

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

JULIÁN DE ALMEIDA NUNES

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO E OTIMIZADO  
PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE NAVIOS MERCANTES DO TIPO PETROLEIRO  
USANDO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS SEGMENTADO

Joinville

2024

JULIÁN DE ALMEIDA NUNES

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO E OTIMIZADO  
PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE NAVIOS MERCANTES DO TIPO PETROLEIRO  
USANDO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS SEGMENTADO

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2024

**Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC. Dados inseridos pelo próprio autor.**

Nunes, Julián de Almeida

Desenvolvimento de procedimento automatizado e otimizado para análise estrutural de navios mercantes do tipo petroleiro usando modelo de elementos finitos segmentado / Julián de Almeida Nunes ; orientador, Thiago Pontin Tancredi, 2024.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Estruturas Navais. 3. Elementos Finitos. 4. Otimização. 5. Ferramenta Computacional. I. Tancredi, Thiago Pontin. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

JULIÁN DE ALMEIDA NUNES

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO E OTIMIZADO  
PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE NAVIOS MERCANTES DO TIPO PETROLEIRO  
USANDO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS SEGMENTADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 19 de junho de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi  
Orientador/Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Vitor Takashi Endo  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me capacitou a realizar grandes conquistas e me ajudou a concluir essa jornada.

À minha família, em especial meus pais, Gean e Nazaré, e meu irmão, Júlio Gabriel, que não pouparam esforços durante toda a jornada, me incentivando e aconselhando nos momentos necessários.

Ao meu grande professor e amigo, Rubens, que me apresentou a engenharia naval e me incentivou a perseguir essa jornada e compartilhar esse sonho comigo.

Aos meus amigos de sempre, Getúlio, Heitor, Pedro e Rodrigo que estão ao meu lado desde o ensino médio, passando por todos os bons e maus momentos.

Aos meus amigos da faculdade, em especial Guilherme, John e Raul que estiveram comigo desde o começo do curso, sempre apoiando e incentivando.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi, que me promoveu uma oportunidade de mostrar meu trabalho no LaSiN, e que sempre com bons conselhos e ensinamentos tornou-se uma figura fundamental em minha formação.

Ao Prof. Dr. Vitor Takashi Endo, que com muita paciência me aconselhou e ensinou sobre elementos finitos e APDL, sendo parte fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, à toda equipe do LaSiN pelo apoio e companheirismo nessa caminhada repleta de desafios.

## RESUMO

Desde os tempos da antiguidade, a humanidade projeta e constrói embarcações com os mais diversos propósitos. Um dos maiores desafios da construção naval consiste na definição do arranjo interno da estrutura, a qual é fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade da embarcação. Sendo uma etapa dispendiosa que demanda grande esforço e tempo para obtenção de resultados viáveis e eficientes, os engenheiros buscam constantemente novas maneiras de desenvolver projetos confiáveis que satisfaçam os requisitos do armador, além de atenderem as diferentes normas impostas pelas sociedades classificadoras e demais entidades que regulam o setor naval. Nesse sentido, o desenvolvimento de técnicas e ferramentas computacionais permite aos projetistas utilizar o poder computacional para realizar diversas simulações e análises em um curto período de tempo, reduzindo a duração de um projeto estrutural e aumentando a eficiência da solução obtida. Inserido nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia de projeto estrutural baseada em um modelo paramétrico que realiza tanto a análise numérica utilizando o método dos elementos finitos, quanto a verificação dos critérios normativos. Esse modelo, por sua vez, é integrado a um processo de otimização que utiliza o algoritmo HDGA implementado na ferramenta Synapse. Tanto as restrições normativas, quanto os níveis de tensões aferidos na análise numérica são utilizados como restrições no processo de otimização, o qual tem como objetivo a redução da massa estrutural do navio. Por fim, é apresentado um estudo de caso no qual o projeto estrutural de um navio petroleiro é desenvolvido com sucesso utilizando a metodologia proposta.

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

## ABSTRACT

Since ancient times, humanity has designed and built vessels for various purposes. One of the greatest challenges in shipbuilding is defining the internal arrangement of the ship's structure, which is essential for ensuring the safety and reliability of the vessel. This is a costly phase that requires significant effort and time to achieve viable and efficient results. Engineers are constantly seeking new ways to develop reliable designs that meet the requirements of shipowners while also complying with the different standards imposed by classification societies and other entities that regulate shipbuilding. In this context, the development of computational techniques and tools allows designers to leverage computational power to perform various simulations and analyses in a short period, reducing the duration of a structural project and increasing the efficiency of the obtained solution. Within this context, this work presents a structural design methodology based on a parametric model that performs both numerical analysis using the finite element method and verification of regulatory criteria. This model is integrated into an optimization process that utilizes the HDGA algorithm implemented in the Synapse tool. Both regulatory constraints and stress levels measured in the numerical analysis are used as constraints in the optimization process, which aims to reduce the structural mass of the ship. Finally, a case study is presented in which the structural design of a tanker is successfully developed using the proposed methodology.

**Keywords:** Finite elements. Optimization. Computational tool. Naval structures. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espiral de Evans .....	15
Figura 2 - Conceito básico do Método de Elementos Finitos (MEF) .....	18
Figura 3 - Exemplo de discretização de malha.....	20
Figura 4 - Exemplo de geometria e malha .....	21
Figura 5 - Exemplo de análise de tensões equivalentes de Von Mises (MPa) .....	23
Figura 6 - Ilustração sobre a otimização de casos com restrição.....	25
Figura 7 - Metodologia do trabalho.....	27
Figura 8 - Estrutura geral do script.....	30
Figura 9 - Subdivisões da etapa de modelagem .....	31
Figura 10 - Subdivisões etapa de aplicação da malha .....	32
Figura 11 - Aplicação das condições de contorno e carregamento .....	32
Figura 12 - Navio petroleiro modelo .....	33
Figura 13 - Disposição das cargas na embarcação .....	35
Figura 14 - Modelagem do casco da embarcação estudada.....	36
Figura 15 - Curvas em mar calmo .....	37
Figura 16 - Curvas em onda crítica de tosamento.....	37
Figura 17 - Curvas em onda crítica de alquebramento .....	38
Figura 18 - Fluxograma de otimização .....	39
Figura 19 - Variáveis de projeto (em azul) e parâmetros (em laranja) .....	41
Figura 20 - Solver Excel (em verde) e saídas do solver (em amarelo).....	41
Figura 21 - Solver Ansys (em marrom) e suas saídas (em cinza).....	42
Figura 22 - Função objetivo (em azul) e restrições (em vermelho) .....	43
Figura 23 - DOE SOBOL (em laranja), otimizador HDGA (em verde) e modelo de otimização (em amarelo).....	43
Figura 24 - Aba principal da planilha de normas .....	44
Figura 25 - Catálogo de chapas de aço utilizado .....	45
Figura 26 - Exemplo de entrada de dados por meio da otimização .....	46
Figura 27 - Reforçadores tipo 1 (em amarelo) e reforçadores tipo 2 (em verde) no duplo fundo de uma embarcação.....	49
Figura 28 – Resultados do processo de otimização.....	50
Figura 29 - Planilha auxiliar caso ótimo.....	52
Figura 30 - Resultados da análise MEF .....	52

Figura 31 – Análise MEF da antepara longitudinal.....	53
Figura 32 - Análise da região mais afetada da estrutura .....	54
Figura 33 - Ficha técnica do navio petroleiro modelo .....	64
Figura 34 - Disposição de estruturas da embarcação modelo .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algoritmos de otimização .....	26
Tabela 2 - Dados da embarcação modelo .....	33
Tabela 3 - Coeficientes e relações adimensionais calculadas .....	34
Tabela 4 – Parcelas calculadas do peso leve .....	34
Tabela 5 - Dimensões dos Tanques.....	35
Tabela 6 - Momento fletor em cada condição de mar analisada .....	38
Tabela 7 – Dados referentes a condição crítica .....	38
Tabela 8 - Atributos do modelo de otimização .....	42
Tabela 9 - Hipóteses consideradas .....	48
Tabela 10 - Variáveis do ponto ótimo.....	51
Tabela 11 - Resultados do ponto ótimo.....	51
Tabela 12 - Catálogos de reforçadores pesados utilizados.....	59
Tabela 13 - Catálogo de reforçadores leves utilizados.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – American Bureau of Shipping  
APDL – Ansys Parametric Design Language  
ARBL – Alta resistência baixa liga  
CTJ – Centro Tecnológico de Joinville  
HDGA – High Dispersion Genetic Algorithm  
MEF – Método de Elementos Finitos  
SAC – Curva de Área Seccional  
SM – Módulo de Seção  
SMm – Módulo de Seção Mínimo  
SMp – Módulo de Seção Projetado  
SMr – Módulo de Seção Requerido  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
VSCoDe – Visual Studio Code

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	17
1.1.1. <b>Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
1.1.2. <b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	18
2.1.1. <b>Geometria e malha</b> .....	<b>19</b>
2.1.2. <b>Propriedades dos materiais</b> .....	<b>21</b>
2.1.3. <b>Condições de contorno e carregamentos</b> .....	<b>22</b>
2.1.4. <b>Análise estrutural</b> .....	<b>22</b>
2.2. OTIMIZAÇÃO .....	24
2.2.1. <b>Algoritmos de otimização</b> .....	<b>25</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1. ANSYS .....	28
3.1.1. <b>Ansys Parametric Design Language</b> .....	<b>28</b>
3.2. PROJETO DE OTIMIZAÇÃO .....	29
<b>4. DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>30</b>
4.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO .....	30
4.2. EMBARCAÇÃO ESTUDADA .....	33
4.2.1. <b>Planilha auxiliar de análise da viga navio</b> .....	<b>34</b>
4.3. OTIMIZAÇÃO .....	39
4.3.1. <b>Elementos da otimização</b> .....	<b>40</b>
4.3.2. <b>Elementos da planilha auxiliar de normas</b> .....	<b>44</b>
4.3.3. <b>Elementos da modelagem e análise MEF</b> .....	<b>46</b>
<b>5. ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>48</b>
5.1. DADOS DO ESTUDO DE CASO E HIPÓTESES .....	48
5.2. RESULTADOS E VERIFICAÇÕES DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO .....	49
5.2.1. <b>Dados do ponto ótimo</b> .....	<b>50</b>
5.2.2. <b>Verificação do ponto ótimo na planilha auxiliar</b> .....	<b>51</b>
5.2.3. <b>Verificação do ponto ótimo na análise MEF</b> .....	<b>52</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A – CATÁLOGOS DOS REFORÇADORES UTILIZADOS.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO A – NAVIO MODELO .....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria naval é um importante setor da economia global, sendo responsável pelo transporte de cerca de 80% das cargas movimentadas no mundo, atingindo o volume de 10,7 bilhões de toneladas transportadas no ano de 2020.

Devido a possibilidade de transportar grandes volumes de mercadorias dos mais diversos tipos e o baixo custo por tonelada transportada, o transporte marítimo proporciona margens de lucro razoáveis para empresas de vários setores (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT - UNCTAD, 2021).

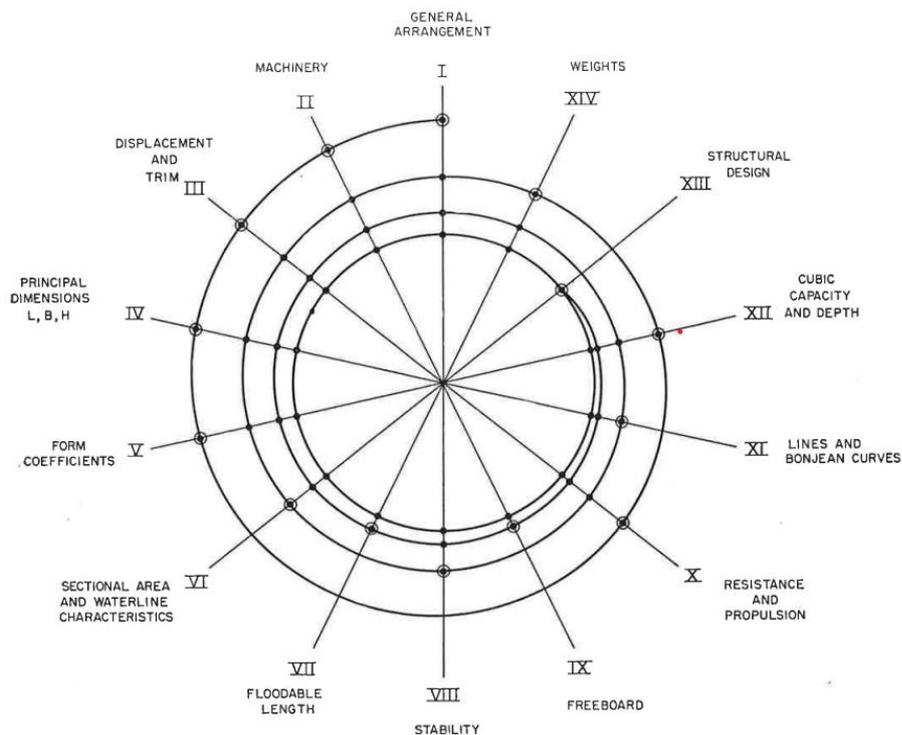
Entretanto, o desenvolvimento do projeto de embarcações de grande porte, visando um transporte transoceânico energeticamente eficiente, seguro e confiável, não é um processo simples, podendo levar de 12 a 16 meses até a finalização do projeto de uma embarcação (THE NEW YORK TIMES, 2020).

A duração de um projeto naval, deve-se, em grande parte, ao caráter iterativo inerente a essa atividade, requerendo que diversas características sejam recalculadas até que todos os requisitos sejam atendidos. Contudo, tais características são interdependentes, de forma que a otimização isolada de uma delas pode não representar uma melhora no desempenho global do projeto (HUGHES; PAIK, 2010)

Tradicionalmente, o processo de projeto de um navio é representado por uma espiral (Figura 1), onde as diferentes etapas são repetidas e reavaliadas até que seja alcançada uma solução satisfatória que atenda aos requisitos estabelecidos. Essa representação foi originalmente proposta por Evans (1959), sendo comumente conhecida como Espiral de Evans.

Entre as diferentes etapas enumeradas na Figura 1, destaca-se o projeto estrutural, objeto deste trabalho. Embora, conforme descrito por Papanikolaou (2014), o projeto estrutural seja uma atividade complexa que demanda várias iterações até ser concluída, o caráter iterativo do projeto naval exige que o projeto estrutural seja repetido a cada volta realizada na espiral.

Figura 1 - Espiral de Evans



Fonte: Evans (1959, p. 672).

As qualidades técnicas do projeto são determinadas pelo armador, baseando-se em normas e limites empíricos estabelecidos por sociedades classificadoras e regulamentos estatutários exigidos por autoridades marítimas.

Esses limites visam garantir a segurança e a confiabilidade das embarcações e, conforme já mencionado, para atingi-los, o dimensionamento estrutural é realizado diversas vezes até que o projeto esteja adequado às normas e recomendações vigentes (FONSECA, 2019).

Todavia, não existem correlações simples entre o dimensionamento dos elementos estruturais e os níveis de tensões atuantes na estrutura. Por isso, são realizados refinamentos sucessivos das variáveis de projeto até que seja determinado um arranjo estrutural que atenda aos requisitos impostos e garanta a integridade da estrutura (HUGHES; PAIK, 2010).

Como o objetivo primordial de um navio é o transporte de cargas ou pessoas, é importante buscar a diminuição da massa da estrutura sem comprometer sua resistência. Pois, quanto menor for a massa estrutural do navio, maior será a sua capacidade de carga e/ou menor será a quantidade de combustível necessária para realizar uma viagem (HUGHES; PAIK, 2010).

Dessa forma, ao desenvolver o projeto de uma embarcação, busca-se um arranjo que otimize a relação entre o peso estrutural e a carga transportada, sempre respeitando os limites de projeto impostos por normas e pelo armador.

Por essa razão, esforços vêm sendo concentrados no estudo de técnicas e ferramentas destinadas à otimização de estruturas navais, as quais vão desde o aprimoramento dos materiais utilizados na fabricação, passando por melhorias nos processos de fabricação e, por fim, na utilização de programas para auxiliar projetistas e construtores no projeto e fabricação das embarcações.

Uma dessas técnicas é a utilização de programas especializados na otimização de problemas de engenharia que permitem automatizar o processo de análise, direcionando a solução para a minimização ou maximização de uma ou mais funções objetivo, sempre respeitando as restrições impostas ao problema.

Para a aplicação da técnica de otimização é necessário desenvolver um fluxograma contendo as variáveis, os parâmetros, as restrições e os objetivos do problema a ser otimizado. Esse processo pode incluir conexões com outros programas, como um modelador CAD, um programa de análise numérica, planilhas eletrônicas, entre outros.

Uma grande vantagem da utilização de algoritmos de otimização é a automatização do processo, a qual permite testar diversas combinações de variáveis sem a necessidade de intervenção humana. Além disso, a conexão entre o programa de otimização e os programas de análise aumenta a agilidade desse processo, minimizando o tempo despendido (TANCREDI, 2008).

O presente trabalho se insere nesse contexto, propondo uma metodologia para a modelagem, o desenvolvimento e a otimização do projeto estrutural de um compartimento de um navio petroleiro.

O procedimento desenvolvido é baseado em um modelo paramétrico que realiza as análises numéricas empregando o método dos elementos finitos (MEF) e verifica os critérios normativos em uma planilha Excel. Busca-se, assim, desenvolver uma técnica que reduza o tempo necessário para definir os arranjos estruturais de embarcações e minimize o gasto computacional das modelagens e análises.

## 1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática do tempo gasto com iterações associadas ao dimensionamento estrutural de embarcações, propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de otimização capaz de determinar, dentro de um universo de variáveis, restrições e objetivos, o melhor dimensionamento estrutural para a seção mestra de uma embarcação.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

No decorrer da execução do objetivo geral, almeja-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo parametrizado e automatizado em um programa de elementos finitos para a modelagem estrutural de uma embarcação;
- Elaborar uma planilha auxiliar para a verificação dos critérios normativos exigidos pelas sociedades classificadoras;
- Desenvolver um fluxograma de otimização conectado à análise do modelo paramétrico em MEF e a planilha auxiliar;
- Executar um estudo de caso, realizando o projeto estrutural de um compartimento de um navio petroleiro;
- Analisar a viabilidade da metodologia proposta para o projeto estrutural de embarcações.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

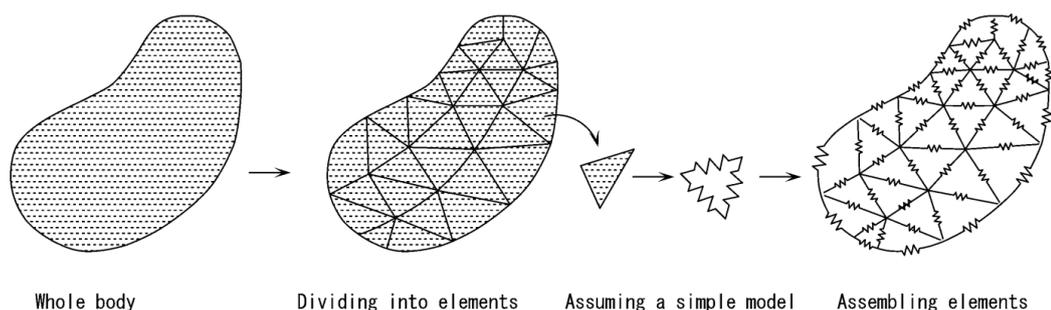
Neste capítulo, são apresentados os principais fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Ao longo do texto, são descritas as hipóteses utilizadas e os conceitos aplicados ao projeto de estruturas navais, cujas análises são realizadas utilizando-se o método dos elementos finitos. Por fim, são discutidos os fundamentos da técnica de otimização.

