

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
**PNV3412 - Mecânica de Estruturas Navais e Oceânicas II**

Felipe José Vidal Souza - 11805082  
Marcus Vinícius Biroli de Almeida - 11807998

**Projeto da Seção Mestra de um Navio Petroleiro**  
Trabalho Final

São Paulo  
Julho de 2023

## Lista de Figuras

1	Navio Hellenpont Pride. Reproduzido de Marine Traffic [6]. . . . .	8
2	Características do Navio Hellenpont Pride. Reproduzido do enunciado de projeto.	8
3	Restrições do Navio Hellenpont Pride. Reproduzido do enunciado de projeto.	8
4	Seção transversal típica de um navio petroleiro de casco duplo. Reproduzido de IACS [4]. . . . .	9
5	Momento fletor em navio. Adaptado de Hughes (2010) [2]. . . . .	18
6	<i>Sketch</i> da seção transversal. . . . .	20
7	Antepara com espessura, fora de escala. . . . .	21
8	Perfis longitudinais, diferentes seções. . . . .	21
9	<i>Assembly</i> , cavernas e transversais gigantes em montagem. . . . .	22
10	<i>Assembly</i> finalizado, uma antepara ocultada para visualizar interior. . . . .	22
11	<i>Coupling</i> entre RP e antepara. . . . .	23
12	<i>Tie</i> entre antepara e extremidades longitudinais. . . . .	23
13	Momentos são aplicados nos RPs. . . . .	24
14	<i>Meshes</i> do perfil longitudinal. . . . .	24
15	Tensões de von Mises terceira iteração na condição de alquebramento. . . . .	29
16	Tensões de von Mises terceira iteração na condição de tosamento. . . . .	30
17	Tensões de von Mises quarta iteração na condição de alquebramento. . . . .	30
18	Tensões de von Mises quarta iteração na condição de tosamento. . . . .	31
19	Viga de validação . . . . .	34
20	Tensão principal, viga de validação simulada. . . . .	35
21	Tensão de von Mises, viga de validação simulada. . . . .	35
22	Teste com viga vazada . . . . .	36
23	Tensão de von Mises, viga vazada. . . . .	36
24	Tensão principal, viga vazada. . . . .	37
25	Planilha desenvolvida. . . . .	39
26	Exemplos longitudinais. Reproduzido de Hughes (2010) [1]. . . . .	39
27	Representação tridimensional, longitudinais pesados. . . . .	41

## Lista de Tabelas

1	Tabela resumo elementos transversais. . . . .	17
2	Tabela resumo elementos longitudinais. . . . .	17
3	Cálculo do módulo de resistência de seção transversal . . . . .	19
4	Resultados analíticos do dimensionamento inicial. . . . .	25
5	Valores do dimensionamento na primeira iteração. . . . .	26
6	Resultados analíticos da primeira iteração. . . . .	26
7	Valores do dimensionamento na segunda iteração. . . . .	27
8	Resultados analíticos da segunda iteração. . . . .	27
9	Valores do dimensionamento na terceira iteração. . . . .	28
10	Resultados analíticos da terceira iteração. . . . .	28

## Lista de Equações

1	Espessura das anteparas . . . . .	10
2	Separação de cavernas no duplo costado . . . . .	10
3	Espessura dos frames . . . . .	10
4	Espessura das transversais gigantes . . . . .	10
5	Separação das anteparas longitudinais . . . . .	11
6	Altura do duplo fundo . . . . .	11
7	Espessura do casco interno do duplo fundo . . . . .	11
8	Espessura do casco externo inferior . . . . .	11
9	Largura do duplo costado . . . . .	12
10	Espessura da parede interna do duplo costado . . . . .	12
11	Espessura do casco externo lateral . . . . .	12
12	Espessura do bojo . . . . .	12
13	Espessura dos caixões inferior e superior . . . . .	13
14	Espessura do convés . . . . .	13
15	Espessura da longarina na linha de centro . . . . .	13
16	Espessura geral da longarina . . . . .	13
17	Momento de inércia do reforçador leve . . . . .	14
18	Espessura da alma do reforçador leve . . . . .	14
19	Espessura do flange do reforçador leve . . . . .	14
20	Momento mínimo na condição de alquebramento . . . . .	14
21	Momento mínimo na condição de tosamento . . . . .	15
22	Momento de flexão vertical na condição de alquebramento . . . . .	16
23	Momento de flexão vertical na condição de tosamento . . . . .	16
24	Tensão analítica de flexão . . . . .	19
25	Equação da linha elástica . . . . .	38
26	Equação da linha elástica . . . . .	38

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Definição do Projeto</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Dimensionamento segundo IACS</b>	<b>9</b>
3.1	Elementos transversais . . . . .	10
3.1.1	Anteparas ( <i>Bulkheads</i> ) . . . . .	10
3.1.2	Cavernas ( <i>Frames</i> ) . . . . .	10
3.1.3	Transversais gigantes ( <i>Solid floor</i> ) . . . . .	10
3.2	Elementos longitudinais . . . . .	11
3.2.1	Anteparas ( <i>Bulkheads</i> ) . . . . .	11
3.2.2	Duplo fundo ( <i>Double bottom</i> ) . . . . .	11
3.2.3	Duplo costado ( <i>Double side</i> ) . . . . .	11
3.2.4	Bojo ( <i>Bilge</i> ) . . . . .	12
3.2.5	Caixão ( <i>Stool</i> ) . . . . .	12
3.2.6	Convés ( <i>Deck</i> ) . . . . .	13
3.2.7	Longarinas ( <i>Girder</i> ) . . . . .	13
3.2.8	Escoas ( <i>Side girder</i> ) . . . . .	13
3.2.9	Reforçadores leves . . . . .	14
3.3	Momento fletor na seção mestra, definido por norma . . . . .	14
3.3.1	Mínimo . . . . .	14
3.3.2	Dinâmico . . . . .	16
3.4	Tabelas Resumo . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>18</b>
4.1	Modelo dos esforços . . . . .	18
4.2	Modelo de viga . . . . .	19
4.3	Implementação em Abaqus . . . . .	20
4.3.1	<i>Part</i> . . . . .	20
4.3.2	<i>Property</i> . . . . .	20
4.3.3	<i>Assembly</i> . . . . .	21
4.3.4	<i>Step</i> . . . . .	22
4.3.5	<i>Interaction</i> . . . . .	22
4.3.6	<i>Load</i> . . . . .	24
4.3.7	<i>Mesh e Job</i> . . . . .	24

---

<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>25</b>
5.1	Método analítico . . . . .	25
5.1.1	Dimensionamento inicial . . . . .	25
5.1.2	Primeira iteração . . . . .	26
5.1.3	Segunda iteração . . . . .	26
5.1.4	Terceira iteração . . . . .	27
5.2	Método de elementos finitos . . . . .	29
5.2.1	Terceira iteração com elementos transversais . . . . .	29
5.2.2	Quarta iteração . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>32</b>
	<b>Referências</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Explorações com Abaqus</b>	<b>34</b>
<b>B</b>	<b>Comentário sobre deslocamento vertical</b>	<b>38</b>
<b>C</b>	<b>Planilha para cálculo dos escantilhões</b>	<b>39</b>
<b>D</b>	<b>Representação do dimensionamento preliminar</b>	<b>41</b>

# 1 Introdução

O presente trabalho, vinculado ao curso Mecânica de Estruturas Navais e Oceânicas II (PNV3412), conclui o programa da disciplina com o projeto da seção mestra de um navio petroleiro. Destaca-se que houve desenvolvimento analítico e computacional, ambos alicerçados em normas internacionais de sociedades classificadoras.

O contexto é do denominado *rationaly-based structural design*, que, em suma, incorpora a análise computacional - enfatiza-se o método dos elementos finitos - desde o início do projeto estrutural, permitindo a concepção e construção de estruturas viáveis de alta complexidade.

Como motivação, na área naval, destaca-se o exponencial aumento, a partir de 1950's, da demanda de transporte, de toda sorte de bens, contêineres a gases liquefeitos, tracionando por navios maiores com inúmeras especificidades. Os objetivos da abordagem racional são atender os diversos requisitos de cada projeto, com segurança necessária, viabilidade técnica e eficiência econômica. [2]

Primeiro, serão levantados, em detalhes, os objetivos técnicos do trabalho, as restrições simplificadoras impostas e os requisitos de projeto. Antecipa-se a decisão de estudar um oil tanker da classe Panamax.

Em seguida, serão declarados o valor ou a janela de valores para cada elemento estrutural, conforme norma. A metodologia analítica e computacional é justificada, com destaque para o procedimento de utilização adotado no software Abaqus.

O resultado final da configuração final é apresentado e discutido. Apêndices foram utilizado para incluir pormenores ao relatório, como reflexões da teoria e, especialmente, as iterações feitas. Por fim, conclui-se analisando o trabalho em retrospecto.

