

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

GUILHERME PEREIRA MASO

PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE  
EMBARCAÇÕES DESLOCANTES USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
COM FERRAMENTA LIVRE

Joinville

2022

GUILHERME PEREIRA MASO

PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE  
EMBARCAÇÕES DESLOCANTES USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
COM FERRAMENTA LIVRE

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

2022

GUILHERME PEREIRA MASO

PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE  
EMBARCAÇÕES DESLOCANTES USANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
COM FERRAMENTA LIVRE

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), 09 de julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.  
Orientador(a)/Presidente

---

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

---

Prof. Vitor Takashi Endo, M. Eng.  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

A análise estrutural é uma etapa do projeto naval que deve ser repetida inúmeras vezes até que seja alcançado um projeto estrutural eficiente e que seja capaz de suportar os esforços exigidos ao longo da vida útil da embarcação. Assim, o uso de procedimentos automatizados de análise mostra-se uma estratégia poderosa para a redução dos custos e do tempo exigido nesse tipo de projeto. Nesse contexto, propõe-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise automatizada da estrutura de embarcações deslocantes. São apresentados dois módulos, um para a análise dos efeitos globais na viga navio e outro destinado à análise dos efeitos locais associados a grelha chapeada que reveste o casco. Os procedimentos foram desenvolvidos utilizando rotinas escritas na linguagem *Python*. As análises estruturais são conduzidas utilizando o método dos elementos finitos implementado na ferramenta gratuita FreeCAD v0.19. Como principal resultado, apresenta-se uma ferramenta computacional gratuita destinada a análise estrutural de embarcações deslocantes que utiliza o método dos elementos finitos e que permite obter tanto o campo de tensões locais, quanto a curva de momento fletor atuante na viga navio. O processo de validação realizado para o procedimento de análise global resultou em erros médios inferiores a 2%, com valores máximos da ordem de 4%. Já o processo de verificação identificou valores de refino de malha a partir dos quais a resposta apresenta comportamento consistente, independente do gerador de malha utilizado. A análise paramétrica realizada mostrou um comportamento robusto, refletindo as mesmas conclusões já descritas na literatura.

**Palavras-chave:** Estruturas navais. Elementos finitos. Ferramenta computacional. Automatização.

## ABSTRACT

Structural analysis is a step in the naval design that must be repeated several times until a viable structural arrangement capable of withstanding the efforts required throughout the life of the vessel is reached. The use of automated analysis procedures proves to be a powerful strategy for reducing costs and time required for the project. In this context, it is proposed the development of a computational tool for automated analysis of the structure of vessels. Two modules are presented, one for the analysis of the global effects on the ship beam and another for the analysis of the local effects associated with the plated grid that covers the hull. The procedures were developed using routines written in the Python language. Structural analyzes are conducted using the finite element method implemented in the free tool FreeCAD v0.19. As a main result, a free computational tool is presented for the structural analysis of vessels that uses the finite element method and that allows obtaining both the local stress field and the bending moment curve acting on the ship beam. The validation process carried out for the global analysis procedure resulted in average errors of less than 2%, with maximum values on the order of 4%. The verification process identified mesh refinement values from which the response presents consistent behavior, regardless of the mesh generator used. The parametric analysis performed showed a robust behavior, reflecting the same conclusions already described in the literature.

**Keywords:** Naval structures. Finites elements. Computational tool. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de espiral de Evans .....	13
Figura 2 - Sistema de coordenadas de uma embarcação.....	16
Figura 3 - Gráfico GIII-7 para cálculo de tensões em placas .....	19
Figura 4 - Representação do método dos elementos finitos.....	20
Figura 5 - Arranjo estrutural de um navio .....	21
Figura 6 - Exemplo de um painel estrutural de uma embarcação.....	23
Figura 7 - Condição de alquebramento .....	25
Figura 8 - Condição de tosamento .....	25
Figura 9 - Curva de Pesos de uma embarcação.....	26
Figura 10 - Influência da passagem de onda na curva de flutuação .....	27
Figura 11 - Curva de cargas de uma embarcação.....	28
Figura 12 - Influência da passagem de onda na curva de momento fletor ....	30
Figura 13 - Equilíbrio estático da embarcação .....	32
Figura 14 - Processo iterativo de análise estrutural por MEF .....	34
Figura 15 - Metodologia utilizada no trabalho.....	35
Figura 16 - Sequenciamento da modelagem na ferramenta.....	38
Figura 17 - Definição das variáveis na modelagem da viga navio .....	39
Figura 18 - Criação de um novo documento e modelagem da viga navio .....	41
Figura 19 - Criação do modelo de elementos finitos .....	41
Figura 20 - Definição do material e suas propriedades.....	42
Figura 21 - Aplicação da condição de carregamento (pressão) .....	43
Figura 22 - Aplicação da condição de contorno de engaste .....	43
Figura 23 - Criação da malha e definição dos tamanhos de elementos .....	44
Figura 24 - Execução da análise pelo método dos elementos finitos.....	45
Figura 25 - Compilado de resultados da análise de viga navio .....	46
Figura 26 - Definição das variáveis de projeto do painel estrutural .....	46
Figura 27 - Modelagem da chapa do painel estrutural que será analisado ...	47
Figura 28 - Modelagem dos reforçadores do painel que será analisado .....	47
Figura 29 - Condições de contorno do painel estrutural .....	48
Figura 30 - Definição das regiões onde serão aplicados o engaste .....	50
Figura 31 - Aplicação da restrição de deslocamentos.....	50

Figura 32 - Compilado de resultados da análise de painéis.....	51
Figura 33 - Variáveis para rotina do painel ortogonal.....	52
Figura 34 - Modelagem e posicionamento dos reforçadores longitudinais....	53
Figura 35 - Modelagem e posicionamento dos reforçadores transversais ....	53
Figura 36 - Fusão e criação do painel ortogonal.....	54
Figura 37 - Exemplo de painel ortogonal modelado .....	54
Figura 38 - Estudo de refino de malha (viga bi-engastada) (Poisson = 0,3) .	56
Figura 39 - Estudo de refino de malha (viga bi-engastada) (Poisson = 0,0) .	57
Figura 40 - Estudo de refino de malha (viga bi-apoiada).....	58
Figura 41 - Representação esquemática dos resultados .....	58
Figura 42 - Representação das tensões máximas no chapeamento.....	60
Figura 43 - Estudo de refino de malha (chapa 1) (lados engastados).....	60
Figura 44 - Estudo de refino de malha (chapa 1) (lados apoiados) .....	60
Figura 45 - Erro entre tendência e extrapolação do gráfico GIII-7 .....	61
Figura 46 - Estudo de refino de malha (chapa 2) (lados engastados).....	62
Figura 47 - Estudo de refino de malha (chapa 2) (lados apoiados) .....	63
Figura 48 - Representação das tensões na chapa 2 (engastado) .....	63
Figura 49 - Representação das tensões na chapa 2 (apoiado).....	64
Figura 50 - Curvas de força cortante para a viga navio 1 .....	66
Figura 51 - Curvas de momento fletor para a condição de mar calmo.....	67
Figura 52 - Curvas de momento fletor para a condição de tosamento.....	67
Figura 53 - Curvas de momento fletor para a condição de alquebramento...	68
Figura 54 - Curvas de força cortante da segunda análise.....	69
Figura 55 - Curva de momento fletor para o segundo caso .....	70
Figura 56 - Curva de momento fletor para o terceiro caso .....	70
Figura 57 - Estudo de variação de massa e tensão de von Mises.....	72
Figura 58 - Fronteira de Pareto para o estudo realizado .....	73
Figura 59 - Influência do número de reforçadores nos resultados.....	74
Figura 60 - Influência das dimensões do flange nos resultados.....	74
Figura 61 - Influência das dimensões da alma nos resultados.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Graus de liberdade das condições de restrição .....	49
Tabela 2 - Viga com seção retangular .....	55
Tabela 3 - Condições de contorno aplicadas nos extremos da viga.....	56
Tabela 4 - Dimensões e propriedades da chapa 1 .....	59
Tabela 5 - Dimensões e propriedades da chapa 2 .....	62
Tabela 6 - Dimensões e propriedades da viga navio 1 .....	65
Tabela 7 - Carregamento atuante na viga navio 1 .....	65
Tabela 8 - Erros quadráticos para primeira validação .....	67
Tabela 9 - Dimensões e propriedades das embarcações da segunda análise.....	68
Tabela 10 - Carregamento atuante nas vigas da segunda análise .....	69
Tabela 11 - Erros quadráticos para a segunda análise.....	70
Tabela 12 - Espaço amostral utilizado no estudo paramétrico .....	71
Tabela 13 - Dimensões das geometrias representadas na fronteira de Pareto.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LCG – Centro longitudinal de gravidade

LCB – Centro longitudinal de flutuação

MEF – Elementos finitos

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

B – Boca da embarcação

L – Comprimento da embarcação

D – Pontal da embarcação

$\rho$  - Densidade do fluido

g – Gravidade

$\Delta$  - Deslocamento da embarcação

$\nabla$  - Volume deslocado da embarcação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1. OBJETIVOS .....	14
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1. SISTEMA DE COORDENADAS .....	16
2.2. ANÁLISE DE TENSÕES EM VIGAS .....	16
2.3. ANÁLISE DE TENSÕES EM PLACAS .....	18
2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	19
2.5. DESACOPLAMENTO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE NAVIOS .....	21
<b>2.5.1. Análise de efeitos globais na estrutura</b> .....	<b>24</b>
<u>2.5.1.1. Curva de pesos</u> .....	<u>26</u>
<u>2.5.1.2. Curva de flutuação</u> .....	<u>26</u>
<u>2.5.1.3. Curva de carga</u> .....	<u>28</u>
<u>2.5.1.4. Curva de força cortante e curva de momento fletor</u> .....	<u>28</u>
<b>2.5.2. Análise de efeitos locais na estrutura</b> .....	<b>31</b>
2.6. PROJETO ESTRUTURAL .....	32
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
<b>4. DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>38</b>
4.1. ROTINA PARA ANÁLISE AUTOMATIZADA DE VIGA NAVIO .....	39
4.2. ROTINA PARA ANÁLISE AUTOMATIZADA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS .....	46
4.2. ROTINA AUTOMATIZADA PARA MODELAGEM DE PAINÉIS ORTOGONAIS .....	52
<b>5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA</b> .....	<b>55</b>
5.1 VERIFICAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA VIGA 3D .....	55
5.2 VERIFICAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA CHAPA 3D .....	58
5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VERIFICAÇÃO DE MALHA .....	64
5.4. VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA VIGA NAVIO .....	64
<b>6. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MASSA NA TENSÃO DE VON MISES</b> .....	<b>71</b>
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A – GRAUS DE LIBERDADE DE CADA TIPO DE ELEMENTO</b> .....	<b>81</b>

<b>APÊNDICE B – CURVAS DE CARGA ATUANTE NA VIGA NAVIO 1 .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE C – DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A análise estrutural é uma das etapas mais importante do projeto naval, pois é nela que é assegurada a integridade necessária para que a embarcação cumpra a funcionalidade desejada. Sobre isso, Tancredi (2004) escreve: “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”.

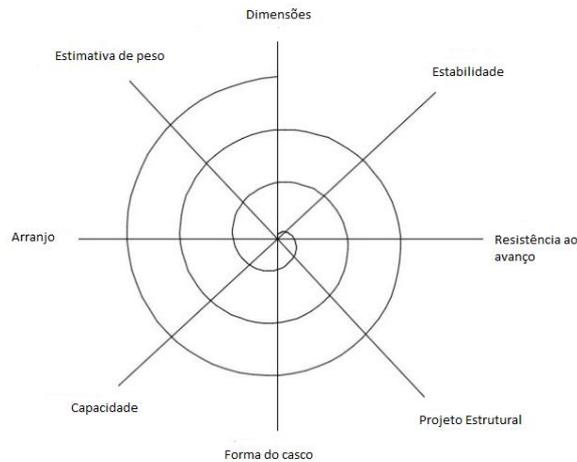
Tradicionalmente, o projeto estrutural naval é um processo iterativo que requer o conhecimento de diversas características da embarcação, tais como: formas do casco, arranjo (posição de anteparas), distribuição de carga, entre outros. No entanto, o peso da estrutura e o centro de gravidade estrutural são fundamentais para a definição do arranjo e das formas de um navio. Assim, é usual que o projeto estrutural seja refeito ao longo dos ciclos sucessivos de um projeto naval, constituindo uma das etapas mais dispendiosas e trabalhosas desse tipo de projeto (HUGHES; PAIK, 2010).

Além disso, como alerta Oliveira et al. (2013), o próprio projeto de embarcações é, também, um procedimento iterativo, no qual a otimização de uma etapa não garante, necessariamente, o desempenho ótimo global do projeto.

Devido a esse caráter iterativo, o processo de projeto de um navio costuma ser representado por uma espiral, onde as etapas são repetidas iterativamente até a convergência da solução. Essa representação foi originalmente proposta por Evans (1959), sendo frequentemente denominada de espiral de Evans.

Dado que a espiral de Evans é composta por etapas interdependentes, a cada volta da espiral, os resultados das etapas são revistos até que o processo convirja para uma solução ideal, representada pelo centro da espiral (Figura 1).

Figura 1 - Exemplo de espiral de Evans



Fonte: Adaptado de Evans (1959, p. 672).

Durante um projeto estrutural naval, o dimensionamento das espessuras do chapeamento e dos reforçadores é realizado diversas vezes até que a estrutura consiga atender os requisitos estabelecidos.

Tradicionalmente, existem duas abordagens para estabelecer esses requisitos. Na primeira, são utilizadas regras empíricas propostas por Sociedades Classificadoras, já na segunda, procedimentos analíticos e/ou numéricos são empregados para determinar as tensões atuantes na estrutura (BAI, 2003).

Uma vez que não existe uma correlação simples entre os espaçamentos de um arranjo estrutural e o nível de tensão atuante no projeto, são realizados ciclos sucessivos de ajustes até que seja determinado um arranjo estrutural cujo módulo de seção atenda aos requisitos impostos.

No entanto, diferentemente das estruturas civis, é importante observar que a missão de um navio é transportar pessoas e/ou cargas (HUGHES; PAIK, 2010). Logo, cada quilo a mais de aço utilizado na estrutura representa, ao longo de toda a vida útil da embarcação, um quilo a menos de carga ou uma quantidade maior de combustível consumida para navegar à velocidade de serviço.

Nesse contexto, a busca por um arranjo estrutural que reduza a massa da estrutura, sem prejudicar a resistência, pode representar um importante diferencial competitivo para as empresas. É por essa razão que Augusto (1996) justifica o fato de que, desde a década de 90, diversos pesquisadores têm empregado esforços para a aplicação de técnicas de otimização no projeto de estruturas navais.

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

Entre as técnicas destinadas à análise estrutural, o Método dos Elementos Finitos (MEF) vem ganhando espaço graças à evolução dos computadores e das tecnologias da informação.

Segundo Bai (2003), o aumento da disponibilidade de poder computacional viabilizou a análise de estruturas complexas e motivou o desenvolvimento de diversas ferramentas computacionais destinadas à auxiliar a modelagem (Computer Aided Design), o projeto (Computer Aided Engineering) e a fabricação (Computer Aided Manufacturing).

Paradoxalmente, é importante observar que as ferramentas consolidadas no mercado costumam apresentar custos proibitivos para centros de pesquisa ou pequenos escritórios de projeto.

## 1.1. OBJETIVOS

Desenvolver um procedimento automatizado de análise estrutural de embarcações deslocantes, o qual empregue o método dos elementos finitos e seja realizado com o auxílio de uma ferramenta gratuita e de fácil acesso.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento automatizado de análise estrutural que emprega o método dos elementos finitos implementado em uma ferramenta gratuita e de fácil acesso.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

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

- Selecionar uma ferramenta gratuita que permita o uso da técnica dos elementos finitos;
- Desenvolver uma rotina para modelagem de estruturas simples, cujo procedimento possa ser parametrizado e automatizado;
- Desenvolver um modelo paramétrico para a análise de viga navio;
- Desenvolver um modelo paramétrico para a análise de um painel estrutural;
- Realizar estudos de caso para verificação e validação da ferramenta.

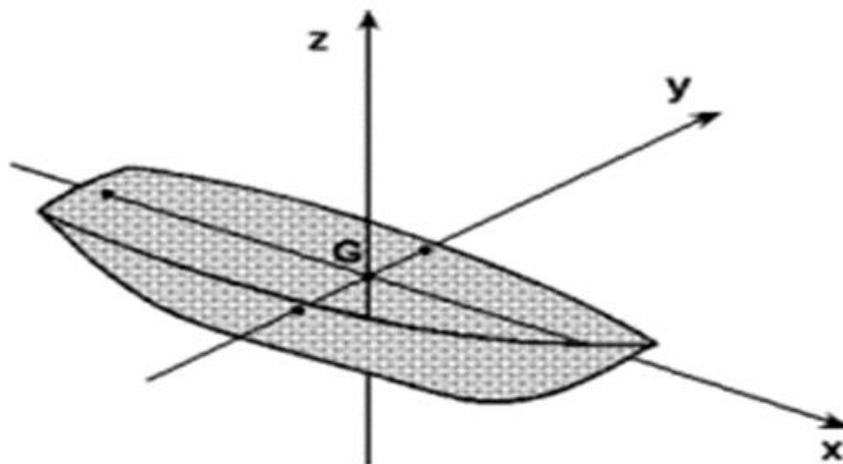
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve as hipóteses e os conceitos associados ao projeto de estruturas navais utilizando o método dos elementos finitos, tal como será aplicado neste trabalho.

### 2.1. SISTEMA DE COORDENADAS

No sistema de coordenadas usualmente empregado por engenheiros navais, o eixo  $X$  corresponde à direção longitudinal da embarcação, sendo positivo da popa para a proa, o eixo  $Y$  corresponde à direção transversal, sendo positivo de boreste para bombordo e, por último, o eixo  $Z$ , corresponde a direção vertical, sendo positivo da quilha para o convés da embarcação (Figura 2).

Figura 2 - Sistema de coordenadas de uma embarcação



Fonte: Autor (2022).

### 2.2. ANÁLISE DE TENSÕES EM VIGAS

De acordo com Hibbler (2004), as vigas são elementos retos e compridos que suportam cargas na direção perpendicular ao seu eixo longitudinal e podem ser classificadas de acordo com o tipo de vínculo existente (engastada, em balanço, apoiada etc.).

Para a determinação das tensões estruturais é necessário analisar as deflexões sofridas pela viga por meio de análise do deslocamento de sua linha elástica (HIBBLER, 2004). Assumindo que a estrutura esteja em equilíbrio, as Equações 1 a 4 podem ser usadas para descrever o comportamento mecânico de uma viga sujeita a cargas transversais.

$$q(x) = EI_z \frac{d^4 v(x)}{dx^4} \quad (1)$$

$$V_y(x) = EI_z \frac{d^3 v(x)}{dx^3} \quad (2)$$

$$M_z(x) = EI_z \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \quad (3)$$

$$\theta_z(x) = EI_z \frac{dv(x)}{dx} \quad (4)$$

Onde  $q(x)$  representa o carregamento transversal aplicado ao longo da viga,  $V_y(x)$  a força cortante,  $M_z(x)$  o momento fletor,  $\theta_z(x)$  a rotação da seção,  $v(x)$  a deflexão no ponto,  $E$  o módulo de elasticidade do material da viga e, por fim,  $I_z$  o momento de inércia da seção transversal da viga calculado em relação a linha neutra da seção.

A tensão normal atuante em uma seção de viga pode ser calculada utilizando a Equação 5, onde  $y$  representa a distância perpendicular medida do ponto analisado até a linha neutra da seção a qual o ponto pertence.

$$\sigma(x) = \frac{M_z(x)y}{I_z} \quad (5)$$

Observando a Equação 5, percebe-se que, ao se analisar os pontos pertencentes à uma mesma seção, o momento fletor atuante e o momento de inércia são constantes. Dessa forma, a máxima tensão ocorrerá no ponto mais distante da linha neutra da seção.

### 2.3. ANÁLISE DE TENSÕES EM PLACAS

Diferentemente das vigas, nas quais a flexão ocorre apenas na direção longitudinal, nas placas observam-se flexões tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal (AUGUSTO, 2004b).

De maneira análoga ao caso das vigas, partindo da teoria geral da elasticidade e aplicando-se as simplificações associadas ao estado plano de tensões, é possível obter a Equação 6.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (6)$$

Onde  $w$  representa o deslocamento na direção do eixo  $z$ ,  $p$  representa a pressão uniforme atuante na placa e  $D$  o módulo de rigidez à flexão da placa, dado pela Equação 7.

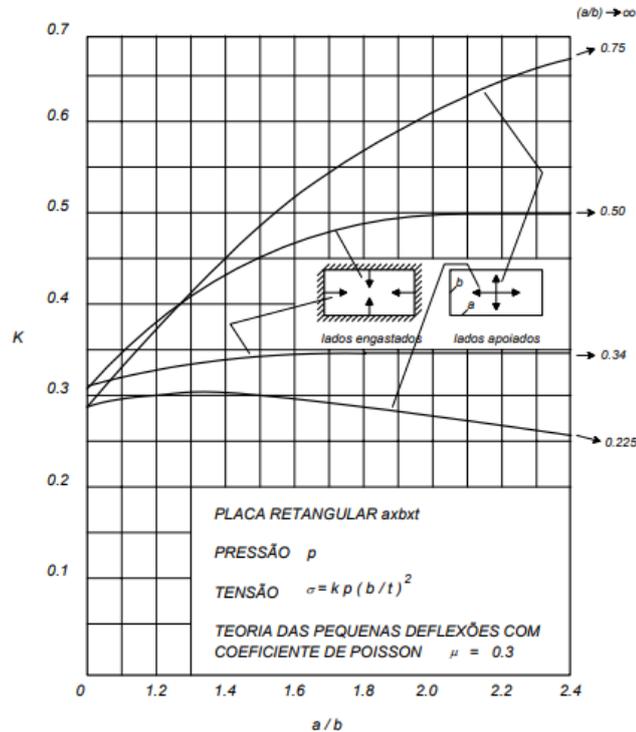
$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (7)$$

Onde  $E$  representa o módulo de elasticidade do material,  $t$  a espessura da placa e  $\nu$  o coeficiente de Poisson.

É importante destacar que a formulação apresentada nesta seção, além de considerar um estado plano de tensões, ainda inclui as hipóteses de pequenas deformações, pequenas rotações e linearidade do material, além de considerar que o plano de meia espessura da placa não se deforma.

Para facilitar as análises estruturais, Freitas (1980) apresenta uma solução gráfica para a Equação 6, a qual pode ser aplicada na análise de chapas retangulares sujeitas à pressão uniforme, quando essas possuem os quatro lados engastados ou os quatro lados apoiados (Figura 3).

Figura 3 - Gráfico GIII-7<sup>1</sup> para cálculo de tensões em placas



Fonte: Freitas (1980).

Observando a Figura 3, é possível constatar que as tensões existentes em uma chapa retangular de espessura  $t$ , sujeita a pressão uniforme  $p$ , variam proporcionalmente ao coeficiente  $k$ , definido em função da condição de contorno aplicada e da relação entre o comprimento do lado maior  $a$  e do lado menor  $b$  da chapa.

## 2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

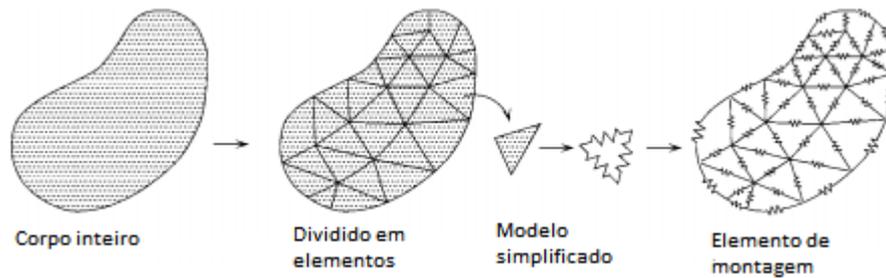
Zienkiewicz e Taylor (2000) explicam que modelos numéricos, os quais utilizam um número limitado de elementos para definirem a estrutura, são chamados de modelos discretos. Já os modelos que utilizam um número infinito de elementos infinitesimais são chamados de modelos contínuos, os quais correspondem a resolução das equações diferenciais que regem o fenômeno. Por fim, existem ainda

<sup>1</sup> Esse gráfico é tão útil e tão usado no mundo das estruturas navais que os engenheiros orientavam uns aos outros dizendo: - 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 mudanças do livro texto.

os modelos híbridos, nos quais apenas uma parte da geometria é representada por elementos discretos, enquanto o restante, continua a ser modelado por equações diferenciais contínuas.