### 2.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Zienkiewicz e Taylor (2000), existem diferentes abordagens para se realizar uma análise estrutural, dividindo-se em modelos discretos e modelos contínuos. Os modelos numéricos que empregam um número limitado de elementos para representar a estrutura são denominados modelos discretos e fornecem uma representação aproximada do comportamento estrutural. Já os modelos contínuos utilizam um número infinito de elementos infinitesimais, correspondendo à resolução exata das equações diferenciais que regem o fenômeno estudado. Por fim, existem modelos híbridos, que combinam elementos discretos e equações diferenciais contínuas.

Entre os modelos discretos, destaca-se o método de elementos finitos (Figura 2). Esse método é utilizado para facilitar a análise de estruturas complexas, fracionando-as em elementos definidos, cujos comportamentos são conhecidos. Assim, a partir da análise individual de cada elemento, é possível reconstruir o comportamento da estrutura original (OKUMOTO et al., 2009).

Figura 2 - Conceito básico do Método de Elementos Finitos (MEF)



Fonte: Okumoto (2009, p. 126).

O objetivo da modelagem de estruturas navais é projetar e analisar a resistência estrutural de embarcações, garantindo sua segurança e eficiência. Entre os aspectos mais importantes que podem ser analisados por meio da modelagem estão a resistência e a eficiência estrutural, o comportamento em fadiga e a estabilidade da estrutura (HUGHES; PAIK, 2010).

O estudo de estruturas navais por meio do método dos elementos finitos envolve várias etapas e considerações para garantir uma representação precisa e confiável do comportamento estrutural. De forma resumida, pode-se identificar cinco etapas de maior importância:

- Modelagem geométrica;
- Discretização da geometria (geração da malha);
- Definição das propriedades dos materiais;
- Aplicação das condições de contorno e dos carregamentos;
- Análise estrutural.

### **2.1.1. Geometria e malha**

A primeira etapa de uma análise MEF é a modelagem da geometria a ser estudada, a qual envolve a criação de um modelo representativo da estrutura em análise. A discussão sobre níveis topológicos de modelagem MEF foge ao escopo deste trabalho e pode ser vista, por exemplo, em Reddy (2005).

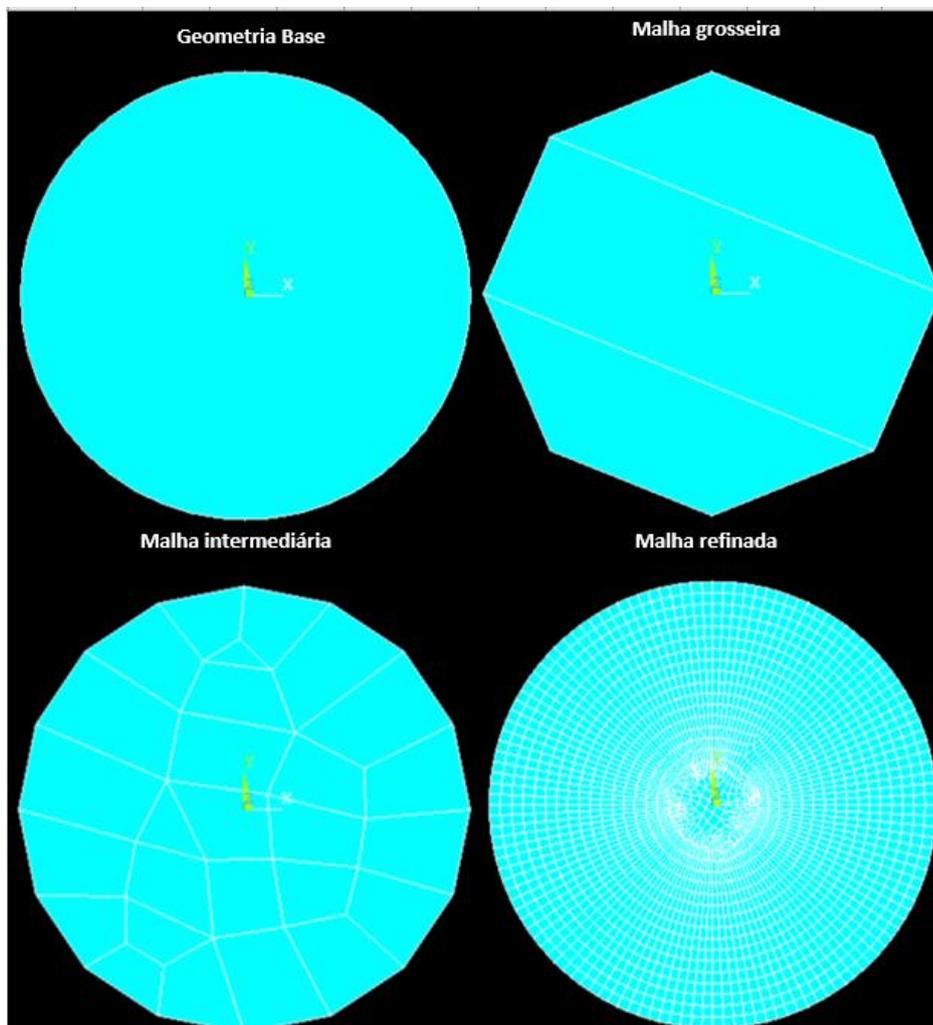
Em linhas gerais, modelos tridimensionais (sólidos) conseguem capturar mais fenômenos e, portanto, são mais realistas do que modelos bidimensionais (cascas) ou unidimensionais (vigas). No entanto, o custo computacional aumenta exponencialmente com a mudança do nível topológico do modelo (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000).

Uma vez definido o nível topológico a ser utilizado e modelada a geometria, a próxima etapa consiste na geração de uma malha computacional que discretize a geometria em pequenos elementos, permitindo a análise numérica.

Nesse aspecto, Barbeiro (2013) destaca que a qualidade da malha é crucial para a obtenção de resultados precisos, pois detalhes geométricos podem ser facilmente perdidos quando malhas grosseiras são utilizadas (Figura 3). No entanto,

é importante destacar que o custo computacional cresce exponencialmente com o grau de refino da malha utilizada.

Figura 3 - Exemplo de discretização de malha.

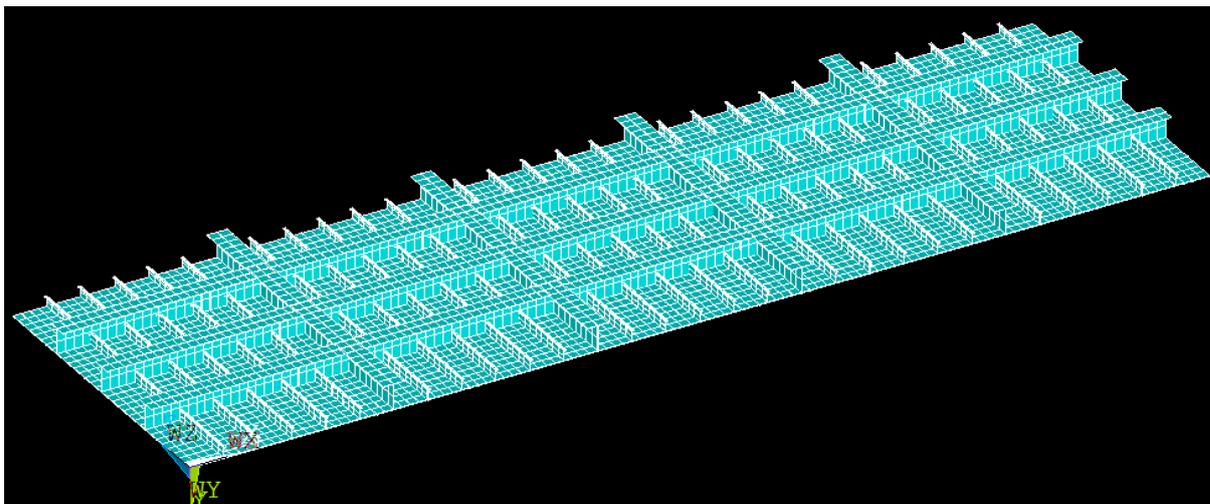


Fonte: Autor (2024)

Conforme pode ser visto na Figura 3, para garantir resultados confiáveis, a estrutura discretizada (malha) deve ser a mais fiel possível à estrutura real. Uma geometria precisa, combinada com uma malha detalhada, permite que a solução numérica represente mais fielmente o comportamento físico real da estrutura (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Um exemplo da modelagem de um painel estrutural naval utilizando elementos bidimensionais e discretizada com elementos retangulares pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de geometria e malha



Fonte: Autor (2024)

Hughes (2000) também reforça a importância da discretização em uma análise MEF. Pois, segundo o autor, tal método baseia-se em subdividir formas complexas em formas mais simples, que podem ser descritas e analisadas por equações conhecidas. Assim, uma malha mais refinada leva a resultados mais precisos, enquanto uma malha grosseira pode resultar em aproximações imprecisas, deixando de capturar fenômenos importantes existentes na estrutura real.

Por fim, Bathe (1995) propõe que a malha deve ser otimizada para garantir resultados precisos sem causar um gasto computacional desnecessário. Ou seja, a malha deve ser ajustada para cada região da estrutura, devendo apresentar um maior grau de detalhamento nas áreas complexas e uma maior suavização nas regiões lineares ou de menor relevância, buscando um compromisso entre a acurácia e a eficiência da análise.

### 2.1.2. Propriedades dos materiais

Nessa etapa, as propriedades dos materiais utilizados na estrutura estudada, tais como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica, devem ser definidas com precisão para garantir uma análise rigorosa das tensões e deformações resultantes das condições de contorno e dos carregamentos aplicados (FAGAN, 1996).

Embora as características dos materiais possam variar em função de fornecedores, lotes e condições climáticas, é crucial que os dados utilizados na análise

sejam o mais próximo possível dos valores reais. Isso assegura que o comportamento mecânico seja corretamente analisado e que os resultados obtidos sejam consistentes (FISH; BELYTCHKO, 2007).

### **2.1.3. Condições de contorno e carregamentos**

As condições de contorno, incluindo eventuais restrições de movimento e rotação, assim como os carregamentos aplicados — sejam cargas distribuídas, concentradas ou momentos — devem ser corretamente definidas. Essas informações são cruciais para obter resultados realistas e representativos do comportamento da estrutura analisada (HUGHES; PAIK, 2010).

Reddy (2005) ressalta que, para que as condições de contorno possam ser corretamente aplicadas e sejam representativas dos fenômenos reais a serem simulados, é necessário que a malha seja bem estruturada e refinada nos pontos de interesse, bem como a geometria modelada deve ser representativa da estrutura real a ser analisada.

Por fim, é importante destacar que as propriedades dos materiais afetam as cargas aplicadas e as condições de contorno estabelecidas. Logo, a definição de propriedades incorretas, ou irreais, pode resultar em comportamentos inesperados, afastando a simulação do comportamento real da estrutura (ODEN; REDDY, 2012).

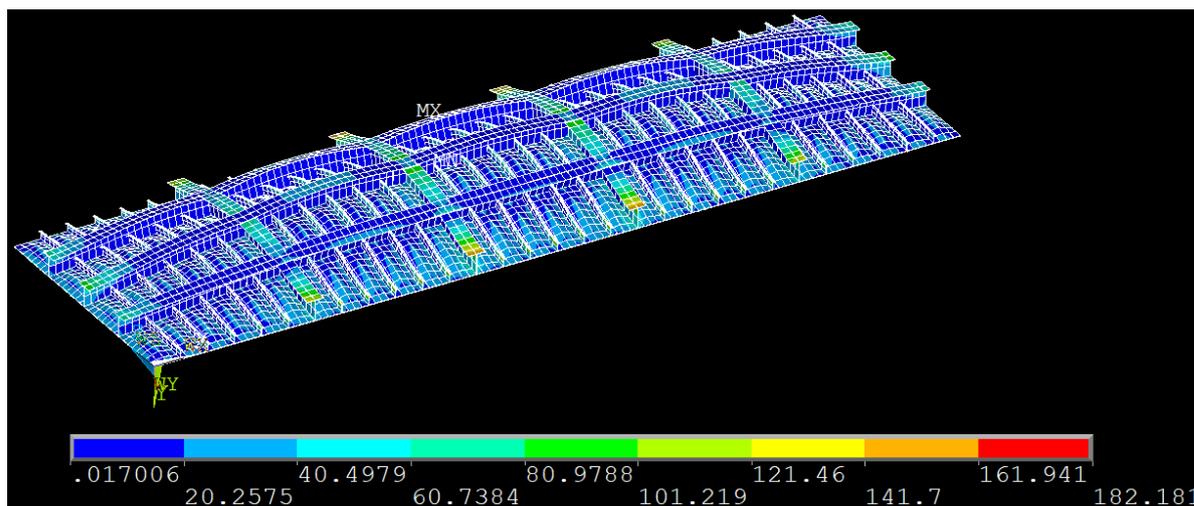
### **2.1.4. Análise estrutural**

Uma vez definida a geometria, a malha, as propriedades dos materiais, as condições de contorno e os carregamentos; a análise estrutural pode ser realizada com a aplicação do Método dos Elementos Finitos. Nessa etapa são calculadas as tensões, as deformações e os deslocamentos; permitindo que os critérios de falha adotados pelo projeto possam ser verificados (MOAVENI, 1999).

O processo de análise começa com a identificação dos graus de liberdade em cada nó existente na malha, seguido pela aplicação dos esforços atuantes em cada região. Em seguida, são formuladas a matriz de equilíbrio e a matriz constitutiva, a qual é definida com base nas leis de comportamento dos materiais existentes na estrutura modelada (ODEN; REDDY, 2012).

Essas matrizes são resolvidas por métodos numéricos de resolução de sistemas lineares, permitindo que os resultados referentes as tensões, deformações e deslocamentos possam ser conhecidos. Por exemplo, na Figura 5 é mostrada a plotagem das tensões de von Mises em um típico painel estrutural naval, cuja deformação indica uma pressão externa maior que a interna.

Figura 5 - Exemplo de análise de tensões equivalentes de Von Mises (MPa)



Fonte: Autor (2024).

Conforme já mencionado, o método dos elementos finitos, como qualquer método numérico, é um modelo que possui hipóteses e faixa de validades, além de ser fortemente influenciado pela modelagem e discretização empregadas.

Assim, ao final do processo é necessário realizar uma verificação e validação dos resultados e, quando necessário, ajustes no modelo são feitos para melhorar a precisão e a convergência da solução (ODEN; REDDY, 2012).

A verificação e a validação são etapas essenciais nas simulações usando o Método dos Elementos Finitos (MEF). A verificação avalia o modelo computacional para garantir sua implementação correta e funcionamento conforme o planejado, incluindo a checagem dos algoritmos e a precisão das soluções numéricas.

A validação, por sua vez, compara os resultados da simulação com dados experimentais ou observações reais, confirmando que o modelo representa com precisão o comportamento físico do sistema estudado. Esse processo é fundamental para assegurar que o modelo é realista e confiável.

## 2.2. OTIMIZAÇÃO

Entre as coisas que distinguem a engenharia de outras profissões, destaca-se o processo racional e eficiente de tomada de decisão. Esse processo não apenas considera o conhecimento teórico do engenheiro, mas também a sua experiência prática, visando determinar soluções que atendam aos requisitos do cliente, às normas e regulamentações vigentes, e que ofereçam diferenciais competitivos de mercado (ERTAS; JONES, 1996).

À medida que os requisitos do cliente se tornam mais complexos e o número de variáveis no projeto aumenta, o processo de tomada de decisão pode exigir um aumento significativo no tempo de análise. Silva (2007) ilustra essa questão com um exemplo: um projeto com três variáveis, cada uma com dez valores possíveis, gera 1.000 combinações. Se cada combinação leva 0,1 segundos para ser analisada, o tempo necessário para analisar todas as possíveis combinações para o projeto seria de 100 segundos. No entanto, se o número de variáveis aumenta para dez e o tempo de análise para cada combinação é de dez segundos, seriam necessários cerca de 3.200 anos para analisar todas as possibilidades existentes para o projeto.

Portanto, a abordagem manual de análise só é viável para casos simples, com poucas variáveis e tempos de análise reduzidos. Já para projetos mais complexos, torna-se essencial a utilização de algoritmos de otimização, capazes de reduzir drasticamente o número de soluções analisadas até que a melhor solução seja definida (TANCREDI, 2008).

Além disso, a crescente competitividade e a luta por fatias de mercado torna extremamente importante a busca por projetos melhores. Na engenharia naval, isso pode se traduzir em uma maior capacidade de carga, um maior conforto, um melhor comportamento no mar, uma maior eficiência energética, menores custos ou uma combinação dessas características. Nesse cenário, a otimização surge como uma abordagem viável e poderosa para melhorar o desempenho de projetos complexos.

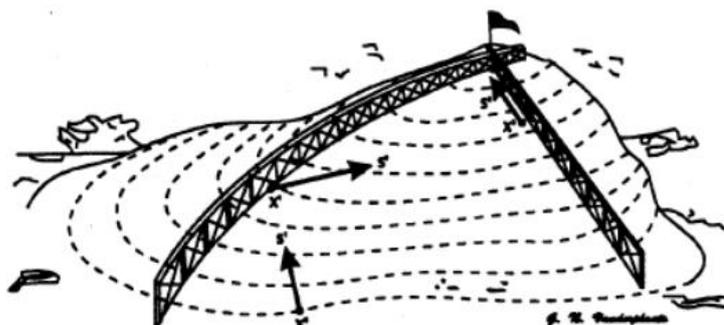
Tancredi (2008) define o processo de otimização como “a busca automática, sistemática e dirigida para obter a melhor solução dentro do universo de soluções existentes” (p. 23). Nesse contexto, a tecnologia auxilia significativamente o engenheiro, acelerando o processo de análise e orientando as mudanças a serem realizadas, embora não substitua a capacidade crítica do projetista.

A modelagem de um problema de otimização pode ser resumida na definição de três elementos principais: a função ou funções objetivo, as variáveis de projeto e as restrições. A função objetivo é uma função escalar das variáveis de projeto que deve ser maximizada ou minimizada. Já as variáveis de projeto são os parâmetros que caracterizam o problema e cujos valores devem ser definidos pelo projetista. Por fim, as funções de restrição delimitam o universo de possibilidades e visam representar as limitações do projeto, sejam físicas, financeiras, normativas ou de qualquer outra natureza (TANCREDI, 2008).

Se o problema possui apenas uma função objetivo, é denominado mono-objetivo e, quando corretamente modelado, resulta em apenas uma solução ótima. Em contraste, problemas com múltiplas funções objetivo são chamados de problemas multiobjetivo. Nesses casos, a modelagem requer uma abordagem distinta, pois, se existirem objetivos conflitantes, o processo de otimização resultará em um conjunto de soluções igualmente ótimas, devendo o engenheiro escolher a solução a ser implementada a partir da priorização de algum aspecto não incluído na modelagem.

Uma analogia útil para entender a otimização é a escalada de uma montanha, onde busca-se alcançar o ponto mais alto dentro de uma área delimitada por cercas, as quais representam as restrições do problema, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Ilustração sobre a otimização de casos com restrição



Fonte: Silva (2007).

### 2.2.1. Algoritmos de otimização

Os algoritmos de otimização são essenciais para a estrutura da otimização, pois são os métodos pelos quais se busca a melhor solução dentro de um universo de possibilidades. Esses métodos são amplamente utilizados, não se restringindo

apenas à engenharia, sendo aplicados em áreas como logística, medicina e economia (GOLDBERG, 1989).

