5/6)-(cb/(3*cwp)));   %%% Normand
kb3 = t*(0.9-(0.3*cm)-(0.1*cb)); %%%Schneekluth

%%%BM
bm1 = 0.084*cw^2*b^2/(t*cb); %%%Barras
bm2= ((0.096+(0.89*(cwp^2)))*b^2)/(12*t*cb); %%% Normand
bm3 = (((0.0372*(2*cwp+1)^3))*b^2)/(12*t*cb); %%% Bauer

%%% KG

kg1= ckg * t; %%%Barras

%%%critério de estabilidade
gm_barras= kb1+bm1 - kg1;
gm_normand= kb2 + bm2- kg1;
gm_Schneekluth_Bauer= kb3 + bm3 - kg1;

matriz_resultados= [matriz_resultados;Dados deslocamento volume
lbp_navio loa lwl b pontal t cb cm cp cwl vel borda_livre restricao_loa
restricao_b restricao_t dwt_previsto gm_barras gm_normand
gm_Schneekluth_Bauer];
end
end

Excel = actxserver('Excel.Application');
set(Excel, 'Visible', 1);
Workbooks = Excel.Workbooks;
Workbook = invoke(Workbooks, 'Add');
Activesheet = Excel.Activesheet;
ActivesheetRange = get(Activesheet, 'Range', 'A1:V75');
set(ActivesheetRange, 'Value', matriz_resultados);

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Anexo 7 – Cálculo de Rf/Rt a) Bulk carrier b) Tanque c) Porta contêiner d) Cruzeiro**

<b>B U L K  C A R R I E R</b>	<b>Ex. 1</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		185.6	171	32.3	12.8	70725
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.1	130.66	118.5	0.278	0.906961
	10	0.126	204.13	180	5.599	0.881662
	12	0.151	326.1	253.3	43.16	0.776729
	14	0.176	581.39	338.2	190.3	0.581729
	16	0.201	1125.5	434.5	588.7	0.386062
	<b>Ex. 2</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		183	171	32.3	12.55	67650
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.1	127.9	116	0.242	0.907197
	10	0.126	199.27	176.2	4.939	0.884304
	12	0.151	315.06	248	38.42	0.787138
	14	0.176	551.84	331.1	170.5	0.600067
	16	0.201	1051.5	425.4	530.4	0.404624
	<b>Ex. 3</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		176	164.5	30.5	12.6	58261
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.102	116.77	105.9	0.22	0.907206
10	0.128	181.84	160.9	4.442	0.884666	
12	0.154	286.77	226.4	34.3	0.789469	
14	0.179	499.12	302.3	151.5	0.605626	
16	0.205	942.26	388.4	468.2	0.412148	

(a)

<b>T A N Q U E</b>	<b>Ex. 1</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m <sup>3</sup> ]
		319	299.7	60	22.6	373613
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	12	0.114	799.11	722.1	4.398	0.903588
	14	0.133	1097.6	964.8	33.04	0.87899
	16	0.152	1532.8	1240	153.3	0.809106
	<b>Ex. 2</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m <sup>3</sup> ]
		315.9	297	60	21.5	347475
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	14	0.133	1057.7	930.5	30.99	0.879787
	16	0.153	1473.5	1196	143.3	0.811826
	18	0.172	2168.9	1493	478.7	0.688368
	<b>Ex. 3</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m <sup>3</sup> ]
		264	246.8	50	17.2	195775
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	14	0.146	779.21	652.8	55.54	0.837808
	16	0.167	1169.9	839.1	224.4	0.717234
	18	0.188	1893.3	1047	674.1	0.553051

(b)

