

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

BRIAN CEZAR DA COSTA DESORDI

PROJETO ESTRUTURAL BASEADO EM SOCIEDADE CLASSIFICADORA DE
UMA EMBARCAÇÃO FLUVIAL

Joinville

2023

BRIAN CEZAR DA COSTA DESORDI

PROJETO ESTRUTURAL BASEADO EM SOCIEDADE CLASSIFICADORA DE
UMA EMBARCAÇÃO FLUVIAL

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

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2023

BRIAN CEZAR DA COSTA DESORDI

PROJETO ESTRUTURAL BASEADO EM SOCIEDADE CLASSIFICADORA DE
UMA EMBARCAÇÃO FLUVIAL

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

Joinville (SC), 30 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador/Presidente

Dr. Vitor Takashi Endo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Dedico este trabalho a minha mãe que acreditou em mim quando eu não o fiz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família pelo suporte, carinho e apoio durante todo o período de graduação.

Agradeço a todos os professores da UFSC, em especial ao orientador desse trabalho Thiago Pontin Tancredi pela paciência e pela oportunidade.

Agradeço também a Mineradora São Gabriel pelo espaço cedido e por permitir que umas de suas embarcações servisse como objeto de estudo para esse trabalho.

RESUMO

O projeto estrutural é uma atividade muitas vezes negligenciada na construção de embarcações fluviais, seja pela complexidade das normas técnicas, seja pela falsa ideia de economia quanto à não aquisição de um projeto de engenharia, ou ainda, pelo simples fato de que grande parte dessas embarcações são construídas de forma artesanal com base apenas em conhecimentos empíricos. As consequências para os armadores que optam por construir uma embarcação sem o projeto estrutural podem ir desde o superdimensionamento da estrutura, passando por um desequilíbrio que pode exigir a utilização de lastros, chegando até, em casos mais grave, a uma resistência estrutural insuficiente, o que pode ocasionar danos severos ao casco. O presente trabalho visa realizar o projeto estrutural de uma embarcação fluvial com base em regras de sociedades classificadoras e confrontar os resultados com aqueles observados em uma embarcação já construída e em operação, comparando as espessuras das chapas, a escolha e a distribuição dos reforçadores e, por fim, a eficiência do projeto estrutural. Uma planilha eletrônica foi desenvolvida para automatizar as etapas deste tipo de projeto estrutural, permitindo que, apenas com os parâmetros geométricos básicos da embarcação e a distribuição de pesos a bordo, o engenheiro projetista possa ter um esboço do arranjo dos reforçadores, bem como os valores de espessura de chapa e as propriedades da seção mestra. O estudo de caso da Draga Luce, que pertence à empresa São Gabriel Mineração, localizada em Garuva, SC, apresentado nesse texto, mostrou que um projeto baseado em sociedade classificadora poderia reduzir o peso da embarcação em 38%, reduzindo a espessura de chapa em todas as regiões da embarcação e reorganizando a distribuição dos reforçadores.

Palavras-chave: Projeto estrutural. Sociedade classificadora. Viga navio. Embarcação fluvial. Escantilhamento.

ABSTRACT

The structural project is often in the background in the construction of a river vessel, either due to the complexity and difficulty in interpreting the rules of classification societies, the false idea of economy regarding the non-acquisition of an engineering project or simply by the fact that large part of these vessels is handcrafted based only on empirical knowledge. The consequences for shipowners who choose to build a vessel without the structural project can range from an oversizing of the thicknesses used in the plates, an imbalance of forces that makes it necessary to add ballast to make navigation viable reducing efficiency, to a more serious case, where the vessel can simply break down in a critical condition of sea and load. The present work aims to carry out the structural design of a river vessel based on a classification society and compare the results with a vessel already built and in operation in order to compare the thicknesses of plates, choice and distribution of stiffeners in order to reduce costs in terms of material acquisition.

Keywords: Structural project. Classification society. Hull girder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de espiral de Evans	14
Figura 2 - Sistema de coordenadas.....	18
Figura 3 - Cargas pontuais como massas concentradas.....	20
Figura 4 - Cargas pontuais tratadas como cargas distribuídas.....	20
Figura 5 - Exemplo da curva de pesos ao longo da embarcação	20
Figura 6 - Fluxograma do processo iterativo de equilíbrio da embarcação ..	22
Figura 7 - Onda senoidal de Tosamento	23
Figura 8 - Onda senoidal de Alquebramento	23
Figura 9 - Exemplo de curva de carga de uma embarcação	24
Figura 10 - Típico arranjo estrutural de uma embarcação de carga	26
Figura 11 – Típico painel estrutural de uma embarcação.....	26
Figura 12 - Perfil + chapa colaborante.....	28
Figura 13 - Unidade de chapeamento	29
Figura 14 - Exemplo de cavernamento transversal e longitudinal	30
Figura 15 - Gráfico GII-7.....	31
Figura 16 - Metodologia do trabalho.....	32
Figura 17 - Interface pesos leves e consumíveis.....	36
Figura 18 –Alterações necessárias para cada condição de carga	37
Figura 19 - Recorte dos diferentes botões presente na planilha	38
Figura 20 – Resultados gráficos para a condição de carga analisada	38
Figura 21 – Recorte dos dados de saída apresentados	39
Figura 22 – Gráficos de análise da embarcação em função da carga.....	40
Figura 23 - Variáveis do projeto estrutural I.....	45
Figura 24 - Variáveis do projeto estrutural II.....	46
Figura 25 - Variáveis do projeto estrutural III.....	46
Figura 26 - Parâmetro S para o cavernamento transversal	49
Figura 27 - Parâmetro S para o cavernamento longitudinal	50
Figura 28 - Localização da empresa São Gabriel Mineração	54
Figura 29 - Rio São João.....	55
Figura 30 - Draga Luce.....	56

Figura 31 - Consumíveis e demais pesos de forma gráfica.....	57
Figura 32 - Curva de pesos 100% de carga e consumíveis	58
Figura 33 - Curva de flutuação 100% de carga e consumíveis	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de peso leve da embarcação	56
Tabela 2 - Distribuição dos consumíveis e carga	57
Tabela 3 - Dados sintetizados das condições de equilíbrio	59
Tabela 4 - SM mínimo e requerido para a draga	60
Tabela 5 - Variáveis de projeto.....	60
Tabela 6 - Espessuras de chapa selecionadas	61
Tabela 7 - SM próprio mínimo determinado pela norma.....	61
Tabela 8 - Dados da embarcação para o SM projetado	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

L	Comprimento da embarcação (m)
B	Boca da embarcação (m)
D	Pontal da embarcação (m)
T	Calado da embarcação (m)
LCB	Posição Longitudinal do centro de flutuação (m)
LCG	Posição longitudinal do centro de gravidade (m)
ABS	American Bureau of Shipbuilding
SM	Módulo de seção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. SISTEMA DE CORDENADAS	18
2.2 ESTRUTURA PRIMÁRIA	19
2.2.1 Equilíbrio da viga-navio	19
2.2.2 Influência das ondas	22
2.3 ESTRUTURA SECUNDÁRIA	25
2.4 ESTRUTURA TERCIÁRIA	29
2.4.1 Tipo de cavernamento	30
3. METODOLOGIA	32
4. DESENVOLVIMENTO: PLANILHA DE EQUILÍBRIO VIGA-NAVIO	35
4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO	35
4.2 DADOS DE SAÍDA.....	38
4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DA CAPACIDADE DE CARGA.....	39
5. PROJETO DA SEÇÃO MESTRA	41
5.1 MOMENTO FLETOR.....	42
5.2 MÓDULO DE RESISTÊNCIA MÍNIMO E REQUERIDO.....	43
5.3 VÁRIÁVEIS DE PROJETO.....	44
5.4 ESPESSURA DE CHAPA E SM DOS REFORÇADORES.....	47
5.4.1 Módulo de resistência dos reforçadores	47
5.4.2 Espessura mínima de chapa costado	48
5.4.3 Espessura mínima de chapa convés	50
<u>5.4.3.1 Com cavernamento transversal:.....</u>	<u>50</u>
<u>5.4.3.2 Com cavernamento longitudinal:</u>	<u>50</u>
5.4.4 Espessura mínima de chapa fundo:	51
<u>5.4.4.1 Com cavernamento transversal:.....</u>	<u>51</u>
<u>5.4.4.2 Com cavernamento longitudinal:</u>	<u>51</u>
5.4.5 Espessura mínima de chapa trincaniz e bojo	51

5.5 LINHA NEUTRA E SM PROJETADO	52
6. ESTUDO DE CASO	54
7. CONSIDERAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
8. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	66

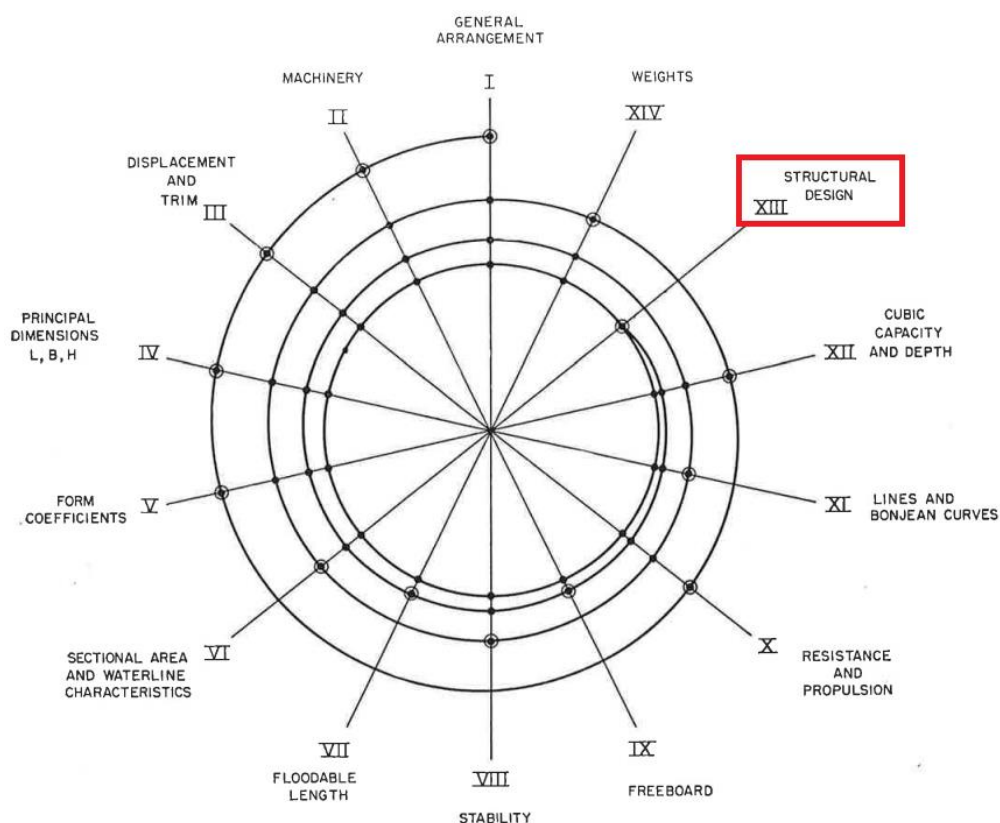
1. INTRODUÇÃO

A concepção de uma embarcação pode ser vista como um processo contínuo e cíclico, pois diferentes áreas do projeto interagem entre si, exercendo influência umas nas outras tal que de forma que, a cada iteração, os resultados obtidos devem ser analisados e as hipóteses adotadas devem ser revistas (AUGUSTO, 2004).

Por se tratar de um processo iterativo, projetos navais são comumente representados por uma espiral, onde as etapas são repetidas, até que se atinja a convergência da solução. Essa representação foi proposta por Evans (1959), sendo popularmente conhecida como Espiral de Evans.

Na Figura 1 é mostrada uma espiral de projeto, onde a etapa do projeto estrutural, foco deste trabalho, é destacada por um quadrado vermelho.

Figura 1 - Exemplo de espiral de Evans



Fonte: Evans (1959, p. 672).

A análise estrutural é umas das etapas mais importantes de um projeto, pois visa garantir a integridade do casco, motivo pelo qual todas as hipóteses utilizadas no dimensionamento estrutural tendem a ser conservadoras (AUGUSTO, 2004).

Segundo Tancredi (2004), a principal função de uma estrutura é servir como suporte material para a transmissão de esforços, viabilizando os sonhos estéticos e funcionais de arquitetos e projetistas.

Em contrapartida, o engenheiro deve procurar soluções eficazes que sejam capazes não apenas de suportar as condições críticas as quais a embarcação estará sujeita, mas também, apresentar um baixo peso estrutural, otimizando o uso do material presente na estrutura (AUGUSTO, 2004).

Assim, pode-se dizer que a otimização estrutural consiste na busca pela maior eficiência da estrutura, cujo valor corresponde à razão entre a máxima carga suportada e o peso da estrutura (CHAVES; TANCREDI; ANDRADE, 2013).

Lamb (2004), sintetiza o assunto estabelecendo que o projeto estrutural visa uma embarcação confiável nas diferentes condições de operação, ao mesmo tempo em que seja econômica para ser construída e operada. Dessa forma, todas as hipóteses adotadas no início do projeto podem ser revistas uma vez que o peso da embarcação é inicialmente estimado considerando um projeto estrutural eficiente, que, eventualmente, nem sempre é viável.

O estudo da eficiência de estruturas flutuantes, tem sido tópico de diversos trabalhos (MASO, 2022; DAMIENSAGE; MELIN, 2012), pois, conforme descrito por Chaves et al. (2013), a redução no peso da embarcação impacta diretamente no custo de fabricação, nos custos operacionais e no desempenho geral da embarcação.

Para a realização do projeto estrutural são necessários dados de entrada referentes à diversas outras áreas do projeto (formas do casco, dimensões, posição das anteparas, distribuição de pesos a bordo etc.) fazendo com que essa etapa, em geral, seja uma das últimas a ser realizada, mesmo que o projeto estrutural possa ser considerado a espinha dorsal da embarcação (AUGUSTO, 2004).

O projeto estrutural baseado em sociedade classificadora apresenta um sequenciamento próprio onde, uma vez definidas as linhas do casco e o arranjo de pesos a bordo, realiza-se o projeto da seção mestra da embarcação, a análise de tensões e, por fim, o cálculo do fator de segurança existente no projeto.

No entanto, projetos de embarcações de menor porte, são muitas vezes elaborados de forma empírica, sem o rigor de uma norma, sujeitando a embarcação

a riscos estruturais não previstos, ou mesmo, a superdimensionamentos que oneram o custo de produção e de operação da embarcação.

Apresentada a problemática associada ao projeto de estruturas navais, o objetivo deste trabalho é realizar o projeto estrutural de uma embarcação fluvial, baseado em sociedade classificadora e, confrontar os resultados obtidos com uma embarcação em operação, de modo a sugerir possíveis melhorias no que diz respeito ao arranjo estrutural e, conseqüentemente, ao peso do casco.

A embarcação estudada neste trabalho pertence à empresa São Gabriel Mineração e está localizada no município de Garuva, SC. Trata-se de uma embarcação do tipo draga com 24,40 m de comprimento, 8 m de boca e 1,5 m de pontal e, cujo projeto estrutural foi realizado de forma empírica baseado nos conhecimentos da equipe de manufatura.