Existem diversos tipos de algoritmos de otimização, cada um com suas características e aplicações. Em geral, diferentes algoritmos podem ser utilizados na otimização de um mesmo problema, variando principalmente na velocidade com que encontram as soluções e na abordagem de busca utilizada. A seguir são exemplificados alguns tipos de algoritmos que também estão reunidos na Tabela 1.

Entre os tipos de algoritmos de otimização destacam-se os algoritmos de otimização linear, desenvolvidos para problemas em que tanto a função objetivo quanto as restrições são lineares. Um exemplo dessa classe de algoritmos é o método simplex (CHVÁTAL, 1983).

Em contraste, para problemas onde a função objetivo ou as restrições não são lineares, utilizam-se algoritmos de programação não linear. Um exemplo dessa classe é o método de gradiente (NOCEDAL; WRIGHT, 2006).

Já os algoritmos estocásticos utilizam processos estocásticos para encontrar soluções ótimas, sendo frequentemente aplicados em problemas com incertezas. Exemplos dessa classe incluem o algoritmo de Monte Carlo e o algoritmo de estimativa de distribuição (RUBISTEIN; KROESE, 2004).

Para problemas complexos, nos quais os métodos exatos são impraticáveis, há a classe dos algoritmos heurísticos e metaheurísticos, que fornecem boas soluções aproximadas e são também utilizados em problemas relacionados ao aprendizado de máquina. Os algoritmos genéticos (GOLDBERG, 1989) são os principais destaques nessa classe de algoritmos.

Por fim, para problemas que envolvem a otimização simultânea de múltiplos objetivos, existe a classe de algoritmos multiobjetivo, na qual o algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) é um clássico exemplo (DEB, 2001).

Tabela 1 - Algoritmos de otimização

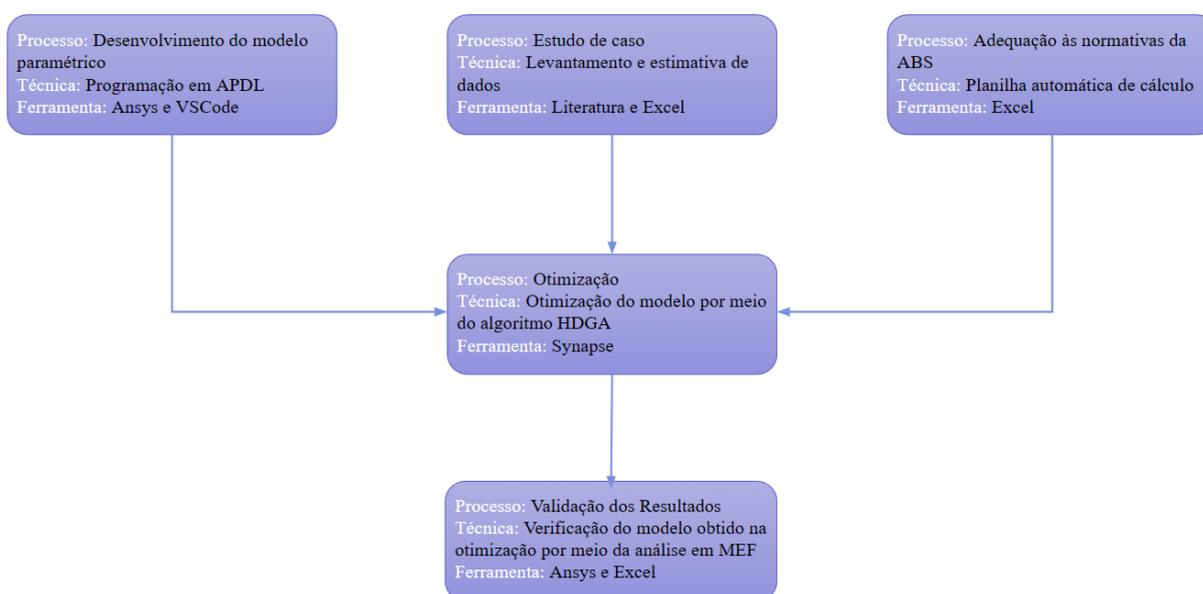
Classe	Algoritmo	Referência
Linear	Simplex	Chvátal, 1983
Não-Linear	Gradiente	Nocedal e Wright, 2006
Estocásticos	Monte Carlo	Rubistein e Kroese, 2004
Heurísticos	Genéticos	Goldberg, 1989
Multiobjetivo	NSGA-II	Deb, 2001

Fonte: Autor (2024)

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, a qual é sintetizada no fluxograma da Figura 7. Ao longo do texto são detalhados os processos de desenvolvimento de cada etapa do projeto, bem como as técnicas e ferramentas empregadas.

Figura 7 - Metodologia do trabalho



Fonte: Autor (2024).

Conforme já estabelecido, este trabalho tem o objetivo de verificar a viabilidade da utilização de um modelo paramétrico e técnicas de otimização para reduzir o tempo despendido no projeto estrutural de uma embarcação.

A primeira etapa consiste no desenvolvimento do modelo paramétrico utilizado para a aplicação do método dos elementos finitos, o qual será escrito empregando a linguagem APDL do programa Ansys, cujos detalhes são descritos na seção 3.1 deste trabalho.

A adequação às normas foi realizada com o auxílio de uma planilha Excel, a qual automatiza o cálculo dos critérios exigidos pela norma escolhida, tais como as espessuras requerida para cada chapa e o módulo de seção requerido para cada reforçador da estrutura.

Por fim, para definir os dados da embarcação utilizada no estudo de caso apresentado, foi realizada uma busca por embarcações semelhantes, uma revisão bibliográfica sobre os modelos empíricos existentes e uma análise das séries sistemáticas mais adequadas para o projeto. Nessa etapa também foi utilizada uma planilha Excel para agrupar e sistematizar as informações necessárias.

### 3.1. ANSYS

Para desenvolver o modelo paramétrico utilizado na análise realizada com o método de elementos finitos, é necessário usar um programa capaz de realizar a modelagem 3D da estrutura do compartimento de uma embarcação e que seja capaz de suportar uma malha suficientemente refinada para que o campo de tensões calculado seja representativo do comportamento real da estrutura.

Reconhecidamente robusto e confiável, o programa Ansys foi escolhido para este trabalho graças a sua capacidade de usar linhas de código para gerar uma modelagem. Esse importante recurso permite a parametrização e automatização da análise, bem como viabiliza a integração dessa ferramenta com o algoritmo de otimização utilizado neste estudo.

Destaca-se que a licença usada neste trabalho foi disponibilizada pelo Laboratório de Simulação Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Tecnológico de Joinville.

#### 3.1.1. Ansys Parametric Design Language

A *Ansys Parametric Design Language* (APDL) é a linguagem de automatização do próprio Ansys, que permite a modelagem e a análise estrutural utilizando linhas de comando. Ela é muito semelhante à linguagem de programação Fortran, tanto na sintaxe quanto na estrutura dos dados armazenados.

O APDL é uma linguagem de automatização sequencial, na qual o usuário fornece uma sequência de comandos ou pede ao programa para ler um arquivo que contenha o script a ser executado. O programa então entende e executa cada comando, eliminando a necessidade de interação direta do projetista com a interface gráfica do programa.

Uma das principais vantagens do APDL é sua capacidade de gerenciar todo o fluxo de trabalho de uma análise, permitindo a automatização da modelagem da estrutura, a definição das propriedades dos materiais, a discretização da geometria, a aplicação das condições de contorno e dos carregamentos; chegando até mesmo a permitir o pós-processamento da análise, incluindo a visualização dos resultados, a verificação de critérios de falha e a exportação dos dados.

Outra vantagem significativa é a facilidade de automatizar e parametrizar análises complexas, permitindo uma integração eficiente com programas de otimização e/ou outros sistemas integrados de análise.

### 3.2. PROJETO DE OTIMIZAÇÃO

Dentro da problemática apresentada, este trabalho propõe um processo de otimização utilizando um algoritmo genético denominado *High Dispersion Genetic Algorithm* (HDGA), desenvolvido no Laboratório de Simulação Naval (LaSiN) da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Tecnológico de Joinville.

O objetivo desse processo é encontrar os valores para as variáveis do projeto estrutural que sejam capazes de minimizar o peso médio por metro de navio, garantindo a segurança estrutural e a conformidade com as normas da sociedade classificadora escolhida.

A ferramenta utilizada para aplicação do processo de otimização foi o programa Synapse, desenvolvido no ambiente Delphi, especificamente para a otimização de problemas complexos de engenharia. Essa ferramenta permite que o modelo de otimização seja construído esquematicamente utilizando blocos que correspondem a cada elemento do modelo de otimização, ou seja, que correspondem às variáveis de entrada, aos parâmetros dependentes, às ferramentas de análise, às restrições e aos objetivos a serem minimizados.

Entre as características fundamentais dessa ferramenta, destacam-se a possibilidade de integrar planilhas auxiliares para cálculos complexos, bem como a conexão com o programa Ansys APDL, o qual realiza, automaticamente, a modelagem e a análise MEF de cada solução proposta pelo algoritmo de otimização.

## 4. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, são apresentadas as etapas referentes ao desenvolvimento do modelo paramétrico em APDL, o qual é utilizado tanto na otimização quanto na verificação dos resultados. Além disso, é descrita a elaboração da planilha de adequação às normativas da sociedade classificadora escolhida.

A seguir é detalhado o processo de otimização, incluindo a modelagem do problema, as especificidades observadas e a integração realizada com a planilha auxiliar e com o modelo paramétrico para análises MEF.

Por fim é descrito o estudo de caso realizado, incluindo o processo de verificação dos resultados.

### 4.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO

A criação do modelo paramétrico foi realizada por meio de scripts escritos em APDL utilizando no editor de código *Visual Studio Code* (VSCode). Para evitar variações nos resultados devido a diferenças de modelagem, o script considera carregamentos e condições de contorno iguais para todos os casos e gera automaticamente a análise de tensões do compartimento informando enfim a maior tensão atingida. A estrutura geral do script pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura geral do script

```
1 /Pmacro
2 /PREP7
3 !Dados entrada
4   !Dados da otimização
5   >   !Variáveis ...
12  >   !Parâmetros...
37  >   !Saídas Excel ...
91  >   !Outros Dados ...
95  >   !Dados de material...
107 !Modelagem
108 > !Modelagem Casca ...
627 > !Modelagem Viga ...
2481 !Malha
2482   nsec=1
2483   /EFACET,1
2484   /ESHAPE,1
2485 > !Casca ...
2574 > !Viga ...
3773 !Condições de Contorno e carregamento
3774 > !Locais de aplicação ...
3782 > !Carregamentos ...
3796 > !Coupling ...
3819 > !Solução ...
3822 > !Saídas ...
```

Fonte: Autor (2024).

A primeira parte do código se refere aos dados de entrada, inseridos automaticamente pelo Synapse a cada rodada de otimização. Essas informações, apresentadas nos tópicos seguintes, são utilizadas para a modelagem da estrutura, bem como para definir seu carregamento e condições de contorno.

A etapa de modelagem, por sua vez, envolve a criação do modelo 3D usando elementos de viga e casca, escolhidos para representar bem a estrutura real sem exigir alto custo computacional.

Por ser uma etapa extensa, é subdividida em partes menores que podem ou não ser aplicadas em cada caso, dependendo do tipo de navio a ser modelado, das subdivisões internas e dos arranjos desejados (Figura 9).

Figura 9 - Subdivisões da etapa de modelagem

```

107 |Modelagem
108 |Modelagem Casca
109 > |Elemento...
111 > |Keypoints...
146 > |Criando Linhas ...
166 > |Bojo...
182 > |Criando quilha...
186 > |Extruindo...
245 > |Conveses intermediários...
268 > |Anteparas Longitudinais...
362 > |Tanque de Bojo...
503 > |Tanque de Asa...
555 > |Escotilha de Carga...
587 > |Seções...
627 |Modelagem Viga
628 > |Elemento...
632 > |Correção caso não tenha Anteparas...
636 > |Reforçadores Conveses intermediários...
887 > |Reforçadores Convés Principal ...
1141 > |Reforçadores Costado...
1234 > |Reforçadores Duplo Costado...
1328 > |Reforçadores Tipo 2 Duplo Costado...
1348 > |Reforçadores Teto Duplo Fundo...
1708 > |Reforçadores Fundo...
2074 > |Reforçadores Tipo 2 Duplo Fundo...
2127 > |Reforçadores Tanque de Bojo...
2251 > |Reforçadores Tanque de Asa...
2328 > |Reforçadores Antepara...
2352 > |Cavernas ...

```

Fonte: Autor (2024).

A próxima etapa consiste na aplicação da malha à estrutura modelada. Para facilitar a elaboração do código, as etapas de aplicação da malha são semelhantes às de modelagem, sendo subdivididas em elementos de casca e viga, agrupados por regiões da estrutura e tipos de arranjos estruturais, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Subdivisões etapa de aplicação da malha

```

2481 !Malha
2482     nsec=1
2483     /EFACET,1
2484     /ESHAPE,1
2485     !Casca
2486 >     !Convés Principal...
2496 >     !Costados ...
2511 >     !Fundo ...
2526 >     !Conveses Médios ...
2540 >     !Anteparas ...
2562 >     !Teto do Duplo Fundo...
2574     !Viga
2575     nref=1
2576 >     !Reforçadores Conveses Médios ...
2750 >     !Reforçadores Convés Principal...
2924 >     !Reforçadores Costado ...
2964 >     !Reforçadores Duplo Costado...
3028 >     !Reforçadores Tipo 2 Duplo Costado...
3052 >     !Reforçadores Teto Duplo Fundo...
3261 >     !Reforçadores Fundo...
3470 >     !Reforçadores Tipo2 Duplo Fundo...
3510 >     !Reforçadores Tanque de Bojo...
3600 >     !Reforçadores Tanque de Asa...
3655 >     !Reforçadores Antepara...
3673 >     !Cavernas ...

```

Fonte: Autor (2024).

O estágio seguinte do script envolve a aplicação das condições de contorno e carregamentos conforme definidos na entrada de dados da modelagem. Uma vez aplicados, esses dados são analisados na estrutura durante a etapa de solução do modelo numérico, que gera os resultados das tensões atuantes na estrutura, das deformações atingidas e do peso da estrutura (Figura 11).

Figura 11 - Aplicação das condições de contorno e carregamento

```

3773 !Condições de Contorno e carregamento
3774 > !Locais de aplicação ...
3782     !Carregamentos
3783 >     !Pressão hidrostática...
3791 >     !Carga interna...
3796 >     !Coupling ...
3819     !Solução
3820     /SOLU
3821     SOLVE

```

Fonte: Autor (2024)

Por fim, a última etapa envolve a exportação dos dados obtidos em formato de arquivos de texto. Isso permite que o software de otimização leia esses dados e busque o melhor resultado dentro das limitações impostas na otimização, conforme explicado no tópico 4.3.

## 4.2. EMBARCAÇÃO ESTUDADA

O processo de estudo de caso começa com a definição do tipo de embarcação a ser modelada e otimizada. Neste trabalho foi arbitrado que a embarcação estudada será um navio petroleiro, o qual é utilizado para armazenagem e transporte de petróleo e seus derivados (Figura 12).

Figura 12 - Navio petroleiro modelo



Fonte: The Royal Institution of Naval Architects (2013)

Para garantir o caráter realístico deste estudo, foram analisadas diversas embarcações desse tipo, além de consultas à literatura, para identificar as semelhanças existentes, evitando assim a escolha de um caso com características excessivamente particulares. Por fim, foi escolhido o petroleiro cujas características básicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da embarcação modelo

Comprimento (LPP)	264,00 m
Boca (B)	48,00 m
Pontal (D)	23,50 m
Calado Design (T)	16,00 m
Altura Duplo Fundo	2,70 m
Espaçamento Duplo Costado	2,55 m
Deslocamento	185.000,00 t
DWT	145.800,00 t
Velocidade de Serviço	15,70 nós

Fonte: Adaptado de Significant Ships (2012).

Com base nos dados principais da embarcação, é possível definir outros parâmetros necessários para o projeto estrutural, em especial aqueles utilizados na verificação dos critérios normativos exigidos pela sociedade classificadora escolhida. Esses cálculos foram realizados em uma planilha auxiliar denominada "Análise da Viga Navio", cujos detalhes são discutidos a seguir.

#### 4.2.1. Planilha auxiliar de análise da viga navio

Com os dados disponíveis sobre a embarcação (Tabela 2), é possível realizar uma análise inicial do projeto, determinando os parâmetros básicos de arquitetura naval, tais como: o coeficiente de bloco ( $C_b$ ), o coeficiente de deadweight ( $C_d$ ) e as relações dimensionais do navio, incluindo a relação comprimento/boca ( $L/B$ ) e a relação boca/calado ( $B/T$ ). Esses dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes e relações adimensionais calculadas

Dados Calculados	
Coeficiente de Bloco ( $C_b$ )	0,83
Coeficiente de Deadweight ( $C_d$ )	0,79
Relação Comprimento/Boca ( $L/B$ )	5,50
Relação Boca/Calado ( $B/T$ )	3,00

Fonte: Autor (2024).

A seguir, utilizando modelos empíricos disponíveis na literatura, são calculadas as parcelas que compõem o peso leve (*Lightweight*) da embarcação, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parcelas calculadas do peso leve

Pesos Leves da Embarcação	
Casco	34.712,16 t
Superestrutura	13.885,16 t
Casco	20.827,73 t
Maquinário	837,49 t
Outfit	2.851,20 t
Margem	798,42 t
Peso leve total	39.200,00 t

Fonte: Autor (2024).

A partir da análise da geometria da embarcação de referência, foram extraídas informações sobre as posições iniciais e finais da superestrutura e dos tanques de carga, bem como a quantidade desses componentes (Tabela 5).

Tabela 5 - Dimensões dos Tanques

Dimensões de cada tanque de carga	
Altura	20,45 m
Comprimento	33,60 m
Largura	21,40 m
Volume	14.704,37 m <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2024).

A análise da viga navio é crucial para garantir a segurança da embarcação, permitindo definir arranjos de carga que assegurem a integridade estrutural e a estabilidade da embarcação navegando tanto em mar calmo quanto em condições adversas de mar.

O processo de análise começa com a determinação da distribuição dos pesos ao longo do navio, além de considerações sobre as diferentes condições de carregamentos. Para o estudo de caso proposto, foi definida a distribuição de pesos apresentada na Figura 13.