<b>P O R T A  C O N T A I N E R</b>	<b>Ex. 1</b>	<b>LBP [m]</b>	<b>LWL [m]</b>	<b>B [m]</b>	<b>T [m]</b>	<b>∇ [m³]</b>
		175	167.7	27.6	9.8	38889
	<b>Vel. [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Rt [kN]</b>	<b>Rf [kN]</b>	<b>Rw [kN]</b>	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.101	97.187	88.1	0.251	0.906503
	12	0.152	237.43	188.3	27.55	0.793044
	16	0.203	700.75	323	314	0.460945
	19	0.241	1616.4	446	1023	0.275935
	21	0.266	2695.9	538.3	1913	0.199667
	23	0.292	4091.8	638.7	3081	0.156083
	<b>Ex. 2</b>	<b>LBP [m]</b>	<b>LWL [m]</b>	<b>B [m]</b>	<b>T [m]</b>	<b>∇ [m³]</b>
		283	264.6	32.2	12	90610
	<b>Vel. [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Rt [kN]</b>	<b>Rf [kN]</b>	<b>Rw [kN]</b>	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.081	174.81	158.7	0.18	0.908062
	12	0.121	396.01	339.8	20.25	0.857952
	16	0.162	899.13	583.4	234	0.648869
	22	0.222	3191.3	1062	1839	0.332836
	24	0.242	4590.6	1251	2922	0.272575
	26	0.263	6467.4	1455	4425	0.224958
	<b>Ex. 3</b>	<b>LBP [m]</b>	<b>LWL [m]</b>	<b>B [m]</b>	<b>T [m]</b>	<b>∇ [m³]</b>
		249	237.8	32.2	11.3	72724
	<b>Vel. [nós]</b>	<b>Fr</b>	<b>Rt [kN]</b>	<b>Rf [kN]</b>	<b>Rw [kN]</b>	<b>Rf/Rt</b>
	8	0.085	151.37	137.5	0.132	0.90822
	12	0.128	342.18	294.1	16.93	0.859608
	16	0.17	785.82	505	209.4	0.642604
	22	0.234	2934.7	919.1	1749	0.313195
	24	0.256	4299.8	1083	2826	0.251802
26	0.277	6244	1259	4418	0.201603	

(c)

<b>C R U Z E I R O</b>	<b>Ex. 1</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		301	310.5	45	10	81488
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	12	0.112	416.25	376.4	1.991	0.904309
	16	0.149	754.15	646.6	39.01	0.857358
	20	0.186	1350.6	984.1	243.7	0.728644
	22	0.205	1822.9	1178	479.6	0.646008
	24	0.224	2461	1387	849.9	0.563749
	<b>Ex. 2</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		265	264.6	32.3	8.5	48431
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	12	0.121	296.61	262.1	7.579	0.883538
	16	0.162	591.17	450	87.42	0.76122
	20	0.202	1186.5	684.7	393.9	0.577123
	22	0.222	1659.4	819.3	689.3	0.493733
	24	0.242	2266.7	965.2	1095	0.425796
	<b>Ex. 3</b>	<b>LBP</b> [m]	<b>LWL</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>∇</b> [m³]
		154	144	27.6	8.5	10199
	<b>Vel.</b> [nós]	<b>Fr</b>	<b>Rt</b> [kN]	<b>Rf</b> [kN]	<b>Rw</b> [kN]	<b>Rf/Rt</b>
	12	0.164	123.13	109	2.949	0.885142
	16	0.219	255.31	186.9	45.21	0.732026
	20	0.274	517.08	277.6	192.5	0.536845
	22	0.301	782.72	332	379.6	0.424166
	24	0.329	1226.5	391	724.1	0.318747

(d)