1.1 OBJETIVOS

A fim de analisar e propor melhorias para o projeto estrutural de uma embarcação fluvial real, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar o projeto estrutural baseado em sociedade classificadora de uma embarcação do tipo draga e confrontar os resultados com aqueles observados em uma embarcação real.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para a efetivação do objetivo geral, busca-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma planilha para o dimensionamento estrutural de forma automatizada utilizando a norma ABS (2019);
- Considerando a embarcação real escolhida para o estudo de caso, coletar as dimensões, linhas de casco, distribuição de pesos e arranjo;
- Analisar o equilíbrio da viga navio e determinar a distribuição das tensões primárias para as diferentes condições de carga;
- Definir a posição da seção mestra e o momento fletor atuante na mesma;
- Realizar o projeto da seção mestra;
- Avaliar os resultados obtidos no estudo de caso, comparando-os com aqueles observados na embarcação real.

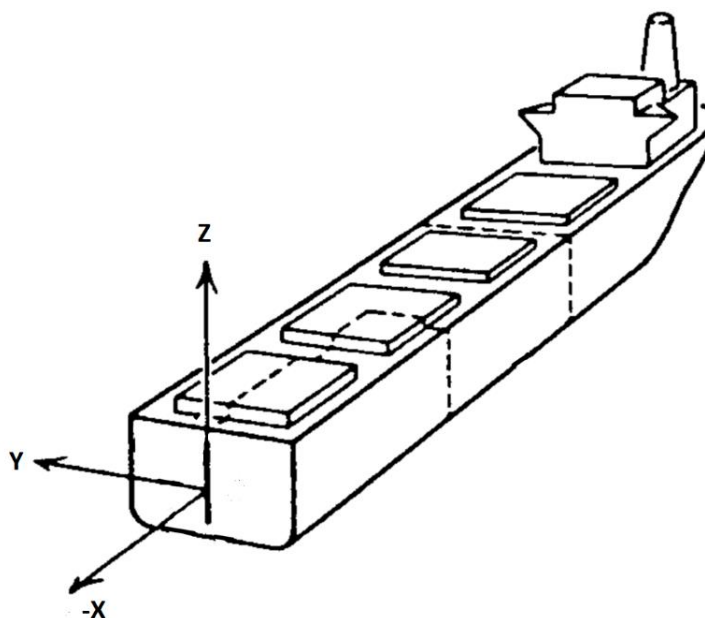
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta o arcabouço teórico necessário para a realização do projeto estrutural de uma embarcação, bem como as hipóteses adotadas em cada etapa. Por fim, apresenta-se uma discussão sobre a análise desacoplada das tensões atuantes nos diferentes elementos que constituem a estrutura de um navio.

2.1. SISTEMA DE CORDENADAS

A definição de um sistema de coordenadas é fundamental para localizar as diferentes regiões da embarcação no espaço tridimensional (AUGUSTO 2004). Usualmente, o eixo X corresponde à direção longitudinal da embarcação, sendo positivo da popa para a proa e tendo como origem o espelho de popa. Já o eixo Z corresponde à direção vertical, sendo positivo no sentido da quilha para o convés. Por fim, o eixo Y corresponde a direção transversal da embarcação, sendo positivo no sentido de boreste para bombordo (Figura 2).

Figura 2 - Sistema de coordenadas



Fonte: Adaptado de Maso (2022).

2.2 ESTRUTURA PRIMÁRIA

A análise de uma estrutura, usualmente, pode ser dividida em efeitos globais e efeitos locais. A análise global de uma estrutura naval costuma ser denominada Análise Primária da embarcação e considera o navio como uma viga (denominada *viga navio*) cujo comprimento é igual ao do navio analisado (TANCREDI, 2004).

Ainda segundo Tancredi (2004), a Teoria Simples de Viga fornece resultados precisos para embarcações com coeficientes L/B e L/D maiores que oito. Para coeficientes menores, o comportamento estrutural começa a sofrer influência das deflexões ocorridas nas direções verticais e transversais do navio.

No entanto, diversas sociedades classificadoras consideram que os resultados utilizando a teoria de viga navio são satisfatórios quando os coeficientes L/B e L/D são maiores que cinco (ABS, 2019).

2.2.1 Equilíbrio da viga-navio

Conforme discutido por Hibeller (2004), sistemas estruturais somente desenvolvem tensões e deformações quando o conjunto de forças e momentos está em equilíbrio, pois, do contrário, o sistema desenvolverá movimento.

Tancredi (2004) afirma que um navio estará em equilíbrio se, e somente se, duas condições forem satisfeitas. A primeira condição consiste na necessidade de o empuxo ser igual ao peso da embarcação. Já a segunda condição diz respeito à posição do centro de gravidade (LCG) e do centro de flutuação (LCB), que devem pertencer a um mesmo eixo vertical da embarcação.

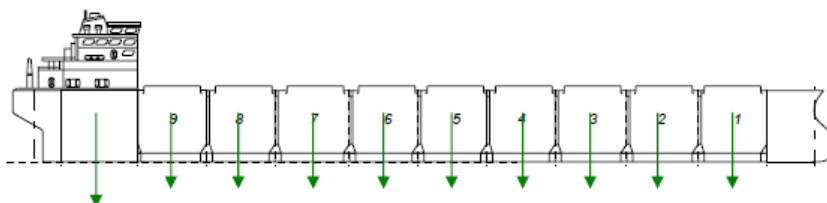
A primeira etapa para a determinação da condição de equilíbrio do navio consiste no levantamento da curva de pesos. Nesse caso, além do peso proveniente do casco, representado pela área de cada seção da viga navio, a viga deve ser carregada com cargas pontuais a fim de representar a praça de máquinas, as cargas a bordo, os tanques de lastro cheios, as obras mortas ou quaisquer outros elementos de massa significativa (TANCREDI, 2004).

As cargas pontuais podem ser modeladas de duas formas. A primeira, mais simples, trata as cargas pontuais como massas concentradas localizadas no LCG de cada carga pontual a ser modelada (TANCREDI, 2004). A segunda, mais realista, trata

as cargas pontuais como uma distribuição uniforme de massa aplicada ao longo do comprimento do elemento representado (TANCREDI, 2004).

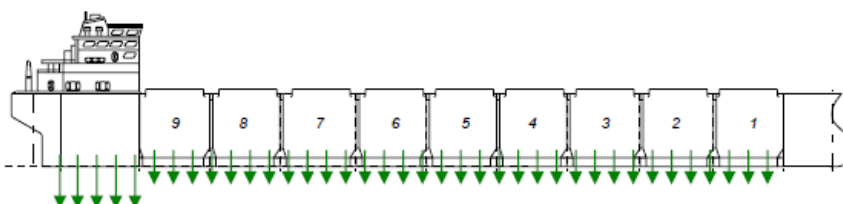
Na Figura 3 é ilustrada a modelagem das cargas pontuais como massas concentradas, enquanto na Figura 4 é ilustrada a modelagem dessas mesmas cargas considerando a abordagem de cargas distribuídas ao longo dos elementos.

Figura 3 - Cargas pontuais como massas concentradas



Fonte: Tancredi (2004).

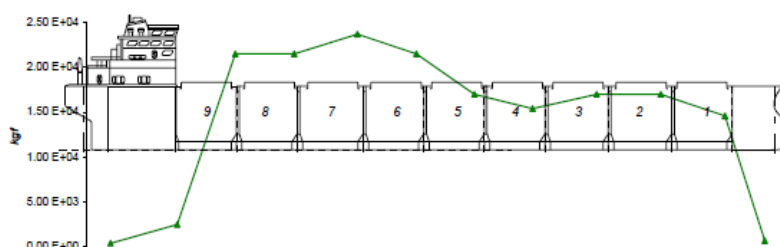
Figura 4 - Cargas pontuais tratadas como cargas distribuídas



Fonte: Tancredi (2004).

Combinando-se a curva de peso distribuído com a curva das cargas pontuais fica determinada a curva de peso atuante na embarcação (Figura 5).

Figura 5 - Exemplo da curva de pesos ao longo da embarcação



Fonte: Tancredi (2004).

Já a distribuição de flutuação só pode ser obtida pela integração do volume submerso de cada seção ao longo do comprimento. Na prática, para se determinar a curva de flutuação deve se levantar as curvas de Bojean, as quais descrevem a área

submersa de uma dada baliza em função do calado existente naquela baliza (TANCREDI, 2004).

Ainda sobre esse processo, Tancredi (2004) esclarece que a verificação do equilíbrio de uma embarcação pode ser feita de modo contínuo, integrando as equações que descrevem as curvas de peso e de flutuação, ou em intervalos discretos (como compartimentos), embora, na prática, o processo seja sempre feito usando integração numérica.

Como apresentado anteriormente, a embarcação estará equilibrada apenas se duas condições foram satisfeitas:

$$Peso = flutuação \quad (1)$$

$$LCB = LCG \quad (2)$$

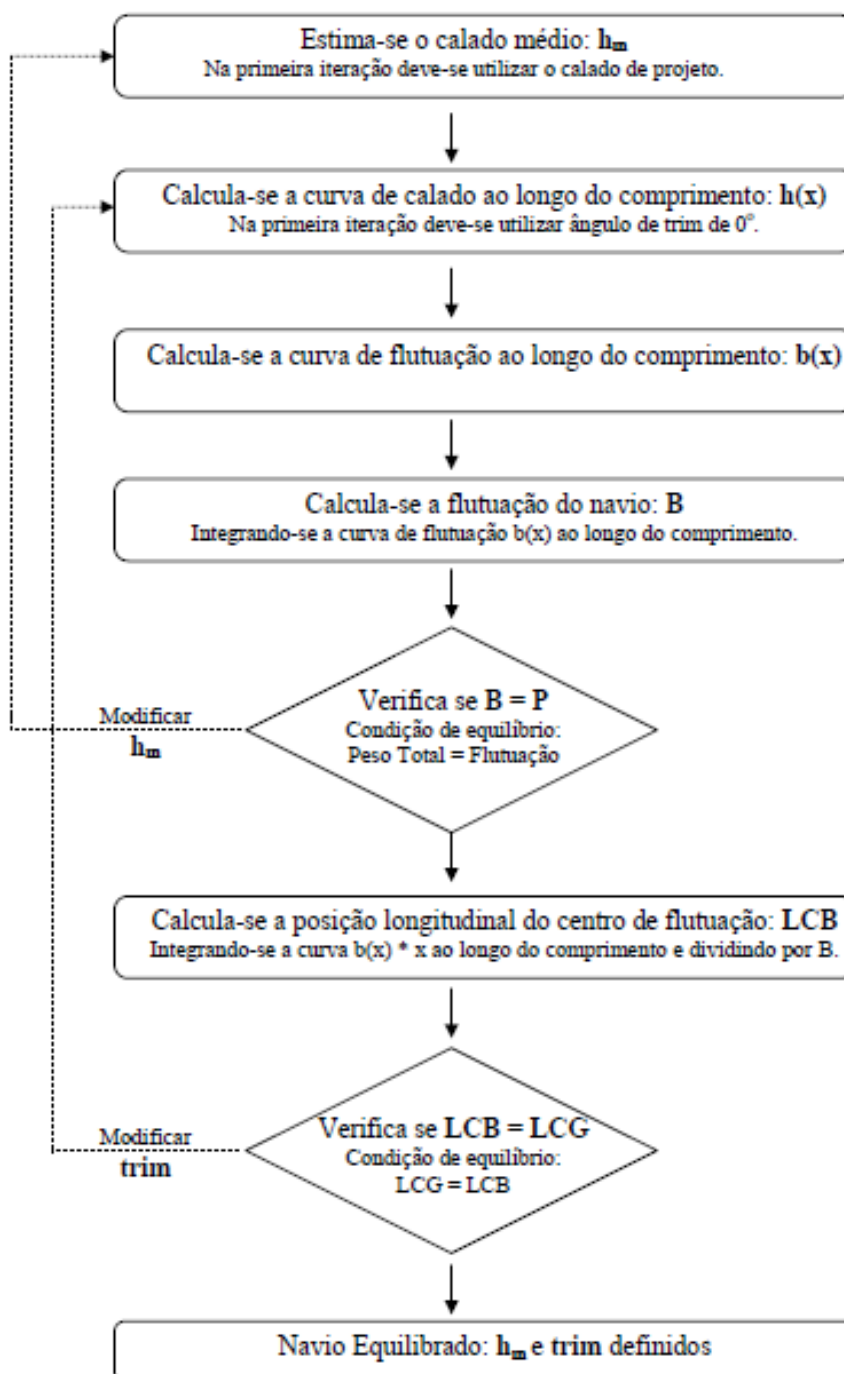
Aonde LCB corresponde a posição longitudinal do centro de gravidade e LCG a posição longitudinal do centro de flutuação.

De maneira geral, uma diferença entre peso e a flutuação (Equação 1) deve ser corrigida modificando-se o calado médio, enquanto uma diferença entre o LCG e o LCB (Equação 2) deve ser corrigida modificando-se o trim da embarcação (TANCREDI, 2004).

No entanto, uma vez que a proa costuma ser diferente da popa, ao se modificar o ângulo de trim da embarcação, modifica-se a distribuição de flutuação ao longo do comprimento, sendo possível que a primeira condição de equilíbrio (Equação 1) não seja mais satisfeita. Dessa forma, para cascos reais, o equilíbrio de uma embarcação torna-se um processo iterativo, mas de rápida convergência (TANCREDI, 2004).

Na Figura 6 o processo iterativo de equilíbrio de uma embarcação é representado na forma de um fluxograma de etapas.

Figura 6 - Fluxograma do processo iterativo de equilíbrio da embarcação



Fonte: Tancredi (2004).

2.2.2 Influência das ondas

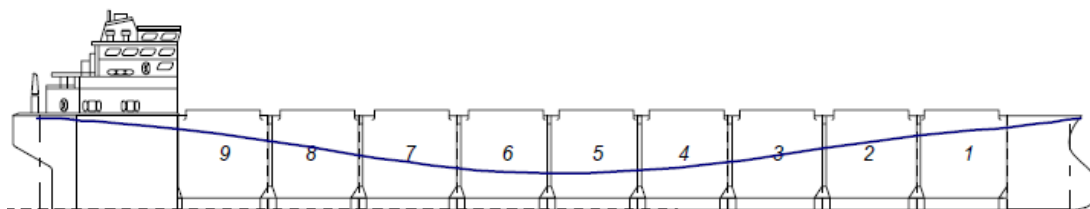
A incidência de ondas sobre o navio modificam a distribuição da flutuação ao longo do comprimento, podendo resultar em uma maior solicitação estrutural do navio. Entre os diversos comprimentos de onda que compõe o espectro de mar, algumas

situações produzem solicitações estruturais severas, que precisam ser consideradas no projeto (AUGUSTO, 1996).

A passagem da onda pela embarcação gera, a cada instante de tempo, uma diferença no calado ao longo do comprimento, ou seja, uma alteração na curva de flutuação. Sendo assim, para a análise estrutural, deve-se verificar a condição na qual a solicitação estrutural é mais severa, que, em geral, ocorre para uma onda de comprimento igual ao comprimento do casco (AUGUSTO, 1996).

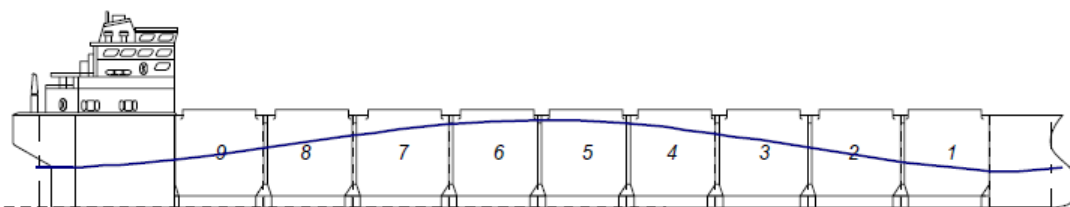
Segundo Tancredi (2004), existem duas configurações críticas de onda. A primeira é denominada Tosamento, e ocorre quando a seção a meia nau se encontra no vale de uma onda de comprimento igual ao comprimento da embarcação (Figura 7). Nessa configuração, a tendência é que o convés superior da seção mestra encontre-se comprimido, enquanto o fundo da embarcação, encontre-se tracionado. Já a segunda configuração crítica ocorre quando a seção a meia nau se encontra na crista de uma onda de mesmo comprimento da embarcação analisada (Figura 8). Nessa configuração, denominada Alquebramento, o convés superior da seção mestra tende a estar tracionado, ao passo que o fundo tende a estar comprimido.

