

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

MONIQUE ELLEN BRUNER

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL EDUCACIONAL PARA
PROJETO ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES COM BASE NA
NORMA ABS

Joinville
2019

MONIQUE ELLEN BRUNER

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL EDUCACIONAL PARA
PROJETO ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES COM BASE NA
NORMA ABS

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

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville
2019

MONIQUE ELLEN BRUNER

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL EDUCACIONAL PARA
PROJETO ESTRUTURAL DE EMBARCAÇÕES DESLOCANTES COM BASE NA
NORMA ABS

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

Banca Examinadora:

Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Orientador e Presidente da Banca

Rafael Gallina Delatorre, Dr. Fís.
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Carlos Maurício Sacchelli, Dr. Eng.
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiro devo dizer que há tanto o que agradecer que não cabe em uma só página.

Agradeço e dedico esse trabalho primeiramente à minha mãe Elizandra, que sempre será minha inspiração, e que me apoiou em minhas decisões, me ensinando a nunca desistir do que se deseja e que nenhum obstáculo é grande o bastante quando se persiste. Me faltam palavras também para agradecer minha avó Maria, minha mãe-de-açúcar, que me criou e sempre estava com uma caneca de chá de camomila do meu lado e nunca falhou em me socorrer quando eu precisava. Também sou grata ao meu avô, que sempre cumpriu o papel tanto de pai, quanto o de avô, me ensinando que a figura paterna não está em uma certidão de nascimento, mas no amor de alguém que sempre desviou do seu caminho para de ajudar a chegar no meu. O amor de vocês fez quem eu sou hoje, e não há como não ser grata por ter vocês na minha vida.

Além deles, também tenho que agradecer ao meu irmão Gabriel, que nunca falhou em me fazer rir quando eu estava em dias ruins. Ao meu padrasto Paulo, que é um excelente pai para o Gabriel e sempre se mostrou alguém preocupado comigo, mesmo sem laços de sangue. À minha tia-irmã Eliziane, alguém que sempre cumpriu um papel de irmã mais velha, e é alguém com quem sempre posso contar. Minha família toda deve ser agradecida, por serem sempre tão pacientes e entenderem que a minha falta nas conversas e nos cafés da tarde eram necessárias.

Também sou grata a meu orientador, Prof. Thiago Pontin, que além de me apoiar e dedicar-se, até demais, junto a mim para a produção deste trabalho, me deu além de aulas maravilhosas e uma orientação espetacular, lições valiosas durante a graduação, as quais vou me lembrar para sempre.

Agradeço ao professor Fajarra, meu orientador de pesquisa e supervisor de estágio, sempre paciente e dedicado, que também me inspirou a querer seguir carreira acadêmica. A graduação é apenas o primeiro passo de uma outra jornada.

Também é um agradecimento a todos os professores que se fizeram presentes em minha formação, desde o fundamental até agora, em especial aos professores da UFSC, Campus Joinville. Há um pouco de vocês neste trabalho e faço minhas as palavras de Malala Yousafzai, *"uma criança, um professor, um livro e uma caneta podem mudar o mundo"*. E não há pretensão mais linda e poética do que a de mudar o mundo e não vejo outra forma de conseguir isso que não seja por meio do conhecimento. *A educação é libertadora e destrói mitos.*

Sou grata a todas as amigas e amigos que me ajudaram até agora, que ficaram do meu lado mesmo quando eu estava estressada, sem dormir e cansada. Os que caminharam comigo na UFSC: Kamila, Laura, Leticia, Leonardo, Aline, Rayza, Lucas, Bruna e todo o pessoal do LAV: Iara, Amanda, Giovana. Vocês nunca falharam em fazer os meus

dias melhores na UFSC e me fizeram crer na ideia de que a época da faculdade é a melhor de nossas vidas.

Às amigas que apoiavam de longe, fosse do outro lado da cidade ou do outro lado do mundo: Rafa, Camila, Nathália, Misaki, Lari Xavier, Marcelle, Bruna Godinho, Natali, Lari Estolano, Beatriz, Bruna Lima, Vika e Amanda. Tudo teria sido muito mais difícil sem o apoio de todos vocês, fosse com um café, com um abraço ou com uma mensagem "*Monique, vai dar tudo certo, pode ir dormir*", isso quando não viravam as noites de estudo junto comigo.

Há um pedaço de cada um de vocês neste texto, assim como há um pedaço dos ensinamentos de vocês que carrego comigo e que espero nunca esquecer.

"A ship in port is safe, but that is not what ships are for. Sail out to sea and do new things."

Grace Hopper

RESUMO

O processo de definição da topologia estrutural de um navio é iterativo e o uso de uma ferramenta computacional reduz o tempo de projeto e facilita a aplicação da metodologia. Uma das abordagens que pode ser utilizada é a baseada em Normas de Sociedade Classificadora, e estes se tratam de textos complexos e que devem ser interpretados com rigor e atenção. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de auxílio ao estudante-projetista de estruturas navais, possibilitando que esse determine a configuração da estrutura que atende aos requisitos definidos pela norma ABS (2019). O tipo de estrutura abordada é a seção mestra de uma embarcação deslocante de comprimento superior a cem metros. A linguagem de programação adotada é a Object Pascal, similar a linguagens de programação matemática matricial e com ferramentas de utilização gratuitas, tal como a versão comunitária do Delphi 10.2 que será utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Como principal resultado, apresenta-se uma ferramenta computacional automatizada que permite ao usuário explorar uma maior quantidade de soluções para o projeto estrutural da seção mestra de uma embarcação deslocante, verificando se tais soluções atendem aos requisitos estabelecidos pela norma ABS de 2019. A ferramenta potencialmente permitirá ainda que estudantes desenvolvam uma maior sensibilidade a cerca da mecânica de estruturas navais, comparando resultados, e entendendo a influência das variáveis de projeto no comportamento estrutural de uma embarcação.

Palavras-chave: Estruturas navais. Projeto por norma. Dimensionamento estrutural. Ferramenta computacional.

ABSTRACT

The process of definition of a ship structural topology is iterative and the use of a software reduces the project's time and favours the application of the methodology. One of the approaches that can be used is the Rule-Based Method, that uses the Classification Society documentation. These rules are complex and have to be interpreted rigorously. This work introduces the development of a computational tool to assist the student of naval structures, enabling the definition of the topology of a ship's structure that meets the requirements defined by a Classification Society standard, in this case, the ABS. The type of structure addressed is the midship section of a vessel not exceeding 100 meters. The programming language adopted is Object Pascal, similar to the matrix-based programming languages and that it has free tools, such as a community version of Delphi 10.2. As a main result, a self-sufficient computational tool is produced, that allows the engineer to explore more solutions for the merchant vessel's midship structural project, verifying if such solutions meet the requirements established by the ABS's standards of 2019. The software will also potentially allow students to develop a greater sensitivity to the mechanics of naval structures, comparing results, and understanding the influence of design variables on the structural behavior of a vessel.

Keywords: Naval structures. Rule-based project. Structural dimensioning. Computational tool.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz de influência, dependência coluna-linha.	18
Figura 2 – Exemplo de espiral de projeto, com projeto estrutural em destaque.	19
Figura 3 – Arranjo tridimensional da seção mestra de um navio do tipo cruzeiro sem os conveses superiores.	20
Figura 4 – Comparação entre as abordagens de projeto.	21
Figura 5 – Sistema de coordenadas do navio.	23
Figura 6 – Onda de comprimento inferior ao do navio (a). Onda de comprimento superior ao do navio (b).	26
Figura 7 – Envoltória do Momento Fletor.	27
Figura 8 – Curva de pesos.	28
Figura 9 – Curva de flutuação para condição de mar calmo.	28
Figura 10 – Fluxograma do procedimento de equilíbrio da viga navio.	30
Figura 11 – Exemplo de curva de carga.	31
Figura 12 – Curva de força cortante.	32
Figura 13 – Exemplo de curva de momento fletor.	33
Figura 14 – Fluxograma do projeto estrutural baseado em norma.	34
Figura 15 – Disposição dos reforçadores leves e pesados.	35
Figura 16 – Cavernamento transversal.	36
Figura 17 – Cavernamento longitudinal.	37
Figura 18 – Cavernamento misto.	37
Figura 19 – Reforçadores e chapa colaborante em destaque.	42
Figura 20 – Fundo de navio com indicação das variáveis de projeto.	43
Figura 21 – Parte de uma planilha de cálculo de módulo de seção.	44
Figura 22 – Diagrama de corpo livre do cisalhamento transversal.	48
Figura 23 – Metodologia adotada.	50
Figura 24 – Interface da ferramenta.	53
Figura 25 – Aba de inserção de dados.	53
Figura 26 – Modelo de tabela de cotas.	55
Figura 27 – Tela do programa após carregar a geometria e calcular as curvas SAC.	56
Figura 28 – Arquivo texto das curvas de áreas seccionais.	57
Figura 29 – Tela do programa após carregar as curvas SAC.	58
Figura 30 – Arquivo texto de carregamento.	59
Figura 31 – Aba de carregamento com os pesos individuais a serem selecionados.	60

Figura 32 – Aba de equilíbrio da viga-navio.	61
Figura 33 – Fluxograma de obtenção da SAC em função do calado em determinada posição x.	63
Figura 34 – Resultados mostrados para o usuário em forma de tabela.	63
Figura 35 – Resultados dos pesos mostrados para o usuário em forma de tabela.	64
Figura 36 – Tabela de resultados com vetor de cargas em destaque para as condições de mar calmo e tosamento.	65
Figura 37 – Tabela de resultados com força cortante em destaque	66
Figura 38 – Tabela de resultados com força momento fletor em destaque	66
Figura 39 – Exemplo de arquivo texto.	68
Figura 40 – Interface do programa Banco de Dados de Perfis.	71
Figura 41 – Dimensões consideradas para o cálculo das propriedades dos perfis.	72
Figura 42 – Painel de seleção de reforçadores.	72
Figura 43 – Quadro para inserir chapas na seção.	74
Figura 44 – Tabela de elementos com chapeamento adicionado.	74
Figura 45 – Quadro para inserir reforçadores na seção.	75
Figura 46 – Tabela de elementos com reforçadores adicionados.	75
Figura 47 – Desenho da seção dado pelo programa.	76
Figura 48 – Tensão normal, dada pelo programa, em uma seção simples.	77
Figura 49 – Fluxo de cisalhamento, em uma seção de embarcação, e momento estático.	78
Figura 50 – Exemplo da distribuição da tensão cisalhante em uma seção simplificada.	79
Figura 51 – Exemplo da distribuição da tensão cisalhante em uma seção multicelular.	79
Figura 52 – Diagrama de força cortante para a condição de tosamento.	83
Figura 53 – Diagrama de momento fletor para a condição de tosamento.	83
Figura 54 – Variáveis de projeto adotadas.	84
Figura 55 – Desenho da seção de projeto.	86
Figura 56 – Tensão normal na seção de exemplo.	86
Figura 57 – Tensão de cisalhamento na seção de exemplo.	87
Figura 58 – Tabela de C_M	93
Figura 59 – Estimativa de ocupação do tanque em relação ao casco do navio.	95
Figura 60 – Curvas SAC de entrada.	97
Figura 61 – Coeficientes R^2 obtidos da décima até a vigésima ordem.	98
Figura 62 – Comparação entre as SAC ajustadas e as reais.	99
Figura 63 – Geometria utilizada para o cálculo dos ângulos de trim.	100
Figura 64 – Estudo dos ângulos de trim.	101
Figura 65 – Dimensões principais, pesos e posicionamento das cargas.	102

Figura 66 – Arranjo do navio.	102
Figura 67 – Carregamento analisado.	103
Figura 68 – Curvas obtidas para águas calmas.	103
Figura 69 – Curvas obtidas para tosamento.	104
Figura 70 – Curvas obtidas para alquebramento.	105
Figura 71 – SM calculado de forma analítica.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis do projeto estrutural para cavernamento longitudinal . . .	38
Tabela 2 – Número de anteparas conforme o posicionamento da praça de máquinas.	39
Tabela 3 – Equações empíricas das Sociedades Classificadoras	40
Tabela 4 – Coeficientes adotados no cálculo de momento fletor e força cortante	41
Tabela 5 – Limitações para resistência longitudinal da norma ABS.	52
Tabela 6 – Requisitos para cada um dos modos de projeto	54
Tabela 7 – Comparação do preenchimento dos campos entre as duas opções de inserir geometria	55
Tabela 8 – Grupos de pesos e sua numeração.	59
Tabela 9 – Configuração do arquivo texto de espaçamentos.	68
Tabela 10 – Equações para o chapeamento	69
Tabela 11 – Espessuras de chapa em polegadas e seu valor aproximado em milímetros.	70
Tabela 12 – Coeficientes c e altura de coluna d'água h adotadas pela ferramenta.	71
Tabela 13 – Coordenadas das chapas adicionadas automaticamente.	73
Tabela 14 – Dimensões e coeficiente de forma do casco da Serie 60.	80
Tabela 15 – Comparação entre os dados obtidos pela ferramenta e os da Serie 60	81
Tabela 16 – Comparação entre os dados obtidos para a três condições de mar.	82
Tabela 17 – Espessuras de chapeamento utilizadas, em milímetros.	84
Tabela 18 – Módulos de seção mínimos requeridos.	85
Tabela 19 – Especificações dos reforçadores leves selecionados.	85
Tabela 20 – Comparação entre resultados analíticos e numéricos.	85
Tabela 21 – Resultados das tensões na seção projetada.	87
Tabela 22 – Nomenclaturas com traduções	92

LISTA DE SIGLAS

DWT deadweight

IMO International Marine Organization

LCB Centro longitudinal de empuxo

LCG Centro longitudinal de gravidade

MEF Método de Elementos Finitos

NORMAM Normas da Autoridade Marítima

RINA Registro Italiano Navale

SAC Curva de área seccional

SOLAS *Safety of Life at the Seas*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_{onda}	Amplitude da onda
B	Boca
c	Coefficiente de contorno
C_B	Coefficiente de bloco
C_1	Coefficiente de onda da norma ABS
d	Calado moldado
D	Pontal
D_s	Pontal moldado
DWT	<i>Deadweight</i>
F_{wn}	Força cortante negativa pela norma ABS
F_{wp}	Força cortante positiva pela norma ABS
h	Altura de coluna d'água
h_{db}	Altura do duplo fundo
$\overline{h_m}$	Calado médio
I_{LN}	Momento de inércia em relação ao eixo transversal do centroide da seção
I_p	Momento de inércia próprio em relação ao eixo transversal da seção
ℓ	Comprimento do vão-livre
L	Comprimento do navio
M_t	Momento total
M_s	Momento em águas calmas

m_{secao}	Momento estático da seção
$M_{SWM,H}$	Momento em águas calmas pela RINA para alquebramento
$M_{SWM,S}$	Momento em águas calmas pela RINA para tosamento
M_w	Momento na vigência de ondas
$M_{WM,H}$	Momento em ondas de alquebramento pela norma ABS
$M_{WM,S}$	Momento em ondas de tosamento pela norma ABS
n_1	Coefficiente de navegação
Q	Força cortante
s_b	Espaçamento entre reforçadores do mesmo tipo
SM	Módulo de seção
t	Espessura de chapa
T	Calado de projeto
w_{ss}	Distância entre costados
WL	Linha d'água
Z_0	Altura da quilha em uma determinada posição do comprimento
Z_{LN}	Altura da linha neutra na direção vertical
Z_{ponto}	Altura de um ponto na posição vertical
Z_q	Distância do centroide à quilha
ϕ	Ângulo de trim
σ	Tensão normal na seção
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento na seção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	SISTEMA DE COORDENADAS	23
2.2	NORMAS DE SOCIEDADES CLASSIFICADORAS	23
2.3	DESACOPLAMENTO DO MODELO	24
2.4	ESTRUTURA PRIMÁRIA	25
2.4.1	Tosamento e Alquebramento	25
2.4.2	Curva de Pesos	27
2.4.3	Curva de Flutuação	28
2.4.4	Equilíbrio da viga navio	29
2.4.5	Curva de carga $q(x)$	31
2.4.6	Curva de força cortante $Q(x)$	31
2.4.7	Curva de momento fletor $M(x)$	32
2.5	PROJETO ESTRUTURAL	33
2.5.1	Determinação do cavernamento	34
2.5.2	Variáveis de projeto	38
2.5.3	Resistência da viga navio	40
2.5.4	Dimensionamento de chapeamento e reforçadores	42
2.5.5	Propriedades da seção projetada	44
2.6	TENSÕES GLOBAIS NA ESTRUTURA	46
2.6.1	Tensão normal	46
2.6.2	Tensão cisalhante	47
2.7	MÉTODO DA BISSECÇÃO	49
3	MÉTODO	50
4	DESENVOLVIMENTO – CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA	52
4.1	DADOS DE ENTRADA	53
4.1.1	Tabela de cotas	55
4.1.2	Curva de área seccional	56
4.2	CONDIÇÕES DE CARGA	58
4.3	EQUILÍBRIO DA VIGA NAVIO	60
4.3.1	Curva de flutuação	61
4.3.2	Agrupamento de pesos	64
4.3.3	Algoritmo de equilíbrio	64
4.4	PROJETO ESTRUTURAL	67

4.4.1	SM requerido pela norma	67
4.4.2	Variáveis de projeto	67
4.4.3	Chapeamento	68
4.4.4	Reforçadores	70
4.5	MÓDULO DE SEÇÃO	73
4.5.1	Adição do chapeamento	73
4.5.2	Adição dos reforçadores	74
4.5.3	Cálculo das propriedades de seção	76
4.6	TENSÕES NA SEÇÃO	77
5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA FERRAMENTA	80
5.1	VERIFICAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO	80
5.2	VERIFICAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA-NAVIO	82
6	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – NOMENCLATURA EM PORTUGUÊS DOS ELEMENTOS DA SEÇÃO	92
	APÊNDICE B – ESTUDO DE OCUPAÇÃO DO TANQUE	93
	APÊNDICE C – ESTUDO DO GRAU DE POLINÔMIO UTILIZADO PARA A GERAÇÃO DAS SAC	96
	APÊNDICE D – ESTUDO DE ÂNGULOS DE TRIM	100
	APÊNDICE E – CASO SÉRIE 60 ANALÍTICO	102
	ANEXO A - NAVIO SAO DOMINGOS SAVIO	107

1 INTRODUÇÃO

Uma embarcação é um sistema complexo composto de diferentes subsistemas, os quais devem interagir harmonicamente de forma a garantir o funcionamento adequado do conjunto. Nesse contexto, Papanikolaou (2010) aborda o projeto de navio como um processo de otimização holístico, onde o todo não é apenas a somatória das partes.

De um modo geral, se cada subsistema de uma embarcação for otimizado individualmente, não é assegurado o desempenho ótimo do sistema em sua totalidade, uma vez que existem *trade-offs* a serem considerados. Por exemplo, ao se optar por módulos de seção maiores do que os estipulados pela norma, ganha-se em rigidez estrutural, porém o aumento do peso da estrutura irá reduzir a capacidade de carga e/ou a velocidade da embarcação.

Em virtude da existência de dependências entre as etapas de projeto, a cada novo ciclo da espiral, os resultados obtidos anteriormente devem ser revistos, buscando-se uma evolução coerente na direção de uma solução viável para o projeto.

Entre as formas para se definir o processo de projeto de um navio, encontra-se a matriz de influência (Figura 1), a qual permite quantificar o grau de influência que um sistema possui nos demais subsistemas da embarcação.

Logo, ao se priorizar os sistemas mais influentes e que, portanto, requerem menos informação para serem estimados, busca-se uma sequência de projeto mais eficiente.

Tradicionalmente o projeto de uma embarcação de grande porte é representado utilizando-se uma espiral, conforme pode ser visto na Figura 2. Tal representação proposta por (EVANS, 1959), considera que cada uma das voltas da espiral descreve uma iteração no processo de projeto do navio, o qual converge para uma solução viável representada pelo centro da espiral.

A espiral de um projeto naval geralmente se inicia com a definição dos requisitos de projeto, que podem ser resultado da vontade do armador ou de exigências de entidades normativas ou, ainda, de restrições encontradas em portos e canais.

Portanto, outra maneira de se definir o projeto de uma embarcação consiste no gerenciamento das relações de perda-e-ganho atreladas a cada etapa da espiral de projeto. Nesse contexto, cabe ao projetista realizar a tomada de decisão entre os diferentes atributos conflitantes existentes no projeto.

Figura 1 – Matriz de influência, dependência coluna-linha.

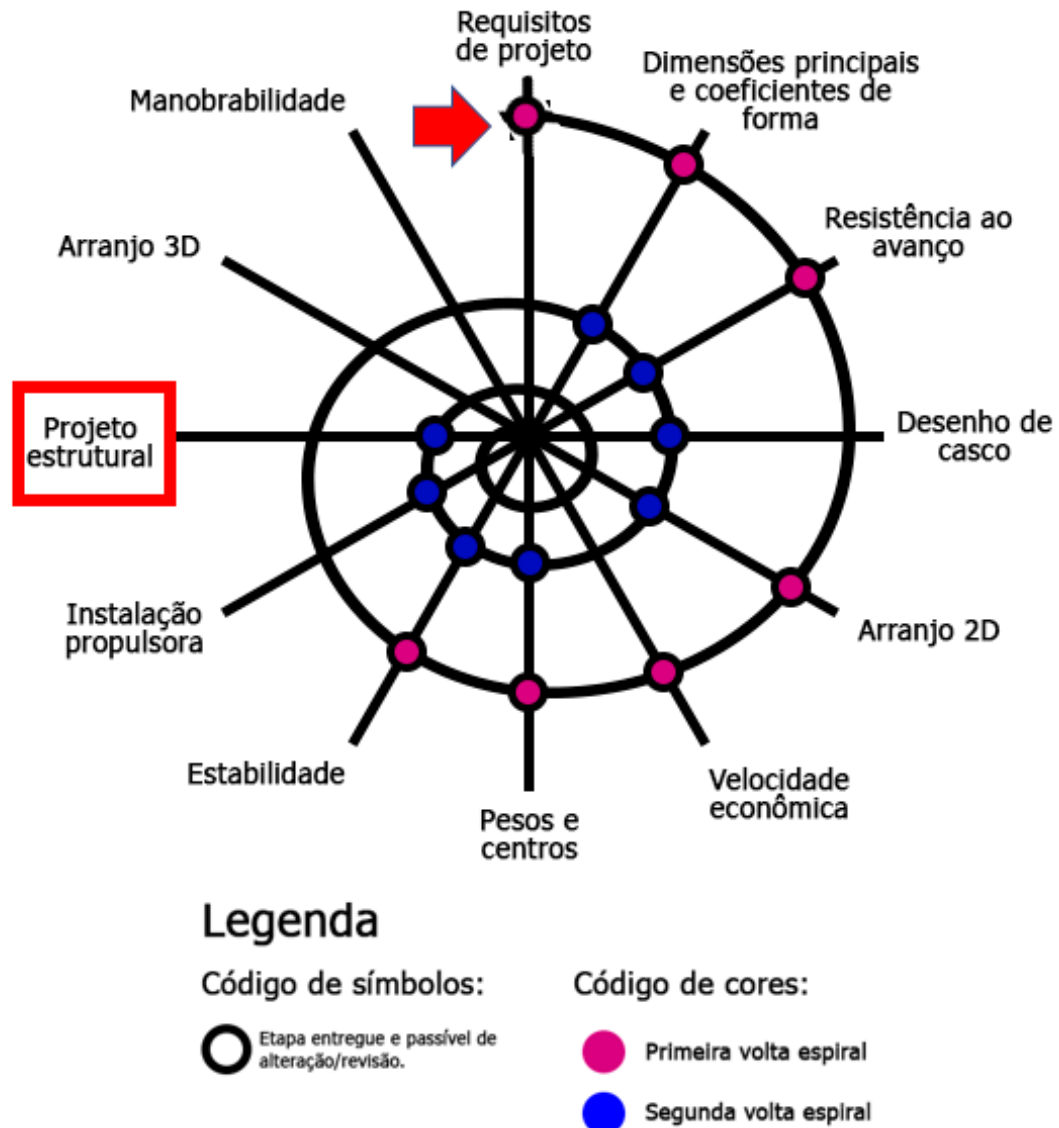
MATRIZ DE INFLUÊNCIA	Dimensões e Coef.	Resistência ao Avanço	Instalação propulsora	Velocidade Econômica	Arranjo 2D	Desenho do Casco	Pesos e Centros	Estabilidade	Projeto Estrutural	Manobrabilidade	Arranjo 3D	TOTAL	Ordem de Prioridade		
Dimensões e Coef.												0	2	Dimensões e Coef.	0
Resistência ao Avanço	1											1	3	Resistência ao Avanço	1
Instalação propulsora	1	1		1		1						4	4	Desenho do Casco	1
Velocidade Econômica	1	1										2	5	Arranjo 2D	2
Arranjo 2D	1		1									2	6	Velocidade Econômica	2
Desenho do Casco	1											1	7	Pesos e Centros	3
Pesos e Centros	1		1		1							3	8	Estabilidade	3
Estabilidade	1					1	1					3	9	Instalação propulsora	4
Projeto Estrutural	1		1		1	1	1					5	10	Projeto Estrutural	5
Manobrabilidade	1	1	1	1	1	1					1	7	12	Arranjo 3D	6
Arranjo 3D	1	1	1		1	1	1					6	13	Manobrabilidade	7

Fonte: Autora (2019).

Uma das etapas mais importantes presente na espiral é o projeto estrutural, pois é nessa etapa que os requisitos estéticos e funcionais de arquitetos e projetistas são viabilizados. É interessante observar que essa etapa costuma ser posicionada próximo ao fim da espiral, pois depende do arranjo da embarcação e da disposição de cargas, conforme pode ser visto na Figura 2, cuja espiral foi construída com base na matriz de influência mostrada na Figura 1. Além disso, o projeto estrutural de um navio consiste em uma etapa por demais trabalhosa (e custosa) para ser repetida em virtude de mudanças significativas das características fundamentais da embarcação ocorridas nas etapas iniciais do projeto.

No entanto, o peso e o centro de gravidade da estrutura do navio são informações de extrema relevância já nas etapas iniciais do projeto, pois delas dependem o cálculo de trim, a estimativa de calado, o cálculo de estabilidade transversal, entre muitos outros.

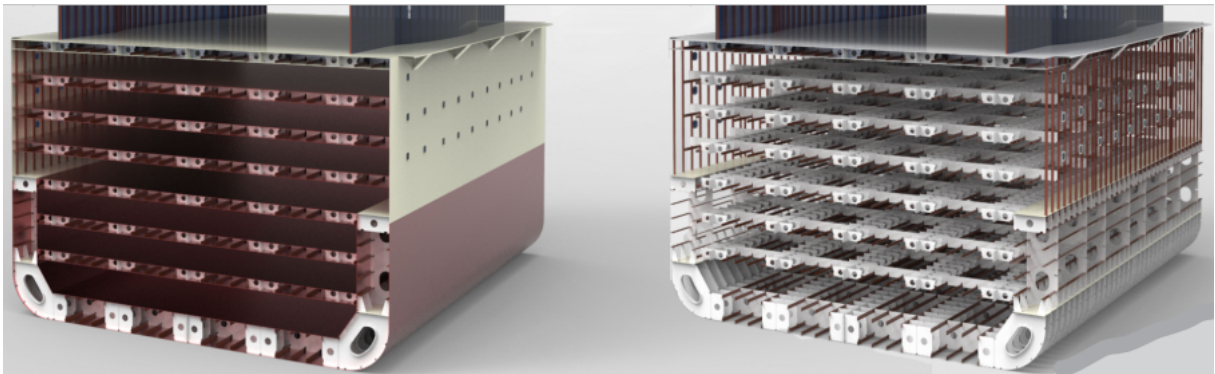
Figura 2 – Exemplo de espiral de projeto, com projeto estrutural em destaque.



Fonte: Autora (2019).

Nas fases conceitual e preliminar do projeto, apenas a topologia da seção mestra da embarcação é projetada, pois o dimensionamento dos corpos de proa e popa do navio representam arranjos complexos, e cujos projetos devem ser tratados separadamente nas fases de detalhamento. Na Figura 3 é mostrado o arranjo típico da estrutura de um navio de grande porte, e pode-se notar que existe um conjunto complexo de cascas finas e grelhas reforçadas que constituem um eficiente sistema estrutural.

Figura 3 – Arranjo tridimensional da seção mestra de um navio do tipo cruzeiro sem os conveses superiores.



Fonte: Carnival Corporation (2019).

A justificativa deste trabalho ser denominado educacional é de que este não conta com algoritmos de otimização de massa ou de decisão de variáveis de projeto. Também, são dimensionados e selecionados apenas elementos de chapa e reforçadores, referentes à topologia longitudinal do navio, restando a definição de elementos transversais, bem como topologias complementares, tais como furos nas hastilhas, borboletas nos reforçadores, saias nas anteparas, entre muitos outros.

Weaver e Ashby (1996) definem eficiência estrutural como a habilidade da estrutura suportar os carregamentos de projeto com segurança, mas projetada de forma a minimizar custos, ou outro objetivo definido pelo projetista, tal como o peso da estrutura.

A eficiência da estrutura é determinada comparando-se o peso de estruturas com arranjos diferentes, mas que possuem a mesma resistência estrutural. Assim um arranjo estrutural é mais eficiente quando seu peso é o menor possível de forma a não prejudicar a resistência do sistema (CHAVES; TANCREDI; ANDRADE, 2013).

Conforme discutido por Amaral (2016), para grandes sistemas navais, existem duas abordagens possíveis: a de projeto baseado em norma e o projeto racional. Na primeira, cabe ao projetista escolher valores iniciais para as variáveis de projeto de tal sorte a atender os requisitos impostos pela norma utilizada.

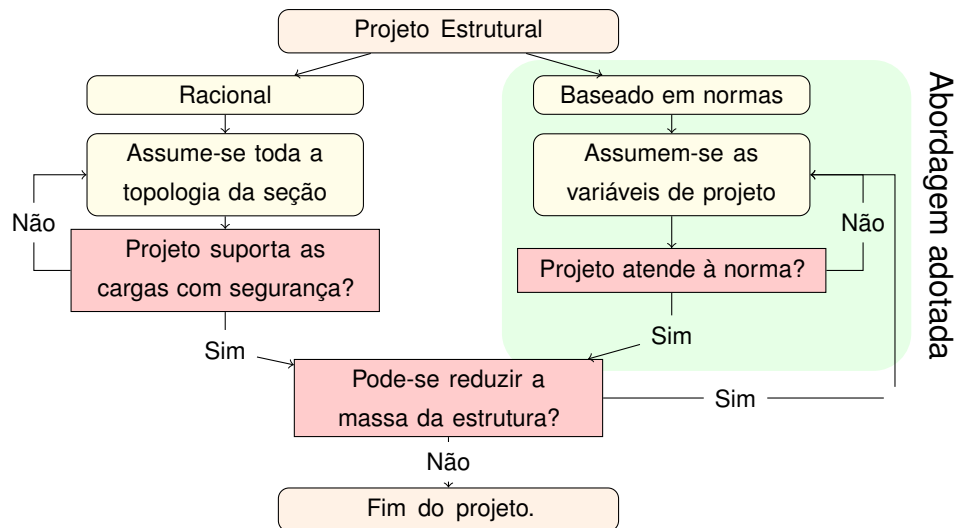
Já a segunda abordagem tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse caso o projetista propõe ¹ uma topologia inicial para a seção, a qual será analisada em uma ferramenta que utiliza MEF para o cálculo das tensões resultantes dos carregamentos aplicados (HUGHES; PAIK, 2010). Tais tensões devem ser menores do que os limites admissíveis estabelecidos para o projeto. Conforme a distribuição de tensões obtida, o projetista realiza mudanças buscando reduzir a massa da estrutura, mantendo as tensões dentro dos limites admissíveis, trabalhando em um processo

¹ A proposição da solução inicial pode ser realizada com base na experiência do projetista ou ainda, em projetos anteriores

iterativo de análise e síntese estrutural.

Na Figura 4 são mostradas as características principais de cada uma das abordagens utilizadas no projeto estrutural de embarcações.

Figura 4 – Comparação entre as abordagens de projeto.



Fonte: Autora (2019).

É possível notar que o projeto estrutural de uma embarcação se trata de um processo iterativo, o que justifica a utilização de uma ferramenta computacional para a sua concepção. Assim, um processo automatizado, robusto e eficaz para o dimensionamento estrutural de uma embarcação ainda nas fases iniciais representa um importante avanço para a redução do tempo necessário para a elaboração de um projeto naval.

Neste trabalho será utilizada a abordagem do projeto baseado em norma, uma vez que a ferramenta desenvolvida requer que sejam definidas as características principais da embarcação e as distâncias entre reforçadores para que o projeto possa ser realizado com o auxílio da norma ABS (2019).

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma ferramenta computacional com a capacidade de realizar análises de equilíbrio da viga navio e, a partir dos resultados dessas análises, realizar o projeto da seção mestra de uma embarcação deslocante que atenda aos requisitos estabelecidos pela norma ABS de 2019².

² Todas as vezes que este texto citar a norma ABS, considera-se que trata da versão editada em 2019, e cuja citação (ABS, 2019) será omitida por concisão textual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem desenvolvidos durante a realização do trabalho são:

- a. Elaborar uma interface gráfica que possibilite a inserção pelo usuário dos parâmetros requeridos para o projeto;
- b. Flexibilizar a interface para permitir que o projeto utilize os esforços determinados pela análise de equilíbrio da viga navio ou os esforços estimados pela equacionamento proposto pela norma ABS (2019);
- c. Implementar o equacionamento para o cálculo do momento fletor e da força cortante de uma viga navio, proposto pela norma ABS (2019);
- d. Implementar o equacionamento para a análise de equilíbrio da viga navio utilizando o algoritmo de bissecção proposto por Soudzler (2018);
- e. Desenvolver uma interface que permita a visualização das curvas de Carga, Força Cortante e Momento Fletor na viga navio;
- f. Desenvolver um modelo de cálculo de curva de flutuação a partir de uma geometria importada pelo usuário na forma de uma tabela de cotas ou de curvas de área seccional;
- g. Implementar as rotinas que definem as características dos elementos estruturais contidos na seção mestra de um navio, considerando os requisitos impostos pela norma ABS (2019).
- h. Desenvolver um algoritmo para o cálculo e visualização das tensões primárias existentes na seção projetada;
- i. Realizar estudos de caso, cujas soluções analíticas são conhecidas, de forma a verificar o desenvolvimento proposto.