## Anexo 8– Rotina para determinar DWT a partir do Método da Raiz Cúbica

```
clc
clear all
close all
warning off

[~, ~, raw] = xlsread('biblioteca','Bulk_Carrier','B2:O200');
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) = {''};

J = ~all(cellfun(@(x) (isnumeric(x) || islogical(x)) && ~isnan(x),raw),2);
% Find rows with non-numeric cells
raw(J,:) = [];

matriz_dwt = reshape([raw{:}],size(raw));

clearvars raw J;

dwt_bulk=matriz_dwt(:,4);

dwt_bulk_min= 0.9 * min(dwt_bulk);
dwt_bulk_max= 1.1 * max(dwt_bulk);

a=[11:1];
a(1,1) = dwt_bulk_min;

for i=2:10
a (i,1) = a(i-1,1)+(dwt_bulk_max-dwt_bulk_min)/9;

end

dwt_bulk= matriz_dwt(:,4);
arquivos = length (dwt_bulk);
D= [ ];
C = [ ];
for j= 1:10
    b= a(j,1);
    min = (0.9* b);
    max = (1.1*b);
    C (j) = b;
    k1=14*(j-1)+1;
    k= 14*j;
    for i=1:arquivos
        if and((min <= dwt_bulk(i, :)), (dwt_bulk(i, :) <= max))
            D(i,k1:k) =(matriz_dwt(i, :));

            end
        end
    end

end

densidade = 1.025;
arquivos = length (dwt_bulk);

for j= 1:10
    k1=14*(j-1);
    for i=1:arquivos
```

```

dwt_Cb = D(i, 4+k1);
lbp =D(i,7+k1);
B =D(i,9+k1);
H =D(i,11+k1);
Cb =D(i,13+k1);
Cd =D(i,14+k1);
V= and (Cb>0,Cd>0);
    if V == 1
        Cb =D(i,13+k1);
        Cd =D(i,14+k1);
    else
        Cd = 0.82;
        Cb = dwt_Cb*10^3/(Cd*densidade*lbp*B*H);
    end

L(i,j)=(((C(j)*10^3)*((lbp/B)^2)*((B/H)))/(densidade*Cb*Cd))^(1/3);
    B_bulk(i,j) = L(i,j)*B/lbp;
    H_bulk(i,j) = H*L(i,j)/lbp;
    Cd_bulk(i,j) = Cd;
    Cb_bulk(i,j) =
C(j)*10^3/(Cd_bulk(i,j)*densidade*L(i,j)*B_bulk(i,j)*H_bulk(i,j));

    end
end
matriz_resultados=[];
matriz_resultados=[matriz_resultados; L B_bulk H_bulk Cb_bulk];

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Anexo 9 – Resultados do modelo de DWT a) Bulk carrier b) Tanque c) Porta contêiner**

<b>B U L K  C A R R I E R</b>	<b>DWT</b>			<b>46.57</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>5.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	183.04	187.97	32.25	33.12	12.54	12.88	0.8200	0.8200	51.0397	-9.6%
	178.00	183.85	31	32.02	11.32	11.69	0.8100	0.8100	42.6381	8.4%
	182.00	182.91	30.04	30.19	11.83	11.88	0.8200	0.8200	41.3097	11.3%
	182.00	188.25	32.26	33.37	12.55	12.98	0.8400	0.8400	53.4074	-14.7%
	176.00	175.07	30.5	30.34	11.22	11.16	0.8700	0.8700	39.6969	14.8%
	<b>DWT</b>			<b>69.07</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>5.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	217.00	210.66	32.28	31.34	14.15	13.74	0.8717	0.8717	61.6987	10.7%
	217.00	211.60	32.67	31.86	14.17	13.82	0.8982	0.8982	65.5923	5.0%
	216.00	223.68	32.20	33.34	12.20	12.63	0.8878	0.8878	64.4736	6.7%
	216.00	223.67	32.24	33.39	14.20	14.70	0.8620	0.8620	74.1583	-7.4%
	<b>DWT</b>			<b>159.09</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	279.00	273.26	45.00	44.07	16.50	16.16	0.9900	0.9900	153.3338	3.6%
	<b>DWT</b>			<b>181.59</b>						