Figura 7 - Onda senoidal de Tosamento



Fonte: Tancredi (2004)

Figura 8 - Onda senoidal de Alquebramento

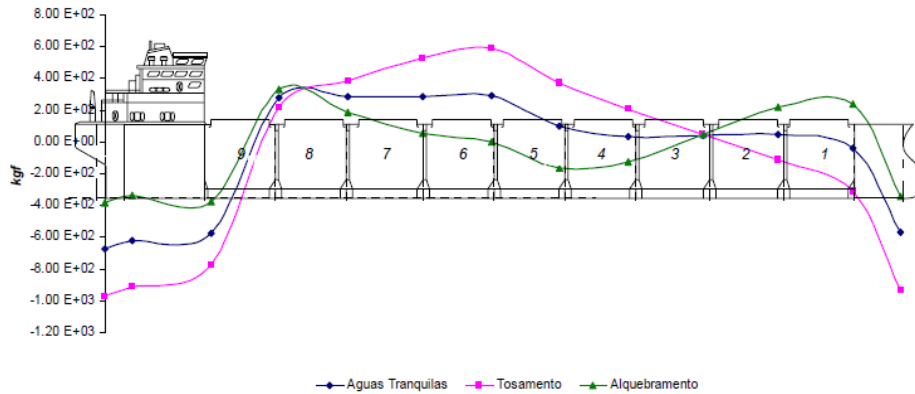


Fonte: Tancredi (2004)

Uma vez determinado o equilíbrio da embarcação, seja em águas tranquilas ou em ondas (Tosamento ou Alquebramento), pode-se então levantar a curva de

cargas da embarcação, a qual é obtida subtraindo-se a curva de flutuação da curva de pesos (Figura 9).

Figura 9 - Exemplo de curva de carga de uma embarcação



Fonte: Tancredi (2004)

Assumindo que a embarcação se encontra em equilíbrio, as Equações 3 a 6, vistas, por exemplo em Hibbler (2004), podem ser utilizadas para descrever o comportamento mecânico de uma viga.

$$Q(x) = EI_z \frac{d^4 v}{dx^4} \quad (3)$$

$$V_z(x) = EI_z \frac{d^3 v}{dx^3} \quad (4)$$

$$M_y(x) = EI_z \frac{d^2 v}{dx^2} \quad (5)$$

$$\theta_y = EI_z \frac{dv}{dx} \quad (6)$$

Onde, considerando o sistema de coordenadas proposto na Figura 2, $Q(x)$ representa o carregamento ortogonal aplicado ao longo do comprimento da viga, $V_z(x)$ o esforço cortante perpendicular ao plano longitudinal, $M_y(x)$ o momento fletor, θ_y a rotação da seção em torno do eixo y , v a deflexão no ponto, E o módulo de elasticidade

do material que constitui a viga e I_z o momento de inércia da seção transversal da viga calculado em relação a linha neutra (HIBBLER, 2004).

Por fim, a distribuição da tensão primária pode ser determinada pela equação:

$$\sigma(x) = \frac{M_y(x)y}{I_z} \quad (7)$$

Onde y corresponde a distância perpendicular do ponto analisado até a linha neutra da seção. Nota-se, a partir da Equação 7, que a tensão tem um comportamento linear ao longo do eixo Z da embarcação, apresentando o máximo módulo no ponto mais distante da linha neutra (HIBBLER, 2004).

2.3 ESTRUTURA SECUNDÁRIA

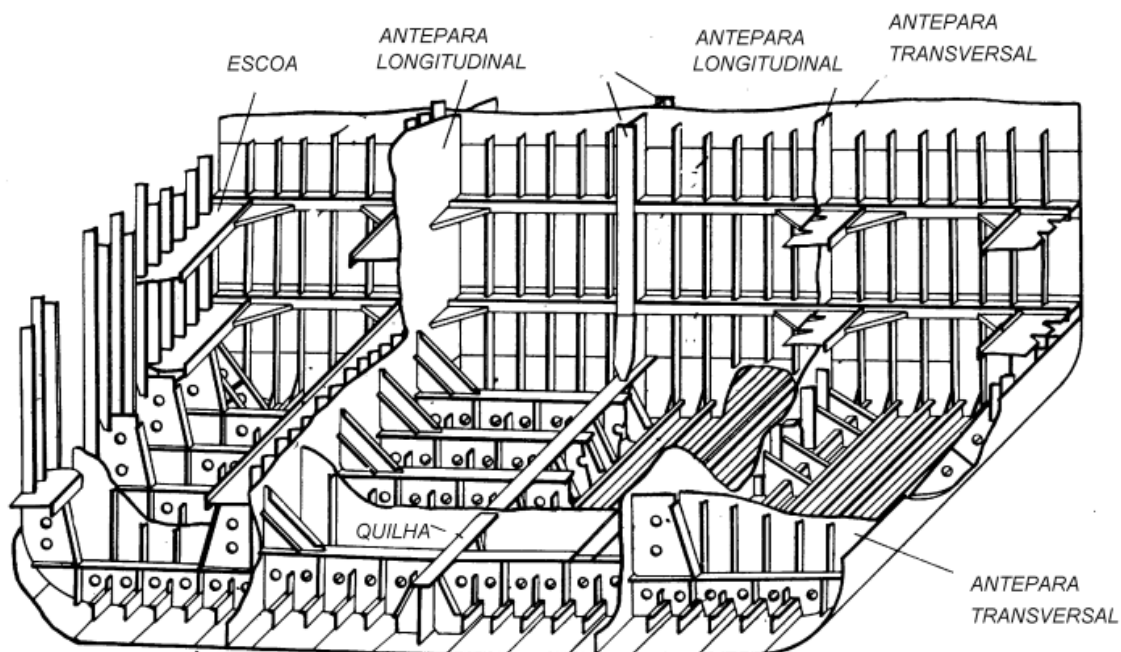
A estrutura secundária é composta por reforçadores que, além de contribuir para a resistência da viga navio, tem o papel de enrijecer o chapeamento, reduzindo os vãos livres da estrutura terciária, contribuindo na resistência às cargas locais associadas a ação da pressão hidrostática (ou pressões de carga) atuantes no casco. (AUGUSTO, 2004).

Segundo Maso (2022), os reforçadores podem ser classificados em reforçadores longitudinais e transversais, sendo que os reforçadores longitudinais podem ser divididos entre reforçadores leves e pesados. Nessa classificação os reforçadores leves possuem rigidez flexional pelo menos uma ordem de grandeza menor que os reforçadores transversais (cavernas) e tem a função de enrijecer o chapeamento localizado entre duas cavernas. Já os reforçadores pesados possuem rigidez flexional da mesma ordem de grandeza que os reforçadores transversais e tem a missão de enrijecer a viga navio.

Tradicionalmente um arranjo formado por uma casca fina reforçada por uma grelha ortogonal (reforçadores longitudinais e transversais) é conhecido por painel estrutural. O conceito de painel estrutural além de ser observado em diversos tipos de embarcações, é amplamente utilizado em diversos outros modais, como o aeroespacial, ferroviário e automotivo (AUGUSTO, 2004).

Na Figura 10 é possível visualizar um arranjo estrutural de uma embarcação de casco singelo que segue o conceito de painel estrutural.

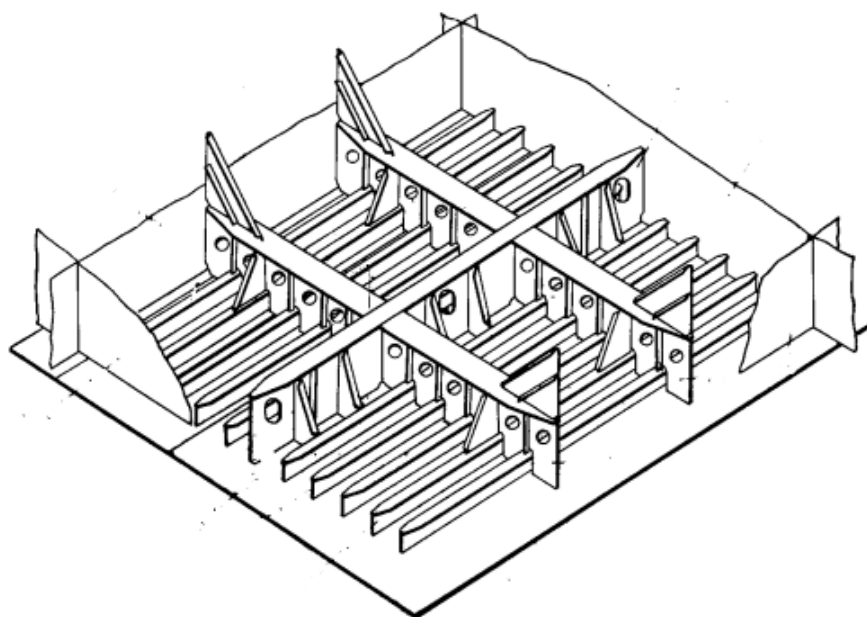
Figura 10 - Típico arranjo estrutural de uma embarcação de carga



Fonte: Augusto (2004, p. 4).

Segundo Barabanov (1966), o conceito de painel estrutural composto por uma chapa fina reforçada por uma grelha ortogonal (Figura 11) é o arranjo mais eficiente quando a estrutura está submetida a uma carga ortogonal ao chapeamento

Figura 11 – Típico painel estrutural de uma embarcação



Fonte: Augusto (2004, p. 5).

Ainda segundo Augusto (2004), a análise de carregamento da estrutura secundária pode ser feita de forma semelhante ao da estrutura primária, usando a teoria simples de viga. Porém, neste caso, o reforçador é considerado uma viga onde ambos os extremos se encontram engastados.

A consideração dos reforçadores longitudinais como vigas bi engastadas baseia-se no fato de que, usualmente, compartimentos adjacentes de um navio apresentam geometrias e carregamentos similares, implicando em simetria de deformação, a qual impede a rotação das seções localizadas nos extremos dos reforçadores longitudinais.

Considerando-se que não existe rotação nos vínculos, tais vínculos devem ser modelados como engastes, possuindo restrição de movimento em todos os graus de liberdade (MARTINS, 2014).

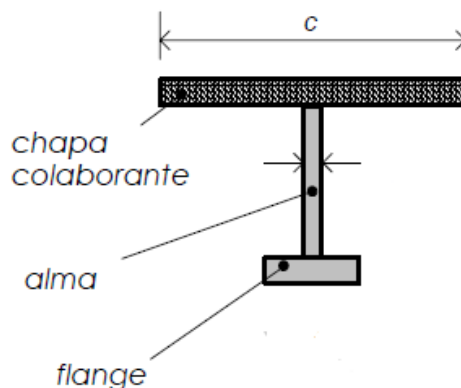
Dada a relação de rigidez flexional existente, considera-se que os extremos dos reforçadores leves estão engastados em dois reforçadores transversais subsequentes. Já no caso de reforçadores pesados, os extremos encontram-se engastados em duas anteparas transversais subsequentes.

É importante observar que, conforme alerta Augusto (2004), nesse modelo, os reforçadores pesados são considerados desacoplados dos reforçadores transversais, oferecendo uma abordagem conservadora para a análise das tensões atuantes na estrutura secundária pesada.

Além disso, a teoria simples de viga considera que as seções permanecem planas e ortogonais a linha neutra da viga, o que somente é verdade para vigas maciças e homogêneas (HIBBLER, 2004). Tradicionalmente, na engenharia naval, os reforçadores longitudinais apresentam seções em formato *T* ou *L*, sendo constituídas por alma e flange distintas, não se enquadrando na hipótese de seções planas e ortogonais a linha neutra.

Nesse caso, a análise correta de um reforçador pertencente a um painel requer que se estabeleçam hipóteses sobre a contribuição que a chapa do casco exerce na rigidez dos reforçadores. Sobre essa questão, Augusto (2004) sugere empregar a teoria simples de viga ao conjunto formado pelo reforçador e por uma porção de chapa, a qual irá funcionar com um segundo flange para o reforçador (Figura 12). Dado que essa parcela de chapa enrijece o reforçador, contribuindo para a sua rigidez, essa recebe o nome de chapa colaborante.

Figura 12 - Perfil + chapa colaborante



Fonte: Augusto (2004, p. 7).

O conceito de chapa colaborante é introduzido com a finalidade de corrigir o efeito de *shear lag* (empenamento da seção) no campo de tensão secundário. Esse fenômeno decorre da distribuição irregular do campo de tensão na chapa soldada ao perfil, a qual apresenta tensões longitudinais menores em pontos do flange que estão mais afastados da alma (AUGUSTO, 2004).

Dados que a pressão atuante no painel estrutural não é aplicada diretamente sobre o reforçador (existência da chapa do casco), é necessário determinar a largura efetiva de carga que atua em cada um dos reforçadores do painel. Augusto (2004) sugere uma abordagem conservadora e propõem considerar que a carga atuante entre os perfis é dividida igualmente entre ambos, admitindo que, para espaçamentos regulares, a largura de carga de um perfil corresponde à distância entre dois perfis adjacentes de mesmo tipo.

Uma vez que os reforçadores são tratados como elementos de viga, todas as formulações e considerações apresentadas na seção anterior são válidas, tanto para o cálculo de força cortante e momento fletor, quanto para a distribuição de tensão ao longo do reforçador (HIBBLER, 2004).

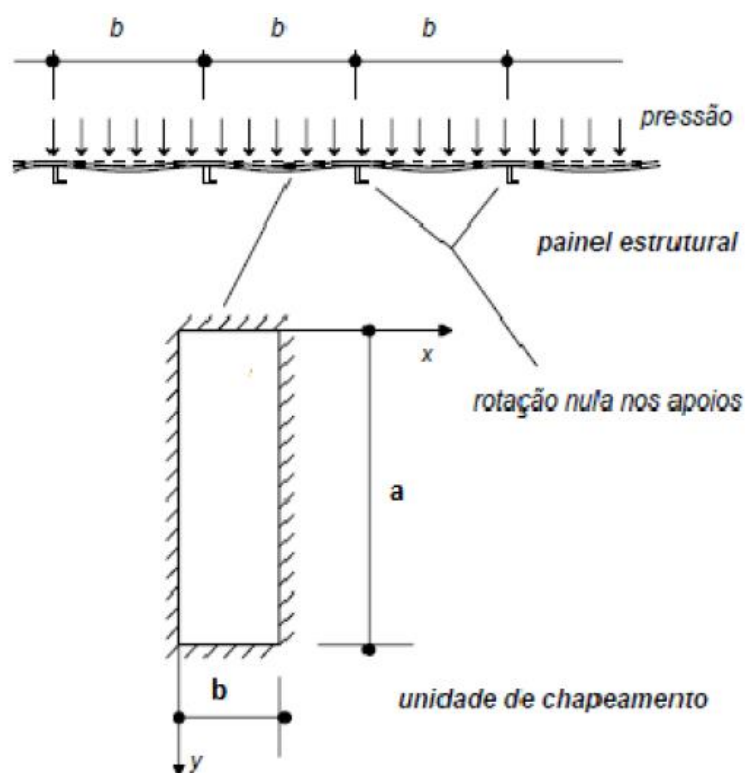
Vale destacar ainda que o carregamento nos reforçadores varia não apenas com a região da embarcação, mas também com os diferentes arranjos de carga a bordo e os diferentes estados de mar. Assim para cada arranjo estrutural projetado, deve-se investigar as diferentes possíveis combinações entre esses fatores (TANCREDI, 2004).