Entre os métodos discretos, destaca-se o método dos elementos finitos (Figura 4), o qual é usado para facilitar análises de estruturas complexas, subdividindo-as em elementos bem definidos cujo comportamento é conhecido. A partir da análise individual de cada elemento, o comportamento da estrutura original é reconstruído (OKUMUTO et al., 2009).

Figura 4 - Representação do método dos elementos finitos



Fonte: Traduzido de Okumoto et al. (2009, p. 126).

Em análises estruturais, uma das principais aplicações desse método consiste na determinação das tensões e das deformações de componentes bidimensionais e tridimensionais. No entanto, é possível, também, realizar análises sobre a estabilidade (flambagem) e a dinâmica (vibrações) de estruturas.

Em uma situação de equilíbrio de forças e momentos, durante o regime linear, o comportamento mecânico de uma estrutura segue a relação existente entre as cargas aplicadas e os deslocamentos estruturais. Essa relação é expressa pela Equação 8, onde  $\{f\}$  e  $\{u\}$  são os vetores de forças e deslocamentos, respectivamente, e  $[K]$  é a matriz de rigidez da estrutura.

$$\{f\} = [K]\{u\} \quad (8)$$

Contudo, destaca-se que, no método dos elementos finitos, o comportamento de uma estrutura é descrito por um número finito de variáveis, as quais se referem aos deslocamentos nodais e suas derivadas. Assim, de acordo com Hughes (2010),

o método dos elementos finitos nunca representará a solução exata de problemas contínuos, independentemente do número de variáveis discretas adotadas no modelo.

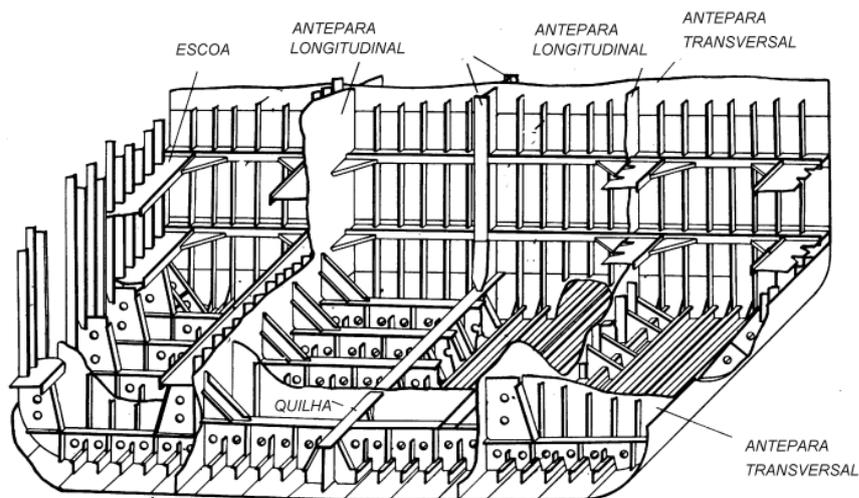
No entanto, uma forma de reduzir o erro da análise consiste em usar elementos menores, aumentando a quantidade de elementos utilizados na análise. Segundo Okumoto (2009), um maior número de elementos permite, em teoria, mais pontos de compatibilidade entre o modelo discreto e a geometria real. Somado a isso, a escolha cuidadosa das características da malha e do tipo de elemento utilizado também contribuem na diminuição do erro da análise.

Assim como a malha, as cargas e as condições de contorno utilizadas na modelagem devem ser cuidadosamente determinadas para que representem corretamente os fenômenos modelados. Sobre os graus de liberdade, no Apêndice A são sintetizadas as diferentes combinações de graus de liberdade associados a cada tipo de elemento.

## 2.5. DESACOPLAMENTO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE NAVIOS

Na Figura 5 é possível visualizar o arranjo estrutural típico de uma embarcação de casco singelo, o qual é composto por chapas, reforçadores longitudinais, anteparas e cavernas.

Figura 5 - Arranjo estrutural de um navio



Fonte: Augusto (2004a, p. 4).

Segundo Barabanov (1966), graças à geometria característica, a análise estrutural de uma embarcação pode ser dividida em efeitos globais e locais. Os efeitos globais são aqueles que se prolongam para regiões da estrutura longe do ponto de aplicação das cargas. Já os efeitos locais são aqueles que ficam restritos apenas à região de aplicação das cargas.

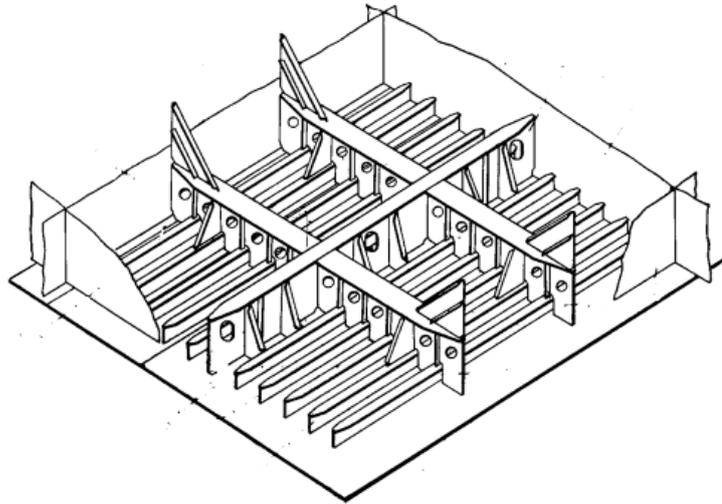
Assim, uma falha ocorrida distante do ponto de aplicação das cargas atuantes é denominada Falha Global, e, em geral, leva ao colapso da estrutura. Embora uma Falha Local possa resultar no colapso estrutural, em geral, esse tipo de falha fica restrita a uma região da estrutura. De acordo com Tancredi (2004), a análise global de uma estrutura naval é chamada de análise da Estrutura Primária, sendo a etapa responsável por avaliar os efeitos sofridos no casco da embarcação, em sua totalidade.

Uma vez que o comprimento de uma embarcação é, geralmente, muito maior que a boca e o pontal, a estrutura primária do navio costuma ser modelada usando a Teoria Simples de Viga. Assim, para embarcações com razões L/B e L/D maiores que cinco (ABS, 2019), a análise global de um navio é feita considerando o casco como uma viga, a qual é chamada de viga navio.

Conforme discutido por Hughes (2010), é importante considerar que apenas os elementos contínuos ao longo do comprimento do navio são efetivos na resistência e rigidez da viga navio. A rigor, o autor explica que esse fator depende de diversas questões e que existe uma porcentagem de efetividade associada a cada elemento estrutural presente na seção mestra de um navio. No entanto, Augusto (2004a) propõem que, em uma abordagem simplificada, os elementos devem ser considerados efetivos apenas se forem contínuos por mais de 2/3 do comprimento do casco. Dessa forma, o modelo simplificado será conservador em relação a estrutura real da embarcação.

Como descrito por Barabanov (1966), em virtude da maior facilidade construtiva e da maior eficiência, painéis estruturais navais são compostos por uma chapa fina reforçada por uma grelha ortogonal, contendo reforçadores longitudinais e transversais a viga navio (Figura 6).

Figura 6 - Exemplo de um painel estrutural de uma embarcação



Fonte: Augusto (2004a, p. 5).

Por fim, a análise da estrutura local de um navio corresponde a análise dos painéis estruturais que compõem o casco, podendo ser subdividida na análise da Estrutura Secundária e da estrutura Terciária. Enquanto a Estrutura Secundária é constituída pelo conjunto de reforçadores que enrijecem as seções localizadas entre duas anteparas transversais, a Estrutura Terciária corresponde ao chapeamento que reveste o casco de uma embarcação.

Segundo Augusto (2004a), os reforçadores podem ser classificados em reforçadores longitudinais e transversais, sendo que os reforçadores longitudinais podem ser subdivididos em reforçadores leves e pesados. Nessa classificação, os reforçadores leves possuem rigidez flexional pelo menos uma ordem de grandeza menor do que os reforçadores transversais (cavernas) e têm 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 têm a missão de enrijecer a viga navio.

Enquanto a estrutura longitudinal permite que a viga navio possa resistir aos esforços flexionais, a estrutura transversal oferece resistência aos esforços torcionais causados pela incidência de ondas oblíquas ao casco.

Conforme já mencionado, a Estrutura Terciária corresponde ao chapeamento do casco, cuja principal função é assegurar a estanqueidade da embarcação. Nesse sentido, define-se como unidade de chapeamento uma porção contínua de chapa limitada por quatro reforçadores quaisquer.

É importante observar que o conceito de unidade de chapeamento não guarda relação com o processo de fabricação/edificação do navio, sendo possível existir cordões de solda em uma unidade de chapeamento, uma vez que a solda é considerada, para todos os efeitos, uma continuidade do material.

Respeitando a modelagem definida na seção anterior, enquanto na viga navio a flexão ocorre apenas na direção longitudinal do navio, o painel estrutural, dado o caráter bidimensional da geometria, estará sujeito tanto a flexão longitudinal quanto a flexão transversal.

### **2.5.1. Análise de efeitos globais na estrutura**

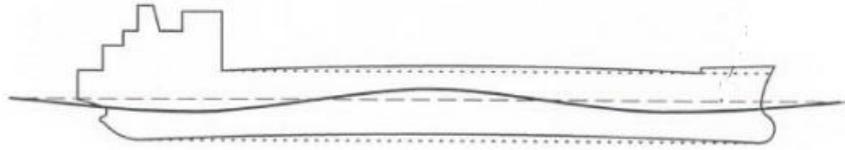
Conforme já mencionado, quando analisado os efeitos globais de um navio, é possível assumir a hipótese de que o casco comportar-se-á como uma viga, possibilitando que a análise estrutural seja realizada utilizando-se a teoria simples de viga. Nesse modelo, as tensões globais podem ser calculadas de maneira simplificada utilizando-se a distribuição de pesos a bordo e a distribuição da flutuação ao longo da embarcação. Logo, a qualidade da resposta obtida dependerá do detalhamento realizado na modelagem da curva de carga atuante na viga navio.

É importante observar que, embora a curva de pesos seja única para cada condição de carga analisada, a curva de flutuação sofre mudanças durante a navegação devido à passagem das ondas, sendo necessário analisar diversos cenários para identificar a situação crítica.

Embora existam ondas de diferentes comprimentos no mar, a literatura (HUGHES, 2010) consagra que as solicitações estruturais mais severas sofridas por um navio ocorrem quando a embarcação encontra ondas que possuem comprimento próximo ao comprimento do casco. O instante no qual as extremidades do navio se encontram no vale de uma onda crítica, é denominado de condição de alquebramento (Figura 7), já quando as extremidades são suportadas pelas cristas de uma onda crítica, denomina-se condição de tosamento (Figura 8).

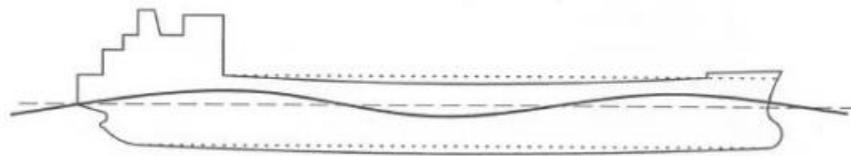
Assim, para buscar a condição de carregamento crítica, além de se considerar a onda crítica (aquela de comprimento igual ao comprimento do casco), deve-se analisar as condições de equilíbrio tanto em águas tranquilas, quanto nos instantes de tosamento e de alquebramento (AUGUSTO, 2007).

Figura 7 - Condição de alquebramento



Fonte: Augusto (2007, p. 23).

Figura 8 - Condição de tosamento



Fonte: Augusto (2007, p. 23).

De acordo com Tancredi (2004), a viga navio não possui vínculos externos. Sendo assim, qualquer desequilíbrio no carregamento irá resultar em movimentos da embarcação até que o carregamento se torne auto equilibrado.

Portanto, qualquer análise estrutural de um navio deve se iniciar pela verificação da condição de equilíbrio, a qual, para ser atendida, requer que o peso seja numericamente igual ao empuxo (Equação 9), além de exigir que a posição longitudinal do centro de massa  $LCG$  seja igual a posição longitudinal do centro de flutuação  $LCB$  (Equação 10).

$$W = \rho g \nabla \quad (9)$$

$$LCG = LCB \quad (10)$$

Onde  $W$  representa o peso do navio,  $\rho$  a densidade do fluido,  $g$  representa a gravidade e  $\nabla$  o volume deslocado pelo casco.

Caso alguma das condições de equilíbrio não seja satisfeita, a análise passa a ser uma análise dinâmica, associada aos movimentos da estrutura, os quais, em um primeiro momento, não provocam solicitações estruturais.

No entanto, conforme alerta Barabanov (1996), em virtude da tridimensionalidade do casco, o equilíbrio é alcançado através de um processo

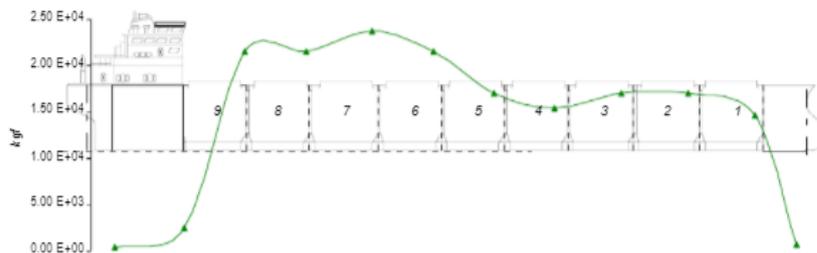
iterativo, pois, a alteração do trim de uma embarcação provoca também uma alteração no volume deslocado pelo casco, modificando o equilíbrio descrito pela Equação 9.

#### 2.5.1.1. Curva de pesos

A curva de pesos descreve a distribuição, ao longo do comprimento, de todos os pesos a bordo da embarcação (Figura 9). Entre os grupos de pesos a bordo de um navio, destacam-se: peso de aço, peso de *outfitting*, peso de maquinário, peso da carga, lastro, pesos de consumíveis, além de, eventualmente, outros elementos com massa significativa (guindastes, piscinas, banco de baterias etc.).

Uma vez que a curva de pesos descreva a distribuição de pesos ao longo do navio, é natural constatar que a área abaixo dessa curva representa o peso total do navio. Já o centro dessa área corresponderá ao *LCG* do navio.

Figura 9 - Curva de Pesos de uma embarcação



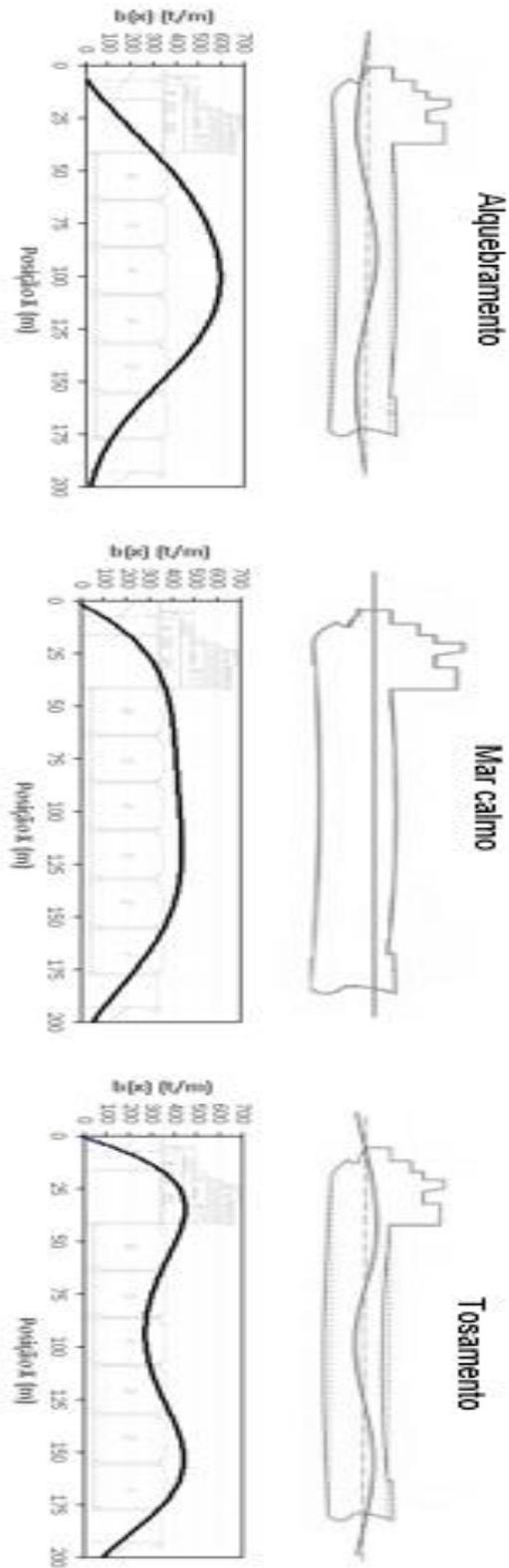
Fonte: Tancredi (2004, p. 10).

#### 2.5.1.2. Curva de flutuação

A curva de flutuação descreve a flutuação existente ao longo do comprimento do casco, sendo obtida a partir da integração da área submersa das balizas da embarcação. Analogamente a curva de pesos, a área abaixo da curva de flutuação representa o volume total deslocado pela embarcação, enquanto o centro da curva corresponderá ao *LCB* do casco.

É justamente no cálculo da curva de flutuação que a passagem das ondas deve ser considerada, pois a interação de uma onda com o navio modificará a área imersa de cada baliza, tal como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Influência da passagem de onda na curva de flutuação

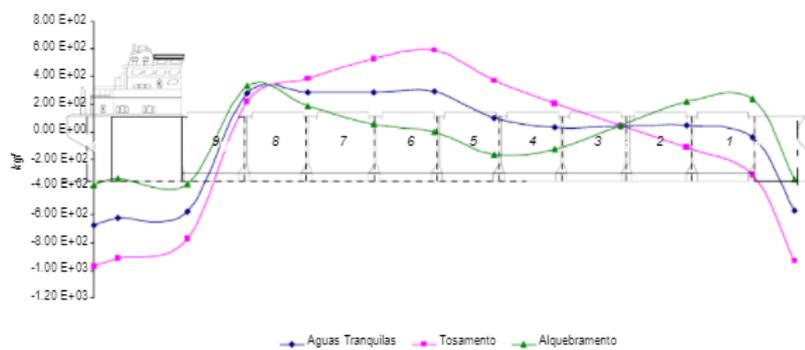


Fonte: Autor (2022).

### 2.5.1.3. Curva de carga

A curva de carga é obtida subtraindo-se a curva de flutuação da curva de pesos da embarcação. Em geometrias tridimensionais de casco e/ou distribuições de pesos irregulares, essa operação deve ser feita ponto a ponto, considerando-se tantas posições longitudinais da vida navio quanto forem necessárias para se obter uma curva de carga representativa do carregamento atuante na estrutura (Figura 11).

Figura 11 - Curva de cargas de uma embarcação



Fonte: Tancredi (2004, p. 12).

Uma vez que a curva de carga representa o carregamento total atuante no navio, se a distribuição de cargas estiver em equilíbrio, a área abaixo da curva de cargas deve ser nula, indicando que não existe sobra de peso ou de flutuação atuante na viga navio. Além disso, o centro das áreas positivas da curva de carga deve estar na mesma posição longitudinal do centro das áreas negativas, assegurando a segunda condição de equilíbrio da estrutura (Equação 10).

### 2.5.1.4. Curva de força cortante e curva de momento fletor

Uma vez que, no modelo descrito neste trabalho, a estrutura primária é analisada usando a teoria simples de vigas, a curva de força cortante atuante na viga navio pode ser obtida pela integração da curva de carga  $q(x)$ :

$$V(x) = \int_0^x q(x) dx \quad (11)$$

Segundo Tancredi (2004), para geometrias usuais e distribuições de carga convencionais, a curva de força cortante costuma ser assimétrica e costuma possuir valor nulo próximo a meia nau, além de apresentar valor máximo próximo a um quarto de vante e a um quarto de ré da embarcação.

Já a curva de momento fletor, também seguindo a teoria simples de viga, é obtida pela integração da curva de força cortante  $V(x)$ :

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (12)$$

Ainda segundo Tancredi (2004), em geral, para geometrias usuais e carregamentos convencionais, a curva de momento fletor apresenta valor máximo próximo à meia nau, sendo essa seção denominada de seção mestra<sup>2</sup>. É justamente por essa seção que o projeto estrutural de uma embarcação é iniciado, já que é nela que estão localizados os maiores esforços solicitantes.

Dado que a disposição do carregamento na embarcação, quando em mar calmo, tende a alquebrar ou a tosar a viga navio, a passagem de uma onda, ora amplifica, ora reduz, essa tendência.

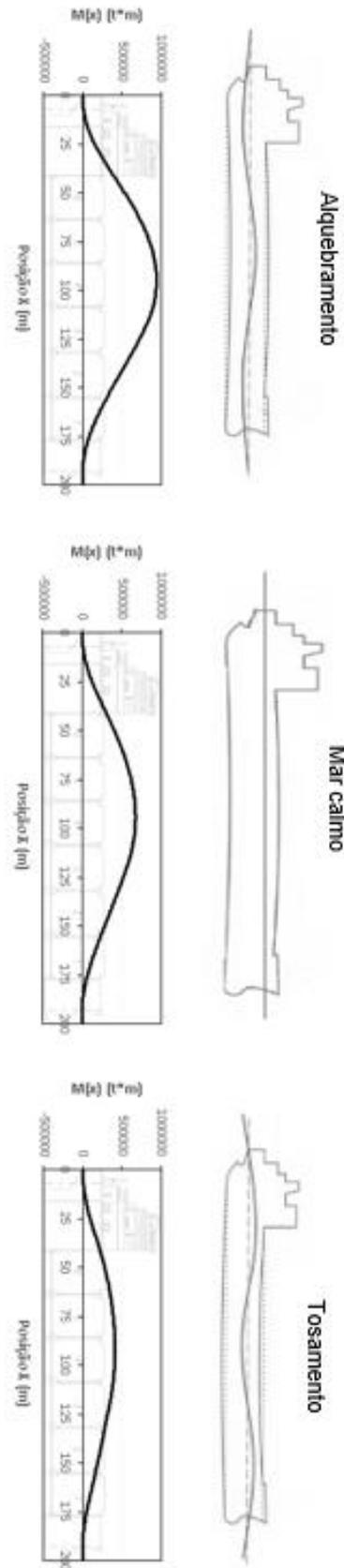
Assim, é importante observar que a condição de mar calmo é sempre uma condição intermediária às duas condições associadas à passagem da onda crítica (Figura 12).

Por fim, como ensina Barabanov (1996), é muito difícil antecipar a condição crítica de carga e, por isso, qualquer análise de uma estrutura naval deve verificar diferentes condições de carga a bordo, além de considerar os diferentes instantes associados a passagem da onda crítica.

---

<sup>2</sup> É importante destacar que a nomenclatura “seção mestra” as vezes é utilizada para definir a seção de maior boca e/ou a seção a meia nau de um navio.

Figura 12 - Influência da passagem de onda na curva de momento fletor



Fonte: Autor (2022).