<b>Qtd.</b>			<b>4.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
282.00	284.84	45.00	45.45	18.02	18.20	0.9332	0.9332	175.8251	3.2%	
279.00	285.58	45.00	46.06	16.50	16.89	0.9900	0.9900	175.4123	3.4%	
282.00	284.96	45.00	45.47	18.32	18.52	0.9168	0.9168	175.8294	3.2%	
282.00	284.96	45.00	45.47	18.25	18.44	0.9204	0.9204	175.8244	3.2%	
<b>DWT</b>			<b>204.10</b>							
<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
294.00	293.09	50.00	49.85	18.50	18.44	0.9175	0.9175	197.3974	3.3%	
<b>DWT</b>			<b>226.60</b>							
<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
294.00	303.49	50.00	51.61	18.50	19.10	0.9175	0.9175	219.5278	3.1%	

(a)

<b>T A N Q U E</b>	<b>DWT</b>			<b>53.31</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	174.00	177.64	32.20	32.87	11.00	11.23	0.9599	0.9599	49.1486	8%
	<b>DWT</b>			<b>90.41</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	239.00	240.26	44.00	44.23	12.20	12.26	0.8171	0.8171	80.4971	11%
	<b>DWT</b>			<b>127.52</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>3.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	239.00	247.09	44.00	45.49	14.90	15.40	0.8370	0.8370	113.5010	11%
	239.00	246.72	43.84	45.26	14.92	15.40	0.8321	0.8321	111.9994	12%
	239.00	246.71	43.84	45.25	14.90	15.38	0.8333	0.8333	111.9800	12%
	<b>DWT</b>			<b>164.63</b>						
	<b>Qtd.</b>			<b>9.00</b>						
	<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>
	263.00	271.38	48.00	49.53	16.00	16.51	0.8339	0.8339	145.1589	12%
	263.00	271.36	48.00	49.53	16.00	16.51	0.8339	0.8339	144.7444	12%
	263.00	271.16	48.00	49.49	15.30	15.77	0.8721	0.8721	144.7444	12%
	264.00	269.44	48.70	49.70	16.62	16.96	0.8535	0.8535	153.1541	7%
	263.96	268.33	48.01	48.80	17.00	17.28	0.8266	0.8266	147.5840	10%
	264.00	268.34	48.00	48.79	17.00	17.28	0.8267	0.8267	147.5425	10%
	264.00	267.05	48.00	48.55	17.00	17.20	0.8281	0.8281	145.6495	12%
	264.00	263.95	50.00	49.99	17.15	17.15	0.8234	0.8234	146.9893	11%
	264.00	263.95	50.00	49.99	17.15	17.15	0.8234	0.8234	146.9884	11%
	<b>DWT</b>			<b>275.94</b>						
<b>Qtd.</b>			<b>4.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
315.94	308.28	60.00	58.55	21.50	20.98	0.8117	0.8117	245.4132	11%	
316.00	308.27	60.00	58.53	21.50	20.97	0.8117	0.8117	245.2463	11%	
315.86	308.09	60.00	58.52	21.50	20.97	0.8120	0.8120	245.1671	11%	
319.00	310.24	60.00	58.35	21.47	20.88	0.8604	0.8604	260.9141	5%	
<b>DWT</b>			<b>313.05</b>							
<b>Qtd.</b>			<b>7.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
315.94	321.53	60.00	61.06	21.50	21.88	0.8117	0.8117	278.9621	11%	
316.00	321.51	60.00	61.05	21.50	21.87	0.8117	0.8117	278.7726	11%	
315.86	321.33	60.00	61.04	21.50	21.87	0.8120	0.8120	278.6822	11%	
319.00	323.56	60.00	60.86	21.47	21.78	0.8604	0.8604	296.5529	5%	
320.00	322.26	58.00	58.41	22.50	22.66	0.8155	0.8155	279.2279	11%	
320.00	322.25	58.00	58.41	22.47	22.62	0.8167	0.8167	279.1915	11%	