2.4 ESTRUTURA TERCIÁRIA

A estrutura terciária tem papel fundamental tanto na resistência primária, como na resistência à pressão lateral sofrida pelo casco. Se, por um lado, garante a estanqueidade do casco, por outro, a sua seção transversal contribui significativamente para a inércia da viga navio (AUGUSTO, 1996).

Nesse sentido, a análise da estrutura terciária corresponde a análise da unidade de chapeamento contida entre dois reforçadores longitudinais e dois reforçadores transversais quaisquer (Figura 13). No entanto, diferentemente das vigas que sofrem deflexão apenas na direção longitudinal, as placas sofrem flexão tanto na longitudinal quanto na transversal (AUGUSTO, 2004).

Figura 13 - Unidade de chapeamento



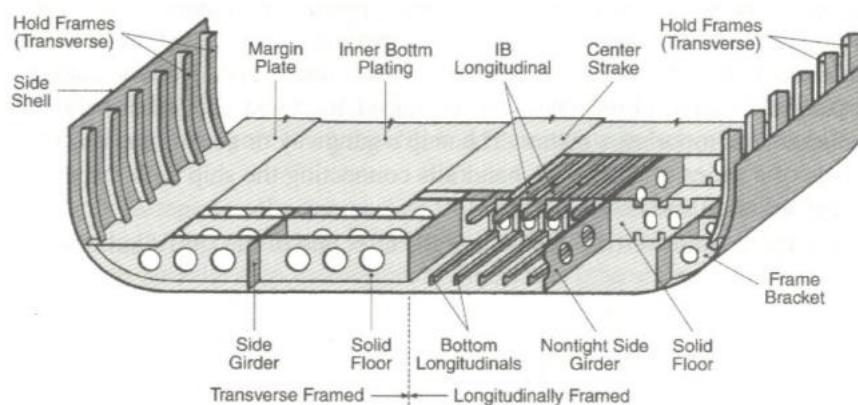
Fonte: Augusto (2004, p. 21).

Em relação as condições de contorno que devem ser aplicadas ao modelo, as mesmas considerações sobre a simetria de geometria e de carregamento em compartimentos adjacentes feita na seção anterior são válidas para as unidades de chapeamento adjacentes, de modo que os quatro lados da chapa podem ser considerados engastados (AUGUSTO, 2004).

2.4.1 Tipo de cavernamento

O tipo de cavernamento da embarcação determina a disposição da chapa, de modo que o cavernamento transversal é aquele em que o maior lado da chapa está posicionado na direção ortogonal ao eixo longitudinal da embarcação enquanto o cavernamento longitudinal é aquele em que o maior lado da chapa é paralelo ao eixo longitudinal da embarcação (AUGUSTO, 2004). A Figura 14 apresenta, do lado esquerdo da estrutura, a distribuição de chapa dado um cavernamento transversal e do lado direito a distribuição dada um cavernamento longitudinal.

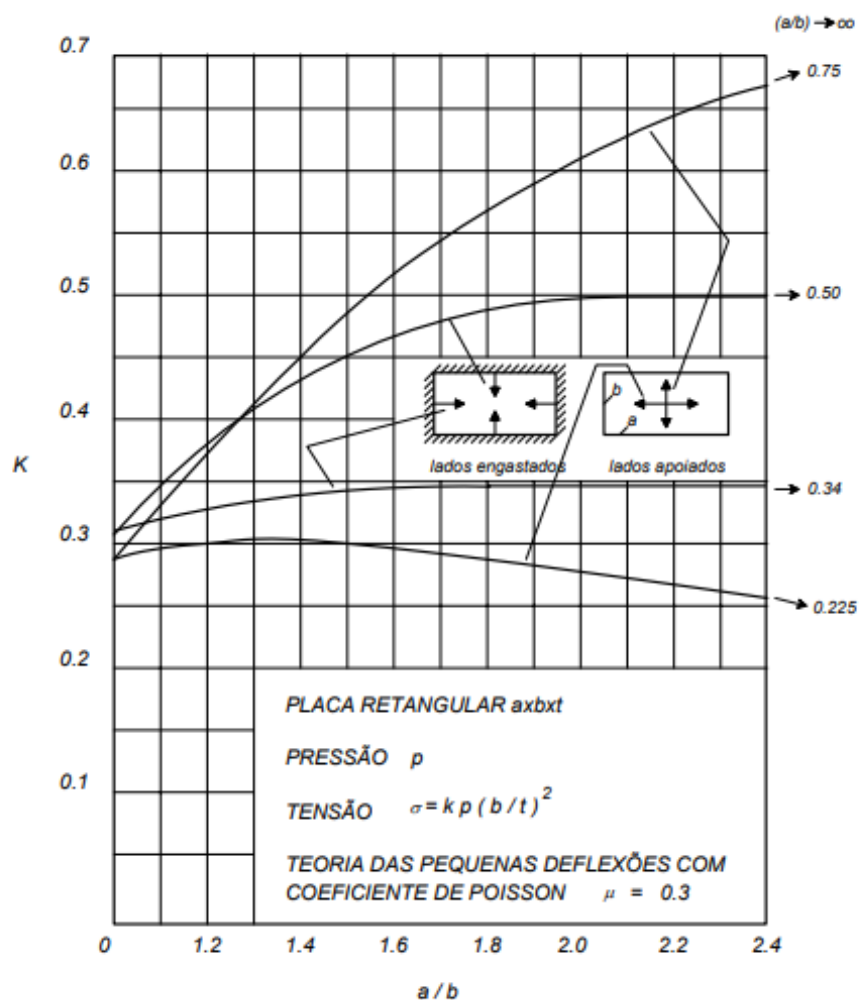
Figura 14 - Exemplo de cavernamento transversal e longitudinal



Fonte: Lamb (2004).

Dado que, no caso das embarcações com comprimento maior que 90m, as tensões primárias representam a maior parcela das tensões atuantes na estrutura, é comum que nesses projetos estruturais sejam utilizados o cavernamento longitudinal, a fim de aumentar a rigidez da viga navio. Além disso, neste tipo de embarcação é comum a existência do duplo fundo, dado que esse arranjo maximiza a rigidez da viga navio (TANCREDI, 2004).

Considerando um campo de deformações bidimensional e adotando-se a hipótese de pequenas deformações, pequenas rotações e linearidade do material, Augusto (2004, p. 20 apud SCHADE, 1951) apresenta uma solução gráfica para a tensão nos pontos críticos de chapas retangulares sujeitas à pressão uniforme que possuem os quatro lados engastados, ou então, os quatro lados apoiados (Figura 15).

Figura 15 - Gráfico GII-7¹

Fonte: Augusto (2004, p. 20 apud SCHADE, 1951).

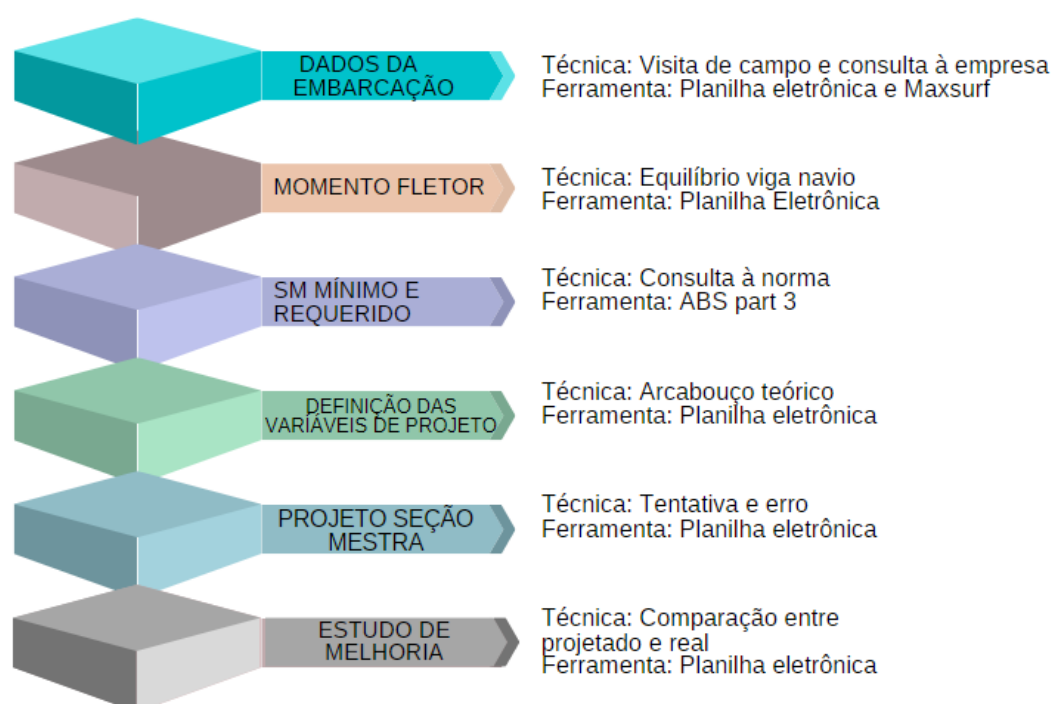
A mesma observação levantada ao final da seção anterior é também pertinente a essa seção. Dado que a distribuição da pressão atuante varia conforme a posição em que a chapa se encontra no casco, além de variar em função da condição de carregamento e de mar analisada, o projeto estrutural deve considerar as possíveis combinações entre esses fatores, buscando-se identificar a condição crítica para a estrutura (TANCREDI, 2004).

¹ O gráfico de tensão em placa retangular é tão comum e tão usado na área de estruturas navais que os engenheiros orientavam uns aos outros da seguinte forma: Para o cálculo das tensões nas chapas, deve-se utilizar o gráfico 7 da seção III do livro texto. Com o passar dos anos, esse gráfico acabou recebendo a alcunha de GIII-7 mesmo com as alterações do livro texto.

3. METODOLOGIA

Descreve-se neste capítulo a metodologia utilizada a fim de efetivar os objetivos estabelecidos para este trabalho. Na Figura 16 são descritas as etapas percorridas ao longo do processo, bem como as técnicas e ferramentas empregadas em cada uma das etapas.

Figura 16 - Metodologia do trabalho



Fonte: Autor (2023).

Para realizar a modelagem da embarcação se faz necessário uma visita de campo onde são levantados os dados geométricos da embarcação e mapeadas as características fundamentais para determinar as linhas de casco, além de se buscar uma primeira aproximação na distribuição de pesos e do arranjo interno.

Em um segundo momento, uma planilha eletrônica implementada no programa Excel foi desenvolvida para facilitar a determinação das curvas de força cortante e de momento fletor considerando diferentes condições de carregamento da embarcação. É importante mencionar que por se tratar de uma embarcação fluvial, a planilha desenvolvida não avalia questões associadas a incidência de ondas no casco.

A escolha do programa Excel para realizar diversas etapas deste trabalho deve-se a popularidade do programa, baixo custo e fácil disponibilidade, além de oferecer uma interface amigável, robusta e de fácil visualização.

A construção da planilha eletrônica visa não apenas auxiliar nos cálculos, mas também automatizar as diversas etapas do projeto. Ao todo são utilizadas cinco abas, onde busca-se uma interface amigável tanto para a modelagem do problema, quanto para a análise dos resultados do projeto. Sendo que todos os cálculos realizados se baseiam no arcabouço teórico e nas regras normativas da ABS (2019), cujo detalhamento é discutido nos capítulos seguintes deste texto.

A escolha da norma ABS (2019) deve-se a importância dessa norma tanto no contexto nacional quanto internacional, bem como o fácil acesso ao texto, disponível gratuitamente no site da sociedade classificadora. Destaca-se que em um estudo futuro poder-se-ia utilizar também o texto especificamente destinado a embarcações fluviais (*steel vessels for service on rivers and intracoastal waterways*, 2023)

A partir das características da embarcação e com o auxílio da planilha eletrônica desenvolvida, é possível realizar a extração dos parâmetros necessários para o projeto estrutural da seção mestra, baseado em sociedade classificadora. Assim, uma vez que o máximo momento fletor e a posição da seção mestra são conhecidos, pode-se dar início ao projeto da seção mestra, tendo como ponto de partida a determinação do SM exigido pela norma.

Na primeira aba são exibidos os campos específicos e devidamente identificados para que o usuário possa inserir os grupos de pesos presentes na embarcação, bem como os parâmetros geométricos necessários ao projeto estrutural.

As variáveis do projeto estrutural referem-se aos parâmetros que, de fato, o engenheiro de estruturas tem a liberdade de definir, e dizem respeito a distribuição e ao arranjo dos reforçadores longitudinais e transversais do casco.

Para ajudar na definição das variáveis de projeto, e visando uma convergência mais rápida do SM projetado, existem além de valores mínimos de espaçamento determinados pela norma, intervalos de valores típicos que podem ser vistos em Chaves, Tancredi (2013).

A determinação das características da seção mestra acontece na aba denominada 'seção mestra', na qual são realizadas apenas cálculos utilizando os parâmetros já definidos nas etapas anteriores. Trata-se de uma etapa diretamente

atrelada a etapa anterior, uma vez que resultados insatisfatórios fazem com que as variáveis de projeto tenham que ser revistas e alteradas.

Por fim, uma vez que a seção mestra projetada atenda aos requisitos exigidos pela norma ABS (2019) e, tendo sido determinados os valores de espessuras das chapas e selecionados os reforçadores exigidos para o projeto estrutural, é possível comparar os resultados obtidos com aqueles observados na embarcação real.

Como exemplo de aplicação, propõe-se o estudo de caso referente a draga Luce, a qual possui 24,4m de comprimento, 8,0m de boca e 1,5m de pontal. A partir do projeto estrutural realizado nesse estudo de caso, são discutidas as hipóteses e resultados obtidos, comparando-os com aqueles observados na embarcação real, atualmente em operação.

4. DESENVOLVIMENTO: PLANILHA DE EQUILÍBRIO VIGA-NAVIO

Nesse capítulo são apresentadas as funcionalidades da ferramenta desenvolvida, suas limitações, os dados de entradas necessários e a natureza dos resultados obtidos.

A proposta da ferramenta é que com informações básicas da embarcação (que serão tratadas mais adiante) o usuário obtenha, para uma determinada condição de carregamento, uma primeira estimativa do calado de equilíbrio, ângulo de trim, força cortante máxima e momento fletor máximo, bem como as posições nas quais ocorrem a máxima força cortante e o máximo momento fletor.

É importante destacar que, a determinação dos máximos esforços solicitantes, em especial o máximo momento fletor, é condição necessária para a aplicação, por exemplo, da norma da ABS (2019).

4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Os parâmetros de entrada necessários para o correto funcionamento da planilha desenvolvida são listados abaixo:

- Comprimento entre perpendiculares (L_{pp})
- Boca (B)
- Pontal (D)
- Coeficiente de bloco (CB)
- Centros e pesos da embarcação
- Curvas seccionais (SAC) para diferentes valores de calado
- Distribuição do peso leve, da carga e dos consumíveis

É importante mencionar que os valores devem ser inseridos utilizando sempre as unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI), as quais estão explicitadas ao lado do campo de entrada de cada parâmetro.

Na Figura 17 é mostrada a interface destinada a introdução dos valores de pesos e centros da embarcação, além de uma interface específica para alocação de carga e dos consumíveis embarcados.