## 2 Definição do Projeto

O objetivo deste projeto é desenvolver a seção mestra resistente de um navio petroleiro, utilizando as regras estabelecidas pelas sociedades classificadoras, em particular as Regras Estruturais Comuns para Graneleiros e Petroleiros (IACS - International Association of Classification Societies). Em adição, será realizado um estudo de modelagem computacional utilizando o método dos elementos finitos, por meio do software Abaqus, para verificar o projeto preliminar dos elementos estruturais.

O dimensionamento deverá considerar:

- Separação entre anteparas, definida pelo comprimento alagável;
- Separação entre cavernas (frames) e transversais gigantes (solid floor);
- Separação entre reforçadores longitudinais leves e pesados;
- Espessuras do chapeamento em diferentes partes do navio, como fundo, duplo fundo, costado, duplo costado, convés, anteparas transversais e longitudinais;
- Determinação dos módulos resistentes (inércia e área) dos respectivos reforçadores de cada chapeamento (fundo, costado, convés).

Este projeto requer uma abordagem iterativa, na qual os cálculos e análises serão realizados em etapas a fim de garantir um dimensionamento estrutural adequado e seguro para o navio petroleiro em questão. Portanto, para simplificar o trabalho, serão impostas as seguintes restrições:

1. A verificação será realizada exclusivamente em relação à resistência flexional;
2. O calado de projeto será utilizado para definir a condição de carga;
3. O critério de projeto adotado será um fator de segurança (FS) ao escoamento, com valores entre 1.5 e 3.0 para todos os pontos materiais da estrutura.

O navio selecionado para este projeto é um Panamax, ou seja, um navio com o tamanho máximo para atravessar o canal do Panamá. O enunciado do projeto define o dimensionamento da embarcação Hellenic Pride (figura 1). As características do navio e restrições de projeto estão apresentadas nas figuras 2 e 3.



Figura 1: Navio Hellespont Pride. Reproduzido de Marine Traffic [6].

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
$(GM/B)_{lastro}$	0,048	<b>0,057</b>	0,038	0,048
$(GM/B)_{carregado}$	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	0,0590	0,0100

Figura 2: Características do Navio Hellespont Pride. Reproduzido do enunciado de projeto.

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

Figura 3: Restrições do Navio Hellespont Pride. Reproduzido do enunciado de projeto.



### 3.1 Elementos transversais

#### 3.1.1 Anteparas (*Bulkheads*)

Conforme a seção 5.2 de 2008, define-se no mínimo três anteparas transversais: uma à popa, mantendo os equipamentos relativos ao leme e associados estanques; uma ao fim da praça de máquinas, também a protegendo; uma à proa, denominada antepara de colisão, para dar mais segurança à embarcação frente a um impacto frontal. Entretanto, fogem ao escopo do trabalho de projetar apenas a seção mestra.

Assim, extrapolando a partir de p1.c2.s2/1.1.4/2023, será definido um espaçamento - comprimento alagável, de  $W_{bk,t} = 28m$  na região dos tanques para as anteparas transversais. A sua espessura, conforme p1.c6.s3/1.1.1/2023, é de, no mínimo:

$$t_{bk,t} = 4.5 + 0.02 \cdot LWL \quad (1)$$

Ou, calculando com o comprimento de projeto,  $9.1mm$ .

#### 3.1.2 Cavernas (*Frames*)

A separação de cavernas pode ser encontrada em p8.c1.s8/3.3.3.1/2008:

$$S_f = 2.6 + 0.005 \cdot LWL \quad \text{com } S_f \leq 3.5m \quad (2)$$

Ao realizar o cálculo de  $S_f$ , verifica-se que o valor total encontrado é de 3.74 metros, ou seja, é necessário adotar o valor máximo de 3.5 metros para a separação. Conforme p1.c6.s3/3.1.1/2023, a sua espessura é de, no mínimo,  $8.4mm$ :

$$t_f = 5.0 + 0.015 \cdot LWL \quad (3)$$

#### 3.1.3 Transversais gigantes (*Solid floor*)

De acordo com p1.c10.s1/2.1.1/2023, pode-se tomar o espaçamento entre *solid floor* de, no máximo,  $3.5m$ . A sua espessura mínima é de  $8.9mm$  (p1.c6.s3/3.1.1/2023):

$$t_{sf} = 5.5 + 0.015 \cdot LWL \quad (4)$$

## 3.2 Elementos longitudinais

### 3.2.1 Anteparas (*Bulkheads*)

Conforme usual, por exemplo fig. 6.3.1 de 2008, serão admitidas duas anteparas longitudinais separando o tanque em três de mesma boca, ou, aproximadamente:

$$W_{bk,l} = \frac{1}{3}(B - 2W_{ds}) \quad (5)$$

Portanto, a separação do tanque será de aproximadamente 9.3 metros. A espessura mínima da anteparas longitudinal será a mesma da transversal, mencionada na seção 3.1.1, de 9.1mm.

### 3.2.2 Duplo fundo (*Double bottom*)

Em p1.c2.s3/2.3.1/2023, a norma define a seguinte relação entre a boca do navio e a altura do duplo fundo:

$$H_{db} = \frac{B}{15} \quad \text{com } 1.0 \leq h \leq 2.0m \quad (6)$$

Como o valor de  $H_{db}$  é maior que 2, o valor escolhido para a altura do duplo fundo é de 2 metros. A espessura do casco interno do duplo fundo pode ser encontrada em p1.c6.s3/1.1.1/2023. Ela é definida como:

$$t_{db,i} = 5.5 + 0.03 \cdot LWL \quad (7)$$

Dessa maneira, a espessura encontrada é de 12.4mm. A espessura do casco externo inferior também vale, no mínimo, 12.4mm:

$$t_{db,o} = 5.5 + 0.03 \cdot LWL \quad (8)$$

### 3.2.3 Duplo costado (*Double side*)

A largura do duplo costado é definido em p1.c2.s3/3.1.1/2023. A equação relaciona o valor de  $W_{ds}$  e o peso morto do petroleiro (deadweight).

$$W_{ds} = \min\left[0.5 + \frac{DWT}{20000}, 2.0\right] \quad \text{com } 1.0 \leq h \leq 2.0m \quad (9)$$

O resultado será o mínimo entre 4.19 e 2.00, portanto seleciona-se  $W_{ds}$  igual a 2 metros. A espessura mínima da parede interna do duplo costado é definida em p1.c6.s3/1.1.1/2023 como:

$$t_{ds,i} = 4.5 + 0.02 \cdot LWL \quad (10)$$

A espessura obtida é de  $9.1mm$ . A parte lateral do casco possui uma espessura de  $12.4mm$ , encontrada a partir da seguinte equação:

$$t_{ds,o} = 5.5 + 0.03 \cdot LWL \quad (11)$$

### 3.2.4 Bojo (*Bilge*)

O raio do bojo de um navio petroleiro panamax pode variar entre 5 e 10% da boca da embarcação. Portanto, define-se um bojo com raio igual a 2 metros.

A IACS, em p1.c6.s3/1.1.1/2023, define a espessura mínima do bojo na seção mestra como:

$$t_b = 5.5 + 0.03 \cdot LWL \quad (12)$$

Portanto, a espessura do bojo da embarcação pode ser aproximada de  $12.4mm$ .

Considera-se, ainda, a espessura da chapa inclinada interligada ao duplo fundo, ou simplesmente asa do bojo (*bilge hopper*), sendo igual à espessura do chão interno:  $12.4mm$ .

### 3.2.5 Caixão (*Stool*)

Toma-se o prescrito em p1.c3.s6/10.4/2023. Os caixões nas bases das anteparas longitudinais farão  $60^\circ$  com a horizontal e terão comprimento de  $1.8m$ . Os caixões superiores terão salto de  $0.5m$  e parte oblíqua de comprimento  $1.5m$  e ângulo  $30^\circ$ .

Os diafragmas dos caixões inferiores e superiores possuem espessuras de  $8.4mm$ , definidas em p1.c6.s3/1.1.1/2023 pela seguinte expressão:

$$t_{st,u} = t_{st,l} = 5.0 + 0.015 \cdot LWL \quad (13)$$

### 3.2.6 Convés (*Deck*)

A espessura mínima da chapa de convés pode ser obtida através da seguinte equação apresentada em p1.c6.s3/1.1.1/2023:

$$t_d = 4.5 + 0.02 \cdot LWL \quad (14)$$

O valor obtido é de  $9.1mm$

### 3.2.7 Longarinas (*Girder*)

A IACS demanda em p1.c10.s1/2.1.2/2023 que a separação das longarinas no duplo fundo não pode ser maior que  $3.5m$ .