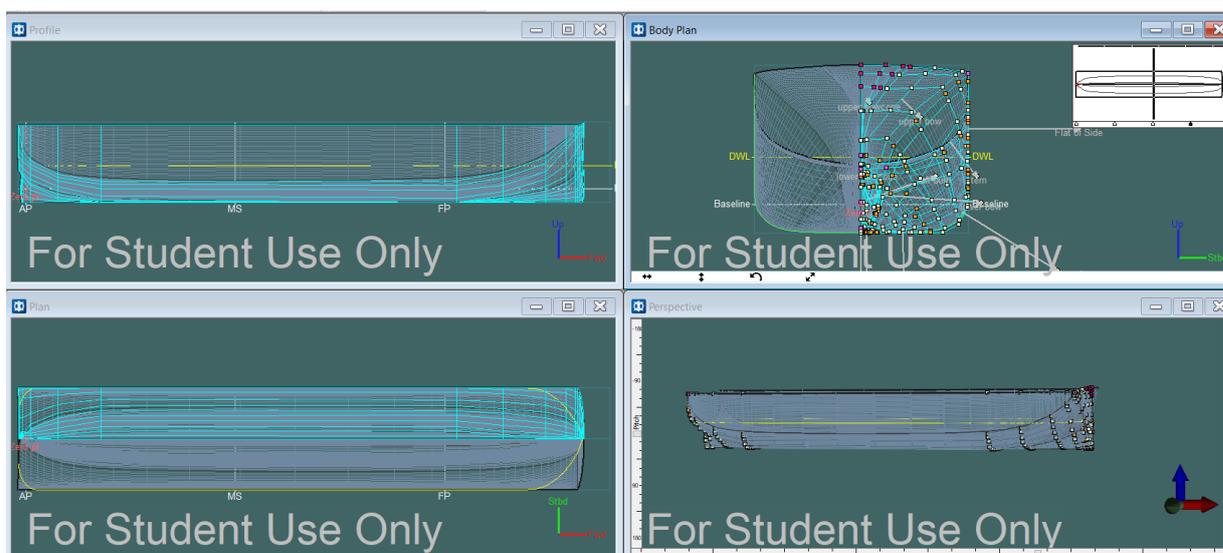
Figura 13 - Disposição das cargas na embarcação

Cargas	Total [T]	Posição Inicial [m]	Posição Final [m]	Comprimento total [m]
Casco	20.827,73	-	264,00	264,00
SE	13.885,16	16,00	44,40	28,40
Máquinas	837,49	16,00	44,40	28,40
Outfit	2.851,20	-	264,00	264,00
Margem	798,42	-	264,00	264,00
Tanques 1,2	24.298,17	44,40	78,00	33,60
Tanques 3,4	24.298,17	78,00	111,60	33,60
Tanques 5,6	24.298,17	111,60	145,20	33,60
Tanques 7,8	24.298,17	145,20	178,80	33,60
Tanques 9,10	24.298,17	178,80	212,40	33,60
Tanques 11,12	24.298,17	212,40	246,00	33,60
Total LWT	39.200,00			
Total DWT	145.789,00			
Total W	184.989,00			

Fonte: Autor (2024).

Após a definição da distribuição de pesos, é essencial realizar a alocação correta dessas cargas para possibilitar uma análise de equilíbrio do navio. Para isso, foi desenvolvida uma modelagem do casco da embarcação utilizando o programa *Maxsurf Modeller*, o qual permite a obtenção das curvas de área seccional (*Section Area Curve - SAC*) da embarcação em diferentes condições de calado, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Modelagem do casco da embarcação estudada

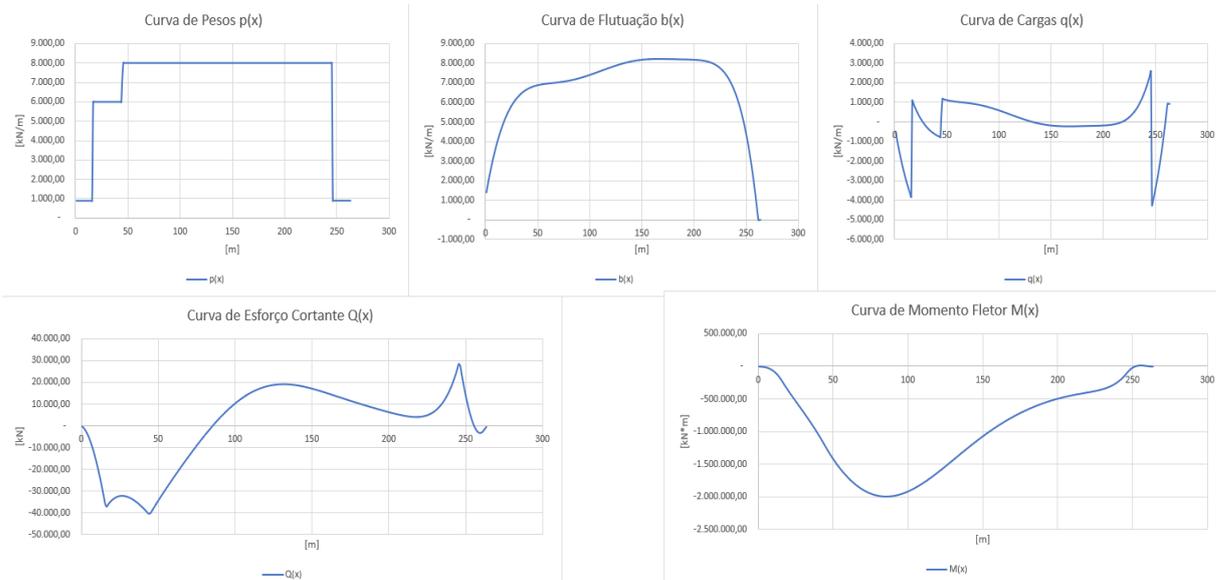


Fonte: Autor (2024).

Após a obtenção das SACs e a alocação das cargas é realizada a análise de equilíbrio do navio e determinadas as curvas de peso  $p(x)$ , flutuação  $b(x)$ , carga  $q(x)$ , esforço cortante  $Q(x)$  e momento fletor  $M(x)$  em cada situação exigida pela norma, ou seja, mar calmo (Figura 15), onda crítica de tosamento (Figura 16) e onda crítica de alquebramento (Figura 17).

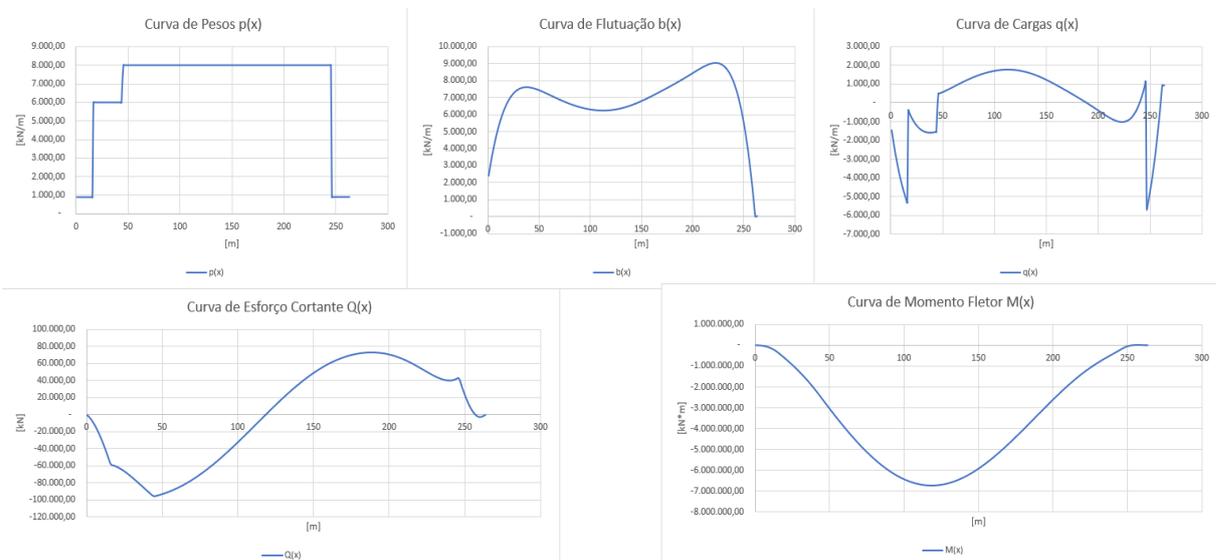
Nesse caso é importante destacar que a literatura estabelece que a onda crítica é aquela que causa os maiores níveis de tensão ao longo da viga navio, correspondendo a uma onda que possui comprimento igual ao comprimento molhado da embarcação (ABS, 2023).

Figura 15 - Curvas em mar calmo



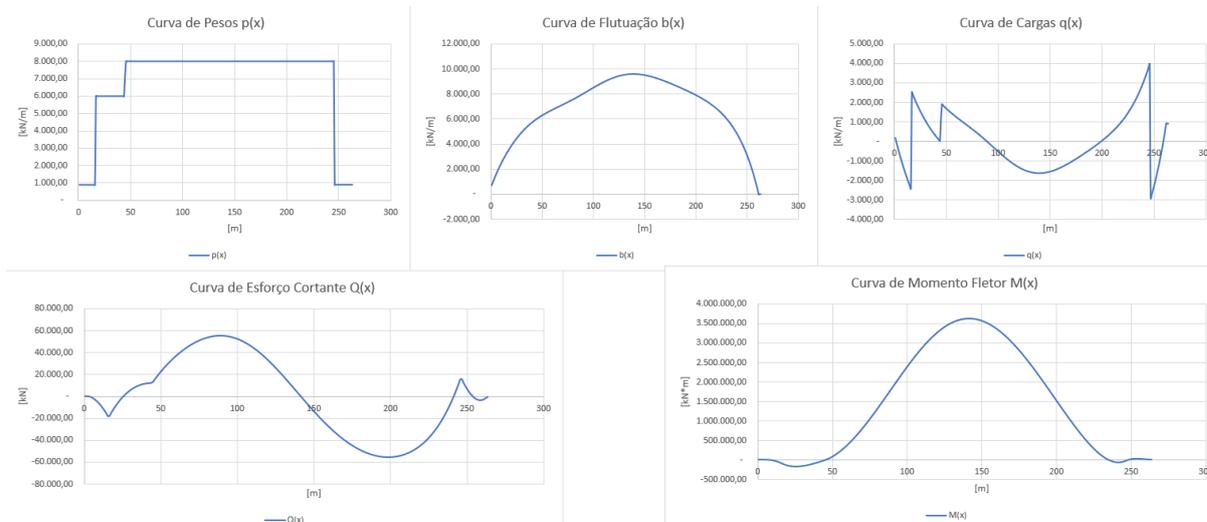
Fonte: Autor (2024).

Figura 16 - Curvas em onda crítica de tosamento



Fonte: Autor (2024).

Figura 17 - Curvas em onda crítica de alquebramento



Fonte: Autor (2024).

A partir dos resultados, foram registrados os valores de máximo momento fletor em cada condição de mar analisada, os quais são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Momento fletor em cada condição de mar analisada

Momento Fletor (M(x))	
Mar Calmo	-2.018.401,03 kN*m
Tosamento	-6.746.896,12 kN*m
Alquebramento	3.621.220,18 kN*m

Fonte: Autor (2024)

Por fim, os resultados mostraram que a maior solicitação estrutural, ou seja, a condição na qual foi observado o máximo valor absoluto de momento fletor, é a condição de tosamento. Considerando que essa condição será utilizada na análise MEF, foram identificados os valores de momento fletor e força cortante 5 metros antes da seção mestra e 5 metros após seção mestra, tal como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados referentes a condição crítica

Condição Crítica (Tosamento)	
Momento Fletor -5m	-6.724.597,05 kN*m
Momento Fletor +5m	-6.725.335,36 kN*m
Esforço Cortante -5m	-8.888,37 kN
Esforço Cortante +5m	8.657,60 kN

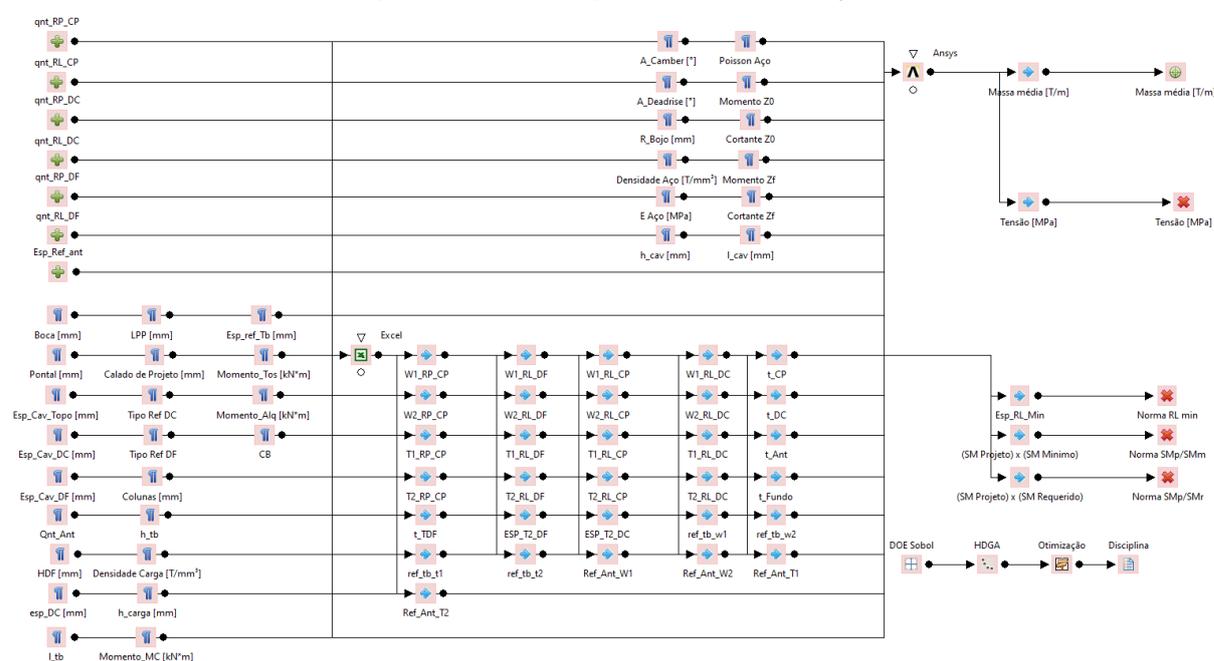
Fonte: Autor (2024)

### 4.3. OTIMIZAÇÃO

O processo de otimização é conduzido em etapas seguindo o fluxograma apresentado na Figura 18. A primeira etapa consiste na inserção dos parâmetros fixos e na definição das variáveis do projeto estrutural.

Os parâmetros a serem definidos podem ser classificados em três grupos: dados utilizados no cálculo dos critérios normativos, dados utilizados na análise MEF e dados utilizados em ambos os processos.

Figura 18 - Fluxograma de otimização



Fonte: Autor (2024).

A segunda etapa do processo de otimização envolve o uso de uma planilha auxiliar para calcular os requisitos normativos exigidos pela sociedade classificadora, os quais, neste caso, se baseiam na norma ABS (2023).

Entre os dados calculados pela planilha auxiliar e que são fundamentais para a modelagem da estrutura, destacam-se as dimensões das chapas e reforçadores requeridos para cada região do casco.

A seguir, na etapa de modelagem, são utilizados os dados necessários para a análise MEF, incluindo as dimensões do compartimento, as dimensões dos elementos estruturais, os esforços atuantes nas chapas internas (devido às cargas a

bordo), os esforços atuantes nas chapas externas (devido às pressões hidrostáticas exercidas pelo meio) e as propriedades dos materiais que compõem a embarcação.

Por fim, o valor das restrições e da função objetivo são calculados com base nos resultados da análise MEF e da planilha auxiliar.

O processo segue iterativamente, realizando diversas simulações, sempre ajustando o valor das variáveis de projeto em busca do melhor resultado para a função objetivo estabelecida, até que um dos critérios de parada seja alcançado.

#### **4.3.1. Elementos da otimização**

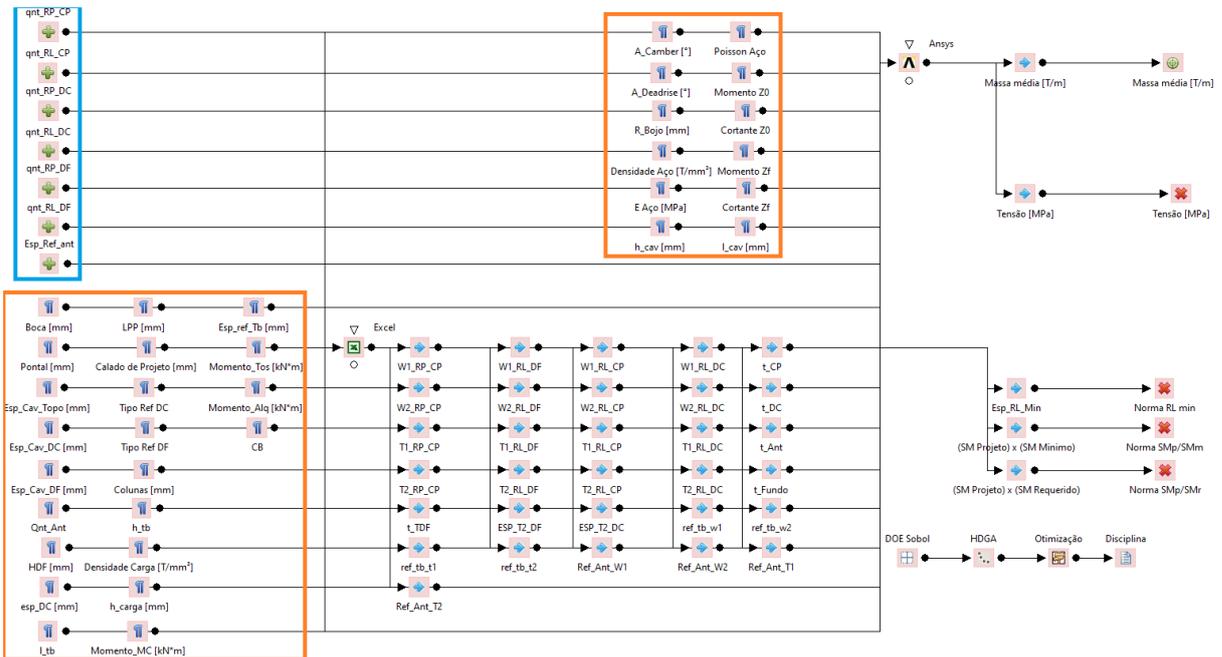
Conforme descrito anteriormente, um modelo de otimização possui elementos distintos, cada qual com uma função específica. Para este trabalho, foram definidos os seguintes elementos:

- 7 variáveis;
- 34 parâmetros;
- 1 solver para conexão com a planilha auxiliar;
- 34 saídas da planilha auxiliar;
- 1 solver para conexão com o programa de análise MEF;
- 2 saídas da análise MEF;
- 3 restrições normativas;
- 1 restrição baseada na análise MEF;
- 1 função objetivo.

As variáveis de projeto são características que têm seus valores alterados a cada iteração do processo de otimização. Neste trabalho, essas variáveis referem-se às quantidades de reforçadores leves e pesados em três regiões distintas da embarcação (convés, duplo costado e duplo fundo) e ao espaçamento entre os reforçadores verticais da antepara longitudinal (Figura 19).

Já os valores dos parâmetros permanecem constantes durante todo o processo de otimização. Os parâmetros utilizados incluem todos os dados necessários na planilha auxiliar e na análise MEF, os quais não foram definidos como variáveis de projeto (Figura 19).

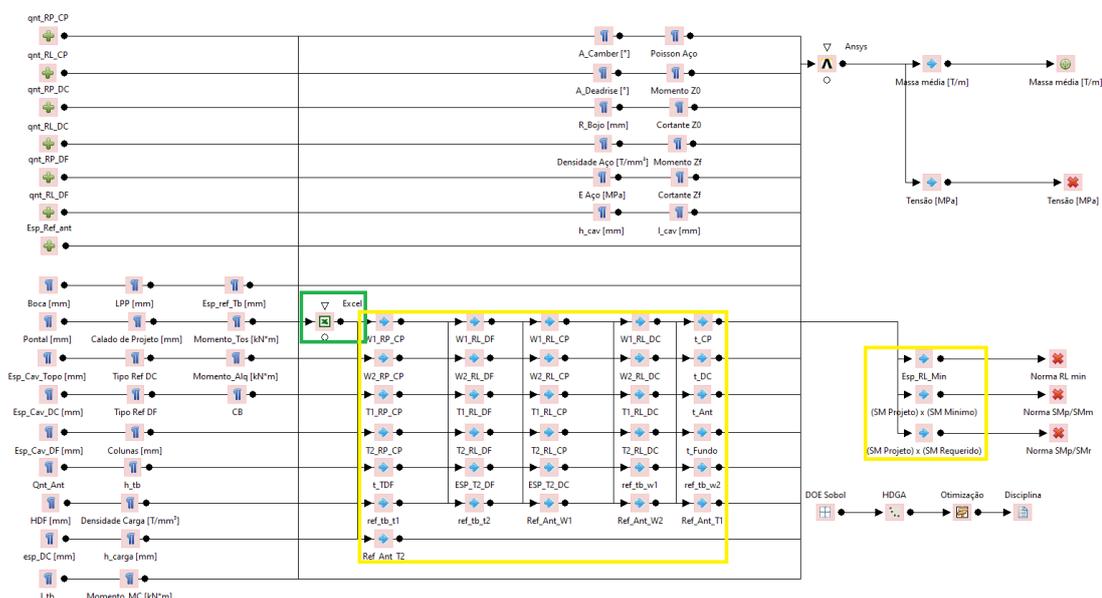
Figura 19 - Variáveis de projeto (em azul) e parâmetros (em laranja)



Fonte: Autor (2024).

