

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PNV3412 - MECÂNICA DE ESTRUTURAS NAVAIS E OCEÂNICAS II**

**MATHEUS MIRANDA VASCONCELOS  
RAFAEL BARRABAS STRIANI**

**PROJETO DA SEÇÃO MESTRA DE UM NAVIO PETROLEIRO**

**SÃO PAULO  
2024**

**MATHEUS MIRANDA VASCONCELOS  
RAFAEL BARRABAS STRIANI**

**PROJETO DA SEÇÃO MESTRA DE UM NAVIO PETROLEIRO**

Relatório parcial apresentado à disciplina PNV3412 (Mecânica de Estruturas Navais e Oceânicas II) do curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Área de concentração: Engenharia Naval e Oceânica.

Linha de pesquisa: Projeto e análise estrutural da seção mestra.

Orientador: Prof. Dr. Diego Felipe Sarzosa Burgos

**SÃO PAULO**

**2024**

## RESUMO

Este trabalho aborda a análise das normas estruturais da *International Association of Classification Societies* (IACS) e o dimensionamento dos elementos estruturais da seção mestra de um navio tipo PANAMAX. Primeiramente, será realizada uma revisão das diretrizes e regulamentações estabelecidas pela IACS, com foco nos requisitos específicos para a construção e segurança de navios petroleiros. Em seguida, aplicaremos esses critérios no projeto e na avaliação dos principais componentes estruturais da seção mestra. A formulação usada para o dimensionamento de cada elemento será detalhada, e um *sketch* ilustrativo da seção transversal projetada será apresentado. Os resultados serão organizados em tabelas, mostrando as dimensões de cada elemento e a separação entre eles. Por fim, será realizada análise da seção mestra projetada através do método dos elementos finitos com o software Abaqus. Os resultados obtidos serão comparados para validação do projeto.

**Palavras-chave:** Dimensionamento estrutural. Seção Mestra. CAE. Abaqus. Normas IACS. PANAMAX.

## ABSTRACT

This work addresses the analysis of structural standards set by the International Association of Classification Societies (IACS) and the **sizing** of structural elements for the PANAMAX ship's midship section. Initially, a review will be conducted on the guidelines and regulations established by IACS, focusing on specific requirements for the construction and safety of oil tankers. Subsequently, these criteria will be applied to the design and evaluation of the main structural components of the midship section. The formulation used for sizing each element will be detailed, accompanied by an illustrative sketch of the designed cross-sectional area. Results will be organized in tables showing the dimensions of each element and their spacing. Lastly, an analysis of the designed midship section will be performed using the finite element method with Abaqus software. The obtained results will be compared to validate the design.

**Keywords:** Structural design. Midship section. CAE. Abaqus. IACS structural rules. PANAMAX.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – ULCC HELLESPONT ALHAMBRA. . . . .	10
Figura 2 – Navio PANAMAX Hellenpont Pride. . . . .	12
Figura 3 – Respostas do navio nos casos de carga HSM - Avaliação de resistência. . . . .	17
Figura 4 – Arranjos típicos de seção mestra de petroleiros. . . . .	24
Figura 5 – Seção mestra inicial - Sem reforçadores. . . . .	25
Figura 6 – Seção mestra de referência com reforçadores. . . . .	26
Figura 7 – Seção mestra - Primeira iteração. . . . .	27
Figura 8 – Seção mestra - Segunda iteração. . . . .	28
Figura 9 – Modelagem computacional da seção mestra . . . . .	31
Figura 10 – Simetria em X. . . . .	32
Figura 11 – Deslocamento nulo nos pontos de referência. . . . .	32
Figura 12 – Pressão hidrostática. . . . .	33
Figura 13 – Momentos fletores adicionados. . . . .	34
Figura 14 – Malha gerada. . . . .	34
Figura 15 – Tensões em alquebramento (Von Mises). . . . .	35
Figura 16 – Tensões em alquebramento (Normais). . . . .	36
Figura 17 – Tensões em tosamento (Von Mises). . . . .	36
Figura 18 – Tensões em tosamento (Normais). . . . .	37

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Casos de carga EDW - Resumo . . . . .	16
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de projeto para o navio PANAMAX Hellenpont Pride. . . . .	12
Tabela 2 – Características do navio PANAMAX Hellenpont Pride. . . . .	13
Tabela 3 – Momentos fletores verticais . . . . .	19
Tabela 4 – Tabela de espessuras mínimas das chapas. . . . .	23
Tabela 5 – Tabela de espessuras mínimas dos reforçadores primários longitudinais. . .	23
Tabela 6 – Resumo de espessuras . . . . .	23
Tabela 7 – Tensões normais e Fatores de segurança sem reforçadores. . . . .	25
Tabela 8 – Tensões normais e Fatores de segurança com reforçadores - Iteração II. . . .	27
Tabela 9 – Tensões normais e Fatores de segurança com reforçadores - Iteração II. . . .	28
Tabela 10 – Síntese dos resultados finais. . . . .	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDW *Equivalent Design Wave*

HSM *Head Sea Moments*

IACS *International Association of Classification Societies*

IMO *Organização Marítima Internacional*

MPC *Multiple Point Constraint*

ULCC *Ultra Large Crude Carriers*

VLCC *Very Large Crude Carriers*



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REQUISITOS DE PROJETO</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>CARREGAMENTOS</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1	EDW - DYNAMIC LOADS AND EQUIVALENT DESIGN WAVE CONCEPT	15
3.2	MOMENTOS FLETORES . . . . .	17
<b>3.2.1</b>	<b>Fatores para análise</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculos</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA VIGA-NAVIO</b> . . . . .	<b>20</b>
4.1	TENSÕES NORMAIS ( $\sigma_L$ ) . . . . .	20
4.2	TENSÃO NORMAL ADMISSÍVEL ( $\sigma_{PERM}$ ) . . . . .	21
4.3	MOMENTO DE INÉRCIA E MÓDULO MÍNIMO DA SEÇÃO . . . . .	21
4.4	AVALIAÇÃO DA TENSÃO ATRAVÉS DE PROCESSO ITERATIVO . . . . .	21
<b>5</b>	<b>ESCANTILHÃO DA SEÇÃO MESTRA</b> . . . . .	<b>23</b>
5.1	ESPESSURA MÍNIMA DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS . . . . .	23
5.2	DUPLO FUNDO E DUPLO COSTADO . . . . .	24
5.3	DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA INICIAL DA SEÇÃO MESTRA . . . . .	24
5.4	REFORÇADORES . . . . .	26
5.5	ITERAÇÃO 1 . . . . .	27
5.6	ITERAÇÃO 2 . . . . .	28
<b>6</b>	<b>ANÁLISE POR ELEMENTO FINITOS</b> . . . . .	<b>30</b>
6.1	IMPLEMENTAÇÃO DO ESCANTILHÃO . . . . .	30
<b>6.1.1</b>	<b>Distância entre anteparas</b> . . . . .	<b>30</b>
6.2	ESPAÇAMENTO CAVERNAS . . . . .	30
6.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO . . . . .	31
<b>6.3.1</b>	<b>Simetria no eixo X no costado</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Deslocamento nulo no eixo Y e Z dos pontos de referência</b> . . . . .	<b>32</b>
6.4	CARREGAMENTOS . . . . .	33
<b>6.4.1</b>	<b>Pressão Hidrostática</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Momentos fletores</b> . . . . .	<b>34</b>
6.5	MALHA . . . . .	34
6.6	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES . . . . .	35
<b>6.6.1</b>	<b>Alquebramento</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>6.6.2</b>	<b>Tosamento</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS FINAIS</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>39</b>

<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>40</b>
<b>ANEXO A – ESBOÇO DETALHADO DA SEÇÃO MESTRA FINAL OBTIDA</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGOS EM PYTHON PARA CÁLCULOS E ITE- RAÇÕES</b> . . . . .	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os navios petroleiros desempenham um papel crucial no transporte global de petróleo bruto e seus derivados. Esses navios são projetados para transportar grandes volumes de carga líquida de maneira eficiente e segura, desde as áreas de produção até os centros de refino e distribuição ao redor do mundo. Os petroleiros variam significativamente em tamanho, desde pequenos "coastal tankers" até os enormes *Very Large Crude Carriers* (VLCCs) e *Ultra Large Crude Carriers* (ULCCs). A carga transportada pelos petroleiros é valiosa e perigosa, exigindo cuidados especiais em seu manuseio e transporte devido à inflamabilidade do petróleo e aos graves impactos ambientais que podem resultar de um derramamento.

Figura 1 – ULCC HELLESPONT ALHAMBRA.



442.470 toneladas de deslocamento (dwt) e 380 metros de comprimento (LOA)

Fonte: Extraído de (WARTSILA, 2024).

Diante disso, é necessário realizar análises estruturais na fase de projeto para assegurar que os navios possam resistir às condições operacionais, garantindo a segurança da tripulação, da carga e do ambiente. Um projeto bem-executado não apenas otimiza a eficiência operacional, mas também minimiza os riscos associados à operação de navios petroleiros. Para isso, as sociedades classificadoras estabelecem normas técnicas e de segurança, garantindo conformidade com regulamentações internacionais, padronização e segurança.

Nesse contexto, o presente trabalho se concentra no projeto estrutural de uma seção mestra de um navio petroleiro, com base nas normas estabelecidas pela *International Association of Classification Societies* (IACS). A seção mestra é uma parte crítica do navio, onde os principais elementos estruturais são dimensionados para garantir a integridade estrutural e a segurança durante a operação.

Nos capítulos posteriores, abordaremos a formulação utilizada para o dimensionamento de cada elemento estrutural da seção mestra, apresentando uma tabela resumo e um esboço da seção transversal projetada. Em seguida, implementaremos a seção projetada no software Abaqus, utilizando as condições de carregamento apropriadas, e analisaremos as tensões por meio do

método dos elementos finitos, comparando com os resultados analíticos obtidos com a norma IACS.

## 2 REQUISITOS DE PROJETO

O objetivo deste projeto é definir a seção mestra resistente do navio petroleiro **PANAMAX Hellespont Pride** utilizando as regras das sociedades classificadoras, especificamente a IACS: *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers*.

Figura 2 – Navio PANAMAX Hellespont Pride.



HELLESPONT PRIDE (IMO: 9351414): Construído em 2007, é um navio PANAMAX tanque (*Crude Oil Tanker*). Navega sob a bandeira do Reino Unido.

Fonte: Extraído de (Maritime Optima, 2023).

O projeto será baseado nas características de projeto da embarcação com custo mínimo (coluna 4 da Tabela 2).

Tabela 1 – Requisitos de projeto para o navio PANAMAX Hellespont Pride.

Descrição	Valor
Peso Morto [Ton]	73727
Autonomia [Milhas Náuticas]	16801,85
Velocidade [Nós]	15
$\gamma_{carga}$ [Ton/m <sup>3</sup> ]	0,8674
Vida Útil [anos]	30

Fonte: Extraído de (SARZOSA, 2024).

Tabela 2 – Características do navio PANAMAX Hellespont Pride.

Parâmetro	Projeto PATANGA	Panamax Hellespont Pride	Mínimo Custo	Mínimo OM
$C_{LB}$	7,3	7,1	5,1	7,3
$C_{BT}$	2,4	2,2	2,2	2,4
$C_B$	0,834	0,847	0,741	0,834
$h_{db}$	2,64	2,00	1,07	2,69
$w$	1,78	2,0	1,02	1,78
$N_{CARGO}$	7	6	4	8
$P_{systyp}$	2	1	2	2
$N_{POPA}$	2		2	2
ManFac	0,50		0,51	0,51
$H_{DK}$	2,1	2,75	2,7	2,1
Comprimento -LWL- [m]	238,56	228,60	183,83	238,36
Boca -B- [m]	32,77	32,26	36,05	32,74
Pontal -D- [m]	21,13	20,80	25,83	21,38
Calado -T- [m]	13,83	14,52	16,24	13,87
$C_x$	0,995		0,999	0,994
$N_{TRIPULAÇÃO}$	12	36	13	13
$\Delta$ [Ton]	92861,05	89343,70	82122,42	93020,69
Carga [Ton]	70627,38	70554,07	70794,48	70625,32
Peso Casco [Ton]	15541,92	13113,85	5529,87	15695,87
Peso Outfit [Ton]	1851,66	<b>1758,98</b>	1787,09	1849,50
Peso Sist. Propulsor [Ton]	691,28	<b>743,87</b>	589,12	691,28
MCR [HP]	17740	15155,6	15910	17740
Velocidade -Vs- [nós]	15,20	15	15,10	15,20
$(GM/B)_{\text{astro}}$	0,048	<b>0,057</b>	0,038	0,048
$(GM/B)_{\text{carregado}}$	0,215	<b>0,228</b>	0,305	0,218
Custo Construção (US \$)	60,24	57,64	45,33	60,39
Custo Total (Milhões US \$)	108,02	108,15	87,34	109,73
Vazamento Médio (OM)	0,0106	0,010	<b>0,0590</b>	0,0100

Fonte: Extraído de (SARZOSA, 2024).

Nos próximos capítulos, de acordo com as normas estabelecidas, serão determinados:

1. **Análise dos carregamentos:** Momentos fletores de onda (Estáticos + Dinâmicos)

- Alquebramento (*Hogging*).
- Tosamento (*Sagging*).