294.00	317.23	60.00	59.67	22.63	22.50	0.8211	0.8211	281.0729	10%	
<b>DWT</b>			<b>350.16</b>							
<b>Qtd.</b>			<b>1.00</b>							
<b>LBP_base</b>	<b>LB</b>	<b>B_base</b>	<b>B</b>	<b>T_base</b>	<b>T</b>	<b>Cb_base</b>	<b>Cb</b>	<b>Novo DWT</b>	<b>Erro</b>	
319.00	329.30	60.00	61.94	22.63	23.36	0.8211	0.8211	314.8997	10%	

(b)

P O R T A  C O N T A I N Ê R	DWT			23.29						
	Qtd.			6.00						
	LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
	165.00	164.10	27.43	27.28	10.90	10.84	0.6471	0.6471	22.96	1%
	165.00	164.33	27.43	27.32	10.85	10.81	0.6474	0.6474	22.94	1%
	165.00	164.52	27.4	27.32	10.90	10.87	0.6430	0.6430	22.94	2%
	165.00	164.10	27.4	27.25	10.90	10.84	0.6479	0.6479	22.96	1%
	162.10	165.15	27.3	27.81	9.50	9.68	0.7064	0.7064	22.83	2%
	175.00	179.05	27.6	28.24	9.80	10.03	0.7820	0.7820	29.36	-26%
	DWT			36.24						
	Qtd.			8.00						
	LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
	210.00	204.57	30.03	29.25	12.00	11.69	0.6984	0.6984	36.00	1%
	210.00	204.57	30	29.22	12.00	11.69	0.6991	0.6991	36.01	1%
	195.40	199.79	29.8	30.47	11.42	11.67	0.6875	0.6875	36.03	1%
	210.00	206.34	30	29.48	12.02	11.81	0.6802	0.6802	35.87	1%
	195.40	199.79	29.8	30.47	11.42	11.67	0.6875	0.6875	36.03	1%
	210.00	204.57	30	29.22	12.00	11.69	0.6991	0.6991	36.01	1%
	195.40	199.79	29.8	30.47	11.40	11.66	0.6885	0.6885	36.03	1%
	195.95	191.21	32.25	31.47	12.00	11.71	0.6934	0.6934	36.31	0%
	DWT			49.18						
	Qtd.			11.00						
	LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro
	251.00	249.18	32.2	31.97	13.50	13.40	0.6212	0.6212	48.08	2%
	283.20	274.72	33.16	32.17	12.00	11.64	0.6446	0.6446	46.47	6%
	249.00	241.56	32.2	31.24	12.74	12.36	0.7110	0.7110	48.73	1%
	249.04	241.61	32.211	31.25	12.77	12.39	0.7089	0.7089	48.72	1%
	244.80	242.57	32.25	31.96	12.60	12.49	0.6852	0.6852	48.50	1%
	244.70	242.21	32.25	31.92	12.60	12.47	0.6877	0.6877	48.53	1%
	244.80	242.65	32.25	31.97	12.60	12.49	0.6845	0.6845	48.49	1%
	244.80	242.65	32.25	31.97	12.60	12.49	0.6845	0.6845	48.49	1%
	248.00	246.23	32.25	32.02	12.60	12.51	0.6574	0.6574	46.98	4%
	242.00	235.86	32.2	31.38	12.40	12.09	0.7002	0.7002	45.84	7%
244.80	242.26	32.25	31.92	12.60	12.47	0.6598	0.6598	46.17	6%	
DWT			62.13							
Qtd.			4.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
254.30	259.90	35	35.77	11.00	11.24	0.8015	0.8015	61.46	1%	
244.00	240.26	37.3	36.73	13.90	13.69	0.6935	0.6935	62.70	-1%	
283.20	276.58	32.2	31.45	13.55	13.23	0.6864	0.6864	57.53	7%	
283.20	276.46	32.2	31.43	13.55	13.23	0.6871	0.6871	57.52	7%	
DWT			75.07							
Qtd.			6.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
276.00	272.89	40	39.55	14.00	13.84	0.6775	0.6775	74.72	0%	
286.00	278.58	40	38.96	14.00	13.64	0.6839	0.6839	74.44	1%	
276.00	278.61	40	40.38	14.02	14.15	0.6357	0.6357	74.02	1%	
266.80	273.36	40	40.98	14.00	14.34	0.6299	0.6299	74.26	1%	
266.80	273.36	40	40.98	14.00	14.34	0.6299	0.6299	74.26	1%	
319.00	309.32	42.8	41.50	14.52	14.08	0.5599	0.5599	71.11	5%	