Um solver Excel foi utilizado para inserir as variáveis e os parâmetros de cada iteração na planilha auxiliar, a qual foi detalhada no tópico 4.3.2. Finalizados os cálculos, o solver recupera da planilha os valores associados aos parâmetros de saída, os quais são utilizados como entrada para a análise MEF, ou então, como valores associados às restrições do problema (Figura 20).

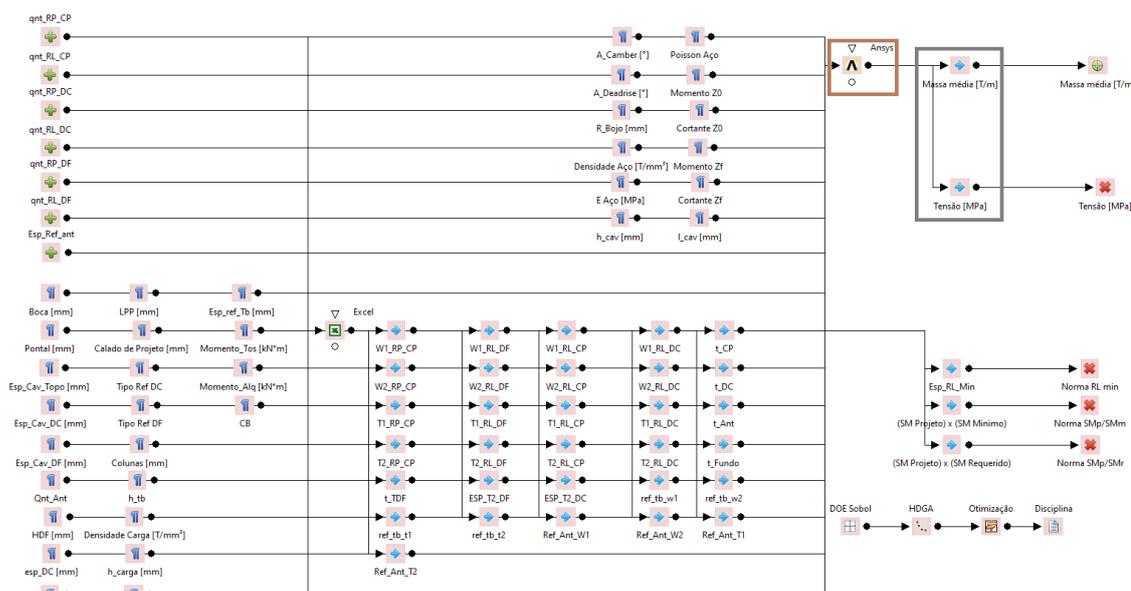
Figura 20 - Solver Excel (em verde) e saídas do solver (em amarelo)



Fonte: Autor (2024).

A seguir, um solver Ansys APDL foi utilizado para realizar as análises MEF associadas a cada iteração do processo de otimização. Esse solver é responsável por inserir no modelo paramétrico de análise MEF as informações provenientes da planilha auxiliar, juntamente com os valores dos parâmetros e das variáveis. Finalizada a análise, o solver recupera o valor da massa estrutural e da máxima tensão atuante na estrutura (Figura 21).

Figura 21 - Solver Ansys (em marrom) e suas saídas (em cinza)



Fonte: Autor (2024).

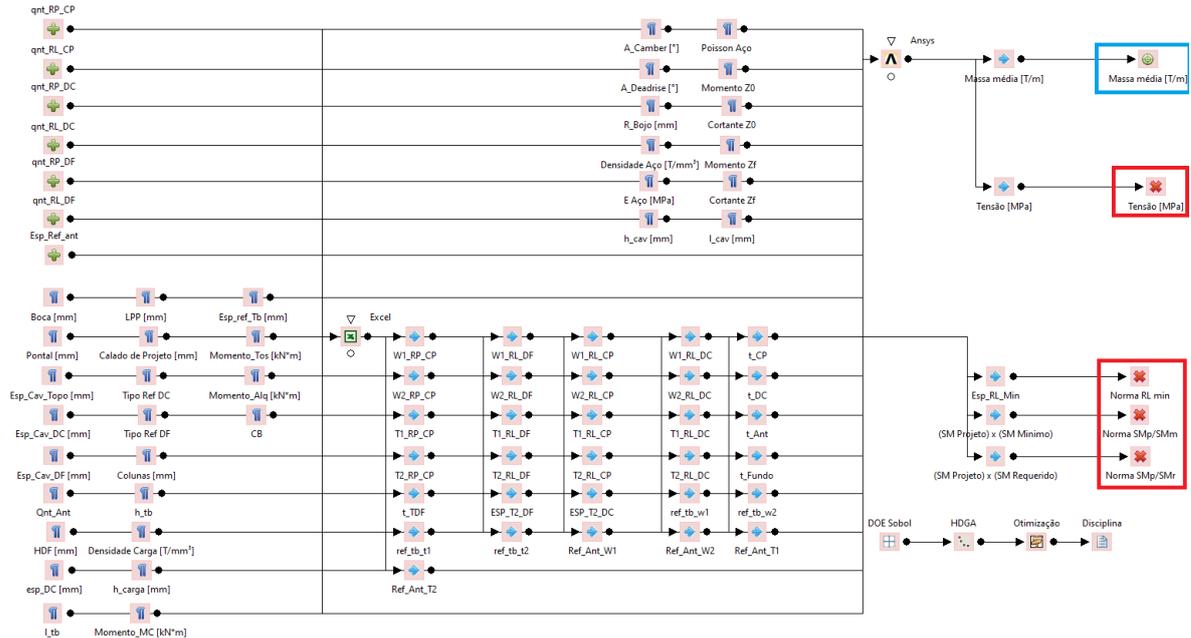
Conforme pode ser visto na Tabela 8, a função objetivo escolhida foi a minimização do peso médio por metro de navio, a qual está sujeita às seguintes restrições: espaçamento mínimo entre reforçadores, módulo de seção mínimo (SMm) e módulo de seção requerido (SMr), além da restrição de projeto relacionada à máxima tensão atuante na estrutura (Figura 22).

Tabela 8 - Atributos do modelo de otimização

Atributos do modelo de otimização		
Atributo	Natureza	Limite
Smp/SMm	Restrição	> 1,00
Smp/SMr	Restrição	< 1,40
Espaçamento mínimo entre reforçadores	Restrição	> 1,00 m
Tensão máxima	Restrição	< 270,00 kPa
Peso médio por metro de navio	Objetivo	Menor possível

Fonte: Autor (2024).

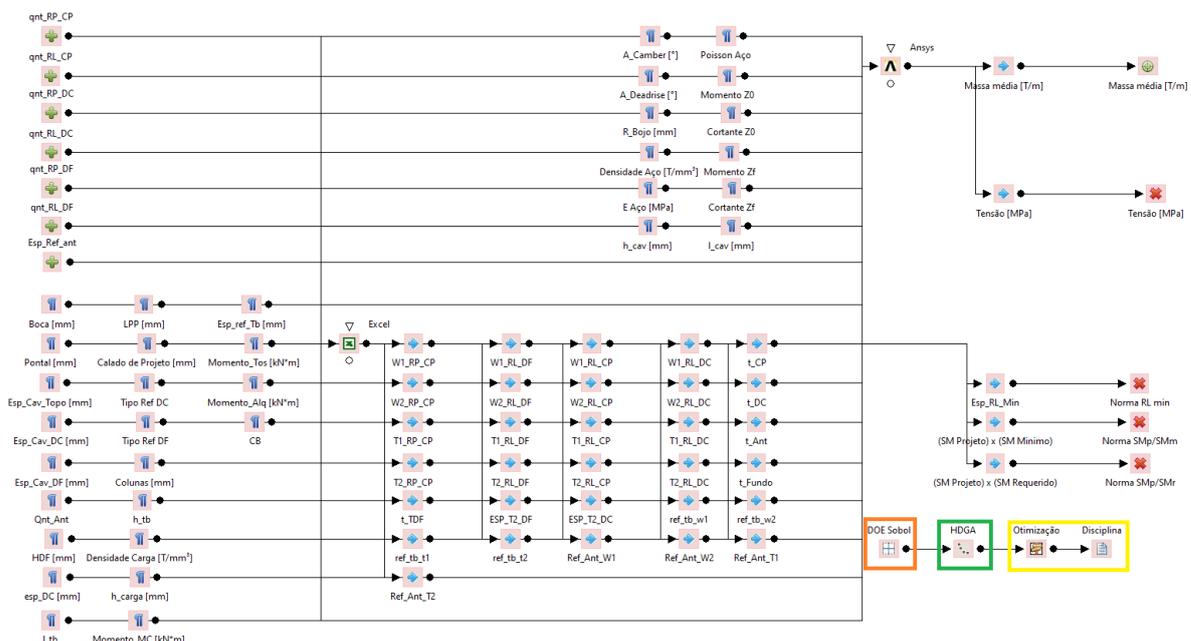
Figura 22 - Função objetivo (em azul) e restrições (em vermelho)



Fonte: Autor (2024).

Por fim, são alocados os elementos associados ao processo de otimização em si, sendo eles: o DOE SOBOL, o otimizador HDGA e o tipo de problema a ser resolvido (Figura 23).

Figura 23 - DOE SOBOL (em laranja), otimizador HDGA (em verde) e modelo de otimização (em amarelo)



Fonte: Autor (2024).

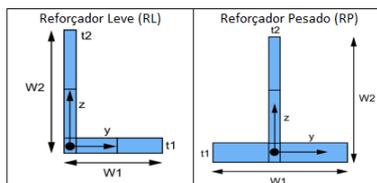
### 4.3.2. Elementos da planilha auxiliar de normas

A planilha auxiliar desenvolvida pode ser dividida em duas partes. A primeira, corresponde a aba de conexão com o programa Synapse (Figura 24), onde são alocados os dados de entrada (variáveis e parâmetros) provenientes do fluxograma de otimização, os quais são automaticamente inseridos a cada iteração do processo.

Nesta aba também estão localizadas as células referentes as saídas da planilha, as quais contêm os resultados necessários para que o modelo de otimização possa avaliar as restrições e funções objetivo definidas para o problema.

Figura 24 - Aba principal da planilha de normas

Entradas		Saídas Reforçadores:					Saídas Chapas:			
Variáveis	qnt_RP_CP	2 [-]	Ref.	W1	W2	T1	T2	Espessura	chapa_Convês_Principal	31,80
	qnt_RL_CP	1 [-]	RP_CP	400	750	25	30	-	chapa_Duplo_Costado	22,20
	qnt_RP_DF	5 [-]	RP_DF	-	-	-	-	10	chapa_Fundo	31,80
	qnt_RL_DF	2 [-]	RP_DC	-	-	-	-	10	chapa_Teto_Duplo_fundo	25,40
	qnt_RP_DC	4 [-]	RP_Ant	450	800	30	40	-	chapa_Antepara	25,40
	qnt_RL_DC	3 [-]	RL_CP	140	180	10	15	-	Saídas SM:	
	esp_ref_ant	1.000,00 [mm]	RL_DF	80	140	10	15	-	SM_P/SM_M	1,067
	Boca	48.000,00 [mm]	RL_DC	80	160	15	20	-	SM_P/SM_R	1,332
	Pontal	23.500,00 [mm]	RL_TB	80	140	10	15	-	Saída RL_Min:	
	esp_cav_Topo	3.000,00 [mm]							esp_min_projeto/esp_min_norma	0,98
esp_cav_DC	2.000,00 [mm]									
esp_cav_DF	1.000,00 [mm]									
h_carga	20.000,00 [mm]									
Densidade Carga	8,60E-10 [T/mm <sup>3</sup> ]									
qnt_Ant	1 [-]									
esp_DC	2.550,00 [mm]									
HDF	2.700,00 [mm]									
LPP	264.000,00 [mm]									
Calado de Projeto	16.000,00 [mm]									
Tipo Ref DC	2 [-]									
Tipo Ref DF	2 [-]									
Colunas	10.000,00 [mm]									
h_tb	4.000,00 [mm]									
l_tb	3.500,00 [mm]									
Momento_MC	2.005.101,05 [kN*m]									
Momento_Tos	-5.923.552,50 [kN*m]									
Momento_Alq	5.544.600,48 [kN*m]									
esp_ref_tb	500,00 [mm]									
CB	0,83 [-]									



Fonte: Autor (2024).

As demais abas da planilha são dedicadas aos cálculos das propriedades e requisitos normativos, incluindo a espessura das chapas em cada região da embarcação, o módulo de seção (SM) de cada reforçador presente na estrutura e o cálculo do SM da seção mestra do navio.

Tais cálculos são realizados utilizando equações empíricas desenvolvidas e atualizadas pelas sociedades classificadoras, em especial aquelas contidas na norma ABS (2023) Essas equações incorporam coeficientes que variam de acordo com as características principais do navio, como a boca, o calado de projeto e o comprimento total da embarcação, além de atributos que são calculados pela própria norma ou que possuem exigências mínimas ou máximas estabelecidas por ela, como a espessura das chapas e o espaçamento entre reforçadores.

A norma ABS (2023) fornece limites mínimos para a espessura das chapas e para o SM dos reforçadores. Portanto, para definir o dimensionamento utilizado, foram empregados catálogos comerciais que visam garantir a aplicação prática e realista da metodologia proposta. O catálogo das chapas pode ser visto na Figura 25, enquanto o catálogo dos reforçadores está disponível no Apêndice A.

Figura 25 - Catálogo de chapas de aço utilizado

Chapas ASTM A-36 / SAE 1045				
Espessura		Qualidade		kg/m <sup>2</sup>
(mm)	(pol)			
3,18	1/8"		SAE 1045	24,96
4,75	3/16"		SAE 1045	37,29
6,35	1/4"	ASTM A-36	SAE 1045	49,85
8	5/16"	ASTM A-36	SAE 1045	62,8
9,53	3/8"	ASTM A-36	SAE 1045	74,81
12,7	1/2"	ASTM A-36	SAE 1045	99,7
15,9	5/8"	ASTM A-36	SAE 1045	124,66
19,1	3/4"	ASTM A-36	SAE 1045	149,54
22,2	7/8"	ASTM A-36	SAE 1045	174,51
25,4	1"	ASTM A-36	SAE 1045	199,39
31,8	1 1/4"	ASTM A-36	SAE 1045	249,24
38,1	1 1/2"	ASTM A-36	SAE 1045	299,09
41,3	1 5/8"	ASTM A-36	SAE 1045	324,05
44,5	1 3/4"	ASTM A-36	SAE 1045	348,93
50,8	2"	ASTM A-36	SAE 1045	398,78
57,2	2 1/4"	ASTM A-36	SAE 1045	448,63

Fonte: Adaptado de SC aços (2024).

Analisando a norma ABS (2023) foram definidas três restrições normativas para o modelo de otimização: o espaçamento mínimo entre reforçadores, o módulo mínimo da seção mestra (SM) e o módulo requerido da seção mestra (SMr).

Embora o módulo de seção requerido também possa ser encontrado na norma; para evitar um superdimensionamento da estrutura e, conseqüentemente, um desperdício de material, foi definido um limite máximo para a relação entre o SM projetado e o SM requerido. Assim, foi arbitrado que o SM projetado da embarcação deve ser maior que o SM mínimo e menor que 1,40 vezes o SM requerido.

### 4.3.3. Elementos da modelagem e análise MEF

Para a realização da modelagem e a subsequente análise em elementos finitos, parte dos dados iniciais e das saídas da planilha auxiliar são alocados no script já descrito, juntamente com as variáveis de projeto (Figura 26).

Figura 26 - Exemplo de entrada de dados por meio da otimização

```

1 *SET,qnt_RP_CP,3
2 *SET,qnt_RL_CP,2
3 *SET,qnt_RP_DC,3
4 *SET,qnt_RL_DC,1
5 *SET,qnt_RP_DF,5
6 *SET,esp_ref_ant,1000
7 *SET,Boca,48000
8 *SET,Pontal,23500
9 *SET,esp_cav_topo,3000
10 *SET,esp_cav_DC,2000
11 *SET,esp_cav_DF,1000
12 *SET,qnt_ant,1
13 *SET,HDF,2700
14 *SET,esp_DC,2550
15 *SET,l_tb,3500
16 *SET,h_tb,4000
17 *SET,Calado,16000
18 *SET,tipo_RP_DF,2
19 *SET,Colunas,10000
20 *SET,rho_carga,8.6E-10
21 *SET,h_carga,20000
22 *SET,esp_ref_tb,500
23 *SET,qnt_RL_DF,1
24 *SET,A_Camber,2
25 *SET,A_Deadrise,1
26 *SET,r_bojo,1200
27 *SET,rho_aco,7.85E-9
28 *SET,E_aco,200000
29 *SET,h_cav,600
30 *SET,poisson_aco,0.26
31 *SET,Momento_1,-6659115
32 *SET,Cortante_1,-15907
33 *SET,Momento_2,-6660471
34 *SET,Cortante_2,15486
35 *SET,l_cav,30
36 *SET,W1_RP_CP,300
37 *SET,W2_RP_CP,650
38 *SET,T1_RP_CP,25
39 *SET,T2_RP_CP,30
40 *SET,REF_ANT_W1,400
41 *SET,REF_ANT_W2,800
42 *SET,REF_ANT_T1,30
43 *SET,REF_ANT_T2,40
44 *SET,W1_RL_CP,80
45 *SET,W2_RL_CP,160
46 *SET,T1_RL_CP,10
47 *SET,T2_RL_CP,15
48 *SET,W1_RL_DF,80
49 *SET,W2_RL_DF,140
50 *SET,T1_RL_DF,10
51 *SET,T2_RL_DF,15
52 *SET,W1_RL_DC,140
53 *SET,W2_RL_DC,200
54 *SET,T1_RL_DC,15
55 *SET,T2_RL_DC,20
56 *SET,REF_TB_W1,80
57 *SET,REF_TB_W2,140
58 *SET,REF_TB_T1,10
59 *SET,REF_TB_T2,15
60 *SET,Chapa_t2_DC,15
61 *SET,Chapa_t2_DF,15
62 *SET,Chapa_CP,15.9
63 *SET,Chapa_DC,55
64 *SET,Chapa_Fundo,44.5
65 *SET,Chapa_TDF,38.1
66 *SET,Chapa_Ant,31.8
67 *SET,cond_esp_min,1.7083333333333333
68 *SET,cond_smp_smm,1.00299908069319
69 *SET,tipo_RP_DC,2
70 /Pmacro
71 /PREP7
72 /GRAPHICS,POWER
73 > !Condição para realização da macro...
87 > !Dados entrada...
105 > !Dados Projeto...
117 > !Modelagem...
2493 > !Malha ...
3881 > !Condições de Contorno e carregamento...
3929 > !Solução...
3934 > !Saídas...

```

Fonte: Autor (2024).

Ao longo da otimização, os valores das variáveis e dos atributos resultantes da planilha auxiliar são atualizados e toda a análise é refeita, gerando saídas distintas para cada iteração do processo.