A espessura depende da localização das mesmas em relação à linha de centro da seção transversal. A norma, na parte p1.c6.s3/3.1.1/2023, explica que, caso o reforçador esteja na linha de centro, a espessura pode ser definida como:

$$t_{bg} = 5.5 + 0.025 \cdot LWL \quad (15)$$

Logo, a espessura resultante na linha de centro é de  $11.2mm$ . Já a espessura nas outras posições é de  $10.1mm$ , que pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$t_{bg} = 5.5 + 0.02 \cdot LWL \quad (16)$$

### 3.2.8 Escoas (*Side girder*)

Os reforçadores pesados no costado possuem propriedades semelhantes a dos duplo fundo. Portanto, aproxima-se  $t_{sg} = t_{bg} = 10.1mm$ .

Seguindo o modelo das longarinas, a separação máxima das escoas devem ser mantidas em  $3.5$  metros.

### 3.2.9 Reforçadores leves

Por simplicidade, definiu-se um único perfil de reforçador leve do tipo T, com diferente espaçamentos na seção transversal. Primeiro, conforme a tabela 10.2.1 de 2008, a largura do flange é, no mínimo, 0.25 da altura da alma. A p8.c1.s10/2.2.2/2008 prevê momento de inércia próprio mínimo de, adaptado:

$$I_{min} = s^2(0.8s_*t_s + ht_h + bt_b)\frac{\sigma_{esc}}{235} \quad cm^4 \quad (17)$$

Onde:  $s$  é o espaçamento entre reforçadores ( $s$  em  $m$  e  $s_*$  em  $cm$ );  $b$  a largura da flange em  $cm$ ;  $h$  a altura da alma em  $cm$ ;  $t$  as respectivas espessuras em  $cm$ ;  $\sigma_{esc}$  a tensão de escoamento do material em  $N/mm^2$ . Ainda, conforme p8.c1.s10/2.2.3/2008, as espessuras valem, no mínimo, adaptado:

$$t_h = \frac{s_{**}}{100} \sqrt{\frac{\sigma_{esc}}{235}} \quad (18)$$

$$t_b = \frac{b_*}{12} \sqrt{\frac{\sigma_{esc}}{235}} \quad (19)$$

Onde as espessuras,  $s_{**}$  e  $b_*$  estão em  $mm$ . Em acompanhamento a p1.c2.s3/3.2.2/2023, a separação média foi fixada em  $700mm$ . Com  $\sigma_{esc} = 225MPa$ , pode-se resolver as três equações anteriores e obter:  $t_h = 6.8mm$   $t_b = 8.1mm$ ,  $h = 211mm$ ,  $b = 53mm$ .

## 3.3 Momento fletor na seção mestra, definido por norma

### 3.3.1 Mínimo

Conforme p1.c1.s4/2.1.1/2023, o momento mínimo de flexão em águas calmas,  $M_{SW-h-min}$  e  $M_{SW-s-min}$ , em  $kNm$ , nas condições de alquebramento e tosamento, deve ser considerado, respectivamente, como:

$$M_{SW-h-min} = f_{SW} (171C_W L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{WV-h-mid}) \quad (20)$$

$$M_{SW-s-min} = -0.85f_{SW} (171C_W L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{WV-s-mid}) \quad (21)$$

Onde:

- $C_W$ : coeficiente de onda. Considerar:

$$C_W = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5} \text{ para } 90m \leq L \leq 300m$$

$$C_W = 10.75 \text{ para } 300m < L \leq 350m$$

$$C_W = 10.75 - \left(\frac{L-350}{150}\right)^{1.5} \text{ para } 350m < L \leq 500m$$

- $f_{SW}$ : coeficiente a ser utilizado como:

$$f_{SW} = 0.00 \text{ para } x \leq 0$$

$$f_{SW} = 0.15 \text{ quando } x = 0.1L$$

$$f_{SW} = 1.00 \text{ para } 0.3L \leq x \leq 0.7L$$

$$f_{SW} = 0.15 \text{ quando } x = 0.9L$$

$$f_{SW} = 0.00 \text{ para } x \geq L$$

- $M_{WV-h-mid}$ : Momento de flexão vertical de onda para avaliação de resistência em condição de alquebramento, conforme definido em 3.3.2, utilizando  $f_p$  e  $f_m$  iguais a 1.0.
- $M_{WV-s-mid}$ : Momento de flexão vertical de onda para avaliação de resistência em condição de tosamento, conforme definido em 3.3.2, utilizando  $f_p$  e  $f_m$  iguais a 1.0.

Portanto, define-se os momentos mínimos de flexão na seção mestra, em águas calmas, como:

$$M_{SW-h-min} = 1.00 [171 \cdot 10.15 \cdot 228.60^2 \cdot 32.26 (0.847 + 0.7) 10^{-3} - 2753721]$$

$$M_{SW-h-min} = 1772849 \text{ kNm}$$

$$M_{SW-s-min} = -0.85 \cdot 1.00 [171 \cdot 10.15 \cdot 228.60^2 \cdot 32.26 (0.847 + 0.7) 10^{-3} - (-2916190)]$$

$$M_{SW-s-min} = -6326346 \text{ kNm}$$

### 3.3.2 Dinâmico

Conforme p1.c1.s4/3.1.1/2023, os esforços dinâmicos do tipo momento fletor de onda, para as condições de tosamento e alquebramento, são definidos como:

$$M_{WV-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad (22)$$

$$M_{WV-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad (23)$$

Onde:

- $f_{nl-vh}$ : coeficiente que considera efeitos não lineares aplicados ao alquebramento.  
Considerar  $f_{nl-vh} = 1.0$  para avaliação de resistência e fadiga.
- $f_{nl-vs}$ : coeficiente que considera efeitos não lineares aplicados ao tosamento:  
Considerar  $f_{nl-vs} = 0.58 \cdot \left(\frac{C_B+0.7}{C_B}\right)$  para avaliação de resistência;  
Considerar  $f_{nl-vs} = 1.0$  para avaliação de fadiga.
- $f_p$ : coeficiente a ser utilizado como:  
 $f_p = f_{ps}$  para avaliação de resistência;
  - $f_{ps} = 1.0$  para condições de mar extremo. $f_p = 0.9 \cdot [0.27 - (6 + 4f_T)L \cdot 10^{-5}]$  para avaliação de fadiga.
  - $f_T = T_{LC}/T_{SC}$  , relação entre calado com determinado carregamento e o calado máximo, sendo sempre maior que 0.5.
- $f_m$ : fator distributivo para momento de flexão em relação ao comprimento do navio.  
Considerar:  
 $f_m = 1.0$  para  $0.4L \leq x \leq 0.65L$

Portanto, define-se os momentos verticais fletores de onda na seção mestra como:

$$M_{WV-h} = 0.19 \cdot 1.00 \cdot 1.00 \cdot 1.00 \cdot 10.15 \cdot 228.60^2 \cdot 32.26 \cdot 0.847$$

$$M_{WV-h} = 2753721 \text{ kNm}$$

$$M_{WV-s} = -0.19 \cdot 1.059 \cdot 1.00 \cdot 1.00 \cdot 10.15 \cdot 228.60^2 \cdot 32.26 \cdot 0.847$$

$$M_{WV-s} = -2916190 \text{ kNm}$$

### 3.4 Tabelas Resumo

Elemento	Símbolo	Dimensionamento
Separação anteparas	$W_{bk,t}$	28 m
Espessura anteparas	$t_{bk,t}$	9.1 mm
Separação cavernas	$S_f$	3.5 m
Espessura cavernas	$t_f$	8.4 mm
Separação transversais gigantes	$S_{sf}$	3.5 m
Espessura transversais gigantes	$t_{sf}$	8.9 mm

Tabela 1: Tabela resumo elementos transversais.

Elemento	Símbolo	Dimensionamento
Separação anteparas	$W_{bk,l}$	9.3 m
Espessura anteparas	$t_{bk,l}$	9.1 mm
Altura duplo fundo	$H_{db}$	2.0 m
Espessura duplo fundo	$t_{db,i}$	12.4 mm
Espessura casco externo inferior	$t_{db,o}$	12.4 mm
Largura duplo costado	$W_{ds}$	2.0 m
Espessura duplo costado	$t_{ds,i}$	9.1 mm
Espessura casco externo lateral	$t_{ds,o}$	12.4 mm
Raio do bojo	$R_b$	2.0 m
Espessura do bojo	$t_b$	12.4 mm
Espessura asa do bojo	$t_b h$	12.4 mm
Comprimento caixão inferior	$S_{st,l}$	1.8 m
Comprimento caixão superior	$S_{st,u}$	1.5 m
Espessura caixão	$t_{st}$	8.4 mm
Espessura convés	$t_d$	9.1 mm
Separação longarinas	$S_g$	3.5 m
Espessura longarina central	$t_{g,c}$	11.2 mm
Espessura longarina	$t_g$	10.1 mm
Separação escoas	$S_{sg}$	3.5 m
Espessura escoas	$t_{sg}$	10.1 mm
Reforçadores leves	-	(211x6.8x53x8.1) mm

Tabela 2: Tabela resumo elementos longitudinais.