2. **Caracterização da viga-navio:**

- Momento de inércia e módulo da seção da viga-navio
- Avaliação da flexão

### 3. Escolha dos Escantilhões:

- Espessuras do chapeamento (fundo, duplo fundo, costado, duplo costado, convés, anteparas transversais e longitudinais).
- Módulos resistentes (inércia e área) dos reforçadores de cada chapeamento.

### 4. Dimensionamento Estrutural:

- Separação entre anteparas, determinada pelo comprimento alagável.
- Separação entre cavernas (*frames*) e transversais gigantes (*solid floors*).
- Separação entre reforçadores longitudinais leves e pesados.

Este projeto será conduzido de forma iterativa, com cálculos e análises de inércia e tensões para assegurar que o navio esteja em conformidade com os padrões de segurança. Para tanto, serão consideradas as seguintes simplificações:

1. Verificação será limitada à resistência à flexão.
2. Calado de projeto será utilizado para definir a condição de carga.
3. Critério de projeto será baseado em um fator de segurança ao escoamento, variando entre 1.5 e 3.0 para todos os pontos materiais da estrutura.

### 3 CARREGAMENTOS

#### 3.1 EDW - DYNAMIC LOADS AND EQUIVALENT DESIGN WAVE CONCEPT

Os carregamentos dinâmicos associados a cada caso de carga dinâmica são baseados no conceito de Onda de Projeto Equivalente (EDW - *Equivalent Design Wave*). Esse conceito aplica um conjunto consistente de cargas dinâmicas ao navio, de forma que a resposta dominante especificada seja equivalente ao valor de resposta de longo prazo requerido. Os diferentes casos de carga podem ser visualizados no Quadro 1.

EDWs são utilizadas para garantir que as cargas dinâmicas aplicadas ao navio simulem de forma realista as condições que ele enfrentará ao longo de sua vida útil. Elas são selecionadas de maneira que a resposta de carga dominante, como o momento fletor vertical, em um cenário dinâmico específico corresponda ao valor esperado dessa resposta ao longo de um período prolongado de operação. Isso permite que a avaliação estrutural leve em consideração os efeitos das cargas dinâmicas significativas, proporcionando uma base confiável para garantir a integridade estrutural do navio sob condições operacionais variadas e desafiadoras.

Em um contexto prático, o estudo da resistência estrutural deve ser conduzido para todas as condições de carga de projeto, e a avaliação final deve ser baseada na condição que exigir maior resistência.

Entretanto, devido à simplificação imposta no trabalho, será verificada unicamente a resistência flexional usando os momentos fletores de onda definidos por norma, considerando a condição de carga pelo calado de projeto (SARZOSA, 2024). Para tanto, serão analisados os casos de carga dinâmica HSM-1 e HSM-2 (*Head Sea Moments*), utilizados para representar situações de mar de proa que minimizam e maximizam, respectivamente, o momento fletor vertical à meia-nau. Esses cenários são críticos para entender como o navio responderá às forças aplicadas durante sua operação e assegurar que a estrutura do navio seja dimensionada adequadamente para suportar essas cargas.




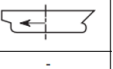
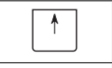



Quadro 1 – Casos de carga EDW - Resumo

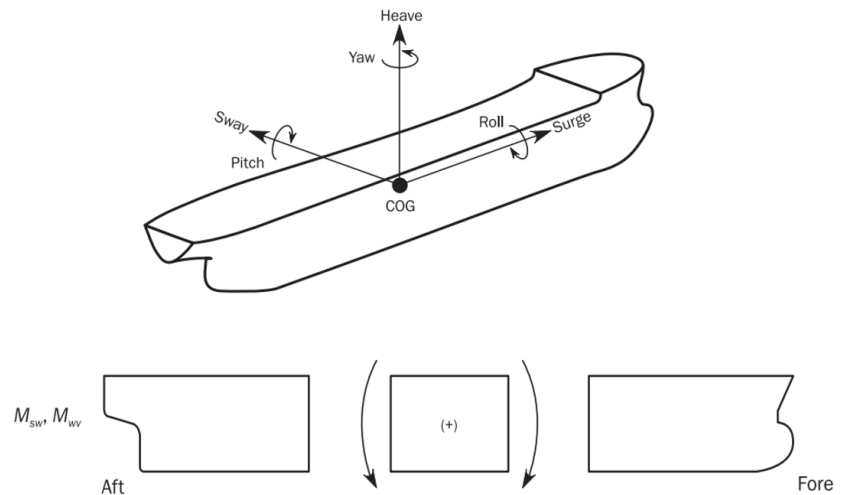
<b>Categoria</b>	<b>Caso de Carga</b>	<b>Descrição</b>
<b>HSM</b>	HSM-1	Ondas de proa que minimizam o momento fletor vertical da onda no meio do navio.
	HSM-2	Ondas de proa que maximizam o momento fletor vertical da onda no meio do navio.
<b>HSA</b>	HSA-1	Ondas de proa que maximizam a aceleração vertical do mar na proa.
	HSA-2	Ondas de proa que minimizam a aceleração vertical do mar na proa.
<b>FSM</b>	FSM-1	Ondas de popa que minimizam o momento fletor vertical da onda no meio do navio.
	FSM-2	Ondas de popa que maximizam o momento fletor vertical da onda no meio do navio.
<b>BSR</b>	BSR-1P	Ondas de través do lado de bombordo que minimizam o movimento de rolamento.
	BSR-2P	Ondas de través do lado de bombordo que maximizam o movimento de rolamento.
	BSR-1S	Ondas de través do lado de boreste que maximizam o movimento de rolamento.
	BSR-2S	Ondas de través do lado de boreste que minimizam o movimento de rolamento.
<b>BSP</b>	BSP-1P	Ondas de través do lado de bombordo que maximizam a pressão hidrodinâmica na linha d'água.
	BSP-2P	Ondas de través do lado de bombordo que minimizam a pressão hidrodinâmica na linha d'água.
	BSP-1S	Ondas de través do lado de boreste que maximizam a pressão hidrodinâmica na linha d'água.
	BSP-2S	Ondas de través do lado de boreste que minimizam a pressão hidrodinâmica na linha d'água.
<b>OST</b>	OST-1P	Ondas oblíquas do lado de estibordo que minimizam o momento de torção a 0,25L da proa.
	OST-2P	Ondas oblíquas do lado de estibordo que maximizam o momento de torção a 0,25L da proa.
	OST-1S	Ondas oblíquas do lado de bombordo que maximizam o momento de torção a 0,25L da proa.
	OST-2S	Ondas oblíquas do lado de bombordo que minimizam o momento de torção a 0,25L da proa.
<b>OSA</b>	OSA-1P	Ondas oblíquas do lado de bombordo que maximizam a aceleração de arfagem.
	OSA-2P	Ondas oblíquas do lado de bombordo que minimizam a aceleração de arfagem.
	OSA-1S	Ondas oblíquas do lado de boreste que maximizam a aceleração de arfagem.
	OSA-2S	Ondas oblíquas do lado de boreste que minimizam a aceleração de arfagem.

Fonte: Extraído de (IACS, 2024).

Antes de iniciar as contas, é importante tratarmos sobre os referenciais e notações que serão utilizadas.

Figura 3 – Respostas do navio nos casos de carga HSM - Avaliação de resistência.

Loadcase	HSM-1	HSM-2
EDW	HSM	
Heading	Head	
Effect	Max. bending moment	
VWBM	Sagging	Hogging
VWSF	Negative-aft Positive-fore	Positive-aft Negative-fore
HWBM	-	-
TM	-	-
Surge	To stern	To bow
$a_{surge}$		
Sway	-	-
$a_{sway}$	-	-
Heave	Down	Up
$a_{heave}$		
Roll	-	-
$a_{roll}$	-	-
Pitch	Bow down	Bow up
$a_{pitch}$		



Fonte: Adaptado de (IACS, 2024).

## 3.2 MOMENTOS FLETORES

Primeiramente, ressalta-se que todos os dados apresentados a seguir foram extraídos do Capítulo 4, Seções 2 e 4 de (IACS, 2024).

### 3.2.1 Fatores para análise

- $f_{xL} = x/L$ : Razão entre a coordenada X do ponto de carga e o comprimento do navio.

$$\text{Para seção mestra } (x = 0.5L): f_{xL} = 0.5. \quad (3.1)$$

- $f_{lp}$ : Fator dependente da posição longitudinal ao longo do navio, a ser considerado como:

$$f_{lp} = 1 \text{ para } x/L \leq 0.5L. \quad (3.2)$$

- $C_{wv}$ : Fator de combinação de carga a ser aplicado ao momento fletor vertical da onda.

$$C_{wv} = -1 \text{ para HSM-1 e } C_{wv} = 1 \text{ para HSM-2} \quad (3.3)$$

- $C_w$ : Coeficiente de onda.

$$C_w = 10,75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1,5} \text{ para } 90m \leq L \leq 300m, \quad (3.4)$$

Considerando  $L = LWL = 183,83m$  (vide Tabela 2):  $C_w \approx 9,50$

- $f_\beta$ : Fator de correção de rumo. Para casos de carga HSM e FSM para o cenário de carga de projeto de cargas marítimas extremas, esse fator vale:

$$f_\beta = 1,05 \quad (3.5)$$

- $f_{sw}$  : Fator de distribuição ao longo do comprimento do navio.

$$f_{sw} = 1 \text{ para } 0,3L \leq x \leq 0,7L \quad (3.6)$$

- $f_{nl-vh}$  : Coeficiente que considera efeitos não lineares aplicados ao arqueamento.

$$f_{nl-vh} = 1 \text{ para avaliação de resistência} \quad (3.7)$$

- $f_{nl-vs}$  : Coeficiente que considera efeitos não lineares aplicados ao tosamento.

$$f_{nl-vs} = 0,58 \left( \frac{C_B + 0,7}{C_B} \right) \text{ para avaliação de resistência} \quad (3.8)$$

Considerando  $C_B = 0,741$  (vide Tabela 2):  $f_{nl-vs} \approx 1,128$

- $f_{ps}$  : Coeficiente para avaliações de resistência que depende do cenário de carga de projeto aplicável.

$$f_{ps} = 1.0 \text{ para cenário de carga de projeto de cargas marítimas extremas.} \quad (3.9)$$

- $f_m$  : Fator de distribuição para o momento fletor vertical da onda ao longo do comprimento do navio.

$$f_m = 1 \text{ para } 0,4L \leq x \leq 0,65L \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Cálculos

Levando em conta os fatores apresentados anteriormente e as características do navio na Tabela 2 ( $L = LWL = 183,83m$ ,  $B = 36,05m$ ,  $C_B = 0,741$ ), temos os seguintes momentos na seção mestra:

- **Momento fletor devido a ondas (*M<sub>wv</sub> - Wave Vertical*)**

– **Alquebramento:**

$$M_{wv-h} = 0,19 f_{nl-vh} f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B \quad (3.11)$$

$$\therefore M_{wv-h-mid} = 1,629 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot m$$

– **Tosamento:**

$$M_{wv-s} = -0,19 f_{nl-vs} f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B \quad (3.12)$$

$$\therefore M_{wv-s-mid} = -1,837 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot m$$

- **Momento fletor em águas paradas ( $M_{sw}$  - Still Water)**

- **Alquebramento:**

$$M_{sw-h-min} = f_{sw}(171C_wL^2B(C_B + 0,7)10^{-3} - M_{wv-h-mid}) \quad (3.13)$$

$$\therefore M_{sw-h-min} = 1,222 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3.14)$$

- **Tosamento:**

$$M_{sw-s-min} = -0,85f_{sw}(171C_wL^2B(C_B + 0,7)10^{-3} + M_{wv-s-mid}) \quad (3.15)$$

$$\therefore M_{sw-s-min} = -0,862 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3.16)$$

- **Cargas dinâmicas**

O momento fletor vertical para os casos de carga dinâmica HSM-1 e HSM-2 podem ser obtidos da seguinte forma:

Tabela 3 – Momentos fletores verticais

Caso	Fator de combinação de carga	Momento fletor ( $M_{wv-LC}$ - $kN \cdot m$ )
HSM-2	$C_{wv} \geq 0$	$f_{\beta}C_{wv}M_{wv-h-mid} = 1,711 \cdot 10^6$
HSM-1	$C_{wv} < 0$	$f_{\beta}C_{wv} M_{wv-s-mid}  = -1,929 \cdot 10^6$

Fonte: Adaptado de (IACS, 2024).

Finalmente, de acordo com o Capítulo 4, Seção 7, Tabela 1 de (IACS, 2024), temos que o momento fletor vertical total (estático + dinâmico) em condições de navegação com cargas marítimas extremas é:

$$M_T = M_{sw} + M_{wv-LC} = \begin{cases} -2,791 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{para HSM-1} \\ 2,933 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{para HSM-2} \end{cases} \quad (3.17)$$

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA VIGA-NAVIO

Conforme determinado no escopo do trabalho, iremos dimensionar os momentos de inércia e o módulo da seção da viga-navio para que atenda aos requisitos do projeto, incluindo o fator de segurança escolhido.

Ressalta-se que iremos realizar o dimensionamento de tal forma que a seção mestra mantenha-se dentro do regime elástico. Dessa forma, iremos empregar as diretrizes contidas na Seção 1 (*Hull Girder Yielding Strength*) do Capítulo 5 de (IACS, 2024).