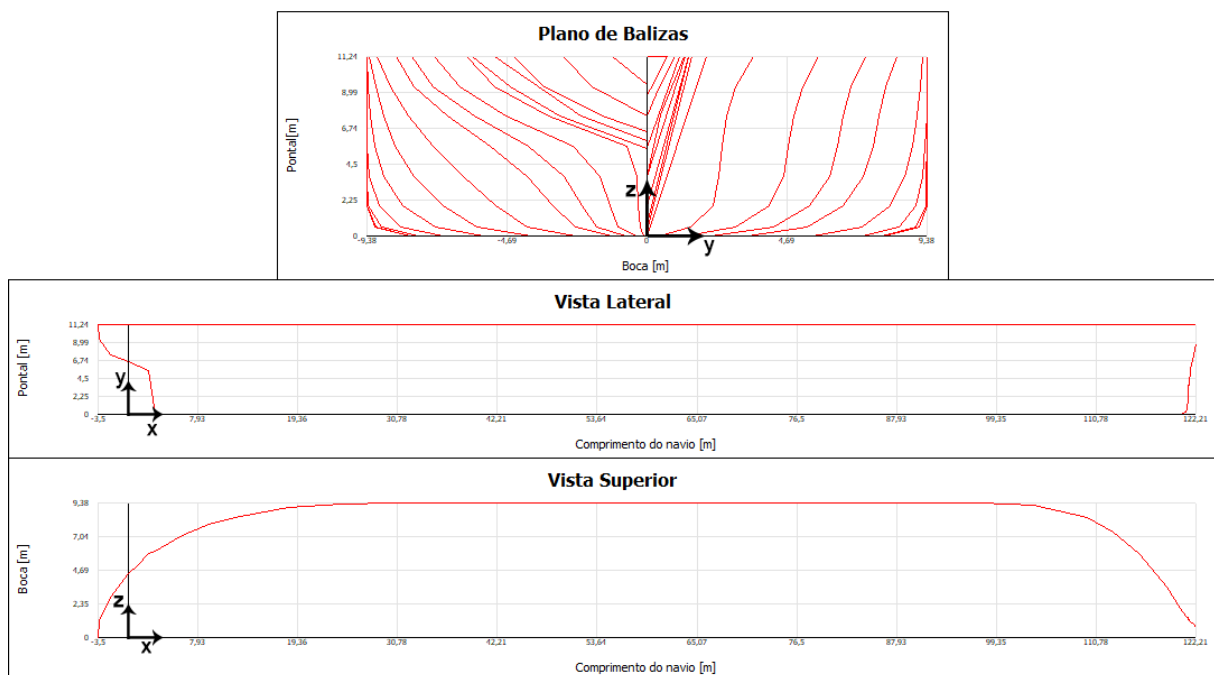
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os princípios e hipóteses que fundamentam o projeto estrutural de sistemas navais quando utilizada a abordagem baseada em normas de Sociedades Classificadoras, em especial a norma ABS (2019). Tais conceitos fundamentam o desenvolvimento realizado e que será apresentado no Capítulo 3.

2.1 SISTEMA DE COORDENADAS

O sistema de coordenadas adotado ao longo de todo o desenvolvimento consiste no conjunto de eixos mostrados na Figura 5, com o eixo X alinhado na direção longitudinal, o Y alinhado à direção transversal e por fim, o eixo Z alinhado com a direção vertical do navio.

Figura 5 – Sistema de coordenadas do navio.



Fonte: Autora (2019).

2.2 NORMAS DE SOCIEDADES CLASSIFICADORAS

As normas para projeto de navios refletem uma compilação de equações empíricas que permitem dimensionar elementos estruturais do casco em função das

dimensões principais do navio; e cuja formulação baseia-se em experiências passadas (HUGHES; PAIK, 2010).

Ou seja, Sociedades Classificadoras utilizam décadas de dados sobre sinistros de embarcações para propor regras, que quando aplicadas, minimizam o risco de novos incidentes associados ao projeto, à construção e à operação de embarcações.

Assim, a cada ano, tais regras são revisadas, de forma a incluir novos sinistros e novas exigências da *International Marine Organization*³, responsável por manter a segurança das embarcações e prevenir a poluição causada pelos navios.

Neste trabalho, a norma utilizada será a da *American Bureau of Shipping*, ABS e sua publicação *Rules for Building and Classing Steel Vessels*. Todos os equacionamentos adotados para a construção da ferramenta estão presentes na terceira parte do documento da classificadora, denominada *Hull Construction and Equipment*.

2.3 DESACOPLAMENTO DO MODELO

Conforme visto em Barabanov (1966), a análise da estrutura de uma embarcação pode ser decomposta em uma análise que considera os efeitos globais e uma análise que considera os efeitos locais do carregamento aplicado ao casco do navio.

A análise dos efeitos globais sofridos pelo casco de uma embarcação costuma ser chamada de análise da Estrutura Primária do Navio (TANCREDI, 2004). Uma vez que embarcações geralmente possuem comprimento muito maior do que a boca e o pontal, pode-se considerar a estrutura de um navio como sendo uma viga de comprimento igual ao comprimento da embarcação.

Assim, a análise da Estrutura Primária de um navio pode ser realizada utilizando-se a Teoria de Vigas sempre que o navio a ser projetado possuir proporção comprimento-boca e comprimento-pontal maiores que cinco (TANCREDI, 2004).

Conforme discutido por Barabanov (1966), a estrutura local de uma embarcação consiste em um chapeamento fino reforçado por perfis estruturais dispostos longitudinalmente e transversalmente à embarcação.

Usualmente a análise dos efeitos locais existentes no casco de um navio recebe o nome de análise da Estrutura Secundária (quando se refere a análise dos reforçadores) e análise da Estrutura Terciária (quando se refere a análise das chapas).

Uma vez que o desenvolvimento proposto considera apenas os esforços globais, o presente texto focará na fundamentação teórica referente a análise da Estrutura Primária de um navio. O leitor interessado poderá encontrar farta documentação sobre os efeitos locais em Barabanov (1966).

³ Agência integrante da Organização das Nações Unidas.

2.4 ESTRUTURA PRIMÁRIA

Como mencionado anteriormente, a análise dos efeitos globais é denominada análise da Estrutura Primária.

Tancredi (2004) destaca que nessa análise considera-se que a viga navio possui comprimento igual ao comprimento da embarcação e seção estrutural constituída apenas pelos elementos do casco que são contínuos por pelo menos dois terços do comprimento da embarcação.

Conforme discutido por Barabanov (1966) a desconsideração dos elementos estruturais do casco cuja dimensão longitudinal é menor do que dois terços do comprimento da embarcação baseia-se no fato de que, uma vez sujeitos a flexão, a curvatura desses elementos é significativamente menor do que a curvatura da viga navio.

Sobre esse assunto, Hughes (1983) destaca que o grau de influência do elemento longitudinal na resistência da viga navio é uma função contínua que depende além do comprimento do elemento, da posição do centro do elemento em relação ao centro da viga navio. Nesse caso, a desconsideração dos elementos que não atingem o limite de continuidade é uma abordagem que vai a favor da segurança e que será adotada nesse trabalho.

2.4.1 Tosamento e Alquebramento

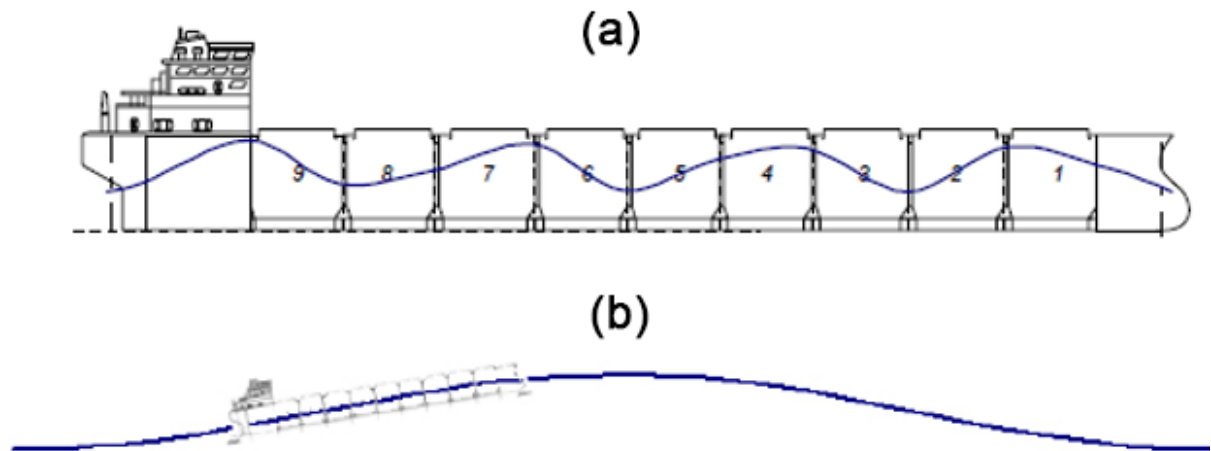
Navios deslocantes de grande porte, ao se moverem pelo mar, encontram ondas que modificam a distribuição de flutuação ao longo do casco, podendo amplificar eventuais esforços atuantes na viga navio.

Assim, a análise da Estrutura Primária de um navio deve considerar duas condições distintas de mar: em águas tranquilas e na presença de ondas. A condição de águas tranquilas, também chamada de mar calmo, em geral está relacionada com o carregamento do navio no porto, enquanto que a presença de ondas está relacionada com a navegação em si.

Segundo Tancredi (2004), entre as ondas com diferentes comprimentos presentes no mar, considera-se na análise primária a ocorrência de ondas cujo comprimento se aproxima do comprimento entre perpendiculares do navio. Pois ondas com comprimento muito menor que o do navio produzem principalmente efeitos locais (Figura 6a).

Por outro lado, se o comprimento da onda é muito maior que o comprimento do navio, a distribuição da flutuação permanece similar àquela observada quando o navio navega em águas calmas (Figura 6b). De maneira prática, uma onda gigante pode inclinar longitudinalmente ou até mesmo emborcar a embarcação, mas, no entanto, provoca pouca solicitação estrutural.

Figura 6 – Onda de comprimento inferior ao do navio (a). Onda de comprimento superior ao do navio (b).

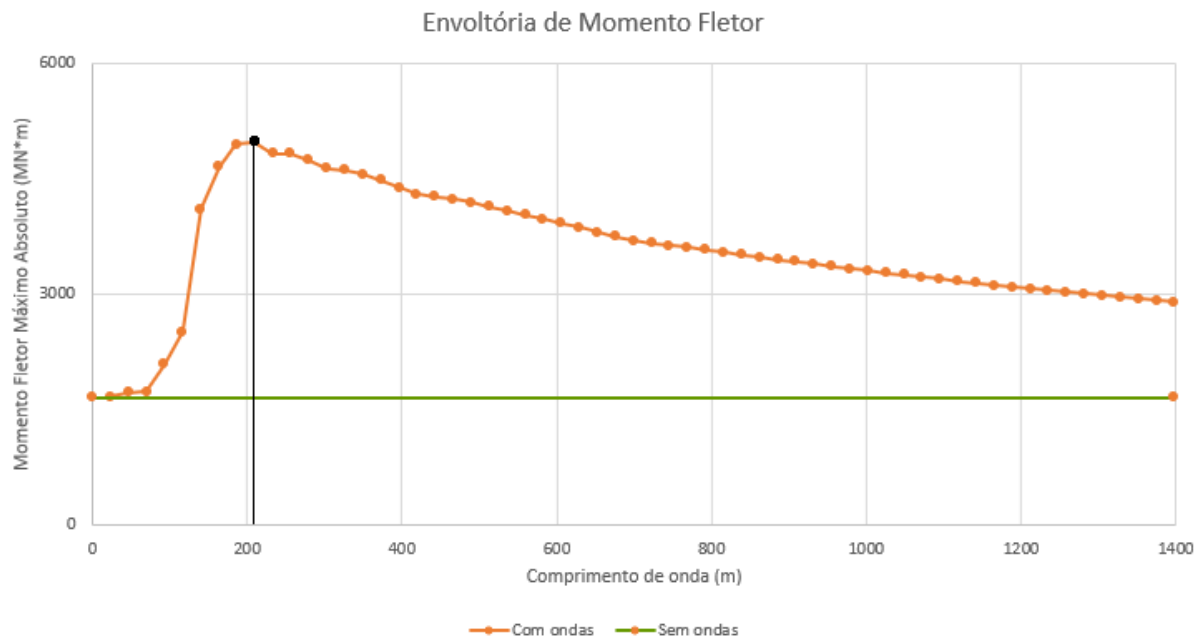


Fonte: Tancredi (2004).

Em geral, a influência do comprimento da onda na solicitação estrutural global sofrida pelo casco da embarcação é mostrada na forma de uma curva contínua denominada Envoltória do Momento Fletor. Neste caso, é calculado o momento fletor atuante na viga navio, para um mesmo carregamento, alterando o comprimento de onda atuante e verificado o comprimento de onda crítico para aquela condição de carga.

Na Figura 7 é mostrada a Envoltória do Momento Fletor para uma embarcação de duzentos e trinta metros de comprimento, na qual é possível observar que a solicitação de maior momento fletor ocorre quando o navio encontra uma onda de aproximadamente 230 metros de comprimento.

Figura 7 – Envoltória do Momento Fletor.



Fonte: Autora (2019).

2.4.2 Curva de Pesos

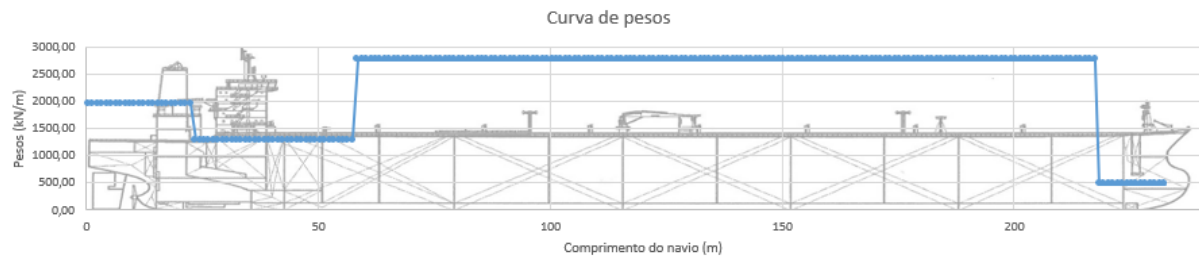
De acordo com Tancredi (2004), a curva da distribuição de pesos deve ser a primeira a ser levantada no processo de equilíbrio de viga navio, e descreve a posição de todos os pesos alocados ao longo do comprimento da embarcação.

Nessa curva são consideradas a massa do sistema propulsivo, o peso em aço do casco, da superestrutura e a própria carga a ser transportada, além de quaisquer outros elementos de massa significativa.

Na Figura 8 é apresentada uma curva de pesos, uma representação visual que auxilia o projetista a observar a magnitude dos pesos alocados ao longo do comprimento do navio e seu posicionamento.

Magalhães (2010) define que enquanto a mercadoria é objeto do comércio, a carga é objeto do transporte e navios são construídos para transportar cargas, sendo importante que o navio projetado tenha a capacidade de suportar os esforços causados pela alocação da carga e demais pesos em sua estrutura.

Figura 8 – Curva de pesos.



Fonte: Autora (2019).

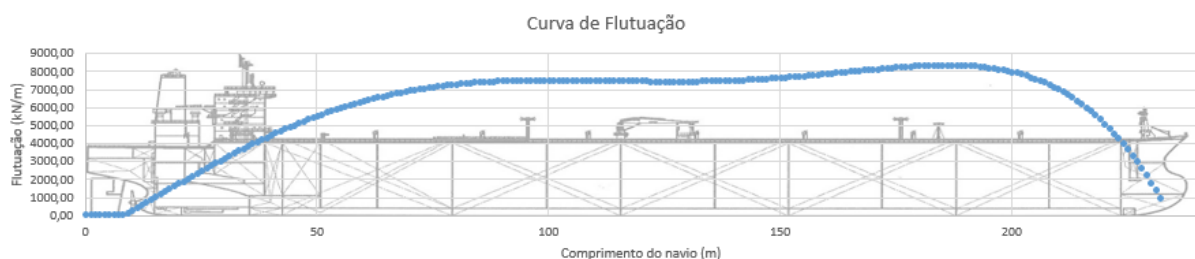
2.4.3 Curva de Flutuação

Uma vez que o navio encontra-se em uma posição de equilíbrio, a curva de flutuação é obtida a partir da integração da área submersa de cada uma das balizas do casco.

A área da curva de flutuação representa o volume deslocado pelo casco na condição de carga analisada. É importante observar que tal volume deve ser multiplicado pela massa específica do fluido onde o navio está imerso, em geral, a água salgada.

Na Figura 9 é mostrado um exemplo de curva de flutuação tipicamente observada em um navio deslocante de grande porte. É importante observar que a curva de flutuação deve considerar também as diferentes condições de mar analisadas.

Figura 9 – Curva de flutuação para condição de mar calmo.



Fonte: Autora (2019).

Uma vez definida que a onda crítica é aquela que possui o comprimento da embarcação, existem duas configurações críticas a serem analisadas: a de tosamento e a de alquebramento.

Na primeira, a seção a meia-nau do navio encontra-se na cava da onda. Nesse instante, o fundo do navio tende a ser tracionado e o convés tende a ser comprimido. Já na segunda condição, a tendência é que ocorra o contrário, a meia-nau do navio se encontra na crista da onda e, nesse caso, o convés encontra-se tracionado e o fundo comprimido (BARABANOV, 1966).

As Equações 1 e 2 descrevem o calado em cada posição x da viga navio

para ambas as configurações de onda analisadas. Tais equações representam a soma do calado médio a meia nau com o ajuste devido à onda e ao ângulo de trim da embarcação.

$$h(x) = \overline{h_m} + A_{onda} \cos(2\pi * \frac{x}{L}) + (\frac{L}{2} - x) * \tan(\phi) \quad (1)$$

$$h(x) = \overline{h_m} - A_{onda} \cos(2\pi * \frac{x}{L}) + (\frac{L}{2} - x) * \tan(\phi) \quad (2)$$

Onde $h(x)$ representa o calado da embarcação na posição x , $\overline{h_m}$ representa o calado médio, A_{onda} representa a amplitude da onda analisada, L representa o comprimento do navio e ϕ representa o ângulo de trim.

A amplitude de onda utilizada nas Equações 1 e 2 considera que essa se desenvolve em águas profundas e possui uma relação típica de linearidade entre a amplitude e comprimento de 2,5% (FUJARRA, 2016). Como a onda crítica tem comprimento igual ao comprimento do navio, a amplitude considerada é igual a 2,5% do comprimento da embarcação analisada.

Por fim, destaca-se que o nível de detalhamento, tanto da curva de pesos, quanto da curva de flutuação, depende da fase do projeto e da quantidade de informações disponíveis para a análise.

2.4.4 Equilíbrio da viga navio

Conforme descrito anteriormente, a análise da estrutura global de uma embarcação utiliza um modelo baseado em teoria de vigas, no qual o carregamento imposto à viga navio é descrito por uma curva de pesos e uma curva de flutuação.

Nessa abordagem, considera-se que a viga navio possui ambas as extremidades livres de apoios, e, portanto, a etapa mais importante da análise consiste na definição da condição na qual os carregamentos impostos a viga navio se encontrem em equilíbrio.

A ausência de equilíbrio entre as cargas aplicadas à viga navio resulta em movimento, o qual persiste até que uma condição de equilíbrio seja alcançada. Tal condição somente é alcançada se o empuxo e o peso do navio assumem valores iguais. No entanto essa condição é necessária, mas não suficiente.

A igualdade entre o peso do navio e o empuxo deslocado pelo casco assegura o equilíbrio vertical da embarcação, mas não assegura o equilíbrio rotacional do casco. No entanto, caso a força peso encontre-se alinhada com o empuxo do casco, inexistirá momento, e, portanto, tal condição representará uma situação de equilíbrio de forças.

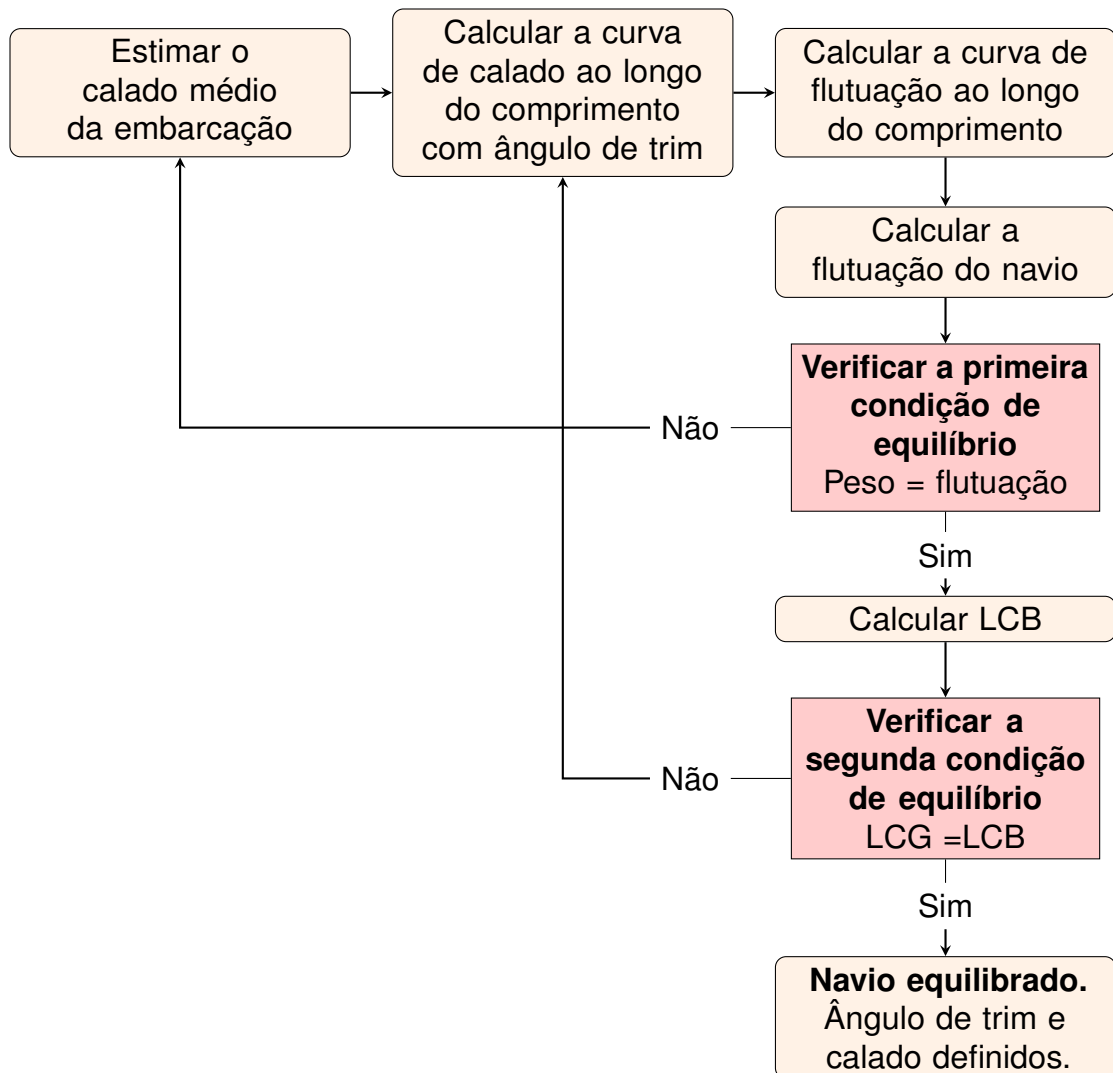
Assim, a segunda condição de equilíbrio pode ser descrita em termos da posição longitudinal do centro de gravidade e da posição longitudinal do centro de flutuação, que devem estar localizados no mesmo eixo vertical da embarcação.

O não atendimento da primeira condição de equilíbrio resulta em um movimento vertical que altera o calado médio da embarcação. Já o não atendimento da segunda condição de equilíbrio resulta em um movimento de rotação que altera o ângulo de trim da embarcação.

No entanto, devido à diferença entre a área de linha água da proa e da popa da embarcação, a variação do ângulo de trim resulta em uma variação do deslocamento total do casco, fazendo com que ambos os parâmetros sejam interdependentes. Logo a determinação da posição de equilíbrio de uma embarcação consiste em um processo iterativo, mas de rápida convergência. Ambos os parâmetros interagem entre si e geralmente tendem a convergir em poucas iterações

O procedimento utilizado para a definição do equilíbrio da viga navio é mostrado no fluxograma descrito na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do procedimento de equilíbrio da viga navio.



Fonte: Autora (2019).

Uma vez que o navio está devidamente equilibrado, podem ser determinadas a

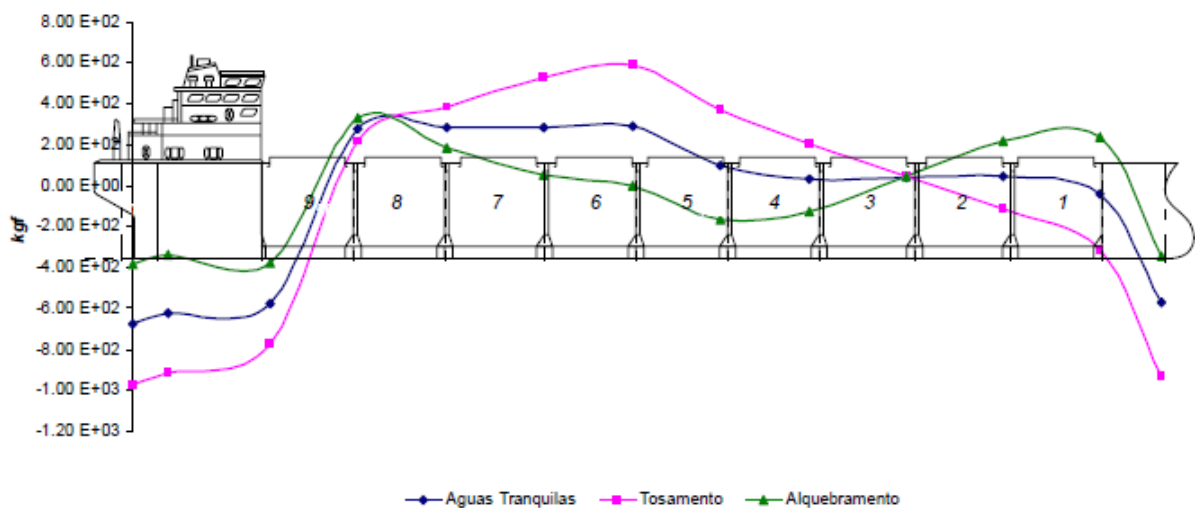
curva de carga, força cortante e momento fletor.

2.4.5 Curva de carga $q(x)$

A curva de carga (Figura 11) representa o carregamento total incidente sobre a viga navio, e pode ser calculada como sendo a subtração entre a curva de pesos e a curva de flutuação. Tal subtração deverá ser feita em cada posição x da viga navio.

Por fim, é importante destacar que o conceito de carga aqui apresentado é diferente do conceito descrito por Magalhães (2010), pois nesse caso, carga se refere à solicitação auto-equilibrada atuante sobre o navio (TANCREDI, 2004).

Figura 11 – Exemplo de curva de carga.



Fonte: Tancredi (2004).

Na Figura 11 é mostrado um exemplo de curva de cargas para as três condições de mar analisadas. É possível observar que a condição de mar calmo sempre representa uma solicitação intermediária entre a condição de tosamento e de alquebramento. Isso deve-se ao fato de que, em mar calmo, o navio apresenta uma tendência de tosar ou de alquebrar, dependendo da alocação de pesos e da geometria do casco. Nesse caso, a passagem da onda irá amplificar a tendência natural da embarcação em uma condição, e reduzir essa tendência na outra condição.

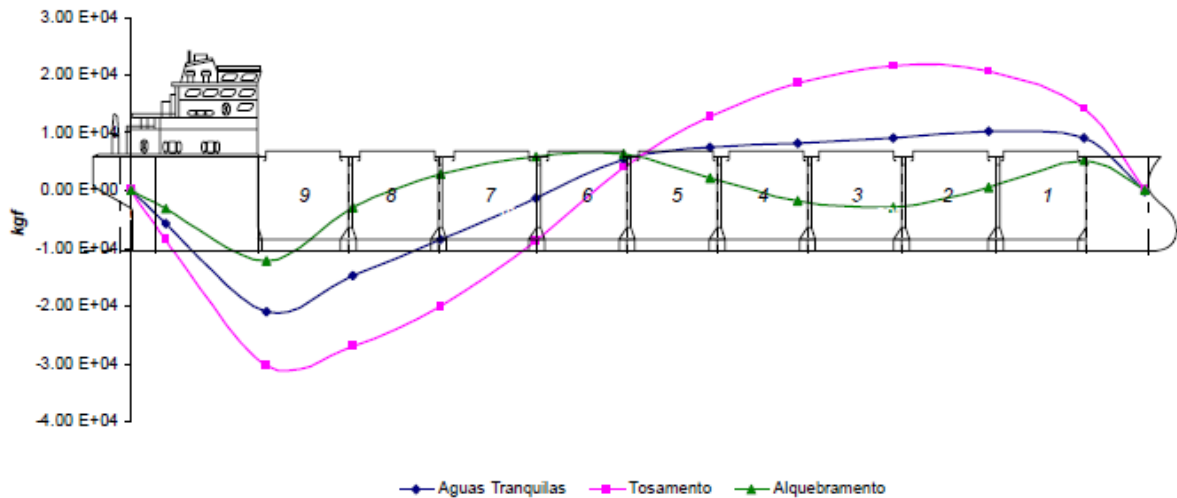
2.4.6 Curva de força cortante $Q(x)$

A curva de força cortante da embarcação pode ser determinada a partir da Equação 3, que tem como base a teoria simples de vigas.

$$Q(x) = \int_0^x q(x) dx \quad (3)$$

Na Figura 12 é apresentado um exemplo de curva de força cortante para cada uma das três condições de mar analisadas. Geralmente, se observa que os máximos valores de força cortante ocorrem a 25% e 75% do comprimento do navio e possui valor nulo em coordenadas próximas à seção de meia-nau da embarcação.

Figura 12 – Curva de força cortante.



Fonte: Tancredi (2004).

2.4.7 Curva de momento fletor $M(x)$

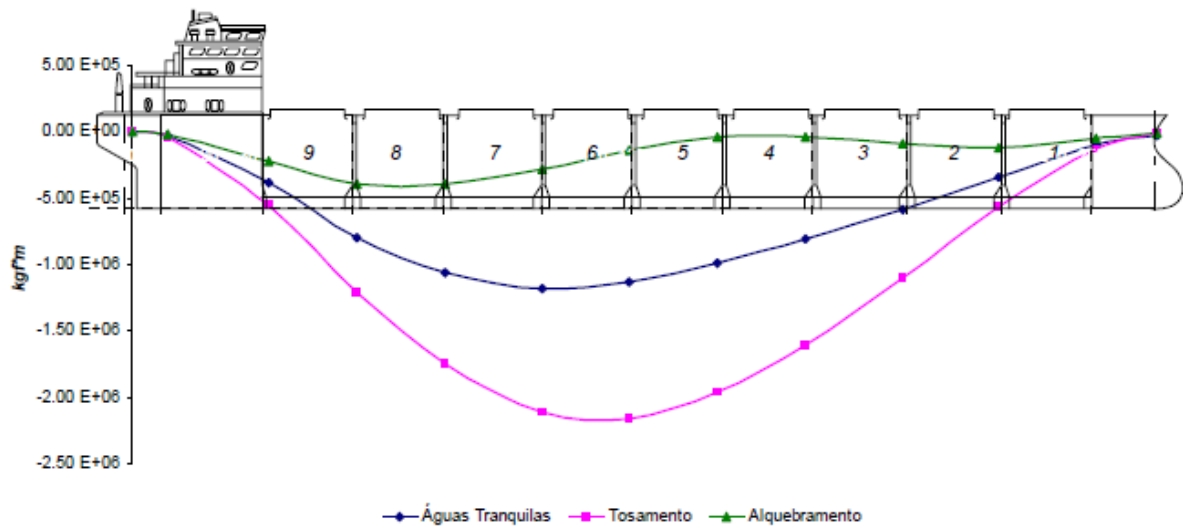
De forma análoga à curva de força cortante, a curva de momento fletor pode ser determinada utilizando-se a Equação 4.

$$M(x) = \int_0^x Q(x)dx \quad (4)$$

Na Figura 13 é apresentado um exemplo de curva de momento fletor calculada para cada uma das três condições de mar analisadas. Geralmente, tal curva apresenta valor máximo próximo à meia-nau da embarcação. Usualmente a seção de máximo momento fletor é denominada de seção mestra ⁴ da embarcação.

⁴ A definição de seção mestra pode variar de acordo com a etapa do projeto. Na análise estrutural, esse termo se refere sempre a seção de máximo momento fletor

Figura 13 – Exemplo de curva de momento fletor.



Fonte: Tancredi (2004).

2.5 PROJETO ESTRUTURAL

As curvas de força cortante e momento fletor representam os esforços globais ao longo da viga navio. Assim, o projeto estrutural da embarcação, deve utilizar como dado de entrada o máximo momento fletor obtido entre as análises das diferentes condições de carga importantes para a missão do navio (BAI, 2003).