## 4 Metodologia

Primeiro, justifica-se o modelo adotado para os esforços, essencialmente o momento de natureza hidrostática. Em seguida, apresenta-se o modelo de viga assumido, bem como o procedimento analítico empregado para cálculo da tensão na seção mestra. Por último, a metodologia de uso do Abaqus é discutida.

### 4.1 Modelo dos esforços

Primeiro, conforme ilustrado na figura 5, o momento fletor a que está sujeita uma embarcação é uma curva contínua e derivável, com mínimos, em módulo, iguais a zero nos extremos da embarcação e máximo próximo a meia-nau<sup>2</sup>. Não é um problema que a convenção de sinais difira da proposta por Popov (1978) [5]. No ponto  $x_*$  de maior momento fletor  $M_*$ , pode-se tomar uma região suficientemente pequena  $\Delta x$  e aplicar linearização por Taylor de primeira ordem, obtendo uma função constante e igual a  $M_*$ . Este procedimento é interessante pois majora-se o esforço a que está submetida, por exemplo, uma caverna do petroleiro. É razoável atribuir a  $M_*$  os momentos prescritos por norma.

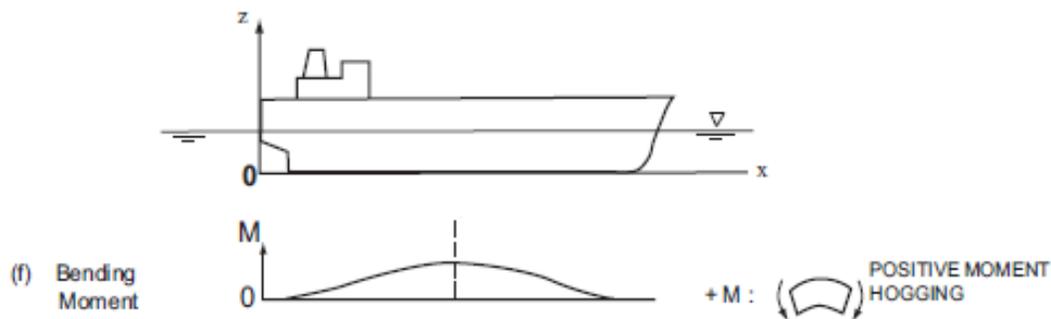


Figura 5: Momento fletor em navio. Adaptado de Hughes (2010) [2].

Destaca-se que, uma vez que a força cortante é a derivada do momento fletor, esta resulta nula na linearização e, portanto, o equilíbrio de forças é assegurado. Para qualquer convenção, o sinal do momento nas duas extremidades da região é inverso, de tal sorte que garante-se que todo o equilíbrio estático está sendo satisfeito.

Com essas considerações já é possível recuperar todas as tensões de regime elástico linear. Por exemplo, pela equação analítica (24), onde  $\sigma_x(x)$  é a tensão de flexão na posição longitudinal  $x$ , em uma linha paralela distante  $y$  da linha neutra da seção transversal, com  $I$  o segundo momento de área com respeito à L.N. e  $M(x)$  o momento fletor.

<sup>2</sup>Não exatamente a meia-nau devido a casco com balizas variáveis, distribuição não uniforme da carga e eventual presença de onda.

$$\sigma_x(x) = \frac{M(x)}{I} y_{LN} \quad (24)$$

Este passo é bem relevante pois dispensa a complexa necessidade de conhecer ou estimar, tão antecipadamente na espiral de projeto, a curva do momento fletor da embarcação – discussão no Apêndice B.

## 4.2 Modelo de viga

Conforme destacado, foi realizado cálculo analítico dos escantilhões. Para isso, foi necessário definir um modelo de viga a ser utilizado: por simplicidade, e também porque as condições do problema permitem, escolheu-se a viga de Euler-Bernoulli. Este modelo que autoriza o uso da equação 24, de tal sorte que o esforço de cálculo teórico se limita a determinação do módulo de resistência da seção transversal.

As seguintes hipóteses são as principais: Viga é um prisma reto, com dimensão longitudinal muito maior que as demais (esbelteza). Planos perpendiculares à linha neutra permanecem planos e perpendiculares depois da deformação (Navier). Efeito Poisson negligenciável. Rotação muito pequena.

Então, pode-se construir a seguinte tabela (referência na quilha), incluindo todos os itens com sessão transversal em uma dada posição longitudinal sob análise (no caso, a sessão mestra):

Item	Base	Altura	Área	Braço	Momento de área	Segundo momento próprio	Termo eixos paralelos
	$i$	$ii$	$iii = i \cdot ii$	$iv$	$iii \cdot iv$	$i \cdot ii^3/12$	$iii \cdot iv^2$
1	$a$	$b$	$ab$	$c$	$abc$	$ab^3/12$	$abc^2$
2	$d$	$e$	$de$	$f$	$def$	$de^3/12$	$def^2$
...							
			$\sum_1 :$ $ab + de$		$\sum_2 :$ $abc + def$	$\sum_3 :$ $(ab^3 + de^3)/12$	$\sum_4 :$ $abc^2 + def^2$

Tabela 3: Cálculo do módulo de resistência de seção transversal

A partir da qual obtém-se a posição da linha neutra por  $Y_{LN} = \sum_2 / \sum_1$  e o momento de inércia com respeito a linha base por  $I_{LB} = \sum_3 + \sum_4$ . Recordar-se que o momento de inércia com respeito a linha neutra é  $I_{LN} = I_{LB} - \sum_2 \cdot Y_{LN}^2$ , então, no fundo, o módulo vale  $Z = I_{LN} / Y_{LN}$  e no topo,  $Z = I_{LN} / (\text{Pontal} - Y_{LN})$ . Relembra-se que, conforme [2], as fórmulas para reforçadores oblíquos e bojos são adaptadas.

A montagem da tabela alcançou alguma complexidade e será discutida no Apêndice C.

### 4.3 Implementação em Abaqus

A análise computacional da seção mestra foi realizada no software proprietário para análise por elementos finitos Abaqus, da estadunidense SIMULIA. A investigação em Abaqus se iniciou, como registrado no Apêndice A, com o estudo as formas de modelar o problema sob análise no programa. O procedimento adotado para construção e simulação da seção mestra é detalhado a seguir, disposto conforme os módulos do Abaqus:

#### 4.3.1 Part

Primeiro, cria-se uma parte única com configuração *3D, Deformable, Shell, Extrusion* para a seção transversal dos elementos longitudinais. Optou-se por modelar a seção inteira, pois o custo computacional está baixo e resulta em visualização mais agradável.

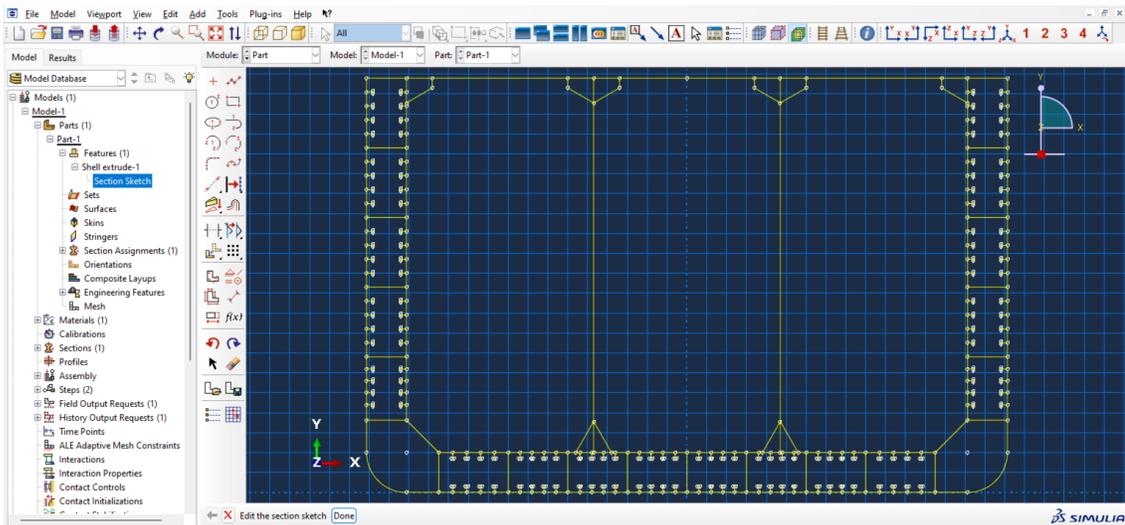


Figura 6: *Sketch* da seção transversal.

Os elementos transversais são do tipo *3D, Deformable, Shell, Planar*, ou seja, desenha-se os seus contornos no sketch.

#### 4.3.2 Property

Para o material, toma-se um único aço de densidade  $7800\text{kg}/\text{m}^3$ , módulo de elasticidade de  $200\text{GPa}$  e coeficiente de Poisson de 0.3. Criam-se seções com configuração *Shell, Homogeneous*, tantas quantas diferentes espessuras estão sendo avaliadas. Atribui-se cada seção a seu respectivo elemento. Levanta-se que, para todo o procedimento, decidiu-se trabalhar no SI, pois as dimensões da embarcação resultam mais facilmente inseridas, e melhor compreendidas, em metros.