Com os valores do carregamento obtidos no capítulo anterior, podemos aplicar o formulário correspondente à determinação de tensões normais no convés principal (*strength deck*) e no fundo, estabelecendo a tensão máxima projetada e, em seguida, fazer o caminho reverso para encontrarmos o momento de inércia necessário.

Além disso, a seção correspondente estabelece um momento de inércia mínimo necessário que, ao aplicarmos os carregamentos estáticos e dinâmicos, excede a capacidade de trabalho do material. Dessa forma, empregaremos esse momento como base em um processo iterativo para atingirmos os valores desejados de tensão normal.

### 4.1 TENSÕES NORMAIS ( $\sigma_L$ )

Empregando a Tabela 2 da Seção 1 do Capítulo 5 de (IACS, 2024), temos os seguintes valores de tensões normais (MPa) para o navio no mar:

1. Para qualquer ponto abaixo do convés principal:

$$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_\beta M_{wv}}{Z_{A-n50}} 10^{-3} \quad (4.1)$$

2. No fundo:

$$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_\beta M_{wv}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \quad (4.2)$$

3. No convés principal:

$$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_\beta M_{wv}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \quad (4.3)$$

$Z_{Y-n50}$  representa o módulo da seção na posição vertical 'Y'. 'A' é um ponto qualquer abaixo do convés principal, 'B' é o fundo do casco e 'D' é o convés. Esta grandeza está relacionada com o momento de inércia em relação ao eixo que passa pela linha neutra ( $I_{y-n50}$ ) e a altura da linha neutra ( $Z_n$ ) da seguinte forma:

$$Z_{Y-n50} = \frac{I_{y-n50}}{|Z_Y - Z_n|} \quad (4.4)$$

#### 4.2 TENSÃO NORMAL ADMISSÍVEL ( $\sigma_{perm}$ )

De acordo com a norma, a tensão normal admissível em flexão para a seção mestra deve ser calculada como:

$$\sigma_{perm} = \frac{190}{k}, \quad (4.5)$$

sendo  $k$  o fator de material (adotado como 1.0 para aço com tensão de escoamento 235MPa).

Como requisito de projeto, o fator de segurança da estrutura deverá estar na faixa de 1.5 a 3.0. Dessa forma, se considerarmos aço com tensão de escoamento de 235 MPa, a tensão máxima admissível será de aproximadamente 157 MPa.

#### 4.3 MOMENTO DE INÉRCIA E MÓDULO MÍNIMO DA SEÇÃO

O momento de inércia e o módulo da seção mínimo para a seção mestra do navio é dado pelas expressões abaixo.

$$I_{yR} = 2,7C_W L^3 B(C_B + 0,7)10^{-8} \quad (4.6)$$

$$Z_R = 0,9kC_W L^2 B(C_B + 0,7)10^{-6} \quad (4.7)$$

Substituindo os valores das características do navio conforme Tabela 2, temos:

$$I_{yR} = 82,797 \quad m^4$$

$$Z_R = 15,010 \quad m^3$$

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA TENSÃO ATRAVÉS DE PROCESSO ITERATIVO

Inicialmente será admitindo a altura da linha neutra no meio da seção como uma aproximação inicial<sup>1</sup>, ou seja,  $Y_{LN} = 12.5m$ . Além disso, consideraremos o caso em que o momento total (estático + dinâmico) é maior, conforme Equação 3.17. Portanto, para a condição HSM-2 (tosamento), temos:

$$M_{sw-h} = 1,222 \cdot 10^6 \quad kN.m$$

$$M_{wv-h} = 1,629 \cdot 10^6 \quad kN.m$$

Dessa forma, utilizando o momento de inércia mínimo e as Equações 4.2 e 4.3, chega-se aos seguintes valores de tensão no fundo e no convés:

$$\sigma_{fundo} = -442,954 \quad MPa$$

$$\sigma_{convés} = +442,954 \quad MPa$$

<sup>1</sup> Como a linha neutra foi inicialmente considerada no meio da seção, obteremos módulos de tensões iguais no fundo e no convés, pois as distâncias em relação à linha neutra serão idênticas.

Tais valores claramente excedem a tensão de escoamento do material. Através de um processo iterativo presente no arquivo HG\_Strength.py, pode-se chegar ao valor do momento de inércia requerido pelos requisitos de projeto. Esse processo aumenta o momento de inércia mínimo, mantendo a altura da linha neutra, e calcula as tensões até que a tensão calculada seja menor que a máxima permitida. Assim, o momento de inércia requerido é:

$$I_{req} = 234 \quad m^4$$

Como verificação, obtemos que os módulos de seção do fundo e do convés são válidos, pois são maiores que o mínimo permitido.

$$Z_F = Z_C = \frac{234}{12,5} = 18,72 \quad m^3 > Z_R$$

As tensões obtidas no fundo e no convés com esse momento de inércia e linha neutra são:

$$\sigma_{fundo} = -157 \quad MPa$$

$$\sigma_{convés} = 157 \quad MPa$$

Dado que o projeto de um navio segue um espiral de projeto, já possuímos um valor inicial para a iteração da seção mestra. A próxima etapa será ajustar o momento de inércia ao valor obtido anteriormente, verificando as tensões resultantes. Destaca-se que a metodologia desenvolvida não apenas analisa o momento de inércia, mas o utiliza como uma diretriz para alcançar os resultados desejados de tensões e fatores de segurança.

## 5 ESCANTILHÃO DA SEÇÃO MESTRA

Uma vez conhecido o momento de inércia necessário da seção mestra, podemos definir o escantilhão da seção através do Capítulo 6 (*Hull Local Scantling*) de (IACS, 2024).

### 5.1 ESPESURRA MÍNIMA DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Analisando as Tabelas 1 e 3 da Seção 3 para os elementos que consideraremos, temos:

Tabela 4 – Tabela de espessuras mínimas das chapas.

<b>Elemento</b>	<b>Espessura</b>
Flange da quilha	7,5 + 0,03 L
Fundo, Costado e Bojo	5,5 + 0,03 L
Convés principal	4,5 + 0,02 L
Teto do duplo fundo	5,5 + 0,03 L
Anteparas longitudinais e transversais estanques	4,5 + 0,02 L
Outros elementos	4,5 + 0,01 L

Fonte: Adaptado de (IACS, 2024).

Tabela 5 – Tabela de espessuras mínimas dos reforçadores primários longitudinais.

<b>Elemento</b>	<b>Espessura</b>
Alma da quilha	5,5 + 0,025 L
Outros elementos primários (em área de carga de óleo)	5,5 + 0,015 L

Fonte: Adaptado de (IACS, 2024).

Portanto, considerando o comprimento de linha d'água do PANAMAX Hellenpont Pride, obtemos as espessuras mínimas da Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo de espessuras

<b>Elemento</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Flange da quilha	13
Fundo, Costado e Bojo	11
Convés principal	8
Teto do duplo fundo	11
Anteparas longitudinais e transversais estanques	8
Outros elementos	6
Alma da quilha	10
Outros elementos primários (em área de carga de óleo)	8

Fonte: Autoria própria.



## 5.2 DUPLO FUNDO E DUPLO COSTADO

De acordo com a Seção 3 do Capítulo 2 (*General Arrangement Design*) de (IACS, 2024), a altura do duplo fundo e a largura do duplo costado são dimensionadas da seguinte forma:

$$H_{duplo-fundo} = \max\left(\frac{B}{15}; 2, 0\right) \quad (5.1)$$

$$H_{duplo-costado} = \max\left(0, 5 + \frac{DWT}{20000}; 1, 0\right) \quad (5.2)$$

Dessa maneira, para  $B = 36,05m$  e  $DWT = 73727ton$ , temos que:

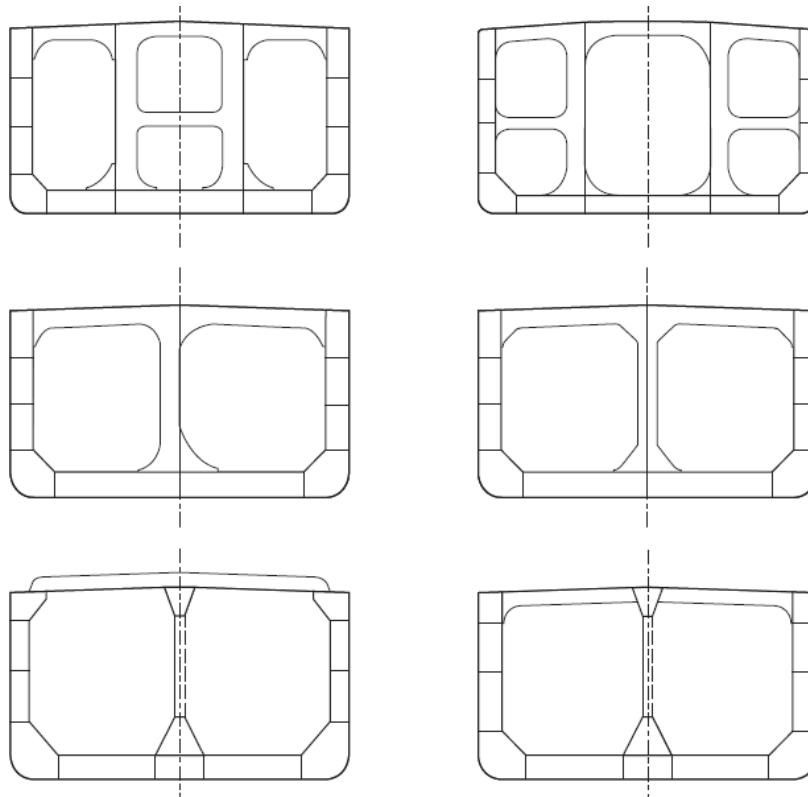
$$H_{duplo-fundo} = 2,4 \quad m$$

$$H_{duplo-costado} = 4,18 \quad m$$

## 5.3 DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA INICIAL DA SEÇÃO MESTRA

Tendo em vista os arranjos típicos de seção mestra de petroleiros, pode-se iniciar o cálculo do momento de inércia sem a presença de reforçadores.

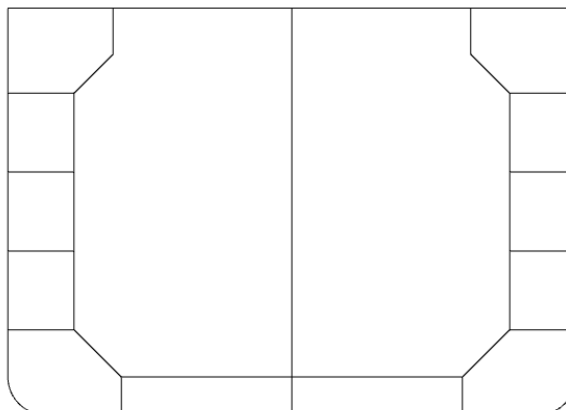
Figura 4 – Arranjos típicos de seção mestra de petroleiros.



Fonte: Extraído de (IACS, 2024).

Diante disso, para o início do processo, foi considerado o seguinte arranjo sem a presença de reforçadores.

Figura 5 – Seção mestra inicial - Sem reforçadores.



Fonte: Autoria própria.

Através do código "Stiffeners\_2\_it.py" presente no Apêndice A, foram calculados o momento de inércia e a altura da linha neutra da seção sem os reforçadores, obtendo-se o valor de:

$$I_{SM} = 227,34 \quad m^4$$

$$Y_{LN} = 8,34 \quad m$$

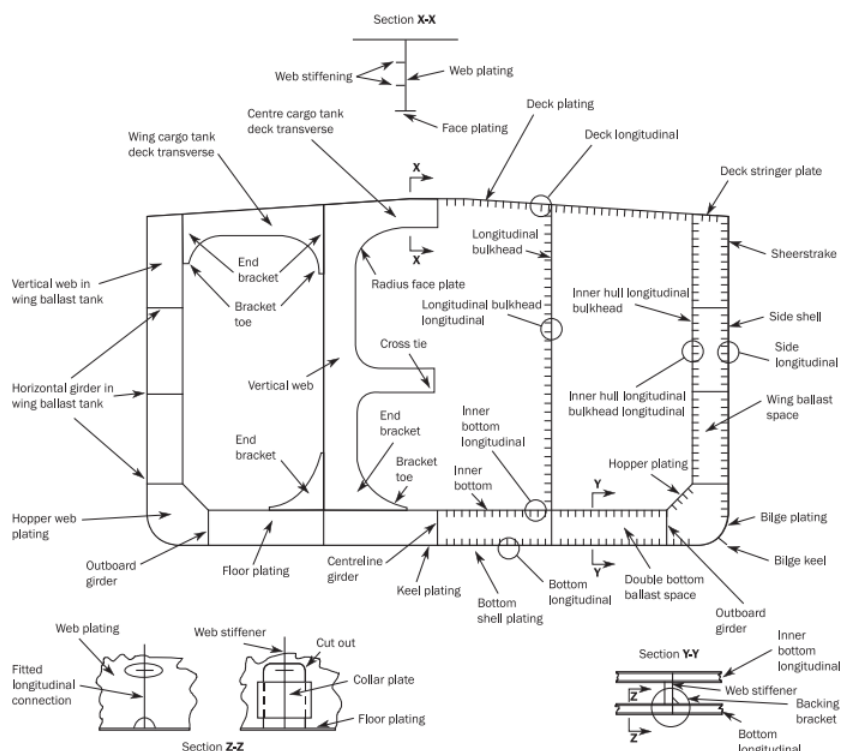
Tabela 7 – Tensões normais e Fatores de segurança sem reforçadores.