Figura 17 - Interface pesos leves e consumíveis

Grupo de PESOS LEVES							
Referência	Peso (ton)	Xinicial (m)	Xfinal(m)	LCG ¹ (m)	Posição ² (m)	Comprimento (m)	Peso*Xmed (ton*)
Fundo							
Convés							
Costado							
Cavernas							
Anteparas transversais							
Caixa de areia							
Escotilha							
Hastilha							
Sobrequilha							
Casaria							
Máquinas							
Long							
Acessórios							

Consumíveis e demais pesos							
Referência	Peso (ton)	Xinicial (m)	Xfinal(m)	LCG ¹ (m)	Posição ² (m)	Comprimento	Peso*Xmed (ton*)
óleo diesel							
óleo hid							
tripulação							
água refrigeração 1							
água refrigeração 2							
carga							

Fonte: Autor (2023).

Entende-se por itens consumíveis tudo aquilo que esteja a bordo e que seja destinado ao funcionamento e operação da embarcação, entre os quais destacam-se: combustível, água de refrigeração, óleos de lubrificação.

Em relação a Figura 17, as colunas *Xfinal* e *Xinicial* dizem respeito, respectivamente, a posição inicial e final da carga em questão. Com relação as colunas *LCG* e *Posição*, ambas são relacionadas a posição longitudinal do centro de gravidade da carga, mas, enquanto a coluna *LCG* tem como referência a meia-nau da embarcação, a coluna *Posição* utiliza como referência o espelho de popa. Em teoria poderia se utilizar apenas uma das colunas, no entanto, a presença das duas colunas visa facilitar e automatizar a entrada de dados do usuário utilizando o referencial usado neste trabalho.

Devido ao fato de cada embarcação apresentar diferentes características de arranjo, inicialmente foram cadastrados alguns grupos de peso usualmente observados na maioria das embarcações. No entanto, o usuário tem a liberdade de adicionar novos grupos ou atribuir peso nulo aos grupos que não precisará usar.

Ainda com relação a entrada de parâmetros, o usuário deverá inserir a porcentagem embarcada de carga e de consumíveis diretamente na macro. Para facilitar essa tarefa, as rotinas de automatização estão comentadas (Figura 18),

facilitando a alteração pelo usuário. No futuro essa opção poderá ser adicionada a interface, facilitando ainda mais a interação do usuário com o programa.

Figura 18 –Alterações necessárias para cada condição de carga

```
Sub condição1()
'
' condição1 Macro

Sheets("Dados Embarcação").Select
Range("M12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0" 'SEM CARGA - NÃO alterar
Sheets("Dados Embarcação").Select
Range("M7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0.05" '10% DE CONSUMÍVEIS - alterar o valor 0.05
Sheets("Equilibrio").Select
Macro_equilibrio

'
End Sub
Sub condição2()
'
' condição2 Macro
'

Sheets("Dados Embarcação").Select
Range("M12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0" 'SEM CARGA - NÃO alterar
Sheets("Dados Embarcação").Select
Range("M7").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=0.45" '100% DE CONSUMÍVEIS - TROCAR O 0.45
Sheets("Equilibrio").Select
Macro_equilibrio
```

Fonte: Autor (2023).

Uma vez que o usuário inseriu as informações solicitadas, a análise de equilíbrio viga-navio será feita considerando as 4 condições de carregamento previstas pela *International Maritime Organization* (IMO).

- Condição I: Sem carga e 10% de consumíveis;
- Condição II: Sem carga e 100% de consumíveis;
- Condição III: 100% carga prevista e 10% de consumíveis;
- Condição IV: 100% de carga prevista e 100 de consumíveis;

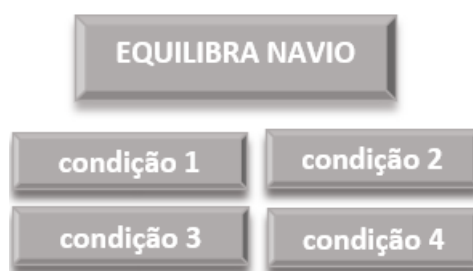
Ao considerar essas 4 condições, busca-se abranger as principais possibilidades críticas de navegação, minimizando os potenciais riscos do projeto.

A interface desenvolvida procura ser amigável. Por essa razão, para facilitar o uso, a planilha apresenta 5 botões (Figura 19), sendo 1 botão referente a cada

condição de carga a ser analisada, permitindo que o usuário possa rapidamente alternar entre as diferentes condições de carga analisadas, ou então analisar uma dada condição específica de carga

Uma vez que uma das condições pré-estabelecidas é selecionada, a função 'equilibra navio' já é acionada automaticamente. No entanto, o usuário tem a opção de utilizar essa opção separadamente, por um botão de mesmo nome, caso queira analisar uma condição de carga estabelecida manualmente na planilha.

Figura 19 - Recorte dos diferentes botões presente na planilha

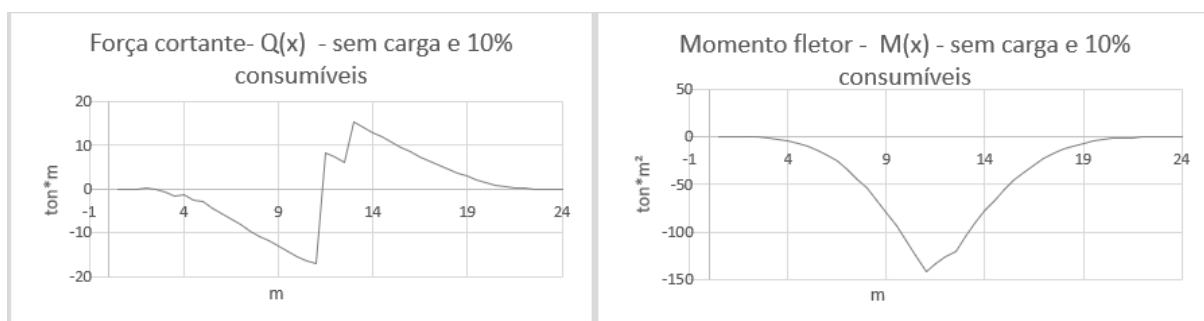


Fonte: Autor (2023).

4.2 DADOS DE SAÍDA

Uma vez definida a condição de carga e estabelecido o equilíbrio da viga navio, a planilha apresenta como resultado a distribuição da força cortante e do momento fletor ao longo do comprimento da embarcação. Os resultados são apresentados tanto na forma de tabela de dados, quanto na forma gráfica (Figura 20).

Figura 20 – Resultados gráficos para a condição de carga analisada



Fonte: Autor (2023).

Além disso, conforme pode ser visto na Figura 21, na planilha são sintetizadas as principais informações da análise (calado médio, ângulo de trim, momento fletor

máximo, força cortante máxima, posição da seção de máximo momento fletor e posição da seção de máxima força cortante) para que o usuário tenha uma visão geral dos efeitos sofridos na viga navio causados pela condição de carga analisada.

Figura 21 – Recorte dos dados de saída apresentados

Ângulo de trim (°)	0,254083195
Calado médio (m)	0,338998044
Máximo momento fletor (KN*m)	141,9547062
Posição do máximo momento (m)	11
Máxima força cortante (KN)	16,81200046
Posição máxima cortante (m)	11

Fonte: Autor (2023).

É importante observar que, no caso específico mostrado na Figura 21, a posição do máximo momento fletor coincidiu com a posição da máxima força cortante, o que baseado nas equações apresentadas no Capítulo 2 seria um erro. No entanto, a embarcação analisada para o exemplo concentra toda a carga a meia nau, o que faz com que a posição do momento fletor máximo seja muito próxima da posição da máxima força cortante.

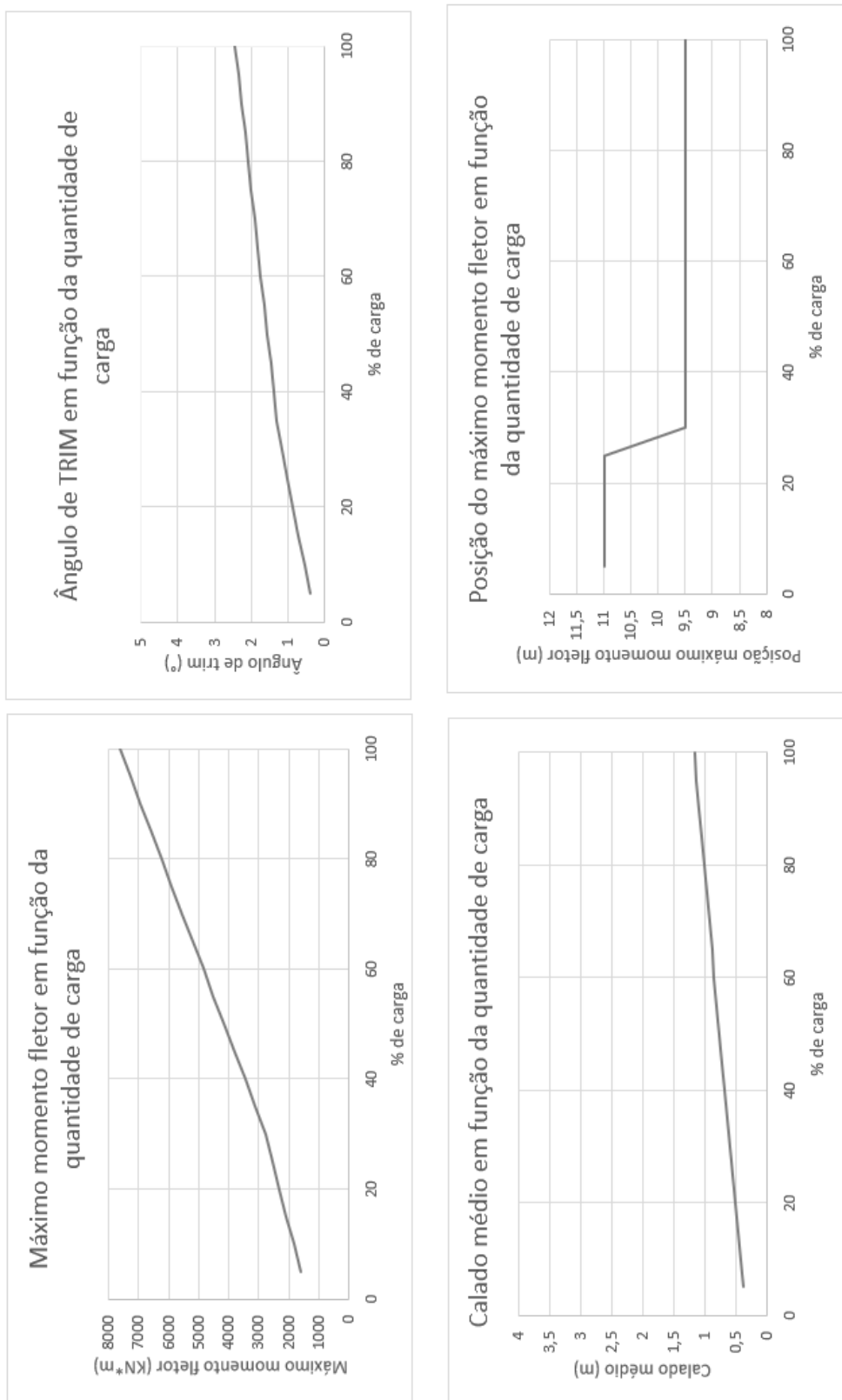
Caso uma abordagem mais realista fosse utilizada, poder-se-ia distribuir a carga ao longo do porão de carga, o que resultaria em distribuições mais usuais tanto para o momento fletor, quanto para a força cortante.

4.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DA CAPACIDADE DE CARGA

Outro recurso bastante interessante da planilha desenvolvida consiste em realizar análises paramétricas referentes a quantidade de carga a bordo, permitindo avaliar a influência que a porcentagem de carga embarcada na embarcação exerce na solicitação estrutural imposta ao casco.

Para visualizar o resultado da análise paramétrica de carga, na aba 'Análise' são apresentados 4 gráficos que permitem verificar o comportamento da embarcação em função da porcentagem de carga embarcada (Figura 22).

Figura 22 – Gráficos de análise da embarcação em função da carga



Fonte: Autor (2022).

5. PROJETO DA SEÇÃO MESTRA

O termo “seção mestra” tem significados diferentes dependendo da finalidade para o qual é empregado. Segundo Fonseca (2005), denomina-se por seção mestra a maior das seções transversais de um casco, podendo, ou não, coincidir com a seção a meia nau. Já no âmbito estrutural, considera-se que a seção mestra corresponde a seção de maior solicitação estrutural (AUGUSTO 2004).

Ao longo de toda a história da navegação foram observados relatos de construtores navais com problemas para proporcionar a resistência adequada às suas embarcações, limitando-se a copiar estruturas anteriormente executadas, cuja resistência estrutural já havia sido considerada satisfatória. Essa tradição, com o tempo se tornou lei, dando origem as regras empíricas propostas pelas sociedades classificadoras (AUGUSTO, 2004).

O projeto da seção mestra baseado em sociedade classificadora é um processo que demanda tempo, sendo bastante exaustivo no que se refere ao levantamento das informações, dimensionamento e verificação. Além disso, trata-se de um processo iterativo, cujos valores das variáveis de projeto são redefinidos inúmeras vezes, buscando uma configuração estrutural que, além de atender aos requisitos impostos pela norma, reduza a massa do casco.

Dado que no caso de embarcações de pequeno porte a certificação pode não ser exigida e que, após um determinado estágio do processo, as reduções no peso estrutural podem ser consideradas desprezíveis, cabe ao engenheiro projetista avaliar quanto esforço deve continuar a ser empregado nessa atividade.

No entanto, as vantagens de se realizar o projeto estrutural de uma embarcação baseado em sociedade classificadora estão atreladas a segurança e confiabilidade, sendo uma técnica usualmente empregada em embarcações de grande valor agregado e que desempenham missões nas quais uma falha estrutural pode ocasionar não apenas prejuízos financeiros, mas também danos ambientais. Por isso, em muitos casos, o projeto feito com base em sociedade classificadora é requisito para que a embarcação possa entrar no mercado e operar.

A escolha entre as diferentes sociedades classificadoras existentes considera, além do tipo de embarcação e da região de operação, diversos outros fatores, tais

como preferência do estaleiro, experiências anteriores, aspectos financeiros e até mesmo questões políticas e mercadológicas.

No entanto, é importante destacar que, para a maior parte dos projetos, as normas apresentam grande similaridade, tanto no que diz respeito ao sequenciamento da etapas, quanto nas equações empíricas propostas, variando apenas em função de particularidades associadas aos coeficientes empíricos a serem empregados.

Em virtude da disponibilidade existente, optou-se pelo uso da norma ABS (2019), a qual abrange o estudo de caso proposto para este trabalho.

5.1 MOMENTO FLETOR

O momento fletor calculado pela norma é composto de duas parcelas, a primeira diz respeito ao esforço sofrido pela embarcação quando navegando em mar calmo, já a segunda parcela diz respeito ao acréscimo de momento fletor causado pela passagem de uma onda ao longo da embarcação.

Assim, o momento fletor total, considerando a incidência de ondas na embarcação, pode ser estimado usando nas Equações 8 e 9.

$$M_{total_tosamento} = M_{mar\ calmo} + M_{tosamento} \quad (8)$$

$$M_{total_alquebramento} = M_{mar\ calmo} + M_{alquebramento} \quad (9)$$

Já as equações extraídas do Capítulo 2, Seção 1 da norma ABS (2019), permitem estimar o acréscimo de momento fletor causado pela passagem de uma onda, tanto no caso da onda de tosamento (Equação 10) quanto de alquebramento (Equação 11).

$$M_{tosamento} = -K_1 * C_1 * L^2 * B * (CB + 0,7) * 10^{-3} \quad (10)$$

$$M_{alquebramento} = K_2 * C_1 * L^2 * B * CB * 10^{-3} \quad (11)$$

Sendo:

$$K_1 = 110$$

$$K_2 = 190$$

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1,5} && 90 \leq L \leq 300 \text{ m} \\
 &= 10,75 && 90 \leq L \leq 300 \text{ m} \\
 &= 10,75 - \left(\frac{L - 350}{100}\right)^{1,5} && 350 \leq L \leq 500 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Onde L é o comprimento da embarcação, B é a boca, CB é o coeficiente de bloco e K1 e K2 são constantes indicadas pela própria norma. Sendo que as dimensões do navio devem ser consideradas em metro, enquanto o resultado de momento fletor será calculado em kN*m.