As saídas da modelagem são: o peso médio por metro do navio e a máxima tensão equivalente ocorrida na estrutura modelada. Ambos os parâmetros são atributos chaves para o processo de otimização, sendo que o primeiro é definido como um objetivo a ser minimizado enquanto o segundo representa uma restrição física do problema que deve ser satisfeita.

Neste projeto, o objetivo é reduzir a massa da estrutura modelada para diminuir os custos de produção e aumentar a capacidade de carga da embarcação. No entanto, não foi realizado um estudo para avaliar o impacto que essa redução exerce nas outras características de desempenho do navio.

Quanto à restrição física do projeto, foi adotado um valor máximo de tensão de 270 MPa. Esse valor é fundamentado na literatura e é amplamente aceito como a tensão máxima para aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), comumente usados na construção naval.

## 5. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, são apresentados os dados do estudo de caso realizado, bem como os resultados obtidos utilizando a metodologia descrita no capítulo 3 e o desenvolvimento apresentado no capítulo 4.

Por fim, os resultados obtidos são analisados de forma a verificar a viabilidade e a eficácia do modelo paramétrico e das técnicas de otimização na redução no tempo e nos custos associados ao projeto estrutural de uma embarcação petroleira.

### 5.1. DADOS DO ESTUDO DE CASO E HIPÓTESES

Conforme descrito anteriormente, a embarcação escolhida para esse estudo de caso foi um petroleiro, cujas informações básicas são sistematizadas na Tabela 2 da seção 4.2. Já os dados calculados (relações adimensionais, coeficientes, dimensões de tanques e distribuição dos pesos da embarcação) são descritos na seção 4.2.1.

Por fim, as informações referentes a análise de equilíbrio da viga navio são descritas na Tabela 6 da mesma seção, a qual também contempla as curvas de peso, flutuação, carga, esforço cortante e momento fletor em cada condição de análise exigida pela sociedade classificadora.

Para cumprir as normas e modelar a estrutura, foram consideradas as hipóteses da Tabela 9, as quais foram definidas com base tanto na literatura existente quanto em embarcações semelhantes analisadas.

Tabela 9 - Hipóteses consideradas

Dados extras utilizados:	
Espaçamento entre cavernas no convés	3,0 m
Espaçamento entre cavernas no costado	2,0 m
Espaçamento entre cavernas no fundo	1,0 m
Altura tanque de bojo	4,0 m
Comprimento tanque de bojo	3,5 m
Espaçamento entre colunas	10,0 m

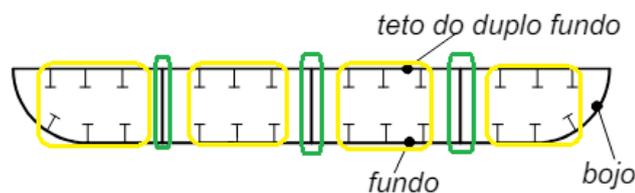
Fonte: Autor (2024).

A definição dos espaçamentos entre cavernas foi baseada na literatura, que preconiza que a cada duas anteparas estanques deve existir ao menos uma caverna completa contendo elementos transversais no topo, costado e fundo da seção.

Já o espaçamento entre colunas foi definido de modo a diminuir os módulos de seção exigidos pela norma ABS (2023) para os reforçadores longitudinais pesados. Pois, nesse caso, o módulo de seção exigido dependerá da distância entre colunas ou anteparas transversais.

Outra hipótese considerada foi a escolha de reforçadores longitudinais do tipo 2 para o duplo fundo e o duplo costado, ou seja, reforçadores cuja alma vai de uma chapa a outra do casco duplo (Figura 27). Essa escolha deve-se ao fato de que um reforçador do tipo 2 gera um módulo de seção maior, facilitando a adequação à norma e oferecendo uma resistência maior do que os reforçadores do tipo 1.

Figura 27 - Reforçadores tipo 1 (em amarelo) e reforçadores tipo 2 (em verde) no duplo fundo de uma embarcação



Fonte: Adaptado de Augusto (2004a).

Após uma primeira tentativa de otimização, a qual não resultou em soluções viáveis, uma nova hipótese foi considerada. Nessa nova hipótese, as espessuras das chapas podem ser maiores do que as espessuras mínimas exigidas pela norma, desde que estejam dentro do catálogo de opções disponíveis.

Com essa nova hipótese foi possível encontrar soluções com módulos de seção maiores, garantindo a conformidade com a norma e permitindo que as soluções obtidas tivessem tensões abaixo do limite de escoamento do material.

## 5.2. RESULTADOS E VERIFICAÇÕES DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Com a aplicação das hipóteses e dados já descritos, foi realizado o processo de otimização para o projeto estrutural da seção mestra da embarcação escolhida para esse estudo de caso.

O processo de otimização levou aproximadamente 10 horas, resultando em cerca de 800 pontos, dos quais 15 foram considerados viáveis, ou seja, pontos onde todas as restrições foram satisfeitas.

Os resultados viáveis podem ser vistos na Figura 28, onde são mostrados os valores das variáveis utilizadas e os valores calculados tanto para as restrições quanto para a função objetivo definida para o problema.

Figura 28 – Resultados do processo de otimização

ID	qnt_RP_CP	qnt_RL_CP	qnt_RP_DC	qnt_RP_DF	qnt_RL_DC	qnt_RL_DF	Esp_Ref_ant	Norma SMp/SMm	Norma SMp/SMb	Norma RL_min	Tensão [MPa]	Massa média [T/m]	Viável	Erro	Ótimo
417	2	3	3	7	1	1	1400	1,0920	1,3631	1,2813	255,3877	67,9476	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
498	4	1	3	4	1	1	1400	1,1002	1,3733	2,0500	261,6523	72,1372	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
469	3	3	3	6	1	1	1400	1,0602	1,3234	1,3406	255,3797	68,4071	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
459	1	1	3	4	1	1	1400	1,1042	1,3783	2,0500	261,6502	77,1052	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
425	2	1	3	5	1	1	1400	1,1042	1,3784	1,7083	255,3878	73,7646	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
398	4	2	3	5	1	1	1400	1,0928	1,3641	1,4300	255,3877	69,9308	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
282	3	1	3	5	1	1	1400	1,0826	1,3514	1,7083	255,3877	71,5494	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
397	1	2	3	5	1	1	1300	1,0657	1,3303	1,7083	249,9777	72,6809	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
364	3	4	3	5	1	1	1300	1,0385	1,2963	1,0725	249,9797	69,0038	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
333	3	3	3	5	1	1	1300	1,0256	1,2803	1,3406	249,9798	68,9194	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
312	3	2	3	4	1	1	1300	1,0101	1,2609	1,7875	261,6516	70,5622	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
152	3	1	3	5	1	1	1300	1,0826	1,3514	1,7083	249,9787	70,5596	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
528	1	2	3	5	1	1	1200	1,0657	1,3303	1,7083	249,9783	73,0661	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
385	3	1	3	5	1	1	1200	1,0826	1,3514	1,7083	249,9793	70,9447	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
308	3	1	3	4	1	1	1100	1,0427	1,3015	2,0500	261,6617	71,7497	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
211	3	1	2	7	2	1	2000	1,1954	1,4921	1,2813	489,9694	68,2383	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
48	3	1	3	7	1	1	1900	1,2161	1,5180	1,2813	332,8650	70,5265	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
138	3	2	3	8	3	1	1800	1,1217	1,4002	1,1389	366,7272	60,1834	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
628	4	1	3	6	1	1	1700	1,1725	1,4636	1,4643	313,6449	69,6585	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
103	2	3	4	8	2	1	1700	1,0557	1,3178	1,1389	342,6459	59,5121	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
503	4	3	3	6	2	1	1600	1,0402	1,2984	1,0725	320,7783	62,7059	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
502	1	3	3	7	1	1	1600	1,1074	1,3823	1,2813	279,9607	69,3738	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
456	4	3	3	5	1	1	1600	1,1042	1,3783	1,0725	279,9769	70,4881	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
632	1	2	3	7	3	1	1500	1,1113	1,3871	1,2188	365,0925	63,9637	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
612	3	1	2	5	1	2	1500	1,0415	1,3000	1,1389	452,5127	68,2348	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
605	4	3	3	8	2	1	1500	1,1812	1,4745	1,0725	323,9800	59,7579	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor (2024).

Conforme pode ser visto na Figura 28, o ponto ótimo corresponde à solução que apresentou o menor peso médio por metro de navio entre as soluções viáveis, ou seja, entre aquelas que atendem as restrições impostas para o projeto.

Após o processo de otimização, os pontos viáveis foram analisados diretamente no programa Ansys APDL para verificar as tensões e as massas obtidas. Os resultados verificados nessa revisão manual condizem com as saídas apresentadas no processo de otimização, demonstrando a confiabilidade do modelo de otimização desenvolvido.

### 5.2.1. Dados do ponto ótimo

O processo de otimização determinou que a solução 417 corresponde ao projeto estrutural ótimo, o qual, além de atender a todos os requisitos normativos, minimiza o peso médio por metro de navio. Os valores referentes as variáveis dessa

solução são listados na Tabela 10, enquanto os resultados são mostrados na Tabela 11.

Tabela 10 - Variáveis do ponto ótimo

Variáveis da solução 417	
Quantidade de reforçadores pesados no convés	2
Quantidade de reforçadores leves no convés	3
Quantidade de reforçadores pesados no duplo costado	3
Quantidade de reforçadores leves no duplo costado	1
Quantidade de reforçadores pesados no duplo fundo	7
Quantidade de reforçadores leves no duplo fundo	1
Espaçamento entre reforçadores na antepara longitudinal	1,40 m

Fonte: Autor (2024).

Tabela 11 - Resultados do ponto ótimo

Resultados da solução 417		
Atributo	Valor obtido	Limite
SMp/SMm	1,09	> 1,00
SMp/SMr	1,36	< 1,40
Espaçamento mínimo entre reforçadores	1,28 m	> 1,00 m
Tensão máxima	255,39 kPa	< 270,00 kPa
Peso médio por metro de navio	67,95 t/m	Menor possível

Fonte: Autor (2024).

### 5.2.2. Verificação do ponto ótimo na planilha auxiliar

Para verificar os resultados referentes a aplicação da norma ABS (2023), os dados da solução ótima foram inseridos manualmente na planilha auxiliar. Cada etapa dos cálculos foi checada para confirmar se a solução atendia a todos os critérios normativos, tal como sintetizado na Figura 29.

Figura 29 - Planilha auxiliar caso ótimo

Entradas		Saídas Reforçadores:						Saídas Chapas:		
Variáveis	qnt_RP_CP	2 [-]	Ref.	W1	W2	T1	T2	Espessura	chapa_Convês_Principal	19,10
	qnt_RL_CP	3 [-]	RP_CP	400	750	25	30	-	chapa_Duplo_Costado	59,80
	qnt_RP_DF	7 [-]	RP_DF	-	-	-	-	12	chapa_Fundo	41,30
	qnt_RL_DF	1 [-]	RP_DC	-	-	-	-	12	chapa_Teto_Duplo_fundo	38,10
	qnt_RP_DC	3 [-]	RP_Ant	600	900	40	50	-	chapa_Antepara	38,10
	qnt_RL_DC	1 [-]	RL_CP	80	160	10	15	-	Saídas SM:	
	esp_ref_ant	1.400,00 [mm]	RL_DF	80	140	10	15	-	SM_P/SM_M	1,096
	Boca	48.000,00 [mm]	RL_DC	140	200	15	20	-	SM_P/SM_R	1,369
	Pontal	23.500,00 [mm]	RL_TB	80	140	10	15	-	Saída RL_Min:	
	esp_cav_Topo	3.000,00 [mm]							esp_min_projeto/esp_min_norma	1,28
esp_cav_DC	2.000,00 [mm]									
esp_cav_DF	1.000,00 [mm]									
h_carga	20.000,00 [mm]									
Densidade Carga	8,60E-10 [T/mm³]									
qnt_Ant	1 [-]									
esp_DC	2.550,00 [mm]									
HDF	2.700,00 [mm]									
LPP	264.000,00 [mm]									
Calado de Projeto	16.000,00 [mm]									
Tipo Ref DC	2 [-]									
Tipo Ref DF	2 [-]									
Colunas	10.000,00 [mm]									
h_tb	4.000,00 [mm]									
l_tb	3.500,00 [mm]									
Momento_MC	2.005.101,05 [kN*m]									
Momento_Tos	- 5.923.552,50 [kN*m]									
Momento_Alq	5.544.600,48 [kN*m]									
esp_ref_tb	500,00 [mm]									
CB	0,83 [-]									

Reforçador Leve (RL)	Reforçador Pesado (RP)

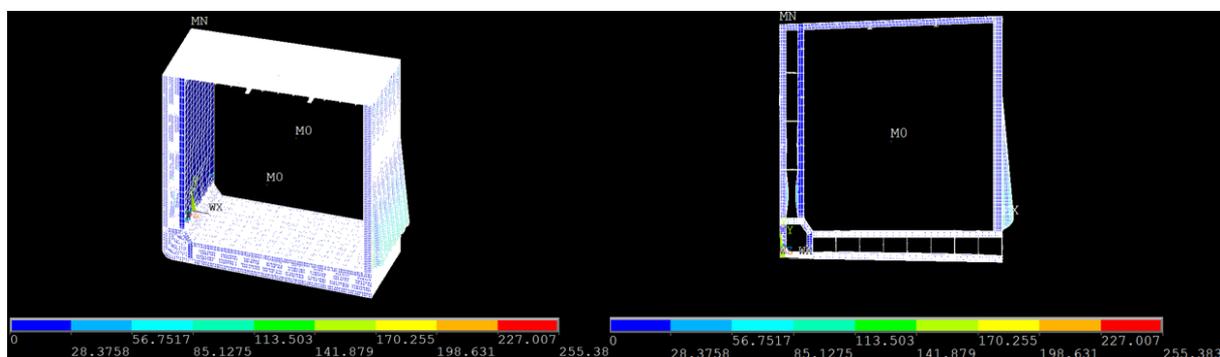
Fonte: Autor (2024)

### 5.2.3. Verificação do ponto ótimo na análise MEF

Para realizar a verificação da análise MEF, tanto as variáveis de projeto, quanto os parâmetros calculados pela planilha auxiliar foram inseridos manualmente no programa Ansys.

Finalizada a análise, na Figura 30 é mostrada a distribuição das tensões na estrutura após a aplicação das condições de contorno e das cargas atuantes. Os resultados obtidos mostram que os níveis de tensão na estrutura estão abaixo do limite de escoamento do material, confirmando que a solução obtida atende aos requisitos impostos para o projeto.

Figura 30 - Resultados da análise MEF



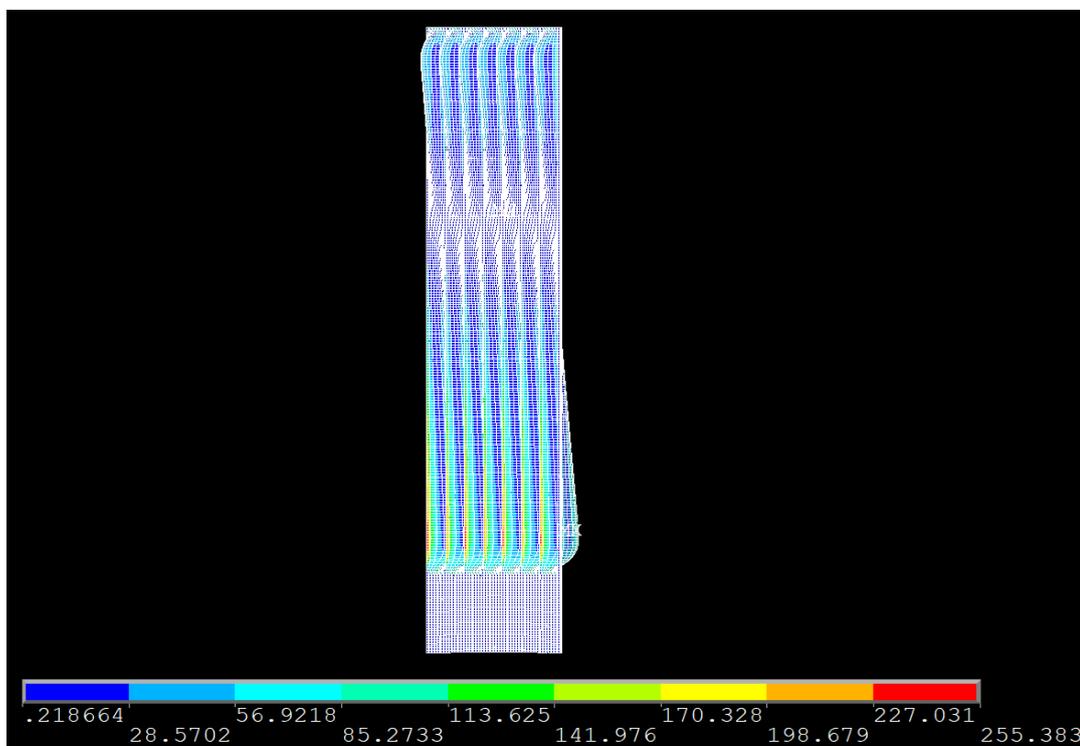
Fonte: Autor (2024).

A análise da seção revelou variações significativas nas tensões ao longo da estrutura. Assim, buscou-se identificar as regiões mais afetadas, ou seja, as regiões de maior sollicitação estrutural.

A antepara longitudinal, que separa os tanques de carga da embarcação, apresentou as maiores tensões (Figura 31). Isso é esperado, considerando que a análise foi realizada para o pior cenário de carregamento, com o tanque de bombordo completamente cheio e o tanque de boreste completamente vazio, resultando em uma grande diferença de pressão agindo diretamente na antepara.

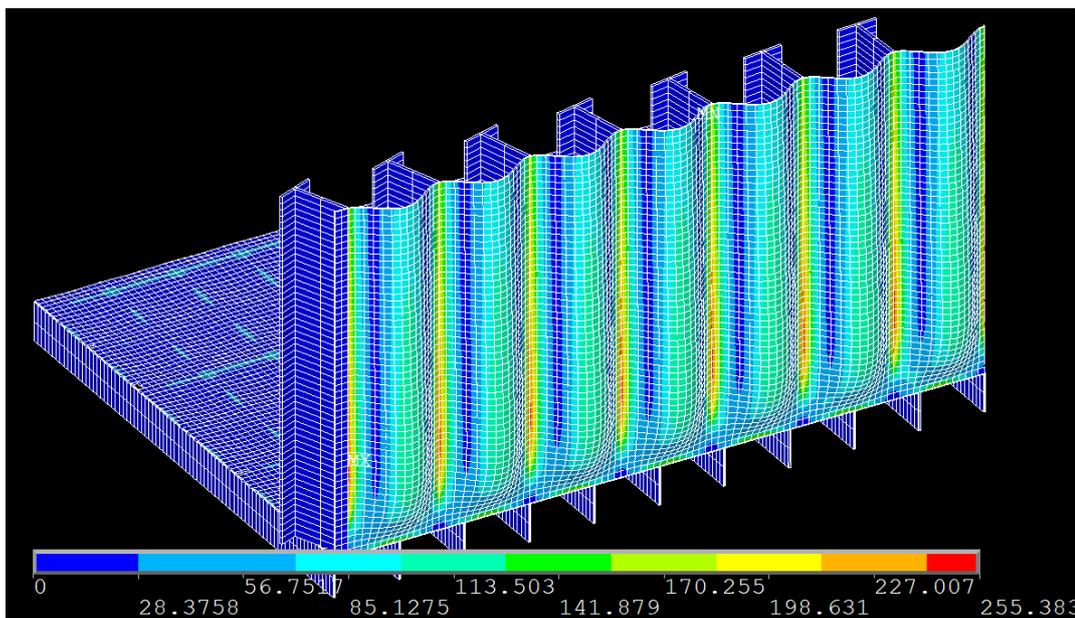
Observou-se também uma grande variação nas tensões existentes nas chapas da antepara longitudinal (Figura 32), com valores mais elevados próximos ao teto do duplo fundo da embarcação. Essa variação é atribuída à disposição da carga líquida, que faz com que a pressão no fundo seja maior do que a pressão no topo do compartimento de carga. Além disso, os picos de tensão ocorrem na junção entre a chapa e o reforçador vertical da antepara, a qual corresponde ao maior lado da unidade de chapeamento. Esse resultado, previsto por Augusto (2004b), confirma a confiabilidade do método de elementos finitos para a análise estrutural.