<b>Alquebramento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	214,97	1,09
Fundo	-107,56	2,18
<b>Tosamento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	-198,70	1,18
Fundo	99,42	2,36

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que os fatores de segurança para as tensões no convés não estão dentro do esperado. Como a linha neutra está abaixo do centro da seção ( $8,34 \leq 12,5m$ ), é esperado que as tensões no convés sejam maiores. Somado a isso, o momento de inércia está abaixo do requerido naquela condição, aumentando ainda mais as tensões. Para atingirmos o valor necessário ( $I_{SM} \geq I_{req}$ ), será necessário empregar reforçadores ao longo da estrutura.

Figura 6 – Seção mestra de referência com reforçadores.



Fonte: Extraído de (IACS, 2024).

#### 5.4 REFORÇADORES

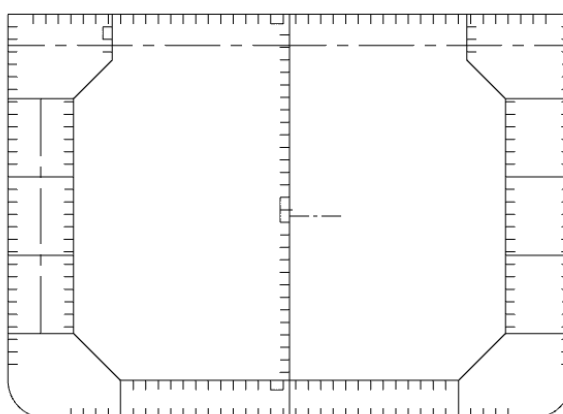
Tendo a seção representada na Figura 6 como referência, foram empregados dois tipos de reforçadores para a estrutura, com características semelhantes, de tal forma que facilitem a implementação do código, ambos com espessuras de 9 mm.

1. **Reforçador tipo T** - Altura da alma: 600mm | Largura da flange: 300mm
2. **Reforçador tipo L** - Altura da alma: 600mm | Largura da flange: 150mm

## 5.5 ITERAÇÃO 1

Como valor inicial de separação entre reforçadores, optou-se pelo mínimo previsto na norma de 800 mm para estruturas rígidas longitudinalmente no duplo costado, ou seja, verticalmente. Esse distanciamento foi estendido para as estruturas horizontais no duplo fundo e no convés principal, assim como para o distanciamento na antepara longitudinal. Dessa forma, o arranjo obtido foi:

Figura 7 – Seção mestra - Primeira iteração.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo do momento de inércia e linha neutra, foi implementado uma rotina escrita em Python contida no Apêndice A. Os valores obtidos foram:

$$I_{SM} = 310,91 \quad m^4$$

$$Y_{LN} = 9,92 \quad m$$

Tabela 8 – Tensões normais e Fatores de segurança com reforçadores - Iteração II.

<b>Alquebramento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	142,30	1,65
Fundo	-93,55	2,51
<b>Tosamento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	-131,53	1,79
Fundo	86,46	2,72

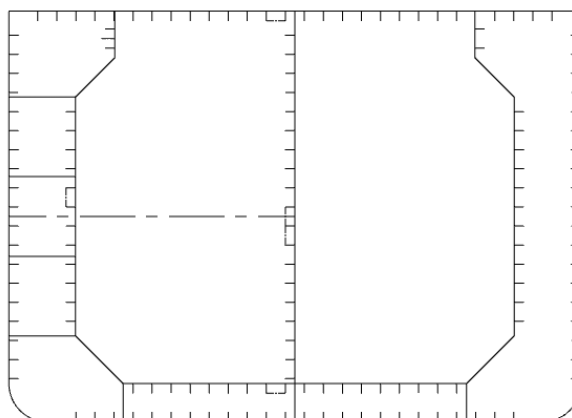
Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que a estrutura apresentou fatores de segurança dentro da faixa esperada (1,5 - 3,0). Entretanto, mesmo que atenda aos requisitos estruturais, o objetivo foi projetar uma estrutura de maneira que o menor fator de segurança fosse 1,5, visando utilizar menos material e, assim, reduzir os custos. Portanto, foi necessária uma nova iteração para reduzir a quantidade de material.

## 5.6 ITERAÇÃO 2

Para a próxima iteração, optou-se por aumentar o espaçamento entre os reforçadores para  $1200mm$  e, conseqüentemente, diminuir a quantidade total de reforçadores na estrutura.

Figura 8 – Seção mestra - Segunda iteração.



Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa, obteve-se o seguinte momento de inércia e altura da linha neutra:

$$I_{SM} = 287,462 \text{ m}^4$$

$$Y_{LN} = 9,51 \text{ m}$$

Tabela 9 – Tensões normais e Fatores de segurança com reforçadores - Iteração II.

<b>Alquebramento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	156,31	1,50
Fundo	-96,98	2,42
<b>Tosamento</b>		
	Tensão Normal (MPa)	Fator de Segurança
Convés	-145,53	1,61
Fundo	89,64	2,62

Fonte: Autoria própria.

Verificando os módulos de seção no fundo e convés, obtemos que ambos estão dentro do permitido pela norma IACS ( $Z_F$  e  $Z_C$  maiores que  $Z_R$ , obtido da Equação 4.7).

$$Z_F = \frac{I_{SM}}{|Y_F - Y_{LN}|} = 30,22m^3$$

$$Z_C = \frac{I_{SM}}{|Y_C - Y_{LN}|} = 17,61m^3$$

Dessa forma, projetamos uma estrutura que atende aos requisitos estruturais utilizando a menor quantidade possível de reforçadores, conforme o esquema de distribuição adotado<sup>1</sup>. Isso garante um menor custo de material ao evitar possíveis superdimensionamentos. O esboço detalhado da seção mestra encontra-se em Anexo A.

---

<sup>1</sup> Podem ser desenvolvidas diferentes configurações de reforçadores que utilizem menos material e ainda garantam a segurança estrutural. No entanto, isso envolve um processo de otimização que está fora do escopo deste projeto.

## 6 ANÁLISE POR ELEMENTO FINITOS

Com o objetivo de verificar o dimensionamento da seção mestra, foi realizada uma modelagem computacional através do *software* de elementos finitos *Abaqus*, disponibilizado pelo EPUSP.

### 6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO ESCANTILHÃO

Para a modelagem da seção mestra conforme descrita no Anexo A e em conformidade com as espessuras descritas na Tabela 6, foram necessários cálculos adicionais da distância entre anteparas e entre cavernas.

#### 6.1.1 Distância entre anteparas

Conforme a Seção 2 do Capítulo 2 (*General Arrangement Design*) (IACS, 2024), é necessário que o navio possua:

1. Um tanque de colisão a vante
2. Um tanque de colisão a ré
3. Duas anteparas estanques a vante e a ré da praça de máquinas

Adicionado a quantidade de tanque de carga ( $N_{CARGO}$ ) prevista na Tabela 2, pode-se calcular o comprimento aproximado entre anteparas da seção mestra.

$$L_{anteparas} = \frac{LPP - 2 \cdot L_{colisao} - L_{maq}}{4} \quad (6.1)$$

Empregando-se os valores aproximados de  $L_{colisao} = 20m$  ( $\approx 10\%$  LWL) e  $L_{maq} = 40m$  ( $\approx 20\%$  LWL), pode-se chegar a distância entre anteparas.

$$L_{anteparas} \approx 25m$$

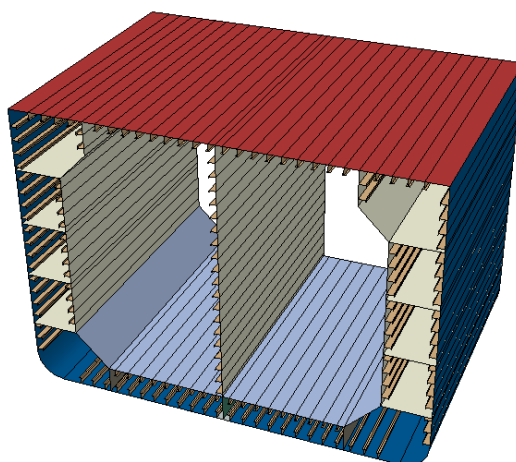
### 6.2 ESPAÇAMENTO CAVERNAS

A separação de cavernas pode ser calculada da seguinte forma:

$$L_{cavernas} = 2.6 + 0.005 \cdot LWL, \quad L_{cavernas} \leq 3.5m \quad (6.2)$$

Entretanto, para o valor de LWL da nossa seção (183,83 metros), temos que  $L_{cavernas} = 3,52m > 3,5m$ . Assim, utilizar-se-á o valor máximo de 3,5 metros.

Figura 9 – Modelagem computacional da seção mestra



Fonte: Autoria própria

Na figura 9, cada cor representa um valor de espessura de acordo com a Tabela 6. Além disso, para todas as seções foram atribuídas o mesmo material com módulo de Young de 206 GPa, em conformidade com a implementação das normas.

### 6.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a modelagem utilizando método dos elementos finitos, foram empregadas duas condições de contorno:

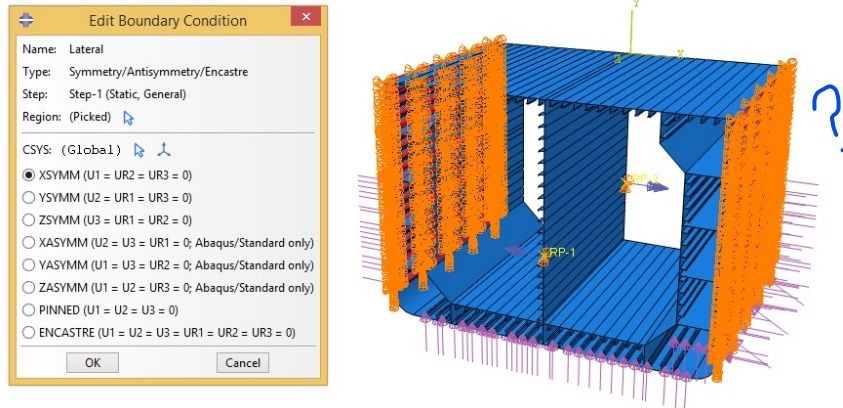
1. Simetria no eixo X no costado.
2. Deslocamento nulo no eixo Y e Z dos pontos de referência.



### 6.3.1 Simetria no eixo X no costado

Através da simetria no costado no eixo X, garantimos que o costado permanece perpendicular a linha d'água e é livre para flexionar no eixo X.

Figura 10 – Simetria em X.

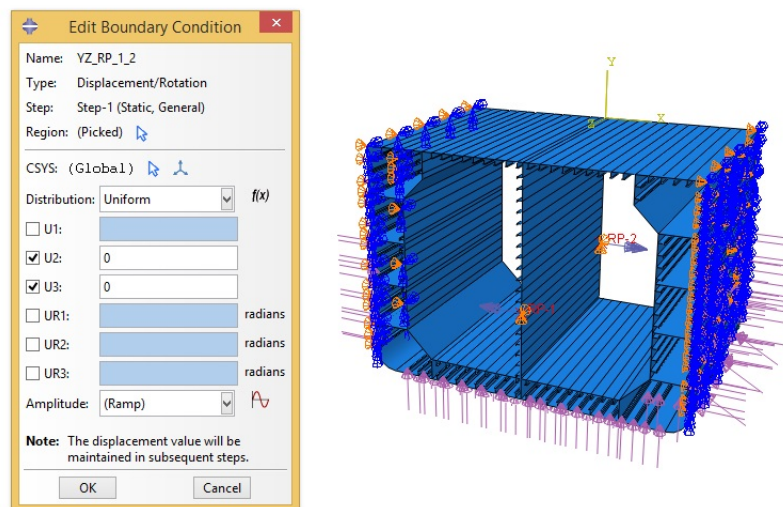


Fonte: Autoria própria.

### 6.3.2 Deslocamento nulo no eixo Y e Z dos pontos de referência

Para essa condição de contorno, inicialmente foram criados 2 pontos de referências localizados na altura calculada da linha neutra da seção mestre. Em seguida, foi adicionada uma restrição (*constraint*) entre todas as arestas contidas no plano que passa pelo ponto de referência do tipo MPC - Beam (*Multiple Point Constraint - Type Beam*). Desse modo, o conjunto de elementos conectados ao ponto de referência age como uma viga.

Figura 11 – Deslocamento nulo nos pontos de referência.



Fonte: Autoria própria.

Ao restringir os movimento em Y e Z dos pontos de referência, caracterizamos a seção mestra como uma viga com apoio móvel, já que estamos analisando apenas uma seção do Navio e não sua totalidade.

## 6.4 CARREGAMENTOS

Em acordo com os cálculos contidos nos códigos no apêndice, definimos dois tipos de carregamentos na seção mestra, pressão hidrostática e momento fletor em condições extremas.