Por fim, é importante destacar que no caso de embarcações fluviais a parcela de ondas deverá ser ignorada.

5.2 MÓDULO DE RESISTÊNCIA MÍNIMO E REQUERIDO

Uma vez determinado o momento fletor, o próximo passo consiste na determinação do módulo de resistência (SM) mínimo e requerido estabelecido pela norma para o projeto da seção mestra da embarcação.

Analisando as Equações 12 e 13 é possível observar que o SM mínimo leva em considerações apenas os parâmetros geométricos da embarcação, enquanto o SM requerido é diretamente proporcional ao momento fletor atuante na seção mestra. Por essa razão, nos casos em que a distribuição de cargas não é usual, o SM mínimo, pode ser maior que o requerido. Assim, deve-se considerar como SM de projeto, o maior valor entre o SM mínimo e o SM requerido estipulados pela norma.

$$SM_{\text{mínimo}} = C_2 * C_3 * L^2 * B * (CB + 0,7) \quad (12)$$

$$SM_{\text{requerido}} = M_{\text{total}}/F_p \quad (13)$$

Onde os coeficientes são apresentados abaixo e M_{total} é igual ao momento fletor de maior valor entre o $M_{total_alquebramento}$ e $M_{total_tosamento}$.

$$C_2 = 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1,5}$$

$$C_3 = 0,01$$

$$Fp = 17,5 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

5.3 VÁRIÁVEIS DE PROJETO

Uma vez estabelecido o valor do SM necessário para que a seção mestra seja capaz de, segundo a norma técnica, resistir aos esforços atuantes na embarcação, o próximo passo é definir as características geométricas associadas a cada um dos elementos estruturais que compõem a seção mestra da embarcação.

Usualmente, a definição das características geométricas da estrutura de uma embarcação é conhecida como dimensionamento estrutural ou escantilhamento do casco. No entanto, é importante observar que, no caso do projeto por norma, as espessuras dos elementos são definidas a partir dos espaçamentos adotados para o arranjo da estrutura.

Em geral, para esse processo, é possível definir ao menos 12 variáveis de projeto, sendo elas:

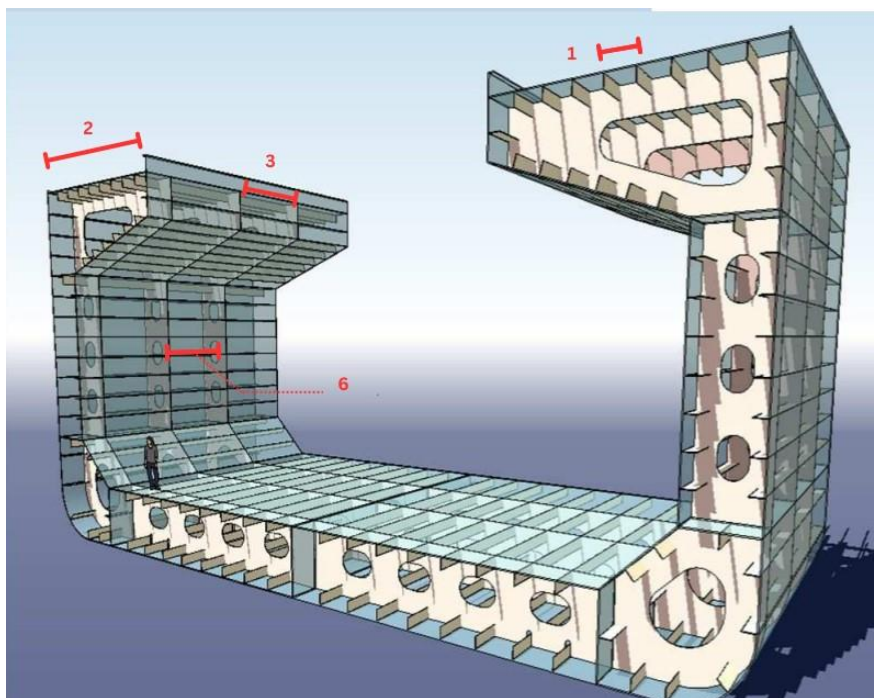
1. Distância entre reforçadores leves no Convés
2. Distância entre reforçadores pesados no Convés
3. Distância entre cavernas no Convés
4. Distância entre reforçadores leves no Costado
5. Distância entre reforçadores pesados no Costado
6. Distância entre cavernas no Costado
7. Distância entre reforçadores leves no Fundo
8. Distância entre reforçadores pesados no Fundo
9. Distância entre cavernas no Fundo
10. Distância entre anteparas

11. Altura duplo fundo

12. Distância entre costados

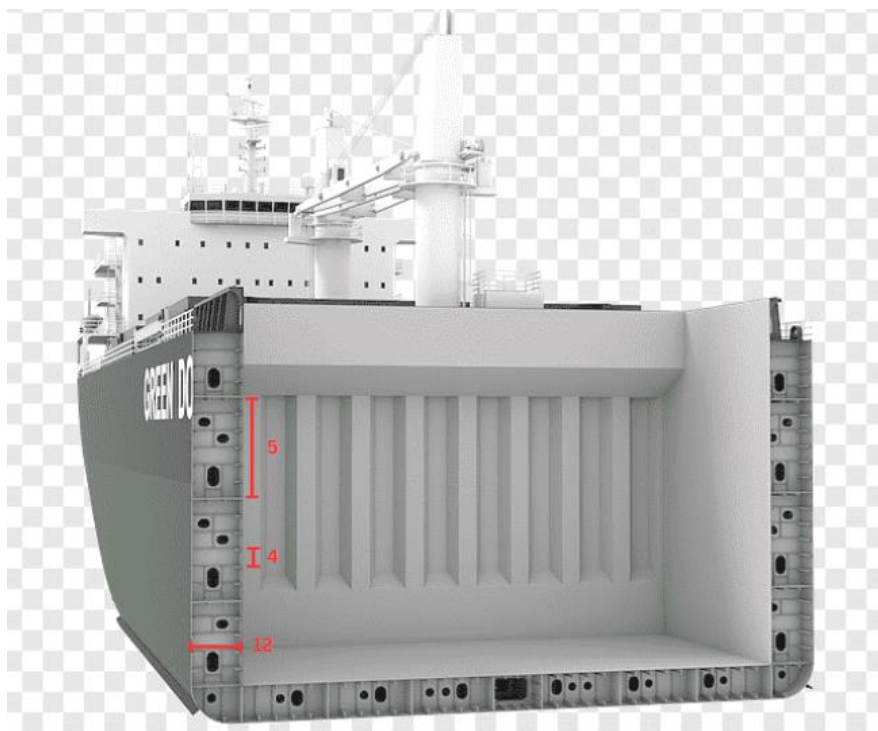
Nas Figuras 23, 24 e 25 são ilustradas as diferentes variáveis associadas ao projeto estrutural de um navio.

Figura 23 - Variáveis do projeto estrutural I



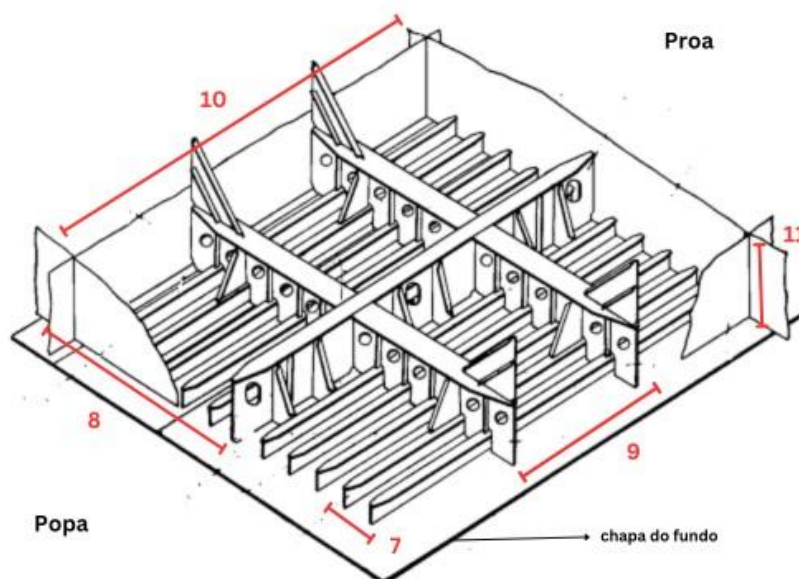
Fonte: Adaptado de Daley (2017).

Figura 24 - Variáveis do projeto estrutural II



Fonte: Adaptado de Damiensage (2012).

Figura 25 - Variáveis do projeto estrutural III



Fonte: Adaptado de Augusto (2004, p. 5).

Dado que, conforme já comentado, o projeto estrutural deve viabilizar os sonhos estéticos e funcionais de arquitetos e projetistas, é importante mencionar que algumas das variáveis do projeto estrutural devem ser definidas com base em análises feitas em outras áreas do projeto da embarcação.

Por exemplo, a distância entre anteparas deve ser definida com base na análise de estabilidade avariada e na concepção do arranjo da embarcação. Por essa razão, esse é um parâmetro que deve ser considerado fixo no projeto estrutural do casco, embora possam ser adicionadas colunas entre as anteparas visando a redução do vão livre dos reforçadores pesados.

Além disso, por questões práticas de fabricação, é desejável que os reforçadores leves sejam igualmente espaçados entre os reforçadores pesados e, por essa razão, sugere-se que a distância entre reforçadores pesados seja um múltiplo inteiro da distâncias entre reforçadores leves.

O mesmo acontece com os espaçamentos associados ao arranjo da estrutural transversal, onde é desejável que a distância entre as anteparas e/ou colunas seja um múltiplo inteiro do espaçamento entre cavernas.

Como em qualquer processo iterativo, é necessário realizar um 'chute' inicial dos valores referentes a cada uma das variáveis do projeto estrutural. Por essa razão, a eficácia e a eficiência dos projetos estruturais baseados em normas estão fortemente ligadas à experiência dos projetistas, os quais também podem recorrer a um histórico de embarcações similares já construídas, a fim de facilitar a obtenção dos valores mais adequados para essas variáveis.

Uma vez definidos os valores das variáveis do projeto estrutural, esses são utilizados para o cálculo do SM requerido para cada um dos reforçadores (leves e pesados) da estrutura, bem como para o cálculo da espessura requerida para cada uma das chapas do casco.

Uma vez dimensionados os elementos estruturais, o projetista pode então selecionar reforçadores e chapas comerciais que atendam aos valores mínimos exigidos pela norma.

5.4 ESPESSURA DE CHAPA E SM DOS REFORÇADORES

É fácil perceber que as diferentes regiões da embarcação sofrem esforços de natureza diferente e uma solicitação em termos de intensidade bastante variada, exigindo uma análise diferenciada para cada região da seção.

5.4.1 Módulo de resistência dos reforçadores

Ao longo dos últimos anos observa-se um esforço por parte das sociedades classificadoras para reduzir o número de equações empregadas no projeto estrutural de embarcações.

Um desses exemplos consiste no uso de apenas uma equação para dimensionar qualquer reforçador longitudinal da estrutura (Equação 14), cujos parâmetros variam em função da posição do reforçador na seção.

$$SM_{reforçador} = 7,8 * c * h * s * l^2 \text{ [cm}^3\text{]} \quad (14)$$

Onde c depende do tipo de conexão do reforçador com as cavernas/anteparas, h corresponde à distância, em metros, da *sheerline* até o reforçador², s corresponde ao espaçamento entre reforçadores do mesmo tipo, em metros, e l corresponde à distância entre os engastes (vão livre).

Embora o resultado da Equação 14 esteja em cm^3 , deve-se utilizar a unidade metros em todos os parâmetros. Além disso, é importante destacar que o módulo de resistência dos reforçadores sofre uma maior influência do vão livre l (espaçamento entre cavernas/anteparas) do que do espaçamento s entre eles.

Dado que nas fases iniciais do projeto é comum que algumas características da embarcação não estejam completamente definidas, o valor do coeficiente c pode não ser facilmente estimado, devendo o projetista adotar um valor conservador para o projeto, ou seja, nesses casos, deve-se adotar o valor do coeficiente c igual a 1.

5.4.2 Espessura mínima de chapa costado

Segundo a norma ABS (2019), as Equações 15 e 16 podem ser utilizadas para definir a espessura mínima das chapas localizadas na região do costado.

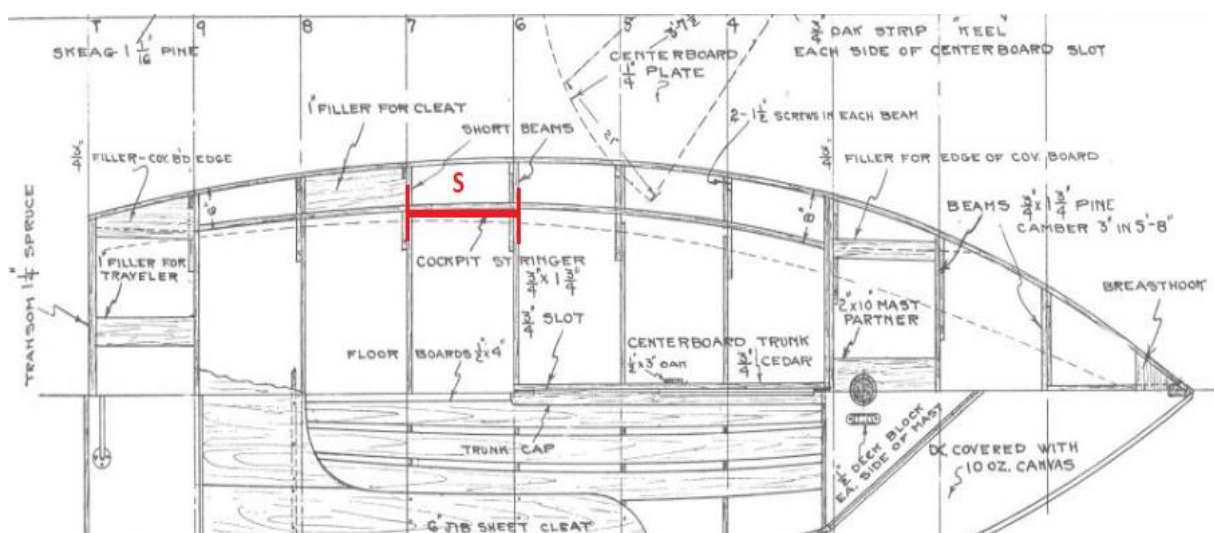
$$Espessura_{costado (L_{pp} \leq 305)} = \left(\frac{s * 1000}{645} \right) * \sqrt{(L_{pp} - 15,2) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right)} + 2,55 \quad (15)$$

² Tancredi (2004) cita que uma boa aproximação é assumir que a *sheerline* está localizada 3 polegadas abaixo do pontal do navio.

$$Espessura_{costado (305 \leq L_{pp} \leq 427)} = \left(\frac{s * 1000}{828} \right) * \sqrt{(L_{pp} + 175) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right)} + 2,55 \quad (16)$$

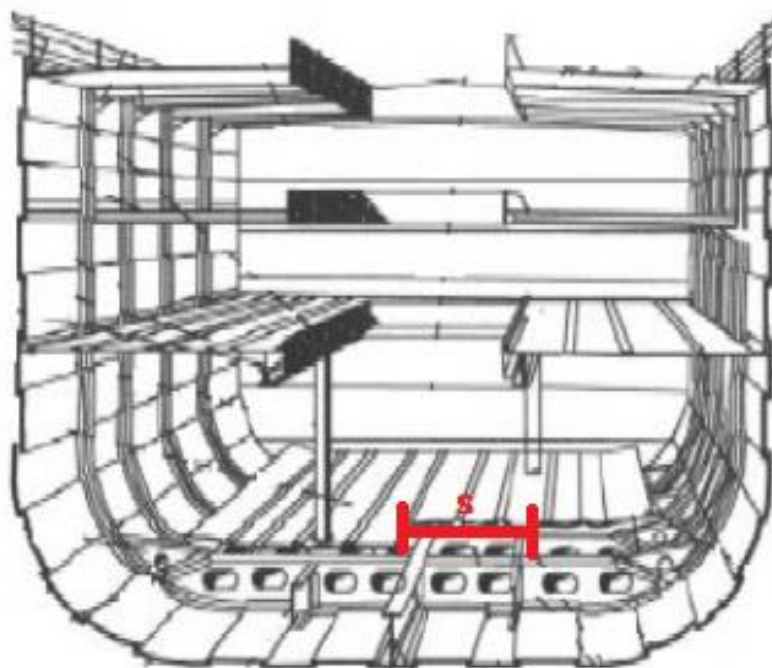
Onde $T_{projeto}$ é o calado de projeto e a espessura é dada em milímetros. Já o parâmetro s refere-se ao menor lado da chapa, ou seja, nas embarcações com cavernamento transversal (Figura 26), esse valor refere-se a distância entre cavernas, já para as embarcações com cavernamento longitudinal (Figura 27), esse valor refere-se ao espaçamento existente entre dois reforçadores leves.