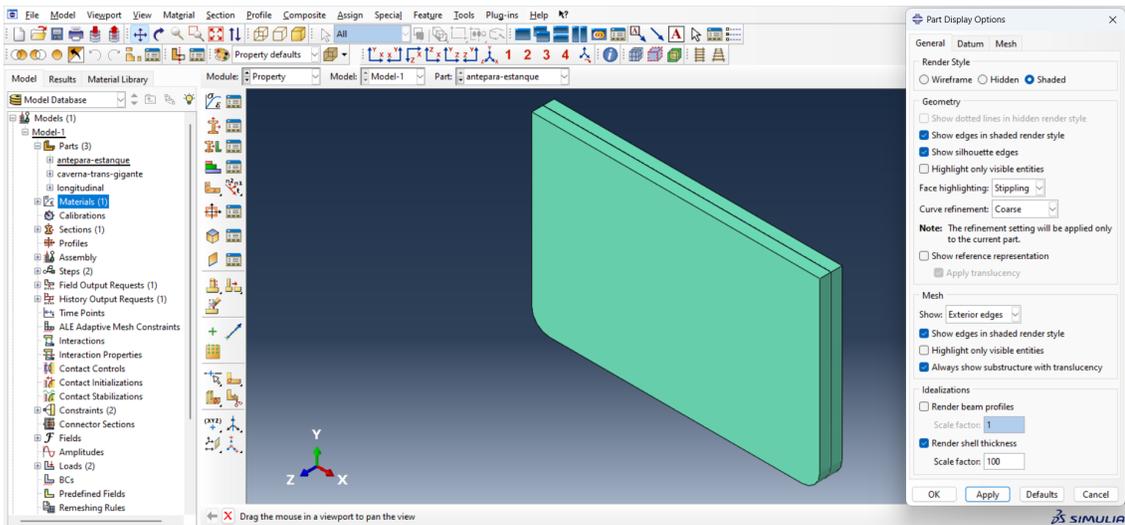


Figura 7: Antepara com espessura, fora de escala.

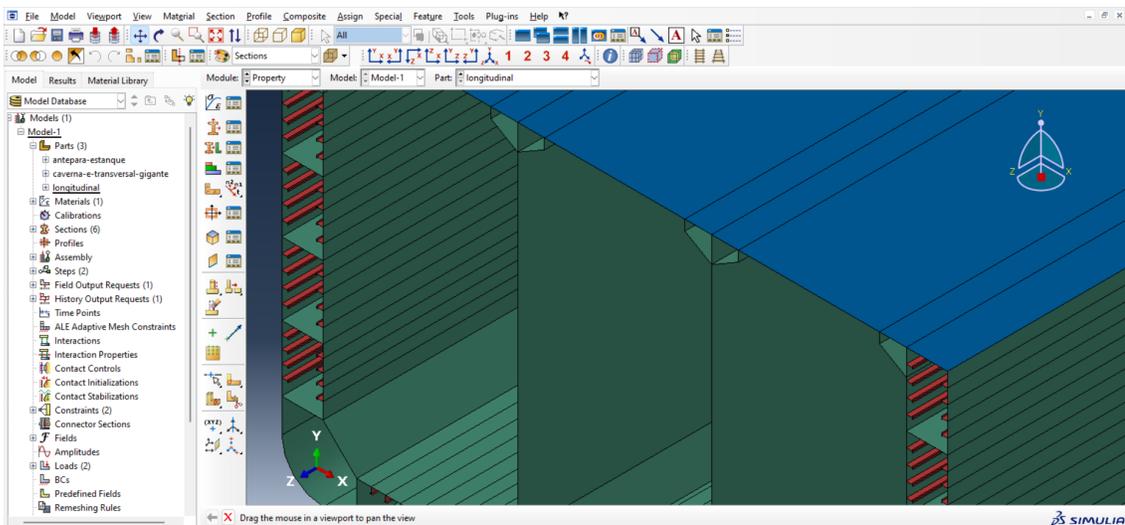


Figura 8: Perfis longitudinais, diferentes seções.

### 4.3.3 Assembly

Cria-se uma instância *Part Dependent* com as peças construídas. Conforme previamente definido, os perfis transversais são copiados e posicionados em relação ao recorte longitudinal da seção mestra. A origem do sistema global foi posicionada na interseção do fundo, plano de simetria longitudinal e extremidade do comprimento alagável – eixo  $z$  paralelo a quilha, de tal sorte que todas as partes tenham esta coordenada igual ou maior que zero.

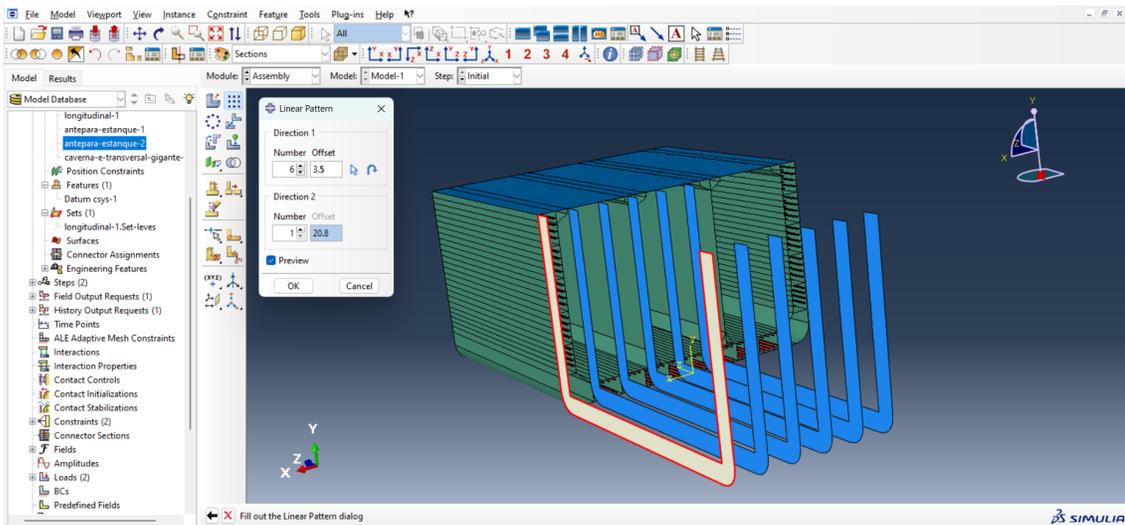


Figura 9: *Assembly*, cavernas e transversais gigantes em montagem.

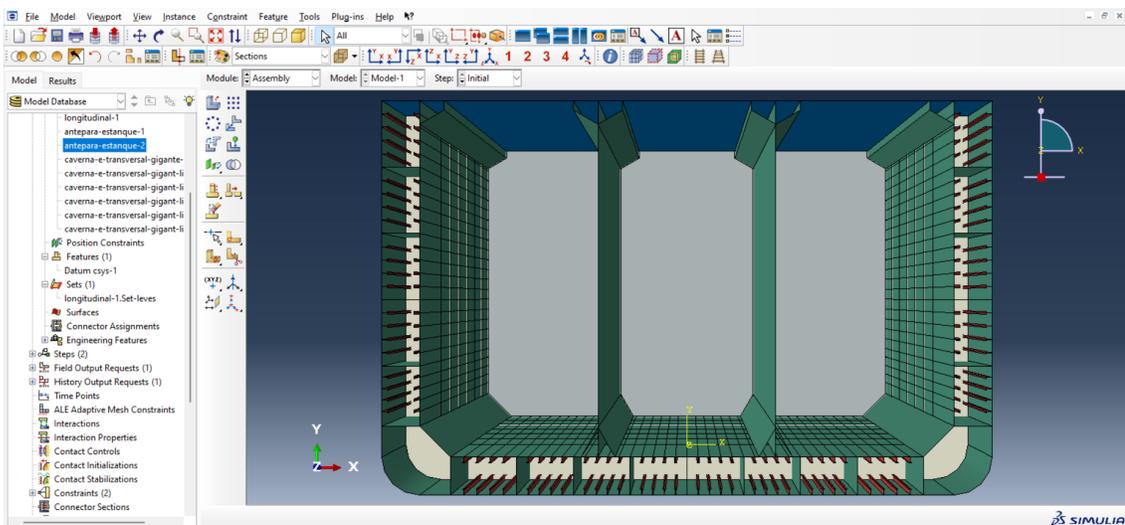


Figura 10: *Assembly* finalizado, uma antepara ocultada para visualizar interior.

#### 4.3.4 Step

A análise é estática. Por padrão da disciplina, têm-se o passo inicial e mais um passo, *Static, General*, com *Time period* de 1 e *Increment size* (todos) de 0.1.