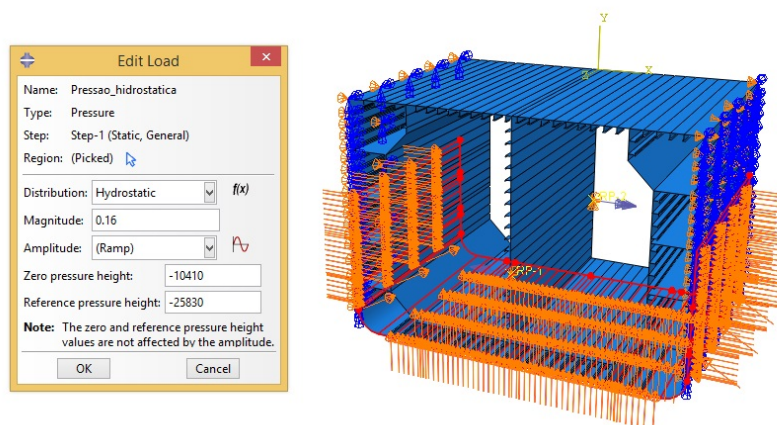
### 6.4.1 Pressão Hidrostática

Conforme a tabela 2, o Navio possui um calado de projeto de 16.24m, dessa forma a pressão hidrostática de referência é dada por:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H = 0.16 \text{ MPa}$$

Empregando o carregamento da classe Pressão Hidrostática do *Abaqus*, adicionamos este valor juntamente com as informações de Altura Zero (correspondente à linha d'água) e Altura de referência (correspondente ao calado), conforme Figura 12.

Figura 12 – Pressão hidrostática.



Fonte: Autoria própria.

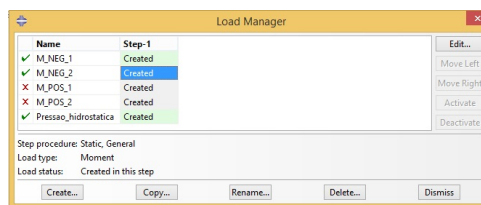
### 6.4.2 Momentos fletores

Para a inclusão dos momentos fletores, foram empregados os carregamentos correspondentes às condições de HSM-1 e HSM-2, isto é, condições que maximizam ou minimizam os momentos fletores na seção mestra do Navio, em conjunto com a convenção de sinais presente em (IACS, 2024).

$$\begin{cases} -2,791 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{para HSM-1} \\ 2,933 \cdot 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m} & \text{para HSM-2} \end{cases}$$

Os momentos foram empregados em cada ponto de referência com valores opostos de tal forma que o momento resultante fosse um somatório entre os dois, conforme pode-se observar na imagem abaixo:

Figura 13 – Momentos fletores adicionados.

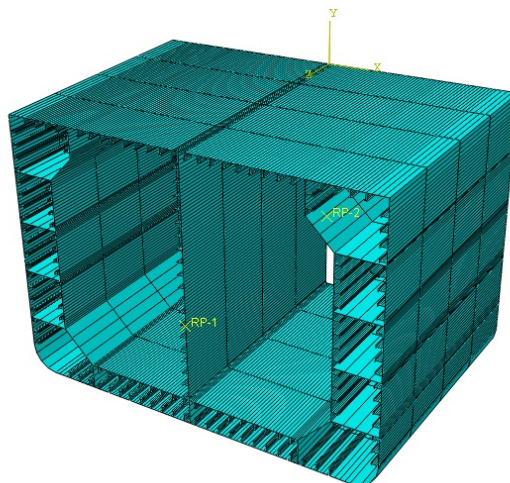


Fonte: Autoria própria.

### 6.5 MALHA

A escolha do nível de refinamento da malha foi tal que houvesse 6 pontos de controle no flange de cada reforçador. Acreditou-se ser uma bom refinamento inicial para a análise.

Figura 14 – Malha gerada.



Fonte: Autoria própria.

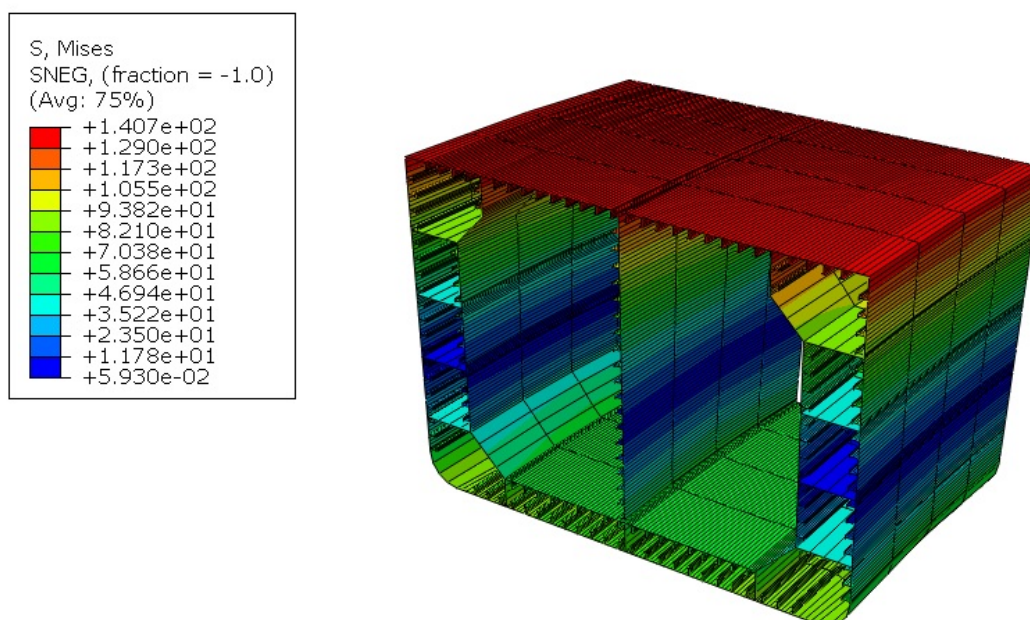
## 6.6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

O processo iterativo descrito nos códigos do apêndice foi desenvolvido considerando o maior momento absoluto que afeta o navio, que corresponde ao momento de alquebramento (*hogging*), sendo assim o principal ponto de referência. Adicionalmente, os resultados foram apresentados em gráficos com um fator de aumento de escala de deformação de 100 vezes.

### 6.6.1 Alquebramento

O resultado numérico obtido foi analisado tanto por meio da tensão equivalente de Von Mises (saída padrão do software) quanto pela tensão normal (utilizada pela (IACS, 2024) para o dimensionamento).

Figura 15 – Tensões em alquebramento (Von Mises).

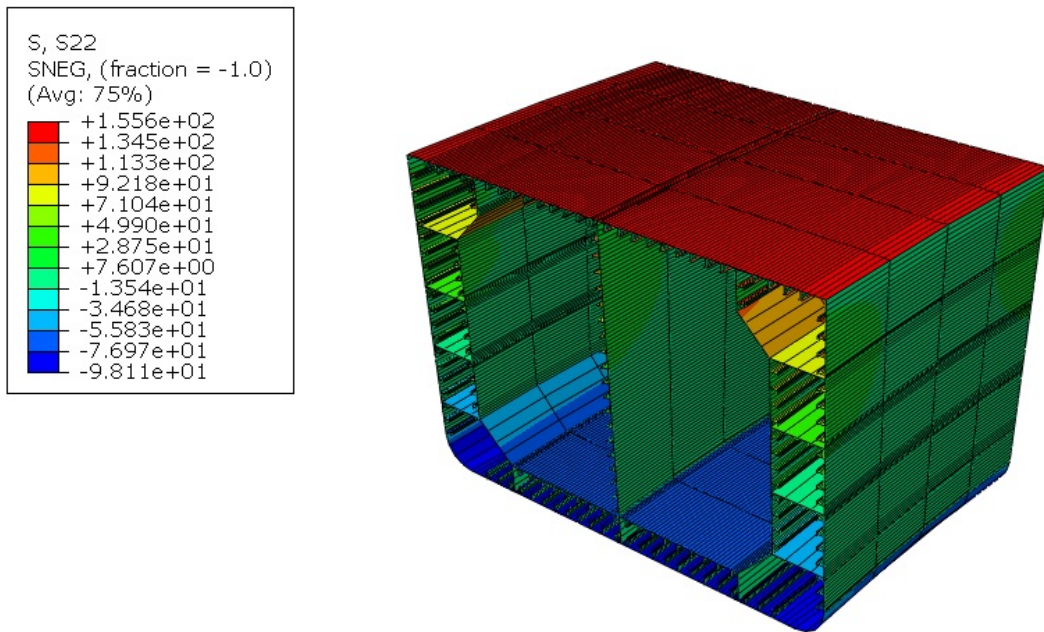


Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que, na figura abaixo, correspondente as tensões normais, pode-se observar as relações de tração no convés e compressão no fundo, compatível com a definição de alquebramento.



Figura 16 – Tensões em alquebramento (Normais).

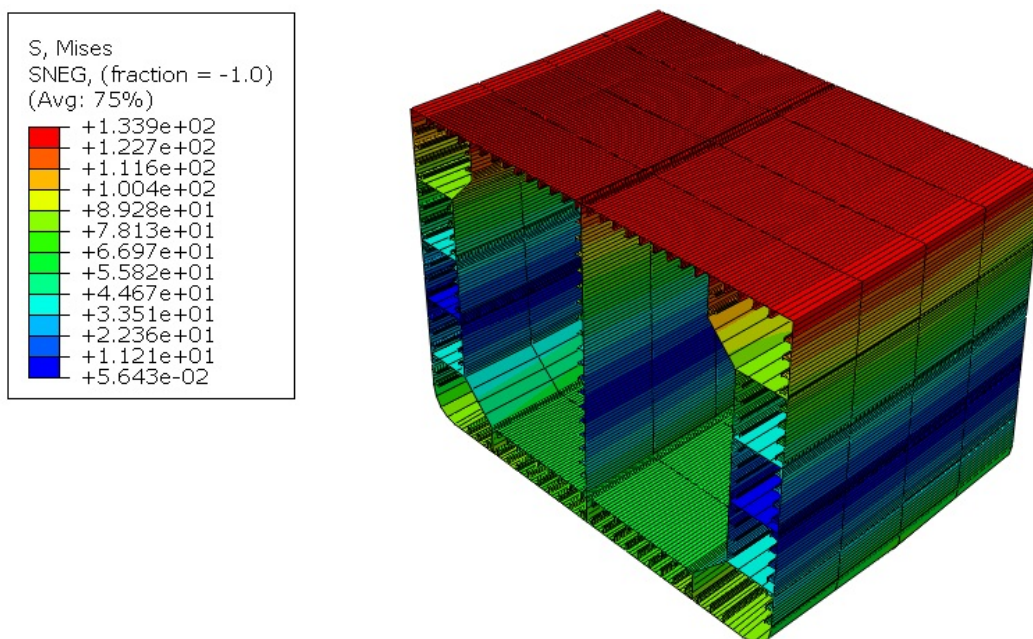


Fonte: Autoria própria.

### 6.6.2 Tosamento

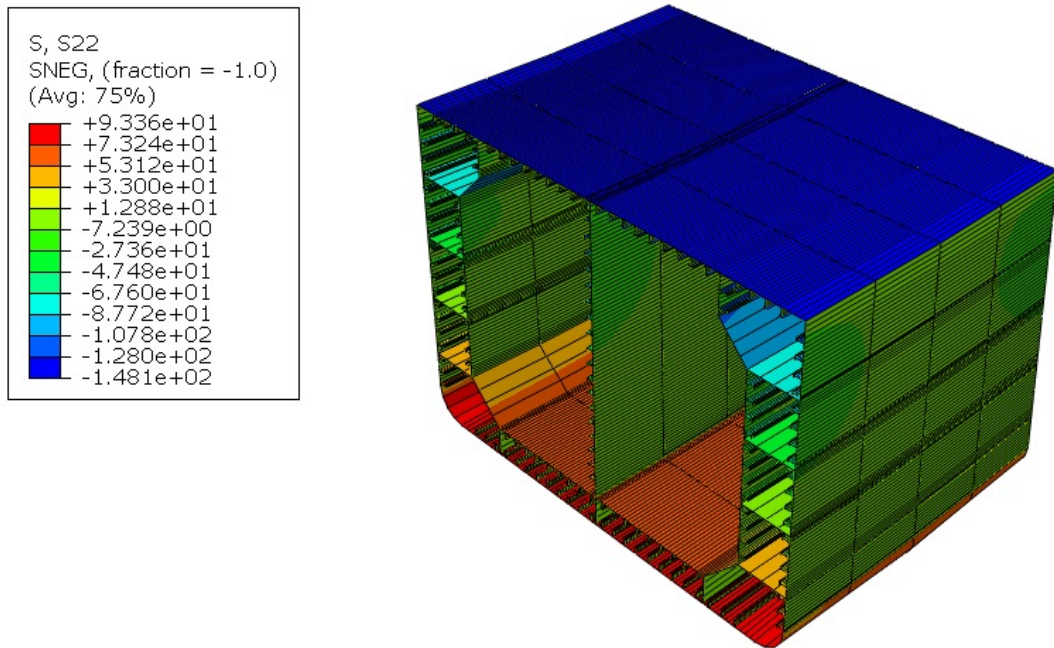
Semelhante ao arranjo anterior, podemos observar as tensões em tosamento.

Figura 17 – Tensões em tosamento (Von Mises).



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Tensões em tosamento (Normais).



Fonte: Autoria própria.