Figura 26 - Parâmetro S para o cavernamento transversal



Fonte: Adaptado de Classe RG65 (2023).

Figura 27 - Parâmetro S para o cavernamento longitudinal



Fonte: Adaptado de Barabanov (1996).

5.4.3 Espessura mínima de chapa convés

Ainda segundo a ABS (2019), as Equações 17 a 19 podem ser utilizadas para definir a espessura mínima das chapas localizadas na região do convés.

5.4.3.1 Com cavernamento transversal:

$$Espessura_{convés(s \leq 760mm)} = 0,01 * s * 1000 + 2,3 \text{ [mm]} \quad (17)$$

5.4.3.2 Com cavernamento longitudinal:

$$Espessura_{convés(s \leq 760mm)} = 0,009 * s * 1000 + 2,4 \text{ [mm]} \quad (18)$$

$$Espessura_{convés(s > 760mm)} = 0,006 * s * 1000 + 4,7 \text{ [mm]} \quad (19)$$

Vale ressaltar que existem variações dessas equações para o caso de conveses internos, as quais podem ser consultadas na Tabela 1 da Seção 3 do Capítulo 2 da norma ABS (2019).

5.4.4 Espessura mínima de chapa fundo:

Por fim, segundo a norma ABS (2019), as Equações 20 a 23 podem ser utilizadas para definir a espessura mínima das chapas localizadas na região do fundo do navio.

5.4.4.1 Com cavernamento transversal:

$$Espessura_{fundo (Lpp \leq 183)} = \left(\frac{s * 1000}{519} \right) * \sqrt{(Lpp - 19,8) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right) + 2,55} \quad (20)$$

5.4.4.2 Com cavernamento longitudinal:

$$Espessura_{fundo (Lpp \leq 122)} = \left(\frac{s * 1000}{671} \right) * \sqrt{(Lpp - 18,3) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right) + 2,55} \quad (21)$$

$$Espessura_{fundo (122 \leq Lpp \leq 305)} = \left(\frac{s * 1000}{508} \right) * \sqrt{(Lpp - 62,5) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right) + 2,55} \quad (22)$$

$$Espessura_{fundo (305 \leq Lpp \leq 427)} = \left(\frac{s * 1000}{661} \right) * \sqrt{(Lpp + 105) * \left(\frac{T_{projeto}}{D} \right) + 2,55} \quad (23)$$

5.4.5 Espessura mínima de chapa trincaniz e bojo

Além dos parâmetros já discutidos, a norma ainda apresenta observações a respeito da espessura das chapas na região do trincaniz e do bojo. Sendo que para o

trincaniz, a norma sugere uma espessura mínima igual a espessura de chapa do costado acrescida de 25%, desde que esse acréscimo não exceda 6,5mm. Já para a chapa do bojo, a norma sugere utilizar a mesma espessura adotada para a chapa do fundo da embarcação.

5.5 LINHA NEUTRA E SM PROJETADO

Definido o arranjo estrutural e dimensionadas as características dos reforçadores e chapas, o próximo passo do projeto consiste em avaliar se a seção projetada alcançará o valor do SM necessário.

Na planilha eletrônica desenvolvida, existe a aba 'seção mestra', na qual o usuário deverá entrar com o arranjo estrutural e as características dos reforçadores e chapas para cada região da embarcação. Embora essa atividade pudesse ser automatizada, extraíndo-se os valores definidos na etapa anterior, é concebível que o usuário possa usar apenas esse módulo, inserindo seus próprios dados de projeto.

Uma vez que a planilha é preenchida, a ferramenta realiza os cálculos referente ao SM da seção projetada, bem como a posição da linha neutra da embarcação, além de uma primeira aproximação do peso do casco.

Para estimar o peso do casco, a planilha, de forma conservadora, considera todas as seções da embarcação com área de aço igual à área de aço da seção mestra, além de um fator de correção de 30% que visa incluir o peso da estrutura transversa (AUGUSTO, 1996). Portanto, dado que toda a estrutura é constituída de aço naval de densidade 7,8 t/m³, o peso do casco pode ser estimado utilizando a Equação 24.

$$\text{Peso de aço} = \text{área} * L * 7,8 * 1,3 \quad (24)$$

Onde o peso de aço da embarcação pode ser estimado como o resultado da multiplicação do comprimento, área total da seção mestra, fator de correção e densidade do aço.

Por fim, o projetista deverá verificar se a seção mestra por ele projetada atende ao SM exigido pela norma. Caso essa exigência não seja atendida, os valores das variáveis de projeto devem ser revistos até que o SM projetado seja maior ou igual àquele exigido pela norma.

Neste contexto, é importante observar que todas as equações apresentadas pela norma já utilizam coeficientes conservadores, não existindo a necessidade de estipular nenhum coeficiente de segurança adicional durante o projeto. Assim, quanto mais próximo o SM projetado estiver do SM requisitado pela norma, em tese, mais eficiente pode ser considerado o projeto estrutural do navio.

Embora não exista uma relação direta entre o SM da seção e o peso linear do casco, é intuitivo pensar que um maior SM está ligado a uma maior quantidade de aço na seção e, portanto, a um maior peso linear da estrutura.

6. ESTUDO DE CASO

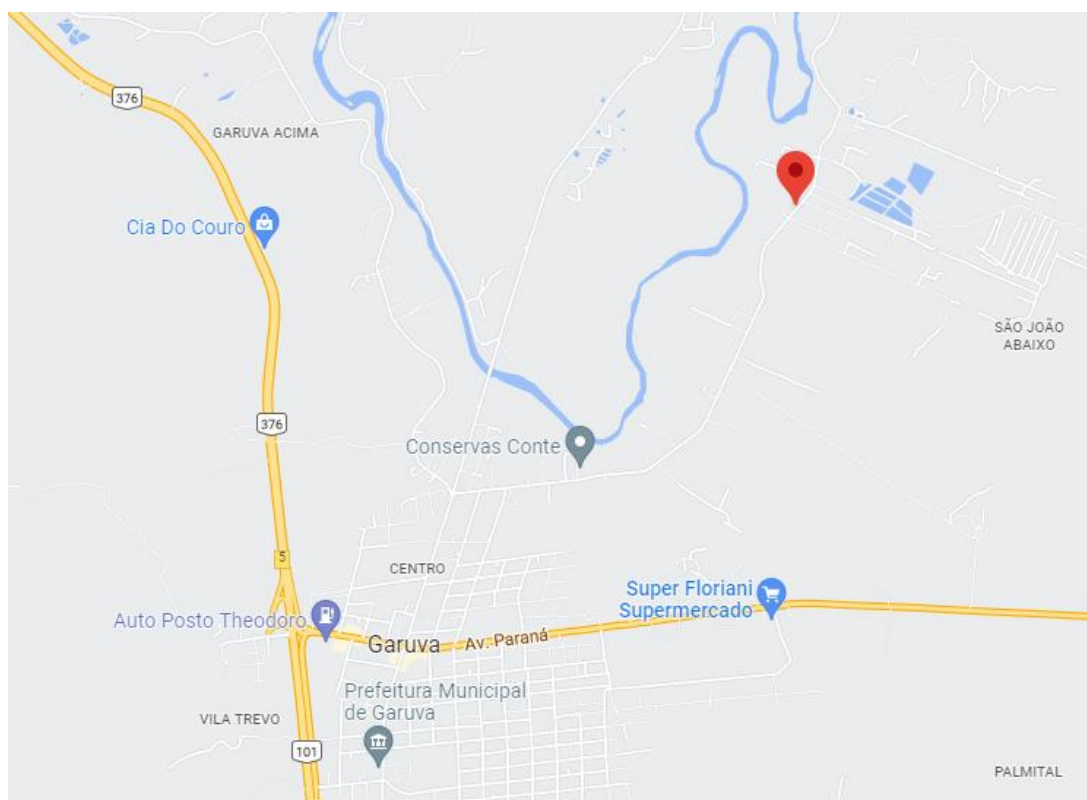
De modo a exemplificar as etapas necessárias para o projeto da seção mestra de uma embarcação, nesse capítulo é apresentada a realização do projeto estrutural de uma embarcação fluvial utilizando a norma ABS (2019).

Embora esse tipo de embarcação, na prática, não exija uma classificação, sendo, em muitos casos, feito de modo empírico, o projeto estrutural baseado em norma surge como uma opção que oferece uma maior confiabilidade e segurança, além de, eventualmente, resultar em uma maior eficiência estrutural.

Assim, para avaliar o projeto estrutural realizado com base em sociedade classificadora no contexto de embarcações fluviais, esse estudo de caso visa a realização do projeto estrutural de uma embarcação já em operação, de modo a permitir a comparação dos resultados obtidos.

A embarcação estudada neste projeto pertence à empresa São Gabriel Mineração que atua desde 1997 no segmento de extração e refino de areia e cascalho no bairro São João em Garuva, no estado de Santa Catarina (Figura 28).

Figura 28 - Localização da empresa São Gabriel Mineração



Fonte: Google maps (2023).

A empresa atua como fornecedora de areia para o porto de Itapoá, Marcegaglia do Brasil e para obras de reparo rodoviários para a prefeitura da cidade, sendo que para a extração de areia e do cascalho do rio São João (Figura 29), a empresa utiliza embarcações de serviço fluviais do tipo draga.

Figura 29 - Rio São João



Fonte: Google maps (2023).

A draga Luce (Figura 30), objeto desse estudo, tem 24,4 m de comprimento total, 8 m de boca, pontal de 1,5 m e calado de projeto de 1,24 m. A embarcação que atualmente está em fase final de fabricação, terá capacidade de carga de aproximadamente 137 toneladas de areia (equipada com uma bomba de carga com capacidade de sucção de material de $120\text{m}^3/\text{h}$). Projetada para ser operada com 2 tripulantes, a embarcação terá velocidade de serviço de 6 nós.

Figura 30 - Draga Luce



Fonte: Autor (2023)

Como visto no capítulo anterior, o primeiro passo para a realização do projeto estrutural consiste no levantamento das características associadas aos pesos e centros da embarcação, bem como à geometria da seção mestra e à curva de flutuação do casco. Destaca-se que todas as informações foram fornecidas pela empresa proprietária da embarcação.

Nas tabelas a seguir são enumeradas as características dos elementos que constituem tanto o peso leve (Tabela 1) quanto o peso morto (Tabela 2) da embarcação.

Tabela 1 - Distribuição de peso leve da embarcação

Grupo de Pesos	Peso (t)	LCG (m)
Fundo	9,14	11,3
Convés	5,9	11,7
Costado	3,1	11,3
Cavernas	7,0	11,6
Anteparas transversais	0,6	13,2
Caixa de areia	6,0	13,2
Escotilha	1,5	13,2
Hastilha	1,2	11,7
Sobre quilha	1,0	13,2
Casaria	1,0	5,2
Máquinas	1,3	4,2
Anteparas longitudinais	1,2	13,2
Acessórios	0,8	11,2

Fonte: autor (2023).

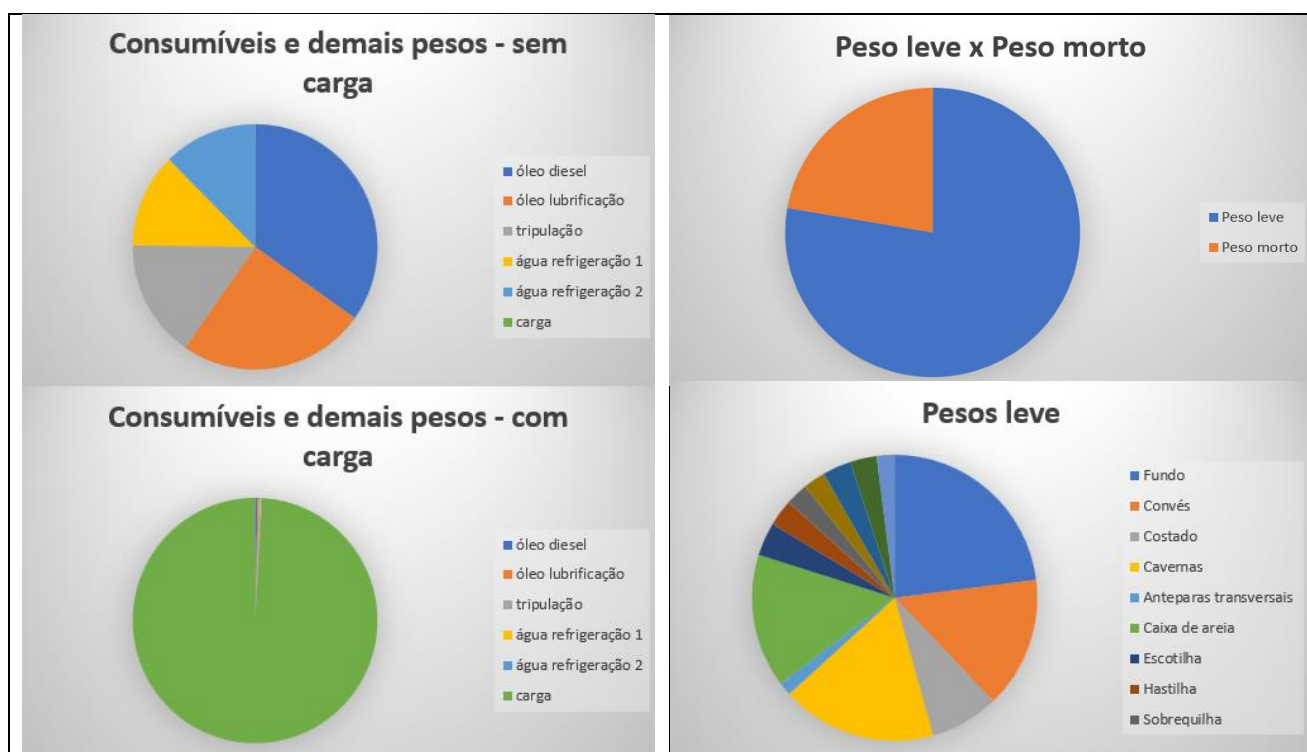
Tabela 2 - Distribuição dos consumíveis e carga

Grupo de Pesos	Peso (t)	LCG (m)
Óleo diesel	0,45	15,71
Óleo lubrificação	0,32	19,08
Tripulação	0,20	3,20
Água refrigeração 1	0,16	2,45
Água refrigeração 2	0,16	16,96
Carga	137,31	10,18

Fonte: autor (2023).