### 2.5.2. Análise de efeitos locais na estrutura

Conforme já apresentado, a análise dos efeitos locais sofridos no casco de uma embarcação refere-se ao estudo das estruturas secundárias e terciárias, que por sua vez, em uma abordagem simplificada, correspondem à análise dos reforçadores longitudinais e do chapeamento de um navio.

Assim como na viga navio, em virtude da geometria característica, tanto os reforçadores leves, quanto os pesados, podem ser analisados utilizando a teoria simples de viga. Dessa forma, os parâmetros do reforçador envolvidos na análise são: a carga uniforme aplicada, as características da seção, o comprimento do vão livre e a largura da chapa colaborante (porção do casco que, efetivamente, contribui para a rigidez do reforçador).

É importante ressaltar que, como discutido por Barabanov (1996), a chapa colaborante deve ser sempre considerada no cálculo das propriedades da seção do reforçador (posição da linha neutra e momento de inércia), pois, ao serem soldados ao casco, os reforçadores têm sua rigidez aumentada.

Embora seja adequada para análise de reforçadores longitudinais, a hipótese de carga uniforme é pouco realista para reforçadores verticais, os quais estão sujeitos a um carregamento linear oriundo da variação da pressão hidrostática ao longo do casco. Nesse caso, Augusto (2004a) sugere que, em uma abordagem conservadora, seja adotada uma carga uniforme, cujo valor corresponde ao maior valor de carregamento atuante no reforçador.

Por fim, o tipo de vínculo utilizado na análise influencia significativamente os resultados. Conforme ensina Augusto (2004a), em virtude da simetria da geometria e do carregamento, os reforçadores leves podem ser considerados bi engastados nas cavernas, enquanto os reforçadores pesados podem ser considerados bi engastados nas anteparas ou colunas.

Resta evidente que, em navios reais, a hipótese da simetria da geometria e do carregamento nem sempre é válida. Logo, na realidade, o tipo de vínculo se aproximaria mais de uma mola com rigidez torcional do que de um apoio ou engaste. No entanto, novamente Augusto (2004a) propõem que, para facilitar a análise, os reforçadores sejam sempre considerados bi engastados, o que oferecerá resultados conservadores em relação a estrutura real.

Já para a estrutura terciária, as tensões devem ser calculadas adotando-se a formulação referente ao modelo de chapa, uma vez que o comprimento das unidades de chapeamento (Seção 2.3) é da mesma ordem de grandeza que sua largura, enquanto a espessura é, ao menos, uma ordem de grandeza menor

Já em relação ao tipo de vínculo, as mesmas hipóteses e discussões realizadas na análise dos reforçadores são aplicáveis a análise das unidades de chapeamento, as quais devem, portanto, sempre<sup>3</sup> serem analisadas considerando que os quatro lados estão engastados.

## 2.6. PROJETO ESTRUTURAL

O projeto estrutural de um navio visa assegurar que a embarcação possa suportar as cargas atuantes ao longo dos anos de serviço, sem sofrer falhas ou deformações plásticas que afetem seu desempenho ou a sua segurança. Assim, de acordo com Augusto (2004a), essa etapa de projeto depende de uma avaliação precisa das cargas atuantes na embarcação durante a sua vida útil.

Conforme já discutido, para realizar o projeto estrutural de uma embarcação é necessário, primeiramente, determinar uma condição equilibrada de carregamento, dada pelas Equações 9 e 10. Esse equilíbrio é resultante da interação das forças gravitacionais atuantes na embarcação (pesos) e das forças de flutuação, oriundas da pressão de água ao redor do casco (Figura 13).

Figura 13 - Equilíbrio estático da embarcação



Fonte: Traduzido de Okumoto *et al.* (2009, p. 18).

<sup>3</sup> Destaca-se que, no caso da análise de flambagem, as chapas e os reforçadores podem ser considerados apoiados. No entanto, essa discussão foge significativamente do escopo deste trabalho.

De acordo com Bai (2003), o projeto estrutural deve ser analisado para todos os estados limites, a fim de assegurar que os esforços máximos sejam suportados com a devida margem de segurança. Contudo, além da segurança, deve-se considerar também a eficiência estrutural, a qual influencia o custo de fabricação e, principalmente, o custo de operação da embarcação.

Nesse contexto, o projeto estrutural deve determinar as dimensões dos elementos estruturais, estabelecendo a espessura das chapas, além do arranjo e dimensões dos reforçadores. No entanto, para permitir a construção, as espessuras das chapas e as dimensões dos reforçadores devem ser viáveis comercialmente, de maneira que possam ser adquiridas de maneira exata pelos estaleiros.

Além disso, é importante destacar que, para facilitar a logística e assegurar melhores preços de compra, deve-se buscar minimizar o número de espessuras de chapas e de geometrias de reforçadores utilizadas no projeto. Conforme ensina Tancredi (2020), em virtude da multiplicidade dos arranjos possíveis e do fato de cada elemento ser dimensionado individualmente, o projeto da seção mestra é um processo iterativo, em que o projetista deve modificar as variáveis de projeto a cada iteração.

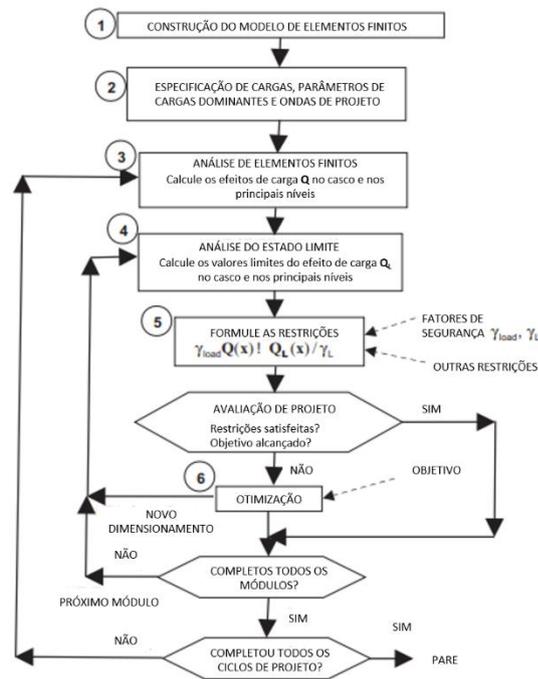
Segundo ABS (2019), as variáveis associadas ao projeto estrutural da seção mestra de um navio correspondem aos espaçamentos e aos vãos livres que descrevem o arranjo dos reforçadores. Nesse sentido, Chaves et al. (2013) enumeram ao menos doze variáveis associadas ao projeto estrutural da seção mestra de um navio, as quais correspondem ao espaçamento entre cavernas, entre longitudinais pesados, entre longitudinais leves, além do espaçamento entre costados, entre anteparas e da altura do duplo fundo. Além disso, Chaves et al. (2013) propõe que, para maximizar a eficiência estrutural, tais espaçamentos podem ser diferentes para cada uma das regiões da seção mestra (convés, costado e fundo).

No entanto, como alertado por Chaves et al. (2013), apesar de listado como variável de projeto, o espaçamento entre anteparas está ligado ao arranjo da embarcação e ao estudo da estabilidade avariada do casco, possuindo valor fixo ao longo do projeto estrutural. Além disso, a altura do duplo fundo é uma variável de projeto que possui um valor mínimo estipulado por normas, mas que pode, eventualmente, ser aumentado ao longo do projeto estrutural.

Por fim, o espaçamento entre costados é uma variável ligada à colisão de embarcações e ao vazamento de carga (ABS, 2006), não sendo usual que ela seja aumentada além do valor mínimo definido por norma.

A obtenção de um projeto estrutural eficiente é um processo trabalhoso, no qual o projetista modifica diversas vezes os valores das variáveis de projeto em busca da redução de massa, sempre mantendo as tensões dentro dos limites estabelecidos para o projeto (Figura 14). Dessa forma, o caráter iterativo inerente ao projeto de estruturas navais motiva o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam a automatização e/ou otimização do projeto estrutural de navios.

Figura 14 - Processo iterativo de análise estrutural por MEF



Fonte: Traduzido de Hughes e Paik (2010, p. 9).

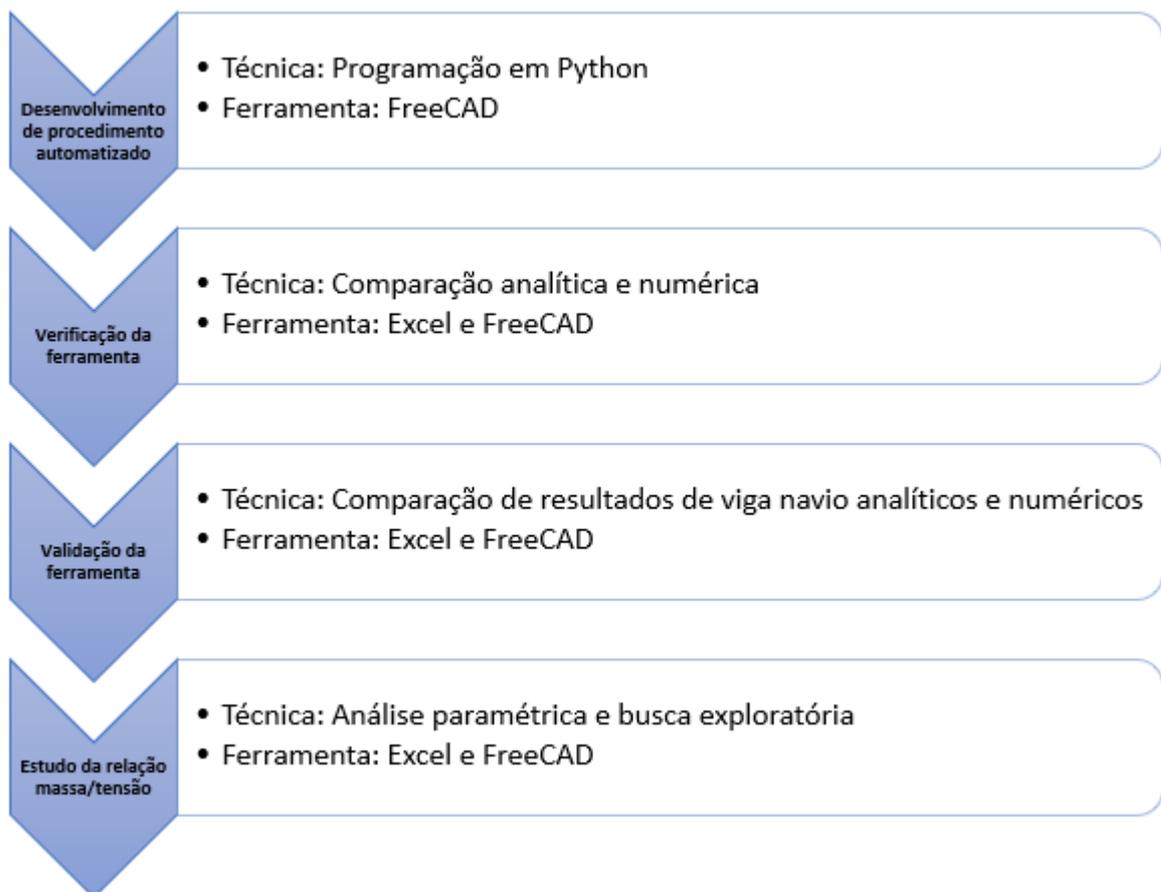
Nesse contexto, a otimização do projeto estrutural de um navio pode ser entendida como a busca automatizada, sistemática e dirigida por arranjos que permitam suportar, com segurança, os esforços atuantes, utilizando a menor quantidade de material possível. No cenário naval, essa diminuição resulta, a um só tempo, em uma diminuição dos custos de fabricação, em uma maior capacidade de carga e/ou em uma maior velocidade operacional (OKUMOTO et al., 2009).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do procedimento automatizado para a análise estrutural de uma embarcação, o qual utiliza uma ferramenta gratuita baseada no método dos elementos finitos.

Ao longo do capítulo são apresentados e discutidos o processo de desenvolvido, bem como, as técnicas e ferramentas utilizadas, cuja sistematização é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Autor (2022).

Seguindo os objetivos traçados, para a determinação dos campos de tensões na estrutura de um navio utilizando o método dos elementos finitos, é necessário, primeiramente, a modelagem da estrutura, para que em seguida seja realizada a

definição das cargas, das restrições, das propriedades do material e da discretização da geometria (malha).

Conforme mencionado na Fundamentação Teórica apresentada, tradicionalmente, a análise estrutural de um navio é realizada desacoplando o campo de tensões globais do campo de tensões locais. Dessa forma, dada as características singulares de cada um dos modelos, as quais foram discutidas no capítulo anterior, torna-se necessário desenvolver um procedimento específico para cada um dos tipos de análise.

Tanto para a modelagem, quanto para a análise numérica usando o método dos elementos finitos, foi utilizado o programa FreeCAD, na versão 0.19. A escolha dessa ferramenta se deu por seu acesso gratuito, somado a possibilidade de automatização da análise utilizando rotinas de códigos escritas na linguagem Python.

A modelagem das geometrias analisadas será realizada por meio da geração de sólidos primitivos, os quais são elementos tridimensionais cuja composição resulta na geometria a ser analisada.

Já para a discretização da geometria, existem dois geradores de malhas tetraédricas 3D disponíveis no FreeCAD (Gmsh e Netgen) os quais se diferenciam na caracterização do grau de refino dos elementos<sup>4</sup>. Para a escolha do gerador a ser utilizado, será feito um estudo paramétrico que comparará a precisão dos resultados obtidos por ambas as opções disponíveis.

Entre os principais parâmetros associados a geração de malha, destaca-se o grau de refino, cuja definição permite obter malhas mais próximas à geometria real, as quais, no entanto, aumentam o custo computacional da análise.

No gerador Netgen, o grau de refino é estabelecido definindo o tamanho máximo dos elementos. Já para o gerador Gmsh, devem ser atribuídos os valores referentes ao máximo e ao mínimo tamanho permitido para os elementos.

Para verificar o grau de influência que o refino de malha exerce na resposta obtida pela ferramenta, foi realizado um estudo paramétrico em ambos os geradores, no qual o tamanho do elemento foi variado sistematicamente. Por fim, os resultados foram comparados com aqueles previstos na formulação analítica descrita na Seção 2.2.

---

<sup>4</sup> É evidente que ambos os geradores devem apresentar algoritmos e estratégias diferentes para determinar a malha de uma geometria. No entanto, uma vez que não se tem acesso ao código fonte, e a documentação desses geradores é bastante limitada, não é possível aprofundar essa discussão.

Além disso, será realizado um estudo referente a influência da tridimensionalidade do modelo, onde são comparados os resultados obtidos considerando dois valores de coeficiente de Poisson. O objetivo desse estudo é verificar a influência que esse coeficiente tem nas análises numéricas realizadas para geometrias do tipo viga.

A verificação da precisão das análises realizadas foi baseada no cálculo do erro relativo (percentual), descrito pela Equação 13, sempre considerando os resultados analíticos como resultados de referência a serem alcançados.

$$Erro\ relativo = \frac{|Resultado\ numérico - Resultado\ analítico|}{Resultado\ analítico} \quad (13)$$

É importante mencionar que os resultados analíticos utilizados na aplicação da Equação 13 referem-se aos modelos descritos no Capítulo 2 deste texto. No entanto, tal como discutido anteriormente, esses modelos são baseados em diversas hipóteses simplificadoras, que podem, em alguns casos, afastar o resultado obtido daqueles observados em situações reais, dificultando uma análise assertiva.

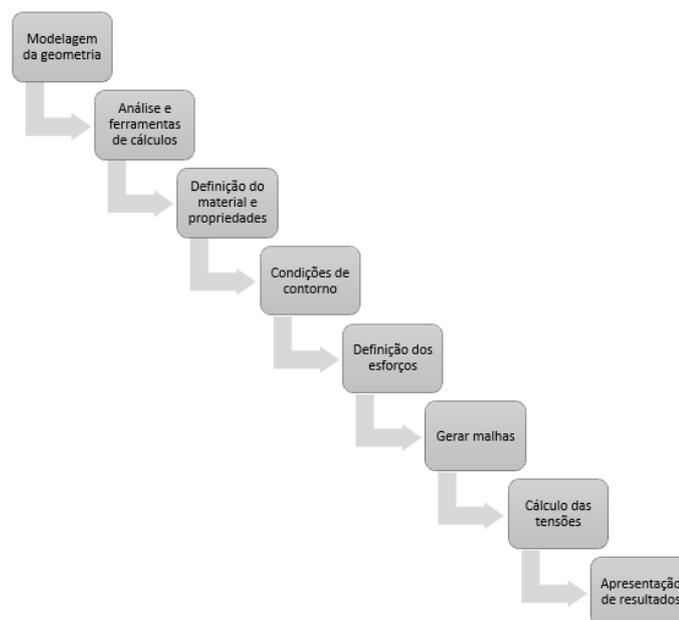
## 4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentadas as etapas referentes ao desenvolvimento do procedimento criado para a análise automatizada de estruturas navais utilizando o método dos elementos finitos. Todas as funções utilizadas foram implementadas na linguagem Python e visam a automatização do programa FreeCAD.

Para análises de geometrias mais simples, como as usadas neste trabalho, é possível realizar a modelagem utilizando macros contendo linhas de comando. Essa abordagem permite automatizar a criação dos modelos, pois é possível realizar alterações nos objetos de estudo, apenas alterando as propriedades desejadas no código, não sendo necessário refazer toda a modelagem manualmente. No entanto, para geometrias mais detalhadas e com condições de contorno complexas e/ou carregamentos não lineares, o uso da interface CAD pode ser exigido.

Conforme mostrado na Figura 16, em apertada síntese, o procedimento desenvolvido realiza a modelagem geométrica da estrutura, a definição das condições de contorno, a aplicação dos carregamentos e a definição das características dos materiais presentes na estrutura. Além disso, o procedimento automatiza a análise, extraindo os principais resultados obtidos.

Figura 16 - Sequenciamento da modelagem na ferramenta



Fonte: Autor (2022).

#### 4.1. ROTINA PARA ANÁLISE AUTOMATIZADA DE VIGA NAVIO

A rotina de automatização desenvolvida começa com a declaração dos valores associados às dimensões da geometria, às propriedades dos materiais e aos esforços atuantes na viga navio. Nessa etapa, conforme pode ser visto na Figura 17, as variáveis declaradas correspondem ao comprimento, à boca e ao pontal da embarcação, além de indicarem os esforços atuantes em cada segmento da viga navio e as características (densidade e módulo de elasticidade) do material do casco.

Ao contrário do senso comum, uma vez que esse modelo será usado para determinar a distribuição de momento fletor na viga navio, a consideração das características do material, bem como das características das seções da viga navio, tem pouca relevância na modelagem.

Figura 17 - Definição das variáveis na modelagem da viga navio

```
# Variáveis de projeto da viga-navio

L = 250000          # comprimento do navio em milímetros
B = 35000          # boca da embarcação em milímetros
D = 19000          # pontal da embarcação em milímetros
q0 = 10669149.1    # carga linear constante no segmento 0 em N/m
q1 = -4741844.1   # carga linear constante no segmento 1 em N/m
q2 = -3852748.3   # carga linear constante no segmento 2 em N/m
q3 = -2963652.6   # carga linear constante no segmento 3 em N/m
q4 = -2074556.8   # carga linear constante no segmento 4 em N/m
q5 = -1185461     # carga linear constante no segmento 5 em N/m
q6 = -296365.28   # carga linear constante no segmento 6 em N/m
q7 = 592730.517   # carga linear constante no segmento 7 em N/m
q8 = 1481826.33   # carga linear constante no segmento 8 em N/m
q9 = 2370922.16   # carga linear constante no segmento 9 em N/m
density = 7900    # densidade do material em kg/m^3
ModYoung = 210000 # Modulo de Young em MPa
coefPoisson = 0.3 # coeficiente de Poisson
```

Fonte: Autor (2022).

É importante observar que o usuário deve seguir rigorosamente o sistema de unidades utilizado na modelagem, o qual é descrito nos comentários presentes na Figura 16. Resta evidente que a inserção de quaisquer características com valores em um sistema métrico diferente do originalmente concebido irá resultar em erros que levarão à resultados pouco realistas.

Para facilitar e padronizar a modelagem, foi utilizada uma estratégia na qual a viga navio foi dividida em dez segmentos de mesmo tamanho, nos quais são

aplicadas cargas constantes correspondentes a média dos valores de  $q(x)$  referentes a cada trecho da viga navio.

Conforme descrito na Metodologia, em virtude das características do FreeCAD, a geração da geometria foi realizada utilizando a combinação de sólidos primitivos, onde cada segmento da viga navio foi modelado por um sólido primitivo.

A rotina de modelagem da viga navio começa com a criação de um novo documento no FreeCAD, seguida pela importação da biblioteca “*Part*”, a qual disponibiliza diversas geometrias de sólidos primitivos para a modelagem.

Já para a modelagem dos segmentos da viga navio, foi utilizado o sólido primitivo do tipo “*Box*”, o qual é criado a partir da função “*addObject*”, tendo como parâmetro apenas o nome que identificará o sólido adicionado. A seguir, é preciso definir as dimensões do sólido, o que é feito através das funções “*Width*”, “*Height*” e “*Length*”, as quais definem, respectivamente, a largura, a altura e o comprimento do sólido modelado (Figura 18).

Após a definição das dimensões, o sólido modelado é movido para a posição da viga navio correspondente a cada um dos segmentos. A movimentação dos sólidos é realizada usando a função “*Placement*”, para a qual é passada como parâmetro as coordenadas referentes as translações e as rotações a serem aplicadas ao sólido.

Por fim, para finalizar a modelagem da viga navio, é feita a seleção aditiva de cada segmento através da função “*addSelection*”, para então ser realizada a operação de fusão geométrica (função “*Fusion*”). A operação de fusão geométrica combina os diferentes sólidos primitivos modelados em uma única geometria a ser analisada (Figura 18).

Finalizada a modelagem da viga navio, é necessário importar a biblioteca referente a aplicação do método de elementos finitos. A biblioteca “*ObjectsFem*” possui as funções necessárias para criação da análise, a definição do material e suas propriedades, as condições de contorno, entre outras funções que são descritas a seguir.

Figura 18 - Criação de um novo documento e modelagem da viga navio

```

# CRIAÇÃO DE NOVO DOCUMENTO E IMPORTAÇÃO DA BANCADA PART
doc = FreeCAD.newDocument()
import Part

for i in range(0,10):
    seg = "seg" + str(i)
    seg = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(seg))
    seg.Width = B
    seg.Height = D
    seg.Length = L/10
    seg.Placement = App.Placement(App.Vector(i*L/10,0,0), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))
    seg = "seg" + str(i)
    Gui.Selection.addSelection('Unnamed',seg)

#Fim do laço

Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg0')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg1')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg2')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg3')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg4')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg5')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg6')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg7')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg8')
Gui.Selection.addSelection('Unnamed','seg9')

primitivos = Gui.Selection.getCompleteSelection()

App.activeDocument().addObject("Part::MultiFuse","Fusion")
App.activeDocument().Fusion.Shapes = primitivos

```

Fonte: Autor (2022).

O primeiro passo consiste na criação da análise através da função *makeAnalysis*, sendo que é nesse objeto que são definidas as informações usadas para a aplicação do método dos elementos finitos. Além disso, é necessário a criação do objeto de cálculo, o qual irá ser responsável por resolver o sistema matricial inerente a aplicação do método dos elementos finitos.

Neste trabalho, foi utilizado o Solver Calculix Ccx, cuja definição é feita utilizando-se a função *makeSolverCalculixCcxTools*, a qual tem como parâmetro o documento na qual ela será incorporada (Figura 19).

Figura 19 - Criação do modelo de elementos finitos

```

# Início da análise
import ObjectsFem
analysis_object = ObjectsFem.makeAnalysis(doc, "Analysis")
solver_object = ObjectsFem.makeSolverCalculixCcxTools(doc, "Calculix")
solver_object.GeometricalNonlinearity = 'linear'
solver_object.MatrixSolverType = 'default'
solver_object.IterationsControlParameterTimeUse = False
analysis_object.addObject(solver_object)

```

Fonte: Autor (2022).