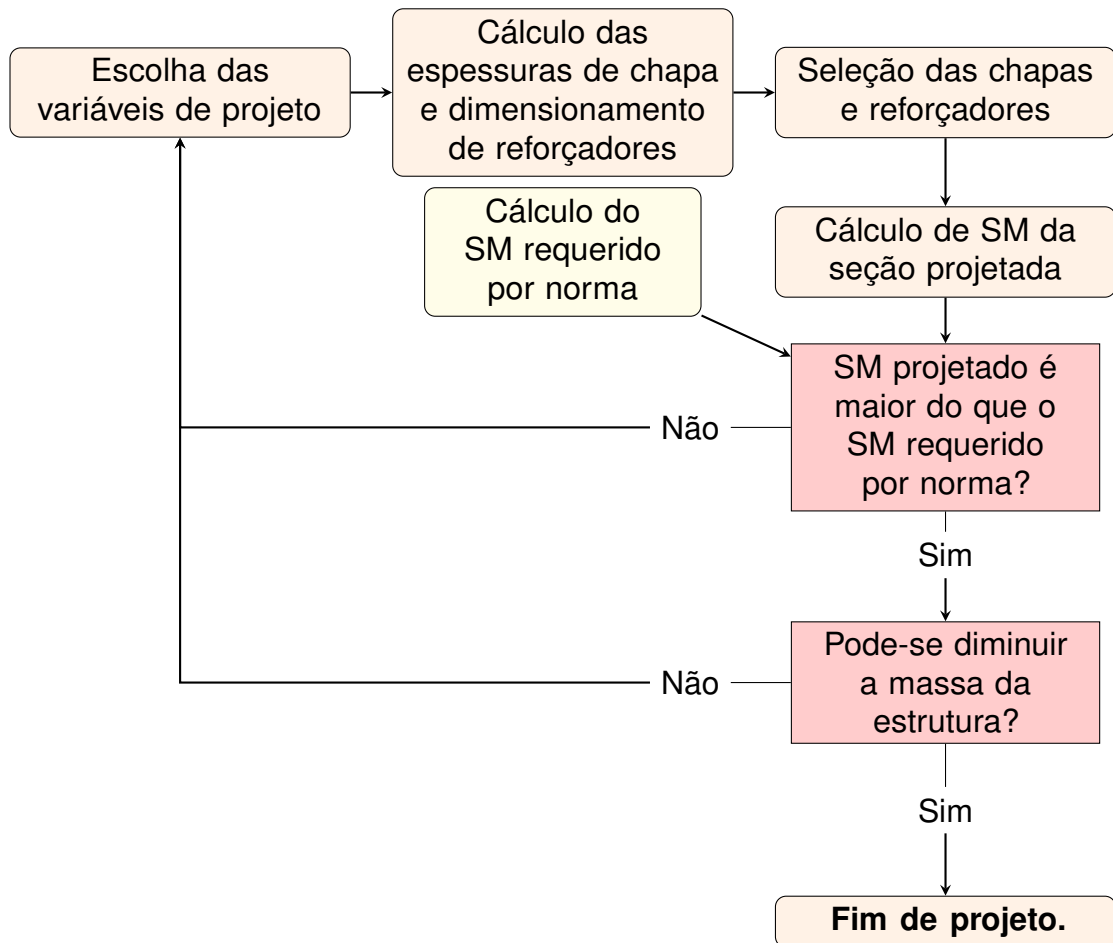
Não utilizar a máxima força cortante nas análises se deve ao fato de seus valores máximos ocorrerem fora da região da seção mestra, entre 25% e 75% do comprimento da embarcação.

Bai (2003) defende que o projeto estrutural de uma embarcação é um processo iterativo e complexo. Na Figura 14 é apresentado o fluxograma do processo de projeto de uma estrutura que utiliza a abordagem baseada em norma.

Nessa abordagem, o processo de projeto consiste basicamente na determinação dos elementos estruturais que constituem a seção mestra da embarcação, tais como: dimensões dos reforçadores e espessuras das chapas.

Esse dimensionamento tem como base os espaçamentos entre reforçadores transversais e longitudinais definidos pelo projetista, os quais são modificados até que o arranjo dimensionado resulte em uma seção mestra que atenda aos requisitos estabelecidos pela norma.

Figura 14 – Fluxograma do projeto estrutural baseado em norma.



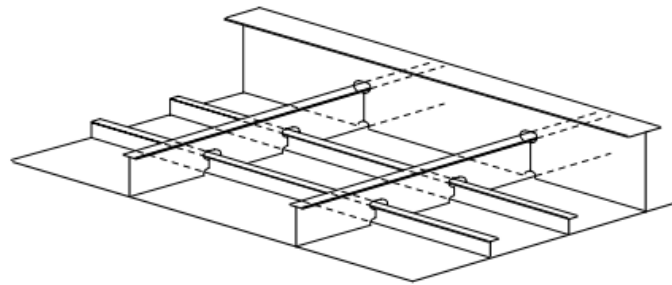
Fonte: Autora (2019).

2.5.1 Determinação do cavernamento

Conforme discutido anteriormente, a estrutura de uma embarcação deslocante é composta de uma casca consistida de chapas soldadas, a qual é reforçada por uma gralha ortogonal composta de perfis estruturais (Figura 15).

Segundo Augusto (2007), os reforçadores utilizados em embarcações podem ser do tipo laminados ou do tipo soldados, os quais costumam ser fabricados no próprio estaleiro.

Figura 15 – Disposição dos reforçadores leves e pesados.



Fonte: Augusto (2007).

Embora existam normas para o projeto de embarcações, tais normas dimensionam os elementos estruturais com base nos espaçamentos definidos pelo projetista. Assim, é justamente na definição desses espaçamentos que se concentra o trabalho do engenheiro de estruturas navais.

Entre os aspectos principais que governam a definição do arranjo estrutural de um casco, destacam-se os conceitos de eficiência e continuidade estrutural.

O conceito de eficiência estrutural já foi apresentado anteriormente neste texto, e sua importância é evidente, dada a relação existente entre o peso e o custo de uma estrutura. Assim, aumentar a eficiência de um projeto estrutural, em geral, resulta em uma redução do custo associado ao projeto.

Já o conceito de continuidade estrutural é importante para evitar concentrações de tensões e pontos frágeis em descontinuidades da estrutura. Assim é importante que os elementos estruturais sejam contínuos e alinhados com a direção na qual os esforços estruturais sejam predominantes.

A predominância de elementos em uma direção do casco define o tipo de cavernamento adotado no projeto. Os diferentes arranjos estruturais de uma embarcação podem ser classificados em três tipos de cavernamento: transversal, longitudinal e misto (ZUBALY, 2009).

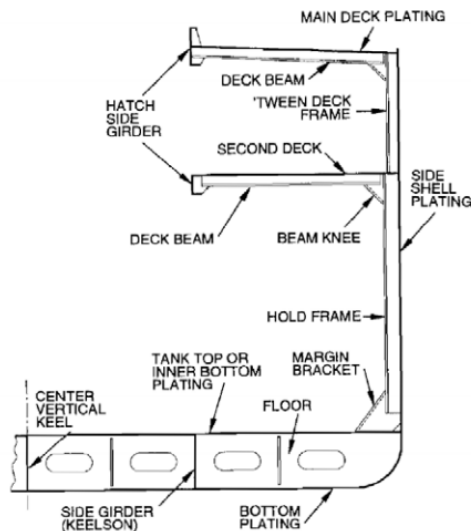
No cavernamento transversal, existe uma predominância de reforçadores posicionados transversalmente ao casco (eixo y da Figura 16). Essa configuração garante apenas a resistência transversal do navio, a rigidez longitudinal nesse caso é dada pelo chapeamento do casco e pelos poucos reforçadores longitudinais (ZUBALY, 2009).

Justamente por causa da baixa rigidez longitudinal, cavernamentos transversais raramente são utilizados em navios mercantes (AUGUSTO, 2004). Um arranjo típico da estrutura transversal de uma embarcação é mostrado na Figura 16.

Tradicionalmente na elaboração de dissertações, figuras com termos em inglês devem ser traduzidos para o português. No entanto, como o texto base para esse trabalho (ABS, 2019) é editado em inglês, a existência de figuras com a nomenclatura

dos diferentes elementos estruturais escritos em inglês representa um importante auxílio para engenheiros e projetistas. De toda sorte, apresenta-se no Apêndice A uma tabela com os termos mostrados nas Figuras 16, 17 e 18 traduzidos para o português.

Figura 16 – Cavernamento transversal.



Fonte: Zubaly (2009).

Por outro lado, no cavernamento longitudinal, existe a predominância de reforçadores leves e pesados dispostos longitudinalmente em relação à embarcação (eixo x da Figura 17). Um exemplo da estrutura longitudinal tipicamente encontrada em navios com esse tipo de cavernamento é mostrado na Figura 17.

Considera-se que um perfil é leve quando esse possui inercia da seção transversal ao menos uma ordem de grandeza menor do que a inercia da seção dos reforçadores transversais. A função dos reforçadores leves consiste no enrijecimento do chapeamento do casco, enquanto os reforçadores pesados garantem a rigidez da viga navio.

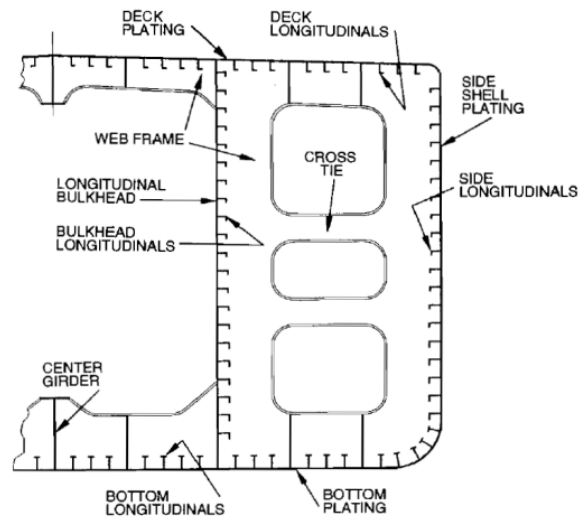
Em virtude da diferença na rigidez de reforçadores leves e pesados, considera-se que os reforçadores leves se apoiam⁵ nos reforçadores transversais, enquanto os reforçadores pesados são considerados apoiados nas anteparas.

A predominância de reforçadores longitudinais aumenta a resistência da viga navio na direção longitudinal. No entanto, dificulta a união dos blocos durante o processo de construção da embarcação, pois o número de elementos a serem alinhados e soldados aumenta consideravelmente.

Assim, esse tipo de cavernamento, geralmente é utilizado em navios de grande porte, tais como petroleiros e graneleiros Zubaly (2009).

⁵ A rigor, o tipo de vínculo existente entre reforçadores longitudinais e elementos transversais do casco é tópico complexo, variando de apoio absoluto até engaste absoluto, mas que foge ao escopo desse trabalho. O leitor interessado pode buscar informações em Barabanov (1966).

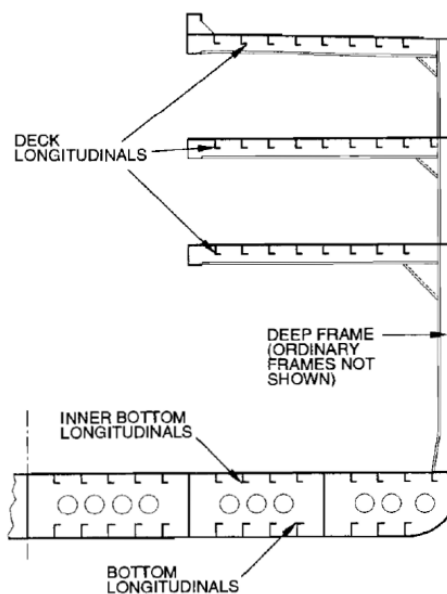
Figura 17 – Cavernamento longitudinal.



Fonte: Zubaly (2009).

Por fim, o cavernamento misto une as melhores características de cada uma das configurações anteriores. Segundo Zubaly (2009), no fundo e no convés⁶ são aplicados cavernamentos longitudinais, assegurando a rigidez da viga navio (Figura 18). No entanto, para facilitar a movimentação de carga, e reduzir o tempo de construção da embarcação na carreira, utiliza-se cavernamento transversal na região dos costados da embarcação.

Figura 18 – Cavernamento misto.



Fonte: Zubaly (2009).

⁶ As regiões de fundo e convés encontram-se mais afastadas da linha neutra da seção transversal do navio. Sendo assim, reforçadores longitudinais presentes nessas regiões são mais efetivos para o aumento do momento de inércia da seção estrutural.

2.5.2 Variáveis de projeto

Conforme fluxograma mostrado na Figura 10, as variáveis do projeto estrutural de uma embarcação dizem respeito aos vãos livres e aos espaçamentos utilizados no arranjo dos reforçadores.

A rigor, o tipo de cavernamento utilizado na estrutura está implícito na determinação dos valores estabelecidos para as variáveis de projeto.

Com base no estudo de eficiência estrutural realizado por Chaves, Tancredi e Andrade (2013), pode-se afirmar que o projeto de uma embarcação é composto de pelo menos doze parâmetros a serem definidos no início do processo iterativo. Essas variáveis são enumeradas na Tabela 1.

Chaves, Tancredi e Andrade (2013) inclui ainda três variáveis que descrevem as características das anteparas transversais. No entanto, tais variáveis fogem ao escopo deste trabalho, pois não guardam relação com o projeto da seção mestra de um navio.

Por fim destaca-se que, embora esteja listada na Tabela 1, a distância entre anteparas não pode ser considerada uma variável do projeto estrutural, pois está intimamente ligada ao arranjo e à estabilidade avariada da embarcação. Nesse caso, tal parâmetro é considerado fixo, podendo apenas ser reduzido com a inclusão de colunas ao longo do compartimento.

Tabela 1 – Variáveis do projeto estrutural para cavernamento longitudinal

Localização	Espaçamentos			
	Longitudinais leves	Longitudinais pesados	Transversais leves	Transversais pesados
Convés	Entre perfis leves	Entre perfis pesados	Entre vaus	
Costado	Entre perfis leves	Entre perfis pesados	Entre cavernas	Entre anteparas
Fundo	Entre perfis leves	Entre perfis pesados	Entre hastilhas	
Duplo fundo	Entre perfis leves	Entre perfis pesados	Entre hastilhas	
		Altura do duplo fundo		
		Espaçamento entre costados		

Fonte: Autora (2019).

A altura do duplo fundo e o espaçamento entre costados têm dimensões mínimas estipuladas pela SOLAS (1965) e que devem ser respeitadas pelo projetista. Em geral, o duplo fundo é uma exigência a ser cumprida para todo tipo de embarcação, enquanto que o duplo costado é obrigatório para navios petroleiros e de transporte de passageiros, sendo facultativo para os demais tipos.

A altura do duplo fundo estipulada por norma deve estar entre um e dois metros. No entanto, tanto a SOLAS (1965), quanto a ABS (2019) estabelecem que essa altura não deve ser menor do que o valor definido pela Equação 5.

De maneira semelhante, o duplo costado também deve possuir largura entre um e dois metros, e cujo valor mínimo pode ser determinado pela Equação 6, proposta

em SOLAS (1965).

$$h_{db} = \frac{B}{15} \quad (5)$$

$$w_{ss} = 0,5 + \frac{DWT}{20000} \quad (6)$$

Onde B representa a boca da embarcação em metros e DWT corresponde ao peso morto da embarcação ⁷, e representa "todo o peso que o navio é capaz de carregar, incluindo a carga, a tripulação e seus pertences, o combustível e a água potável"(FONSECA, 2002), até que o calado de projeto seja alcançado.

A consideração do peso morto na estimativa da distância entre cascos visa estimar a energia envolvida em uma eventual colisão da embarcação.

Conforme discutido anteriormente, a distância entre anteparas é definida com base no arranjo e na capacidade da embarcação permanecer estável após uma avaria. Porém, na ausência de informações precisas, uma primeira aproximação pode ser obtida fazendo um estudo de embarcações semelhantes ou utilizando fórmulas empíricas.

A autoridade marítima brasileira possui uma normativa denominada NORMAM (2005), a qual estabelece uma distância máxima entre anteparas de trinta metros; além de estabelecer um número mínimo de anteparas transversais em função do comprimento e da posição da praça de máquinas da embarcação (Tabela 2).

Tabela 2 – Número de anteparas conforme o posicionamento da praça de máquinas.

Comprimento de regra	Número de anteparas	
	Máquinas ao centro	Máquinas a ré
até 65 m	0	0
65 m < L ≤ 85 m	0	1
85 m < L ≤ 105 m	1	1
105 m < L ≤ 115 m	2	2
115 m < L ≤ 145 m	3	3
acima de 145 m	4	4

Fonte: Adaptado de NORMAM (2005).

As cavernas são geralmente espaçadas de três a cinco metros (AUGUSTO, 2007) no cavernamento longitudinal e de 0,6 a um metro para transversal (ABS, 2019).

Augusto (2007) defende ainda espaçamentos de seiscentos milímetros a novecentos milímetros para reforçadores leves, e é razoável adotar espaçamentos entre perfis pesados da ordem de dois a seis metros para as primeiras iterações (CHAVES; TANCREDI; ANDRADE, 2013).

⁷ Mais conhecido pelo termo em inglês *deadweight*.

2.5.3 Resistência da viga navio

A resistência estrutural requerida pelo navio na direção longitudinal é definida a partir dos valores de momento fletor e da força cortante que atuam sobre o casco, os quais podem ser calculados ao final do processo de equilíbrio da viga navio ou a partir de modelos empíricos proposto por normas de Sociedades Classificadoras.

Usualmente, o momento fletor total (M_t) que atua em uma embarcação pode ser decomposto em duas parcelas, uma que diz respeito ao equilíbrio do navio em águas calmas (M_s) e outra que considera a modificação do campo de pressão ao longo do casco; resultado da incidência de uma onda crítica (M_w), tal como mostrado na Equação 7.

$$M_t = M_s + M_w \quad (7)$$

No caso específico da ABS (2019), não existem modelos para a estimativa de momento fletor em águas calmas, deixando claro que essa é uma tarefa do projetista, pois depende da distribuição de cargas adotada no projeto.

Já em RINA (2012) são apresentados modelos empíricos que foram implementados na ferramenta computacional desenvolvida. Ressalta-se que esse equacionamento deve ser usado apenas nas fases iniciais do projeto onde ainda não se dispõe de dados referentes a geometria do navio. Ou ainda, ser usado para verificar a razoabilidade dos resultados obtidos na análise de equilíbrio da viga navio.

O conjunto de equações utilizado no modelamento empírico da força cortante máxima e do momento fletor máximo atuante na viga navio é sintetizado na Tabela 3, onde os parâmetros e coeficientes são descritos na Tabela 4.

Tabela 3 – Equações empíricas das Sociedades Classificadoras

Equação	Unidade	Fonte
$F_{wp} = 30 \cdot 0,7 \cdot C_1 \cdot L \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-2}$	kN	(ABS, 2019)
$F_{wn} = -30 \cdot 0,7 \cdot C_1 \cdot L \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-2}$	kN	(ABS, 2019)
$M_{SWM,H} = 175 \cdot n_1 \cdot C_1 \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-3} - M_{WM,H}$	$kN \cdot m$	(RINA, 2012)
$M_{SWM,S} = 175 \cdot n_1 \cdot C_1 \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-3} + M_{WM,S}$	$kN \cdot m$	(RINA, 2012)
$M_{WM,H} = k_2 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot C_B \cdot 10^{-3}$	$kN \cdot m$	(ABS, 2019)
$M_{WM,S} = -k_1 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-3}$	$kN \cdot m$	(ABS, 2019)

Fonte: Autora (2019).

Onde F_{wp} se trata da força cortante positiva em ondas, F_{wn} a força cortante negativa em ondas, $M_{SWM,S}$ momento fletor em águas calmas para tosamento, $M_{SWM,H}$ o momento fletor em águas calmas para alquebramento, $M_{WM,H}$ representa o momento fletor em ondas de alquebramento, $M_{WM,S}$ representa o momento fletor em ondas de tosamento, L representa o comprimento da embarcação, B seu valor de boca e C_B o coeficiente de bloco, C_1 , k_1 e k_2 são dados conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes adotados no cálculo de momento fletor e força cortante

Parâmetro	Descrição	Valor	Restrição
C_1/C	Coeficiente de onda	$10,75 - \frac{300 - L^{1,5}}{100}$	$90 \leq L \leq 300m$
		10,75	$300 < L < 350m$
		$10,75 - \frac{L - 350^{1,5}}{150}$	$350 \leq L \leq 500m$
k_1			110
k_2			190
n_1	Coeficiente de navegação	1	Navegação irrestrita

Fonte: Adaptado de ABS (2019) e RINA (2012).

O modelo de viga navio utilizado neste trabalho baseia-se na teoria de Bernoulli-Euler para vigas. Tal modelo considera que o navio pode ser representado por uma viga de seção transversal uniforme, cujas seções planas permanecem planas e ortogonais a linha neutra. Além disso os efeitos de Poisson são desconsiderados e o material possui comportamento elástico (BAI, 2003).

Nesse modelo a tensão máxima em uma seção qualquer pode ser calculada utilizando-se a Equação 8.

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{SM(x)} \quad (8)$$

Onde $\sigma(x)$ representa a tensão normal admissível na posição x , $M(x)$ representa o momento fletor na mesma posição, $SM(x)$ representa o módulo de seção tomado em x .

Considerando-se a tensão admissível para o material do casco e invertendo a Equação 8 é possível determinar o mínimo módulo de seção requerido para o projeto estrutural da seção mestra de um navio (Equação 9).

$$SM(x) = \frac{M(x)}{\sigma(x)} \quad (9)$$

Onde $\sigma(x)$ representa a tensão normal admissível na posição x , $M(x)$ representa o momento fletor na mesma posição, $SM(x)$ representa o módulo de seção tomado em x .

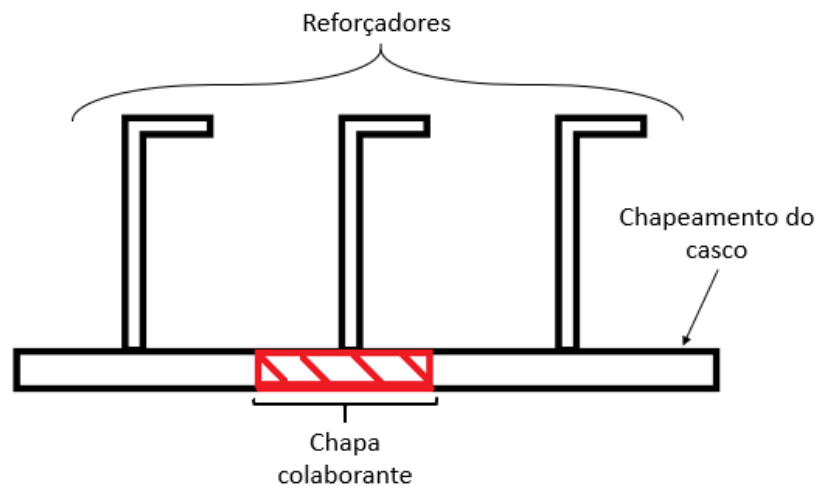
É importante observar que a tensão admissível considerada pela ABS (2019) não representa a tensão de escoamento do material, pois além das tensões globais, devem ser consideradas as tensões locais.

2.5.4 Dimensionamento de chapeamento e reforçadores

Conforme visto no Capítulo 1, a estrutura de um navio é composta por um conjunto de grelhas chapeadas, denominados painéis estruturais. Esse arranjo é composto de uma chapa fina soldada à reforçadores dispostos longitudinalmente e transversalmente ao casco.

Segundo Augusto (2004), os reforçadores, ao serem soldados ao casco, tem sua rigidez aumentada em função da rigidez do chapeamento. A porção do casco que efetivamente contribui para a rigidez do reforçador é chamada de chapa colaborante (Figura 19).

Figura 19 – Reforçadores e chapa colaborante em destaque.



Fonte: Autora (2019).

Schade (1951) estabelece um procedimento para a determinação da largura da chapa colaborante de um reforçador a partir de gráficos adimensionais que descrevem as características do painel estrutural.

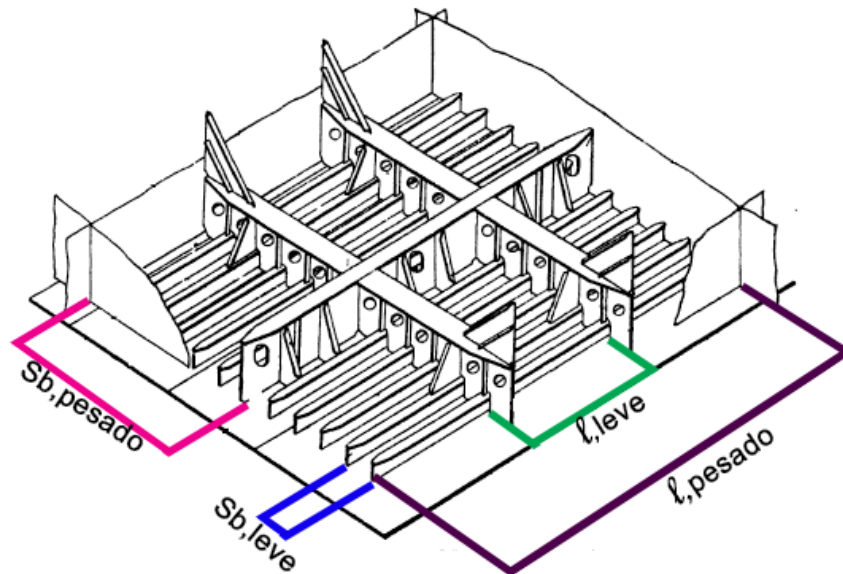
Na metodologia proposta em ABS (2019), os reforçadores são selecionados com base no módulo de seção requerido, o qual deve ser calculado utilizando-se a Equação 10. É importante destacar que o módulo de seção requerido para um reforçador já considera a inclusão da chapa colaborante. Ou seja, o módulo de seção do conjunto reforçador e chapa colaborante deve ser maior do que o valor estabelecido pela Equação 10.

$$SM = 7,8chs_b\ell^2 \quad (10)$$

Onde c representa um parâmetro que depende das condições de contorno e da localização do reforçador no navio, h representa a altura da coluna d'água a qual o reforçador está submetido, s_b representa o espaçamento entre dois reforçadores de mesmo tipo e ℓ representa o vão livre do reforçador.

A Figura 20 mostradas referências de s_b e ℓ para o fundo de uma embarcação, entre duas anteparas transversais e duas anteparas longitudinais, composto de reforçadores leves, pesados e cavernas.

Figura 20 – Fundo de navio com indicação das variáveis de projeto.



Fonte: Adaptado de Barabanov (1966).

A seguir, a espessura do chapeamento deve ser calculada em função do calado, do pontal, do comprimento e dos espaçamentos entre reforçadores leves.

Assim como no caso dos reforçadores, a ABS (2019) propõe uma única equação (Equação 11) para o dimensionamento das chapas de um navio. No entanto, os parâmetros dessa equação mudam conforme a localização da chapa a ser dimensionada.

$$t = \frac{s_b}{C_1} \sqrt{\frac{L - 15,2}{T/D}} + C_2 \quad (11)$$

Onde: t é a espessura da chapa, s_b se trata do espaçamento entre os reforçadores leves e C_1 e C_2 representam parâmetros que são dependentes da localização da chapa, L se trata do comprimento do navio, T representa o calado de projeto e D representa o pontal da embarcação.

Por fim é importante destacar que tanto os reforçadores selecionados, quanto as espessuras de chapas calculadas, devem ser ajustadas para a realidade construtiva, sempre selecionando elementos comerciais cujas dimensões sejam superiores àquelas estabelecidas pela norma.

A rigor é possível selecionar elementos cujas dimensões sejam menores do que àquelas estabelecidas nessa fase do projeto. Para isso o projetista deve modificar os espaçamentos utilizados como variáveis de projeto para induzir a redução das

dimensões desejadas.

2.5.5 Propriedades da seção projetada

As propriedades de seção são essenciais para a determinação do módulo de resistência à flexão, tratado ao longo do texto apenas como módulo de seção, conforme a própria nomenclatura da norma ABS.

Uma vez determinados os módulos de seção dos reforçadores e as espessuras das chapas, o projetista deve elaborar a topologia da seção, obedecendo às variáveis de projeto e as dimensões do navio.

A seguir devem ser calculadas as propriedades da seção projetada considerando-se cada um dos elementos dimensionados e que constituem a seção mestra da embarcação. Na Figura 21 é mostrado um exemplo de como o cálculo de módulo de seção pode ser realizado com auxílio de uma planilha eletrônica.

Eventualmente a seção projetada poderia ser modelada em um sistema CAD, e as propriedades da seção poderiam ser obtidas numericamente na própria ferramenta de modelagem. Na prática essa abordagem se mostra mais lenta do que a utilização de uma planilha eletrônica.

Figura 21 – Parte de uma planilha de cálculo de módulo de seção.

Cálculos para meia seção											
	Elemento	Quantidade (meia seção)	Base (m)	Altura (m)	Área (m ²)	Y _q (m)	A*Y _q (m ³)	Y _q -Y _{ln} (m)	(Y _q -Y _{ln}) ² (m ²)	I _{total} (m ⁴)	
Chapeamento	Convés	1	11	0,0159	0,17	23,30	4,08	14,58	212,71	37,20	
	Convés (chapa vertical)	1	0,0159	1,01	0,02	22,80	0,37	14,08	198,23	3,18	
	Trincaiz (parte vertical)	1	1,8	0,0254	0,05	23,30	1,07	14,58	212,71	9,72	
	Trincaiz (parte horizontal)	1	0,0254	1,8	0,05	22,40	1,02	13,68	187,26	8,57	
	Tanque de asa	1	11,58	0,0222	0,26	21,35	5,49	12,64	159,73	42,90	
	Fundo	1	21,3	0,0254	0,54	0,01	0,01	-8,70	75,74	40,98	
	Bojo	1	-	-	0,05	0,49	0,03	-8,23	67,67	3,49	
	Borboleta do bojo	1	3,3	0,0318	0,09	3,21	0,29	-5,51	30,32	2,79	
	Duplo fundo	1	18,9	0,0318	0,60	2,00	1,20	-6,72	45,10	27,11	
	Duplo costado	1	0,0222	15,6	0,35	11,00	3,81	2,28	5,22	8,83	
	Antepara longitudinal	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Costado	1	0,0222	22	0,49	12,30	6,01	3,58	12,85	25,97	
	Reforços	Reforçador leve de fundo	20			0,14	0,27	0,04	-8,44	71,30	9,78
		Reforçador leve de bojo 1	1			0,01	0,25	0,00	-8,47	71,73	0,49
Reforçador leve de bojo 2		1			0,01	5,00	0,03	-3,72	13,81	0,09	
Reforçador pesado de convés		2			0,05	22,94	1,23	14,22	202,33	10,83	
Somatório					3,87	-	33,69	-	-	301,50	
	Linha neutra				8,72	m					
	Inércia Total				603,00	m ⁴					
	SM projetado				41,35	m ³					
	SM requerido				39,31	m ³					
	Margem de segurança								5%		

Fonte: Autora (2019).

A Equação 12 é utilizada para o cálculo do módulo da seção projetada, o qual deve ser maior do que o valor requerido pela norma.

$$SM = \frac{I_{LN_{secao}}}{Z_{ponto} - Z_{LN_{secao}}} \quad (12)$$

Onde SM é o módulo de seção projetado, $I_{LN_{secao}}$ representa a inércia total da seção em relação à linha neutra, Z_{ponto} representa a cota vertical do ponto analisado, $Z_{LN_{secao}}$ representa a cota vertical da linha neutra.

Existem dois pontos onde o SM deve ser analisado, sendo o primeiro o pontal da embarcação, chamado de SM superior, e o segundo na linha da quilha, chamado de SM inferior.

Para navios deslocantes convencionais, o SM superior costuma ser menor do que o SM inferior, pois em geral, a linha neutra da seção encontra-se mais perto da quilha do que do convés.

Caso o SM superior ou o SM inferior sejam menores do que o módulo de seção requerido pela norma, o projetista deve modificar as variáveis de projeto refazendo o dimensionamento até que tal requisito seja atendido.

No entanto, deve-se ter atenção nos casos em que o SM projetado possui valor consideravelmente maior do que o módulo de seção requerido pela norma. Chaves, Tancredi e Andrade (2013) defendem que o valor de módulo de seção é proporcional à massa da estrutura de um navio. Assim, em teoria, quanto maior o módulo da seção, maior o custo e o tempo de construção de um navio.

O cálculo do módulo de seção depende diretamente da posição vertical do eixo neutro e do momento de inércia da seção, conforme pode ser visto na Equação 12.

A área total é calculada considerando-se a soma das áreas de cada um dos elementos que compõe a estrutura (chapas e reforçadores), não considerando as espessuras dos cordões de solda utilizados na fabricação dos painéis estruturais.

A posição da linha neutra é calculada como sendo a média ponderada das áreas considerando a posição vertical do centroide de cada elemento da seção tomada em relação à quilha da embarcação (Z_q), conforme a Equação 13.

$$Z_{LN_{secao}} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot Z_{q_i})}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (13)$$

Onde $Z_{LN_{secao}}$ representa a posição vertical da linha neutra, A_i representa a área calculada do elemento i , Z_{q_i} representa o centroide do elemento i em relação à quilha.

O momento de inércia da seção pode ser calculado como a somatória dos momentos de inércia dos n elementos que compõe a estrutura do navio, como visto na Equação 13.

O cálculo do momento de inércia de cada um dos elementos deve ser tomado em relação à linha neutra da seção do navio. Utilizando o Teorema de Steiner, também chamado de Teorema dos Eixos Paralelos, é possível dividir o momento de inércia de cada elemento do casco em uma parcela referente ao eixo que passa pelo centro de gravidade do próprio elemento, e outra, devido a transferência do momento de inércia do eixo próprio para o eixo neutro da seção (HIBBELER, 2005).

$$I_{LN_{secao}} = \sum_{i=1}^n I_{p_i} + A_i (Z_{q_i} - Z_{LN})^2 \quad (14)$$

Onde $I_{LN_{secao}}$ representa a inércia da seção tomada em relação à linha neutra,

I_{p_i} representa a inércia própria do elemento i , $Z_{LN_{secao}}$ é a posição vertical da linha neutra, A_i é a área calculada do elemento i , Z_{q_i} representa o centroide do elemento i em relação à quilha.

Por fim, o momento de inércia próprio de um elemento da seção em relação ao eixo transversal y do navio pode ser calculado utilizando-se a Equação 15 (HIBBELER, 2005).

$$I_y = \int_A z^2 dA \quad (15)$$

Uma vez computadas as propriedades da seção e calculado o módulo de resistência á flexão do navio (Equação 12), devem ser calculadas as tensões globais da estrutura de forma a verificar se a estrutura tanto se adéqua a norma, quanto suporta o carregamento imposto.

Em tese, para projetos convencionais, o atendimento aos requisitos da norma implica na ocorrência de tensões abaixo do limite admissível para o material. No entanto, o cálculo das tensões auxilia o projetista a entender o comportamento mecânico da estrutura projetada, bem como a quantificar eventuais fatores de segurança aplicados ao projeto.

2.6 TENSÕES GLOBAIS NA ESTRUTURA

Os esforços atuantes na viga navio resultam em dois campos de tensões primárias distribuídos ao longo da estrutura da embarcação. O primeiro decorre da ação do momento fletor sobre a viga navio e resulta em uma distribuição de tensão na direção longitudinal, possuindo natureza normal. O segundo, por sua vez, decorre da força cortante e resulta em uma distribuição de tensão no plano transversal da viga navio, possuindo natureza cisalhante (BAI, 2003).

Nesta seção são descritos os fundamentos e procedimentos utilizados na determinação dos campos de tesões primárias existentes na estrutura de uma embarcação deslocante.