## 7 RESULTADOS FINAIS

Obtidos os valores de tensões correspondentes à formulação da (IACS, 2024) e à modelagem computacional, é possível realizar uma comparação entre as tensões e os fatores de segurança correspondentes para validar a seção mestra projetada.

Tabela 10 – Síntese dos resultados finais.

<b>Alquebramento</b>					
	IACS	Numérico	%	F.S IACS	F.S Numérico
Convés	156,31	155,6	0,5%	1,50	1,51
Fundo	-96,98	-98,11	1,1%	2,42	2,39
<b>Tosamento</b>					
	IACS	Numérico	%	F.S IACS	F.S Numérico
Convés	-145,53	-148,1	1,7%	1,61	1,59
Fundo	89,64	93,36	4,0%	2,62	2,52

Fonte: Autoria própria.

## 8 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma primeira iteração no projeto estrutural de um petroleiro, utilizando as normas presentes na (IACS, 2024). Dessa forma, foi possível dimensionar os componentes estruturais e distribuí-los em um arranjo adequado. Percebeu-se a importância dos reforçadores para o aumento do momento de inércia e resistência da embarcação. Entretanto, um balanço deve ser feito para que a embarcação seja segura do ponto de vista estrutural com o mínimo de material possível.

A análise pelo método dos elementos finitos validou os valores conforme as diretrizes da IACS, evidenciando uma variação máxima de 4% entre os resultados (considerado satisfatório para este estudo). Além disso, os fatores de segurança estão dentro dos limites estabelecidos pelo projeto (entre 1.5 e 3.0), cumprindo o objetivo de projetar uma estrutura com o menor fator de segurança sendo 1,5. É importante notar que nossa análise se concentrou apenas no regime elástico do material, utilizando momentos correspondentes a cargas extremas. Isso sugere que a estrutura é segura, embora o regime plástico de deformação do material não tenha sido considerado.

Além das limitações computacionais enfrentadas e do escopo do trabalho, é recomendável realizar uma análise de convergência dos resultados numéricos, refinando gradualmente a malha até que os critérios de parada sejam atendidos. Devido à natureza iterativa do projeto e construção de navios, são necessárias iterações adicionais até alcançar a conclusão final do projeto.



## REFERÊNCIAS

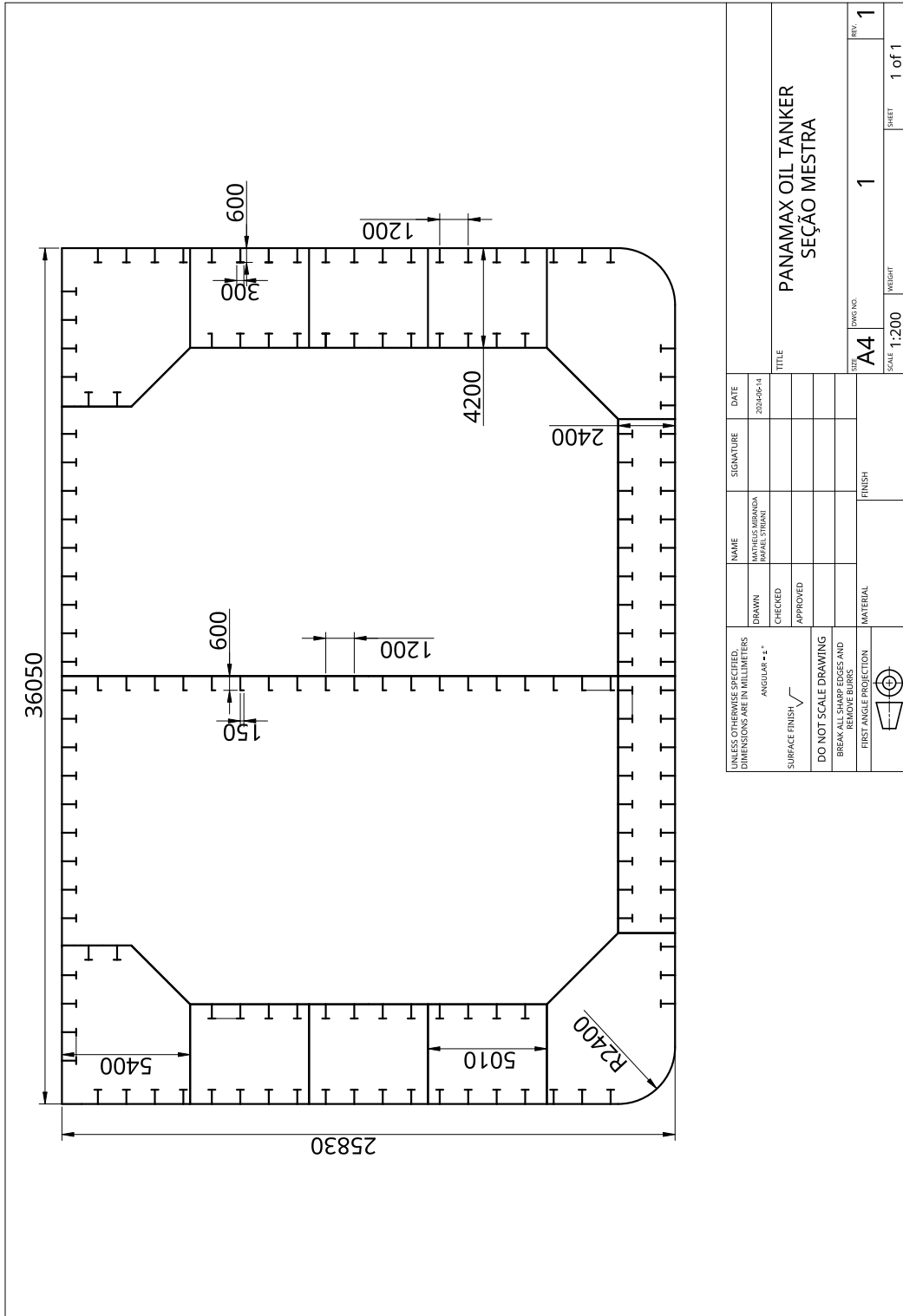
IACS. **Bulk Carriers and Oil Tankers 1**. [S.l.: s.n.], 2024.

Maritime Optima. **HELLESPONT PRIDE - Tanker / Panamax (LR 1) / Epoxy**. 2023. Disponível em: <[https://maritimeoptima.com/public/vessels/pages/imo:9351414/mmsi:232012089/HELLESPONT\\_PRIDE.html](https://maritimeoptima.com/public/vessels/pages/imo:9351414/mmsi:232012089/HELLESPONT_PRIDE.html)>. Acesso em: 14/06/2024.

SARZOSA, D. F. B. **TRABALHO FINAL: PROJETO DA SEÇÃO MESTRA DE UM NAVIO PETROLEIRO**. 2024. 1–3 p.

WARTSILA. **Ultra large crude carrier HELLESPONT ALHAMBRA**. 2024. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/ultra-large-crude-carrier-hellespont-alhambra>>. Acesso em: 13/06/2024.

ANEXO A – ESBOÇO DETALHADO DA SEÇÃO MESTRA FINAL OBTIDA



## APÊNDICE A – CÓDIGOS EM PYTHON PARA CÁLCULOS E ITERAÇÕES

### Código A.1 – Carregamentos - HG\_Loads.py

```

1 import numpy as np
2
3 # Dados do Navio
4 L = 183.83 # m
5 B = 36.05 # m
6 T_sc = 16.24 # m
7 D = 25.83 # m
8 Cb = 0.741
9
10 # Definições para meia-nau
11 C_w = 10.75 - ((300-L)/100)**1.5 # Coeficiente de Onda
12 f_ps = 1 # Coeficiente para avaliação de resistência
13 f_p = f_ps
14 f_sw = 1 # Fator de distribuição ao longo do comprimento do navio
15
16 ##### Vertical Bending Moment (VBM) #####
17 # VBMs mínimos
18
19 # Hogging (fatores para meia-nau)
20 f_nl_vh = 1.0 # Efeitos não lineares aplicados ao alquebramento
21 f_m = 1.0 # Fator de distribuição para o momento fletor vertical
22
23 M_wv_h_mid = 0.19*f_nl_vh*f_m*f_p*C_w*L**2*B*Cb # Wave vertical
24 M_sw_h_min = f_sw*(171*C_w*L**2*B*(Cb+0.7)*0.001 - M_wv_h_mid) # Still
    water
25
26 print("Hogging - M_WV: " + str(M_wv_h_mid))
27 print("Hogging - M_SW: " + str(M_sw_h_min))
28
29 # Sagging (fatores para meia-nau)
30 f_nl_vs = 0.58*((Cb+0.7)/Cb) # Efeitos não lineares aplicados ao
    tosamento
31 f_m = 1.0
32
33 M_wv_s_mid = -0.19*f_nl_vs*f_m*f_p*C_w*L**2*B*Cb # Wave vertical
34 M_sw_s_min = -0.85*f_sw*(171*C_w*L**2*B*(Cb+0.7)*0.001 + M_wv_s_mid) #
    Still water
35
36 print("Sagging - M_WV: " + str(M_wv_s_mid))
37 print("Sagging - M_SW: " + str(M_sw_s_min))
38
39

```

```

40 ##### Vertical Shear Force (VSF) #####
41 # VSF = Q_sw + Q_wv_LC
42 rho = 0.9 # Densidade do petróleo (ton/m3)
43 g = 9.81
44 B_local = B
45 l_tk = 4
46 T_lc = T_sc
47
48 Q_sw_min = 0.4*rho*g*B_local*l_tk*T_sc # Para oil carriers com 2 tanques
49
50 f_q_pos = 0.7 # Fator para meia-nau
51 Q_wv_pos = 0.52*f_q_pos*f_p*C_w*L*B*Cb
52 Q_wv_neg = -Q_wv_pos
53
54 ##### Horizontal Bending Moment (HBM) #####
55
56 f_nlh = 0.9 # Fator para meia-nau
57
58 M_wh = f_nlh*f_p*(0.31 + (L/2800))*f_m*C_w*(L**2)*T_lc*Cb
59
60 ##### Wave Torsional Moment (WTM) #####
61 # Fatores para meia-nau
62 f_t1 = np.abs(np.sin(2*np.pi*0.5/L))
63 f_t2 = (np.sin(0.5*np.pi/L))**2
64
65 M_wt1 = 0.4*f_t1*C_w*np.sqrt(L/T_lc)*B**2*D*Cb
66 M_wt2 = 0.22*f_t2*C_w*L*B**2*Cb
67
68 M_wt = f_p * (M_wt1 + M_wt2)
69
70 ##### Carregamentos Totais #####
71
72 # HSM
73 f_lp = 1
74 f_betaHSM = 1.05
75
76 VBM_HSMs = f_betaHSM*(-1)*np.abs(M_wv_s_mid) # HSM-1 (C_wv = -1)
77 VBM_HSMh = f_betaHSM*1*M_wv_h_mid # HSM-2 (C_wv = 1)
78
79 VSF_HSM1 = f_betaHSM*(-1)*f_lp*np.abs(Q_wv_neg) # HSM-1 (C_qw = -1)
80 VSF_HSM2 = f_betaHSM*1*f_lp*Q_wv_pos # HSM-2 (C_qw = 1)
81
82 print("----- HSM -----")
83 print("Momento em sagging - HSM-1 (kN.m): " + str(round(VBM_HSMs)))
84 print("Momento em hogging - HSM-2 (kN.m): " + str(round(VBM_HSMh)))
85 print("Esforço cortante para HSM-1 (kN) : +-" + str(round(VSF_HSM1)))
86 print("Esforço cortante para HSM-2 (kN) : +-" + str(round(VSF_HSM2)))

```

## Código A.2 – Tensões - HG\_Strength.py

```

1 ##### RESULTADOS DOS CARREGAMENTOS #####
2 # Hogging - M_WV: 1629060.3957012582
3 # Hoggin - M_SW: 1222125.066086814
4 # Sagging - M_WV: -1837430.630930091
5 # Sagging - M_SW: -861691.6062292841
6
7 import numpy as np
8
9 # Dados do Navio
10 L = 183.83 # m
11 B = 36.05 # m
12 Cb = 0.741
13 C_w = 10.75 - ((300-L)/100)**1.5 # Coeficiente de Onda
14 Z_D = 25.83 # m
15 T = 16.24 # m
16 Delta = 82122.42 # Deslocamento (ton)
17
18 # Parâmetros e Momentos (kN x m)
19 k = 1.38 # Fator de segurança
20 f_beta = 1.05 # Fator de correção de rumo
21 M_WV_h = 1629060
22 M_SW_h = 1222125
23 M_WV_s = -1837431
24 M_SW_s = -861691
25
26 # Como a equação da tensão irá preservar o sinal, vamos calcular qual
   terá a maior soma em módulo
27 hogging_abs = np.abs(M_SW_h + f_beta*M_WV_h)
28 sagging_abs = np.abs(M_SW_s + f_beta*M_WV_s)
29 if hogging_abs > sagging_abs:
30     M_SW = M_SW_h
31     M_WV = M_WV_h
32 else:
33     M_SW = M_SW_s
34     M_WV = M_WV_s
35
36 print(" --- Cálculos das características da viga navio a meia-nau --- ")
37
38 ### Momento de inércia mínimo (Capítulo 5 - 2.3.1) ###
39 I_yR = 2.7*C_w*(L**3)*B*(Cb+0.7)*(10**(-8))
40 print("\nMomento de inércia mínimo em Y (m^4) - OK com ABS/DNV/NK: " +
   str(round(I_yR)))
41
42 ### Módulo da seção no convés e fundo (Capítulo 5 - 2.3.2) ###
43 Z_R = 0.9*k*C_w*L**2*B*(Cb+0.7)*10**(-6)
44 print("Módulo da seção mínimo no convés e fundo (m^3) - OK com ABS/DNV/