A terceira etapa consiste na definição do material utilizado na análise e suas propriedades. A criação do material é realizada com a função “*makeMaterialSolid*”, a partir da qual são definidos os valores referentes ao módulo de elasticidade, ao coeficiente de Poisson e à massa específica do material (Figura 20).

Na estrutura desenvolvida, essas propriedades são definidas pelo usuário no início do código. Destaca-se que é possível definir várias outras propriedades, como condutividade térmica, deformação térmica, entre outras, as quais, no entanto, não têm aplicação no escopo deste trabalho.

Figura 20 - Definição do material e suas propriedades

```
# material
material_object = ObjectsFem.makeMaterialSolid(doc, "SolidMaterial")
mat = material_object.Material
mat['Name'] = "Steel-Generic"
mat['YoungsModulus'] = str(ModYoung) + " MPa"
mat['PoissonRatio'] = str(coefPoisson)
mat['Density'] = str(density) + " kg/m^3"
material_object.Material = mat
analysis_object.addObject(material_object)
```

Fonte: Autor (2022).

Uma vez que a geometria modelada utilizou elementos 3D, a aplicação das condições de carregamento foi realizada considerando a atuação de uma pressão uniforme aplicada na face superior de cada um dos 10 segmentos da viga navio. A pressão foi calculada através Equação 14.

$$p(x) = \frac{\bar{q}(x)}{B} \quad (14)$$

Onde  $\bar{q}(x)$  representa a carga linear média do segmento em que está sendo calculado a pressão e  $B$  a boca do navio.

A aplicação das pressões foi realizada utilizando a função “*makeConstraintPressure*”. Conforme pode ser visto na Figura 21, existem dois parâmetros que precisam ser ajustados ao se definir uma pressão uniforme. O primeiro (“*Pressure*”) diz respeito ao módulo da pressão, enquanto o segundo (“*Reversed*”) diz respeito a direção da pressão.

É importante observar que a definição da direção da pressão é feita por meio de valores booleanos na função “*Reversed*”. Assim, foi desenvolvido uma análise

condicional na qual, para valores de carregamento menores que zero, é aplicado a reversão da pressão, ou seja, a pressão é aplicada no sentido positivo do eixo z (Figura 21). Caso contrário, a reversão da pressão não é adotada, definindo uma pressão aplicada no sentido negativo do eixo.

Figura 21 - Aplicação da condição de carregamento (pressão)

```
#aplicacao da pressao
pressure_constraint = ObjectsFem.makeConstraintPressure(App.ActiveDocument, "FemConstraintPressure")
pressure_constraint.References = [(App.ActiveDocument(seg0, "Face6")]
if q0 < 0:
    q0 = abs(q0)
    pressure_constraint.Pressure = (q0 / (B/1000)) * 10**-6
    pressure_constraint.Reversed = True
else:
    pressure_constraint.Pressure = (q0 / (B/1000)) * 10**-6
    pressure_constraint.Reversed = False

analysis_object.addObject(pressure_constraint)
```

Fonte: Autor (2022).

Conforme já discutido, uma análise estrutural só pode ser realizada para condições de carregamento que estejam em equilíbrio, tal como definido na Seção 2.5.1. Assim, para assegurar que pequenos erros numéricos não inviabilizem a análise, considera-se que a aresta da face superior do segmento localizado a meia nau esteja engastada.

Embora essa condição não esteja presente na estrutura real, essa estratégia é utilizada apenas para limitar o movimento do corpo rígido causado por eventuais resíduos numéricos da análise.

Nesse caso, a aplicação da condição de engaste é realizada utilizando-se a função "*makeConstrainFixed*", a qual tem como parâmetros as regiões a serem vinculadas (pontos, faces ou arestas). Uma vez que a função é específica para vínculos do tipo engaste, não é necessário especificar o tipo de vínculo ou os graus de liberdade a serem restritos (Figura 22).

Figura 22 - Aplicação da condição de contorno de engaste

```
#Definicao do Engaste
fixed_constraint = ObjectsFem.makeConstraintFixed(doc, "FemConstraintFixed")
fixed_constraint.References = [(App.ActiveDocument(seg4, "Edge6")]
analysis_object.addObject(fixed_constraint)
```

Fonte: Autor (2022).

A seguir, a discretização da geometria é feita também pela biblioteca “*ObjectsFem*”, sendo possível escolher entre dois geradores de malha (Netgen e Gmsh), os quais utilizam malhas compostas de tetraedros tridimensionais.

A utilização do gerador Netgen é realizada aplicando-se a função “*makeMeshNetgen*” cujos parâmetros de uso correspondem: à geometria na qual a malha será gerada, ao tamanho máximo permitido para os elementos, à espessura dos elementos (muito fino, fino, moderado, grosso e muito grosseiro<sup>5</sup>) e ao tipo de interpolação dos elementos.

Conforme pode ser visto na Figura 23, para o gerador de malhas Gmsh, é utilizada a função “*makeMeshGmsh*”, a qual requer a definição das características geométricas dos elementos atribuindo-se valores aos parâmetros “*CharacteristicLengthMax*” (tamanho máximo permitido para os elementos) e “*CharacteristicLengthMin*” (tamanho mínimo permitido para os elementos).

Figura 23 - Criação da malha e definição dos tamanhos de elementos

```
#Definicao da malha
mesh = ObjectsFem.makeMeshGmsh(App.ActiveDocument, "Mesh")
mesh.Part = App.ActiveDocument.Fusion
mesh.CharacteristicLengthMax = 5000
mesh.CharacteristicLengthMin = 5000

App.ActiveDocument.recompute()

from femmesh.gmshtools import GmshTools as gt
gmsh_mesh = gt(mesh)
error = gmsh_mesh.create_mesh()
print(error)

analysis_object.addObject(mesh)
```

Fonte: Autor (2022).

Uma vez que a geometria, o material, as condições de contorno, o carregamento e a malha foram definidos, é possível realizar a aplicação do método dos elementos finitos.

A execução da análise é realizada por meio da função “*FemToolsCcs*” pertencente a biblioteca “*femtools*” (Figura 24). Essa função realiza os cálculos de tensões na estrutura utilizando os dados definidos na modelagem.

<sup>5</sup> Embora o uso do termo “muito grosseiro” adjacente ao termo “grosso” possa causar estranheza, optou-se por manter-se os termos existentes na ferramenta utilizada.

Figura 24 - Execução da análise pelo método dos elementos finitos

```

import FemGui
FemGui.setActiveAnalysis(App.ActiveDocument.Analysis)

from femtools import ccxtools
fea = ccxtools.FemToolsCcx()
fea.purge_results()
fea.run()

from femtools import ccxtools
fea = ccxtools.FemToolsCcx()
fea.update_objects()
fea.setup_working_dir()
fea.setup_ccx()
message = fea.check_prerequisites()

if not message:
    fea.purge_results()
    fea.write_inp_file()
    fea.ccx_run()
    fea.load_results()
else:
    FreeCAD.Console.PrintError("O código apresentou algum erro! {}\n".format(message))
    print("O código apresentou algum erro! {}\n".format(message))

for m in analysis_object.Group:
    if m.isDerivedFrom('Fem::FemResultObject'):
        result_object = m
        break

```

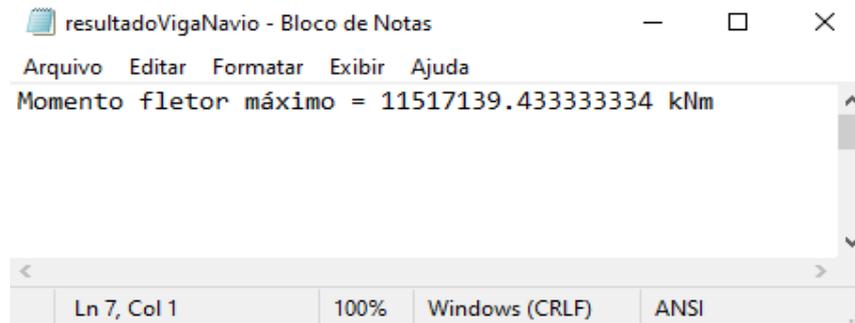
Fonte: Autor (2022).

Conforme pode ser visto na Figura 24, para facilitar a utilização, foi implementado na rotina desenvolvida uma mensagem de aviso que indica ao usuário que ocorreram erros durante a aplicação do método dos elementos finitos.

Para a sistematização e apresentação dos resultados, foram criados vetores que recebem os valores das tensões na direção longitudinal da viga navio, bem como das tensões equivalentes de von Mises, referentes à cada um dos nós existentes na malha. Além dos resultados de tensões, foi implementado na rotina o cálculo de máximo momento fletor atuante na viga, o qual é realizado, conforme descrito no Capítulo 2, utilizando-se a Equação 5.

Uma vez que a viga navio foi modelada com elementos maciços, considerou-se que o valor da máxima distância perpendicular à linha neutra corresponde à metade do pontal da embarcação. Por fim, esses resultados são registrados em um arquivo texto, permitindo que o usuário possa acessá-los após a finalização da simulação (Figura 25).

Figura 25 - Compilado de resultados da análise de viga navio



Fonte: Autor (2022).

#### 4.2. ROTINA PARA ANÁLISE AUTOMATIZADA DE PAINÉIS ESTRUTURAIS

Similar ao procedimento desenvolvido para a análise automatizada da viga navio, nesta seção apresenta-se o procedimento desenvolvido para a análise de um painel estrutural de uma embarcação.

Conforme pode ser visto na Figura 26, a rotina começa com a definição das variáveis utilizadas na modelagem, sendo elas: o número de reforçadores, o espaçamento, a espessura e o comprimento do chapeamento, a espessura e o comprimento do flange, a espessura e a altura da alma, além das características associadas ao material da estrutura (densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson).

Figura 26 - Definição das variáveis de projeto do painel estrutural

```
# Variáveis de projeto
n_ref = 3           # numero de reforçadores
spacing = 900      # distancia entre reforçadores em mm
t_chapa = 20       # espessura da chapa em mm
l_chapa = 3800     # comprimento da chapa em mm
t_flange = 40      # espessura da flange em mm
l_flange = 220    # comprimento da flange em mm
t_alma = 20        # espessura da alma em mm
h_alma = 400       # altura da alma em mm
density = 7900     # densidade do material em kg/m^3
ModYoung = 210000  # Modulo de Young em MPa
coefPoisson = 0.3  # coeficiente de Poisson
```

Fonte: Autor (2022).

Após a definição dos parâmetros da modelagem, é realizada a criação de um novo documento no FreeCAD, seguida da importação da biblioteca “Part” para utilização do sólido primitivo “Box”, o qual será utilizado para a modelagem dos elementos que compõem a grelha ortogonal chapeada (Figura 27).

Figura 27 - Modelagem da chapa do painel estrutural que será analisado

```
# CHAPEAMENTO
chapa = "chapa"
chapa = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", "Box")
w_chapa = n_ref * spacing
chapa.Width = w_chapa
chapa.Height = t_chapa
chapa.Length = l_chapa
```

Fonte: Autor (2022).

É importante destacar que, conforme visto na Figura 26, a largura do painel estrutural  $W_{chapa}$  é calculada utilizando a Equação 15.

$$W_{chapa} = n_{ref} * spacing \quad (15)$$

Onde  $n_{ref}$  representa o número de reforçadores modelados no painel estrutural e  $spacing$  corresponde ao espaçamento entre eles.

Já a modelagem dos reforçadores foi realizada utilizando-se um laço iterativo onde a cada iteração um dos reforçadores é modelado e posicionado no painel estrutural através da função "Placement" (Figura 28).

Figura 28 - Modelagem dos reforçadores do painel que será analisado

```
# REFORÇADORES
for i in range(0,n_ref):
    # ALMA
    alma = "alma" + str(i)
    alma = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(alma))
    alma.Width = t_alma
    alma.Height = h_alma
    alma.Length = l_chapa
    alma.Placement = App.Placement(App.Vector(0, spacing/2 - t_alma/2 + i*spacing,
                                                t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    alma = "alma" + str(i)
    # FLANGE
    flange = "flange" + str(i)
    flange = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(flange))
    flange.Width = l_flange
    flange.Height = t_flange
    flange.Length = l_chapa
    flange.Placement = App.Placement(App.Vector(0, spacing/2 - l_flange/2 + i*spacing,
                                                h_alma+t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    flange = "flange" + str(i)
    Gui.Selection.addSelection('Unnamed', alma)
    Gui.Selection.addSelection('Unnamed', flange)

doc.recompute()

Gui.Selection.addSelection('Unnamed', 'Box')
lista = Gui.Selection.getCompleteSelection()
App.activeDocument().addObject("Part::MultiFuse", "Fusion")
App.activeDocument().Fusion.Shapes = lista
```

Fonte: Autor (2022).

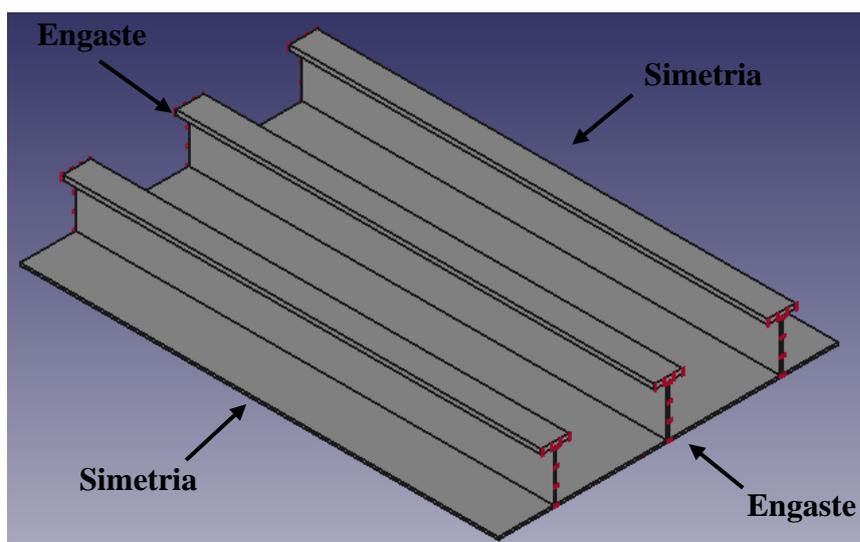
É, também, dentro do laço iterativo que realiza a modelagem dos reforçadores é que é realizada a adição dos sólidos primitivos a lista de elementos que serão fundidos na geometria final. Usando a função de seleção aditiva (“*addSelection*”) cada alma e cada flange modeladas passam a fazer parte da lista de geometrias a serem fundidas.

Ao término do laço é realizada a fusão de todos os elementos modelados utilizando-se a função “*Fusion*” (Figura 28).

Já a aplicação do método dos elementos finitos, segue os mesmos passos da rotina desenvolvida para a análise da viga navio. Inicialmente é realizada a importação da biblioteca “*ObjectsFEM*” para uso das funções de criação e definição das propriedades do material, além da criação da ferramenta de cálculo (Figura 19).

O próximo passo da modelagem corresponde a definição das condições de contorno associadas a análise de um painel pertencente a uma estrutura naval. Buscando reduzir o tamanho do modelo computacional, optou-se por aplicar planos de simetria nos extremos transversais do painel. Já para os extremos longitudinais, optou-se por aplicar a condição de engaste, pois tal como descrito na fundamentação teórica, um painel estrutural de um navio pode ser sempre considerado engastado nas extremidades longitudinais. A definição das condições de contorno utilizadas na modelagem pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 - Condições de contorno do painel estrutural



Fonte: Autor (2022).

Para a condição de engaste, são restringidos os movimentos em todos os graus de liberdade. Já para a condição de simetria, são restritos o deslocamento ortogonal ao plano de simetria e as duas rotações que provocam movimentos para fora do plano de simetria. Visando facilitar a implementação, as características das condições de contorno utilizadas na modelagem são sistematizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Graus de liberdade das condições de restrição

<b>Grau de liberdade</b>	<b>Engaste</b>	<b>Simetria</b>
Deslocamento em x	Fixo	Livre
Deslocamento em y	Fixo	Fixo
Deslocamento em z	Fixo	Livre
Rotação em x	Fixo	Fixo
Rotação em y	Fixo	Livre
Rotação em z	Fixo	Fixo

Fonte: Autor (2022).

A aplicação da condição de engaste é realizada utilizando-se a função “*makeConstrainFixed*”. Essa função tem como parâmetro apenas as regiões nas quais a restrição deve ser aplicada (Figura 22). Conforme já mencionado, o uso dessa função já impõe um vínculo do tipo engaste, restringindo o movimento de todos os graus de liberdade.

Para a definição das faces a serem engastadas, foi construído um laço que percorre todas as faces da geometria e verifica se a face analisada possui o vetor normal paralelo ao eixo x. Caso essa condição seja satisfeita, essa face é passada como parâmetro para a função de engaste (Figura 30).

Já para a aplicação da condição de contorno de simetria é utilizada a função “*ConstrainDisplacement*”, onde, além de especificar as regiões nas quais o vínculo será aplicado, deve-se também especificar os graus de liberdade a serem restritos (Figura 31). De maneira análoga a seleção das faces a serem engastadas, na seleção das faces pertencentes aos planos de simetria, buscou-se as faces do modelo cujo vetor normal é paralelo ao eixo y.

Figura 30 - Definição das regiões onde serão aplicados o engaste

```

shapes=App.ActiveDocument.findObjects("Part::Feature")
for sh in shapes:
    faces = ["Face%d" % (i+1) for i in range(len(sh.Shape.Faces))]
    Gui.Selection.addSelection(sh, faces)

import FreeCAD as App
import FreeCADGui as Gui
import math

objs = Gui.Selection.getSelection()
Gui.Selection.clearSelection()

_angTol_ = math.pi*1e-9

for obj in objs:
    xmin = -1
    xmax = 1_chapa + 1
    _disTol_ = max(1e-9*max(abs(xmin), abs(xmax)), 0.0)
    for i, fac in enumerate(obj.Shape.Faces):
        facType = fac.Surface.TypeId
        if facType != 'Part::GeomPlane':
            continue
        facAxis = fac.Surface.Axis
        _XVec_ = App.Vector(1,0,0)
        if abs(facAxis.getAngle(_XVec_) % math.pi) > _angTol_:
            continue
        facPos = fac.Surface.Position.x
        if facPos <= xmin + _disTol_ or facPos >= xmax - _disTol_:
            continue
        facName = 'Face{:d}'.format(i+1)
        fixed_constraint_x = ObjectsFem.makeConstraintFixed(App.activeDocument(), "FemConstraintFixed")
        fixed_constraint_x.References = [(obj,facName)]
        analysis_object.addObject(fixed_constraint_x)

```

Fonte: Autor (2022).

Figura 31 - Aplicação da restrição de deslocamentos

```

# Restricao de deslocamento
App.activeDocument().addObject("Fem::ConstraintDisplacement","ConstraintDisplacement")
App.activeDocument().ConstraintDisplacement.Scale = 1
App.activeDocument().Analysis.addObject(App.activeDocument().ConstraintDisplacement)
for amesh in App.activeDocument().Objects:
    if "ConstraintDisplacement" == amesh.Name:
        amesh.ViewObject.Visibility = True
    elif "Mesh" in amesh.TypeId:
        aparttoshow = amesh.Name.replace("_Mesh","")
        for apart in App.activeDocument().Objects:
            if aparttoshow == apart.Name:
                apart.ViewObject.Visibility = True
                amesh.ViewObject.Visibility = False
App.ActiveDocument.recompute()
Gui.activeDocument().setEdit('ConstraintDisplacement')
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.xDisplacement = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.yDisplacement = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.zDisplacement = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.xRotation = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.yRotation = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.zRotation = 0.000000
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.xFree = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.xFix = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.yFree = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.yFix = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.zFree = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.zFix = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotxFree = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotxFix = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotzFree = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotzFix = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotzFree = False
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.rotzFix = True
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.Scale = 13
App.ActiveDocument.ConstraintDisplacement.References = [(App.ActiveDocument.Box,"Face3"),
                                                         (App.ActiveDocument.Box,"Face4")]
App.ActiveDocument.recompute()
Gui.activeDocument().resetEdit()

```

Fonte: Autor (2022).

Uma vez estabelecidas as condições de contorno, a aplicação da pressão atuante no chapeamento é realizada utilizando-se a função “*makeConstrainPressure*”, a qual requer a especificação da região de aplicação, bem como o módulo e o sentido da pressão a ser aplicada. Sendo que, tal como descrito na seção anterior, a definição do sentido da pressão é feita por meio do parâmetro “*Reversed*”, o qual foi mostrado na Figura 21.

Já a definição da região de aplicação da pressão é realizada considerando sempre a face inferior do primeiro sólido primitivo modelado, o qual corresponde sempre ao chapeamento do painel estrutural.

Em seguida, a discretização da geometria modelada é realizada com o auxílio do gerador de malhas Gmsh (Figura 23). Por fim a análise é realizada por meio da função “*FemToolsCcs*” pertencente a biblioteca “*femtools*” (Figura 24).

Para realizar a sistematização, tratamento e apresentação dos resultados, foram criados vetores com os valores de tensão referentes a cada nó de cada elemento da malha, incluindo a tensão de von Mises. De posse desses vetores, foram utilizadas as funções “*max*” e “*min*” para determinar as tensões máximas e mínimas atuantes na estrutura.

Visando aprofundar as análises realizadas, foi desenvolvido um procedimento para o cálculo da massa total do painel estrutural, a qual é calculada a partir do volume da geometria e da densidade do material.

Por fim os principais resultados são sintetizados em um arquivo de texto que reúne a massa da estrutura, as tensões máximas e mínimas nas direções *x* e *y*, bem como a tensão máxima de von Mises (Figura 32).

Figura 32 - Compilado de resultados da análise de painéis

```

results3 - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
Massa = 3519.4500000000003 kg
Tensão máxima xx = 32.721 MPa
Tensão mínima xx = -27.8641 MPa
Tensão máxima yy = 14.0233 MPa
Tensão mínima yy = -11.9418 MPa
Tensão máxima de von Mises = 25.81388152724091 MPa
Ln 7, Col 1    100%    Windows (CRLF)    ANSI
  
```

Fonte: Autor (2022).

## 4.2. ROTINA AUTOMATIZADA PARA MODELAGEM DE PAINÉIS ORTOGONAIS

A rotina utilizada para a modelagem automatizada de painéis ortogonais começa, assim como as demais rotinas desenvolvidas, com a declaração de todas as variáveis utilizadas na modelagem da geometria. Nesse caso, as variáveis são referentes às dimensões dos reforçadores longitudinais e transversais, o espaçamento entre eles, o número de reforçadores transversais e longitudinais, bem como a espessura da chapa e as propriedades do material (Figura 33).

Figura 33 - Variáveis para rotina do painel ortogonal

```
# Variáveis de projeto

# Chapa
t_chapa = 20          # espessura da chapa em mm

# Dimensoes reforçadores transversais
n_ref_trans = 2      # numero de reforçadores
spacing_trans = 900  # distancia entre reforçadores em mm
t_flange_trans = 40  # espessura da flange em mm
l_flange_trans = 220 # comprimento da flange em mm
t_alma_trans = 20    # espessura da alma em mm
h_alma_trans = 400   # altura da alma em mm

# Dimensoes reforçadores longitudinais
n_ref_long = 3       # numero de reforçadores
spacing_long = 900   # distancia entre reforçadores em mm
t_flange_long = 40   # espessura da flange em mm
l_flange_long = 220  # comprimento da flange em mm
t_alma_long = 20     # espessura da alma em mm
h_alma_long = 350    # altura da alma em mm

#Propriedades do material
density = 7900        # densidade do material em kg/m^3
ModYoung = 210000     # Modulo de Young em MPa
coefPoisson = 0.3     # coeficiente de Poisson
```

Fonte: Autor (2022).

A modelagem do painel estrutural contendo reforçadores transversais é realizada de maneira análoga ao procedimento descrito na seção anterior, mas, no entanto, são adicionados reforçadores transversais ao modelo (Figuras 34 e 35).