Figura 31 – Análise MEF da antepara longitudinal



Fonte: Autor (2024).

Figura 32 - Análise da região mais afetada da estrutura



Fonte: Autor (2024)

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs a utilização de técnicas de otimização para avaliar diferentes arranjos para o projeto estrutural de uma embarcação, direcionando o projeto para a solução de menor massa estrutural capaz de atender aos critérios e requisitos normativos de uma sociedade classificadora.

Para alcançar esse objetivo, foi desenvolvido um modelo paramétrico no programa Ansys APDL que automatiza a modelagem e a análise numérica da estrutura, reduzindo o tempo demandado e garantindo a consistência nas análises das diferentes configurações estruturais estudadas.

Além disso, foi elaborada uma planilha Excel para analisar os requisitos exigidos pela norma ABS (2023), a qual realiza a definição das dimensões das chapas e dos reforçadores, tendo como base os catálogos reais adicionados à planilha.

Por fim, utilizando o programa Synapse, foi criado um fluxograma de otimização focado na minimização da massa estrutural, o qual contém sete variáveis, trinta e quatro parâmetros, duas ferramentas de análise (Excel e Ansys), quatro restrições (três normativas e uma estrutural) e uma função objetivo.

Após um estudo de caso ter sido conduzido, a viabilidade do ponto ótimo foi verificada através de uma análise detalhada do processo, incluindo a verificação manual das entradas, cálculos e saídas da planilha de normas e da análise MEF.

Os resultados demonstraram a eficácia e eficiência da metodologia proposta para determinar arranjos estruturais internos de embarcações, mostrando que é possível obter soluções viáveis em menos de 12 horas de otimização. Tal tempo é consideravelmente menor do que as tradicionais semanas de trabalho consumidas pelas abordagens convencionais.

### 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à grande aplicabilidade da metodologia desenvolvida neste trabalho, existem diversos temas que podem ser estudados em projetos futuros. Dentre os quais é possível citar:

- a. Estudar a viabilidade de aplicação da metodologia proposta para diferentes tipos de embarcações de grande porte;
- b. Verificar a viabilidade da aplicação de uma adaptação da metodologia proposta para embarcações de pequeno porte;
- c. Estudar os diferentes algoritmos de otimização visando a redução do tempo gasto na busca por soluções;
- d. Realizar melhorias no script para gerar modelos MEF que demandem um menor custo computacional;
- e. Desenvolver uma modelagem da embarcação completa aplicando os esforços diretamente na viga navio;
- f. Estudar a viabilidade do uso de redes neurais como acelerador do processo de otimização da estrutura.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **Marine vessel: Rules for Building and classing.** Janeiro, 2023.
- AUGUSTO, O. B. **A estrutura secundária do navio.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004a.
- AUGUSTO, O. B. **A estrutura terciária do navio: Introdução à teoria de placas.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004b.
- BARBERO, E. J. **Finite element analysis of composite materials using abaqus.** Boca Raton: CRC Press, 2013.
- BATHE, K. J. **Finite element procedures.** Victoria: Pearson College Div, 1995.
- CHVÁTAL, V. **Linear Programming.** San Francisco: W. H. Freeman, 1983.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms.** New York: Willey, 2001.
- ERTAS, A.; JONES, J. C. **The engineering design process.** Texas: Wiley, 1996.
- EVANS, J. H. Basic design concepts. **Journal of the American Society for Naval Engineers**, v. 71, n. 4, p. 671–678, 1959.
- FAGAN, M. J. **Finite element analysis: Theory and practice.** Harlow: Longman Pub Group, 1996.
- FAUSETT, L. **Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms and applications.** United States: Prentice Hall, 1993.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements.** Chichester: Willey, 2007
- FONSECA, M. M. **Arte naval.** 8. ed. Rio de Janeiro: SDM, 2019.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in Search, optimization and machine learning.** Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
- HUGHES, O. F.; PAIK, J. K. **Ship structural analysis and design.** Nova Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- HUGHES, T. J. R. **The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis.** Mineola: Dover Publications, 2000.
- MOAVENI, S. **Finite element analysis: Theory and application with ANSYS.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization.** New York: Springer, 2006.

ODEN, J. T.; REDDY, J. N. **An introduction to the mathematical theory of finite elements**. Mineola: Dover Publications, 2012.

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

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

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. Columbus: McGraw Hill, 2005.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **The cross-entropy method: A unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo simulation and machine learning**. New York: Springer, 2004.

SILVA, E. C. N. **Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Universidade de São Paulo, 2007.

TANCREDI, Thiago Pontin. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

THE NEW YORK TIMES. **HOW giant ships are built**. New York, 2020. Disponível em: <https://www.nytimes.com/interactive/2020/06/17/business/economy/how-container-ships-are-built>. Acesso em: 17 mar. 2023.

THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS. **Significant Ships of 2012**. Janeiro, 2013.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Review of maritime transport 2021**. Genebra, 2021. Disponível em: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021\\_en\\_0.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf) Acesso em: 17 mar. 2023.

WATSON, D. G. M. **Practical Ship Design**. Oxford: Elsevier Science, 1998.

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

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method: Its basis and fundamentals**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

## APÊNDICE A – Catálogos dos reforçadores utilizados

Nesta seção são apresentados os catálogos de reforçadores pesados (Tabela 12) e leves (Tabela 13) utilizados no presente trabalho.

Tabela 12 - Catálogos de reforçadores pesados utilizados

Dimensões [mm]				SM [mm <sup>3</sup> ]				
W1	W2	T1	T2	Fundo	Duplo Fundo	Costado	Antepara	Convés
300	650	20	25	7,93E+06	7,78E+06	7,78E+06	7,34E+06	7,34E+06
300	650	25	30	9,63E+06	9,46E+06	9,46E+06	8,88E+06	8,93E+06
300	750	20	25	9,68E+06	9,52E+06	9,52E+06	8,98E+06	9,04E+06
300	750	25	30	1,18E+07	1,16E+07	1,16E+07	1,08E+07	1,10E+07
400	750	25	30	1,37E+07	1,35E+07	1,35E+07	1,27E+07	1,28E+07
400	750	30	40	1,70E+07	1,68E+07	1,68E+07	1,56E+07	1,59E+07
400	800	25	35	1,60E+07	1,58E+07	1,58E+07	1,47E+07	1,50E+07
400	800	30	40	1,86E+07	1,84E+07	1,84E+07	1,70E+07	1,74E+07
450	800	30	40	1,99E+07	1,96E+07	1,96E+07	1,82E+07	1,86E+07
450	800	35	45	2,27E+07	2,24E+07	2,24E+07	2,06E+07	2,12E+07
450	850	30	40	2,16E+07	2,13E+07	2,13E+07	1,97E+07	2,02E+07
450	850	35	45	2,47E+07	2,43E+07	2,43E+07	2,23E+07	2,30E+07
450	900	30	40	2,34E+07	2,31E+07	2,31E+07	2,13E+07	2,19E+07
450	900	35	45	2,67E+07	2,64E+07	2,64E+07	2,41E+07	2,49E+07
500	850	30	40	2,29E+07	2,26E+07	2,26E+07	2,09E+07	2,15E+07
500	850	35	45	2,62E+07	2,58E+07	2,58E+07	2,37E+07	2,45E+07
500	900	30	40	2,48E+07	2,45E+07	2,45E+07	2,26E+07	2,32E+07
500	900	35	45	2,83E+07	2,79E+07	2,79E+07	2,56E+07	2,65E+07
500	900	40	50	3,18E+07	3,14E+07	3,14E+07	2,86E+07	2,96E+07
500	950	35	45	3,05E+07	3,01E+07	3,01E+07	2,75E+07	2,85E+07
500	950	40	50	3,42E+07	3,38E+07	3,38E+07	3,07E+07	3,19E+07
500	950	45	55	3,79E+07	3,74E+07	3,74E+07	3,38E+07	3,53E+07
550	900	40	50	3,36E+07	3,32E+07	3,32E+07	3,02E+07	3,14E+07
550	900	45	55	3,73E+07	3,68E+07	3,68E+07	3,33E+07	3,47E+07
550	900	50	60	4,09E+07	4,04E+07	4,04E+07	3,63E+07	3,80E+07
550	900	55	65	4,45E+07	4,39E+07	4,39E+07	3,92E+07	4,12E+07
550	950	45	55	4,01E+07	3,96E+07	3,96E+07	3,57E+07	3,73E+07
550	950	50	60	4,40E+07	4,34E+07	4,34E+07	3,89E+07	4,08E+07
550	950	55	65	4,78E+07	4,72E+07	4,72E+07	4,20E+07	4,42E+07
550	1000	45	55	4,30E+07	4,24E+07	4,24E+07	3,82E+07	4,00E+07
550	1000	50	60	4,71E+07	4,65E+07	4,65E+07	4,16E+07	4,37E+07
550	1000	55	65	5,13E+07	5,06E+07	5,06E+07	4,49E+07	4,74E+07
550	1000	60	70	5,54E+07	5,46E+07	5,46E+07	4,82E+07	5,10E+07

600	900	40	50	3,54E+07	3,50E+07	3,50E+07	3,19E+07	3,31E+07
600	900	45	55	3,93E+07	3,88E+07	3,88E+07	3,51E+07	3,66E+07
600	900	50	60	4,32E+07	4,26E+07	4,26E+07	3,83E+07	4,01E+07
600	900	55	65	4,70E+07	4,64E+07	4,64E+07	4,14E+07	4,35E+07
600	950	45	55	4,22E+07	4,17E+07	4,17E+07	3,77E+07	3,93E+07
600	950	50	60	4,64E+07	4,58E+07	4,58E+07	4,10E+07	4,30E+07
600	950	55	65	5,05E+07	4,98E+07	4,98E+07	4,44E+07	4,67E+07
600	1000	45	55	4,52E+07	4,47E+07	4,47E+07	4,02E+07	4,21E+07
600	1000	50	60	4,96E+07	4,90E+07	4,90E+07	4,38E+07	4,61E+07
600	1000	55	65	5,40E+07	5,33E+07	5,33E+07	4,74E+07	5,00E+07
600	1000	60	70	5,83E+07	5,76E+07	5,76E+07	5,08E+07	5,38E+07
650	950	40	50	4,00E+07	3,95E+07	3,95E+07	3,59E+07	3,74E+07
650	950	45	55	4,44E+07	4,38E+07	4,38E+07	3,96E+07	4,14E+07
650	950	50	60	4,87E+07	4,81E+07	4,81E+07	4,32E+07	4,53E+07
650	950	55	65	5,31E+07	5,24E+07	5,24E+07	4,67E+07	4,91E+07
650	1000	45	55	4,75E+07	4,69E+07	4,69E+07	4,23E+07	4,42E+07
650	1000	50	60	5,21E+07	5,15E+07	5,15E+07	4,61E+07	4,84E+07
650	1000	55	65	5,68E+07	5,60E+07	5,60E+07	4,98E+07	5,25E+07
650	1050	45	55	5,07E+07	5,01E+07	5,01E+07	4,50E+07	4,72E+07
650	1050	50	60	5,56E+07	5,50E+07	5,50E+07	4,90E+07	5,16E+07
650	1050	55	65	6,05E+07	5,98E+07	5,98E+07	5,30E+07	5,60E+07
650	1050	60	70	6,54E+07	6,46E+07	6,46E+07	5,68E+07	6,03E+07
700	950	45	55	4,65E+07	4,60E+07	4,60E+07	4,15E+07	4,34E+07
700	950	50	60	5,11E+07	5,05E+07	5,05E+07	4,53E+07	4,75E+07
700	950	55	65	5,57E+07	5,50E+07	5,50E+07	4,90E+07	5,16E+07
700	950	60	70	6,02E+07	5,94E+07	5,94E+07	5,26E+07	5,56E+07
700	1000	45	55	4,97E+07	4,92E+07	4,92E+07	4,43E+07	4,64E+07
700	1000	50	60	5,46E+07	5,40E+07	5,40E+07	4,83E+07	5,08E+07
700	1000	55	65	5,95E+07	5,88E+07	5,88E+07	5,22E+07	5,51E+07
700	1050	50	60	5,82E+07	5,75E+07	5,75E+07	5,14E+07	5,41E+07
700	1050	55	65	6,34E+07	6,26E+07	6,26E+07	5,55E+07	5,87E+07
700	1050	60	70	6,85E+07	6,77E+07	6,77E+07	5,96E+07	6,32E+07
700	1050	65	75	7,36E+07	7,26E+07	7,26E+07	6,36E+07	6,77E+07
700	1100	50	60	6,19E+07	6,12E+07	6,12E+07	5,45E+07	5,75E+07
700	1100	55	65	6,74E+07	6,66E+07	6,66E+07	5,89E+07	6,24E+07
700	1100	60	70	7,28E+07	7,19E+07	7,19E+07	6,32E+07	6,72E+07
700	1100	65	75	7,82E+07	7,72E+07	7,72E+07	6,74E+07	7,19E+07
750	950	50	60	5,35E+07	5,29E+07	5,29E+07	4,75E+07	4,98E+07
750	950	55	65	5,83E+07	5,76E+07	5,76E+07	5,13E+07	5,40E+07
750	950	60	70	6,30E+07	6,22E+07	6,22E+07	5,51E+07	5,82E+07
750	950	65	75	6,77E+07	6,69E+07	6,69E+07	5,89E+07	6,24E+07
750	1000	55	65	6,22E+07	6,15E+07	6,15E+07	5,47E+07	5,77E+07
750	1000	60	70	6,73E+07	6,64E+07	6,64E+07	5,87E+07	6,22E+07
750	1000	65	75	7,23E+07	7,14E+07	7,14E+07	6,27E+07	6,66E+07
750	1050	55	65	6,63E+07	6,55E+07	6,55E+07	5,81E+07	6,14E+07

750	1050	60	70	7,16E+07	7,07E+07	7,07E+07	6,23E+07	6,61E+07
750	1050	65	75	7,70E+07	7,60E+07	7,60E+07	6,65E+07	7,08E+07
750	1050	70	80	8,22E+07	8,11E+07	8,11E+07	7,06E+07	7,54E+07
750	1100	55	65	7,04E+07	6,96E+07	6,96E+07	6,15E+07	6,52E+07
750	1100	60	70	7,61E+07	7,51E+07	7,51E+07	6,60E+07	7,02E+07
750	1100	65	75	8,17E+07	8,07E+07	8,07E+07	7,05E+07	7,51E+07
750	1100	70	80	8,73E+07	8,62E+07	8,62E+07	7,48E+07	8,00E+07
750	1150	55	65	7,46E+07	7,37E+07	7,37E+07	6,51E+07	6,90E+07
750	1150	60	70	8,06E+07	7,96E+07	7,96E+07	6,98E+07	7,43E+07
750	1150	65	75	8,66E+07	8,55E+07	8,55E+07	7,45E+07	7,96E+07
750	1150	70	80	9,25E+07	9,13E+07	9,13E+07	7,90E+07	8,47E+07
800	1000	50	60	5,96E+07	5,89E+07	5,89E+07	5,28E+07	5,55E+07
800	1000	55	65	6,50E+07	6,42E+07	6,42E+07	5,71E+07	6,02E+07
800	1000	60	70	7,03E+07	6,94E+07	6,94E+07	6,13E+07	6,49E+07
800	1000	65	75	7,55E+07	7,45E+07	7,45E+07	6,55E+07	6,95E+07
800	1100	55	65	7,34E+07	7,25E+07	7,25E+07	6,42E+07	6,80E+07
800	1100	60	70	7,94E+07	7,84E+07	7,84E+07	6,89E+07	7,32E+07
800	1100	65	75	8,53E+07	8,42E+07	8,42E+07	7,35E+07	7,84E+07
800	1150	55	65	7,78E+07	7,68E+07	7,68E+07	6,78E+07	7,20E+07
800	1150	60	70	8,40E+07	8,30E+07	8,30E+07	7,28E+07	7,75E+07
800	1150	65	75	9,03E+07	8,91E+07	8,91E+07	7,77E+07	8,30E+07
800	1150	70	80	9,64E+07	9,52E+07	9,52E+07	8,24E+07	8,83E+07
800	1200	55	65	8,22E+07	8,12E+07	8,12E+07	7,15E+07	7,60E+07
800	1200	60	70	8,88E+07	8,77E+07	8,77E+07	7,67E+07	8,19E+07
800	1200	65	75	9,54E+07	9,42E+07	9,42E+07	8,19E+07	8,76E+07
800	1200	70	80	1,02E+08	1,01E+08	1,01E+08	8,69E+07	9,33E+07
800	1250	55	65	8,67E+07	8,57E+07	8,57E+07	7,53E+07	8,02E+07
800	1250	60	70	9,37E+07	9,26E+07	9,26E+07	8,08E+07	8,63E+07
800	1250	65	75	1,01E+08	9,93E+07	9,93E+07	8,61E+07	9,23E+07
800	1250	70	80	1,07E+08	1,06E+08	1,06E+08	9,14E+07	9,83E+07
800	1300	60	70	9,87E+07	9,75E+07	9,75E+07	8,48E+07	9,08E+07
800	1300	65	75	1,06E+08	1,05E+08	1,05E+08	9,05E+07	9,71E+07
800	1300	70	80	1,13E+08	1,12E+08	1,12E+08	9,60E+07	1,03E+08
800	1300	75	85	1,20E+08	1,19E+08	1,19E+08	1,01E+08	1,09E+08

Fonte: Autor (2024).