Buscando uma melhor visualização da distribuição de peso a bordo, na Figura 31 são apresentadas o percentual que cada grupo de pesos representa do deslocamento da embarcação estudada.

Figura 31 - Consumíveis e demais pesos de forma gráfica



Fonte: Autor (2023)

Por fim na Figura 32 é mostrado o posicionamento longitudinal de cada grupo de pesos, além da curva de pesos considerando a embarcação 100% carregada e com 100% dos consumíveis embarcados.

Figura 32 - Curva de pesos 100% de carga e consumíveis



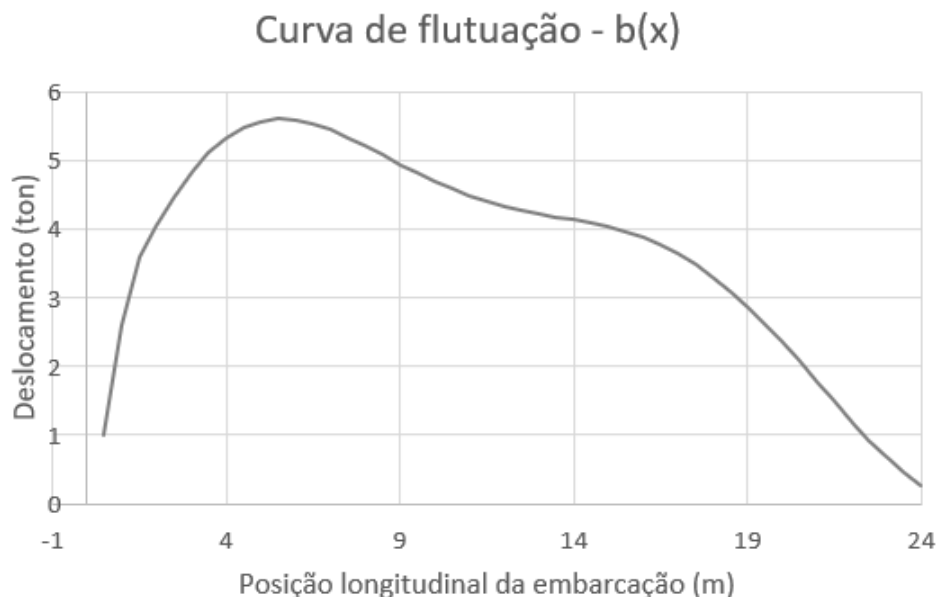
Fonte: Autor (2023).

Para o cálculo da curva de flutuação, foi utilizado o programa Maxsurf, com o qual foi extraída a curva SAC da embarcação para 3 diferentes valores de calado, os quais são de certa forma arbitrários. Porém, baseado em tentativa e erro, recomenda-se a utilização de curvas SAC extraídas considerando 20% e 70% do calado de projeto e 90% do pontal.

Os dados de flutuação extraídos com auxílio do programa Maxsurf, foram então interpolados para que a planilha desenvolvida pudesse estimar a flutuação de uma dada baliza quando essa está sujeita a qualquer valor de calado.

Como exemplo de aplicação, na Figura 33 é mostrada a curva de flutuação da embarcação já equilibrada, para a mesma condição de carregamento apresentada anteriormente, ou seja, contendo 100% de carga e de consumíveis.

Figura 33 - Curva de flutuação 100% de carga e consumíveis



Fonte: Autor (2023)

Em posse dessas informações é possível determinar as condições de equilíbrio da embarcação usando o procedimento descrito no Capítulo 2 para cada uma das condições de carga enumeradas no Capítulo 4. Os resultados obtidos são sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados sintetizados das condições de equilíbrio

	Máx. Força cortante (kN)	Posição Máx. Força cortante (m)	Máx. Momento fletor (kN*m)	Posição Máx. Momento fletor (m)	Calado médio (m)	Ângulo de trim (°)
Condição I	164,92	11,0	1392,54	11,0	0,33	0,25
Condição II	165,77	11,0	1398,38	11,0	0,34	0,24
Condição III	846,80	9,5	7613,62	9,5	1,16	2,44
Condição IV	847,36	9,5	7616,39	9,5	1,17	2,43

Fonte: autor (2023).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3, observa-se que a seção mestra está localizada a 9,5 m do espelho de popa. Outro ponto que pode ser destacado, consiste no fato da embarcação não apresentar diferenças significativas em função da alteração da quantidade de consumíveis embarcado. Isso acontece

porque a quantidade de consumíveis desse tipo de embarcação, que não realiza viagens longas, é baixa em comparação as demais parcelas de peso existentes.

Em teoria, para o cálculo do SM exigido pela norma deve-se conhecer as duas parcelas de momento fletor descritas nas Equações 10 e 11. No entanto, em se tratando de uma embarcação fluvial, a parcela de momento fletor causada pela passagem de onda não existe, logo o momento fletor total consiste apenas da parcela referente à condição de mar calmo.

Assim, utilizando-se as Equações 12 e 13, na Tabela 4 são apresentados os valores referentes ao SM mínimo e ao SM requerido estabelecidos pela norma ABS (2019) considerando a condição IV da Tabela 3.

Tabela 4 - SM mínimo e requerido para a draga

SM _{mínimo}	424,74 [cm ² *m]
SM _{requerido}	435,22 [cm ² *m]

Fonte: Autor (2023).

Definido o SM especificado pela norma, o próximo passo consiste em atribuir valores às variáveis de projeto de modo que o SM projetado seja superior aos 435,22 cm²*m estabelecidos pela norma.

Seguindo o procedimento discutido no Capítulo 5, os valores arbitrários para as variáveis de projeto são sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis de projeto

Região	Espaçamento entre:		
	Cavernas (m)	Long. Leves (m)	Long. Pesados (m)
Convés	0,3	0,5	-
Costado	0,5	0,7	-
Fundo	0,5	1,5	-
Anteparas	-		
Altura duplo fundo	-		
Distância entre costados	-		

Fonte: Autor (2023).

A fim de aproximar o projeto estrutural da realidade da empresa, optou-se pela não utilização de reforçadores pesados, além da utilização de apenas um tipo de reforçador leve, simplificando consideravelmente diversas questões associadas à logística e a manufatura do casco.

Com base no valor das variáveis, definiu-se a espessura mínima para as chapas de cada região da embarcação, as quais serviram de base para a escolha das chapas comerciais pertencentes ao catálogo de aço naval A36 da empresa SC Aços, localizada em Araquari, SC. O resultado desse processo pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Espessuras de chapa selecionadas

Região	Espessura mín. de chapa (mm)	Espessura comercial de chapa (mm)
Fundo	4,38	4,75
Bojo	4,38	4,75
Costado	4,63	4,75
Trincaniz	5,79	6,35
Convés	5,30	6,35

Fonte: Autor (2023).

É importante observar que a embarcação real, estudada neste trabalho, foi construída com chapas de 10mm de espessura para todas as regiões do casco, valor esse que representa mais que o dobro daquilo que está sendo proposto.

Já com relação aos reforçadores leves, foi selecionado um perfil de seção L laminada do tipo ISO standard com SM próprio igual a $4,42^{-9} \text{ m}^3$, o suficiente para atender ao SM mínimo próprio exigido em todas as regiões da seção mestra, tal como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 - SM próprio mínimo determinado pela norma

Região	SM mínimo do reforçador (m^3)		SM próprio do reforçador comercial (m^3)	
	Leve	Pesado	Leve	Pesado
Convés	$0,77^{-9}$	-	$4,42^{-9}$	-
Costado	$1,16^{-9}$	-	$4,42^{-9}$	-
Fundo	$2,49^{-9}$	-	$4,42^{-9}$	-

Fonte: Autor (2023).

Observando a Tabela 7, é possível constatar que o reforçador leve selecionado poderia ser inclusive menor. Porém, optou-se por esse modelo em virtude da similaridade que tal reforçador apresenta com aqueles atualmente existentes na embarcação estudada.

Além disso, conforme já comentado, seria possível utilizar um reforçador leve com SM próprio menor especialmente na região do convés. Porém, por questões práticas, foi utilizado o mesmo reforçador leve em todas as regiões da embarcação.

Definidas as variáveis de projeto e especificadas as dimensões dos elementos estruturais pertencentes à seção mestra, é possível calcular o SM projetado e verificar se esse valor atende ao exigido pela norma.

Por fim, na Tabela 8 são apresentados os principais resultados fornecidos pela planilha eletrônica desenvolvida referentes ao caso da embarcação estudada neste trabalho.

Tabela 8 - Dados da embarcação para o SM projetado

SM projetado	815,54 [cm ² *m]
Posição LN em relação a quilha da embarcação	0,87 [m]
Peso aço da embarcação	24,64 t
Peso de aço por metro de navio	1,009 t

Fonte: Autor (2023).

A partir dos resultados mostrados na Tabela 8, é possível afirmar que, com os valores das variáveis de projeto definidos nas Tabela 5, verificou-se que a seção mestra projetada atende aos requisitos exigidos pela norma para a classificação da embarcação, apresentando SM projetado 1,87 vezes maior que o requerido.

Conforme já discutido na Seção 2 do Capítulo 5, o SM requerido pela norma já apresenta todos os coeficientes de modo a ser o mais conversador possível. Assim, a fim de maximizar a eficiência estrutural, o SM projetado deve estar o mais próximo possível do SM requerido. No presente caso, isso não ocorreu em virtude da escolha de um único tipo de reforçador para todas as regiões da embarcação.

Dado que, conforme dados da documentação técnica da embarcação, a linha neutra da seção projetada (0,87 m) é muito próxima da linha neutra da embarcação atual (0,84 m), é possível afirmar que, em questões geométricas, não houve mudanças significativas.

A principal mudança que o projeto proposto neste trabalho apresenta em relação a embarcação já construída consiste no fato de que o casco passaria a ter um peso aproximado de 24,64 toneladas, ou seja, uma redução de cerca 38% em relação ao peso atual, que é de aproximadamente 39,75 toneladas, segundo as informações fornecidas pela própria empresa.

7. CONSIDERAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O projeto estrutural é uma etapa fundamental do projeto de uma embarcação, pois além de assegurar a integridade do casco, ainda está diretamente relacionada com a eficiência da operação. Assim, o arranjo e o dimensionamento das chapas e reforçadores deve visar não apenas segurança, mas também a eficiência do projeto.

Entre os diferentes métodos que um engenheiro pode seguir, o projeto estrutural baseado em sociedade classificadora se mostra uma opção bastante interessante mesmo quando a embarcação não tem a necessidade da classificação, pois reduz o empirismo e permite que procedimentos de otimização estrutural possam ser empregados de forma segura.

Com o auxílio da planilha eletrônica desenvolvida, o projetista pode, de forma rápida, determinar as características do projeto estrutural, tanto no que se refere ao arranjo, quanto ao dimensionamento de chapas e reforçadores. Além disso é possível realizar o processo numérico de equilíbrio da viga, o qual visa determinar o módulo de resistência a flexão necessário para o projeto estrutural da seção mestra.

O estudo de caso realizado permitiu evidenciar a importância de um projeto estrutural eficiente, pois os resultados mostraram que a embarcação estudada poderia apresentar um peso estrutural cerca de 38% menor, o que na prática significa um menor gasto de combustível, além de diminuir o custo de construção em virtude da economia de material empregado na fabricação do casco.

8. CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta para o projeto estrutural de embarcações fluviais usando a norma ABS (2019). O procedimento seguiu a técnica do projeto estrutural baseado em norma técnica e foi implementado em uma planilha eletrônica usando o programa Excel.

Como exemplo de aplicação, foi realizado o projeto estrutural da draga da empresa São Gabriel Mineração, que apresenta 24,4 m de comprimento total, 8,0 m de boca, pontal de 1,5 m, calado de projeto de 1,24m e capacidade de carga de aproximadamente 137 toneladas

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, a coleta de dados foi umas das etapas onde mais foram encontradas barreiras, dado que a embarcação foi construída de forma empírica, baseada em conhecimentos da equipe de produção, sem que existisse um memorial detalhado do projeto estrutural. No entanto foi possível realizar uma boa estimativa do projeto estrutural considerando as informações técnicas disponíveis, medições manuais e conversas com a equipe de produção.

Com relação a implementação da planilha, a principal dificuldade encontrada refere-se a tentativa de automatizar a entrada de dados, uma vez que cada embarcação apresenta características e arranjos diferenciados. Assim, optou-se pela utilização de uma tabela com referências genéricas para os grupos de pesos, a qual pode ser ampliada e/ou modificada manualmente pelo usuário, considerando os diferentes elementos específicos de cada projeto.

Em relação aos objetivos associados ao estudo de caso, entende-se que esses foram realizados a contento, obtendo-se um projeto estrutural consistente, que atende a norma ABS (20129) e que apresentou um peso do casco cerca de 38% menor, o que na prática significa um menor gasto de combustível, além de um menor custo de construção.

Para trabalho futuros, existem ainda pelo menos outros dois fatores que poderão agregar e corroborar o estudo até aqui apresentado. O primeiro refere-se à realização de um estudo de viabilidade de manufatura e logística, dado que um projeto eficiente usaria chapas de espessuras diferentes em cada região da embarcação, o que torna não apenas o processo de fabricação mais complicado, mas também o custo envolvido na compra dessas chapas.

Outro possível estudo futuro consiste na análise do nível de tensão atuante nas diferentes regiões da embarcação, buscando analisar os pontos críticos da estrutura, além de identificar os elementos estruturais que, eventualmente, podem estar superdimensionados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN BUREAU OF SHIPBUILDING. **Steel Vessels 2019**: part 3, hull construction and equipment. Spring, 2019. Disponível em: [http](http://www.abshipbuilding.com) Acesso em: 12 jul. 2022.
- AUGUSTO, O. B. **A estrutura secundária do navio**. Apostila. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- AUGUSTO, O. B. **Projeto racional otimizado e automatizado da estrutura de embarcações**. 1996. Tese de Livre Docência. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- BARABANOV, N. **Structural design of sea-going ships**. Nem Delhi: Central Books Ltd, 1966.
- Classe RG65**. Disponível em: <<https://marlonprestes.wordpress.com/estaleiro-mp/>>. Acesso em: maio.2023.
- DALEY, C. **Lecture Notes for Engineering 5003 – Ship Structures I** . (Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University St. John’s, CANADA, Ed.), 2017. Disponível em: <https://www.engr.mun.ca/~cdaley/5003/Lects_5003_18.pdf>. Acesso em: jun. 2023.
- DAMIENSAGE, J.; MELIN, T. **Análise paramétrica da secção mestra de um navio petroleiro. Comparação entre análise FEM e métodos analíticos aproximados**. 2012. Monografia (Curso de Engenharia Naval) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- EVANS, J. H. Basic design concepts. **Journal of the American Society for Naval Engineers**, v. 71, n. 4, p. 671–678, 1959.
- FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 7. ed, Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- LAMB, T. et al. (ed.). **Ship design and construction**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2004.
- MARTINS, R. S. M. **Desenvolvimento de uma ferramenta para suporte na análise de tensões longitudinais em estruturas de embarcações convencionais de grande porte**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Naval) - Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.
- MASO, G. P. **Procedimento computacional para análise estrutural de embarcações deslocantes usando método de elementos finitos com código aberto**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Naval) - Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- TANCREDI, T. P. **A estrutura primária do navio: Teoria de vigas – viga navio**. Apostila. Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. (mimeo).