Figura 34 - Modelagem e posicionamento dos reforçadores longitudinais

```

# REFORCADORES LONGITUDINAIS
for i in range(0,n_ref_long):
    # ALMA
    alma_long = "alma_long" + str(i)
    alma_long = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(alma))
    alma_long.Width = t_alma_long
    alma_long.Height = h_alma_long
    alma_long.Length = l_chapa
    alma_long.Placement = App.Placement(App.Vector(0, spacing_long/2 - t_alma_long/2 + i*spacing_long,
                                                    t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    alma_long = "alma_long" + str(i)
    # FLANGE
    flange_long = "flange_long" + str(i)
    flange_long = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(flange))
    flange_long.Width = l_flange_long
    flange_long.Height = t_flange_long
    flange_long.Length = l_chapa
    flange_long.Placement = App.Placement(App.Vector(0, spacing_long/2 - l_flange_long/2 + i*spacing_long,
                                                    h_alma_long+t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    flange_long = "flange_long" + str(i)

doc.recompute()

```

Fonte: Autor (2022).

Figura 35 - Modelagem e posicionamento dos reforçadores transversais

```

# REFORCADORES TRANSVERSAIS
for i in range(0,n_ref_trans):
    # ALMA
    alma_trans = "alma_trans" + str(i)
    alma_trans = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(alma))
    alma_trans.Width = w_chapa
    alma_trans.Height = h_alma_trans
    alma_trans.Length = t_alma_trans
    alma_trans.Placement = App.Placement(App.Vector(spacing_trans/2 - t_alma_trans/2 + i*spacing_trans,
                                                    0,t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    alma_trans = "alma_trans" + str(i)
    # FLANGE
    flange_trans = "flange_trans" + str(i)
    flange_trans = App.ActiveDocument.addObject("Part::Box", str(flange))
    flange_trans.Width = w_chapa
    flange_trans.Height = t_flange_trans
    flange_trans.Length = l_flange_trans
    flange_trans.Placement = App.Placement(App.Vector(spacing_trans/2 - l_flange_trans/2 + i*spacing_trans,
                                                    0, h_alma_trans+t_chapa), App.Rotation(App.Vector(0,0,1),0))

    flange_trans = "flange_trans" + str(i)

doc.recompute()

```

Fonte: Autor (2022).

Além disso, é importante destacar que o comprimento do painel estrutural passa a ser calculado por meio da Equação 16.

$$l_{chapa} = n_{reftrans} * spacing_{trans} \quad (16)$$

Onde  $n_{reftrans}$  representa o número de reforçadores transversais e  $spacing_{trans}$  o espaçamento entre esse tipo de reforçador.

Para finalizar a modelagem do painel estrutural, foi implementada uma função para selecionar todos os elementos modelados e, então, realizar a fusão para

combinar todos os sólidos primitivos (Figura 36), o que resulta na grelha ortogonal chapeada mostrada na Figura 37.

Figura 36 - Fusão e criação do painel ortogonal

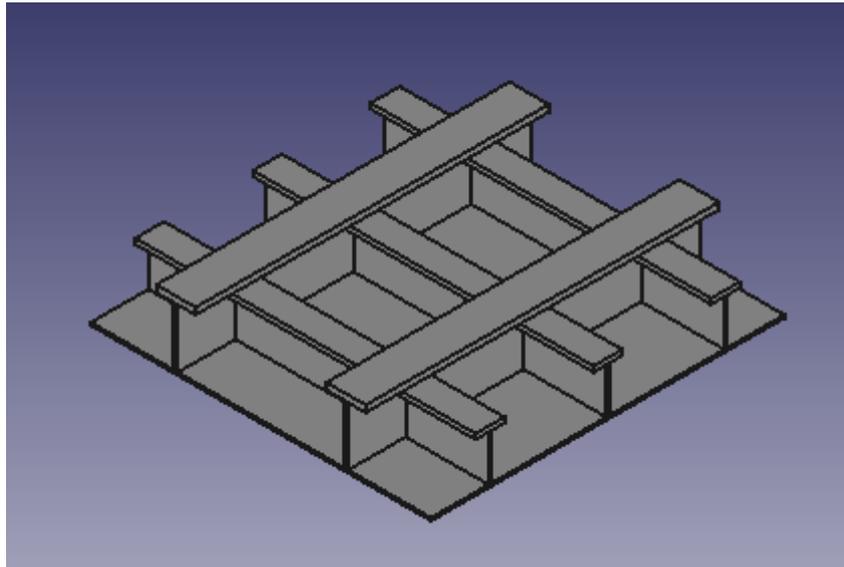
```
shapes=App.ActiveDocument.findObjects("Part::Feature")
for sh in shapes:
    faces = ["Face%d" % (i+1) for i in range(len(sh.Shape.Faces))]
    Gui.Selection.addSelection(sh, faces)

objs = Gui.Selection.getSelection()

App.activeDocument().addObject("Part::MultiFuse","Fusion")
App.activeDocument().Fusion.Shapes = objs
```

Fonte: Autor (2022).

Figura 37 - Exemplo de painel ortogonal modelado



Fonte: Autor (2022).

## 5. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de verificação e validação realizados durante o desenvolvimento da rotina para análise automatizada de estruturas navais usando o método dos elementos finitos.

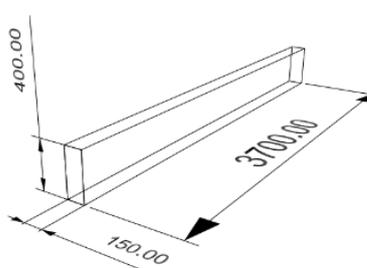
Conforme já estabelecido na metodologia, o processo de verificação consistirá em avaliar a influência da malha na qualidade da resposta obtida. Já o processo de validação consistirá na comparação dos resultados numéricos obtidos com aqueles previstos pelos modelos analíticos clássicos existentes na literatura.

### 5.1 VERIFICAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA VIGA 3D

A verificação e validação do modelo automatizado para a análise numérica da estrutura primária de um navio foi realizada comparando-se os resultados obtidos utilizando-se o procedimento desenvolvido neste trabalho com aqueles obtidos usando a teoria de vigas, cuja formulação foi descrita na Seção 2.2.

Nessa etapa foram realizadas duas análises, sempre considerando uma viga com seção transversal retangular constante. A primeira análise considerou uma viga bi-engastada, enquanto a segunda, considerou a viga bi-apoiada. As dimensões, propriedades e cargas utilizadas são enumeradas na Tabela 2, onde também é possível observar uma representação tridimensional da geometria modelada.

Tabela 2 - Viga com seção retangular

Representação geométrica	Dimensão	Valor	Unidade
	Comprimento	3700	mm
	Altura	400	mm
	Linha neutra	200	mm
	Largura	150	mm
	Momento de inércia	8,00E+08	mm <sup>4</sup>
	Carga uniforme	37,5	N/m
	Módulo de elasticidade	210	GPa
	Massa específica	7900	kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2022).

Para a viga com seção transversal retangular bi-engastada e cujas propriedades foram descritas na Tabela 2, o modelo analítico estabelece uma tensão

máxima junto aos engastes de 10,695 MPa e uma tensão máxima de 5,348 MPa na seção localizada no meio do vão livre. Já para a condição bi-apoiada, tem-se uma tensão nula junto ao apoio e uma tensão máxima de 16,043 MPa na seção localizada no meio do vão livre.

Conforme discutido no Capítulo 3, essa fase de verificação foi realizada utilizando-se elementos 3D, já que, segundo mencionado por van Havre (2008), esse tipo de elemento se adapta melhor a incidência de cargas normais. Além disso, foram avaliados dois geradores de malhas (Gmsh e Netgen), os quais foram usados na construção de malhas tetraédricas 3D. Tal como discutido no Capítulo 4, as condições de contorno aplicadas em cada uma das análises realizadas são enumeradas na Tabela 3.

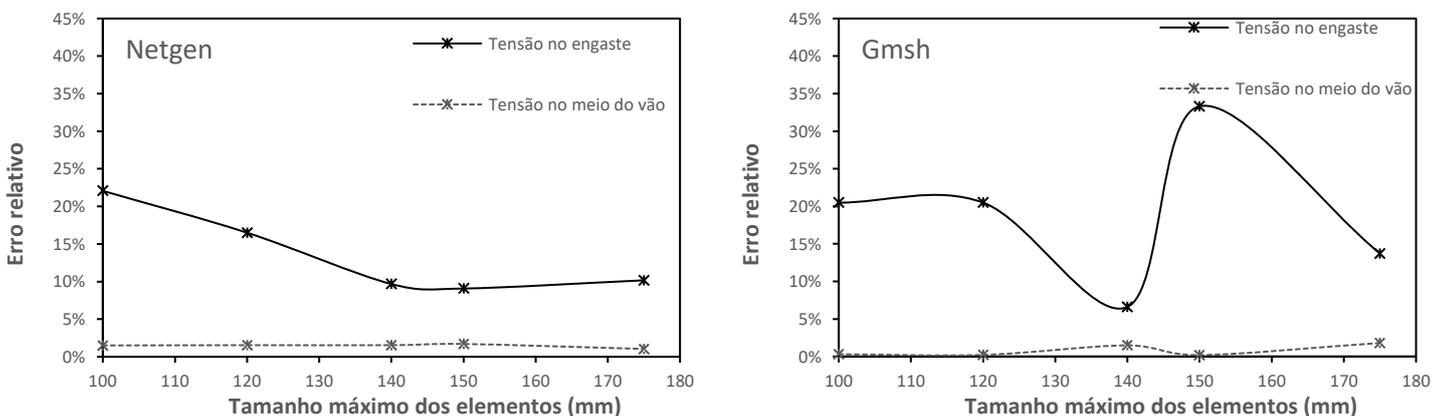
Tabela 3 - Condições de contorno aplicadas nos extremos da viga

Grau de liberdade	Viga bi-engastada	Viga bi-apoiada
Deslocamento em x	Fixo	Fixo
Deslocamento em y	Fixo	Fixo
Deslocamento em z	Fixo	Fixo
Rotação em x	Fixo	Livre
Rotação em y	Fixo	Livre
Rotação em z	Fixo	Livre

Fonte: Autor (2022).

A influência do tamanho dos elementos nos resultados referentes a condição bi-engastada utilizando ambos os geradores de malha, pode ser vista na Figura 38, onde no gráfico da esquerda utiliza-se o gerador Netgen e no gráfico da direita utiliza-se o gerador Gmsh.

Figura 38 - Estudo de refino de malha (viga bi-engastada) (Poisson = 0,3)

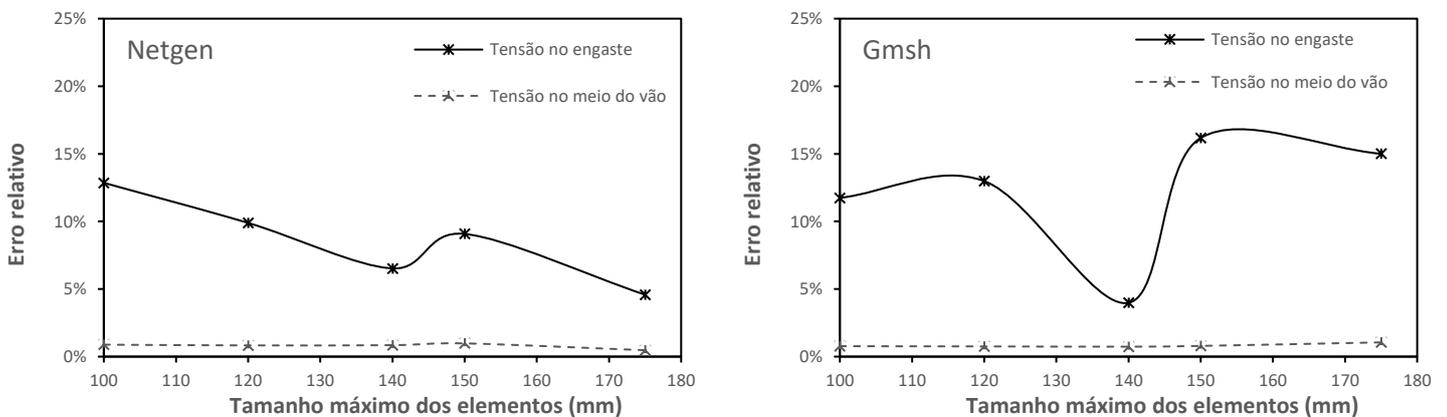


Fonte: Autor (2022).

Conforme descrito na Seção 2.2, parte do erro observado na Figura 38 pode ser creditado ao fato de que a formulação analítica utilizada considera apenas a deformação longitudinal da viga, enquanto o modelo numérico 3D é capaz de considerar as deformações transversais decorrentes do efeito Poisson.

Assim, para avaliar a influência do efeito Poisson, o processo de verificação paramétrica foi repetido, considerando um coeficiente de Poisson igual a zero. Os resultados para a viga bi-engastada podem ser vistos na Figura 39.

Figura 39 - Estudo de refino de malha (viga bi-engastada) (Poisson = 0,0)



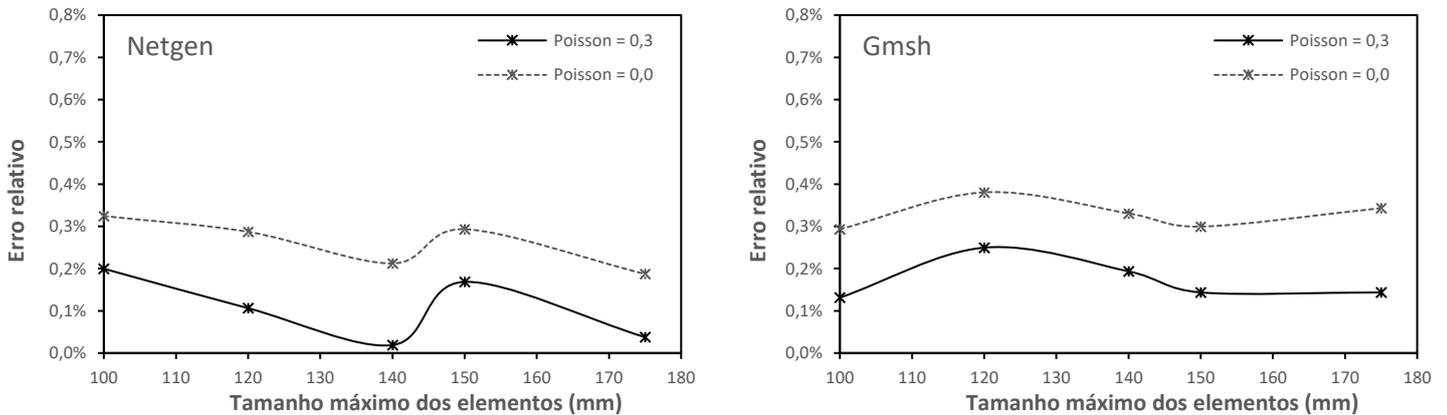
Fonte: Autor (2022).

Conforme esperado, os erros sofreram reduções da ordem de 10% ao se remover o efeito Poisson da modelagem. É importante considerar que, nesse caso, a modelagem 3D se aproxima mais do fenômeno real, pois considera deformações não avaliadas pela Teoria Simples de Viga.

Já para a condição bi-apoiada, os resultados de tensões nas extremidades são nulos, inviabilizando o cálculo de erros. Assim, os resultados foram analisados apenas para as tensões no meio do vão livre e são mostrados na Figura 40.

É interessante observar que, ao contrário do caso da viga bi-engastada, na análise da viga bi-apoiada a consideração de um valor nulo para o coeficiente de Poisson aumentou ligeiramente o erro. Acredita-se que, nesse caso, os valores de erro são tão baixos que efeitos numéricos se sobreponham as hipóteses de modelagem.

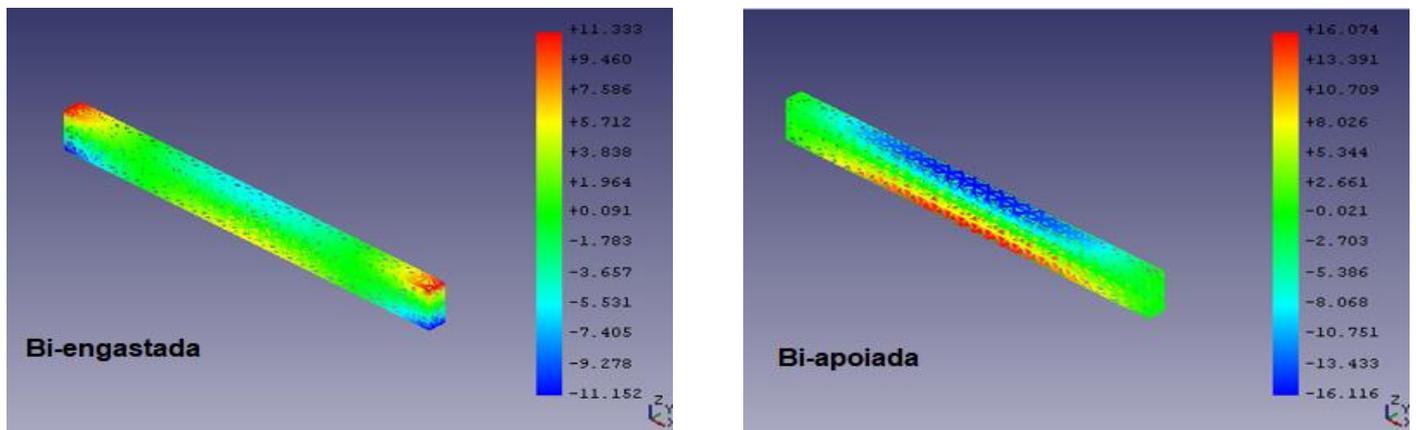
Figura 40 - Estudo de refino de malha (viga bi-apoiada)



Fonte: Autor (2022).

Para uma melhor visualização dos resultados, na Figura 41 são mostradas representações esquemáticas dos campos de tensões obtidos na análise considerando a condição bi-engastada (à esquerda) e a condição bi-apoiada (à direita). Em ambos os casos foi utilizado o gerador de malha Gmsh, com tamanho de malha de 140 mm.

Figura 41 - Representação esquemática dos resultados



Fonte: Autor (2022).

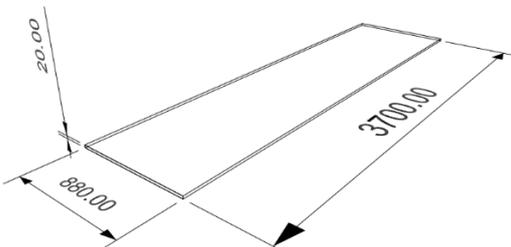
## 5.2 VERIFICAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA CHAPA 3D

De maneira análoga ao estudo de convergência de malha apresentado na seção anterior, nesta seção será apresentado o processo de verificação e validação referente à modelagem de uma chapa.

Conforme proposto na metodologia, nessa etapa, foram realizadas análises de uma mesma chapa sujeita a duas condições de contorno. A primeira análise considerou a chapa com os quatro lados engastados, enquanto na segunda, os quatro lados foram considerados apoiados.

As características da geometria, bem como o valor da pressão uniforme aplicada, são enumeradas na Tabela 4, onde também pode ser vista uma representação tridimensional da geometria modelada.

Tabela 4 - Dimensões e propriedades da chapa 1

Representação geométrica	Dimensão	Valor	Unidade
	Comprimento	3700	mm
	Largura	880	mm
	Espessura	20	mm
	Pressão uniforme	0,25	MPa
	Módulo de elasticidade	210000	MPa
	Massa específica	7900	kg/m <sup>3</sup>

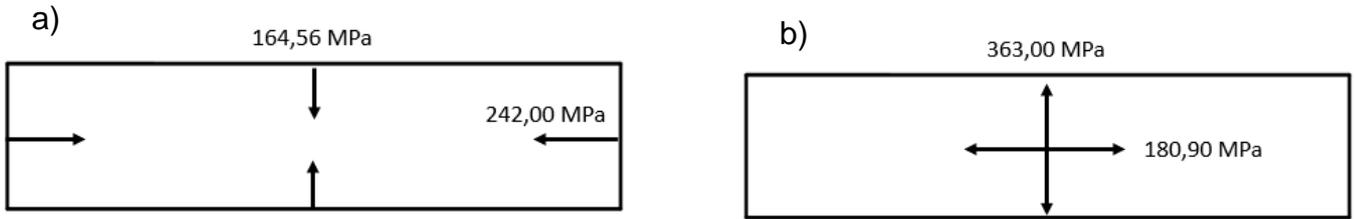
Fonte: Autor (2022).

A análise usando o método dos elementos finitos seguiu o mesmo procedimento aplicado no estudo da viga tridimensional. Nessa etapa também foram utilizados elementos 3D tetraédricos, sendo verificado o uso dos mesmos geradores de malha do caso anterior (Netgen e Gmsh).

Assim como no estudo de caso anterior, foi realizado um estudo de refino de malha, além da comparação entre os resultados obtidos no modelo numérico com aqueles calculados usando o modelo analítico descrito na Seção 2.3.

Os resultados considerando a chapa com os quatro lados engastados foram de 242,00 MPa e 164,56 MPa para os pontos localizados no centro dos lados maiores e menores, respectivamente (Figura 42a). Já para a chapa considerando os quatro lados apoiados, a aplicação do modelo analítico resultou em uma tensão longitudinal de 180,90 MPa e uma tensão transversal de 363,00 MPa para o ponto localizado no centro da chapa (Figura 42b).

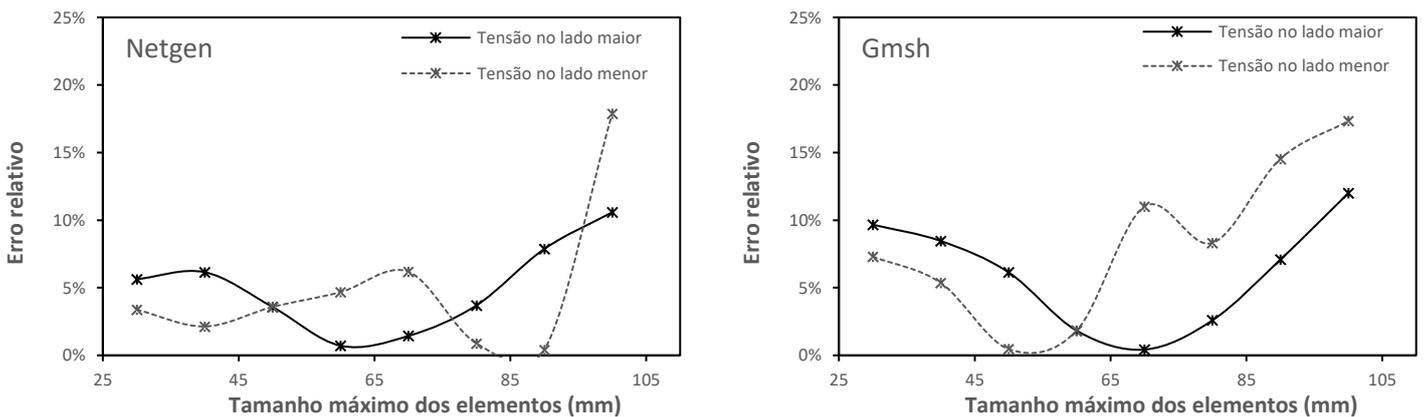
Figura 42 - Representação das tensões máximas no chapeamento



Fonte: Autor (2022).