#### 4.3.5 Interaction

Primeiro, posicionam-se dois *Reference Points* (RPs), um no centro de cada antepara. Conforme o Apêndice A, coloca-se a *constrain* do tipo *coupling* entre um RP e sua respectiva

antepara. Deve ser aplicado *tie* entre cada superfície de uma peça e extremidades de outra em que aquela repousa, por exemplo: entre a superfície interna de uma antepara e todas as extremidades coplanares dos elementos longitudinais.

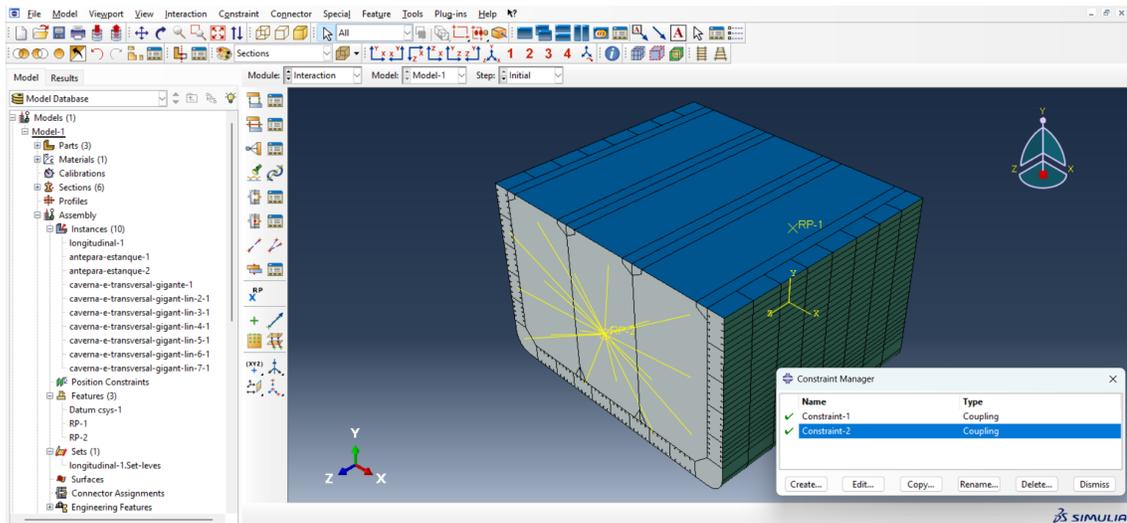


Figura 11: *Coupling* entre RP e antepara.

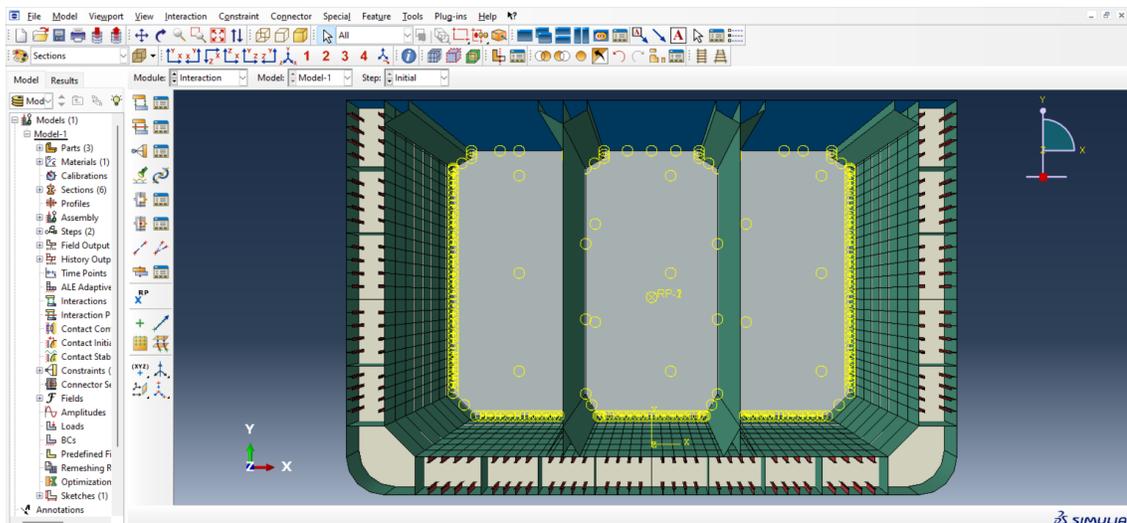


Figura 12: *Tie* entre antepara e extremidades longitudinais.

Totalizaram-se 11 *constrains*. É importante ressaltar que, para viabilizar a montagem manual, só foi considerada a interação das cavernas com os perfis longitudinais externos.

### 4.3.6 Load

Impõe-se dois momentos, de mesmo módulo e direção, mas sinais opostos, aos dois RPs. No alquebramento, estes sinais são tais que, na notação de Popov (1978) [5], o momento fletor é negativo, e no tosamento positivo.

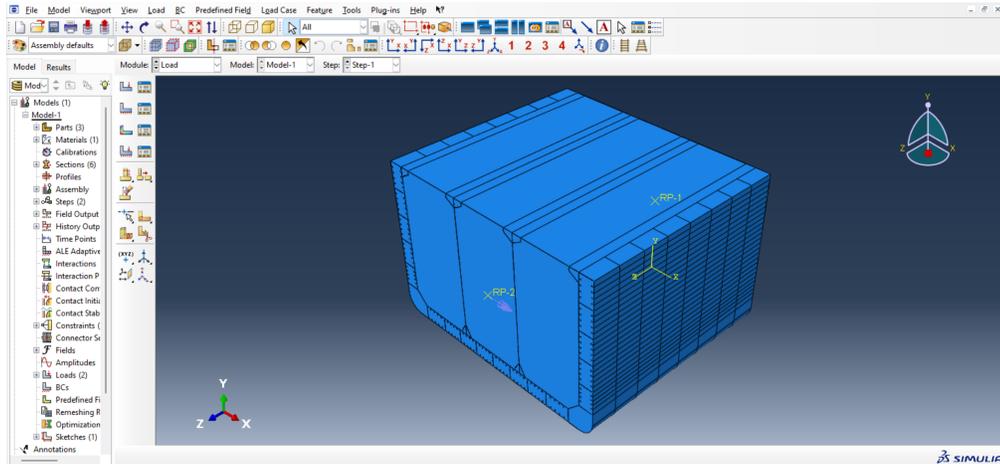


Figura 13: Momentos são aplicados nos RPs.

Destaca-se que, como levantado em 4.1, não há necessidade de aplicar condições de contorno ao problema, pois o equilíbrio já é satisfeito.

### 4.3.7 Mesh e Job

Não se preocupou com a geração dos *meshes* ou configuração do *Job*. Pontua-se que aplicou-se, globalmente, tamanho de  $0.5m$  para um *mesh*, totalizando pouco mais de 50000 elementos.

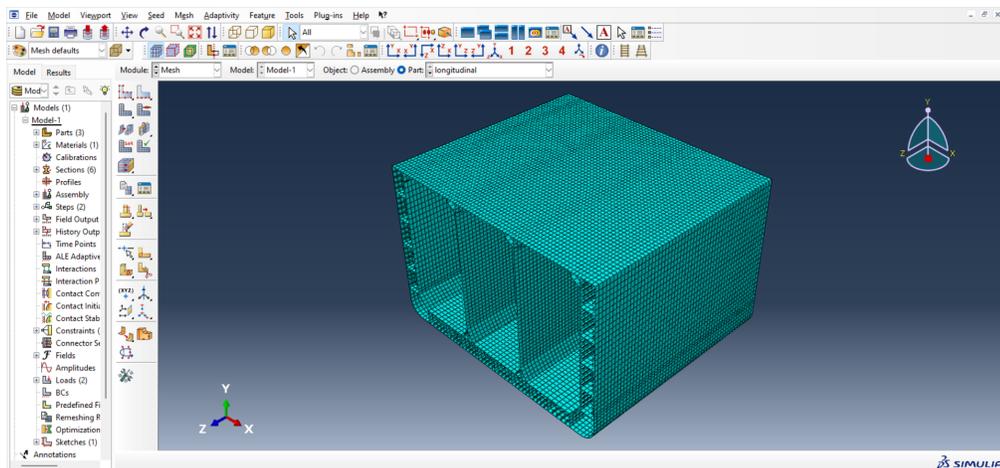


Figura 14: *Meshes* do perfil longitudinal.

## 5 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos da resistência da seção mestra. Primeiro, verifica-se analiticamente os resultados através do modelo de viga de Euler-Bernoulli, com o auxílio de planilhas de cálculos apresentados no Apêndice C. Por fim, verifica-se as tensões de von Mises através do método de elementos finitos.

### 5.1 Método analítico

Para realizar a análise analítica da seção mestra, os cálculos apresentados na seção 4.2 consideram apenas os elementos de uma única direção. Dessa maneira, serão calculados apenas os esforços nos elementos longitudinais apresentados na seção 3.2.