```

```

    NK: " + str(round(Z_R))
45
46 ### Avaliação de flexão da viga navio (Capítulo 2) ###
47
48 sigma_perm = 190/k #Tensão permissível para seagoing a meia-nau
49 print("\n --- Avaliação de flexão ---")
50 Z_n = 12.5 #Altura da linha neutra, chute inicial
51 V_D = Z_D - Z_n # Distância da linha neutra até convés principal
52
53 # Qualquer ponto abaixo de V_ZD
54 Z = 5 # Altura do fundo até o ponto que calcularemos a tensão
55 Z_A = I_yR/np.abs(Z-Z_n)
56 sigma_L_b_zvd = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_A))*10**(-3)
57 print("Tensão em Z = " + str(Z) + " (MPa): " + str(sigma_L_b_zvd))
58
59 # No fundo
60 Z_B = I_yR/Z_n
61 sigma_L_fundo = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_B))*10**(-3)
62 print("Tensão no fundo (MPa): " + str(sigma_L_fundo))
63
64 # No convés principal
65 Z_D = I_yR/V_D
66 sigma_L_convés = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_D))*10**(-3)
67 print("Tensão no convés (MPa): " + str(sigma_L_convés))
68
69
70 # ITERAÇÃO para atingir valores desejados
71 print("\n --- Avaliação da flexão --- ")
72 flag = False
73 while flag != True:
74     Z_B = I_yR/Z_n
75     sigma_L = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_B))*10**(-3)
76
77     if sigma_L > sigma_perm:
78         I_yR += 0.1
79     else:
80         flag = True
81
82 # Qualquer ponto abaixo de V_ZD
83 Z_A = I_yR/np.abs(Z-Z_n)
84 print("Momento de inércia requerido (m^4): " + str(round(I_yR)))
85 sigma_L_b_zvd = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_A))*10**(-3)
86 print("Tensão em Z = " + str(Z) + " (MPa): " + str(sigma_L_b_zvd))
87
88 # No fundo
89 Z_B = I_yR/Z_n
90 sigma_L_fundo = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_B))*10**(-3)
91 print("Tensão no fundo (MPa): " + str(sigma_L_fundo))

```

```
92 |  
93 | # No convés principal  
94 | Z_D = I_yR/V_D  
95 | sigma_L_convés = ((M_SW + f_beta*M_WV)/(Z_D))*10**(-3)  
96 | print("Tensão no convés (MPa): " + str(sigma_L_convés))
```

## Código A.3 – Escantilhão - Scantling.py

```

1 # Dados do Navio
2 L = 183.83 # m
3 B = 36.05 # m
4 Cb = 0.741
5 C_w = 10.75 - ((300-L)/100)**1.5 # Coeficiente de Onda
6 Z_D = 25,83 # m
7 T = 16.24 # m
8 Delta = 82122.42 # Deslocamento (ton)
9 Deadweight = 73727 # ton
10
11 # Altura do duplo fundo
12 DB_Heigth = B/15
13 print("Altura do duplo fundo (m): " +str(DB_Heigth))
14
15 # Largura do costado duplo
16 W_ds = 0.5 + Deadweight/20000
17 print("Largura do duplo costado (m): " +str(W_ds))
18
19 # Espaçamento mínimo dentro do duplo costado
20 min_clearance_trans = 0.6 # m
21 min_clearance_long = 0.8 # m
22
23 # Espessuras mínimas de chapeamento
24 print("\n ---- Espessuras - Chapeamento ----")
25
26 shell_keel = 7.5 + 0.03*L
27 print("Espessura da flange da quilha (mm): " + str(round(shell_keel)))
28
29 shell_b_ss_bilge = 5.5 + 0.03*L
30 print("Espessura do fundo, costado e bilge (mm): " + str(round(
    shell_b_ss_bilge)))
31
32 deck = 4.5 + 0.02*L
33 print("Espessura do convés principal (mm): " + str(round(deck)))
34
35 inner_bottom = 5.5 + 0.03*L
36 print("Espessura do teto do duplo fundo (mm): " + str(round(inner_bottom
    )))
37
38 anteparas_longitudinais = 4.5 + 0.02*L
39 print("Espessura das anteparas longitudinais/transversais estanques (mm)
    : " + str(round(anteparas_longitudinais)))
40
41 outros = 4.5 + 0.01*L
42 print("Espessura de outras chapas (mm): " + str(round(outros)))
43

```



```
44 # Reforçadores primários
45 print("\n --- Primary Support Members ---")
46
47 psm_quilha = 5.5 + 0.025 * L
48 print("Espessura da quilha (mm) : " + str(round(psm_quilha)))
49
50 psm_other_b_girder = 5.5 + 0.02 * L
51 print("Espessura dos reforçadores na base do duplo fundo (mm): " + str(
    round(psm_other_b_girder)))
52
53 psm_bottom_floor = 0.6 * (L**0.5)
54 print("Espessura do fundo (mm): " + str(round(psm_bottom_floor)))
55
56 psm_other_members = 5.5 + 0.015*L
57 print("Espessura de outros reforçadores primários na região de oil cargo
    (mm): " + str(round(psm_other_members)))
58
59 # Plating
60 print("\n --- Plating ---")
61 P_ex = 271 # kN/m^2 (Pressão hidrostática no fundo (SEA-1))
62 S_b = 600 # mm (Distância entre reforçadores transversais (Referenciado
    linha 23))
63 R_0 = 2400 # mm (Raio da curvatura da bilge - Retirada do CAD)
64 Delta_S1 = 0 #
65 Delta_S2 = 0 #
66
67 R = R_0 + Delta_S1 + Delta_S2
68
69 p_bilge_round = 6.45*10**(-4)*((P_ex*S_b)**0.4)*(R**0.6)
70 print("Espessura do Chapeamento da Bilge (mm): " + str(round(
    p_bilge_round)))
71
72 altura_sheerstrake = 0.8 + L/200
73 print("Altura da sheer strake (m): " + str(round(altura_sheerstrake)))
```

## Código A.4 – Dimensionamento reforçadores - Stiffeners\_2\_it.py

```

1 import numpy as np
2 # 2 Iteração
3
4 I_requerido = 266 # m^4
5
6 I_base = 0
7 Sum_A = 0
8 Sum_A_Y = 0
9
10 ##### Inclusão dos elementos com características já definidas #####
11
12 # 1. Convés principal (z = 25m, t = 8mm, w = 36.05m)
13 A_cp = 36.05*8*(10**(-3))
14 A_Y_cp = A_cp*25
15 Sum_A += A_cp
16 Sum_A_Y += A_Y_cp
17
18 # 2. Costados externos (z = 12.915m, t = 11mm, altura = 25.830m) # sem o
    bojo (aproximado)
19 A_ce = 25.830*(11)*(10**(-3))
20 A_Y_ce = A_ce*12.915
21 Sum_A += 2*A_ce # x2 por contas de ambos os bordos
22 Sum_A_Y += 2*A_Y_ce
23
24 # 2.1 Costados internos (z = 12.915 , t = 11mm, altura = 15.030m)
25 A_ci = 15.030*(11)*(10**(-3))
26 A_Y_ci = A_ci*12.915
27 Sum_A += 2*A_ci
28 Sum_A_Y += 2*A_Y_ci
29
30 # 2.2 Longarinas inferiores (z = 1.2, t = 11mm, altura = 2.4m)
31 A_long_inf = 2.4*(11)*(10**(-3))
32 A_Y_long = A_long_inf*1.2
33 Sum_A += 2*A_long_inf
34 Sum_A_Y += 2*A_Y_long
35
36 # 2.3 Longarinas superiores (z = 24.111, t = 11, altura = 2.9m)
37 A_long_sup = 2.9*(11)*(10**(-3))
38 A_Y_long_sup = A_long_sup*24.111
39 Sum_A += 2*A_long_sup
40 Sum_A_Y += 2*A_Y_long_sup
41
42 # 2.4 Planos inclinados superiores (Valores calculados em script
    separado)
43 A = 38620.1*10**(-6)
44 Sum_A += 2*A

```

```
45 Sum_A_Y += 2*A*21.66642
46
47 # 2.5 Planos inclinados inferiores (Valores calculados em script
    separado)
48 A = 46790.04759*10**(-6)
49 Sum_A += 2*A
50 Sum_A_Y += 2*A*3.90722
51
52 # 3. Antepara estanque longitudinal (z = 14.115m, t = 8mm, altura =
    23.430m)
53 A_antepara_longitudinal = 23.430*8*(10**(-3))
54 A_Y_antepara_longitudinal = A_antepara_longitudinal*14.115
55 Sum_A += 4*A_antepara_longitudinal
56 Sum_A_Y += A_Y_antepara_longitudinal
57
58 # 4. Teto do duplo fundo (z = 2.4m, t = 11mm, w = 21.650m)
59 A_teto_df = 21.650*11*(10**(-3))
60 A_Y_teto_df = A_teto_df*2.4
61 Sum_A += A_teto_df
62 Sum_A_Y += A_Y_teto_df
63
64 # 5. Fundo do duplo fundo (z = 0m, t = 11mm, w = 36.05m)
65 A_fundo_df = 36.05*11*(10**(-3))
66 A_Y_fundoo_df = A_fundo_df*0
67 Sum_A += A_fundo_df
68 Sum_A_Y += A_Y_fundoo_df
69
70 # 6. Convés 1 (z = 20.432m, t = 6mm, w = 4.2m) (Primeiro abaixo do convé
    s principal)
71 A_cv_1 = 4.2*6*10**(-3)
72 A_Y_cv_1 = A_cv_1*20.432
73 Sum_A += 2*A_cv_1 # x2 por contas de ambos os bordos
74 Sum_A_Y += 2*A_cv_1
75
76 # 7. Convés 2 (z = 15.422m, t = 6mm, w = 4.2m)
77 A_cv_2 = 4.2*6*10**(-3)
78 A_Y_cv_2 = A_cv_2*15.422
79 Sum_A += 2*A_cv_2
80 Sum_A_Y += 2*A_cv_2
81
82 # 8. Convés 3 (z = 10.414m, t = 6mm, w = 4.2m)
83 A_cv_3 = 4.2*6*10**(-3)
84 A_Y_cv_3 = A_cv_3*10.414
85 Sum_A += 2*A_cv_3
86 Sum_A_Y += 2*A_cv_3
87
88 # 9. Convés 4 (z = 5.408m, t = 6mm, w = 4.2m)
89 A_cv_4 = 4.2*6*10**(-3)
```

```

90 | A_Y_cv_4 = A_cv_4*5.408
91 | Sum_A += 2*A_cv_4
92 | Sum_A_Y += 2*A_cv_4
93 |
94 | # 10. Alma da Quilha (z = 1.2m, t = 10mm, h = 2.4)
95 | A_alma_keel = 2.4 * 10 * 10**(-3)
96 | A_Y_alma_keel = A_alma_keel * 1.2
97 | Sum_A += A_alma_keel
98 | Sum_A_Y += A_Y_alma_keel
99 |
100 | # 11. Flange inferior da quilha (z = 0, t = 13, h = 1.75) (7.2 Keel
    |     Plate)
101 | A_flange_inf_quilha = 1.75*13*(10**(-3))
102 | A_Y_flange_inf_quilha = 0*A_flange_inf_quilha
103 | Sum_A += A_flange_inf_quilha
104 | Sum_A_Y += A_Y_flange_inf_quilha
105 |
106 | ##### Inclusão dos reforçadores #####
107 |
108 | # Iremos empregar 2 tipos de reforçadores (tipo T (hxw) e tipo L (hxw/2)
109 | t = 9*10**(-3) # Espessura de 9mm
110 | h = 0.6 # 600mm
111 | w = 0.3 # 300mm
112 |
113 | # 12. No fundo do duplo fundo (24 reforçadores) - Tipo "a"
114 | z = 0 # Alma na base do fundo
115 | A_a_1 = h*t
116 | A_a_2 = w*t
117 | A_Y_a_1 = A_a_1*(h/2 + z)
118 | A_Y_a_2 = A_a_2*(h + t/2 + z)
119 |
120 | Sum_A += 24*(A_a_1 + A_a_2)
121 | Sum_A_Y += 24*(A_Y_a_1 + A_Y_a_2)
122 |
123 | # 13. No teto do duplo fundo (18 reforçadores) - Tipo "b"
124 | z = 2.4
125 | A_b_1 = h*t
126 | A_b_2 = w*t
127 | A_Y_b_1 = A_b_1*(z - h/2)
128 | A_Y_b_2 = A_b_2*(z - h - t/2)
129 |
130 | Sum_A += 18*(A_b_1 + A_b_2)
131 | Sum_A_Y += 18*(A_Y_b_1 + A_Y_b_2)
132 |
133 | # 14. No costado externo - Tipo "C" - 19 por bordo
134 | # Z varia de 2.7115m até 24.315 com passo de 1.2m
135 | z = 2.7115
136 | for i in range(19):