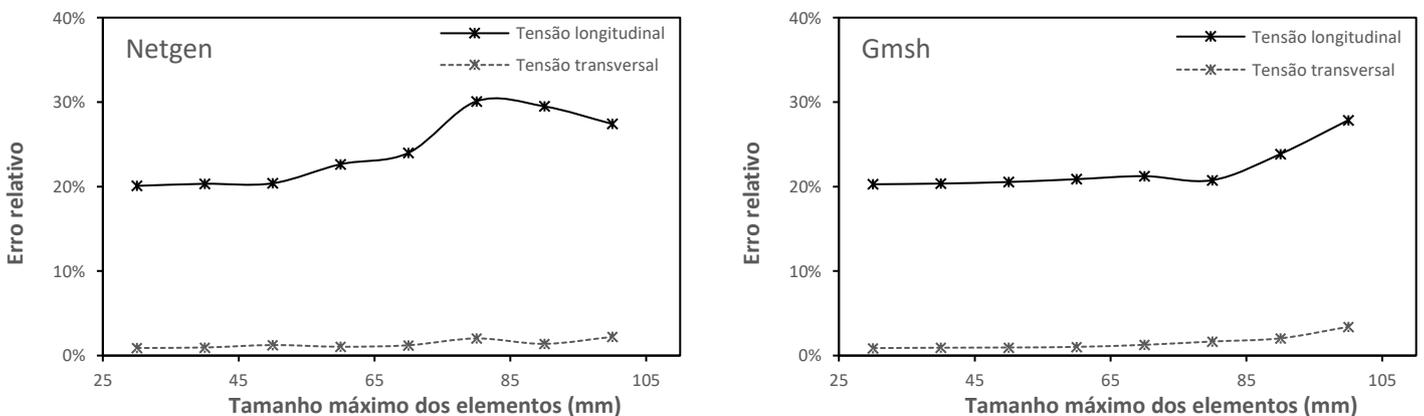
A seguir é mostrado o resultado do estudo de refino de malha para a chapa engastada (Figura 43) e para a chapa apoiada (Figura 44), utilizando tanto o gerador de malha Netgen (à esquerda), quanto o gerador Gmsh (à direita).

Figura 43 - Estudo de refino de malha (chapa 1) (lados engastados)



Fonte: Autor (2022).

Figura 44 - Estudo de refino de malha (chapa 1) (lados apoiados)

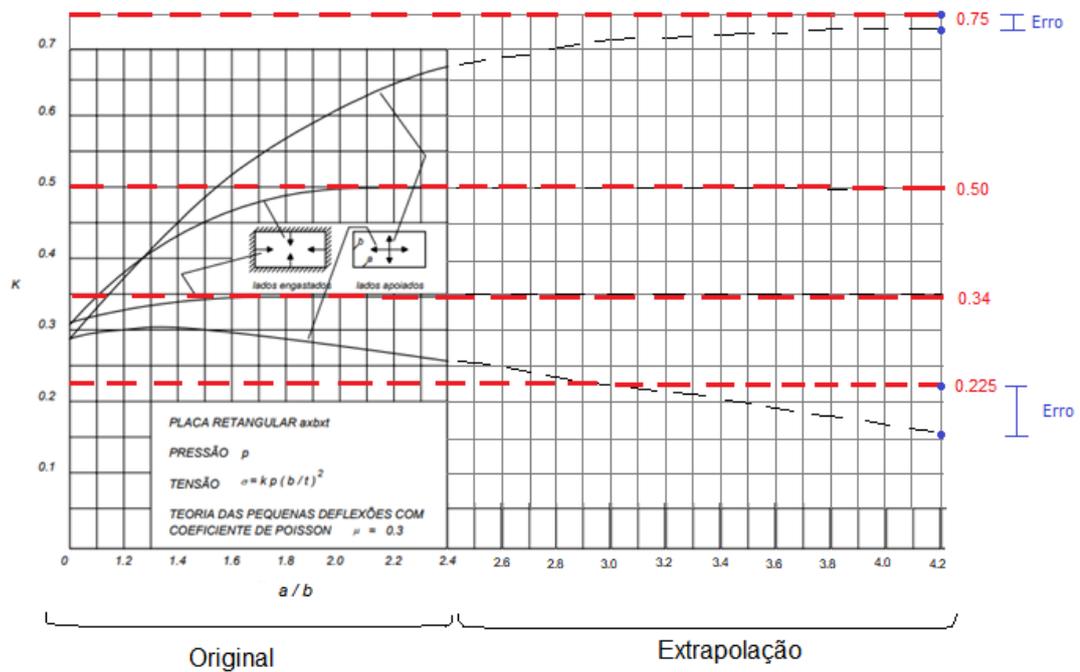


Fonte: Autor (2022).

Visto que, na geometria analisada, a razão de aspecto entre o comprimento dos lados maiores e menores ultrapassa o limite do gráfico GIII-7, para a definição do coeficiente  $K$  foram utilizados os valores de tendência no infinito sugeridos no próprio gráfico.

No entanto, os resultados de tensões no método numérico apresentaram erros superiores a 20% quando comparados aos cálculos analíticos. Esse fato pode ser explicado devido a diferença existente entre os valores do coeficiente  $K$  tomados na razão de aspecto real da chapa e os valores sugeridos pelo gráfico quando essa razão tende ao infinito (Figura 45).

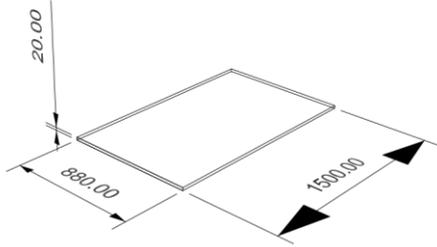
Figura 45 - Erro entre tendência e extrapolação do gráfico GIII-7



Fonte: Adaptado de Freitas (1980).

Dessa forma, para uma comparação mais assertiva, foi modelada uma chapa cuja razão de aspecto entre os lados está dentro do limite do gráfico GIII-7. Assim, foi realizada uma segunda análise, cuja geometria, dimensões, condições de contorno, carregamento e demais propriedades são descritas na Tabela 5.

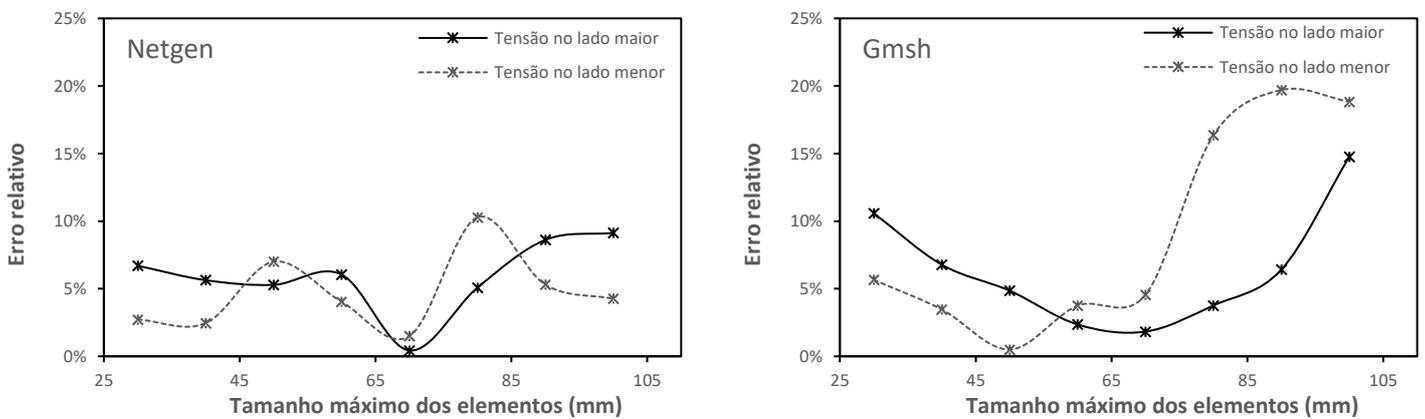
Tabela 5 - Dimensões e propriedades da chapa 2

Representação geométrica	Dimensão	Valor	Unidade
	Comprimento	1500	mm
	Largura	880	mm
	Espessura	20	mm
	Pressão uniforme	0,25	MPa
	Módulo de elasticidade	210000	MPa
	Massa específica	7900	kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2022).

Para o chapeamento engastado, os resultados de tensões pelo método analítico foram 227,48 MPa e 166,98 MPa para os lados maior e menor, respectivamente. Já o estudo paramétrico referente à influência que o refino de malha exerce no erro relativo da análise pode ser visto na Figura 46, tanto para o gerador Netgen (à direita), quanto para o gerador Gmsh (à esquerda).

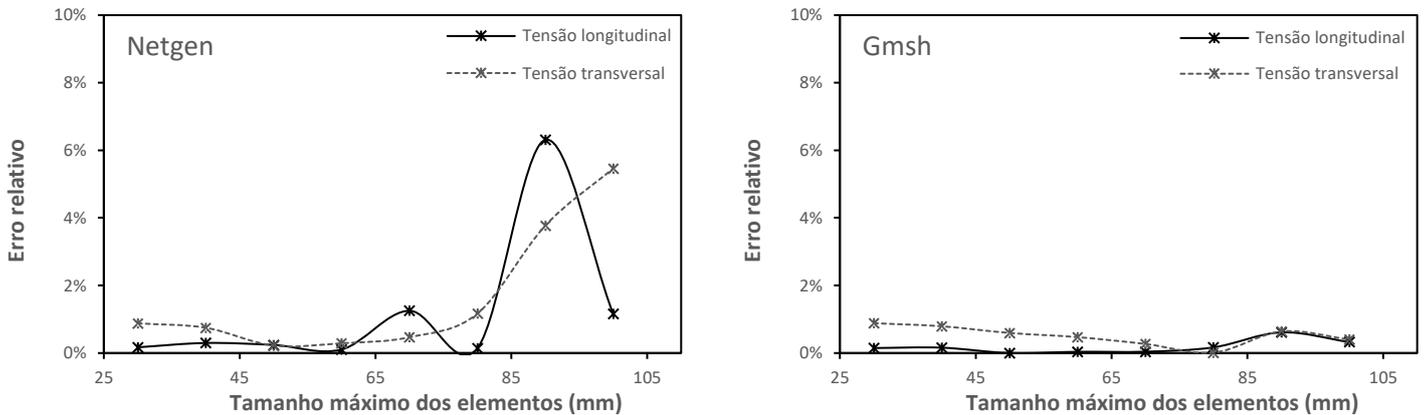
Figura 46 - Estudo de refino de malha (chapa 2) (lados engastados)



Fonte: Autor (2022).

O mesmo procedimento foi utilizado para o chapeamento apoiado, no qual a tensão longitudinal máxima resultou em 137,94 MPa, enquanto a tensão transversal máxima ficou em 263,78 MPa. Já os resultados referentes ao estudo paramétrico podem ser vistos na Figura 47.

Figura 47 - Estudo de refino de malha (chapa 2) (lados apoiados)



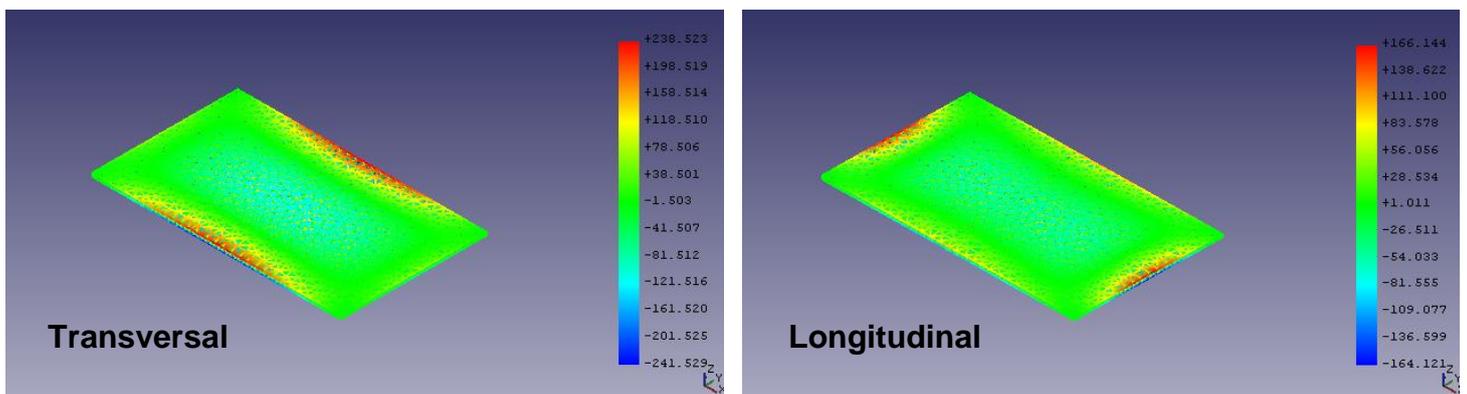
Fonte: Autor (2022).

Observando as Figuras 46 e 47, é possível constatar que os erros relativos diminuíram significativamente quando foi analisada uma geometria cuja razão de aspecto está dentro do intervalo descrito no gráfico GIII-7.

Nesse caso, é possível afirmar que os resultados numéricos descritos na Figura 45 encontram-se mais próximos da realidade do que os valores analíticos calculados utilizando os valores do coeficiente  $K$  considerando a extrapolação para a razão de aspecto infinita.

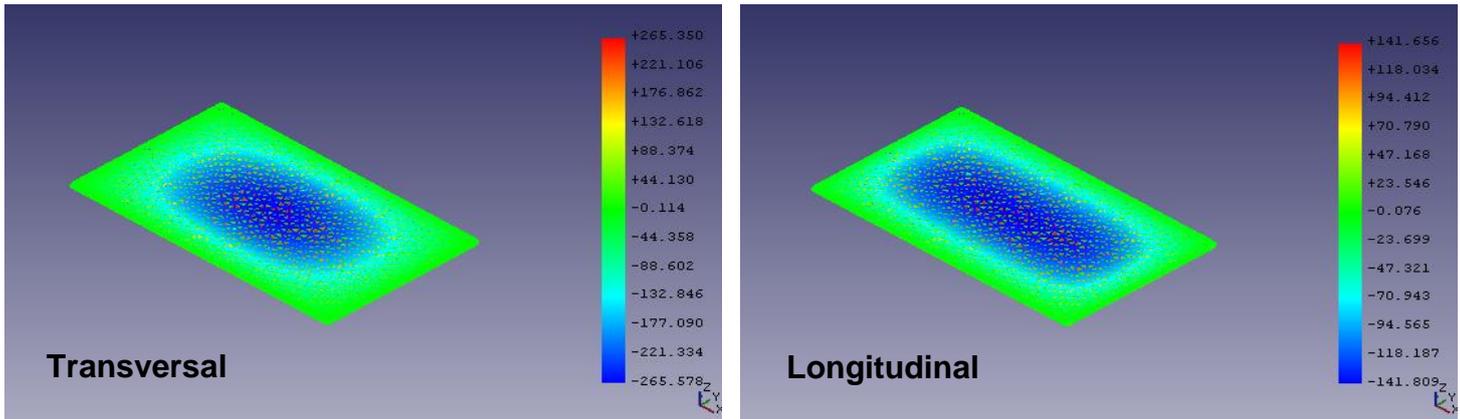
A distribuição das tensões no chapeamento 2, considerando a condição com os quatro lados engastados, é mostrada na Figura 48, enquanto os resultados para a condição com os quatro lados apoiados são mostrados na Figura 49. Em ambas as imagens são utilizadas malhas de 60 mm construídas com o gerador Gmsh, sendo que as tensões transversais são mostradas a esquerda, enquanto as tensões longitudinais são mostradas a direita.

Figura 48 - Representação das tensões na chapa 2 (engastado)



Fonte: Autor (2022).

Figura 49 - Representação das tensões na chapa 2 (apoiado)



Fonte: Autor (2022).

### 5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VERIFICAÇÃO DE MALHA

Em todas as análises realizadas, observou-se uma variação não sistemática e não convergente do erro relativo em função do grau de refino da malha. Embora os valores oscilem em torno de uma média, é provável que tal oscilação se deva a utilização de elementos tetraédricos excessivamente distorcidos (LUO, 2008). Nesse sentido, embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os geradores de malha estudados, optou-se pelo uso do Gmsh como gerador de malha associado ao procedimento desenvolvido.

De maneira geral, os erros observados foram pequenos, sendo possível concluir que a ferramenta reproduz os resultados obtidos por métodos analíticos e, por consequência, pode ser utilizada na análise estrutural de embarcações.

### 5.4. VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA VIGA NAVIO

A validação do procedimento automatizado para a análise da estrutural global de uma embarcação (modelo de viga navio), foi realizada comparando-se os valores de momento fletor obtidos utilizando o modelo analítico (Seção 2.5.1) com aqueles obtidos com o procedimento desenvolvido neste trabalho.

Nessa etapa, utilizou-se uma viga cujas dimensões são mostradas na Tabela 6, a qual foi analisada considerando três condições de mar. Na primeira a embarcação flutua em mar calmo, enquanto na segunda, é considerada a passagem de uma onda

crítica no instante de alquebramento. Por fim, a última condição analisada considera a passagem de uma onda crítica no instante de tosamento.

Tabela 6 - Dimensões e propriedades da viga navio 1

<b>Dimensão</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Comprimento	210	m
Boca	25	m
Pontal	18	m
Calado	14	m
Volume deslocado	73500	m <sup>3</sup>
LCB	105	m
Altura da linha neutra da seção	9	m
Momento de inércia	12150	m <sup>4</sup>

Fonte: Autor (2022).

Segundo a metodologia estabelecida no Capítulo 3, a viga foi dividida em 10 trechos, para os quais as propriedades e os carregamentos aplicados foram considerados constantes. A curva de carga utilizada, em cada uma das condições de carregamento estudada, é descrita na Tabela 8, além de poder ser vista nos gráficos do Apêndice B.

Tabela 7 - Carregamento atuante na viga navio 1

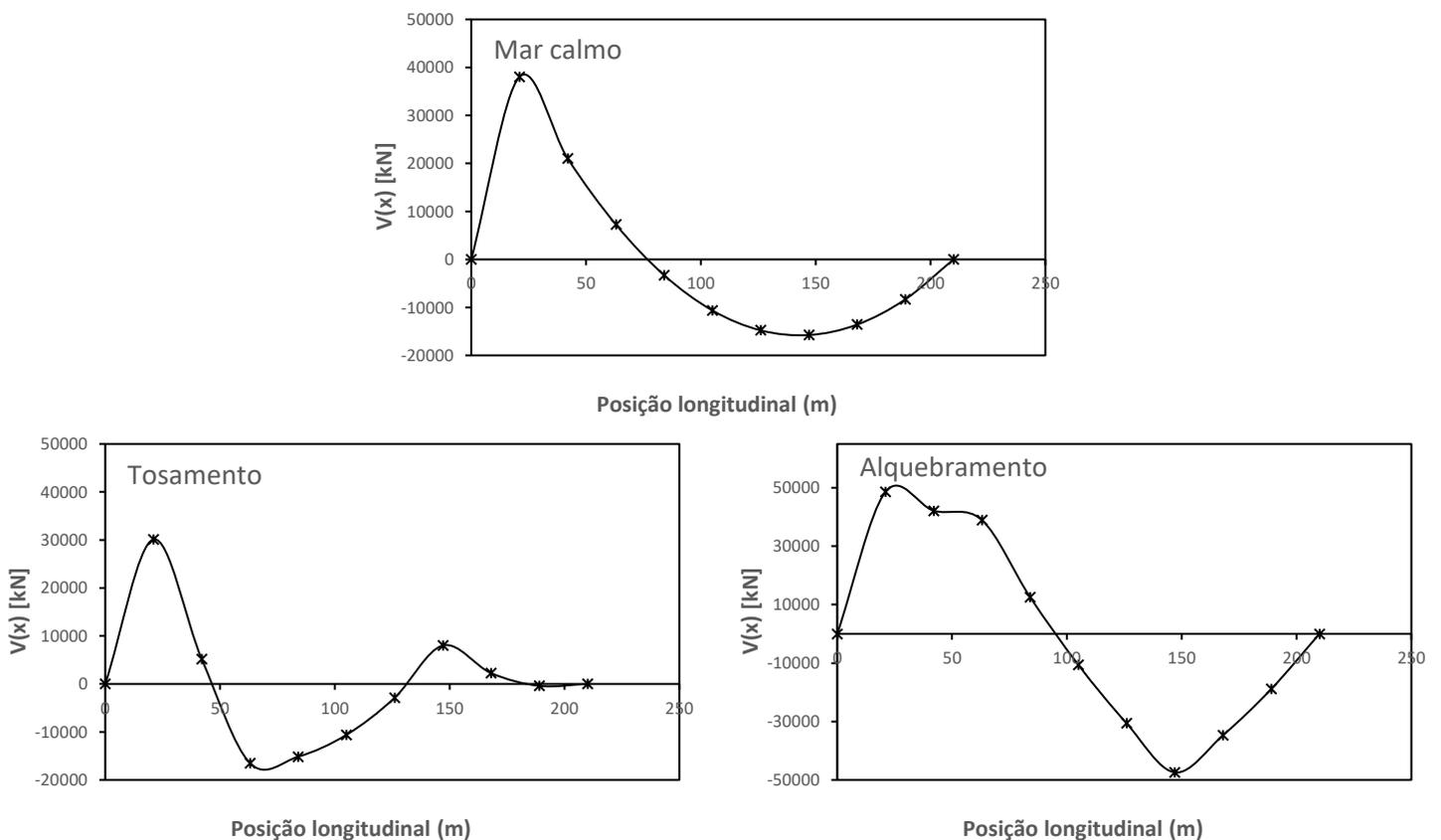
	<b>Carga – Mar calmo (kN/m)</b>	<b>Carga – Alquebramento (kN/m)</b>	<b>Carga – Tosamento (kN/m)</b>
q <sub>1</sub> (x)	1810,84	2313,60	1433,77
q <sub>2</sub> (x)	-809,19	-306,42	-1186,26
q <sub>3</sub> (x)	-655,64	-152,88	-1032,71
q <sub>4</sub> (x)	-502,35	-1256,49	63,26
q <sub>5</sub> (x)	-349,55	-1103,69	216,06
q <sub>6</sub> (x)	-197,50	-951,64	368,11
q <sub>7</sub> (x)	-46,52	-800,66	519,09
q <sub>8</sub> (x)	103,03	605,79	-274,04
q <sub>9</sub> (x)	250,73	753,50	-126,34
q <sub>10</sub> (x)	396,14	898,90	19,07

Fonte: Autor (2022).

A partir da integração das curvas de cargas é possível obter a curva de força cortante para cada uma das condições analisadas, as quais são mostradas na Figura 50. Por fim, integrando-se cada uma das curvas de força cortante, obtém-se a curva de momento fletor para cada uma das condições analisada.

Conforme já discutido, por questões associadas à rotina de automatização, os valores de momento fletor para cada posição longitudinal foram obtidos de maneira indireta. A rotina desenvolvida é capaz de ler os valores de tensão na direção longitudinal da viga em um ponto cujas coordenadas são conhecidas. Assim, utilizando-se a Equação 5, é possível determinar o momento fletor existente no segmento analisado.

Figura 50 - Curvas de força cortante para a viga navio 1



Fonte: Autor (2022).

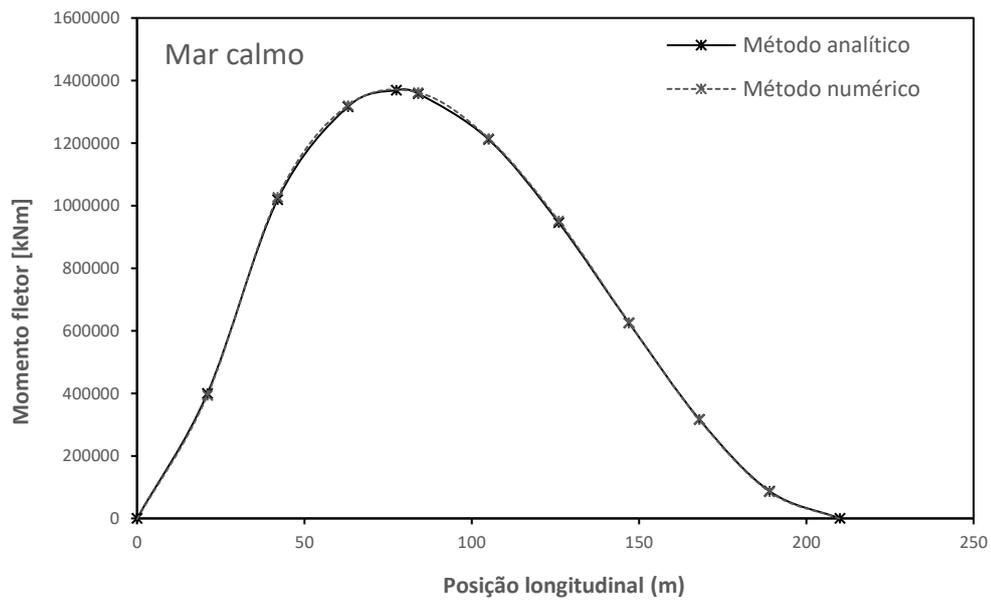
A comparação entre os resultados do modelo analítico e aqueles obtidos empregando-se o procedimento desenvolvido neste trabalho (Capítulo 3), é mostrada nas Figuras 51 a 53, enquanto na Tabela 8 são sintetizados os erros quadráticos médios obtido em cada uma das condições analisadas.