Serão realizadas iterações no dimensionamento com o objetivo de minimizar o uso de material e, ao mesmo tempo, manter o fator de segurança entre 1.5 e 3.0. Optou-se por manter as separações constantes e unificar a espessura das chapas durante as iterações, por convenção na modelagem. A tensão de escoamento considerada é de 225 MPa.

#### 5.1.1 Dimensionamento inicial

Os cálculos preliminares com os elementos dimensionados, apresentados na tabela 2, resultaram nos seguintes resultados:

$Y_{LN}$	8.1	$m$	<b>Alquebramento</b>			<b>Tosamento</b>		
$I_{LB}$	405.7	$m^4$	Tensão fundo	76	MPa	Tensão fundo	272	MPa
$I_{LN}$	189.6	$m^4$	Tensão convés	118	MPa	Tensão convés	422	MPa
$Z_{\text{fundo}}$	23.3	$m^3$	F.S. Fundo	2.95		F.S. Fundo	0.83	
$Z_{\text{convés}}$	15.0	$m^3$	F.S. Convés	1.90		F.S. Convés	0.53	

Tabela 4: Resultados analíticos do dimensionamento inicial.

Nota-se que a tensão no fundo e no convés, na condição de tosamento, ficaram muito acima do esperado, com o fator de segurança menor que 1. Uma possível justificativa para tal resultado é o dimensionamento feito anteriormente. Foram consideradas as espessuras mínimas permitidas pela norma, separações máximas dos elementos e reforçadores leves com dimensões mínimas, portanto resultando na seção mestra com menor resistência permitida.

Desse modo, é necessário que haja iterações aumentando a espessura do chapeamento, além de um aumento significativo no comprimento e largura dos reforçadores leves.

### 5.1.2 Primeira iteração

A primeira iteração analítica considerou um aumento de 20% no comprimento da flange e alma dos reforçadores leves. Em adição, houve um aumento de 30% na espessura de todo chapeamento com menos de 10mm, e um aumento de 15% no chapeamento com mais de 10mm. Esta modificação, que pode ser verificada na tabela 5, segue o objetivo de unificar a espessura dos elementos longitudinais na seção mestra.

Elemento	Símbolo	Valor Inicial [mm]	Iteração 1 [mm]
Espessura antepara	$t_{bk,l}$	9.1	11.8
Espessura duplo fundo	$t_{db,i}$	12.4	14.3
Espessura casco externo inferior	$t_{db,o}$	12.4	14.3
Espessura duplo costado	$t_{ds,i}$	9.1	11.8
Espessura casco externo lateral	$t_{ds,o}$	12.4	14.3
Espessura do bojo	$t_b$	12.4	14.3
Espessura asa do bojo	$t_{bh}$	12.4	14.3
Espessura caixão	$t_{st}$	8.4	10.9
Espessura convés	$t_d$	9.1	11.8
Espessura longarina central	$t_{g,c}$	11.2	12.9
Espessura longarina	$t_g$	10.1	11.6
Espessura escoa	$t_{sg}$	10.1	11.6
Reforçadores leves	-	(211x6.8x53x8.1)	(253x8.8x64x10.5)

Tabela 5: Valores do dimensionamento na primeira iteração.

Os resultados da primeira iteração podem ser verificados na tabela 6.

$Y_{LN}$	8.4	$m$	Alquebramento			Tosamento		
$I_{LB}$	517.8	$m^4$	Tensão fundo	63	MPa	Tensão fundo	224	MPa
$I_{LN}$	236.1	$m^4$	Tensão convés	93	MPa	Tensão convés	333	MPa
$Z_{fundo}$	28.2	$m^3$	F.S. Fundo	3.58		F.S. Fundo	1.00	
$Z_{convés}$	19.0	$m^3$	F.S. Convés	2.41		F.S. Convés	0.68	

Tabela 6: Resultados analíticos da primeira iteração.

É possível observar que o aumento das espessuras de todos os elementos, juntamente com o aumento dos reforçadores, diminuiu significativamente a tensão no fundo. Entretanto, o fator de segurança continua menor que 1.5 na condição de tosamento, longe de seu objetivo. Logo, é necessário que haja mais iterações do mesmo tipo.

### 5.1.3 Segunda iteração

A segunda iteração considerou um aumento de 10% do comprimento da flange e alma dos reforçadores leves. Aumentou, ainda, a espessura em 30% dos elementos com valores

menores que 12mm, e 15% dos elementos com espessura superior a 12mm.

É importante salientar a grande diferença entre as tensões no fundo e no convés, pois não há reforçadores na parte superior da seção mestra. Portanto, nesta iteração aumentou em 40% a espessura do chapeamento de convés, para que haja um aumento na altura da linha neutra, ou  $Y_{LN}$

Os novos valores do dimensionamento modificado está apresentado na tabela 7.

Elemento	Símbolo	Iteração 1 [mm]	Iteração 2 [mm]
Espessura antepara	$t_{bk,l}$	11.8	15.3
Espessura duplo fundo	$t_{db,i}$	14.3	16.4
Espessura casco externo inferior	$t_{db,o}$	14.3	16.4
Espessura duplo costado	$t_{ds,i}$	11.8	15.3
Espessura casco externo lateral	$t_{ds,o}$	14.3	16.4
Espessura do bojo	$t_b$	14.3	16.4
Espessura asa do bojo	$t_{bh}$	14.3	16.4
Espessura caixão	$t_{st}$	10.9	14.2
Espessura convés	$t_d$	11.8	16.5
Espessura longarina central	$t_{g,c}$	12.9	14.8
Espessura longarina	$t_g$	11.6	15.1
Espessura escoa	$t_{sg}$	11.6	15.1
Reforçadores leves	-	(253x8.8x64x10.5)	(278x11.4x70x13.7)

Tabela 7: Valores do dimensionamento na segunda iteração.

Os valores obtidos após a segunda iteração estão apresentadas na tabela 8.

$Y_{LN}$	8.7	$m$	Alquebramento			Tosamento		
$I_{LB}$	680.5	$m^4$	Tensão fundo	51	MPa	Tensão fundo	182	MPa
$I_{LN}$	301.1	$m^4$	Tensão convés	71	MPa	Tensão convés	255	MPa
$Z_{fundo}$	34.7	$m^3$	F.S. Fundo	4.41		F.S. Fundo	1.24	
$Z_{convés}$	24.8	$m^3$	F.S. Convés	3.15		F.S. Convés	0.88	

Tabela 8: Resultados analíticos da segunda iteração.

A razão entre a tensão no fundo e a tensão no convés diminuiu após aumentar o chapeamento no convés, pois a altura da linha neutra passou de 8.4 para 8.7 metros. O fator de segurança no convés para a condição de tosamento, entretanto, segue abaixo de 1, sendo necessário mais interações.

#### 5.1.4 Terceira iteração

Com o objetivo de facilitar a modelagem, e futuramente a escolha de materiais na construção desta seção, a terceira iteração uniformiza todas as espessuras em 20mm. O convés,

por sofrer altas tensões, ficará 10% mais espesso, ou seja, 22mm. Os reforçadores, que por norma apresentam uma espessura menor que o resto dos elementos, apresentará espessura 20% menor, de 16mm.

Foi constatado, por exemplos da literatura, que o comprimento da alma dos reforçadores leves apresenta comprimento muito abaixo do esperado. Portanto este parâmetro teve seu valor dobrado. Por simplicidade, o comprimento da flange foi aproximado por 300mm.

Os dimensionamentos, após sofrerem estas alterações, estão apresentados na tabela 9.

Elemento	Símbolo	Iteração 2 [mm]	Iteração 3 [mm]
Espessura antepara	$t_{bk,l}$	15.3	20
Espessura duplo fundo	$t_{db,i}$	16.4	20
Espessura casco externo inferior	$t_{db,o}$	16.4	20
Espessura duplo costado	$t_{ds,i}$	15.3	20
Espessura casco externo lateral	$t_{ds,o}$	16.4	20
Espessura do bojo	$t_b$	16.4	20
Espessura asa do bojo	$t_{bh}$	16.4	20
Espessura caixão	$t_{st}$	14.2	20
Espessura convés	$t_d$	16.5	22
Espessura longarina central	$t_{g,c}$	14.8	20
Espessura longarina	$t_g$	15.1	20
Espessura escoa	$t_{sg}$	15.1	20
Reforçadores leves	-	(278x11.4x70x13.7)	(300x16x140x16)

Tabela 9: Valores do dimensionamento na terceira iteração.

Os resultados de tensões e inércias obtidos após a terceira iteração estão apresentados na tabela 10.

$Y_{LN}$	8.8	$m$	Alquebramento			Tosamento		
$I_{LB}$	917.0	$m^4$	Tensão fundo	39	MPa	Tensão fundo	139	MPa
$I_{LN}$	400.4	$m^4$	Tensão convés	53	MPa	Tensão convés	190	MPa
$Z_{fundo}$	45.7	$m^3$	F.S. Fundo	5.79		F.S. Fundo	1.62	
$Z_{convés}$	33.3	$m^3$	F.S. Convés	4.22		F.S. Convés	1.18	

Tabela 10: Resultados analíticos da terceira iteração.