2.6.1 Tensão normal

Segundo Barabanov (1966), a partir de experimentos em escala real em navios, foi confirmado que tensões de tração e compressão na viga navio, gerados a partir do momento fletor, podem ser determinadas a partir da teoria de flexão elástica. De acordo com essa teoria, a tensão normal em qualquer ponto de uma seção transversal é dada pela Equação 16.

$$\sigma_{secao}(x) = \frac{M(x) \cdot (Z_{ponto} - Z_{LN})}{I_{LN_{secao}}} \quad (16)$$

Onde $\sigma(x)$ representa a tensão normal na posição x , $M(x)$ representa o momento fletor na mesma posição, $I_{LN_{secao}}$ representa a inércia total da seção em relação à linha neutra, Z_{ponto} representa a cota vertical do ponto analisado, $Z_{LN_{secao}}$ representa a cota vertical da linha neutra.

Como a tensão normal é função do momento fletor atuante na viga navio, esta varia ao longo do comprimento do navio e, geralmente, possui valores máximos próximos a seção de meia-nau (HUGHES, 1983).

É importante observar que a distribuição da tensão normal é fortemente influenciada pela incidência de ondas ao longo do casco. Em geral ⁸, uma onda de alquebramento causa tração no convés e compressão na quilha, enquanto que uma onda de tosamento, comprime o convés e traciona a quilha. Por fim, conforme pode ser visto na Equação 16, destaca-se que o sinal da tensão normal depende ainda da posição relativa do ponto analisado em relação ao eixo neutro da seção Barabanov (1966).

2.6.2 Tensão cisalhante

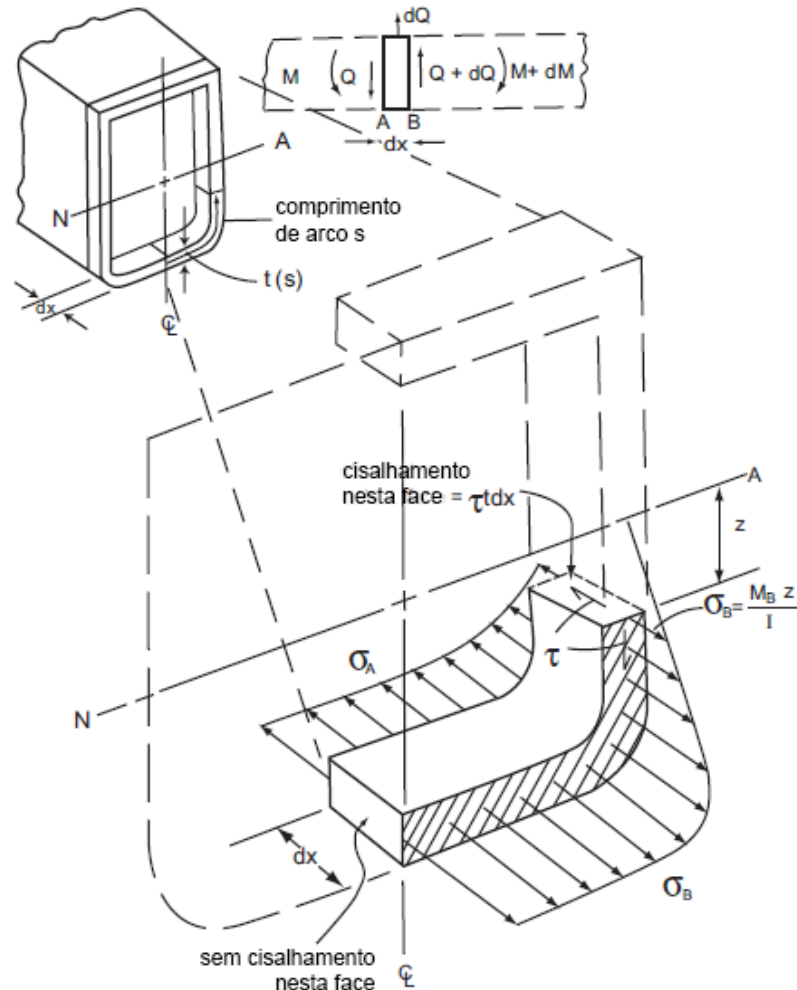
Como em qualquer viga carregada por forças verticais, as seções de um navio estão sujeitas às tensões cisalhantes. A determinação da distribuição de tais tensões é muito importante para assegurar o correto dimensionamento dos elementos que constituem a estrutura de uma embarcação.

Segundo Hughes (1983), ao se considerar um elemento infinitesimal da viga navio de comprimento dx , a tensão de cisalhamento surge de forma a equilibrar a diferença entre a tensão normal tomada nas duas faces do elemento, conforme pode ser visto na Figura 22.

Ainda segundo Hughes (1983), para facilitar o cálculo, a análise da distribuição do cisalhamento costuma ser calculada apenas em um dos bordos da seção de um navio. Pois, devido à simetria entre bordos, a tensão cisalhante é sempre nula no plano de simetria.

⁸ Podem existir situações em que momento fletor em águas calmas é maior do que a parcela decorrente da ação de ondas. Nesses casos, a parcela de ondas não é capaz de inverter o sinal do momento fletor ocorrido em mar calmo.

Figura 22 – Diagrama de corpo livre do cisalhamento transversal.



Fonte: Adaptado de Hughes e Paik (2010).

A formulação utilizada no cálculo do cisalhamento é mostrada na Equação 17, a qual depende da força cortante $Q(x)$ e do momento de inércia I_{LN} em relação à linha neutra na seção analisada, bem como do momento estático $m_{s_{secao}}$ e da espessura no ponto analisado.

$$\tau_{xy}(x) = \frac{Q(x) \cdot m_{s_{secao}}}{I_{LN} \cdot t_{eq}} \quad (17)$$

Já momento estático da seção, $m_{s_{secao}}$ é calculado de forma acumulativa, do ponto de origem até um ponto s qualquer, utilizando-se a Equação 18. No caso da seção de um navio, o ponto de origem pode ser o início de uma chapa ou então um ponto localizado no plano de simetria do casco (HUGHES, 1983).

$$m_{s_{secao}}(s) = \int_0^s z \cdot t ds \quad (18)$$

A demonstração do equacionamento para o cálculo do momento estático e do cisalhamento foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser visto em qualquer texto

clássico sobre resistência dos materiais, tais Timoshenko (1976) e Hibbeler (2010).

2.7 MÉTODO DA BISSECÇÃO

Uma vez que, para navios reais, o modelo de viga navio é tratado numericamente, o processo de equilíbrio iterativo pode ser resolvido usando um algoritmo de otimização que busca os valores de calado médio e ângulo de trim que minimizam o erro associado as duas condições de equilíbrio descritas na seção 2.4.4.

Nesse contexto, Soudzler (2018) propõe o uso do método da bissecção para a determinação do equilíbrio da viga navio. Os resultados obtidos pelo autor mostraram que tal técnica foi eficaz, na medida que foi capaz de resolver os diversos exemplos por ele apresentado, bem como foi eficiente, devido ao baixo custo computacional exigido.

Essa técnica permite obter a raiz de uma função contínua qualquer $f(x)$ tal que, ao ser avaliada em dois pontos, p_0 e p_1 quaisquer, os seus resultados tenham sinais opostos, ou seja, $f(p_0) \cdot f(p_1) < 0$. A partir dessa condição, o Teorema de Bolzano garante a existência de uma raiz no intervalo (p_0, p_1) .

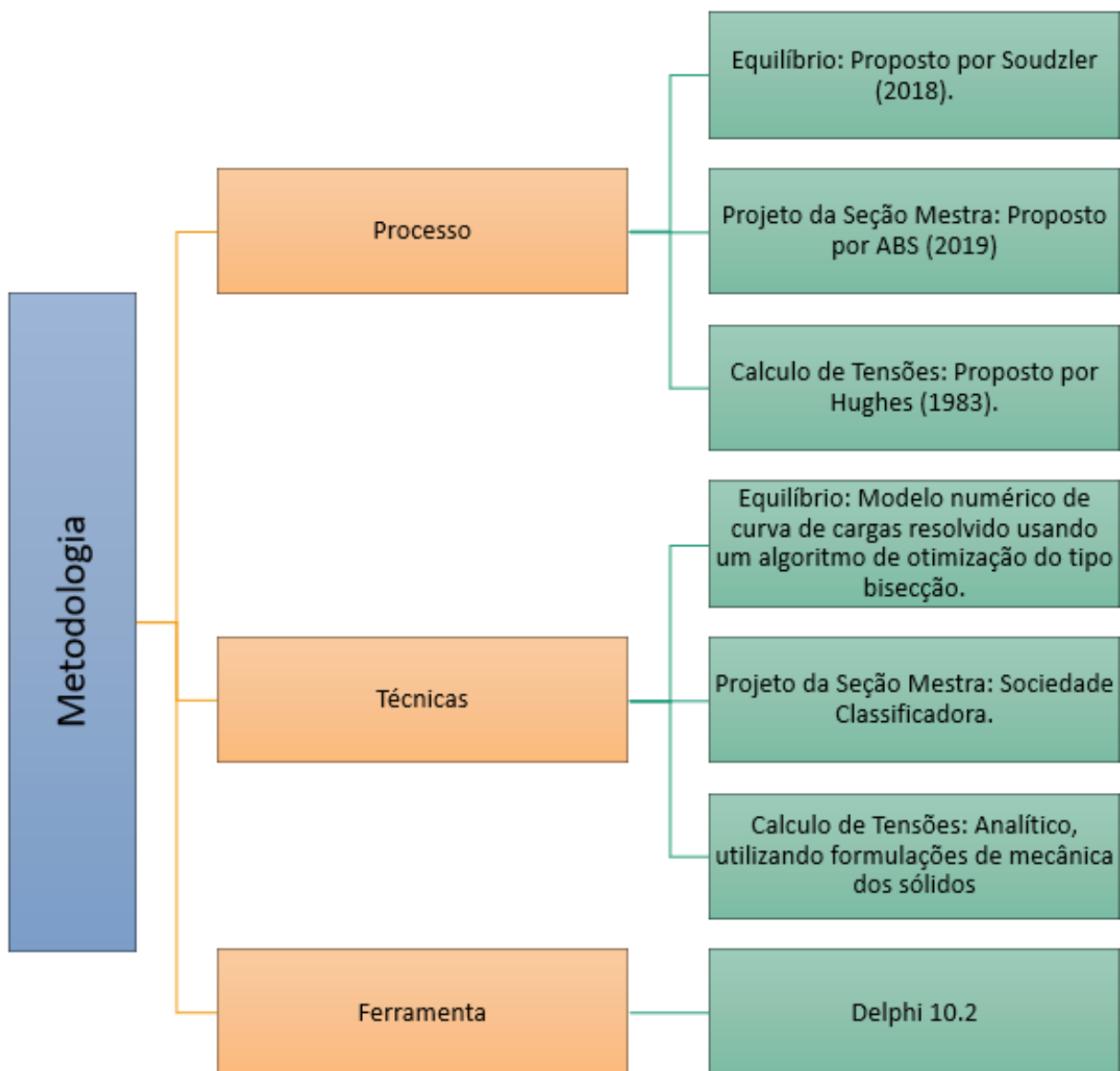
A bissecção consiste em dividir o intervalo avaliado em seu ponto médio $p_m = (p_0 + p_1)/2$ e verificar a condição $f(p_0) \cdot f(p_m) < 0$. Se afirmativo existe uma raiz no intervalo (p_0, p_m) , caso o contrário, a mesma existe no intervalo (p_m, p_1) . Esse é um processo iterativo, repetido para subintervalos cada vez menores, onde o critério de parada é tal que seja encontrado p_m que mais se aproxima da raiz da função $f(x)$ dentro de um intervalo de tolerância.

Neste trabalho, para os pontos p_0 e p_1 para o caso da força cortante, serão utilizados o valor zero, correspondente à linha da quilha e o pontal do navio de projeto. Já para o momento fletor, os mesmos assumem valores entre -10 e 10 graus, conforme discussão apresentada no Apêndice D.

3 MÉTODO

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, destacando-se o processo de construção da ferramenta computacional, bem como as técnicas e ferramentas utilizadas no desenvolvimento e na verificação dos resultados (Figura 23).

Figura 23 – Metodologia adotada.



Fonte: Autora (2019).

A ferramenta desenvolvida pode ser dividida em 3 módulos principais: equilíbrio

da viga navio, projeto da seção mestra e cálculo das tensões primárias.

Para o módulo do equilíbrio foi utilizado o procedimento numérico proposto por Soudzler (2018) e cujo modelo matemático foi resolvido utilizando o algoritmo de otimização da bissecção, cujo funcionamento foi descrito na seção 2.7 deste trabalho.

Já para o dimensionamento da seção mestra, utilizou-se a técnica do projeto baseado na norma da Sociedade Classificadora, em especial o procedimento descrito por ABS (2019).

Por fim, o módulo para cálculo das tensões primárias implementou o procedimento analítico proposto por Hughes (1983) e que utiliza os conceitos clássicos da resistência dos materiais, os quais foram descritos no capítulo anterior.

O processo de verificação da ferramenta teve como base a análise de diferentes casos, nos quais são comparados os resultados analíticos àqueles obtidos pelo programa..

Em todo o desenvolvimento realizado utilizou-se a linguagem Object Pascal implementada por meio da ferramenta Delphi de programação. O uso de Object Pascal foi adotado principalmente por sua semelhança com outras linguagens utilizadas por ferramentas matemáticas, além de ser didática, incentivando a programação modular e estruturada.

A licença utilizada no projeto foi a versão gratuita do Delphi 10.2, (Community Edition), disponibilizada pela Embarcadero, empresa proprietária da ferramenta, por um ano ao usuário cadastrado.

4 DESENVOLVIMENTO – CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA

Neste capítulo será descrito o processo de construção da ferramenta, suas funcionalidades e as etapas a serem seguidas pelo usuário a fim de concluir o projeto estrutural da embarcação utilizando a abordagem baseada na norma ABS (2019).

O programa é composto de abas onde o usuário deve inserir os dados necessários para efetuar o projeto estrutural. Todas as dimensões devem estar no Sistema Internacional de Unidades para que os cálculos sejam realizados de forma coerente.

Para iniciar o projeto estrutural, é necessário inserir a geometria da embarcação na ferramenta. Esse processo pode ser feito por meio da importação da tabela de cotas ou da curva de áreas seccionais do casco. Sem estes dados, o usuário não poderá fazer uso da ferramenta desenvolvida.

Aqui destaca-se a primeira evolução em relação ao trabalho de Soudzler (2018), pois o procedimento desenvolvido pelo autor permitia apenas a definição do calado da embarcação, não considerando a tridimensionalidade do casco.

É importante destacar que existem limitações que dizem respeito à aplicação da norma ABS (2019), sendo lógico que a ferramenta desenvolvida tenha as mesmas limitações.

Na Tabela 5 são resumidas as limitações referentes a utilização da ferramenta desenvolvida. Como pode ser visto, o desenvolvimento realizado pressupõe a construção do navio em aço. Projetos que envolvem a fabricação do casco em alumínio e/ou compósitos não serão abordadas por este trabalho, pois referem-se a outra norma técnica.

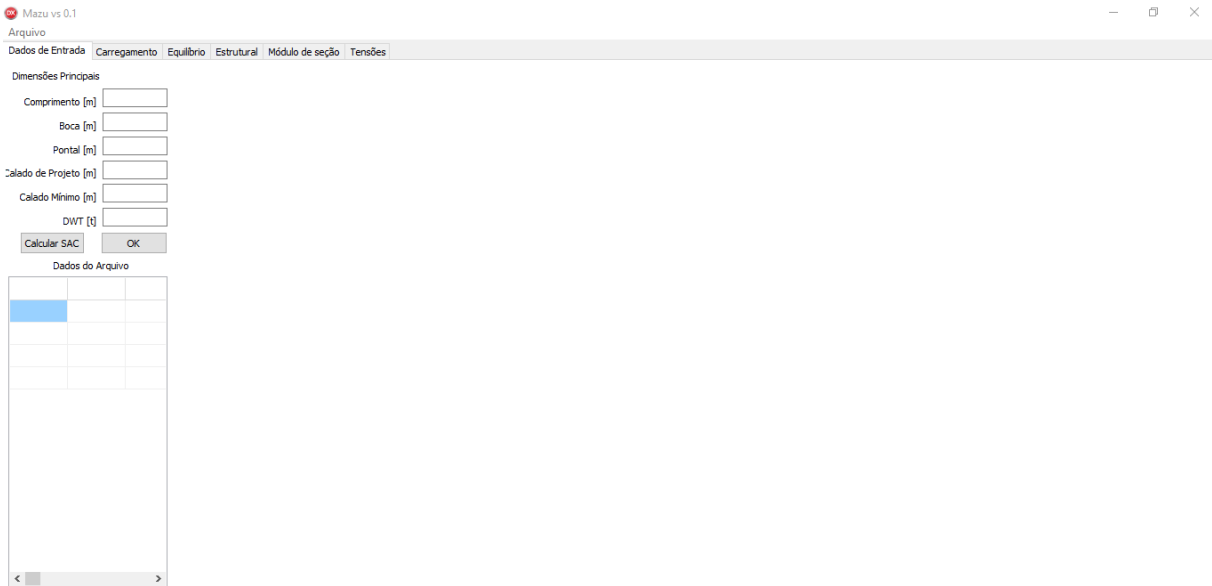
Tabela 5 – Limitações para resistência longitudinal da norma ABS.

Propriedade	Limitação
Comprimento	$L < 500$
Proporção comprimento-boca	$L/B > 5$
Proporção boca-pontal	$B/D < 2,5$
Coefficiente de bloco	$C_B > 0,5$

Fonte: Adaptado de ABS (2019).

A ferramenta desenvolvida destina-se à sistemas operacionais Windows, e possui interface semelhante àquela mostrada na Figura 24. Ao longo deste capítulo são descritas as principais funcionalidades e informações mostradas na interface.

Figura 24 – Interface da ferramenta.



Fonte: Autora (2019).

4.1 DADOS DE ENTRADA

A primeira aba a ser preenchida pelo usuário contém caixas onde devem ser inseridos o comprimento da embarcação, boca, pontal, calado de projeto, calado mínimo, *DWT* em toneladas e também o coeficiente de bloco do navio.

A seguir, a geometria da embarcação deve ser importada utilizando-se a opção 'Cotas' ou a opção 'Curva SAC', ambas localizadas no menu Arquivo. Os dados importados podem ser visualizados na tabela mostrada no canto inferior da Figura 25.

Figura 25 – Aba de inserção de dados.

Dimensões Principais

Comprimento [m]

Boca [m]

Pontal [m]

Calado de Projeto [m]

Calado Mínimo [m]

DWT [t]

Coeficiente de bloco

Equilibrar Navio

Momento ABS

Fonte: Autora (2019).

O usuário somente poderá prosseguir na análise se todos os campos da Figura 25 estiverem devidamente preenchidos.

No entanto, a ferramenta desenvolvida fornece ao usuário duas opções para a estimativa do momento fletor máximo atuante na seção mestra.

Na primeira, (caixa de seleção ‘Equilibrar Navio’), refere-se ao procedimento numérico de equilíbrio da viga-navio descrito na seção 2.4.4.

Já na segunda opção (caixa de seleção ‘Momento ABS’) o momento fletor máximo é estimado com base na formulação empírica proposta pela ABS (2019), a qual foi mostrada na Seção 2.5.3. Ao utilizar essa opção, o usuário não tem a necessidade de importar para o programa nenhuma informação de geometria do casco ao utilizar essa opção, sendo necessárias apenas as características principais do projeto.

Na Tabela 6 são resumidas as informações necessárias para cada uma das opções de projeto permitidos pela ferramenta desenvolvida.

Tabela 6 – Requisitos para cada um dos modos de projeto

	Modo	
	Momentos ABS	Equilibrar navio
Dimensões principais	Requer	Requer
Geometria	Não requer	Requer
Carregamento do navio	Não requer	Requer
Equilíbrio da viga	Não requer	Requer

Fonte: Autora (2019).

Destaca-se que a opção ‘Momentos ABS’ representa uma abordagem empírica simplificada em relação à análise numérica de equilíbrio da viga-navio, podendo ser utilizada para geometrias simples ou quando ainda não se dispõe de uma modelagem tridimensional do casco.

Por fim destaca-se que no caso do usuário utilizar a opção referente a importação da tabela de cotas, os valores de comprimento, boca e pontal são preenchidos automaticamente pela ferramenta, com base nos dados importados (Tabela 7).

Tabela 7 – Comparação do preenchimento dos campos entre as duas opções de inserir geometria

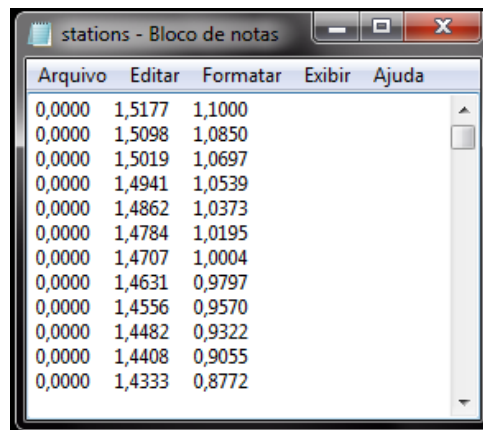
Parâmetro	Tabela de cotas	Curva SAC
Comprimento	Automático	Manual
Boca	Automático	Manual
Pontal	Automático	Manual
Calado de projeto	Manual	Manual
Calado mínimo	Manual	Manual
DWT	Manual	Manual
Coefficiente de bloco	Manual	Manual

Fonte: Autora (2019).

4.1.1 Tabela de cotas

Ao optar pela inserção de dados utilizando-se a tabela de cotas, o documento de texto a ser importado deve ser constituído de três colunas espaçadas, sendo a primeira referente as dimensões de comprimento (coordenadas X), a segunda de largura (coordenadas Y) e a terceira de altura (coordenadas Z), conforme exemplo mostrado na Figura 26, o qual refere-se à uma tabela de cotas de um navio genérico.

Figura 26 – Modelo de tabela de cotas.



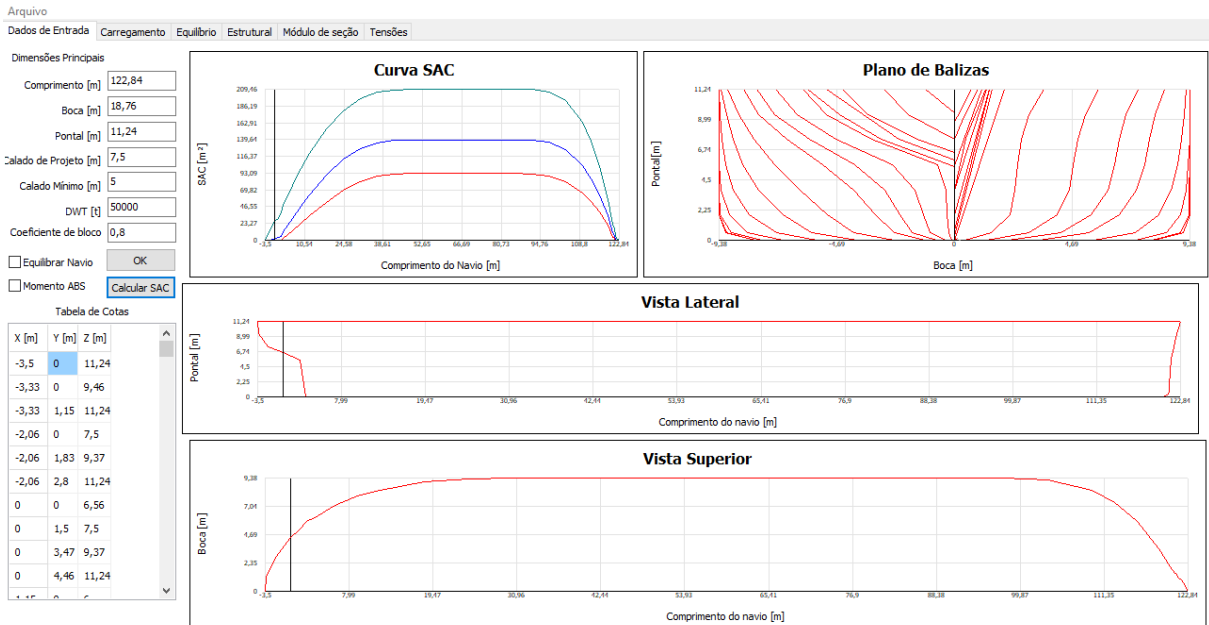
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
0,0000	1,5177	1,1000		
0,0000	1,5098	1,0850		
0,0000	1,5019	1,0697		
0,0000	1,4941	1,0539		
0,0000	1,4862	1,0373		
0,0000	1,4784	1,0195		
0,0000	1,4707	1,0004		
0,0000	1,4631	0,9797		
0,0000	1,4556	0,9570		
0,0000	1,4482	0,9322		
0,0000	1,4408	0,9055		
0,0000	1,4333	0,8772		

Fonte: Autora (2019).

Uma vez importada a geometria, o usuário deve clicar nos botões de "Calcular SAC" e "OK", para prosseguir. Ao fazer isso, a ferramenta irá calcular as curvas SAC para os valores de calado mínimo, calado de projeto e pontal da embarcação; por meio da integração das balizas importadas.

Um exemplo do resultado final obtido após a definição das características principais da embarcação, da importação da geometria do casco e do cálculo das curvas SAC pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Tela do programa após carregar a geometria e calcular as curvas SAC.

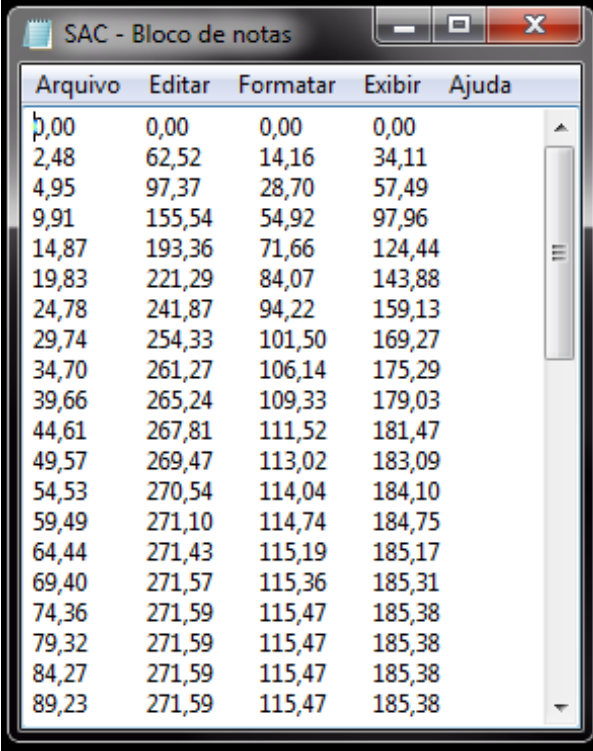


Fonte: Autora (2019).

4.1.2 Curva de área seccional

Neste tipo de inserção de dados, o arquivo texto deve possuir as informações dispostas em quatro colunas espaçadas. A primeira refere-se às posições das balizas. A segunda coluna deve conter o valor da SAC para um calado igual ao pontal da embarcação. A terceira deve conter o valor da SAC para um calado igual ao calado mínimo. Por fim, a quarta coluna deve conter o valor da SAC para o calado de projeto.

Figura 28 – Arquivo texto das curvas de áreas seccionais.

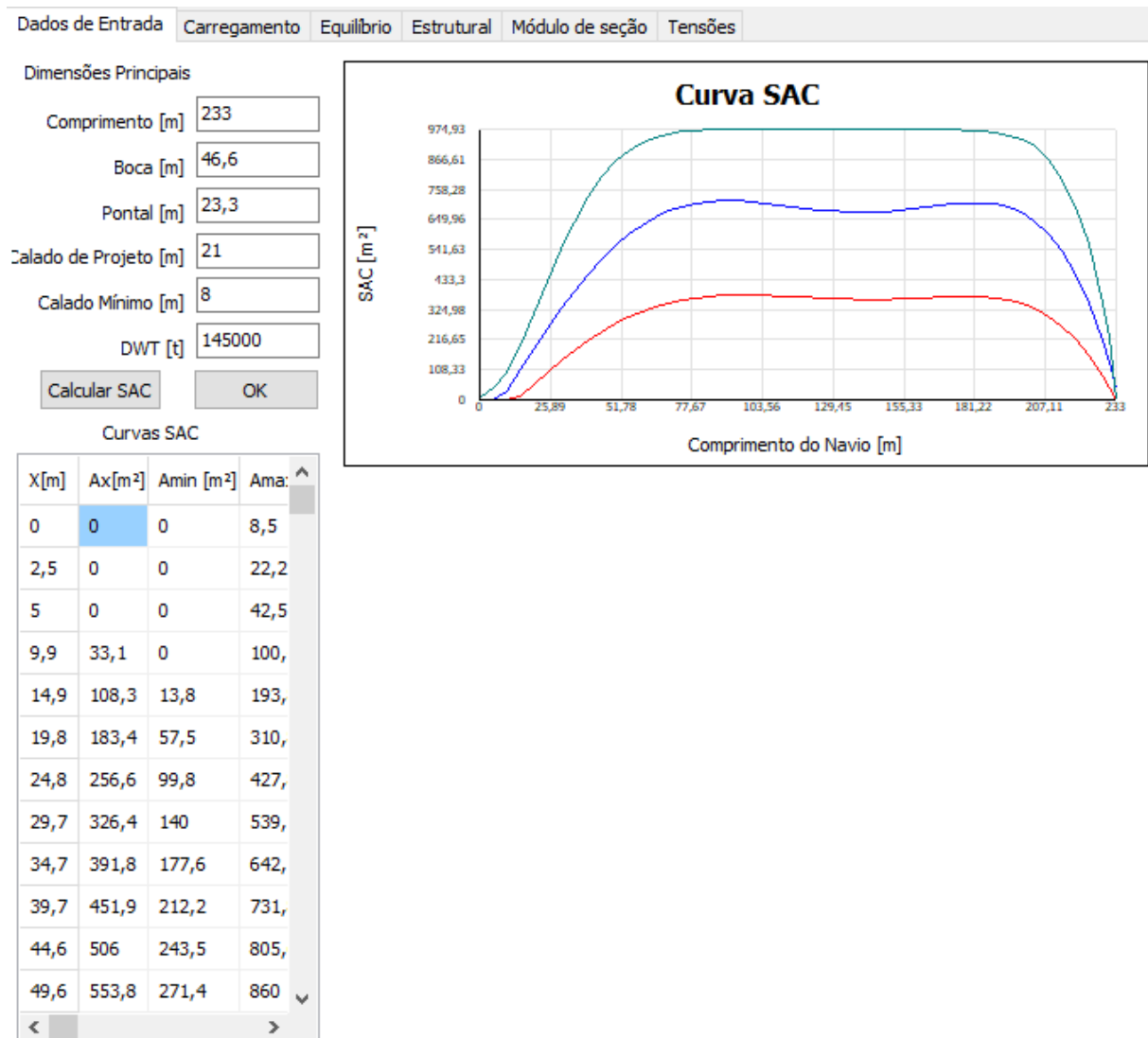


Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
0,00	0,00	0,00	0,00	
2,48	62,52	14,16	34,11	
4,95	97,37	28,70	57,49	
9,91	155,54	54,92	97,96	
14,87	193,36	71,66	124,44	
19,83	221,29	84,07	143,88	
24,78	241,87	94,22	159,13	
29,74	254,33	101,50	169,27	
34,70	261,27	106,14	175,29	
39,66	265,24	109,33	179,03	
44,61	267,81	111,52	181,47	
49,57	269,47	113,02	183,09	
54,53	270,54	114,04	184,10	
59,49	271,10	114,74	184,75	
64,44	271,43	115,19	185,17	
69,40	271,57	115,36	185,31	
74,36	271,59	115,47	185,38	
79,32	271,59	115,47	185,38	
84,27	271,59	115,47	185,38	
89,23	271,59	115,47	185,38	

Fonte: Autora (2019).

Uma vez importado os dados referentes as curvas SACs, o usuário deve clicar no botão "OK" para prosseguir. Um exemplo do resultado final obtido após a definição das características principais da embarcação e da importação das curvas SAC pode ser visto na Figura 29. Nesse caso somente o gráfico das curvas SAC é mostrado, uma vez que não existem dados suficientes para o programa exibir o plano de linhas da embarcação.

Figura 29 – Tela do programa após carregar as curvas SAC.



Fonte: Autora (2019).

Após a definição tanto da geometria quanto dos dados de entrada, o usuário poderá visualizar o conteúdo do arquivo texto por meio da interface, o que permite verificar inconsistências na geometria e efetuar os devidos ajustes, se necessário. No entanto, tais ajustes devem ser feitos diretamente no arquivo texto, que deve ser importado novamente para o programa.

4.2 CONDIÇÕES DE CARGA

Na aba de condições de carga é realizada a inclusão dos pesos a bordo da embarcação. Nesse caso tem-se a opção de adicionar as cargas por meio de um arquivo texto, ou então diretamente no próprio programa, utilizando os campos disponíveis na interface.

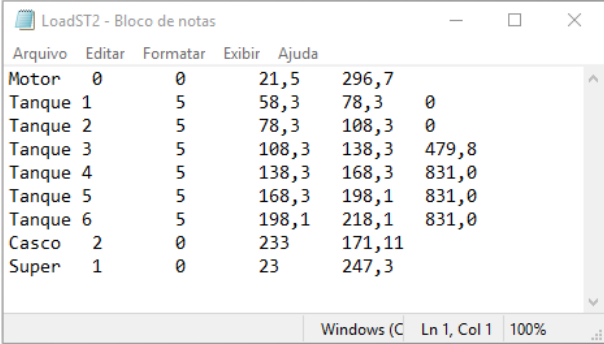
Uma vez que essas informações são inseridas, é preciso criar uma condição

de carga composta pelos pesos individuais a serem considerados na análise ⁹.

Ao clicar no botão '+ carregamento' o programa cria uma nova condição de carga reunindo as cargas selecionadas na tabela de pesos. Também é possível excluir uma condição de carga utilizando o botão '- carregamento".

Ao optar por importar as cargas a bordo da embarcação utilizando um arquivo texto, o mesmo deve possuir cinco colunas espaçadas. A primeira refere-se à descrição do peso, enquanto que a segunda coluna corresponde ao grupo à qual o peso pertence. Já a terceira e quarta colunas correspondem, respectivamente, a posição longitudinal do início e do fim da carga. Por fim, a quinta coluna refere-se ao peso linear ¹⁰ da carga (Figura 30).