Tabela 8 - Erros quadráticos para primeira validação

Condição de análise	Erro quadrático médio
Mar calmo	1,07%
Tosamento	4,08%
Alquebramento	1,25%

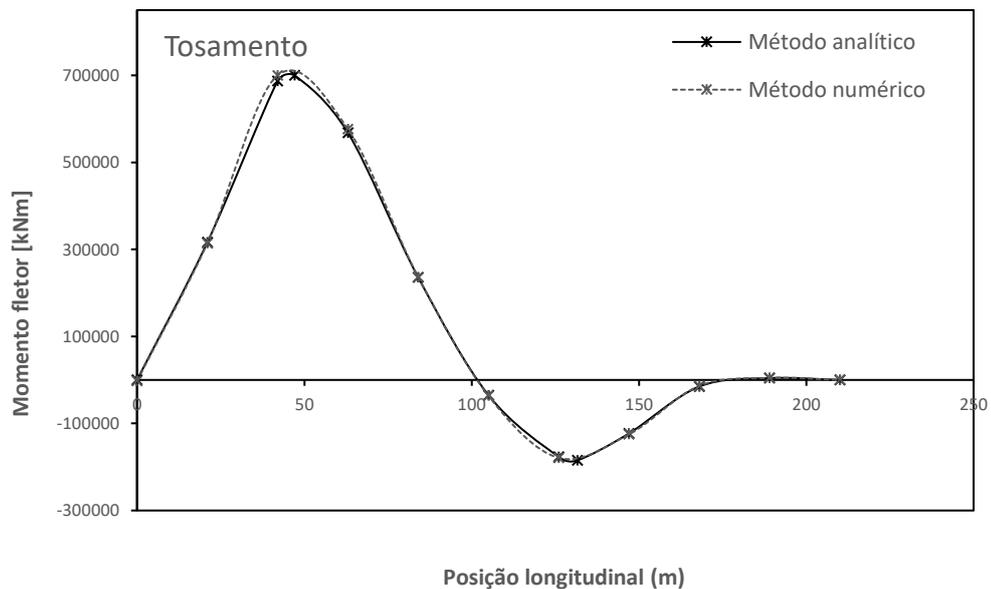
Fonte: Autor (2022).

Figura 51 - Curvas de momento fletor para a condição de mar calmo



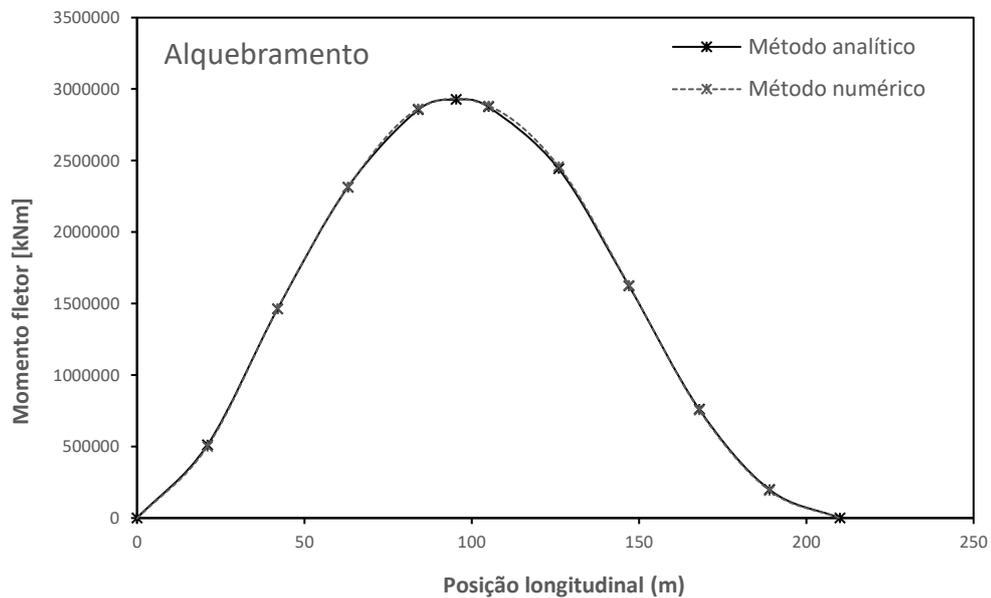
Fonte: Autor (2022).

Figura 52 - Curvas de momento fletor para a condição de tosamento



Fonte: Autor (2022).

Figura 53 - Curvas de momento fletor para a condição de alquebramento



Fonte: Autor (2022).

Para verificar a robustez da ferramenta, foi realizada a análise de outros dois casos, considerando embarcações com diferentes dimensões e diferentes distribuições de carregamento.

O procedimento de comparação utilizado foi o mesmo empregado no estudo de caso anterior. As dimensões e propriedades dos modelos de viga navio analisados nessa etapa são enumeradas na Tabela 9, enquanto as curvas de carga aplicadas são mostradas na Tabela 10.

Tabela 9 - Dimensões e propriedades das embarcações da segunda análise

	Segundo caso	Terceiro caso	Unidade
Comprimento	180	250	m
Boca	20	35	m
Pontal	17	19	m
Calado	14,5	16	m
Volume deslocado	52200	140000	m <sup>3</sup>
LCB	90	125	m
Momento de inércia	8188	20005	m <sup>4</sup>

Fonte: Autor (2022).

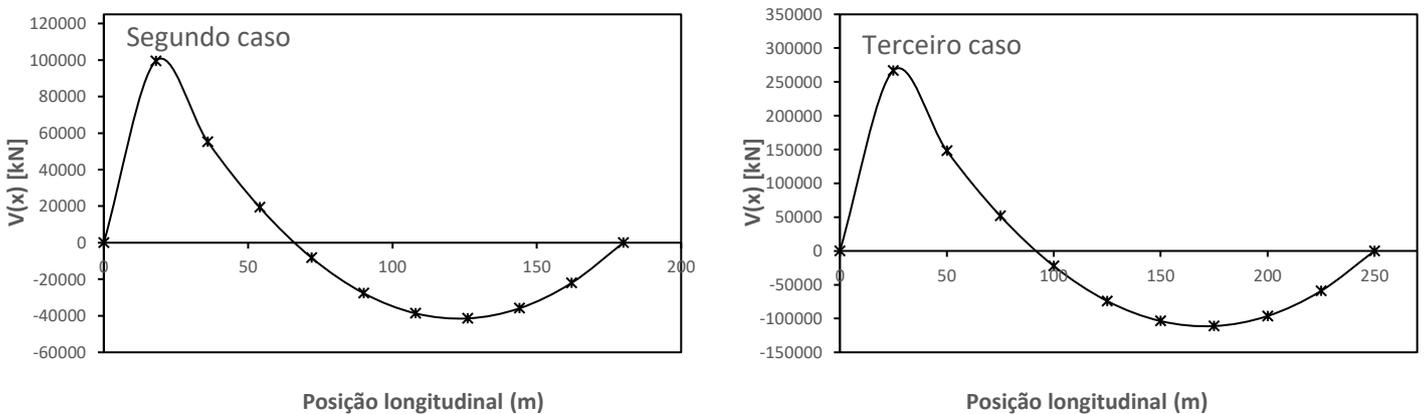
Tabela 10 - Carregamento atuante nas vigas da segunda análise

	Carga – Segundo caso (kN/m)	Carga – Terceiro caso (kN/m)
$q_1(x)$	5525,10	10669,15
$q_2(x)$	-2455,60	-4741,84
$q_3(x)$	-1995,17	-3852,75
$q_4(x)$	-1534,75	-2963,65
$q_5(x)$	-1074,32	-2074,56
$q_6(x)$	-613,90	-1185,46
$q_7(x)$	-153,47	-296,37
$q_8(x)$	306,95	592,73
$q_9(x)$	767,37	1481,83
$q_{10}(x)$	1227,90	2370,92

Fonte: Autor (2022).

Assim como no estudo anterior, integrando-se as curvas de cargas descritas na Tabela 10, foram traçadas as curvas de força cortante para cada um dos casos (Figura 54).

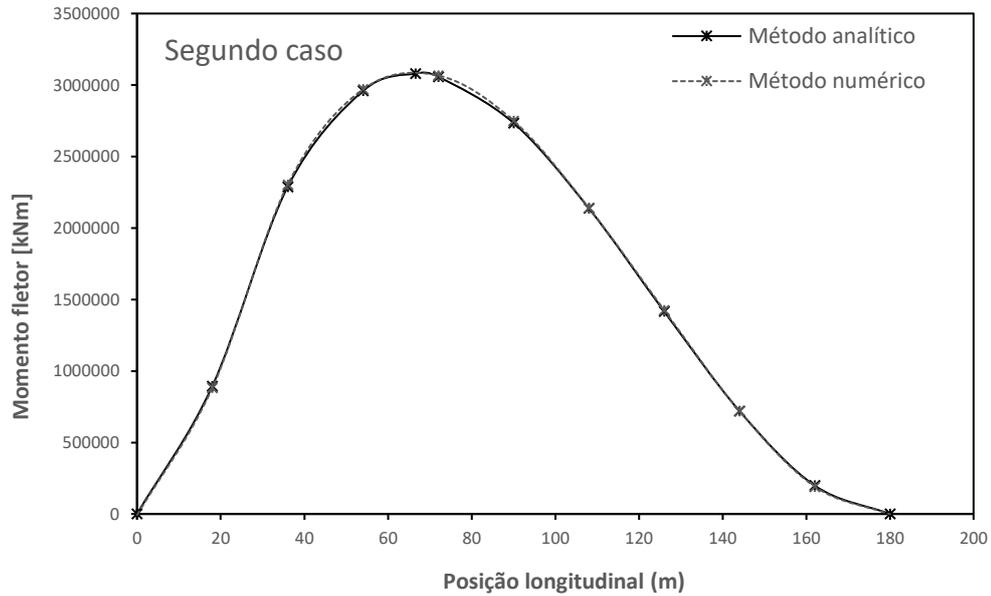
Figura 54 - Curvas de força cortante da segunda análise



Fonte: Autor (2022).

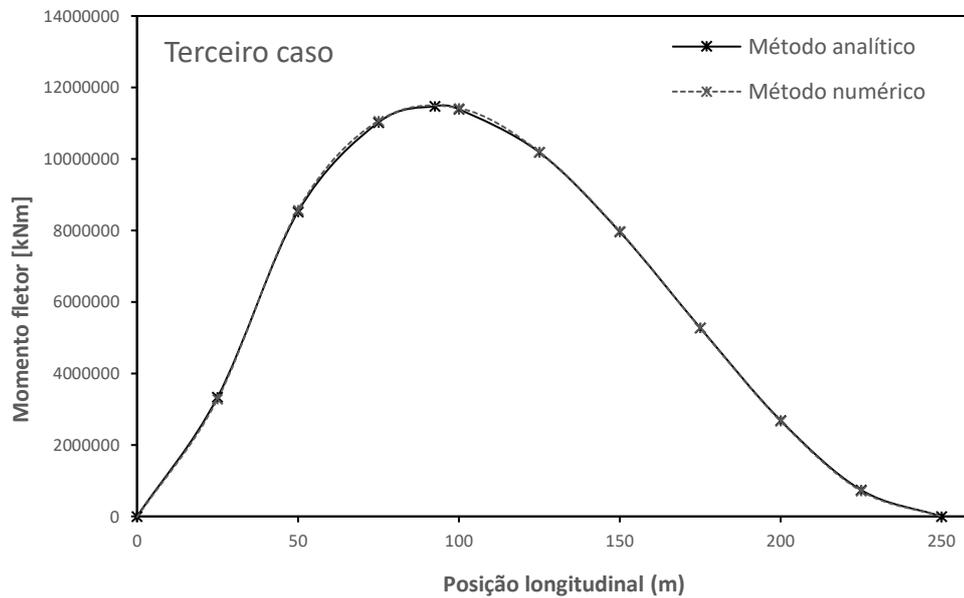
Por fim, nas Figuras 55 e 56 são apresentadas as comparações entre as curvas de momento fletor obtidas analiticamente e aquelas obtidas no procedimento desenvolvido neste trabalho. Já os erros quadráticos médios são sintetizados na Tabela 11.

Figura 55 - Curva de momento fletor para o segundo caso



Fonte: Autor (2022).

Figura 56 - Curva de momento fletor para o terceiro caso



Fonte: Autor (2022).

Tabela 11 - Erros quadráticos para a segunda análise

Caso	Erro quadrático médio
Segundo caso	1,32%
Terceiro caso	1,36%

Fonte: Autor (2022).

## 6. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MASSA NA TENSÃO DE VON MISES

Com o objetivo de entender a influência que as características geométricas exercem no projeto de um painel estrutural de um navio (Seção 4.1), foi realizado um estudo paramétrico correlacionando a máxima tensão de von Mises e a massa da estrutura.

Conforme discutido na fundamentação teórica, o critério de menor massa permite que uma embarcação alcance uma maior quantidade de carga e/ou obtenha uma economia de combustível ao viajar na velocidade de serviço. Por outro lado, a redução dos níveis de tensão pode ser associada à uma maior segurança e/ou a um aumento da vida útil da embarcação.

Nesse caso, a rotina de automatização desenvolvida permite variar as principais dimensões da estrutura, as quais são enumeradas na Tabela 12, juntamente com os limites de variação adotados nesse estudo.

Tabela 12 - Espaço amostral utilizado no estudo paramétrico

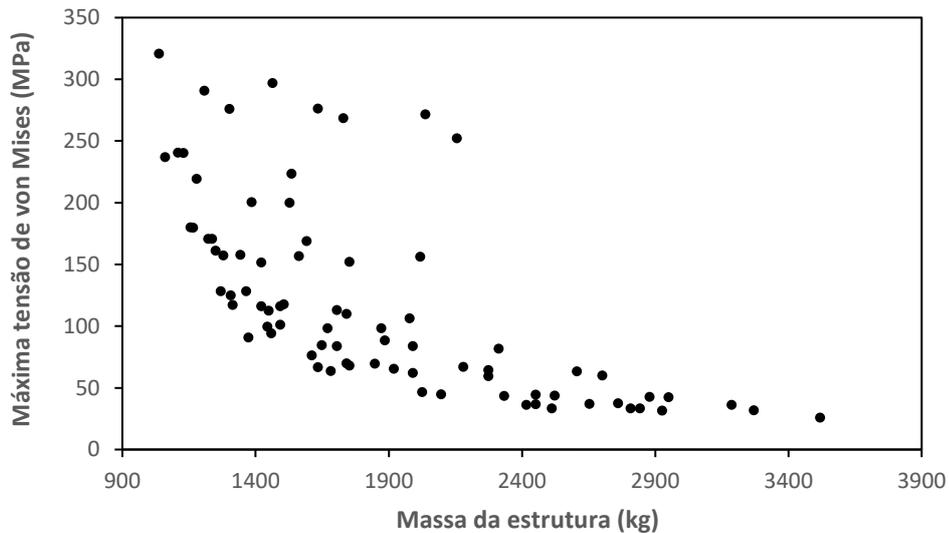
Variáveis	Unidade	Mínimo	Máximo
Número de reforçadores	-	2	5
Espaçamento	mm	360	900
Espessura da chapa	mm	20	40
Espessura do flange	mm	20	40
Comprimento do flange	mm	120	300
Espessura da alma	mm	10	35
Altura da alma	mm	150	250

Fonte: Autor (2022).

Visando uma comparação assertiva, o comprimento e a largura da chapa foram mantidos constantes durante todas as análises, assim como as propriedades do material utilizado na modelagem.

Considerando o espaço amostral descrito na Tabela 12, um total de 80 combinações foram geradas aleatoriamente e cujos dados podem ser vistos no Apêndice C, juntamente com os resultados obtidos em cada uma das análises realizadas. Os resultados referentes à massa da estrutura e à tensão máxima de von Mises são sistematizados na Figura 57.

Figura 57 - Estudo de variação de massa e tensão de von Mises



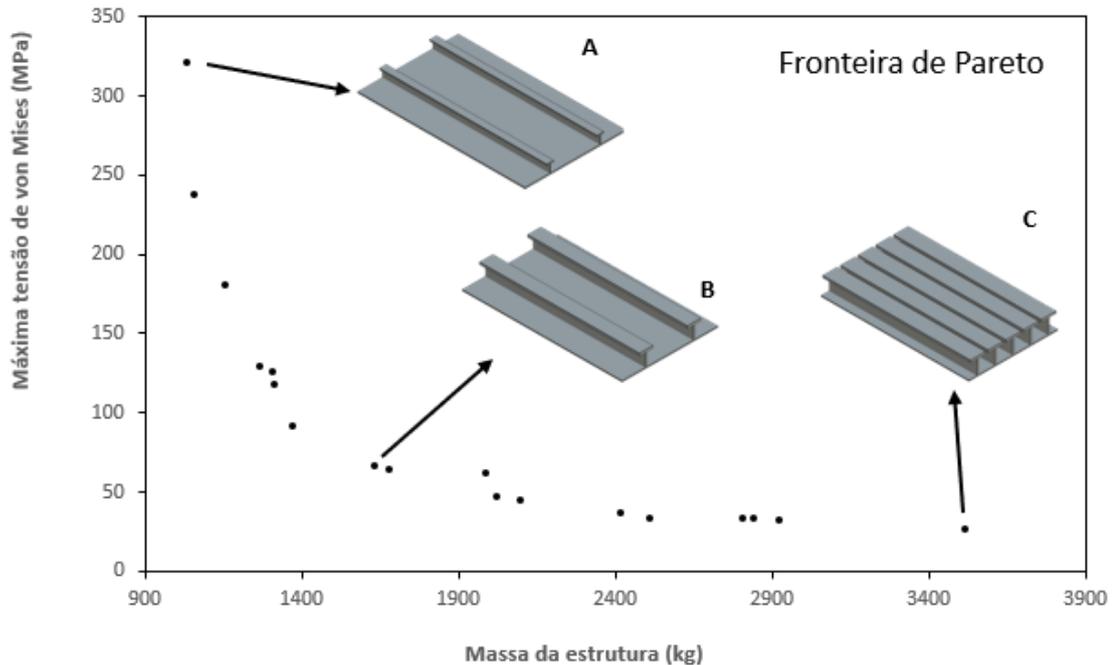
Fonte: Autor (2022).

Analisando os resultados obtidos, é possível observar que a tensão máxima de von Mises decresce à medida que a massa da estrutura aumenta. Pois, em linhas gerais, o aumento da massa implica no aumento do módulo de rigidez, diminuindo, assim, a tensão máxima sofrida pela estrutura.

Tancredi (2008) discute que em problemas multiobjetivos nos quais existe um conflito de interesses entre os objetivos, não existe uma única solução ótima para o problema, pois é possível conceber infinitas soluções que representam diferentes graus de comprometimento (ou importância) entre os objetivos do projeto.

Nesse caso é possível identificar as combinações de variáveis que resultam em soluções igualmente ótimas, sejam reduzindo a massa ou reduzindo a tensão máxima atuante na estrutura. Esse conjunto de soluções forma uma curva conhecida com fronteira de Pareto. A fronteira de Pareto referente ao estudo realizado nesta seção é mostrada na Figura 58.

Figura 58 - Fronteira de Pareto para o estudo realizado



Fonte: Autor (2022).

As soluções apresentadas na Figura 58 são consideradas dominantes, pois, para um dado valor de massa, apresentam o menor nível de tensão possível, ou para um dado limite de tensão, apresentam o menor valor de massa possível.

Para facilitar a visualização da variação das características geométricas da estrutura ao longo da fronteira de Pareto, foram incluídas na Figura 58 representações tridimensionais da geometria nas três regiões características da fronteira de Pareto (ponto de mínima massa, ponto de mínima tensão e um ponto de equilíbrio entre a redução de massa e de tensão), cujas dimensões são apresentadas na Tabela 13.

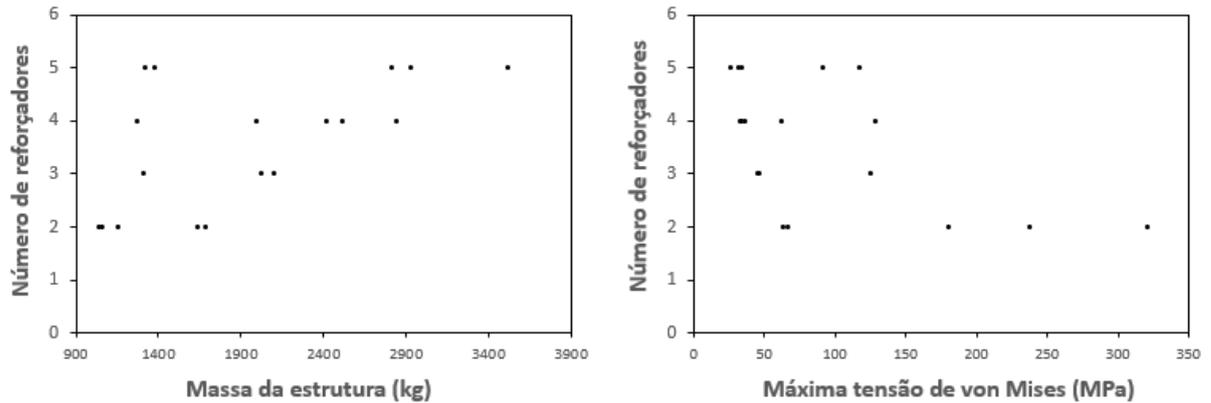
Tabela 13 - Dimensões das geometrias representadas na fronteira de Pareto

Variáveis	Solução A	Solução B	Solução C
Número de reforçadores	2	2	5
Espaçamento (mm)	900	900	360
Espessura do chapeamento (mm)	20	20	20
Espessura do flange (mm)	20	30	40
Comprimento do flange (mm)	120	300	300
Espessura da alma (mm)	10	30	35
Altura da alma (mm)	150	250	300

Fonte: Autor (2022).