```

```
137     A_c_1 = h*t
138     A_c_2 = w*t
139     A_Y_c_1 = A_c_1*z
140     A_Y_c_2 = A_c_2*z
141
142     Sum_A += 2*(A_c_1 + A_c_2)
143     Sum_A_Y += 2*(A_Y_c_1 + A_Y_c_2)
144
145     z += 1.2
146
147 # 14.1. No costado interno - Tipo "C" - 14 reforçadores por bordo (12 no
      meio e 2 no topo)
148 z = 6.315
149 for i in range(12):
150     A_c_1 = h*t
151     A_c_2 = w*t
152     A_Y_c_1 = A_c_1*z
153     A_Y_c_2 = A_c_2*z
154
155     Sum_A += 2*(A_c_1 + A_c_2)
156     Sum_A_Y += 2*(A_Y_c_1 + A_Y_c_2)
157
158     z += 1.2
159
160 z = 23.506
161 for i in range(2):
162     A_c_1 = h*t
163     A_c_2 = w*t
164     A_Y_c_1 = A_c_1*z
165     A_Y_c_2 = A_c_2*z
166
167     Sum_A += 2*(A_c_1 + A_c_2)
168     Sum_A_Y += 2*(A_Y_c_1 + A_Y_c_2)
169
170     z += 1.2
171
172 # 15. No teto do convés principal - 28 reforçadores - Tipo "D"
173 z = 25.830
174 A_d_1 = h*t
175 A_d_2 = w*t
176 A_Y_d_1 = A_d_1*(z - h/2)
177 A_Y_d_2 = A_d_2*(z - h - t/2)
178
179 Sum_A += 28*(A_d_1 + A_d_2)
180 Sum_A_Y += 28*(A_Y_d_1 + A_Y_d_2)
181
182 # 16. Na antepara longitudinal - 19 reforçadores - Tipo "F"
183 # Z varia de 2.715m até 24.315m com passo de 1.2m
```

```

184 z = 2.715
185 for i in range(19):
186     A_f_1 = h*t
187     A_f_2 = (w/2)*t
188     A_Y_f_1 = A_f_1 * z
189     A_Y_f_2 = A_f_2 * z
190
191     Sum_A += A_f_1 + A_f_2
192     Sum_A_Y += A_Y_f_1 + A_Y_f_2
193
194     z += 1.2
195
196 ##### Check da nova linha neutra #####
197 Y_LN = Sum_A_Y / Sum_A
198 print("Altura da linha neutra: " + str(Y_LN))
199
200 ##### Inclusão dos momentos de inércia dos elementos padrões #####
201 I_total = 0
202
203 # 1. Convés principal (z = 25m, t = 8mm, w = 36.05m)
204 I_0 = (36.05*((8*10**(-3))**3))/12
205 I_t = (36.05*((8*10**(-3))))*(25-Y_LN)**2
206 I_el = I_0 + I_t
207 I_total += I_el
208 print(str(I_total) + " Convés principal")
209
210 # 2. Costado interno e externo (z = 12.915m, t = 11mm, altura = 25.830m)
211     # sem o bojo (aproximado)
212 I_0 = ((11*10**(-3))*(25.830**3))/12 #bh^3/12
213 I_t = ((11*10**(-3))*25.830)*(12.915-Y_LN)**2 # A*d^2
214 I_el = I_0 + I_t
215 I_total += 2*I_el
216 print(str(I_total) + " Costados externos")
217
218 # 2.1 Costados internos (z = 12.915 , t = 11m, altura = 15.030m)
219 I_0 = ((11*10**(-3))*(15.030**3))/12
220 I_t = ((11*10**(-3))*15.030)*(12.915-Y_LN)**2 # A*d^2
221 I_el = I_0 + I_t
222 I_total += 2*I_el
223 print(str(I_total) + " Costados interno")
224
225 # 2.2 Longarinas inferiores (z = 1.2, t = 11mm, altura = 2.4m)
226 I_0 = ((11*10**(-3))*(2.4**3))/12
227 I_t = ((11*10**(-3))*2.4)*(1.2-Y_LN)**2 # A*d^2
228 I_el = I_0 + I_t
229 I_total += 2*I_el
230 print(str(I_total) + " Longarinas inferiores")

```

```
231 # 2.3 Longarinas superiores (z = 24.111, t = 11, altura = 2.9m)
232 I_0 = ((11*10**(-3))*(2.9**3))/12
233 I_t = ((11*10**(-3))*2.9)*(24.111-Y_LN)**2 # A*d^2
234 I_el = I_0 + I_t
235 I_total += 2*I_el
236 print(str(I_total) + " Longarinas superiores")
237
238 # 2.4 Planos inclinados superiores (Valores calculados em script
      separado)
239 I_total += 0.0355 + 0.0386*(21.667 -Y_LN)**2
240 # 2.5 Planos inclinados inferiores (Valores calculados em script
      separado)
241 I_total += 0.002 + 0.0468*(3.907-Y_LN)**2
242
243 # 3. Antepara estanque longitudinal (z = 14.115m, t = 8mm, altura =
      23.430m)
244 I_0 = ((8*10**(-3))*(23.430**3))/12
245 I_t = ((8*10**(-3))*23.430)*(14.115-Y_LN)**2 # A*d^2
246 I_el = I_0 + I_t
247 I_total += I_el
248 print(str(I_total) + " Antepara estanque longitudinal")
249
250 # 4. Teto do duplo fundo (z = 2.4m, t = 11mm, w = 21.650m)
251 I_0 = (21.650*(11*10**(-3))**3)/12
252 I_t = (21.650*11*(10**(-3)))*(2.4-Y_LN)**2
253 I_el = I_0 + I_t
254 I_total += I_el
255 print(str(I_total) + " Teto duplo fundo")
256
257 # 5. Fundo do duplo fundo (z = 0m, t = 11mm, w = 36.05m)
258 I_0 = (36.05*((11*10**(-3))**3))/12
259 I_t = (36.05*(11*10**(-3)))*(0-Y_LN)**2
260 I_el = I_0 + I_t
261 I_total += I_el
262 print(str(I_total) + " Fundo duplo fundo")
263
264 # 6. Convés 1 (z = 20.432m, t = 6mm, w = 4.2m) (Primeiro abaixo do convé
      s principal)
265 I_0 = (4.2*(0.006**3))/12
266 I_t = (4.2*0.006)*(20.432-Y_LN)**2
267 I_el = I_0 + I_t
268 I_total += 2*I_el # Pq tem 4.2m de cada bordo
269 print(str(I_total) + " Convés 1")
270
271 # 7. Convés 2 (z = 15.422m, t = 6mm, w = 4.2m)
272 I_0 = (4.2*(0.006**3))/12
273 I_t = (4.2*0.006)*(15.422-Y_LN)**2
274 I_el = I_0 + I_t
```

```

275 I_total += 2*I_el # Pq tem 4.2m de cada bordo
276 print(str(I_total) + " Convés 2")
277
278 # 8. Convés 3 (z = 10.414m, t = 6mm, w = 4.2m)
279 I_0 = (4.2*(0.006**3))/12
280 I_t = (4.2*0.006)*(10.414-Y_LN)**2
281 I_el = I_0 + I_t
282 I_total += 2*I_el # Pq tem 4.2m de cada bordo
283 print(str(I_total) + " Convés 3")
284
285 # 9. Convés 4 (z = 5.408m, t = 6mm, w = 4.2m)
286 I_0 = (4.2*(0.006**3))/12
287 I_t = (4.2*0.006)*(5.408-Y_LN)**2
288 I_el = I_0 + I_t
289 I_total += 2*I_el # Pq tem 4.2m de cada bordo
290 print(str(I_total) + " Convés 4")
291
292 # 10. Alma da Quilha (z = 1.2, t = 10mm, h = 2.4)
293 I_0 = (0.01*(2.4**3))/12
294 I_t = (0.01*2.4)*(1.2-Y_LN)**2
295 I_el = I_0 + I_t
296 I_total += I_el
297 print(str(I_total) + " Alma da quilha")
298
299 # 11. Flange inferior da quilha (z=0, t= 13mm, h = 1.75)
300 I_0 = (1.75*(0.013**3))/12
301 I_t = (1.75*0.013)*(0-Y_LN)**2
302 I_el = I_0 + I_t
303 I_total += I_el
304 print(str(I_total) + " Flange da quilha")
305
306 ##### Inclusão dos momentos de inércia dos elementos reforçadores #####
307
308 # Iremos empregar 2 tipos de reforçadores (tipo T (hwx) e tipo L (hwx/2)
309 t = 9*10**(-3) # Espessura de 9 mm
310 h = 0.6 # 600mm
311 w = 0.4 # 300mm
312
313 # 12. No fundo do duplo fundo (24 reforçadores) - Tipo "A"
314 z = 0
315 A_a_1 = h*t
316 A_a_2 = w*t
317 I_0_a_1 = (t*h**3)/12
318 I_0_a_2 = (w*t**3)/12
319 I_t_a = (A_a_1*(Y_LN - (h/2 + z))**2) + (A_a_2*(Y_LN-(h+t/2+z))**2)
320 I_el = I_0_a_1 + I_0_a_2 + I_t_a
321 I_total += 24*I_el
322 print(str(I_total) + " Reforçadores fundo do duplo fundo")

```



```
323
324 # 13. No teto do duplo fundo (18 reforçadores) - Tipo "B"
325 z = 2.4
326 A_b_1 = h*t
327 A_b_2 = w*t
328 I_0_b_1 = (t*h**3)/12
329 I_0_b_2 = (w*t**3)/12
330 I_t_b = (A_b_1*(z - Y_LN**2)) + (A_b_2*(z-h-Y_LN)**2)
331 I_el = I_0_b_1 + I_0_b_2 + I_t_b
332 I_total += 18*I_el
333 print(str(I_total) + " Reforçadores teto do duplo fundo")
334
335 # 14. No costado externo - (2 fileiras de 19) (38)- Tipo "C"
336 # Z varia de 2.7115m até 24.315m com passo de 1.2m
337 z = 2.7115
338 for i in range(19):
339     A_c_1 = h*t
340     A_c_2 = w*t
341
342     I_0_c_1 = (h*(t**3))/12
343     I_0_c_2 = (t*(w**3))/12
344
345     I_t_c = (A_c_1*(z - Y_LN)**2) + (A_c_2*(z- Y_LN)**2)
346
347     I_el = I_0_c_1 + I_0_c_2 + I_t_c
348     I_total += 2*I_el
349
350     z += 1.2
351
352 print(str(I_total) + " Reforçadores costado externo")
353
354 # 14.1. No costado interno - (2 fileiras de 14) (28)- Tipo "C"
355 # Z varia de 6.315m até 19.515m + 23.506 a 24.706m
356 z = 6.315
357 for i in range(12):
358     A_c_1 = h*t
359     A_c_2 = w*t
360
361     I_0_c_1 = (h*(t**3))/12
362     I_0_c_2 = (t*(w**3))/12
363
364     I_t_c = (A_c_1*(z - Y_LN)**2) + (A_c_2*(z- Y_LN)**2)
365
366     I_el = I_0_c_1 + I_0_c_2 + I_t_c
367     I_total += 2*I_el
368
369     z += 1.2
370
```

```

371 z = 23.506
372 for i in range(2):
373     A_c_1 = h*t
374     A_c_2 = w*t
375
376     I_0_c_1 = (h*(t**3))/12
377     I_0_c_2 = (t*(w**3))/12
378
379     I_t_c = (A_c_1*(z - Y_LN)**2) + (A_c_2*(z- Y_LN)**2)
380
381     I_e1 = I_0_c_1 + I_0_c_2 + I_t_c
382     I_total += 2*I_e1
383
384     z += 1.2
385
386 print(str(I_total) + " Reforçadores costado interno")
387
388 # 15. No teto do convés principal - 28 reforçadores - Tipo "D"
389 z = 25.830
390 A_d_1 = h*t
391 A_d_2 = w*t
392 I_0_d_1 = (t*h**3)/12
393 I_0_d_2 = (w*t**3)/12
394 I_t_d = (A_d_1*(z - Y_LN**2)) + (A_d_2*(z-h-Y_LN)**2)
395 I_e1 = I_0_d_1 + I_0_d_2 + I_t_d
396 I_total += 28*I_e1
397 print(str(I_total) + " Reforçadores do convés principal")
398
399
400 # 16. Na antepara longitudinal - 19 reforçadores - Tipo "F"
401 # Z varia de 2.715m até 25.515m com passo de 1.2m
402 z = 2.715
403 for i in range(19):
404     A_f_1 = h*t
405     A_f_2 = w*t
406
407     I_0_f_1 = (h*(t**3))/12
408     I_0_f_2 = (t*((w/2)**3))/12
409
410     I_t_f = (A_f_1*(z - Y_LN)**2) + (A_f_2*(z - Y_LN)**2)
411
412     I_e1 = I_0_f_1 + I_0_f_2 + I_t_f
413     I_total += I_e1
414
415     z += 1.2
416
417 print(str(I_total) + " Reforçadores antepara longitudinal")
418

```

```
419 | print("-----")
420 | print("Momento de inércia total: " + str(round(I_total)) + " m^4")
```