DWT			88.02							
Qtd.			3.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
286.00	293.75	40	41.08	14.00	14.38	0.6839	0.6839	87.72	0%	
319.00	326.17	42.8	43.76	14.52	14.85	0.5599	0.5599	83.90	5%	
317.20	315.56	43.4	43.17	13.00	12.93	0.6735	0.6735	85.00	3%	
DWT			100.96							
Qtd.			1.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
331.54	321.83	42.8	41.55	14.94	14.50	0.6572	0.6572	92.73	8%	
DWT			113.91							
Qtd.			3.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
321.73	320.41	48.3	48.10	15.20	15.14	0.6583	0.6583	113.03	1%	
321.72	320.61	48.2	48.03	15.19	15.14	0.6586	0.6586	113.04	1%	
331.54	335.03	42.8	43.25	14.94	15.10	0.6572	0.6572	105.03	8%	
DWT			126.85							
Qtd.			2.00							
LBP_base	LB	B_base	B	T_base	T	Cb_base	Cb	Novo DWT	Erro	
321.73	332.11	48.3	49.86	15.20	15.69	0.6583	0.6583	126.28	0%	
321.72	332.33	48.2	49.79	15.19	15.69	0.6586	0.6586	126.29	0%	

(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

### Anexo 10 – Resultado do modelo de otimização do propulsor para *bulk*

BULK CARRIER																	
LBP [m]	B [m]	T [m]	C <sub>b</sub>	VEL [kt]	Δ [10 <sup>3</sup> t]	LWT [10 <sup>3</sup> t]	DWT [10 <sup>3</sup> t]	C <sub>d</sub>	LOA [m]	GM [m]	Rt [kN]	Dh [m]	Z	Ae/Ao	P/Dh	η <sub>o</sub>	SHP [kW]
303.5	51.6	19.1	0.917	14.5	260.2	33.0	225.5	0.867	311.9	10.1	1208	10.0	7	0.400	1.081	0.548	14424
285.0	45.5	18.4	0.920	14.5	208.7	26.8	180.6	0.865	293.1	8.0	1076	6.3	5	0.400	0.948	0.441	15930
285.6	46.1	16.9	0.990	14.5	208.7	27.1	180.2	0.864	293.7	9.1	1093	10.9	6	0.400	1.070	0.557	12213
284.8	45.5	18.2	0.933	14.5	208.7	26.8	180.6	0.865	293.0	8.1	1079	10.7	3	0.300	0.782	0.615	11362
273.3	44.1	16.2	0.990	14.5	182.9	24.3	157.4	0.860	281.2	8.7	1025	11.6	7	0.400	1.244	0.570	11200
223.7	33.4	14.7	0.862	14.5	90.2	13.4	76.1	0.844	231.0	5.3	727	10.3	7	0.400	1.001	0.607	8086
223.7	33.3	12.6	0.888	14.5	79.7	12.9	66.2	0.831	231.0	6.4	690	9.8	5	0.400	0.814	0.608	7560
211.6	31.9	13.8	0.898	14.5	79.8	11.9	67.3	0.844	218.8	5.1	702	10.1	5	0.400	0.951	0.593	7837
210.7	31.3	13.7	0.872	14.5	75.4	11.7	63.2	0.838	217.8	5.0	681	10.7	5	0.400	0.869	0.606	7554
175.1	30.3	11.2	0.870	14.5	49.4	8.3	40.7	0.825	181.8	6.0	628	6.4	5	0.400	1.171	0.537	7875
188.2	33.4	13.0	0.840	14.5	65.5	10.2	54.8	0.836	195.1	6.2	676	10.1	6	0.400	1.023	0.620	7458
182.9	30.2	11.9	0.820	14.5	51.5	8.7	42.4	0.823	189.7	5.5	611	8.7	6	0.400	0.981	0.623	6773
183.8	32.0	11.7	0.810	14.5	53.3	9.1	43.8	0.820	190.7	6.4	621	9.1	7	0.400	1.151	0.634	6799
188.0	33.1	12.9	0.820	14.5	62.9	10.1	52.3	0.832	194.9	6.1	661	10.0	6	0.400	1.020	0.620	7365

Fonte: Elaborada pelo autor.

### Anexo 11 – Resultado do modelo de otimização do propulsor para tanque

TANQUE																	
LBP [m]	B [m]	T [m]	C <sub>b</sub>	VEL [kt]	Δ [10 <sup>3</sup> t]	LWT [10 <sup>3</sup> t]	DWT [10 <sup>3</sup> t]	C <sub>d</sub>	LOA [m]	GM [m]	Rt [kN]	Dh [m]	Z	Ae/Ao	P/Dh	η <sub>o</sub>	SHP [kW]