Figura 30 – Arquivo texto de carregamento.



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
Motor	0	0	21,5	296,7
Tanque 1	5	58,3	78,3	0
Tanque 2	5	78,3	108,3	0
Tanque 3	5	108,3	138,3	479,8
Tanque 4	5	138,3	168,3	831,0
Tanque 5	5	168,3	198,1	831,0
Tanque 6	5	198,1	218,1	831,0
Casco	2	0	233	171,11
Super	1	0	23	247,3

Fonte: Autora (2019).

A definição do grupo a qual cada item de peso pertence deve respeitar a classificação mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Grupos de pesos e sua numeração.

Número	Grupo	Descrição
0	Maquinário	Motor, propulsor, geradores, redutor, caldeiras.
1	Superestruturas	Castelo de proa e popa, casarias.
2	Peso em aço	Peso do casco e seus apêndices
3	Outfitting	Acomodações, mantimentos, equipamentos e etc.
4	Consumíveis	Combustível, água, óleo lubrificante
5	Tanques de carga	Carga a ser transportada.

Fonte: Autora (2019).

Classificar o grupo de cada peso é importante uma vez que itens definidos como tanques de carga permitem ao programa determinar a porcentagem do compartimento ocupada. Assim, o projetista pode verificar se está alocando mais carga no porão do que a geometria deste permite (Figura 31).

⁹ Essa abordagem evita que o usuário tenha que apagar dados do programa caso queira verificar diferentes combinações de carregamentos.

¹⁰ Peso por metro da embarcação, medido na direção longitudinal.

Figura 31 – Aba de carregamento com os pesos individuais a serem selecionados.

Dados de Entrada Carregamento Equilíbrio Estrutural Módulo de seção Tensões

Nome Grupo Início [m] Fim [m] Peso [t] + -

Peso específico da carga [t/m³]

Para selecionar o peso, pressione a tecla ESPAÇO + Carregamento - Carregamento

	Compartimento	Grupo	Xi [m]	Xf [m]	Peso[t/m]	Peso máximo [t]	%
OK <input checked="" type="checkbox"/>	Motor	0	0	21,5	296,7	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	Tanque 1	5	58,3	78,3	0	16216,64	0,00
OK <input checked="" type="checkbox"/>	Tanque 2	5	78,3	108,3	0	24801,35	0,00
<input type="checkbox"/>	Tanque 3	5	108,3	138,3	479,8	24900,48	57,81
<input type="checkbox"/>	Tanque 4	5	138,3	168,3	820,0	24813,72	99,14
<input type="checkbox"/>	Tanque 5	5	168,3	198,1	820,0	24471,72	99,85
<input type="checkbox"/>	Tanque 6	5	198,1	218,1	820,0	14431,59	113,64
<input type="checkbox"/>	Casco	2	0	233	171,11	N/A	N/A
<input type="checkbox"/>	Super	1	0	23	247,3	N/A	N/A

Fonte: Autora (2019).

4.3 EQUILÍBRIO DA VIGA NAVIO

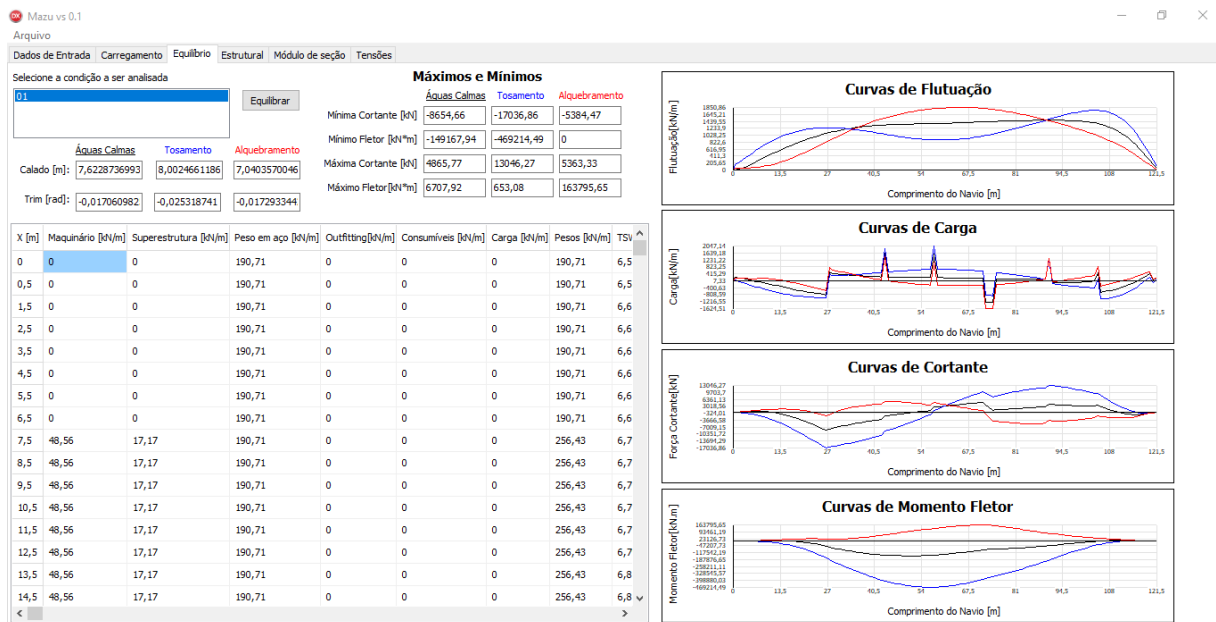
Uma vez definida a geometria do casco e a distribuição de cargas a bordo da embarcação, o usuário pode iniciar a análise do equilíbrio da viga navio para a condição de carregamento escolhida.

O algoritmo de equilíbrio para a determinação do calado médio e do ângulo de trim é o mesmo proposto por Soudzler (2018) e que foi descrito na seção 2.7 da fundamentação teórica.

Todos os dados utilizados na determinação do equilíbrio da viga navio são armazenados em vetores, analisados a cada metro da embarcação.

Para melhorar a precisão dos cálculos, as posições ao longo do comprimento do navio são contabilizadas no ponto central de cada trecho discretizado. A utilização de espaçamentos regulares com um metro de comprimento permite calcular a integral de um vetor a partir da simples soma de seus elementos.

Figura 32 – Aba de equilíbrio da viga-navio.



Fonte: Autora (2019).

Todos os valores utilizados na análise do equilíbrio da viga navio são mostrados na tabela localizada na parte inferior esquerda da Figura 32.

Os resultados principais são informados na forma de gráficos, onde as linhas na cor preta correspondem a condição de mar calmo, enquanto as linhas em azul correspondem a condição de tosamento e, por fim, as linhas em vermelha correspondem a condição de alquebramento.

4.3.1 Curva de flutuação

O cálculo da curva de flutuação, diferente dos modelos propostos por Soudzler (2018) e Hermann (2016), leva em consideração o uso da curva de área seccional da embarcação, o que permite a obtenção da geometria tridimensional do navio de projeto para o cálculo da flutuação.

Quando os dados de geometria são inseridos via tabela de cotas, o código calcula vetores linearmente espaçados com mil elementos, para cada baliza da embarcação (Equação 19). Esse processo é repetido considerando-se o calado mínimo, o calado de projeto e, por fim, o pontal da embarcação.

$$\text{incremento} = \frac{T^* - Z_0}{999} \quad (19)$$

Onde T^* é o calado onde se deseja calcular a SAC e Z_0 é a cota vertical do primeiro ponto do casco, em uma dada baliza.

Uma vez discretizadas as secções do navio, o cálculo da área submersa de cada baliza é efetuado utilizando-se a regra dos trapézios, para cada um dos três

calados analisados. A partir da interpolação das áreas submersas de cada baliza, ajusta-se uma curva que represente a SAC do navio para cada um dos três calados analisados.

Na ferramenta desenvolvida, essa interpolação da curva SAC utiliza uma equação polinomial de ordem dez. A escolha de um polinômio de grau dez, representa o modelo de menor ordem cujo o erro quadrático médio entre os valores originais e os valores interpolados se encontre abaixo de 0,005%, conforme procedimento detalhado no Apêndice C.

Ao final desse processo, seja utilizando dados obtidos pela tabela de cotas, ou importados diretamente na forma de curvas SAC, obtém-se três equações polinomiais de ordem dez que representam a SAC da embarcação para os três calados analisados.

Por fim, para cada posição x ao longo do comprimento do navio, discretizado de metro em metro, é determinado uma equação polinomial de grau dois que interpola o valor da área submersa da baliza localizada em x , como uma função do calado do navio medido na mesma posição x . A escolha de uma equação quadrática (grau dois), nesse caso, deve-se ao fato de que, em cada posição x , existem três valores de área submersa, referentes a cada um dos três calados analisados pela ferramenta.

O processo de construção da curva de flutuação, descrito nesta seção, é mostrado na Figura 33.

Ao final desse processo, cada baliza do navio possui uma equação quadrática que relaciona a área submersa com o calado medido na baliza. Assim, a flutuação do navio em uma posição qualquer pode ser obtida pela multiplicação da área submersa da baliza pela aceleração da gravidade e pela densidade do fluido ¹¹.

$$B(x) = SAC(x) \cdot \rho \cdot g \quad (20)$$

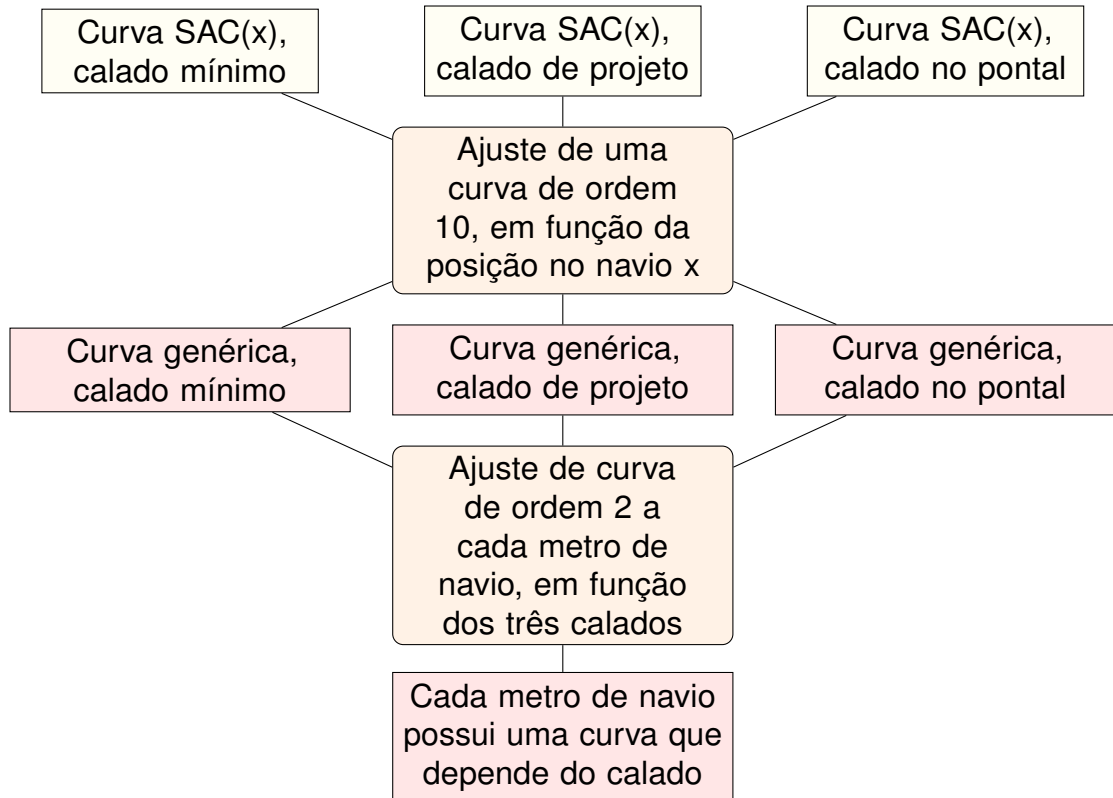
Onde $B(x)$ é a flutuação na posição x , $SAC(x)$ é a área seccional na posição x , ρ a densidade do fluido e g a aceleração da gravidade.

Durante o processo de equilíbrio, o calado ao longo da viga navio é calculado utilizando-se as Equações 1 e 2, as quais consideram a influência das ondas e do ângulo de trim da embarcação.

No entanto, valores de calados negativos são corrigidos para representarem flutuação nula, enquanto calados maiores do que o pontal do navio devem ser corrigidos para representarem a máxima área submersa possível em cada uma das balizas analisadas.

¹¹ A ferramenta desenvolvida utiliza água salgada com massa específica de 1025 kg/m^3 como fluido padrão e uma aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$. No entanto, é possível configurar esses valores no algoritmo.

Figura 33 – Fluxograma de obtenção da SAC em função do calado em determinada posição x .



Fonte: Autora (2019).

Pois valores de calado maiores do que o pontal do navio, em qualquer posição x da embarcação, representam que, naquela condição de carga, a seção localizada na mesma posição x da embarcação encontra-se completamente submersa.

Após a determinação da posição de equilíbrio, os valores de calado ao longo do comprimento podem ser verificados pelo usuário, assim como as flutuações considerando as diferentes condições de mar por meio da tabela (Figura 34), ou na forma gráfica, ambas disponíveis na interface (Figura 32).

Figura 34 – Resultados mostrados para o usuário em forma de tabela.

X [m]	TSW [m]	Flutuação SW [kN/m]
0,5	4,71	0
1,5	4,77	24,15
2,5	4,83	74,47
3,5	4,89	127,3
4,5	4,95	182,5
5,5	5,01	239,93
6,5	5,07	299,44
7,5	5,13	360,9

Fonte: Autora (2019).

4.3.2 Agrupamento de pesos

Conforme descrito na fundamentação teórica, os pesos da condição de carga analisada no equilíbrio de viga-navio são classificados por grupo. Os valores de peso são sempre expressos como peso linear, ou seja, peso por metro longitudinal da embarcação; sendo nulo nas localizações onde o peso não está atuando.

Os diferentes grupos de carregamentos são somados a cada posição de comprimento da embarcação, resultando em um único vetor de pesos o qual pode ser visualizado na interface na forma de tabela (Figura 35).

Figura 35 – Resultados dos pesos mostrados para o usuário em forma de tabela.

X [m]	Maquinário [kN/m]	Superestrutura [kN/m]	Peso em aço [kN/m]	Outfitting[kN/m]	Consumíveis [kN/m]	Carga [kN/m]	Pesos [kN/m]
0,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
1,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
2,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
3,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
4,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
5,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
6,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
7,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
8,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
9,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
10,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
11,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
12,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
13,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
14,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23
15,5	2910,63	2426,01	1678,59	0	0	0	7015,23

Fonte: Autora (2019).

Como o vetor de pesos é o mesmo para todas as condições de mar, esse é calculado uma única vez, sendo utilizado em todas as condições de mar analisadas.

4.3.3 Algoritmo de equilíbrio

O algoritmo implementado no programa utiliza o método da bissecção proposto por Soudzler (2018) para encontrar as raízes do problema de equilíbrio descrito na seção 2.7.

Os limites de funcionamento do algoritmo são definidos pela linha da quilha e pelo pontal da embarcação. Pois a embarcação fisicamente não pode possuir calado médio negativo, muito menos esse deve ultrapassar a altura do casco. Já os limites do algoritmo para a determinação do ângulo de trim são tais que o navio não incline mais do que dez graus tanto no sentido horário, quanto no anti-horário. Tais limites devem ser alvo de trabalhos futuros, uma vez que foram estimados com base em um estudo

inicial a respeito da imersão de popas de embarcações deslocantes, o qual pode ser visto em detalhes no Apêndice D.

A curva de carga da embarcação corresponde a diferença entre o vetor de pesos e o vetor de flutuação calculada para cada baliza, conforme a equação:

$$q(x) = p(x) - B(x) \quad (21)$$

Onde $q(x)$ se trata da carga na posição x , $p(x)$ o peso na posição x e $B(x)$ a flutuação na posição x

Os vetores de carga para cada condição de mar analisada podem ser visualizados na interface tanto na forma de tabela (Figura 36) quanto na forma gráfica (Figura 32).

Figura 36 – Tabela de resultados com vetor de cargas em destaque para as condições de mar calmo e tosamento.

X [m]	Carga SW [kN/m]	Cortante SW [kN]	Fletor SW [kN*m]	TTos [m]	Flutuação Tos [kN/m]	Carga Tos [kN/m]	Cortante Tos [kN]	Fletor Tos [kN*m]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	699,16	699,16	699,16	19,27	1624,67	-637,78	-637,78	-637,78
1,5	758,64	1457,81	2156,97	19,3	1504,1	-517,21	-1154,99	-1792,7
2,5	763,01	2220,81	4377,78	19,32	1465,71	-478,83	-1633,82	-3426,9
3,5	721,31	2942,12	7319,9	19,34	1495,62	-508,73	-2142,55	-5569,1
4,5	641,58	3583,7	10903,61	19,36	1581,46	-594,57	-2737,12	-8306,2
5,5	530,92	4114,62	15018,23	19,37	1712,29	-725,41	-3462,53	-11768,
6,5	395,57	4510,2	19528,43	19,38	1878,51	-891,63	-4354,16	-16122,
7,5	241,01	4751,2	24279,63	19,38	2071,7	-1084,81	-5438,97	-21561,
8,5	71,98	4823,18	29102,81	19,38	2284,53	-1297,64	-6736,61	-28298,
9,5	-107,4	4715,78	33818,58	19,38	2510,71	-1523,82	-8260,43	-36558,
10,5	-293,58	4422,19	38240,78	19,37	2744,83	-1757,95	-10018,38	-46577,
11,5	-483,57	3938,63	42179,4	19,36	2982,34	-1995,45	-12013,83	-58591,
12,5	-674,81	3263,81	45443,22	19,34	3219,4	-2232,51	-14246,34	-72837,
13,5	-865,2	2398,61	47841,83	19,32	3452,86	-2465,97	-16712,31	-89549,
14,5	521,97	2920,58	50762,41	19,3	3680,16	-1118,31	-17830,61	-107380

Fonte: Autora (2019).

A distribuição da força cortante pode ser calculada realizando-se a integração da curva de carga para cada uma das condições de mar analisadas.

Por fim, a distribuição do momento fletor ao longo da viga navio pode ser obtida integrando-se a curva de força cortante para cada uma das condições de mar analisadas.

O detalhamento do cálculo dos esforços globais atuantes na viga navio (força cortante e momento fletor) pode ser visto na seção 2.5.3 desta dissertação.

Os resultados das distribuições de forças cortantes e momentos fletores podem ser visualizados tanto na forma gráfica (Figura 32), quanto na forma de tabelas (Figura 37 e 38).

Figura 37 – Tabela de resultados com força cortante em destaque

X [m]	Carga SW [kN/m]	Cortante SW [kN]	Fletor SW [kN*m]	TTos [m]	Flutuação Tos [kN/m]	Carga Tos [kN/m]	Cortante Tos [kN]	Fletor Tr
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	699,16	699,16	699,16	19,27	1624,67	-637,78	-637,78	-637,78
1,5	758,64	1457,81	2156,97	19,3	1504,1	-517,21	-1154,99	-1792,7
2,5	763,01	2220,81	4377,78	19,32	1465,71	-478,83	-1633,82	-3426,5
3,5	721,31	2942,12	7319,9	19,34	1495,62	-508,73	-2142,55	-5569,1
4,5	641,58	3583,7	10903,61	19,36	1581,46	-594,57	-2737,12	-8306,2
5,5	530,92	4114,62	15018,23	19,37	1712,29	-725,41	-3462,53	-11768,
6,5	395,57	4510,2	19528,43	19,38	1878,51	-891,63	-4354,16	-16122,
7,5	241,01	4751,2	24279,63	19,38	2071,7	-1084,81	-5438,97	-21561,
8,5	71,98	4823,18	29102,81	19,38	2284,53	-1297,64	-6736,61	-28298,
9,5	-107,4	4715,78	33818,58	19,38	2510,71	-1523,82	-8260,43	-36558,
10,5	-293,58	4422,19	38240,78	19,37	2744,83	-1757,95	-10018,38	-46577,
11,5	-483,57	3938,63	42179,4	19,36	2982,34	-1995,45	-12013,83	-58591,
12,5	-674,81	3263,81	45443,22	19,34	3219,4	-2232,51	-14246,34	-72837,
13,5	-865,2	2398,61	47841,83	19,32	3452,86	-2465,97	-16712,31	-89549,
14,5	521,97	2920,58	50762,41	19,3	3680,16	-1118,31	-17830,61	-107380

Fonte: Autora (2019).

Figura 38 – Tabela de resultados com força momento fletor em destaque

X [m]	Fletor SW [kN*m]	TTos [m]	Flutuação Tos [kN/m]	Carga Tos [kN/m]	Cortante Tos [kN]	Fletor Tos [kN*m]	TAlq [m]	Flutuação Alq [kN]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	699,16	19,27	1624,67	-637,78	-637,78	-637,78	6,03	0
1,5	2156,97	19,3	1504,1	-517,21	-1154,99	-1792,77	6,07	0
2,5	4377,78	19,32	1465,71	-478,83	-1633,82	-3426,59	6,11	0
3,5	7319,9	19,34	1495,62	-508,73	-2142,55	-5569,14	6,15	0
4,5	10903,61	19,36	1581,46	-594,57	-2737,12	-8306,26	6,2	0
5,5	15018,23	19,37	1712,29	-725,41	-3462,53	-11768,79	6,25	0
6,5	19528,43	19,38	1878,51	-891,63	-4354,16	-16122,95	6,31	0
7,5	24279,63	19,38	2071,7	-1084,81	-5438,97	-21561,91	6,37	44,11
8,5	29102,81	19,38	2284,53	-1297,64	-6736,61	-28298,52	6,43	121,86
9,5	33818,58	19,38	2510,71	-1523,82	-8260,43	-36558,95	6,5	206,15
10,5	38240,78	19,37	2744,83	-1757,95	-10018,38	-46577,33	6,57	295,97
11,5	42179,4	19,36	2982,34	-1995,45	-12013,83	-58591,16	6,65	390,4
12,5	45443,22	19,34	3219,4	-2232,51	-14246,34	-72837,49	6,72	488,65
13,5	47841,83	19,32	3452,86	-2465,97	-16712,31	-89549,8	6,81	590,03
14,5	50762,41	19,3	3680,16	-1118,31	-17830,61	-107380,41	6,9	693,91

Fonte: Autora (2019).

4.4 PROJETO ESTRUTURAL

Nessa aba da ferramenta, o usuário define as variáveis de projeto referentes ao arranjo estrutural da embarcação. A partir do valor dessas variáveis, o equacionamento de ABS (2019) permite calcular a espessura do chapeamento e, também, o módulo de seção mínimos dos reforçadores a serem utilizados no projeto.

Um importante avanço em relação ao trabalho de Soudzler (2018) consiste no fato de que a ferramenta desenvolvida neste trabalho permite o projeto de embarcações de casco singelo e de duplo casco, como é o caso de petroleiros, em que o uso de um casco interno é obrigatório.

4.4.1 SM requerido pela norma

A norma ABS estipula dois equacionamentos para o SM requerido para a seção mestra da embarcação para que essa seja classificada.

A primeira equação é chamada simplesmente de módulo de seção e define que o módulo requerido deve ser calculado pela razão entre o máximo ¹² momento fletor atuante na viga-navio, e a tensão de flexão permissível, a qual é fixada em $17,5kN/cm^2$.

A segunda equação é chamada de módulo de seção mínimo e depende estritamente das dimensões principais da embarcação, como mostrado na Equação 22.

$$SM = C_1 \cdot 0,01 \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \quad (22)$$

Onde SM é o módulo de seção, C_1 representa um coeficiente de onda, dado na Tabela 4, L é o comprimento da embarcação, B sua boca e C_B o coeficiente de bloco.

Os parâmetros pertencentes a Equação 22 são apresentados na Tabela 7, sendo que o resultado é expresso em $cm^2 \cdot m$. Para facilitar a análise, esse resultado é convertido para m^3 antes de ser exibido para o usuário.

A ferramenta desenvolvida calcula ambos os valores, os quais são mostrados na interface, permitindo ao usuário comparar os resultados do módulo da seção projetada verificando se o arranjo estrutural proposto atende a esse requisito da ABS (2019).

4.4.2 Variáveis de projeto

Existem duas opções para a definição dos valores das variáveis de projeto, sendo que a primeira consiste na importação de um arquivo texto, enquanto que a segunda, consiste na utilização dos campos de edição presentes na própria interface.

¹² O termo máximo, nesse caso, refere-se ao máximo momento fletor entre as diferentes condições de mar analisadas.

O arquivo texto a ser importado deve conter três colunas espaçadas e cinco linhas, cuja configuração pode ser verificada na Tabela 9 e na Figura 39. Todos os valores devem estar em milímetros para que os cálculos sejam realizados corretamente.

Tabela 9 – Configuração do arquivo texto de espaçamentos.

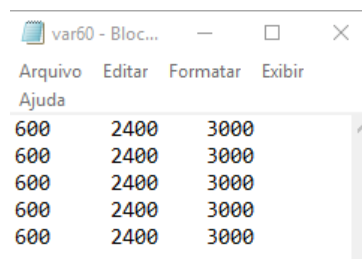
Localização no navio	Arquivo texto	Espaçamentos		
		Long. leves Coluna 1	Long. pesados Coluna 2	Transv. leves Coluna 3
Convés	Linha 1			
Costado interno	Linha 2			
Costado externo	Linha 3	Espaçamentos em milímetros		
Duplo fundo	Linha 4			
Fundo	Linha 5			

Autora (2019).

Variáveis como a distância entre anteparas, o número de colunas entre anteparas, a distância entre cascos e a altura do duplo fundo devem ser inseridos manualmente na interface do programa.

No entanto, existe a opção de calcular a distância entre cascos e a altura do duplo fundo utilizando as recomendações estabelecidas em SOLAS (1965). Ao selecionar a caixa chamada "Reg.19 SOLAS", o programa calcula esses valores utilizando as Equações 5 e 6.

Figura 39 – Exemplo de arquivo texto.



Arquivo	Editado	Formatado	Exibido
600	2400	3000	
600	2400	3000	
600	2400	3000	
600	2400	3000	
600	2400	3000	

Fonte: Autora (2019).

Quanto à utilização de colunas entre anteparas, essa é uma medida adotada de forma a reduzir o vão livre em que os reforçadores pesados se deformam. A redução do vão-livre resulta em uma redução significativa no módulo de seção requerido para o reforçador, uma vez que esse é proporcional ao quadrado do vão livre. Assim, a utilização de colunas reduz as dimensões dos reforçadores pesados, reduzindo o custo e facilitando a compra de perfis disponíveis no mercado.

4.4.3 Chapeamento

A seleção do chapeamento tem como primeiro passo a determinação das espessuras mínimas definidas em ABS (2019), a qual propõe relações empíricas que

dependem do pontal da embarcação e do calado moldado medido na região da chapa que será dimensionada.

Assim, a espessura do chapeamento é obtida por equações que variam conforme a localização da chapa, sendo que algumas também dependem do comprimento do navio a ser projetado e são proporcionais aos espaçamentos adotados pelo projetista.

O equacionamento adotado é tal qual obtido pelas equações presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Equações para o chapeamento

Localização	Equação	Observação	Referência na norma
Convés	$(s_b(L + 48,76))/(26L + 8681)$	$L \leq 183m$	Seção 3-2-3/Tabela 1
	$(24,38s_b)/(1615,4 - 1,1L)$	$180 < L \leq 427m$	
Fundo	$(s_b/671)\sqrt{(L - 18,3)(d/D_s)} + 2,5$	$L \leq 122m$	Seção 3-2-2/3.13.2(b)
	$(s_b/508)\sqrt{(L - 62,5)(d/D_s)} + 2,5$	$122 < L \leq 305m$	
	$(s_b/661)\sqrt{(L + 105)(d/D_s)} + 2,5$	$305 < L \leq 427m$	
Duplo fundo	$37L10^{-3} + 0,009s - 1,5$		Seção 3-2-4/9.1.
Costado	$(s_b/645)\sqrt{(L - 15,2)(d/D_s)} + 2,5$	$L \leq 305m$	Seção 3-2-2/3.9
	$(s_b/828)\sqrt{(L + 175)(d/D_s)} + 2,$	$305 < L \leq 427m$	

Fonte: Autora (2019).

Onde s_b se trata do espaçamento entre reforçadores do mesmo tipo e s o espaçamento entre cavernas.

Muitos fornecedores de chapas de aço já oferecerem os produtos cortados de forma customizada, com a espessura desejada pelo cliente e com a precisão na casa de milímetros. Porém, é justificável que esse serviço custe mais caro do que chapas padronizadas. Por isso, o programa arredonda a espessura mínima de cada chapa dimensionada para valores típicos medidos em polegadas, unidade tradicionalmente utilizada no comércio de chapas, e depois converte a unidade para o sistema métrico, conforme padrão mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Espessuras de chapa em polegadas e seu valor aproximado em milímetros.

Espessuras aproximadas	
Polegadas	Milímetros
1/3	8
3/8	9,5
1/2	12,5
5/8	16
3/4	19
7/8	22,4
1	25,4
1 1/4	31,5
1 1/2	37,5
1 3/4	44,5
2	50
2 1/2	63
3	75
4	100

Fonte: Adaptado de Gerdau (2018).

O chapeamento do casco interno da embarcação é a mesma utilizada para o costado externo, uma vez que o livro de regras não estabelece formulações específicas. No entanto é razoável imaginar que a chapa do costado interno deve ser, no mínimo, tão resistente quanto a chapa externa, uma vez que em caso de avaria da chapa externa, a chapa interna receberá a pressão equivalente a atuante na chapa externa.

Vale ressaltar que nesta versão preliminar do programa, o usuário ainda não possui a capacidade de especificar manualmente as espessuras das chapas, estando limitado aos valores estabelecidos pela norma ABS (2019).

4.4.4 Reforçadores

Para a seleção dos reforçadores longitudinais, foi utilizada a Equação 10, a qual determina o módulo de seção mínimo requerido para um reforçador qualquer, sendo que os parâmetros variam em função das características do reforçador a ser dimensionado.

Os valores adotados pela ferramenta para a determinação dos reforçadores longitudinais de cada região do casco são mostrados na Tabela 12. São utilizados sempre os valores mais conservadores estabelecidos em ABS (2019).

Tabela 12 – Coeficientes c e altura de coluna d'água h adotadas pela ferramenta.

Localização	c	h
Convés	0,585	2,9
Costado interno	0,585	Meio pontal
Costado externo	0,585	Meio pontal
Fundo	0,715	Calado de projeto
Duplo fundo	$SM_{duplofundo} = 0,85SM_{fundo}$	

Fonte: Autora (2019).

Para o duplo fundo, a ABS (2019) estipula que o módulo de seção dos reforçadores não seja menor que 85% do módulo de seção dos reforçadores longitudinais de fundo, o que é obedecido pela ferramenta.

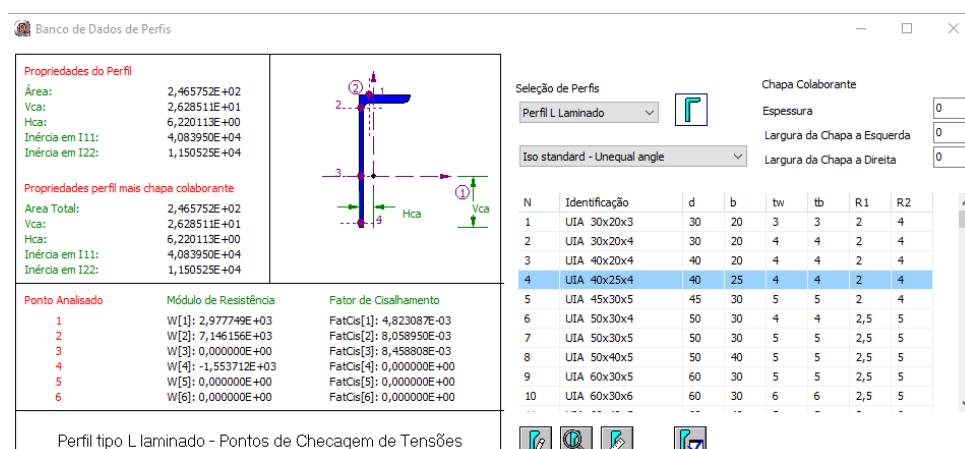
Buscar reforçadores que se adéquem ao projeto não é uma tarefa trivial, sendo necessário recorrer a um banco de dados de perfis e selecionar aqueles cujas características atendem aos requisitos da norma.

Para facilitar o trabalho do usuário, decidiu-se implementar no código um banco de dados de perfis, valendo-se como base, os dados constantes no programa Banco de Dados de Perfis, o qual pode ser visto na Figura 40.

O banco de perfis implementado é dividido em perfis do tipo– bulbo, formato T e L, que podem ser laminados ou fabricados – e por padrão de dimensão, como ISO, japonês, escandinavo, coreano, entre outros.

Como o programa foi desenvolvido principalmente para fins educacionais, decidiu-se não separar os perfis pela normativa a qual obedece, uma vez que essa característica possui maior importância no aspecto construtivo do estaleiro, o que foge do escopo deste trabalho. Porém manteve-se a divisão por formato, pois a classificação quanto ao tipo de perfil utilizado, possui relevância no projeto.

Figura 40 – Interface do programa Banco de Dados de Perfis.

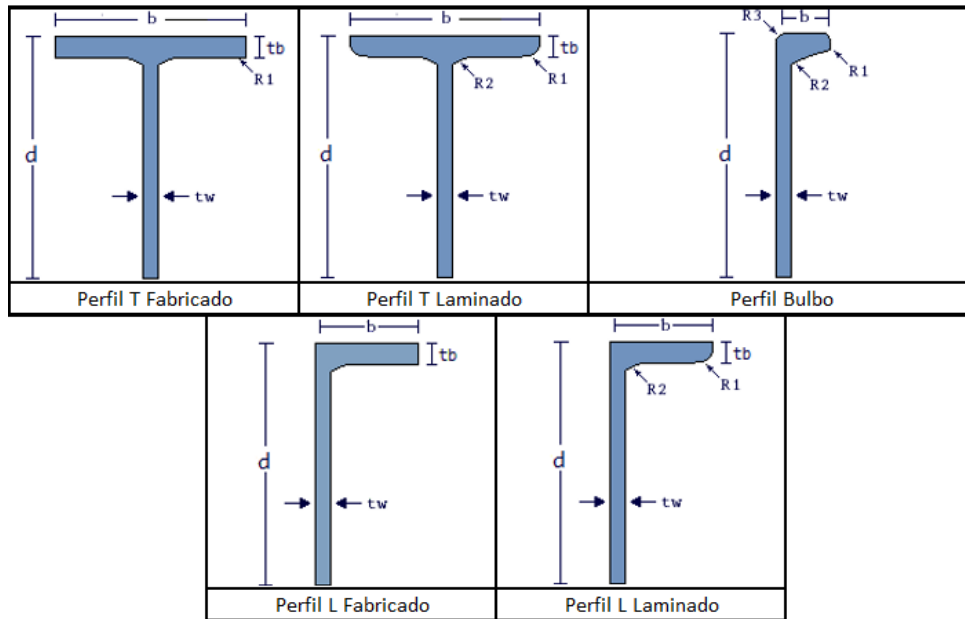


Fonte: Autora (2019).