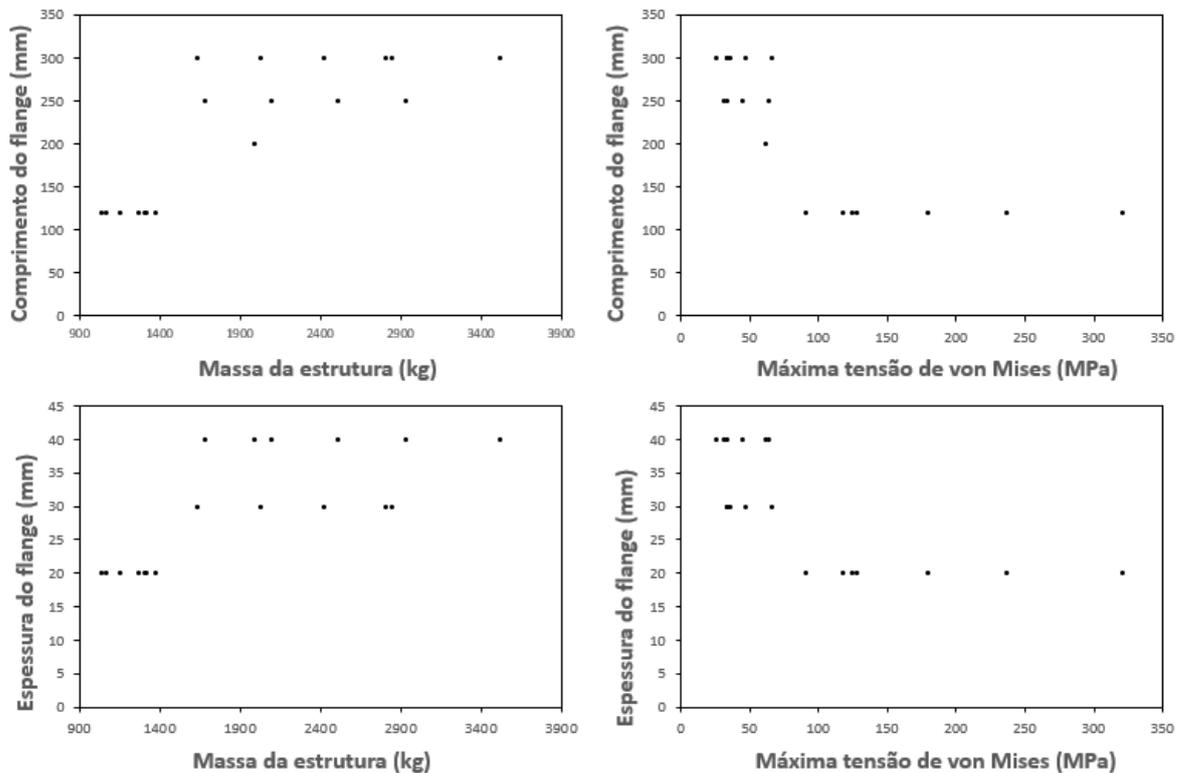
Por fim, para avaliar a influência de cada variável isoladamente nos parâmetros de desempenho analisados (massa da estrutura e máxima tensão de von Mises), foram traçados gráficos (Figuras 59 a 61) que buscam identificar tais influências ao longo da fronteira de Pareto apresentada na Figura 58.

Figura 59 - Influência do número de reforçadores nos resultados



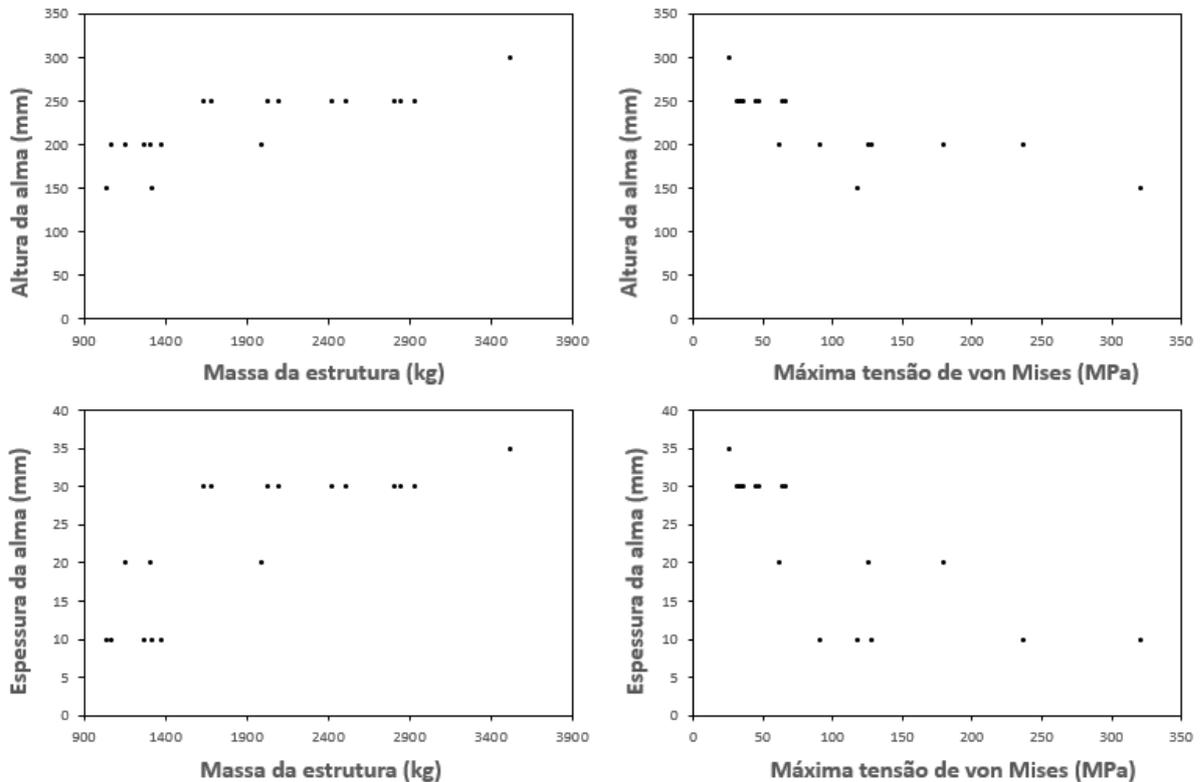
Fonte: Autor (2022).

Figura 60 - Influência das dimensões do flange nos resultados



Fonte: Autor (2022).

Figura 61 - Influência das dimensões da alma nos resultados



Fonte: Autor (2022).

Analisando a Figura 58, percebe-se que, considerando apenas as soluções da fronteira de Pareto, inicialmente poder-se-ia dizer que não existe uma correlação direta entre o número de reforçadores e o desempenho da estrutura, pois existem 5 reforçadores tanto na região de menor massa (1200 kg) quanto na região de maior massa (3500 kg), indicando que existem múltiplas geometrias que resultam em valores similares de massa e de tensão máxima de von Mises.

Por outro lado, não foram observadas soluções com 2 reforçadores na região de maior massa (acima de 2000 kg), além de que, a opção de 2 reforçadores foi a única a oferecer soluções ótimas na fronteira de Pareto com menos de 1000 kg. Por fim, apenas a opção com 5 reforçadores resultou em soluções na fronteira de Pareto com massa acima de 2800 kg.

Uma vez que o estudo realizado não incluiu a utilização de uma técnica de otimização, é possível inferir que um maior número de reforçadores tende a resultar em soluções de maior massa e menores níveis de tensão máxima de von Mises, ao passo que soluções com menos reforçadores têm a tendência oposta.

Realizando análises similares para as outras variáveis, é possível inferir que o aumento de qualquer uma das dimensões do reforçador tende a resultar em soluções de maior massa e menores níveis de tensão máxima de von Mises.

Em linhas gerais, esses resultados concordam com as observações realizadas por Zilio (2018), que realizou um trabalho similar, porém utilizando uma ferramenta comercial de elementos finitos acoplada a um modelo de otimização também implementado em uma ferramenta comercial.

## 7. CONCLUSÃO

De acordo com o que foi visto ao longo deste trabalho, o projeto estrutural de embarcações é uma etapa de grande importância para a segurança da navegação, podendo reduzir custos de fabricação, aumentar a capacidade de carga e/ou aumentar a velocidade de serviço da embarcação.

Dessa forma, a definição de um arranjo estrutural eficiente para um projeto naval é um processo contínuo e sistemático de tomadas de decisões em busca de uma configuração estrutural que atenda aos requisitos definidos pelas normas e regulamentos existentes. No entanto, a complexidade do projeto estrutural exige grande experiência de arquitetos e projetistas, necessitando um conhecimento teórico bem consolidado e a compreensão de como as variáveis de projeto afetam o desempenho da estrutura.

Embora largamente empregada na indústria, o uso do método dos elementos finitos é bastante restrito no caso do projeto de estruturas navais, seja pelo tempo e conhecimentos exigidos para a correta modelagem dos fenômenos, seja pelo custo associado as ferramentas comerciais disponíveis.

Nesse contexto, este trabalho apresentou o desenvolvimento de um procedimento computacional para análise automatizada da estrutura de embarcações deslocantes através do método de elementos finitos, o qual utiliza apenas ferramentas de análise gratuitas.

Pelo descrito nesta dissertação, entende-se que o trabalho logrou êxito em atingir os objetivos estabelecidos, pois foi capaz de identificar uma ferramenta gratuita (FreeCAD v0.19) e desenvolver o procedimento de análise proposto. Além disso, os processos de verificação e validação permitiram afirmar que o procedimento desenvolvido é promissor e poderá ser utilizado pela comunidade acadêmica, além de pequenos escritórios de projeto naval e/ou estaleiros de pequeno e médio porte.

Seguindo a tradicional metodologia desacoplada de análise de estruturas navais, foram desenvolvidos dois módulos de análise. O primeiro contempla a análise de efeitos globais e permite, conhecendo a curva de carga correspondente a situação de equilíbrio da embarcação, determinar a distribuição da curva de momento fletor ao longo do comprimento da viga navio. Já o segundo, efetua a análise dos efeitos locais,

avaliando a distribuição das tensões em um painel estrutural composto por uma grelha ortogonal chapeada sujeita a uma pressão uniforme.

A validação do procedimento para a análise da viga navio revelou erros inferiores a 5% em todos os casos analisados, sendo que os erros médios ficaram abaixo dos 2%.

Já o estudo paramétrico do painel estrutural mostrou que os objetivos de reduzir a massa da estrutura e a tensão atuante no painel estrutural são conflitantes e, portanto, a diminuição de um objetivo, resulta, invariavelmente, no aumento do outro. Tais resultados são consistentes com aqueles observados na literatura.

Dado que os objetivos deste trabalho foram atingidos, para trabalhos futuros, recomenda-se o aprimoramento do procedimento desenvolvido, incluindo uma metodologia para a modelagem de diferentes formas de reforçadores, além da realização de um estudo mais profundo sobre a influência que o grau de refino da malha exerce nos resultados obtidos.

Por fim, sugere-se que o procedimento desenvolvido seja incorporado à um modelo de otimização, permitindo a obtenção de projetos estruturais eficientes que, eventualmente, representem diferenciais reais no competitivo mercado da indústria naval.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPBUILDING. **Steel vessels 2006: Part 5, Specific vessel type**. Spring, 2006.

AMERICAN BUREAU OF SHIPBUILDING. **Steel vessels 2019: Part 3, Hull construction and equipment**. Spring, 2019.

AUGUSTO, O. B. **A estrutura secundária do navio**. Apostila. Curso Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004a. (mimeo).

AUGUSTO, O. B. **A estrutura terciária do navio**. Apostila. Curso Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004b. (mimeo).

AUGUSTO, O. B. **Análise estrutural de navios**. Apostila. Curso Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. (mimeo).

AUGUSTO, Oscar Brito. **Projeto racional otimizado e automatizado da estrutura de embarcações**. 1996. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BAI, Y. **Marine structural design**. Oxford: Elsevier Science, 2003.

BARABANOV, N. **Structural design of sea-going ships**. Nem Delhi: Central Books Ltd, 1966.

CHAVES, V. T.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. de. Optimal structural design of small ships with response surface. **Proceedings** of 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.

Freitas, E. S., **Curvas, Tabelas e Notas para Projetos**, Área de Estruturas Navais, DEN - EPUSP - 1980.

HIBBELER, R. C.. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HUGHES, O. F.; PAIK, J. K. **Ship structural analysis and design**. Nova Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.

LUO, Yunhua. An effective way for dealing with element distortion by nearest-nodes FEM. **International Journal For Numerical Methods In Biomedical Engineering**. Winnipeg, p. 1125-1129. set. 2008.

OKUMOTO, Yasuhisa *et al.* **Design of ship hull structures: a practical guide for engineers.** Berlin: Springer, 2009.

OLIVEIRA, D. et al. Synthesis and optimization of oceanographic ship design. **Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources.** London, p. 491–500. 2013

TANCREDI, T. P. **A estrutura primária do navio:** Teoria de vigas – viga navio. Apostila. Curso Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. (mimeo).

TANCREDI, Thiago Pontin. **Sociedade classificadora – Vídeo 3 – Variáveis do projeto estrutural.** Youtube, 9 nov. 2020. Disponível em <[www.youtube.com/watch?v=swRieotcZpo&ab\\_channel=UmaPitadadeEngenharia](http://www.youtube.com/watch?v=swRieotcZpo&ab_channel=UmaPitadadeEngenharia)>. Acesso em 3 jul. 2022.

TANCREDI, Thiago Pontin. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia.** 2008. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

VAN HAVRE, Yorik. **Manual:Introduction.** 2008. Disponível em: <https://wiki.freecad.org/Manual:Introduction>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. **The finite element method:** volume 1: the basis. 5. ed. Barcelona: Butterworth-Heinemann, 2000.

ZILIO, Gabriel. **Otimização multiobjetivo do arranjo de um painel estrutural submetido a pressão uniforme, utilizando o método dos elementos finitos.** 2018. 123 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

## APÊNDICE A – Graus de liberdade de cada tipo de elemento

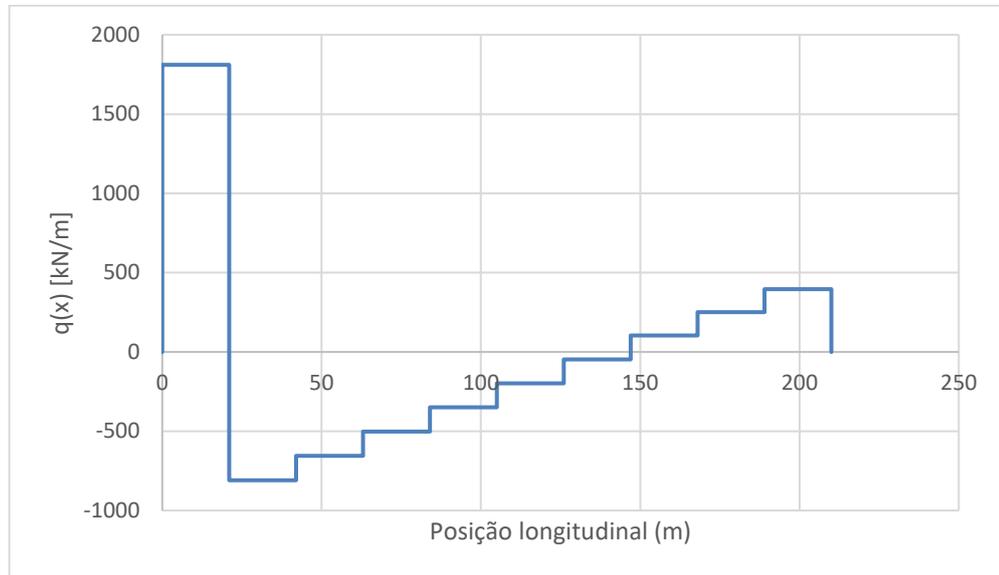
Tabela A 1 – Elementos e seus respectivos graus de liberdade

<b>Elementos</b>	<b>Número de GL</b>	<b>GL</b>
Elemento plano de tensão (membrana)	2	$u$ e $v$
Elemento de curvatura de placa	3	$w$ , $\theta_x$ e $\theta_y$
Elemento de casca	5	$u$ , $v$ , $w$ , $\theta_x$ e $\theta_y$
Elemento de barra	1	$u$
Elemento de viga	6	$u$ , $v$ , $w$ , $\theta_x$ , $\theta_y$ e $\theta_z$
Elemento sólido	3	$u$ , $v$ e $w$

Fonte: Autor (2022).

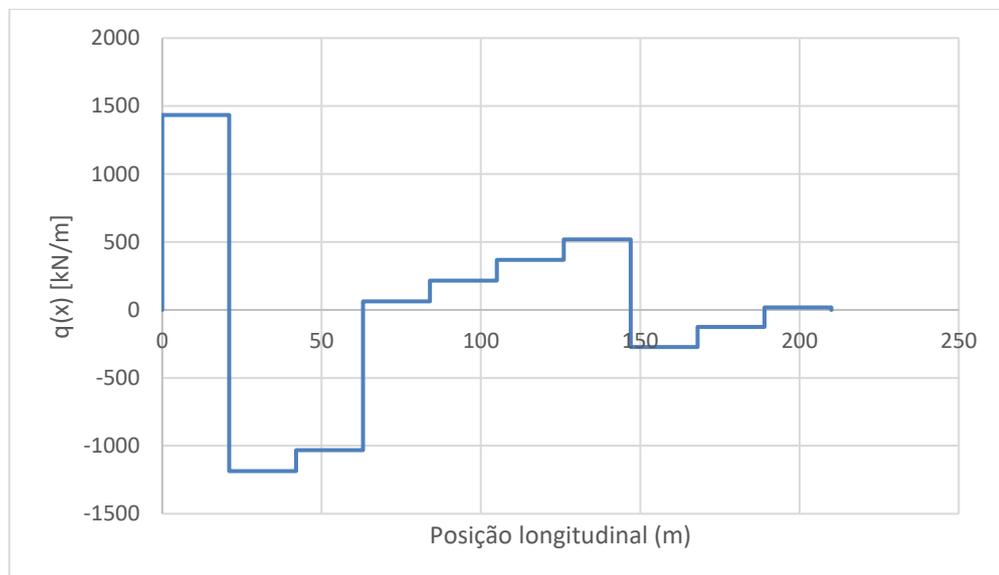
## APÊNDICE B – Curvas de carga atuante na viga navio 1

Figura B 1 – Curva de cargas para condição de mar calmo



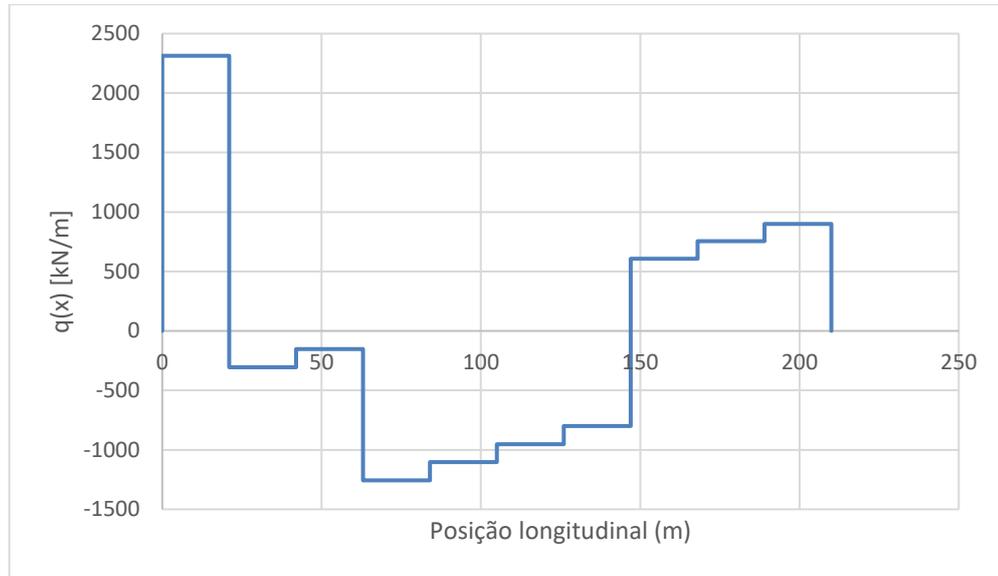
Fonte: Autor (2022).

Figura B 2 – Curva de carga para condição de tosamento



Fonte: Autor (2022).

Figura B 3 – Curva de carga para condição de alquebramento



Fonte: Autor (2022).

## APÊNDICE C – Dados utilizados no estudo paramétrico

Tabela C 1 – Dados para estudo de influência da massa na tensão máxima de von Mises

Número de reforçadores	Espaçamento (mm)	Espessura do chapeamento (mm)	Espessura da flange (mm)	Comprimento da flange (mm)	Espessura da alma (mm)	Altura da alma (mm)	Massa da estrutura (kg)	Máxima tensão de von Mises (MPa)
2	900	20	20	120	10	150	1038,06	320,63
2	900	30	20	120	10	150	1464,66	296,99
2	900	20	20	120	20	150	1109,16	240,43
2	900	30	20	120	20	150	1535,76	223,44
2	900	20	20	120	10	200	1061,76	236,92
2	900	20	20	120	20	200	1156,56	179,88
2	900	20	20	120	30	150	1180,26	219,34
2	900	20	20	120	30	200	1251,36	161,11
2	900	20	30	200	10	150	1208,70	290,71
2	900	30	30	200	10	150	1635,30	276,18
2	900	20	30	200	20	150	1279,80	157,21
2	900	20	30	300	30	250	1635,30	66,61
2	900	20	30	250	25	200	1445,70	99,66
2	900	30	30	250	25	200	1872,30	98,26
2	900	20	30	300	20	150	1422,00	151,64
2	900	20	40	200	10	150	1303,50	275,98
2	900	30	40	200	10	150	1730,10	268,40
2	900	40	40	200	10	150	2156,70	252,14
2	900	20	40	200	20	200	1422,00	116,19
2	900	20	40	250	30	250	1682,70	63,56
2	900	20	40	300	35	200	1753,80	68,07
2	900	30	40	300	35	200	2180,40	66,98
2	900	40	40	300	35	200	2607,00	63,40
3	600	20	20	120	10	150	1130,49	240,38
3	600	20	20	120	20	150	1237,14	170,60
3	600	20	20	120	10	200	1166,04	179,62
3	600	30	20	120	10	200	1592,64	168,99
3	600	40	20	120	10	200	2019,24	156,14
3	600	20	20	120	20	200	1308,24	124,96
3	600	20	20	120	30	150	1343,79	157,72
3	600	20	20	120	30	200	1450,44	112,45
3	600	20	30	200	10	150	1386,45	200,40
3	600	20	30	200	20	150	1493,10	116,00
3	600	20	30	300	30	250	2026,35	46,56
3	600	30	30	300	30	250	2452,95	44,41
3	600	40	30	300	30	250	2879,55	42,68
3	600	20	30	250	25	200	1741,95	69,88
3	600	20	30	300	20	150	1706,40	112,91

3	600	20	40	200	10	150	1528,65	200,01
3	600	20	40	250	30	250	2097,45	44,76
3	600	30	40	250	30	250	2524,05	43,59
3	600	40	40	250	30	250	2950,65	42,25
3	600	20	40	300	35	300	2452,95	36,64
4	450	20	20	120	10	150	1222,92	170,71
4	450	20	20	120	20	150	1365,12	128,17
4	450	20	20	120	10	200	1270,32	128,30
4	450	20	20	120	20	200	1459,92	94,23
4	450	30	20	120	20	200	1886,52	88,34
4	450	40	20	120	20	200	2313,12	81,57
4	450	20	20	120	30	150	1507,32	117,74
4	450	20	20	120	30	200	1649,52	84,60
4	450	20	30	200	10	150	1564,20	156,72
4	450	20	30	200	20	150	1706,40	83,73
4	450	20	30	300	30	250	2417,40	36,10
4	450	30	30	300	30	250	2844,00	33,25
4	450	40	30	300	30	250	3270,60	31,79
4	450	20	30	250	25	200	2038,20	271,51
4	450	20	30	300	20	150	1990,80	83,82
4	450	20	40	200	10	150	1753,80	152,11
4	450	20	40	200	20	200	1990,80	62,03
4	450	20	40	250	30	250	2512,20	33,41
4	450	20	40	300	35	200	2654,40	37,00
5	360	20	20	120	10	150	1315,35	117,23
5	360	20	20	120	20	150	1493,10	101,17
5	360	20	20	120	10	200	1374,60	90,69
5	360	20	20	120	20	200	1611,60	76,25
5	360	20	20	120	30	150	1670,85	98,18
5	360	20	20	120	30	200	1848,60	69,50
5	360	30	20	120	30	200	2275,20	64,25
5	360	40	20	120	30	200	2701,80	59,90
5	360	20	30	200	10	150	1741,95	110,00
5	360	20	30	200	20	150	1919,70	65,31
5	360	20	30	300	30	250	2808,45	33,27
5	360	20	30	250	25	200	2334,45	43,35
5	360	30	30	250	25	200	2761,05	37,54
5	360	40	30	250	25	200	3187,65	36,18
5	360	20	30	300	20	150	2275,20	59,52
5	360	20	40	200	10	150	1978,95	106,30
5	360	20	40	250	30	250	2926,95	31,54
5	360	20	40	300	35	300	3519,45	25,92

---

Fonte: Autor (2022).