329.3	61.9	23.4	0.821	15.0	375.2	43.5	329.5	0.878	342.4	25.1	1488	7.5	6	0.504	0.788	0.470	22571
317.2	59.7	22.5	0.821	15.0	335.8	39.5	294.3	0.876	330.3	24.2	1403	11.0	7	0.361	0.835	0.520	19398
322.2	58.4	22.6	0.817	15.0	334.0	39.5	292.5	0.876	335.5	23.7	1398	11.4	7	0.350	0.820	0.520	19404
322.3	58.4	22.7	0.815	15.0	334.0	39.5	292.5	0.876	335.5	23.7	1398	10.4	6	0.361	0.510	0.449	22484
323.6	60.9	21.8	0.860	15.0	354.3	41.6	310.6	0.877	336.8	24.9	1458	10.5	7	0.386	0.774	0.520	19664
321.3	61.0	21.9	0.812	15.0	334.5	40.5	292.0	0.873	334.5	24.9	1405	10.0	7	0.396	0.818	0.521	19365
321.5	61.0	21.9	0.812	15.0	334.7	40.6	292.1	0.873	334.7	24.9	1405	9.8	7	0.402	0.824	0.520	19362
321.5	61.1	21.9	0.812	15.0	334.9	40.6	292.2	0.873	334.7	24.9	1405	9.8	7	0.402	0.824	0.520	19367
310.2	58.4	20.9	0.860	15.0	312.4	37.3	273.3	0.875	323.1	23.8	1364	7.9	7	0.504	0.927	0.510	22032
308.1	58.5	21.0	0.812	15.0	295.0	36.3	256.8	0.871	320.9	23.8	1314	8.0	7	0.485	0.827	0.520	20798
308.3	58.5	21.0	0.812	15.0	295.1	36.4	256.9	0.871	321.1	23.8	1315	8.0	7	0.485	0.827	0.520	20805
308.3	58.5	21.0	0.812	15.0	295.3	36.4	257.1	0.871	321.1	23.9	1315	8.0	7	0.485	0.827	0.520	20811
264.0	50.0	17.1	0.823	15.0	179.3	24.0	154.1	0.859	275.4	20.5	1034	9.3	7	0.399	0.979	0.564	13082
267.0	48.6	17.2	0.828	15.0	177.7	23.8	152.7	0.859	278.5	19.8	1026	9.6	7	0.384	0.955	0.566	12928
268.3	48.8	17.3	0.827	15.0	179.9	24.1	154.7	0.860	279.9	19.9	1032	10.8	7	0.351	0.908	0.568	13057
269.4	49.7	17.0	0.854	15.0	186.6	24.8	160.5	0.861	281.0	20.4	1058	8.8	7	0.424	0.999	0.561	13189
271.4	49.5	16.5	0.834	15.0	178.0	24.5	152.2	0.855	283.0	20.4	1032	9.1	7	0.411	0.906	0.568	12849
246.7	45.3	15.4	0.833	15.0	137.8	19.4	117.4	0.852	257.6	18.6	920	8.4	5	0.391	0.810	0.556	11749
247.1	45.5	15.4	0.837	15.0	139.6	19.6	119.0	0.853	258.0	18.7	926	9.6	5	0.351	0.710	0.564	11758
240.3	44.2	12.3	0.817	15.0	102.6	17.1	84.6	0.825	250.9	19.0	815	9.6	5	0.357	0.943	0.594	9850
177.6	32.9	11.2	0.960	15.0	60.9	8.9	51.6	0.847	186.4	13.5	768	7.9	5	0.421	1.070	0.594	10299

Fonte: Elaborada pelo autor.

## Anexo 12 – Resultado do modelo de otimização do propulsor para porta contêiner

PORTA CONTÊINER																	
LBP [m]	B [m]	T [m]	Cb	VEL [kt]	$\Delta$ [10 <sup>3</sup> t]	LWT [10 <sup>3</sup> t]	DWT [10 <sup>3</sup> t]	Cd	LOA [m]	GM [m]	Rt [kN]	Dh [m]	Z	Ae/Ao	P/Dh	$\eta_o$	SHP [kW]
276.6	31.4	13.2	0.686	22.0	76.7	20.0	55.7	0.727	290.9	4.8	2659	10.0	3	0.400	1.397	0.607	48731
276.5	31.4	13.2	0.687	22.0	76.6	19.9	55.7	0.727	290.8	4.8	2660	10.0	3	0.400	1.397	0.607	48733
272.9	39.5	13.8	0.677	22.0	98.2	24.1	72.9	0.742	287.1	7.7	3065	10.0	3	0.400	1.397	0.607	56377
278.6	39.0	13.6	0.684	22.0	98.2	24.8	72.1	0.735	292.9	7.6	3020	10.0	3	0.400	1.397	0.607	55404
278.6	40.4	14.2	0.636	22.0	98.2	24.8	72.1	0.734	293.0	7.9	2992	9.3	3	0.400	1.400	0.607	55982
273.4	41.0	14.3	0.630	22.0	98.2	24.7	72.3	0.736	287.6	8.1	3034	9.3	3	0.400	1.400	0.607	56881