Cada tipo de perfil é descrito por meio das dimensões (Figura 41), a partir

das quais são calculadas as propriedades do reforçador. A formulação para o cálculo das propriedades de um reforçador foi retirada do código fonte do programa Perfis, sendo essa descrita na fundamentação teórica desta dissertação. As propriedades do reforçador calculadas correspondem à posição da linha neutra no eixo vertical e horizontal, à inércia da seção em relação aos eixos neutros e ao módulo de resistência à flexão.

Figura 41 – Dimensões consideradas para o cálculo das propriedades dos perfis.



Fonte: Autora (2019).

Após serem calculados os módulos mínimos de seção dos reforçadores, o usuário escolhe o tipo de reforçador que deseja utilizar e assim, são exibidos na tela todos os perfis daquele formato (Figura 42).

Figura 42 – Painel de seleção de reforçadores.

Reforçadores tipo Perfil
Módulos de seção requeridos por norma em mm³

Escolher reforçadores

	Long. Leves			Long. Pesados		
Convés	7,146E+04	L Laminado	EA 3x3x3/8	7,146E+06	Formato	
Costado Externo	2,649E+05	Formato		2,649E+07	Formato	
Costado Interno	2,649E+05	Formato		2,649E+07	Formato	
Duplo Fundo	4,213E+05	Formato		4,213E+07	Formato	
Fundo	4,957E+05	Formato		4,957E+07	Formato	

Identificação	d [mm]	b [mm]	tw [mm]	tb [mm]	R1 [mm]	R2 [mm]	Área [mm ²]	LNx [mm]	LNy [mm]	Ix [mm ⁴]	Iy [mm ⁴]	SM [mm ³]
EA 3x3x1/4	76	20	76	20	6	35	1,241E+04	3,808E+01	2,144E+01	6,801E+06	2,279E+08	1,014E+05
EA 3x3x3/8	76	20	76	20	9	53	1,274E+04	3,951E+01	2,226E+01	6,857E+06	2,289E+08	1,035E+05
EA 3x3x7/16	76	20	76	20	11	11	1,216E+04	3,721E+01	2,061E+01	5,822E+06	2,274E+08	8,575E+04
EA 3,5x3,5x1/4	88	88	6	35	6	35	1,115E+04	1,452E+01	2,955E+01	1,411E+07	2,307E+08	1,989E+05

Fonte: Autora (2019).

Por fim, ao se clicar no botão "Escolher reforçadores", os dados são transferidos para variáveis a serem utilizadas na aba referente ao projeto estrutural.

4.5 MÓDULO DE SEÇÃO

A aba de módulo de seção pode ser resumida como a aba do programa onde efetivamente ocorre o cálculo das propriedades da seção e a verificação da adequação da seção projetada à norma.

Ao calcular a espessura de chapeamento na aba anterior, o programa automaticamente já desenha uma seção preliminar, a qual é composta por fundo, duplo fundo, bojo, costados e convés.

A modelagem da seção preliminar utiliza as dimensões principais da embarcação, assim como o raio do bojo, a distância entre cascos e a altura do duplo fundo, seguindo os valores e equacionamentos presentes na Tabela 13. Nesta tela o usuário tem ainda a possibilidade de remover ou adicionar novos elementos estruturais para a seção mestra.

Tabela 13 – Coordenadas das chapas adicionadas automaticamente.

Localização	Cota Y (transversal)		Cota Z (vertical)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Bojo	$B - R_{bj}$	B	0	R_{bj}
Convés	0	B	D	D
Costado externo	B	B	R_{bj}	D
Costado interno	$B - w_{ss}$	$B - w_{ss}$	h_{db}	D
Duplo fundo	0	B	h_{db}	h_{db}
Fundo	0	$B - R_{bj}$	0	0

Fonte: Autora (2019).

4.5.1 Adição do chapeamento

Além das chapas adicionadas automaticamente, o usuário pode adicionar novas chapas por meio do painel "chapeamento"(Figura 43), localizado no canto superior esquerdo da aba.

O procedimento é simples, basta que o usuário selecione a espessura da chapa que deseja adicionar, suas coordenadas de início e fim e a orientação (vertical, horizontal ou inclinado).

Figura 43 – Quadro para inserir chapas na seção.

Fonte: Autora (2019).

O programa calcula as dimensões de comprimento e altura da chapa, de acordo com a orientação selecionada anteriormente. O comprimento da chapa adicionada é calculado como sendo a distância entre os pontos que descrevem a chapa, conforme a Equação 23. A seguir, são calculadas a área, o centroide e a inércia própria da chapa.

$$L_{chapa} = \sqrt{(Y_f - Y_i)^2 + (Z_f - Z_i)^2} \quad (23)$$

Onde Y_f e Y_i são as coordenadas final e inicial da chapa na direção transversal, enquanto Z_f e Z_i representam as coordenadas final e inicial da chapa na direção vertical.

Vale ressaltar que ao selecionar que a chapa está inclinada, é necessário que o código faça a projeção da geometria para um eixo vertical, de forma que o Teorema de Steiner e outros cálculos possam ser utilizados.

Assim que o chapeamento é adicionado, as informações de nome do elemento, quantidade em meia seção, área, distância à quilha e inércia própria aparecem em uma tabela, conforme mostrada na Figura 44.

Figura 44 – Tabela de elementos com chapeamento adicionado.

Elemento	Quant.	Area total[m ²]	Yq [m]	Ip [m ⁴]	Itr[m ⁴]	Itotal [m ⁴]
Chapa Fundo	1	0,4	0,01	0	13,26	13,26
Chapa Bojo	1	0,06	1,15	0,03	1,28	1,31
Chapa Cost. Ext.	1	0,37	11,75	11,74	13,23	24,97
Chapeamento Convés	1	0	0,09	0	0,08	0,08
Chapeamento Duplo Fundo	1	0,02	21,18	0	3,99	3,99

Fonte: Autora (2019).

4.5.2 Adição dos reforçadores

Assim como o painel de adição de chapas, há no programa um painel de adição de reforçadores, cujo funcionamento é análogo ao descrito na seção anterior.

Para adicionar um novo conjunto de reforçadores, o projetista deve selecionar o tipo de reforçador que se deseja adicionar, com base nas geometrias selecionadas

anteriormente, na aba Estrutural. Além disto, deve inserir as coordenadas da chapa onde os reforçadores devem ser adicionados e a quantidade desses em cada bordo da seção. Por fim é importante destacar que o espaçamento entre reforçadores é definido com base nas variáveis de projeto descritas na Seção 4.4.2.

Figura 45 – Quadro para inserir reforçadores na seção.

Fonte: Autora (2019).

O programa realiza a adição dos reforçadores automaticamente, considerando a distância referente ao início da chapa, e o espaçamento definidos pelo usuário na tela anterior. Os reforçadores presentes em chapas verticais, como os de costado, são adicionados automaticamente um a um, uma vez que sua cota vertical é importante para o cálculo das propriedades da seção.

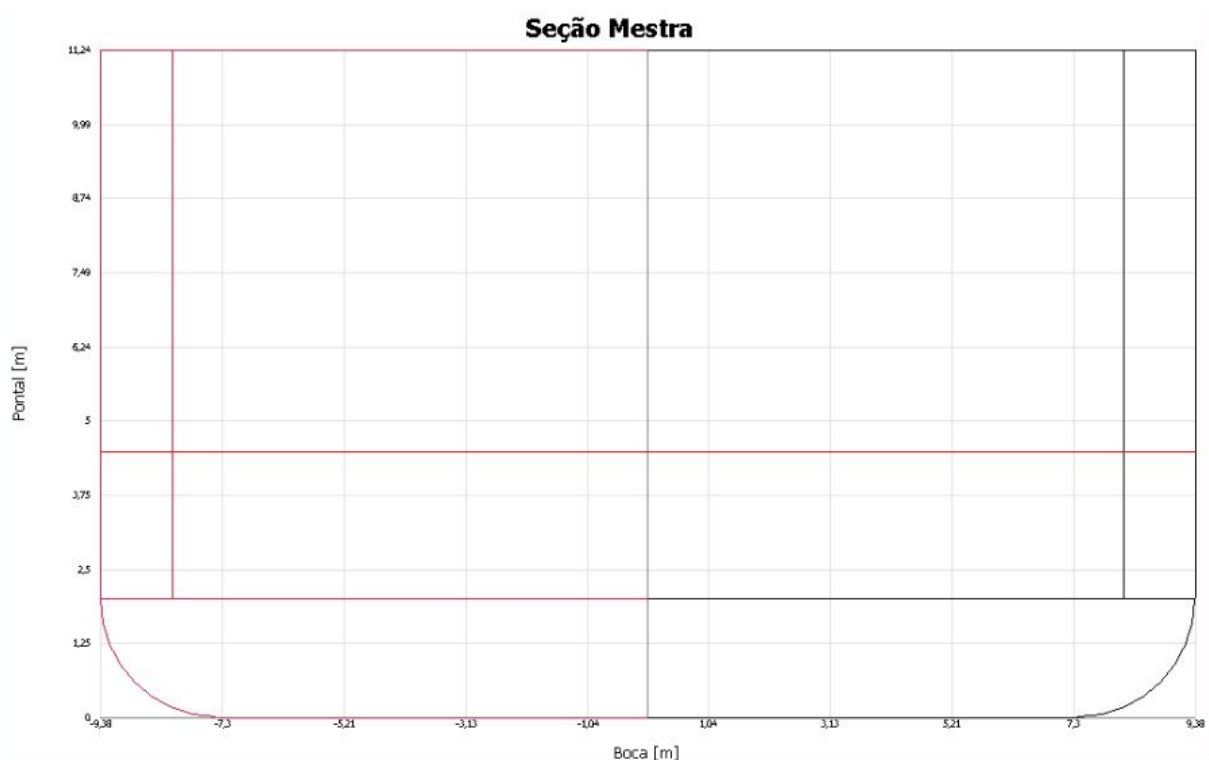
Figura 46 – Tabela de elementos com reforçadores adicionados.

Elemento	Quant.	Area total[m ²]	Yq [m]	Ip [m ⁴]	Itr [m ⁴]	Itotal [m ⁴]
Pesado Convés	5	0,01	3,43	0	0,08	0,08
Leve Costado Externo	1	0	4,15	0	0,01	0,01
Leve Costado Externo	1	0	4,87	0	0	0
Leve Costado Externo	1	0	5,59	0	0	0
Leve Costado Externo	1	0	6,31	0	0	0
Leve Costado Externo	1	0	7,03	0	0	0
Leve Costado Externo	1	0	7,75	0	0,01	0,01
Leve Costado Externo	1	0	8,47	0	0,02	0,02
Leve Costado Externo	1	0	9,19	0	0,03	0,03
Leve Costado Externo	1	0	9,91	0	0,05	0,05
Leve Costado Externo	1	0	10,63	0	0,07	0,07
Leve Costado Externo	1	0	11,35	0	0,09	0,09
Leve Costado Externo	1	0	12,07	0	0,11	0,11
Leve Costado Externo	1	0	12,79	0	0,14	0,14
Leve Costado Externo	1	0	13,51	0	0,17	0,17

Fonte: Autora (2019).

De forma análoga, o usuário também pode verificar os elementos que adicionou na mesma tabela de chapeamento. Na Figura 46 é mostrado o resultado do processo de adição de reforçadores pesados de convés e leves de costado. E se assim desejar, o projetista pode também já calcular o módulo de seção a cada nova adição de elemento, por meio do botão de cálculo de módulo de seção.

Figura 47 – Desenho da seção dado pelo programa.



Fonte: Autora (2019).

No fim da adição, o usuário pode solicitar ao programa que este calcule as propriedades da seção e assim, também lhe é mostrada a seção desenhada com os elementos adicionados, tal como visto na Figura 47.

4.5.3 Cálculo das propriedades de seção

O cálculo da linha neutra da seção se trata de uma média ponderada entre as áreas dos elementos estruturais e a posição desses em relação à linha da quilha da embarcação. Logo, são multiplicados os valores das colunas dois, três e quatro da tabela onde são apresentados os elementos que compõe a seção (Figura 46). O valor final deste somatório é dividido pelo somatório resultante da multiplicação das colunas dois e três da tabela.

A inércia própria das chapas da seção é tal como obtida pela Equação 31. Ressalta-se que nessa equação, para chapas horizontais, a base se trata da largura da chapa e a altura assume o valor da espessura. Em chapas verticais ocorre o oposto, a base corresponde a espessura da chapa.

$$I_{chapa} = \frac{base \cdot altura^3}{12} \quad (24)$$

Para reforçadores, a inércia própria é calculada utilizando-se a Equação 15, do Banco de Dados, desconsiderando qualquer valor de inércia adicional das chapas colaborantes. Todos os resultados são salvos em um vetor de inércias próprias. Esse

resultado é multiplicado pela quantidade presente em meia seção e somado à parcela de inércia de transferência.

A inércia de transferência é calculada por intermédio da segunda parcela da Equação 14, sendo que a área adotada é o resultado da multiplicação da quantidade de reforçadores pela área de cada um.

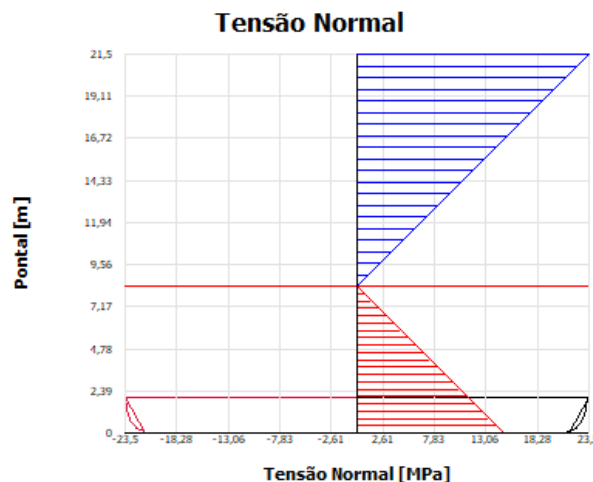
A partir da soma das inércias de todos os elementos que compõe a tabela, se obtém o valor da inércia de meia seção o qual, ao ser multiplicado por dois, resulta na inércia total da seção projetada.

São contabilizados no programa o SM inferior e o SM superior, sendo o primeiro tomado em referência ao pontal do navio e o segundo à quilha. Nesse ponto, o projetista deve comparar o SM obtido pelo cálculo da seção projetada, com aquele definido em ABS (2019) como sendo o valor mínimo requerido pela norma e que foi descrito na Seção 2.5.5.

4.6 TENSÕES NA SEÇÃO

O último dos módulos desenvolvidos na ferramenta consiste no procedimento referente ao cálculo das tensões na seção da embarcação, além da exibição dos resultados para o usuário. No painel referente à tensão normal, é exibida ao usuário a seção inteira da embarcação tal como desenhada na aba de módulo de seção. Em seguida o usuário deve selecionar a condição de mar que deseja analisar e clicar no botão para que o cálculo seja realizado. Na Figura 48 é mostrado como a ferramenta desenvolvida exibe um resultado referente a distribuição da tensão normal na seção de um navio deslocante.

Figura 48 – Tensão normal, dada pelo programa, em uma seção simples.



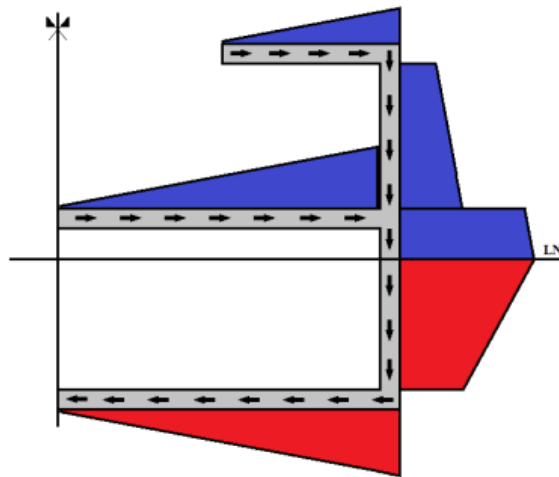
Fonte: Autora (2019).

Para que a tensão cisalhante seja calculada, é preciso obter o momento estático

ao longo da seção, porém esse não se trata de um cálculo trivial. Deve-se somar a contribuição de cada área, obedecendo o fluxo da força cortante na seção.

Na Figura 49 é mostrado como esse fluxo se distribui ao longo da seção de um casco monocelular, representado em cinza. Os valores em azul correspondem ao aumento do momento estático, cujo valor máximo encontra-se na linha neutra da seção. Passada a linha neutra, os valores são subtraídos até se anularem no plano de simetria da seção, conforme descrito na seção 2.6.2 deste trabalho.

Figura 49 – Fluxo de cisalhamento, em uma seção de embarcação, e momento estático.



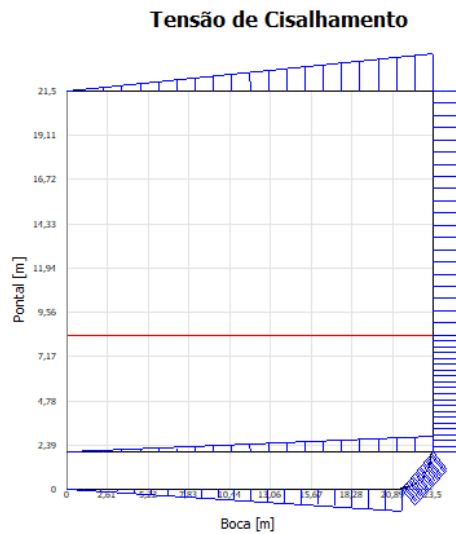
Fonte: Soudzler (2018).

Hughes e Paik (2010) demonstram que para chapeamentos e reforçadores ortogonais à linha neutra, o comportamento do momento estático obedece uma distribuição quadrática. Já para os elementos paralelos, tal distribuição é linear.

Porém, a exemplo do desenvolvimento realizado por Soudzler (2018), esta ferramenta calcula o momento estático apenas no início e no fim de cada chapa, realizando sempre uma plotagem linear dos resultados. Por essa razão, elementos curvos, como o bojo, são aproximados por uma chapa inclinada equivalente.

A distribuição da tensão cisalhante na seção é função do momento estático, conforme equacionamento discutido na seção 2.6.2. Na Figura 50 pode-se observar como a ferramenta exibe a distribuição da tensão cisalhante resultante da análise de uma seção simplificada, a qual é constituída apenas do chapeamento, sem a adição de reforçadores.

Figura 50 – Exemplo da distribuição da tensão cisalhante em uma seção simplificada.

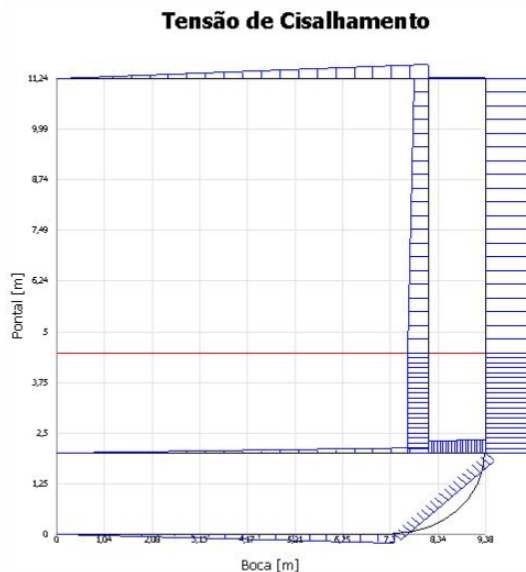


Fonte: Autora (2019).

Os valores de tensão normal máxima e mínima, além da tensão cisalhante na linha neutra, são mostrados na interface.

No entanto, destaca-se que foram desenvolvidos procedimentos iniciais para o cálculo da distribuição do cisalhamento em seções multicelulares. Embora tal algoritmo ainda requeira melhorias e testes, os resultados preliminares são bastante promissores, como pode ser visto na Figura 51. É importante destacar que não se tem registro de ferramentas computacionais capazes de calcular a distribuição de cisalhamento em seções navais multicelulares sem a utilização de técnicas numéricas como o Método dos Elementos Finitos.

Figura 51 – Exemplo da distribuição da tensão cisalhante em uma seção multicelular.



Fonte: Autora (2019).

5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA FERRAMENTA

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas para a verificação do programa. Tais análises foram realizadas utilizando-se geometrias conhecidas, como os cascos de séries sistemáticas, em especial da Série 60, proposta por Todd (1963).

Os casos apresentados possuem solução analítica, dado por meio de uma planilha eletrônica desenvolvida em trabalhos anteriores¹³, os quais podem ser comparados com aqueles obtidos utilizando-se a ferramenta computacional cujo desenvolvimento foi apresentado no capítulo anterior.

5.1 VERIFICAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO

A verificação da obtenção da curva SAC por intermédio de uma tabela de cotas, utilizando o programa, se deu por meio de uma comparação com uma geometria conhecida em que se dispõe do valor da curva SAC.

O navio utilizado foi um casco da Série 60, o modelo mãe 4214W-B4, cujas características principais são exibidas na Tabela 14 e a tabela de cotas pode ser vista em Todd (1963).

Nesse caso, estipulou-se um calado mínimo como sendo o ponto médio entre o calado de projeto e a linha da quilha da embarcação, apenas para que o programa possa efetuar os cálculos. Uma vez que não se dispõe dos resultados em outros calados que não o de projeto, apenas os resultados referentes a SAC calculada no calado de projeto são verificados.

Tabela 14 – Dimensões e coeficiente de forma do casco da Serie 60.

	Valor	Unidade
Comprimento	121,92	m
Boca	18,75	m
Calado de projeto	7,5	m
Calado mínimo	3,75	m
Coeficiente de bloco	0,8	

Fonte: Adaptado de Todd (1963).

A partir da tabela de cotas, o código calcula as áreas seccionais nas posições das balizas e retorna ao usuário as áreas seccionais calculadas. Os resultados obtidos

¹³ Em especial relatórios realizados na disciplina Projeto de Navio 2, os quais não podem ser citados adequadamente, mas são de grande valia na verificação da ferramenta desenvolvida.

são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação entre os dados obtidos pela ferramenta e os da Serie 60

x [m]	Série [m^2]	Ferramenta [m^2]	Diferença [%]
0,000	0,000	0,000	0,000
3,048	33,958	33,487	-1,386
6,096	64,003	63,325	-1,058
9,144	86,641	85,704	-1,082
12,192	104,249	103,189	-1,017
18,288	125,909	125,216	-0,550
24,384	136,250	135,694	-0,409
30,480	139,324	138,898	-0,306
36,576	139,744	139,327	-0,298
42,672	139,744	139,327	-0,298
48,768	139,744	139,327	-0,298
54,864	139,744	139,327	-0,298
60,960	139,744	139,327	-0,298
67,056	139,744	139,327	-0,298
73,152	139,604	139,254	-0,251
79,248	139,045	138,605	-0,316
85,344	136,110	135,481	-0,463
91,440	127,866	127,133	-0,573
97,536	112,633	111,965	-0,594
103,632	90,694	90,006	-0,758
109,728	62,745	62,492	-0,403
112,776	46,954	46,809	-0,309
115,824	29,626	29,872	0,831
118,872	11,040	11,434	3,569
121,920	1,397	1,410	0,897

Fonte: Autora (2019).

Nota-se que a diferença máxima entre os resultados interpolados e aqueles registrados no trabalho de referência (TODD, 1963) foi de aproximadamente 3,5%, ocorrendo no corpo de popa, que possui geometrias mais complexas do que a seção mestra, o que explica a discrepância de resultados nessa região.

Outra razão para a diferença advém do grau do polinômio utilizado na interpolação. Para um corpo que possui curvas nas suas três direções de forma, como as linhas de um casco, o ajuste perfeito da curva é esperado apenas ao se utilizar um polinômio com o grau igual ao número de pontos utilizados na interpolação menos um.

5.2 VERIFICAÇÃO DE EQUILÍBRIO DA VIGA-NAVIO

A partir do caso de solução analítica conhecida, importou-se a mesma condição de carga, além da mesma geometria para a ferramenta desenvolvida.

Após a realização do procedimento de equilíbrio da viga navio, obtiveram-se os resultados referentes aos diagramas de força cortante e momento fletor para as três condições de mar analisadas, cujos resultados podem ser vistos nas Tabela 16.

Tabela 16 – Comparação entre os dados obtidos para a três condições de mar.

	Parâmetro	Unidade	Análítico	Ferramenta	Diferença [%]
Mar calmo	Calado médio	<i>m</i>	7,6197222476	7,6228736993	0,04%
	Ângulo de trim	<i>rad</i>	-0,018433647	-0,017060982	-7,45%
	Força cortante mínima	<i>kN</i>	-8519,79	-8654,66	1,58%
	Momento fletor mínimo	<i>kN · m</i>	-145521,52	-149167,94	2,51%
	Força cortante máxima	<i>kN</i>	4816,61	4865,77	1,02%
	Momento fletor máximo	<i>kN · m</i>	7375,71	6707,92	-9,05%
Tosamento	Calado médio	<i>m</i>	7,6197222476	8,0024661186	5,02%
	Ângulo de trim	<i>rad</i>	-0,015924751	-0,025318741	58,99%
	Força cortante mínima	<i>kN</i>	-160373,38	-170036,86	6,03%
	Momento fletor mínimo	<i>kN · m</i>	-429253,57	-469214,49	9,31%
	Força cortante máxima	<i>kN</i>	12041,24	13046,27	8,35%
	Momento fletor máximo	<i>kN · m</i>	689,18	653,08	-5,24%
Alquebramento	Calado médio	<i>m</i>	6,7384314802	7,0403570046	4,48%
	Ângulo de trim	<i>rad</i>	-0,031091999	-0,017293344	-44,38%
	Força cortante mínima	<i>kN</i>	-4633,61	-5384,47	16,20%
	Momento fletor mínimo	<i>kN · m</i>	0,00	0,00	0,00%
	Força cortante máxima	<i>kN</i>	4671,19	5363,33	14,82%
	Momento fletor máximo	<i>kN · m</i>	135813,72	163795,65	20,60%

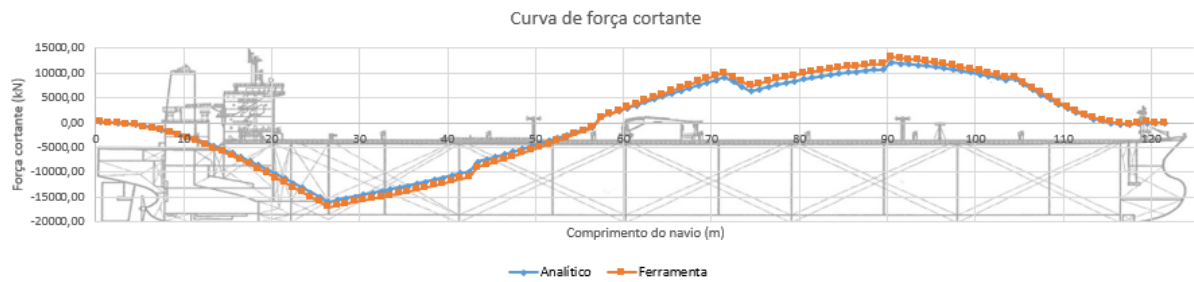
Fonte: Autora (2019).

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que os erros chegam a 20% no que diz respeito aos esforços presentes na viga navio, porém há discrepâncias ainda maiores quando comparados os ângulos de trim da embarcação.

Essa diferença nos valores pode ter origem nos métodos numéricos aplicados para o equilíbrio da viga navio. Na planilha eletrônica utilizou-se a função atingir meta, cujo funcionamento não é detalhado no manual do Excel, mas pode resultar em uma solução numérica levemente diferente para o problema de otimização referente ao equilíbrio da viga navio e que foi descrito na seção 2.7. Isso pode ser verificado nas duas primeiras linhas relativas a cada condição de mar analisada, onde pode-se notar uma diferença próxima 60% para o resultado de ângulo de trim na condição de tosamento.

Outra forma de verificar os resultados obtidos é comparando graficamente as curvas de força cortante e momento fletor, o que pode ser visto nas Figuras 52 e 53.

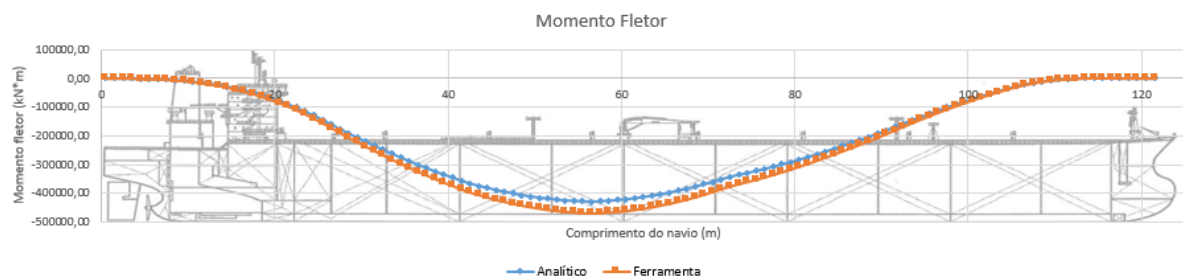
Figura 52 – Diagrama de força cortante para a condição de tosamento.



Fonte: Autora (2019).

A partir da Figura 52, verifica-se que ambas as extremidades da embarcação possuem força cortante igual a zero, o que significa que o navio está equilibrado, respeitando a condição peso igual a flutuação.

Figura 53 – Diagrama de momento fletor para a condição de tosamento.



Fonte: Autora (2019).

Também, na Figura 53, observa-se que ambas as curvas possuem valores nulos nas extremidades, logo, o navio obedece a segunda condição de equilíbrio, onde a posição longitudinal de centro de empuxo deve ser igual a posição longitudinal do centro de gravidade.

A partir do equilíbrio da viga-navio, tendo como resultado o momento fletor e a força cortante que atuam na seção do navio, pode-se iniciar o projeto estrutural em si.

As variáveis de projeto que servem de estrada para a definição da seção mestra são apresentadas na Figura 54, sendo utilizadas tanto no cálculo analítico quanto na ferramenta desenvolvida.

Figura 54 – Variáveis de projeto adotadas.

Variáveis de Projeto
Espaçamentos em MILÍMETROS

	Long. Leves	Long. Pesados	Transv. Leves	Transv. Pesados	Colunas entre anteparas
Convés	550	2200	6000	14800	2
Costado Externo	225	1125	3000		OK
Costado Interno	225	1125	3000		
Duplo Fundo	600	2400	2000		
Fundo	600	2400	2000		
Duplo casco [mm]	0	<input type="checkbox"/> Reg. 19 SOLAS			
Duplo fundo [mm]	1250				
Raio do bojo [mm]	750				

Fonte: Autora (2019).

A partir dos valores definidos para as variáveis do projeto estrutural, são calculadas as espessuras de chapeamento requeridas pela ABS (2019). Na Tabela 17 são comparados os resultados obtidos analiticamente, com aqueles obtidos na utilização da ferramenta desenvolvida. Como pode ser observado, os resultados considerando as medidas comerciais foram rigorosamente os mesmos.

Tabela 17 – Espessuras de chapeamento utilizadas, em milímetros.

Localização	Analítico [mm]		Ferramenta [mm]
	Calculado	Comercial	Comercial
Convés	5,46	8	8
Costado	7,95	8	8
Duplo fundo	21,05	22,4	22,4
Fundo	9,99	12,5	12,5

Fonte: Autora (2019).

Por fim, os reforçadores selecionados conforme a norma ABS (2019), tanto para o caso analítico, quanto para a ferramenta desenvolvida são mostrados na Tabela 18. Novamente observa-se grande aderência nos resultados, indicando a correta implementação da ferramenta.

Tabela 18 – Módulos de seção mínimos requeridos.

Localização	Leves [mm^3]		Pesados [mm^3]	
	Analítico	Ferramenta	Analítico	Ferramenta
Convés	2,620E+05	2,620E+05	7,085E+05	7,085E+05
Costado	5,193E+04	5,193E+04	7,021E+05	7,021E+05
Duplo costado	5,193E+04	5,193E+04	7,021E+05	7,021E+05
Duplo fundo	8,533E+04	8,533E+04	2,077E+06	2,077E+06
Fundo	1,004E+05	1,004E+05	2,443E+06	2,443E+06

Fonte: Autora (2019).

Os perfis selecionados foram os mesmos para ambos os casos, cujas informações são apresentadas na Tabela 19¹⁴. A estrutura de exemplo é simplória (Figura 55), sendo composta apenas de reforçadores leves, facilitando a verificação dos dados obtidos.

Tabela 19 – Especificações dos reforçadores leves selecionados.

Identificação	Área [mm^2]	Y_{LN} [mm]	Z_{LN} [mm]	I_{yy} [mm^4]	I_{zz} [mm^4]	SMc [mm^3]
D EIA150x150x14	4,045E+03	2,375E+01	1,08E+02	8,94E+06	8,42E+06	3,50E+05
SS LF85x08x57x08	1,136E+03	4,000E+00	6,12E+01	1,00E+06	1,27E+05	5,53E+04
DC LF120x12x80x12	2,400E+03	6,000E+00	8,64E+01	4,25E+06	5,29E+05	1,89E+05
DF LF120x12x80x13	2,400E+03	6,000E+00	8,64E+01	4,25E+06	5,29E+05	1,72E+05
B LF120x12x80x14	2,400E+03	6,000E+00	8,64E+01	4,25E+06	5,29E+05	5,53E+04

Fonte: Autora (2019).

Feito isso, foram adicionados os reforçadores e o chapeamento à seção e a ferramenta efetuou os cálculos necessários. As comparações dos resultados referentes as propriedades da seção são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Comparação entre resultados analíticos e numéricos.