Tabela 13 - Catálogo de reforçadores leves utilizados

Dimensões [mm]				SM [mm <sup>3</sup> ]				
W1	W2	T1	T2	Fundo	Duplo Fundo	Costado	Bojo	Convés
80	140	10	15	9,51E+05	6,89E+05	6,89E+05	3,19E+05	2,66E+05
80	140	15	20	1,04E+06	7,82E+05	7,82E+05	4,23E+05	3,57E+05
80	160	10	15	9,34E+05	6,95E+05	6,95E+05	3,64E+05	3,09E+05
80	160	15	20	1,05E+06	8,09E+05	8,09E+05	4,85E+05	4,17E+05
80	180	10	15	9,34E+05	7,13E+05	7,13E+05	4,13E+05	3,56E+05

80	180	15	20	1,07E+06	8,49E+05	8,49E+05	5,53E+05	4,83E+05
100	160	10	15	9,73E+05	7,32E+05	7,32E+05	4,01E+05	3,43E+05
100	160	15	20	1,11E+06	8,65E+05	8,65E+05	5,41E+05	4,68E+05
100	180	10	15	9,76E+05	7,55E+05	7,55E+05	4,54E+05	3,95E+05
100	180	15	20	1,13E+06	9,11E+05	9,11E+05	6,15E+05	5,41E+05
100	180	20	25	1,29E+06	1,06E+06	1,06E+06	7,69E+05	6,84E+05
100	200	10	15	9,93E+05	7,87E+05	7,87E+05	5,11E+05	4,51E+05
100	200	15	20	1,18E+06	9,67E+05	9,67E+05	6,93E+05	6,19E+05
100	200	20	25	1,35E+06	1,15E+06	1,15E+06	8,69E+05	7,84E+05
120	160	10	15	1,01E+06	7,69E+05	7,69E+05	4,39E+05	3,77E+05
120	160	15	20	1,16E+06	9,21E+05	9,21E+05	5,97E+05	5,20E+05
120	180	10	15	1,02E+06	7,96E+05	7,96E+05	4,96E+05	4,33E+05
120	180	15	20	1,20E+06	9,72E+05	9,72E+05	6,76E+05	5,98E+05
120	180	20	25	1,37E+06	1,15E+06	1,15E+06	8,51E+05	7,60E+05
120	200	10	15	1,04E+06	8,32E+05	8,32E+05	5,56E+05	4,93E+05
120	200	15	20	1,24E+06	1,04E+06	1,04E+06	7,61E+05	6,82E+05
120	200	20	25	1,45E+06	1,24E+06	1,24E+06	9,58E+05	8,68E+05
140	180	10	15	1,06E+06	8,37E+05	8,37E+05	5,37E+05	4,71E+05
140	180	15	20	1,26E+06	1,03E+06	1,03E+06	7,38E+05	6,55E+05
140	200	10	15	1,09E+06	8,77E+05	8,77E+05	6,02E+05	5,35E+05
140	200	15	20	1,31E+06	1,10E+06	1,10E+06	8,28E+05	7,45E+05
140	200	20	25	1,54E+06	1,33E+06	1,33E+06	1,05E+06	9,52E+05
140	220	10	15	1,12E+06	9,26E+05	9,26E+05	6,71E+05	6,03E+05
140	220	15	20	1,38E+06	1,18E+06	1,18E+06	9,23E+05	8,40E+05
140	220	20	25	1,64E+06	1,43E+06	1,43E+06	1,17E+06	1,07E+06
140	240	15	20	1,46E+06	1,27E+06	1,27E+06	1,02E+06	9,42E+05
140	240	20	25	1,74E+06	1,55E+06	1,55E+06	1,29E+06	1,20E+06
140	240	25	30	2,03E+06	1,83E+06	1,83E+06	1,55E+06	1,46E+06
160	200	15	20	1,38E+06	1,17E+06	1,17E+06	8,95E+05	8,08E+05
160	200	20	25	1,63E+06	1,42E+06	1,42E+06	1,14E+06	1,04E+06
160	220	15	20	1,45E+06	1,25E+06	1,25E+06	9,96E+05	9,09E+05
160	220	20	25	1,74E+06	1,53E+06	1,53E+06	1,26E+06	1,17E+06
160	220	25	30	2,01E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,52E+06	1,42E+06
160	240	15	20	1,54E+06	1,35E+06	1,35E+06	1,10E+06	1,02E+06
160	240	20	25	1,85E+06	1,66E+06	1,66E+06	1,40E+06	1,30E+06
160	240	25	30	2,16E+06	1,96E+06	1,96E+06	1,68E+06	1,58E+06
160	260	20	25	1,98E+06	1,79E+06	1,79E+06	1,54E+06	1,45E+06
160	260	25	30	2,32E+06	2,13E+06	2,13E+06	1,85E+06	1,76E+06
160	260	30	35	2,66E+06	2,46E+06	2,46E+06	2,15E+06	2,07E+06
160	280	20	25	2,11E+06	1,93E+06	1,93E+06	1,68E+06	1,60E+06
160	280	25	30	2,49E+06	2,30E+06	2,30E+06	2,02E+06	1,94E+06
160	280	30	35	2,86E+06	2,67E+06	2,67E+06	2,35E+06	2,28E+06
180	220	20	25	1,84E+06	1,63E+06	1,63E+06	1,36E+06	1,26E+06
180	220	25	30	2,14E+06	1,93E+06	1,93E+06	1,64E+06	1,53E+06
180	240	20	25	1,96E+06	1,76E+06	1,76E+06	1,50E+06	1,40E+06

180	240	25	30	2,30E+06	2,09E+06	2,09E+06	1,81E+06	1,71E+06
180	240	30	35	2,63E+06	2,42E+06	2,42E+06	2,11E+06	2,01E+06
180	260	20	25	2,09E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,65E+06	1,55E+06
180	260	25	30	2,46E+06	2,27E+06	2,27E+06	1,99E+06	1,89E+06
180	260	30	35	2,83E+06	2,63E+06	2,63E+06	2,31E+06	2,23E+06
180	280	25	30	2,64E+06	2,46E+06	2,46E+06	2,17E+06	2,09E+06
180	280	30	35	3,05E+06	2,85E+06	2,85E+06	2,53E+06	2,45E+06
180	280	35	40	3,45E+06	3,25E+06	3,25E+06	2,87E+06	2,82E+06
180	300	25	30	2,83E+06	2,65E+06	2,65E+06	2,36E+06	2,28E+06
180	300	30	35	3,28E+06	3,09E+06	3,09E+06	2,74E+06	2,69E+06
180	300	35	40	3,71E+06	3,51E+06	3,51E+06	3,12E+06	3,08E+06
200	280	20	25	2,36E+06	2,18E+06	2,18E+06	1,92E+06	1,83E+06
200	280	25	30	2,80E+06	2,61E+06	2,61E+06	2,32E+06	2,23E+06
200	300	20	25	2,52E+06	2,34E+06	2,34E+06	2,08E+06	2,00E+06
200	300	25	30	3,00E+06	2,81E+06	2,81E+06	2,51E+06	2,44E+06
200	300	30	35	3,47E+06	3,28E+06	3,28E+06	2,93E+06	2,87E+06
200	340	20	25	2,87E+06	2,70E+06	2,70E+06	2,43E+06	2,36E+06
200	340	25	30	3,43E+06	3,25E+06	3,25E+06	2,93E+06	2,88E+06
200	340	30	35	3,98E+06	3,80E+06	3,80E+06	3,41E+06	3,39E+06
200	380	25	30	3,90E+06	3,73E+06	3,73E+06	3,37E+06	3,35E+06
200	380	30	35	4,54E+06	4,36E+06	4,36E+06	3,92E+06	3,94E+06
200	380	35	40	5,17E+06	4,98E+06	4,98E+06	4,44E+06	4,52E+06
200	400	25	30	4,14E+06	3,98E+06	3,98E+06	3,60E+06	3,60E+06
200	400	30	35	4,83E+06	4,65E+06	4,65E+06	4,18E+06	4,23E+06
200	400	35	40	5,51E+06	5,32E+06	5,32E+06	4,74E+06	4,85E+06
250	340	25	30	3,89E+06	3,71E+06	3,71E+06	3,36E+06	3,31E+06
250	340	30	35	4,54E+06	4,34E+06	4,34E+06	3,92E+06	3,91E+06
250	340	35	40	5,18E+06	4,97E+06	4,97E+06	4,46E+06	4,49E+06
250	380	25	30	4,41E+06	4,23E+06	4,23E+06	3,84E+06	3,83E+06
250	380	30	35	5,15E+06	4,96E+06	4,96E+06	4,48E+06	4,52E+06
250	380	35	40	5,89E+06	5,69E+06	5,69E+06	5,09E+06	5,19E+06
250	400	25	30	4,68E+06	4,51E+06	4,51E+06	4,09E+06	4,10E+06
250	400	30	35	5,47E+06	5,29E+06	5,29E+06	4,77E+06	4,83E+06
250	400	35	40	6,26E+06	6,06E+06	6,06E+06	5,42E+06	5,55E+06
250	440	25	30	5,25E+06	5,08E+06	5,08E+06	4,61E+06	4,67E+06
250	440	30	35	6,15E+06	5,96E+06	5,96E+06	5,37E+06	5,50E+06
250	440	35	40	7,03E+06	6,84E+06	6,84E+06	6,09E+06	6,31E+06
250	480	25	30	5,85E+06	5,69E+06	5,69E+06	5,16E+06	5,26E+06
250	480	30	35	6,86E+06	6,68E+06	6,68E+06	5,99E+06	6,19E+06
250	480	35	40	7,86E+06	7,66E+06	7,66E+06	6,79E+06	7,11E+06
250	500	25	30	6,17E+06	6,00E+06	6,00E+06	5,44E+06	5,57E+06
250	500	30	35	7,23E+06	7,05E+06	7,05E+06	6,31E+06	6,55E+06
250	500	35	40	8,28E+06	8,08E+06	8,08E+06	7,16E+06	7,52E+06

Fonte: Autor (2024).

## ANEXO A – Navio Modelo

Nesta seção se encontra a ficha técnica da embarcação (Figura 33) utilizada como modelo para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como a disposição de estruturas internas da embarcação (Figura 34).

Figura 33 - Ficha técnica do navio petroleiro modelo



### BRIGHTWAY: Suezmax tanker from HHIC-Phil

Shipbuilder: ..... **Hanjin Heavy Industry & Construction Co., Ltd**  
 Vessel's name: ..... **Brightway**  
 Hull No: ..... **NTP0059**  
 Owner/operator: ..... **Tanker Pacific Management**  
 Country: ..... **Singapore, India, UK**  
 Designer: ..... **Hanjin Heavy Industry & Construction Co., Ltd**  
 Country: ..... **Korea**  
 Model test establishment used: ..... **MOERI**  
 Flag: ..... **Singapore**  
 IMO number: ..... **9588146**  
 Total number of sister ship already completed (excluding ship presented): ..... **nil**  
 Total number of sister ships still on order: ..... **4**

**B**RIGHTWAY is the first in the series of four crude oil carriers that are to be constructed at HHIC-Phil, in the Philippines, for Tanker Pacific Management with Brightway was delivered in April with its sister vessels delivered later in the year.

The vessel has been designed and constructed according to Agip & Chevron Texaco requirements, Maritime Labour Convention 2006 and to ExxonMobil terms and conditions. The vessel is the first to have applied silicon paint on the propeller in HHIC-Phil. The vessel is classified by DNV with the special notation of CLEAN, which means that the vessels operation meets with the class' environmental standards.

The hull form takes advantage of the vessel's double skin configuration and has particularly fine lines aft of the vessel, which gives it a smooth flow through the water. Brightway is powered by a low speed MAN 6S70MC-C8 engine, also reducing the vessel's emissions and giving the vessel a service speed of 15.7knots.

The ship has a bulbous bow, transom stern and a continuous deck. The cargo areas has three longitudinal bulkheads with a double bottom and double hull, and consists of six pairs of cargo oil tanks, one pair of slop tanks and six pairs of water ballast tanks. All fuel oil tanks are of double skin and fully comply with the MARPOL 12A regulation for fuel oil tanks protection. The vessel also has a five-tiered deckhouse complying with the SOLAS visibility regulation and provides accommodation for a complement of 28 persons excluding Suez crew. The vessel also has two lifeboats installed with a capacity for 28 persons each.

The vessel has a cargo loading capacity of 176,500m<sup>3</sup> and fuel oil tank capacity of 3,500m<sup>3</sup>. Brightway's cruising range is about 17,000 nautical miles on the basis of 15.7knots considering three reserve days.

Accommodation including the navigation bridge and engine room are located aft of the vessel, with the cargo area consisting of triple cargo oil tanks (port, starboard and centre)

and one pair of slop tanks (port and starboard) with double bottom and double hull. Ultra low sulphur marine gas oil (ULSMGO) storage tanks, chiller unit and cooler have been installed to meet with the EU Directive/2005/33/EC. The dual ECDIS system provides the crew with continuous position and navigational safety information.

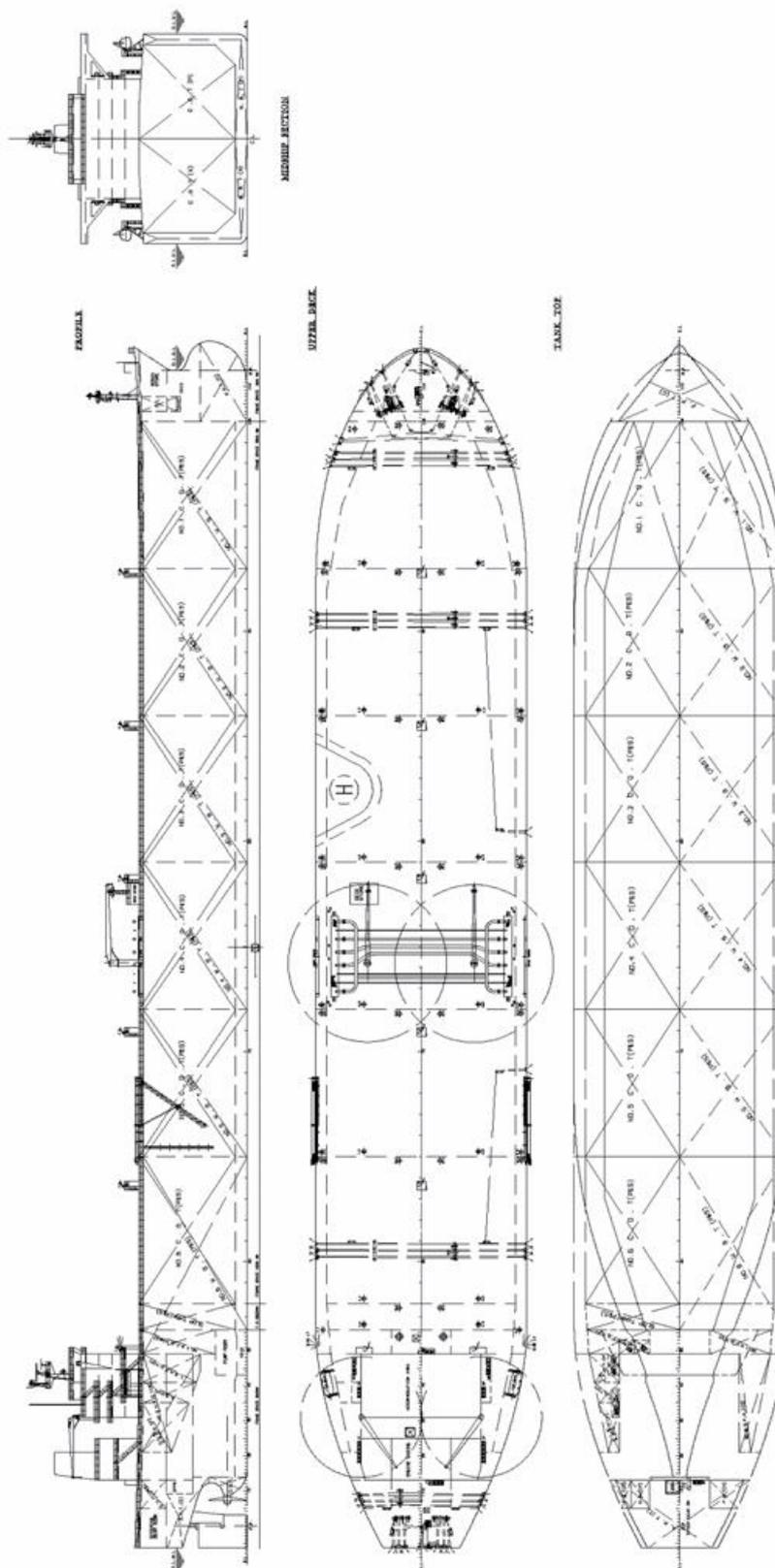
#### TECHNICAL PARTICULARS

Length oa: ..... 274.00m  
 Length bp: ..... 264.00m  
 Bread moulded: ..... 48.00m  
 Depth moulded: ..... 23.50m  
 To main deck: ..... 23.50m  
 Width of double skin  
 Side: ..... 2.55m  
 Bottom: ..... 2.70m  
 Draught  
 Scantling: ..... 17.20m  
 Design: ..... 16.00m  
 Gross: ..... 63,830gt  
 Displacement: ..... 185,000tonnes  
 Deadweight  
 Design: ..... 145,800dwt  
 Scantling: ..... 160,000dwt  
 Speed, service: ..... 15.7knots  
 Cargo capacity  
 Liquid volume: ..... 176,500m<sup>3</sup>  
 Bunkers  
 Heavy oil: ..... 3,600m<sup>3</sup>  
 Diesel oil: ..... 580m<sup>3</sup>  
 Water ballast: ..... 56,000m<sup>3</sup>  
 Daily fuel consumption  
 Main engine only: ..... 75tonnes/day  
 Auxiliaries: ..... 4.5tonnes/day  
 Classification society and notations: ..... DNV + 1A1, \*Tanker for oil ESP\*, EO, CSR, SPM, BIS, VCS-2B, BWM-E(S), COAT-PSP (B), CLEAN  
 Main engine  
 Design: ..... MAN Turbo Diesel  
 Model: ..... 6S70MC-C8  
 Manufacturer: ..... Hyundai Heavy Industries  
 Type of fuel: ..... HFO  
 Output of each engine: ..... 18,100kW  
 Propellers  
 Material: ..... Ni-Al-Bronze  
 Designer/manufacturer: ..... HHIC (TMS)/MMG  
 Fixed/controlable pitch: ..... Fixed  
 Diameter: ..... 8.3m  
 Speed: ..... 89rpm  
 Diesel-driven alternators  
 Engine make/type: ..... Hyundai/Himsen 5H21/32  
 Type of fuel: ..... HFO  
 Output/speed of each set: ..... 960kW x 900rpm  
 Alternator make/type: ..... Hyundai/HFC7 506-94K  
 Output/speed of each set: ..... 900kVA x 900rpm

Boilers  
 Type: ..... Oil-fired boiler  
 Make: ..... Aalborg  
 Output, each boiler: ..... 45,000gh/h x 16Bar  
 Cargo cranes/cargo gear  
 Make: ..... MCT  
 Type: ..... Electro-hydraulic cylinder lifting type  
 Performance: ..... SWL 20tonnes  
 Other cranes  
 Make: ..... Haean  
 Type: ..... Electric driven wire lifting type  
 Tasks: ..... Provision & engine part handling  
 Performance: ..... SWL 6.5tonnes/ 2tonnes  
 Mooring equipment  
 Make: ..... Pusnes  
 Type: ..... Electro-hydraulic  
 Special lifting/lifting equipment  
 Number of each and capacity: ..... 2 x 32 persons  
 Make: ..... DSB  
 Cargo tanks  
 Number: ..... 12 x cargo tanks + 2 slop tanks  
 Grades of cargo carried: ..... Crude oil having a flash point below 60°C  
 Coated tanks: ..... PPG SSC's epoxy (Sigmagrip 700) for crown area & bottom & slop tanks (full area)  
 Cargo pumps  
 Type: ..... Steam driven, vertical, reciprocating, duplex double acting  
 Make: ..... Shinko  
 Stainless steel: ..... Shaft  
 Capacity: ..... 3,800m<sup>3</sup>/h x 150m<sup>3</sup>H  
 Cargo control system  
 Make: ..... KSB Seal  
 Ballast control system  
 Make: ..... KSB Seal  
 Bridge control system  
 Make: ..... Hyundai Heavy Industries & construction Co., Ltd  
 Type: ..... Integrated navigation console  
 Fire detection system  
 Make: ..... Consilium  
 Type: ..... Salwico cargo  
 Fire extinguishing systems  
 Engine room: ..... NK/ high expansion foam  
 Radars  
 Make: ..... Japan Radio Co., Ltd  
 Model: ..... JMA-9133-SA, JMA-9123-9XA  
 Integrated bridge system  
 Make: ..... Japan Radio Co., Ltd  
 Waste disposal plant  
 Incinerator: ..... Hyundai/ MAXI NG 100SL WS  
 Sewage plant: ..... Jonghapi/ JMC-Bio Aerob-18N  
 Contract date: ..... 17 March 2012  
 Launch/Post-out date: ..... 28 October 2011  
 Delivery date: ..... 1 May 2012

Fonte: Significant Ships (2012).

Figura 34 - Disposição de estruturas da embarcação modelo



Fonte: Significant Ships (2012).