273.4	41.0	14.3	0.630	22.0	98.2	24.7	72.3	0.736	287.6	8.1	3034	9.3	3	0.400	1.400	0.607	56881
309.3	41.5	14.1	0.560	22.0	98.0	27.2	69.4	0.708	324.7	8.7	2758	10.2	3	0.400	1.400	0.665	48325
293.7	41.1	14.4	0.684	22.0	115.0	27.9	85.7	0.745	308.6	8.0	3149	10.2	3	0.400	1.400	0.607	57824
315.6	43.2	12.9	0.674	22.0	114.9	30.6	82.8	0.721	331.1	10.2	3054	9.8	3	0.400	1.400	0.542	63029
321.8	41.5	14.5	0.657	22.0	123.3	30.4	91.4	0.741	337.6	8.2	3077	9.8	3	0.400	1.400	0.607	57106
320.4	48.1	15.1	0.658	22.0	148.6	34.9	112.0	0.754	336.1	10.7	3416	10.5	3	0.400	1.400	0.607	63375
332.3	49.8	15.7	0.659	22.0	165.4	37.9	125.6	0.759	348.4	11.1	3539	10.5	3	0.400	1.400	0.607	65637
332.1	49.9	15.7	0.658	22.0	165.4	38.5	125.0	0.756	348.2	11.1	3540	10.5	3	0.400	1.400	0.607	65672
335.0	43.3	15.1	0.657	22.0	139.0	33.3	104.1	0.748	351.2	8.5	3204	10.0	3	0.400	1.400	0.607	59450
320.6	48.0	15.1	0.659	22.0	148.6	34.8	112.0	0.754	336.3	10.7	3415	10.4	3	0.400	1.389	0.609	63061
240.3	36.7	13.7	0.694	22.0	81.5	21.3	59.1	0.726	253.4	6.6	3145	10.4	3	0.400	1.400	0.607	57529
259.9	35.8	11.2	0.801	22.0	81.4	22.0	58.3	0.717	273.7	8.0	2998	7.9	3	0.400	1.400	0.472	67142
242.3	31.9	12.5	0.660	22.0	61.9	17.7	43.3	0.700	255.5	5.4	2694	8.0	3	0.400	1.400	0.542	55897
235.9	31.4	12.1	0.700	22.0	61.0	17.1	43.0	0.706	248.9	5.4	2778	8.0	3	0.400	1.400	0.542	56736
246.2	32.0	12.5	0.657	22.0	63.1	17.5	44.7	0.708	259.6	5.5	2671	9.6	3	0.400	1.355	0.618	48675
242.7	32.0	12.5	0.684	22.0	64.5	17.5	46.2	0.716	255.9	5.4	2757	9.7	3	0.400	1.387	0.610	50360
242.7	32.0	12.5	0.684	22.0	64.5	17.5	46.2	0.716	255.9	5.4	2757	9.7	3	0.400	1.387	0.610	50360
242.2	31.9	12.5	0.688	22.0	64.5	17.4	46.2	0.716	255.4	5.4	2764	9.7	3	0.400	1.387	0.610	50426
242.6	32.0	12.5	0.685	22.0	64.5	17.9	45.7	0.708	255.8	5.4	2759	9.7	3	0.400	1.387	0.610	50370
241.6	31.3	12.4	0.709	22.0	64.5	17.7	46.0	0.713	254.8	5.2	2780	8.2	3	0.400	1.400	0.542	56574
241.6	31.2	12.4	0.711	22.0	64.5	17.6	46.0	0.714	254.7	5.2	2782	8.2	3	0.400	1.400	0.542	56564
274.7	32.2	11.6	0.645	22.0	64.3	19.1	44.3	0.689	289.0	6.1	2449	9.1	3	0.400	1.363	0.615	45010
249.2	32.0	13.4	0.621	22.0	64.5	17.8	45.8	0.711	262.6	5.0	2642	9.1	3	0.400	1.363	0.615	48977
191.2	31.5	11.7	0.693	20.0	47.8	12.1	35.1	0.734	202.8	5.7	1941	9.1	3	0.400	1.363	0.615	31812
199.8	30.5	11.7	0.689	20.0	47.7	12.2	34.9	0.731	211.6	5.3	1840	9.0	3	0.400	1.335	0.623	29856
204.6	29.2	11.7	0.699	20.0	47.7	12.1	35.0	0.733	216.6	4.8	1794	9.0	3	0.400	1.335	0.623	28985
199.8	30.5	11.7	0.688	20.0	47.7	12.2	34.9	0.731	211.6	5.3	1840	8.9	3	0.400	1.354	0.618	30106
204.6	29.2	11.7	0.699	20.0	47.7	12.8	34.3	0.718	216.6	4.8	1794	8.9	3	0.400	1.354	0.618	29224
179.0	28.2	10.0	0.782	20.0	38.9	11.0	27.3	0.702	190.2	5.4	1947	6.8	3	0.400	1.400	0.472	40022
165.2	27.8	9.7	0.706	20.0	30.9	10.0	20.3	0.658	175.9	5.5	1971	7.5	3	0.400	1.400	0.542	36492
164.1	27.3	10.8	0.648	20.0	30.9	9.2	21.2	0.688	174.8	4.5	1960	7.1	3	0.400	1.400	0.542	37137

Fonte: Elaborada pelo autor.