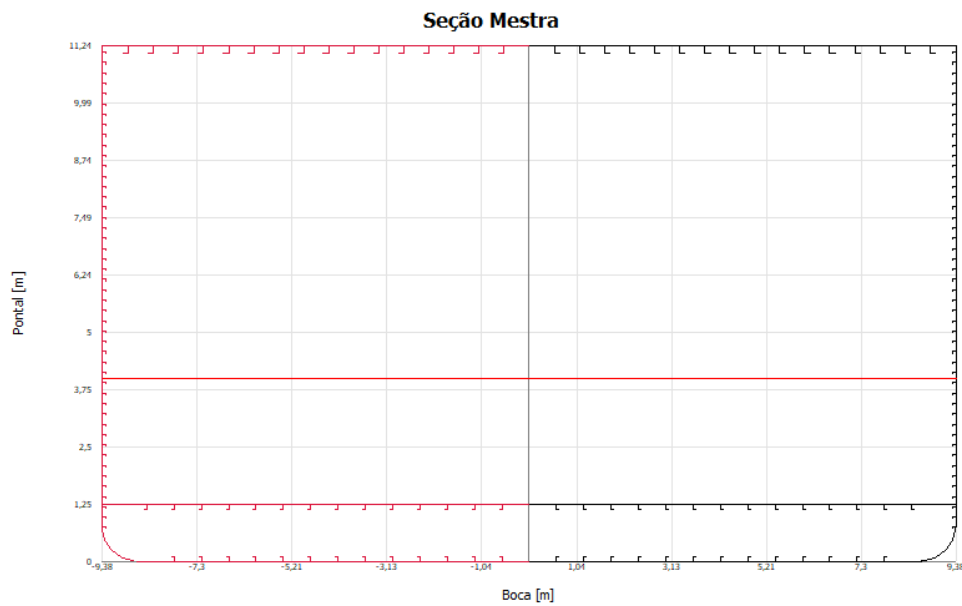
Dado	Unidade	Analítico	Ferramenta	Diferença [%]
Linha neutra	m	3,991	3,990	-0,025%
Inércia da seção	m^4	26,572	26,563	-0,034%
SM	m^3	3,665	3,664	-0,027%

Fonte: Autora (2019).

Nota-se a pouca diferença entre os resultados, sendo assim, salvo melhor juízo, acredita-se que o processo de verificação da ferramenta desenvolvida logrou êxito.

¹⁴ SM – SM com chapa colaborante, D – convés, SS – costado externo, DC – duplo costado, DF – duplo fundo e B – fundo

Figura 55 – Desenho da seção de projeto.

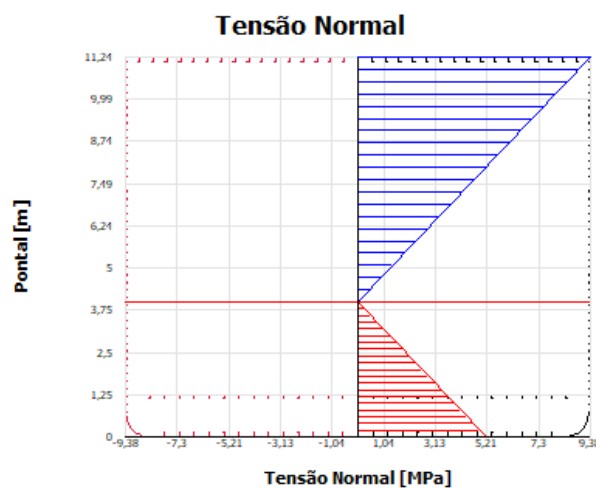


Fonte: Autora (2019).

Na Figura 55 é mostrada a topologia estrutural do projeto estudado, com a respectiva linha neutra da seção representada em vermelho.

Não se dispunha de valores das tensões normais e de cisalhamento para o caso de estudo, porém os mesmos foram realizados com a ferramenta desenvolvida e os resultados são mostrados nas Figuras 56 e 57.

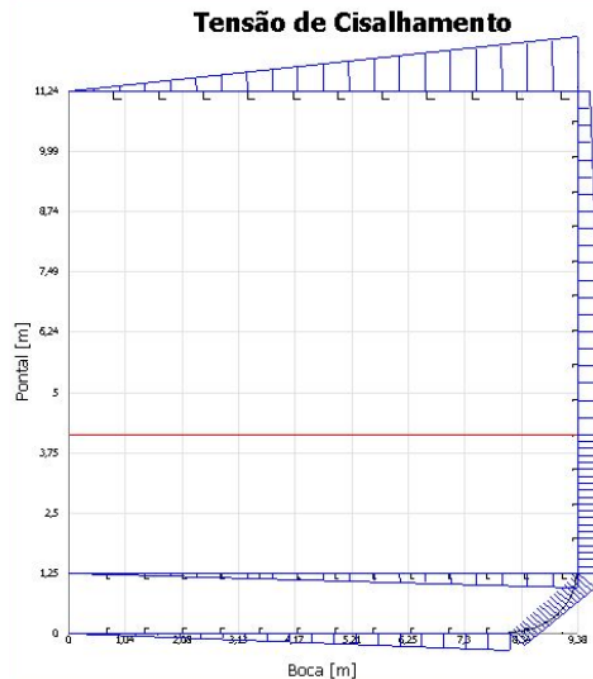
Figura 56 – Tensão normal na seção de exemplo.



Fonte: Autora (2019).

Observa-se pela imagem que os valores de tensão de cisalhamento, com o fluxo de cortante vindo da parte superior e com o fluxo na direção oposta, aparentemente são os mesmos na linha neutra, que leva a crer que o cálculo está correto.

Figura 57 – Tensão de cisalhamento na seção de exemplo.



Fonte: Autora (2019).

Os resultados obtidos dos cálculos de tensões são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados das tensões na seção projetada.

Condição de mar	Tensão Normal [MPa]		Tensão Cisalhante [MPa]
	Tração	Compressão	
Mar calmo	22407,61	-40716,71	29,48
Tosamento	70484,16	-128076,27	58,04
Alquebramento	44709,48	-24604,95	18,34

Fonte: Autora (2019).

Nota-se que a maior tensão normal absoluta ocorre para a compressão em tosamento, o que se repete para o cisalhamento. Assim, é possível inferir que a condição de tosamento é a crítica no que diz respeito às tensões estruturais.

6 CONCLUSÕES

Conforme visto ao longo deste texto, a definição da estrutura de um navio tem elevado grau de importância no projeto final da embarcação, devido a sua influência direta no custo e desempenho de um casco deslocante.

A complexidade inerente e a multiplicidade de soluções fazem com que a qualidade de um projeto estrutural, mesmo baseado em normas, dependa da experiência de arquitetos e projetistas.

Nesse contexto este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional destinada ao projeto automatizado da estrutura referente a seção mestra de uma embarcação mercante que utiliza a abordagem baseada na norma ABS (2019).

Considera-se que os objetivos propostos foram atingidos. Pois, como mostrado no capítulo anterior, o resultado obtido foi uma ferramenta eficiente e transparente ao usuário, que contém uma interface para a entrada das características do projeto, bem como para a visualização dos resultados.

É interessante observar que a ferramenta desenvolvida pode, a um só tempo, ser utilizada por estudantes de engenharia naval, professores e pesquisadores, possibilitando a avaliação do efeito do carregamento na resistência requerida pela estrutura e o efeito da mudança das variáveis de projeto nos módulos de seção de reforçadores e nas espessuras mínimas das chapas, entre muitas outras análises possíveis.

Foram desenvolvidos três módulos principais. O primeiro destinado ao equilíbrio da viga navio, permite importar a geometria do casco por meio de uma tabela de cotas ou então por intermédio de curvas SAC.

Após definir a condição de carga a ser analisada, o equilíbrio da viga navio é calculado em três condições de mar, e é dado por meio de um algoritmo de bissecção.

No segundo módulo é realizado o projeto estrutural da seção mestra utilizando a norma ABS (2019). Nessa etapa são dimensionados cada um dos elementos estruturais da seção, tendo como base os espaçamentos definidos pelo projetista. Essa é uma etapa iterativa, e deve ser repetida até que os espaçamentos utilizados como variáveis de projeto resultem em uma seção mestra que atenda aos requisitos da norma.

Por fim, o terceiro módulo é destinado ao cálculo das tensões principais, permitindo ao projetista visualizar a distribuição da tensão normal e da tensão cisalhante ao longo da seção estrutural projetada.

É importante destacar que este trabalho dá prosseguimento aos estudos de

Soudzler (2018) e Hermann (2016), incorporando o equilíbrio da viga navio de um casco com geometria tridimensional, além de incluir um algoritmo preliminar para a análise de seções multicelulares.

Para a verificação do desenvolvimento realizado, foi efetuado um estudo de caso, partindo de uma tabela de cotas até o cálculo das tensões na seção, utilizando o programa em sua totalidade. Os resultados foram satisfatórios quando comparados aos dados analíticos existentes, porém carece de um mapeamento da origem da discrepância nos ângulos de trim, que tem influência direta no momento fletor atuante na viga navio.

Uma vez que os objetivos foram atingidos, é recomendado que a ferramenta seja aprimorada. Pode-se estender as análises para a estrutura local, bem como implementar algoritmos de análise baseados no Método dos Elementos Finitos que permitam a estimativa de deslocamentos e deformações na estrutura, tensões na estrutura transversal, além da avaliação do cisalhamento em seções multicelulares. Além da melhoria na capacidade de análise da estrutura, recomenda-se a implementação de um algoritmo de otimização que permita obter as variáveis de projeto que resultem em uma estrutura que atenda aos requisitos da ABS (2019) e possua a menor massa possível, tal como proposto por Hermann (2016).

Em relação ao caráter educacional da ferramenta, sugere-se fortemente que a ferramenta desenvolvida seja colocada a prova, permitindo-se avaliar a usabilidade e confiabilidade da interface. Infelizmente o desenvolvimento do sistema tomou todo o tempo do projeto, inviabilizando tal estudo.

Como conclusão final destaca-se que tal como mostrado por Tancredi (2009), o desenvolvimento realizado, embora vislumbre a resolução automatizada para o projeto estrutural de uma embarcação, não pretende eliminar o trabalho do engenheiro, mas sim permitir que esse desenvolva projetos mais complexos e possa explorar um conjunto maior de alternativas de solução. Por fim, vale ressaltar que o senso crítico e o conhecimento técnico são fundamentais para que os engenheiros possam avaliar a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. R. de. **Otimização do projeto estrutural de embarcações de alta velocidade produzidas em material compósito**. 94 p. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPBUILDING. **Steel Vessels 2019: Part 3, Hull Construction and Equipment**. Spring, 2019.
- AUGUSTO, O. B. **A Estrutura Secundária do Navio**. São Paulo, 2004. (Apostila).
- AUGUSTO, O. B. **Análise Estrutural de Navios**. São Paulo, 2007. (Apostila).
- BAI, Y. **Marine Structural Design**. 1. ed. Oxford: Elsevier Science, 2003.
- BARABANOV, N. **Structural Design of Sea-going Ships**. 1. ed. [S.l.]: Central Books Ltd, 1966.
- CHAVES, V. T.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. de. Optimal structural design of small ships with response surface. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL MARITIME ASSOCIATION OF THE MEDITERRANEAN, 15., 2013, La Coruña. La Coruña: University of A Coruna, 2013.
- EVANS, J. H. Basic design concepts. **Journal of the American Society for Naval Engineers**, Wiley Online Library, v. 71, n. 4, p. 671–678, 1959.
- FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 5. ed. [S.l.]: Serviço de Documentação da Marinha, 2002. v. 2.
- FUJARRA, A. L. C. **Hidrodinâmica das Ondas de Gravidade**. Joinville, 2016. (Apostila).
- GERDAU. **Catálogo de produtos**: catálogo. São Paulo, 2018. 68 p.
- HERMANN, M. P. **Otimização de projeto estrutural para embarcações de grande porte**. 109 p. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- HIBBELER, R. C. **Estática: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. [S.l.]: Pearson Educación, 2010.
- HUGHES, O. F. **Ship structural design**: a rationally-based, computer-aided, optimization approach. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1983.
- HUGHES, O. F.; PAIK, J. K. **Ship Structural Analysis and Design**. 1. ed. Nova Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.

MAGALHÃES, P. S. B. **Transporte marítimo-cargas, navios, portos e terminais**. 1. ed. São Paulo: Aduaneiras, 2010.

MARINHA DO BRASIL. **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto**. [S.l.], 2005.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

PAPANIKOLAOU, A. Holistic ship design optimization. **Computer-Aided Design**, Elsevier BV, v. 42, n. 11, p. 1028–1044, nov 2010.

PAPANIKOLAOU, A. **Ship design: methodologies of preliminary design**. 1. ed. Atenas: Springer, 2014.

REGISTRO ITALIANO NAVALE. **Rules for the Classification of Ships: Part b: Hull and stability**. Genova, 2012.

SAFETY OF LIFE AT SEA. **International Convention for the Safety of Life at Sea**. [S.l.], 1965.

SCHADE, H. A. The effective breadth of stiffened plating under bending loads. **Trans. SNAME**, v. 59, p. 403–430, 1951.

SIGNIFICANT SHIPS OF 2013. London: Royal Institute of Naval Architects, 2013. 88-89 p.

SOUDZLER, L. K. **Desenvolvimento de um aplicativo para a síntese e análise da estrutura global de embarcações**. 112 p. Trabalho de conclusão de curso — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

TANCREDI, T. P. **A Estrutura Primária do Navio: Teoria de vigas – viga navio**. São Paulo, 2004. (Apostila).

TANCREDI, T. P. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia**. 190 p. Tese de doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TIMOSHENKO, S. **Resistencia de Materiales, 2 vol.** [S.l.]: Espasa calpe, 1976.

TODD, F. H. **Series 60: Methodical experiments with models of single-screw merchant ships**. [S.l.], 1963.

WEAVER, P.; ASHBY, M. The optimal selection of material and section-shape. **Journal of Engineering Design**, Taylor & Francis, v. 7, n. 2, p. 129–150, 1996.

ZUBALY, R. B. **Applied Naval Architecture**. 2. ed. Atglen: Cornell Maritime Pr/Tidewater Pub, 2009.

APÊNDICE A – NOMENCLATURA EM PORTUGUÊS DOS ELEMENTOS DA SEÇÃO

Para facilitar a compreensão da nomenclatura, a Tabela 22 elenca os termos em inglês utilizados nas Figuras 16, 17 e 18, junto com sua tradução para o português.

Tabela 22 – Nomenclaturas com traduções

Nomenclatura em inglês	Nomenclatura em português
<i>Main deck plating</i>	Chapeamento do convés principal
<i>Deck beam</i>	Reforçadores leves de convés/sicorda
<i>Tween deck frame</i>	Caverna de costado
<i>Hatch side girder</i>	Reforçador pesado de escotilha
<i>Second deck</i>	Segundo convés
<i>Beam knee</i>	Borboleta
<i>Hold frame</i>	Caverna
<i>Margin bracket</i>	Borboleta
<i>Inner bottom plating</i>	Chapeamento do duplo fundo
<i>Center vertical keel</i>	Quilha central
<i>Floor</i>	Hastilha
<i>Side girder (keelson)</i>	Reforçador pesado de fundo
<i>Bottom plating</i>	Chapeamento do fundo
<i>Deck plating</i>	Chapeamento do convés
<i>Deck longitudinals</i>	Reforçadores leves de convés
<i>Side longitudinals</i>	Reforçadores leves de costado
<i>Bottom longitudinals</i>	Reforçadores leves de fundo
<i>Web frame</i>	Caverna
<i>Cross tie</i>	-
<i>Deep frame</i>	Caverna

Fonte: Autora(2019).

APÊNDICE B – ESTUDO DE OCUPAÇÃO DO TANQUE

Para estimar a porcentagem do casco que é efetivamente ocupada por carga, e assim ser possível estimar a quantidade máxima de carga que cada tanque é capaz de carregar, fez-se um estudo de vinte embarcações de diferentes tipos, colhendo suas dimensões e capacidades de carga. Os dados dessas embarcações foram retirados do catálogo de produtos da *Hyundai Heavy Industries*, um estaleiro sul-coreano de grande porte e alto nível de inovação tecnológica, aleatoriamente de forma a englobar a maior variedade de embarcações e que estas estivessem englobadas no tipo de embarcação que pode ter sua tipologia determinada pela ferramenta computacional desenvolvida.

Depois de colhidas as informações, buscou-se valores de coeficientes de seção mestra da embarcação típicos para cada tipo de navio. Estes foram assumidos conforme apresentado em Papanikolaou (2014), e mostrados em destaque na Figura 58. Utilizou-se o menor valor apresentado de forma a evitar majorar a área da seção, o que poderá resultar em um tanque de carga com maior volume e o usuário pode ser levado ao erro quando tentar carregar o navio com maior quantidade de carga do que este tem a capacidade de transportar.

Figura 58 – Tabela de C_M

Ship type	Hull form coefficients	
	C_P	C_M
Fast seagoing cargo ships	0.57–0.65	0.97–0.98
Slow seagoing cargo ships	0.66–0.74	0.97–0.995
Coastal cargo ships	0.69–0.73	–0.985
Small short sea passenger ships	0.61–0.63	0.82–0.85
Ferries	0.53–0.62	0.91–0.98
Fishing vessels	0.61–0.63	0.87–0.90
Tugboats	0.61–0.68	0.75–0.85
Bulk carriers	0.79–0.84	0.990–0.997
Tanker $F_n = 0.15$	0.835–0.855	0.992–0.996

Fonte: Papanikolaou (2014).

O coeficiente de seção mestra representa a porcentagem de ocupação da área da seção transversal do navio em relação a um retângulo formado pelo valor de sua boca e calado, dado conforme a Equação 25. Apesar de ser uma relação obtida com um valor menor do que o pontal, assumiu-se que o valor de C_M calculado no calado de projeto é o mesmo que se este fosse tomado no pontal da embarcação. Vale ressaltar que este valor deve ser revisado futuramente, já que se trata de uma estimativa preliminar.

$$C_M = \frac{A_X}{B \cdot T} \quad (25)$$

A partir dos dados de boca e calado, foi calculada a área do retângulo descrito por ambas as dimensões e multiplicada pelo valor de C_M . Em seguida, foram estimados os valores de altura do duplo fundo e distância entre cascos para cada um dos navios, utilizando das Equações 5 e 6 para tal. Logo, descontou-se os valores de duplo fundo do pontal e duas vezes a distância entre costados da boca, e calculou-se esta área interna. A partir da razão, em porcentagem, entre a área interna e externa, calculou-se uma porcentagem média entre as vinte embarcações, e sendo assumido este valor médio como uma constante a ser multiplicada pelo volume de qualquer tanque que foi calculado por meio do *software*.

Nota-se que o valor médio de ocupação da área é próximo de 79% e também que o desvio padrão relativo foi pouco acima de 5%, o que foi julgado aceitável para uma ferramenta computacional e tendo em vista que algumas informações, como o caso do coeficiente da seção mestra, foram assumidas a partir de valores típicos. O programa irá contabilizar uma constante de 0,79 para multiplicar o volume final de cada tanque.

Figura 59 – Estimativa de ocupação do tanque em relação ao casco do navio.

Nome do navio	Carga	Comprimento (m)	Boca (m)	Pontal (m)	DWT (t)	Área total (m ²)	CM	Hdb (m)	Dss(m)	Área interna (m ²)	%
Stena Roro	Carros	192,500	29,900	9,500	12640,000	284,050	0,910	1,993	1,132	207,454	66,461%
Anne Sif	Químico	110,000	19,000	10,200	9200,000	193,800	0,992	1,267	1,000	151,867	77,736%
Toyo Line S.A.	Geral	105,500	19,000	10,500	7000,000	199,500	0,970	1,267	1,000	156,967	76,320%
Bunga Kerayong	Geral	152,000	25,800	10,800	18000,000	278,640	0,970	1,720	1,400	208,840	72,701%
Korean Jade	Granel	143,000	22,860	13,000	19200,000	297,180	0,990	1,524	1,460	228,831	76,231%
Spring Bear	Container	141,000	24,000	13,460	9472,000	323,040	0,970	1,600	1,000	260,920	78,347%
Bunga Melati Dua	Químico	168,000	30,000	15,000	32168,000	450,000	0,992	2,000	2,000	338,000	74,510%
Maersk Glory	LPG	147,000	25,500	16,000	16819,000	408,000	0,992	1,700	1,341	326,299	79,335%
Superstars	Granel	186,000	32,200	16,600	47000,000	534,520	0,990	2,000	2,000	411,720	76,256%
Libra Ipanema	Geral	199,000	30,230	16,700	34248,000	504,841	0,970	2,000	2,000	385,581	74,085%
Amazon Virtue	Geral	218,000	40,000	18,200	73000,000	728,000	0,970	2,000	2,000	583,200	77,707%
Nissos Christiana	Petróleo	241,000	45,000	21,000	114900,000	945,000	0,992	2,000	2,000	779,000	81,774%
SKS Trinity	Ore-Bulk-Oil	234,000	42,000	23,200	110000,000	974,400	0,990	2,000	2,000	805,600	81,850%
Neo Energy	LPG	275,000	44,200	26,000	85602,000	1149,200	0,992	2,000	2,000	964,800	83,282%
DHT Puma	Petróleo	322,000	60,000	29,400	299910,000	1764,000	0,992	2,000	2,000	1534,400	86,288%
Thalassa Mana	Container	352,000	51,000	29,850	152343,000	1522,350	0,970	2,000	2,000	1308,950	83,403%
Berge Stahl	Granel	328,000	63,500	30,200	41000,000	1917,700	0,990	2,000	2,000	1677,900	86,620%
MSC Anna	Container	383,000	58,600	30,500	185503,000	1787,300	0,970	2,000	2,000	1556,100	84,452%
B Whale	Ore-Bulk-Oil	327,000	60,000	31,000	319000,000	1860,000	0,990	2,000	2,000	1624,000	86,439%
Tugela	Carros	219,300	32,300	34,700	28837,000	1120,810	0,910	2,000	1,942	929,213	75,444%
Média											
78,962%											
σ médio											
4,279%											
σ médio rel.											
5,418%											

Fonte: Papanikolaou (2014).

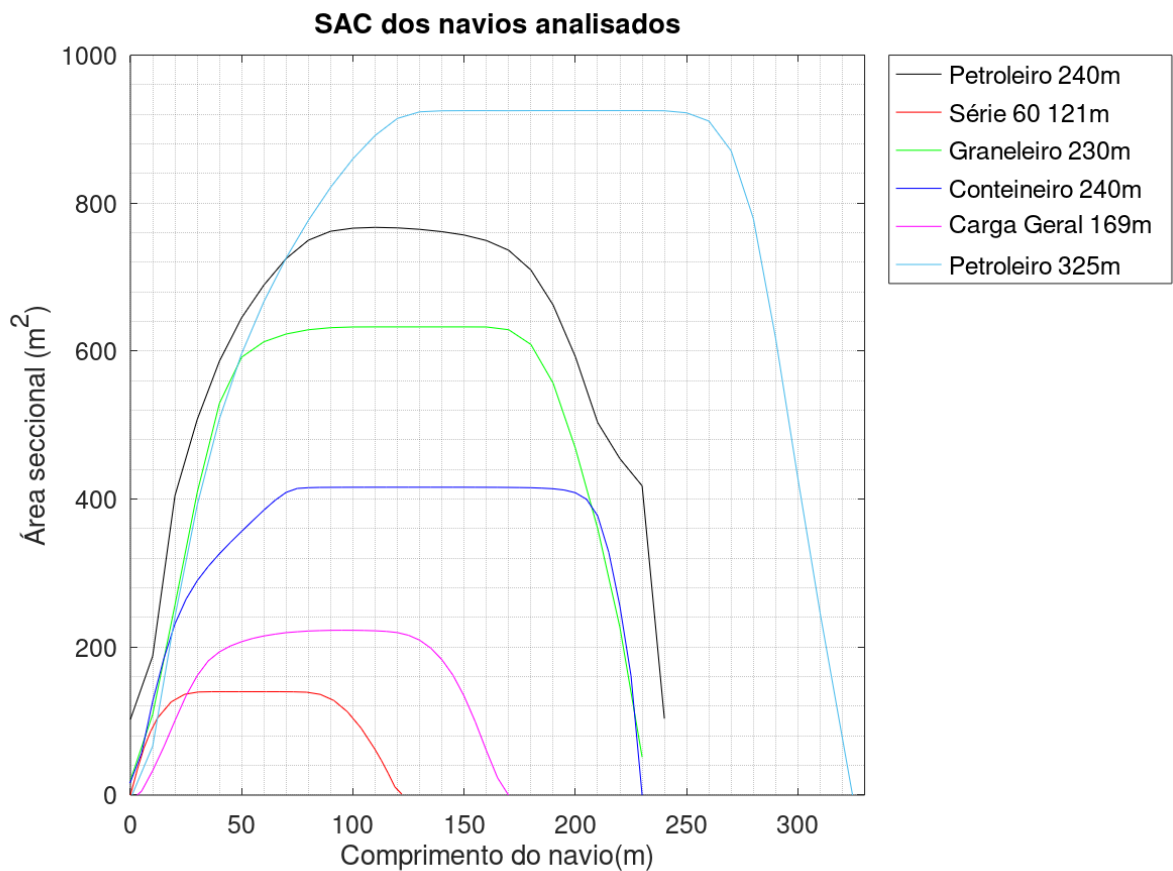
APÊNDICE C – ESTUDO DO GRAU DE POLINÔMIO UTILIZADO PARA A GERAÇÃO DAS SAC

O ajuste de uma curva que defina a SAC inserida pelo usuário ou obtida por meio da tabela de cotas é de suma importância para o cálculo da curva de flutuação. Porém é preciso escolher a ordem deste polinômio de tal sorte a ser capaz de melhor representar a curva com uma precisão de dispersão desejada. Neste caso foi utilizado o coeficiente de determinação, chamado também de R^2 , como medida de adequação da regressão realizada. Montgomery e Runger (2013) define que quanto mais próximo R^2 é de 1, em teoria, melhor se consegue prever os valores dependentes em função da mudança da variável independente, ou seja, melhor esta curva descreve os dados que lhe geraram. Para este trabalho, valor de coeficiente de determinação maior que 0,9999 foi estabelecido como o mínimo a ser obtido pelas curvas a serem ajustadas, utilizando a Equação 26.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i_{real}} - y_{i_{curva}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i_{real}} - \bar{y}_{i_{real}})^2} \quad (26)$$

Para fins de validação, foram selecionados seis curvas de área seccional, sendo um destes pertencente ao casco-mãe 4214W-B4 da Série 60, e os outros provenientes de navios *default* do *software Free!Ship*, de modelagem tridimensional de embarcações. Os navios variam em tipo, comprimento e possuem áreas seccionais de valores diversos, de forma a englobar todos os possíveis tipos de navio a serem inseridos no programa de projeto estrutural. A Figura 60 mostra as curvas SAC avaliadas para verificação do grau do polinômio.

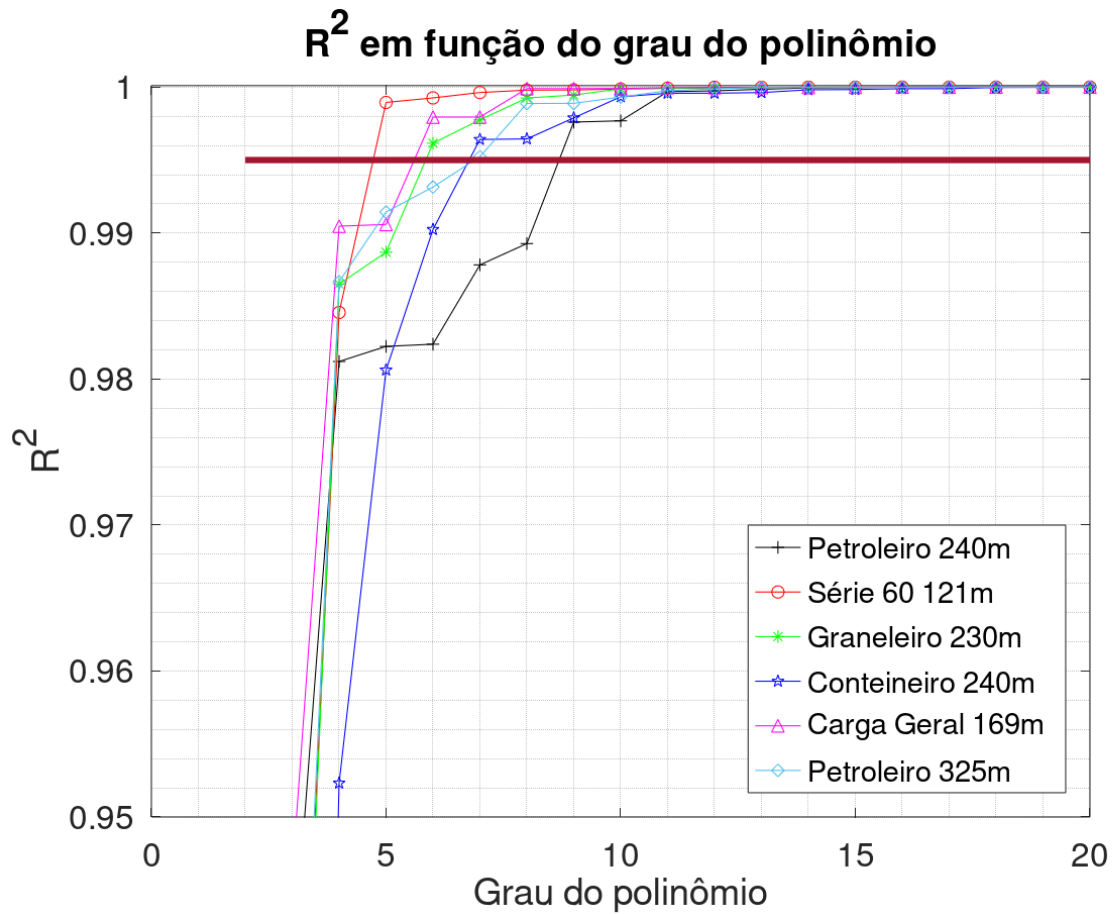
Figura 60 – Curvas SAC de entrada.



Fonte: Autora (2019).

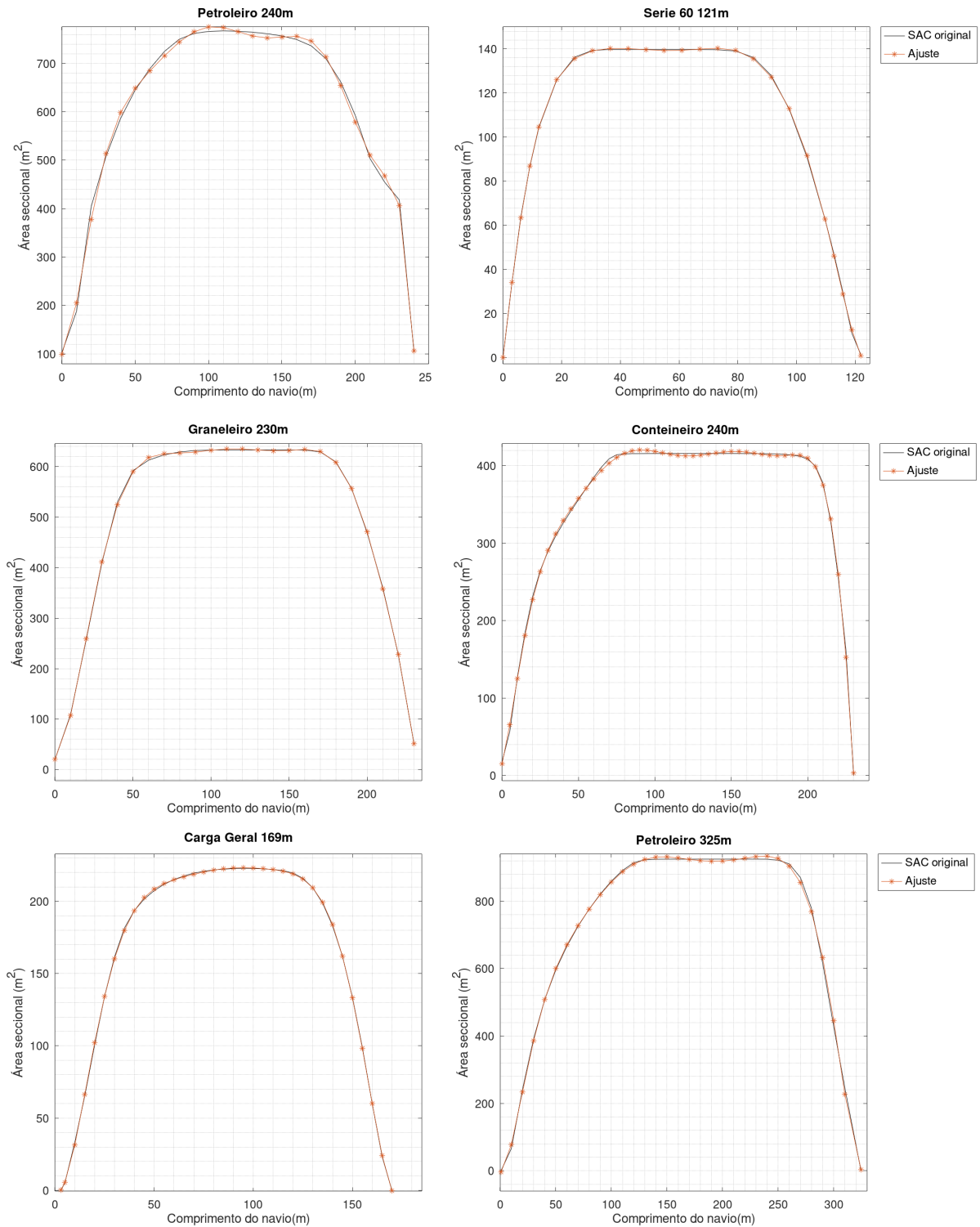
Utilizando o ajuste de curvas do programa, foram avaliadas regressões de primeiro grau até o grau $n-1$ de dados que se dispõe para cada um dos seis navios, onde se tem o coeficiente de determinação igual a 1, segundo Montgomery e Runger (2013). Após a obtenção do polinômio, avaliou-se as posições em que as SAC foram tomadas nos dados reais e então calculado o coeficiente R^2 para todas as embarcações, em todos os graus avaliados. Observa-se, pela Figura 61, que a partir da décima primeira, os valores começam a atender a precisão estabelecida.

Figura 61 – Coeficientes R^2 obtidos da décima até a vigésima ordem.



De forma a conferir os ajustes das curvas, foram plotadas ambas as curvas para cada navio, e os resultados estão presentes na Figura 62, onde pode-se verificar que praticamente ocorre sobreposição das curvas SAC.

Figura 62 – Comparação entre as SAC ajustadas e as reais.



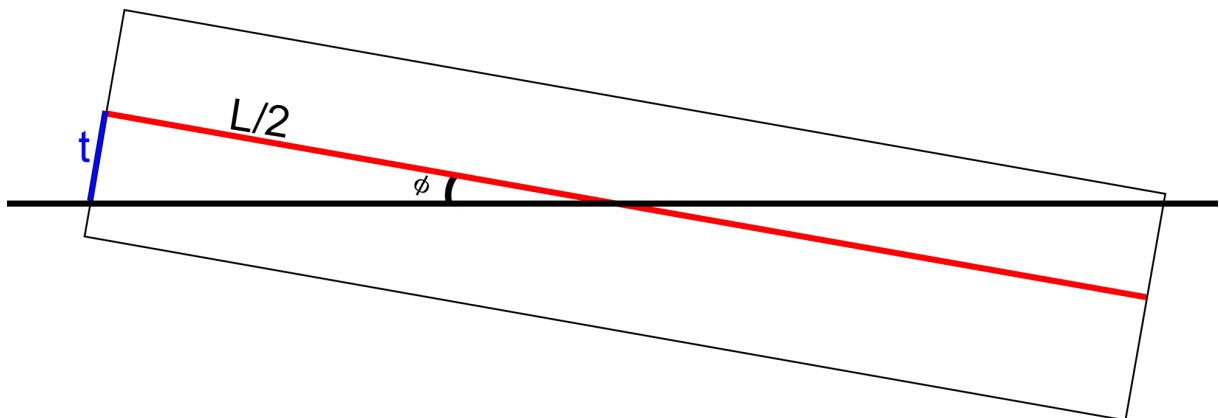
Fonte: Autora (2019).

A partir destas análises, foi decidido utilizar um polinômio de ordem dez para as regressões. Sendo assim, o usuário necessita ter pelo menos onze valores de área seccional para que a ferramenta ajuste a curva de forma adequada.

APÊNDICE D – ESTUDO DE ÂNGULOS DE TRIM

A partir dos mesmos vinte navios onde foi efetuada a avaliação de ocupação dos tanques de carga na geometria, apresentada no Apêndice A, foram avaliados ângulos de trim de 1, 5 a 10 e 15 graus e observou-se a submersão da popa t em metros de cada um dos navios, para cada ângulo. O valor t é resultado das relações geométricas entre o ângulo de trim e o comprimento da embarcação. Foi considerado que o centro de empuxo, sob o qual o navio gira em trim, está localizado na metade do comprimento total, conforme mostrado na Figura 63.

Figura 63 – Geometria utilizada para o cálculo dos ângulos de trim.



Fonte: Autora (2019).

O equacionamento adotado foi tal como a Equação 27.

$$t = \frac{L/2 \cdot \sin(\phi)}{\cos(\phi)} \quad (27)$$

Os resultados obtidos foram tais como expostos na Figura 64, a partir de 10 graus, começa a ocorrer submersão quase total da popa da embarcação, o que pode ocasionar em o propulsor estar para fora da água.

Figura 64 – Estudo dos ângulos de trim.

Nome do navio	Carga	Comprimento (m)	Pontal (m)	Submersão da popa (m)							
				1°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	15°
Stena Roro	Carros	192,500	9,500	1,680	8,421	10,116	11,818	13,527	15,245	16,971	24,915
Anne Sif	Químico	110,000	10,200	0,960	4,812	5,781	6,753	7,730	8,711	9,698	14,237
Toyo Line S.A.	Geral	105,500	10,500	0,921	4,615	5,544	6,477	7,414	8,355	9,301	13,655
Bunga Kerayong	Gerla	152,000	10,800	1,327	6,649	7,988	9,332	10,681	12,037	13,401	19,673
Korean Jade	Granel	143,000	13,000	1,248	6,255	7,515	8,779	10,049	11,324	12,607	18,508
Spring Bear	Container	141,000	13,460	1,231	6,168	7,410	8,656	9,908	11,166	12,431	18,250
Bunga Melati Dua	Químico	168,000	15,000	1,466	7,349	8,829	10,314	11,805	13,304	14,811	21,744
Maersk Glory	LPG	147,000	16,000	1,283	6,430	7,725	9,025	10,330	11,641	12,960	19,026
Superstars	Granel	186,000	16,600	1,623	8,136	9,775	11,419	13,070	14,730	16,398	24,074
Libra Ipanema	Geral	199,000	16,700	1,737	8,705	10,458	12,217	13,984	15,759	17,545	25,756
Amazon Virtue	Geral	218,000	18,200	1,903	9,536	11,456	13,384	15,319	17,264	19,220	28,216
Nissos Christiana	Petróleo	241,000	21,000	2,103	10,542	12,665	14,796	16,935	19,085	21,247	31,192
SKS Trinity	Ore-Bulk-Oil	234,000	23,200	2,042	10,236	12,297	14,366	16,443	18,531	20,630	30,286
Neo Energy	LPG	275,000	26,000	2,400	12,030	14,452	16,883	19,324	21,778	24,245	35,593
DHT Puma	Petróleo	322,000	29,400	2,810	14,086	16,922	19,768	22,627	25,500	28,389	41,676
Thalassa Mana	Container	352,000	29,850	3,072	15,398	18,498	21,610	24,735	27,876	31,034	45,559
Berge Stahl	Granel	328,000	30,200	2,863	14,348	17,237	20,137	23,049	25,975	28,918	42,453
MSC Anna	Container	383,000	30,500	3,343	16,754	20,127	23,513	26,914	30,331	33,767	49,571
B Whale	Ore-Bulk-Oil	327,000	31,000	2,854	14,304	17,185	20,075	22,978	25,896	28,829	42,323
Tugela	Carros	219,300	34,700	1,914	9,593	11,525	13,463	15,410	17,367	19,334	28,384

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE E – CASO SÉRIE 60 ANALÍTICO

Aqui serão expostos os dados referentes ao cálculo analítico do estudo de caso utilizado para verificação e validação da ferramenta.

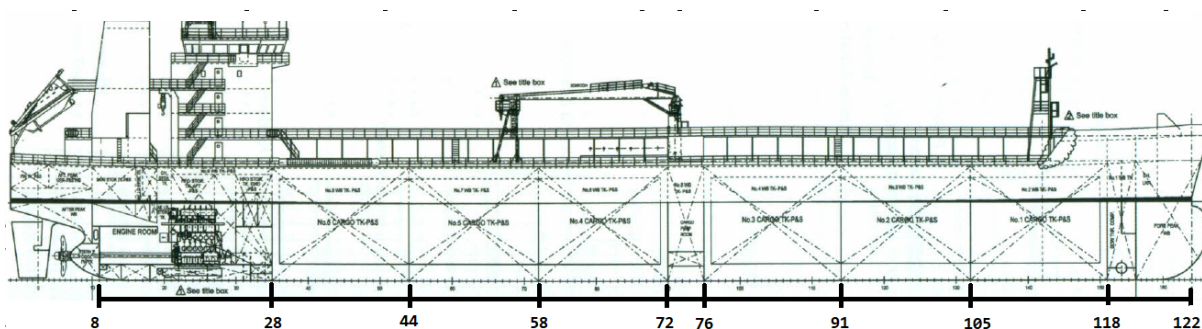
Figura 65 – Dimensões principais, pesos e posicionamento das cargas.

DADOS	Valor
Comprimento (m)	122,84
Boca (m)	18,76
Calado projeto (m)	7,50
Pontal (m)	11,24
DWT (t)	11420,00
CB de projeto	0,80
Peso leve (t)	2391,12
Peso superestrutura (t)	36,75
L superestrutura (m)	8 a 28
Peso motor (t)	103,95
Praça de maquinas (m)	8 a 28

Fonte: Autora (2019).

Estes pesos estão dispostos seguindo o arranjo da Figura 66.

Figura 66 – Arranjo do navio.



Fonte: Adaptado de Significant... (2013)

O carregamento adotado é dado pela Figura 70.

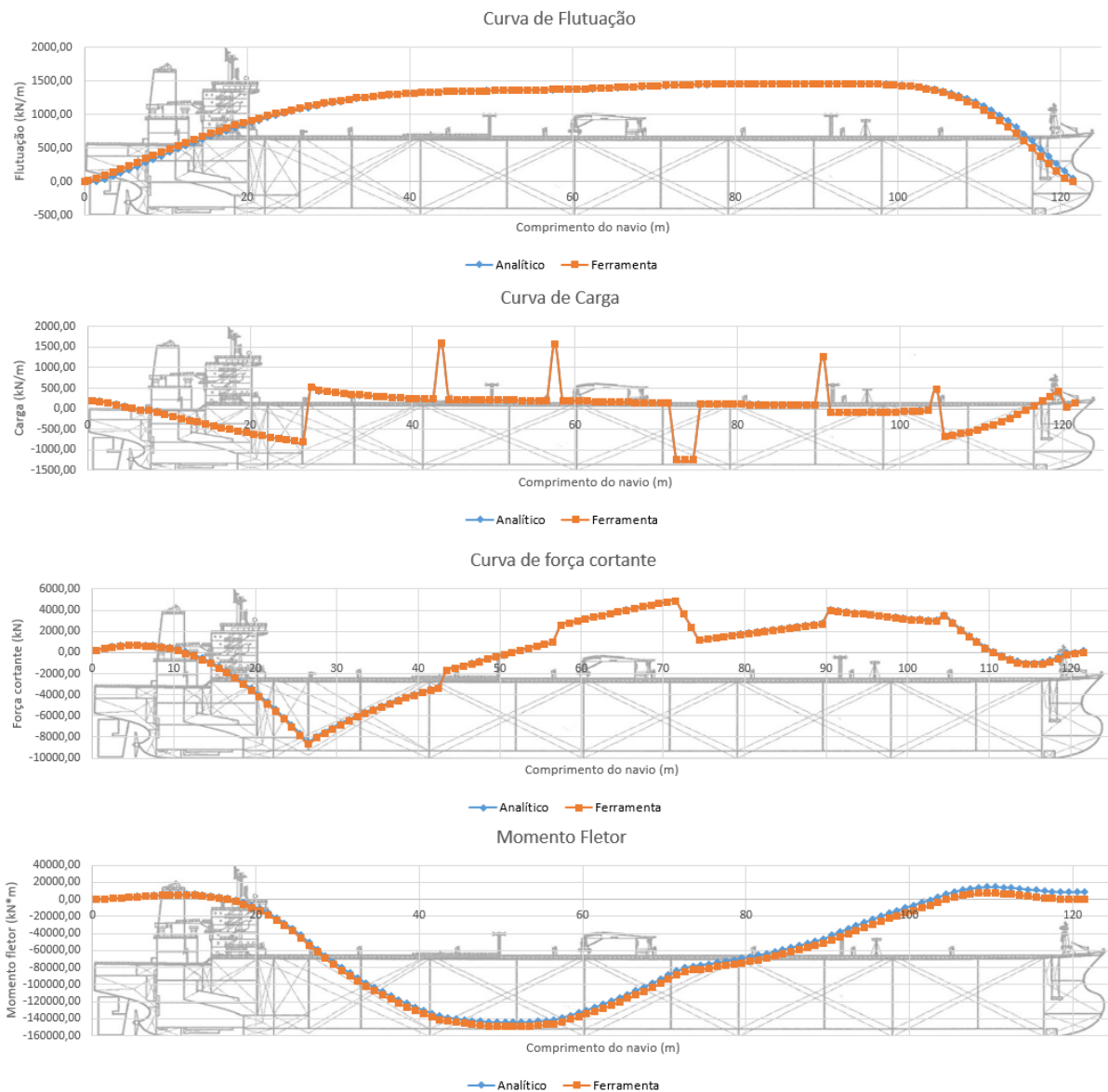
Figura 67 – Carregamento analisado.

Condição de carga				
Compartimento	X_i (m)	X_f (m)	Peso (t/m)	Peso (t)
Tanque 1	28,0	44,0	140,0	2240,0
Tanque 2	44,0	58,0	140,0	1960,0
Tanque 3	58,0	72,0	140,0	1960,0
Tanque 4	76,0	91,0	140,0	2100,0
Tanque 5	91,0	105,0	120,0	1680,0
Tanque 6	105,0	118,0	50,0	650,0

Fonte: Autora (2019).

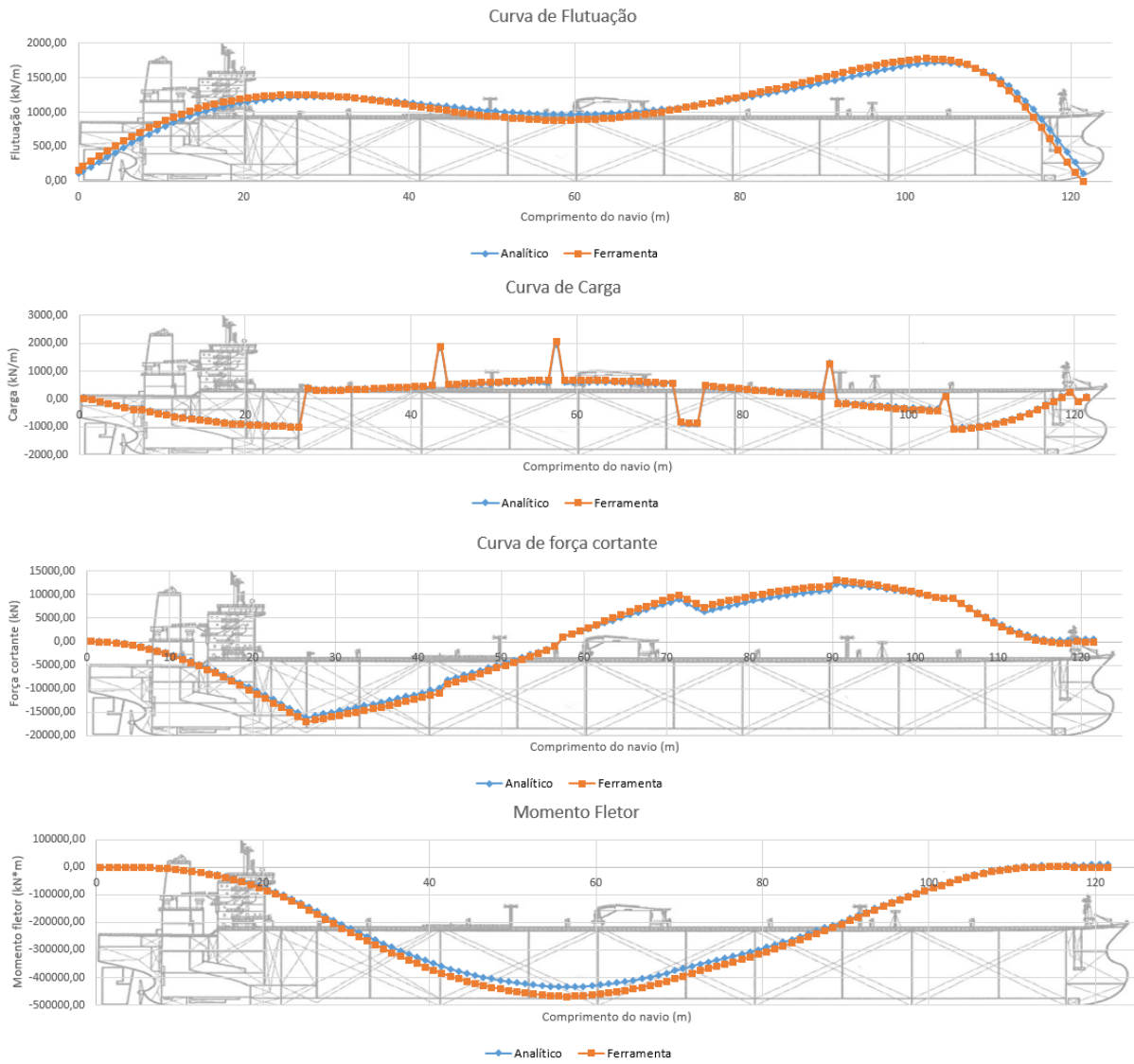
Os resultados obtidos constam no Capítulo 5.

Figura 68 – Curvas obtidas para águas calmas.



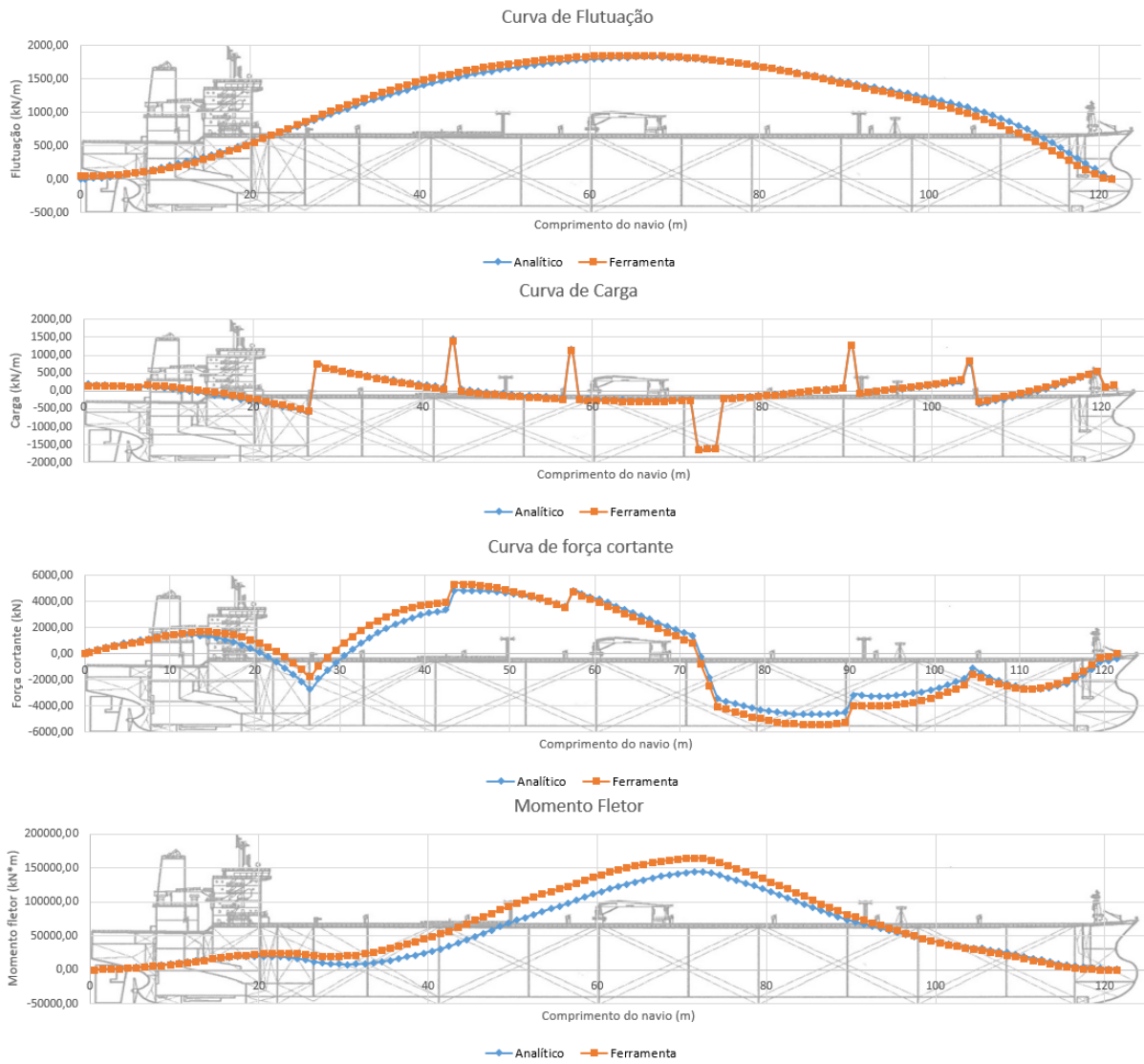
Fonte: Autora (2019).

Figura 69 – Curvas obtidas para tosamento.



Fonte: Autora (2019).

Figura 70 – Curvas obtidas para alquebramento.



Fonte: Autora (2019).

Figura 71 – SM calculado de forma analítica.

Elemento	Quantidade	Área (m ²)	Yq (m)	It (m ⁴)	Ip (m ⁴)	Itotal (m ⁴)
Convés	1	0,08	11,24	3,94	0,00	3,94
Fundo	1	0,11	0,01	1,71	0,00	1,71
Bojo	1	0,01	0,43	0,19	0,00	0,19
Costado	1	0,08	6,00	0,34	0,77	1,11
Duplo fundo	1	0,21	1,24	1,59	0,00	1,59
Leves convés	16	0,06	11,13	3,30	0,00	3,30
Leve costado	1	0,00	0,75	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	0,98	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	1,20	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	1,43	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	1,65	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	1,88	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	2,10	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	2,33	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	2,55	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	2,78	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	3,45	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	3,68	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	3,90	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	4,13	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	4,35	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	4,58	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	4,80	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	5,03	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	5,25	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	5,48	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	5,70	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	5,93	0,00	0,00	0,00
Leve costado	1	0,00	6,15	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	6,38	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	6,60	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	6,83	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	7,05	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	7,28	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	7,50	0,01	0,00	0,01
Leve costado	1	0,00	7,73	0,02	0,00	0,02
Leve costado	1	0,00	7,95	0,02	0,00	0,02
Leve costado	1	0,00	8,18	0,02	0,00	0,02
Leve costado	1	0,00	8,40	0,02	0,00	0,02
Leve costado	1	0,00	8,62	0,02	0,00	0,02
Leve costado	1	0,00	8,85	0,03	0,00	0,03
Leve costado	1	0,00	9,07	0,03	0,00	0,03
Leve costado	1	0,00	9,30	0,03	0,00	0,03
Leve costado	1	0,00	9,52	0,03	0,00	0,03
Leve costado	1	0,00	9,75	0,04	0,00	0,04
Leve costado	1	0,00	9,97	0,04	0,00	0,04
Leve costado	1	0,00	10,20	0,04	0,00	0,04
Leve costado	1	0,00	10,43	0,05	0,00	0,05
Leve costado	1	0,00	10,65	0,05	0,00	0,05
Leve costado	1	0,00	10,88	0,05	0,00	0,05
Leve costado	1	0,00	11,10	0,06	0,00	0,06
Leve fundo	13	0,03	0,09	0,48	0,00	0,48
Leve DF	14	0,03	1,16	0,27	0,00	0,27
	Linha neutra	3,991	m			
	Inércia Total	26,572	m ⁴			
	SM projetado	3,665	m ³		Margem de segurança	3%
	SM requerido	3,563	m ³			

Fonte: Autora (2019).

ANEXO A - NAVIO SAO DOMINGOS SAVIO

Nas páginas seguintes são apresentadas as informações sobre a embarcação semelhante, utilizada como base para a verificação dos resultados da ferramenta. O mesmo foi retirado de Significant. . . (2013), publicação que compila detalhes técnicos de algumas embarcações mercantes de todas as classes e tamanhos produzidas no ano anterior à publicação.



SAO DOMINGOS SAVIO: Large asphalt/bitumen tanker

Shipbuilder: **3. Maj Brodogradiliste, Rijeka, Croatia**
 Vessels name: **Sao Domingos Savio**
 Hull No: **717**
 Owner/operator: **DBT Shipping I LLC/ Wisby Tankers AB**
 Country: **Sweden**
 Designer: **3. Maj Brodogradiliste Croatia**
 Model test establishment used: **Brodarski Institut Zagreb Marshall Islands**
 Flag: **Marshall Islands**
 IMO number: **9492311**
 Total number of sister ships already completed (excluding ship presented): **3**
 Total number of sister ship still on order: **nil**

emission of polluting substances in the sea and the air. The vessel has space reserved for the future installation of a ballast water treatment plant to add to the vessel's environmentally friendly qualities.

TECHNICAL PARTICULARS

Length oa: 133.28m
 Length bp: 128.20m
 Breadth moulded: 23.00m
 Depth moulded
 To main deck: 12.40m
 Width of double skin
 Side: 1.25m
 Draught
 Scantling: 8.618m
 Gross: 10,830gt
 Displacement: 21,282tonnes
 Lightweight
 Scantling: 14,936
 Block co-efficient: 0.815
 Speed, service: 13.62knots
 Cargo capacity
 Liquid volume: 14,900m³
 Bunkers
 Heavy oil: 634m³
 Diesel oil: 100m³
 Water ballast: 5,030m³
 Daily fuel consumption
 Main engine only: 18tonnes/day
 Auxiliaries: 2.5tonnes/day
 Classification society and notations: BV I Oil Tanker, Asphalt carrier (max. cargo temp. 250°C) Chemical Tanker unrestricted navigation
 % high-tensile steel used in construction: 10%
 Main engine
 Model: Wärtsilä 6X35
 Manufacturer: 3. Maj Engines & Cranes
 Number: 1
 Type of fuel: HFO/MDO
 Output of each engine: 4,500kW
 Propeller
 Material: Ni-Al-Bronze
 Designer/manufacturer: Berg
 Number: 1
 Fixed/controllable pitch: Controllable
 Diameter: 4.6m
 Speed: 140rpm
 Main-engine driven alternators
 Number: 1
 Make/type: Uljanik TESU
 Output/speed of each set: 624kW x 1,800rpm
 Diesel-driven alternators
 Number: 3
 Engine make/type: Wärtsilä/4L20
 Type of fuel: HFO/MDO
 Output/speed of each set: 680kW x 900rpm
 Alternator make/type: FENXI 1 FC&TFJ6
 Output/speed of each set: 806kVA x 900rpm
 Boilers
 Number: 3
 Type: TOH2200V40, TOH2200V40, EGH 719V40

Make: Gesab
 Output, each boiler: 2,200kW, 2,200kW, 500kW
 Other cranes
 Number: 1
 Make: 3. Maj- MacGregor
 Type: HH160-520-2
 Tasks: Hose handling
 Performance: 50KN - 20m
 Mooring equipment
 Number: 6
 Make: Vulkan - NOVA
 Type: Hydraulic 100KN x 12m/min
 Special lifesaving equipment
 Number of each and capacity: 1 x 22 persons
 1 x 6 persons
 Make: Greben
 Type: FFL- 28FP, RB-4.3
 Cargo tanks
 Number: 12
 Grades of cargo carried: Asphalt/bitumen, crude oil & oil products, coal tar pitch, coal tar naphtha solvent, coal tar creosote
 Cargo pumps
 Number: 2
 Type: Twin screw, hydraulically driven, W8.52-75/2
 Make: EPS
 Capacity: 600m³/h
 Cargo control system
 Make: Kongsberg
 Type: K-gauge CLS GL-300
 Ballast control system
 Make: Kongsberg
 Complement
 Crew: 17
 Bow thruster
 Make: Berg
 Number: 1
 Output: 500kW
 Bridge control system
 Make: Raytheon Anschütz
 One-man operation: Yes
 Fire detection system
 Make: Consilium
 Fire extinguishing systems
 Engine room: Wilhelmsen/ CO₂
 Radars
 Number: 2
 Make: Raytheon Anschütz
 Model: Synapsis multifunctional workstations
 Integrated bridge system
 Make: Raytheon Anschütz
 Model: Synapsis
 Waste disposal plant
 Incinerator: Atlas/ 200 SL WS P
 Waste compactor: Delitek Marine/ DT-220PN
 Sewage plant: Brodopur/ BS 20
 Contract date: 7 September 2010
 Launch/float-out date: 30 June 2012
 Delivery date: 1 March 2013

Sao Domingos Savio is one of the largest asphalt/bitumen tankers constructed to date for Swedish shipowner Wisby Tankers that was delivered in March from Croatian shipyard 3 Maj Brodogradiliste. *Sao Domingos Savio* is the second vessel out of four in series delivered to the owner with the first ship delivered in 2012.

Although the vessel has about 15,000tonnes deadweight only, it is classed as one of the largest asphalt / bitumen carriers with independent cargo tanks in the world. Designed by 3.MAJ design office, besides asphalt/bitumen, the vessel can transport oil, oil products and chemicals as specified in compliance with latest IMO rules and regulations. The vessel is intended to transport asphalt/bitumen and similar cargoes in independent cargo tanks heated to a maximum of 250°C. The vessel's cargo tanks are made of high tensile steel and insulated at outside areas.

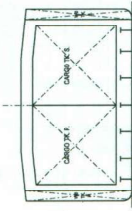
After extensive strength, thermal and finite element analysis (FEM) were carried out, independent cargo tanks (two blocks of six tanks each) were placed on more than 200 special supports with Tenmat Feroform pads, which are used as a thermal insulation against the supporting ship structure and as a sliding area to enable expected thermal expansion of the tanks. A set of anti-pitching, anti-rolling and anti-floating keys have also been fitted.

Considerable attention has been paid to the effectiveness of the tank insulation system, so that in the event of any technical problems the cargo temperature can be maintained sufficiently to keep the cargo fluid and the cargo can be pumped ashore. The body lines of the vessel have been based on a previous vessels that 3.Maj have constructed with further optimisation on these body lines, which were checked by the Ship Model Basin Brodarski Institut, Zagreb and proven during the vessel's trials.

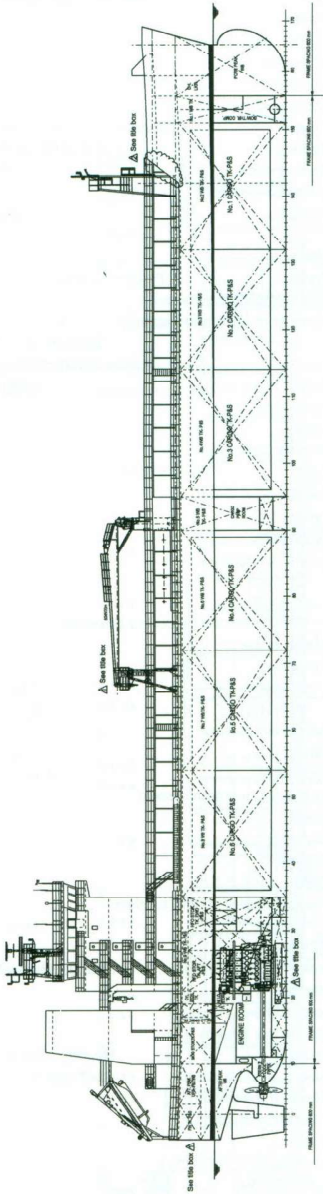
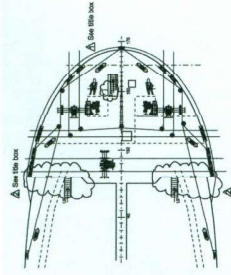
The main engine is low speed Wärtsilä 6X35 with power of 4,500kW at 144rpm, built in 5.MAJ Engines & Cranes Factory. This engine is first of its type in the world, which has received type approval. The Wärtsilä 6X35 is an electronically controlled main engine complying with NOx Tier II requirements, along with this the vessel is fitted with low sulphur tanks (for operation in SECA) with double skin fuel oil tanks that fully comply with IMO regulations for oil fuel tank protection.

Sao Domingos Savio meets with Bureau Veritas' (BV) CLEANSHIP (C) additional class notation. The notation is assigned to ships fitted with the latest equipment and arrangements enabling them to control and limit the

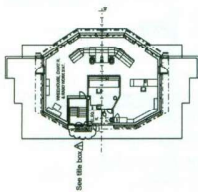
SAO DOMINGOS SAVIO



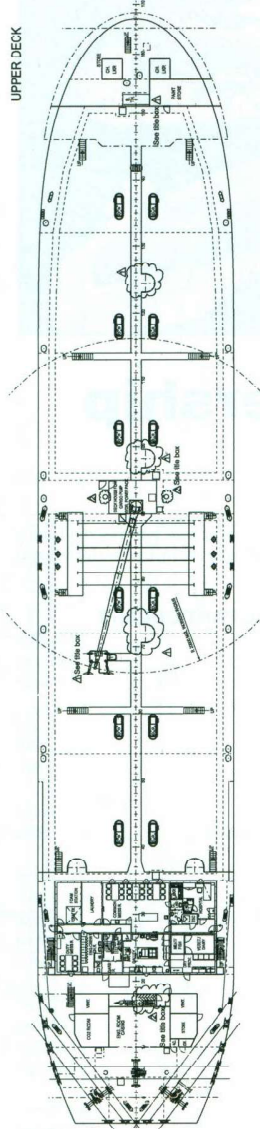
FORECASTLE DECK



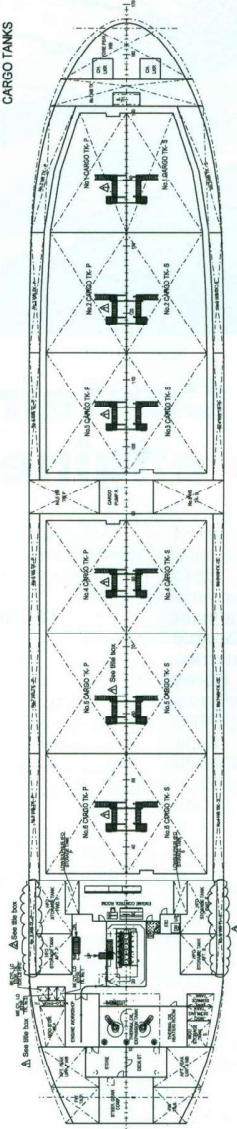
WHEELHOUSE



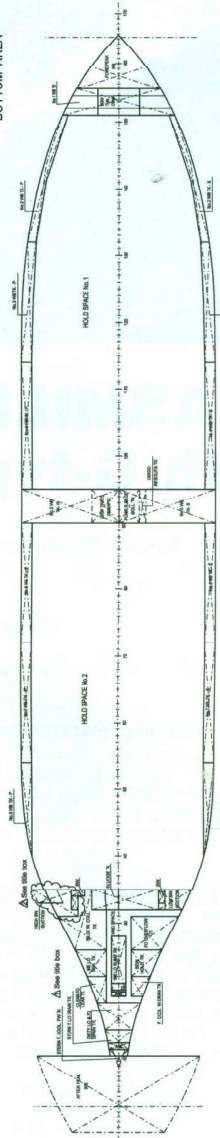
UPPER DECK



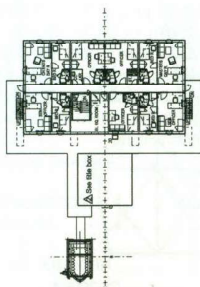
CARGO TANKS



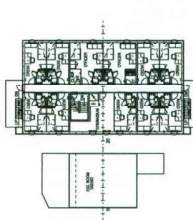
BOTTOM AREA



3rd POOP DECK



2nd POOP DECK



1st POOP DECK