Nota-se que as tensões no fundo e no convés, em ambas condições, estão abaixo da tensão de escoamento, portanto o fator de segurança ficou acima de 1. Optou-se por finalizar as interações analíticas na terceira iteração, pois o menor fator de segurança está próximo ao intervalo esperado. Os resultados serão refinados com o método de elementos finitos na próxima seção, que incluirá os elementos transversais.

## 5.2 Método de elementos finitos

O método numérico de elementos finitos foi realizado com o auxílio do software Abaqus. Em todas as figuras, a antepara foi ocultada para ser possível visualizar o interior do recorte da seção mestra.

### 5.2.1 Terceira iteração com elementos transversais

Celebrou-se, no Abaqus, a terceira iteração analítica, incorporando os elementos transversais, que, conforme esperável da teoria, têm pouco efeito na resistência ao puro momento de flexão da viga navio.

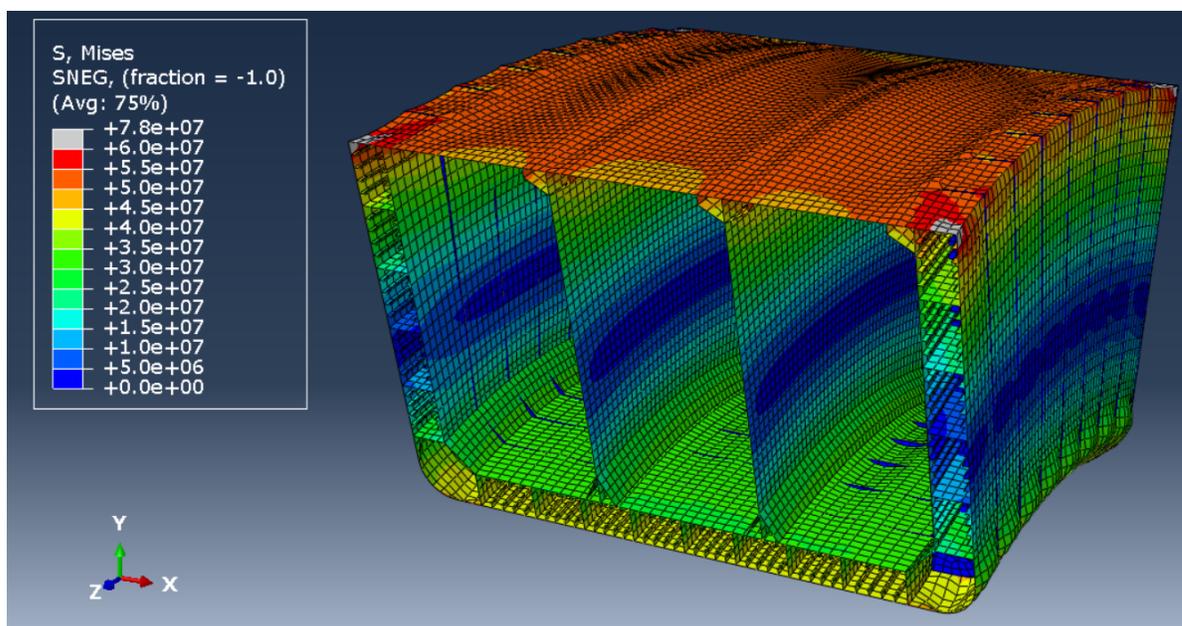


Figura 15: Tensões de von Mises terceira iteração na condição de alquebramento.

Na condição de alquebramento, a tensão no fundo resulta 41 MPa e no convés 54 MPa. As tensões nesta condição podem ser observadas na figura 15. Como já visto, os fatores de segurança de, respectivamente, 5.49 e 4.17, não são relevantes frente a condição de tosamento, que apresenta a maior tensão.

A figura 16 apresenta os valores na condição de tosamento. A tensão no fundo oscilou para 146 MPa e no convés para 193MPa. Fatores de segurança iguais a 1.54 e 1.17, respectivamente. Desta forma, é preciso aumentar o módulo de resistência da seção mestra.

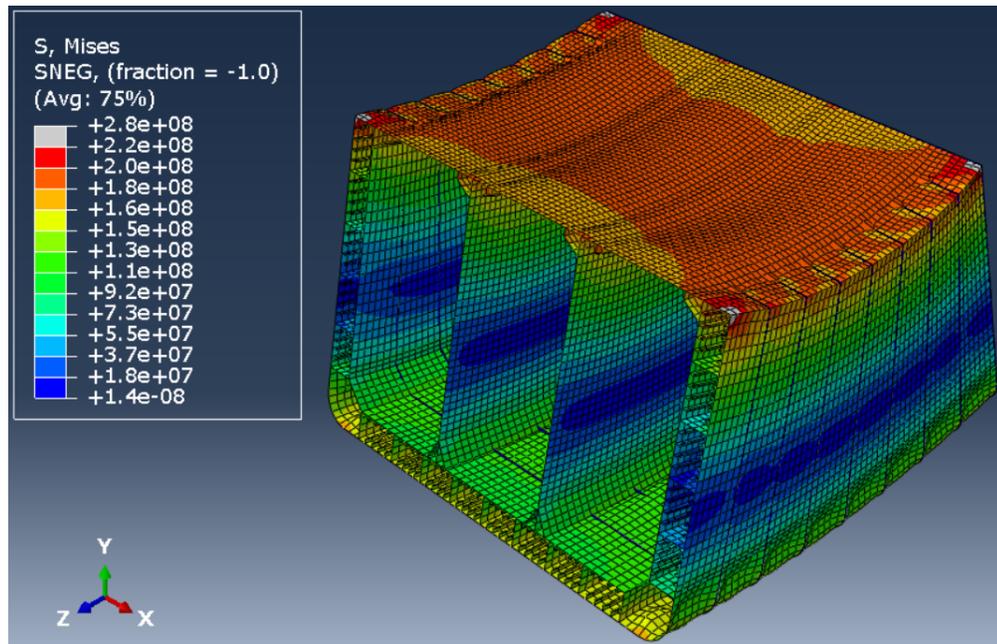


Figura 16: Tensões de von Mises terceira iteração na condição de tosamento.

### 5.2.2 Quarta iteração

Como medida última, levou-se a espessura do convés para 30mm, dos demais itens longitudinais de 20mm para 25mm e dos reforçadores leves à 20mm. Isto alcançou o F.S. mínimo de 1.5 para o crítico caso do convés no tosamento, sem ultrapassar o máximo estipulado de 3.0.

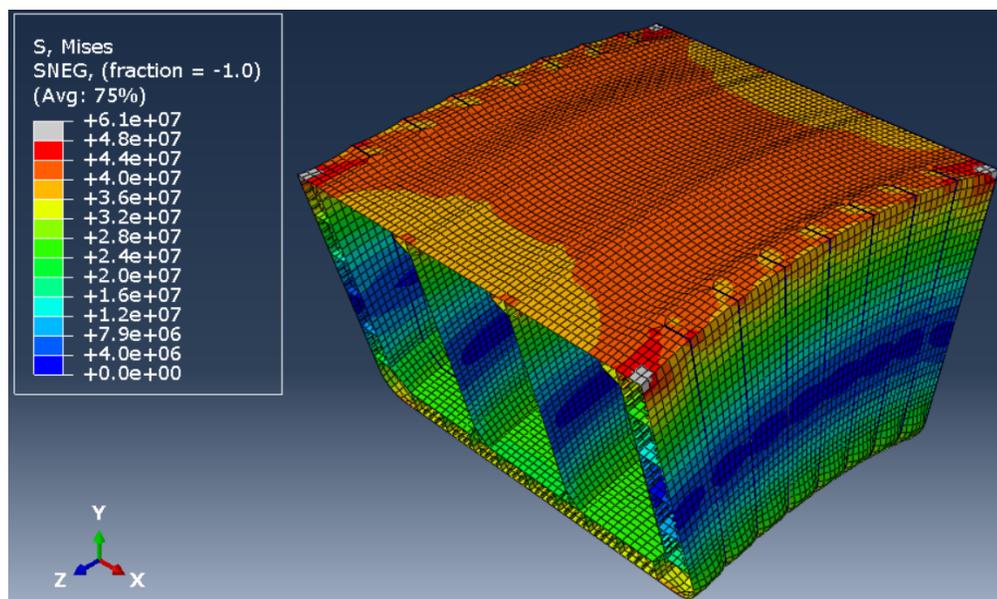


Figura 17: Tensões de von Mises quarta iteração na condição de alquebramento.

A figura 17 apresenta as tensões finais obtidas na condição de alquebramento. A tensão no fundo na condição de alquebramento resultou em 33 MPa e no convés em 42 MPa. Os fatores de segurança aumentaram para 6.82 e 5.36, respectivamente.

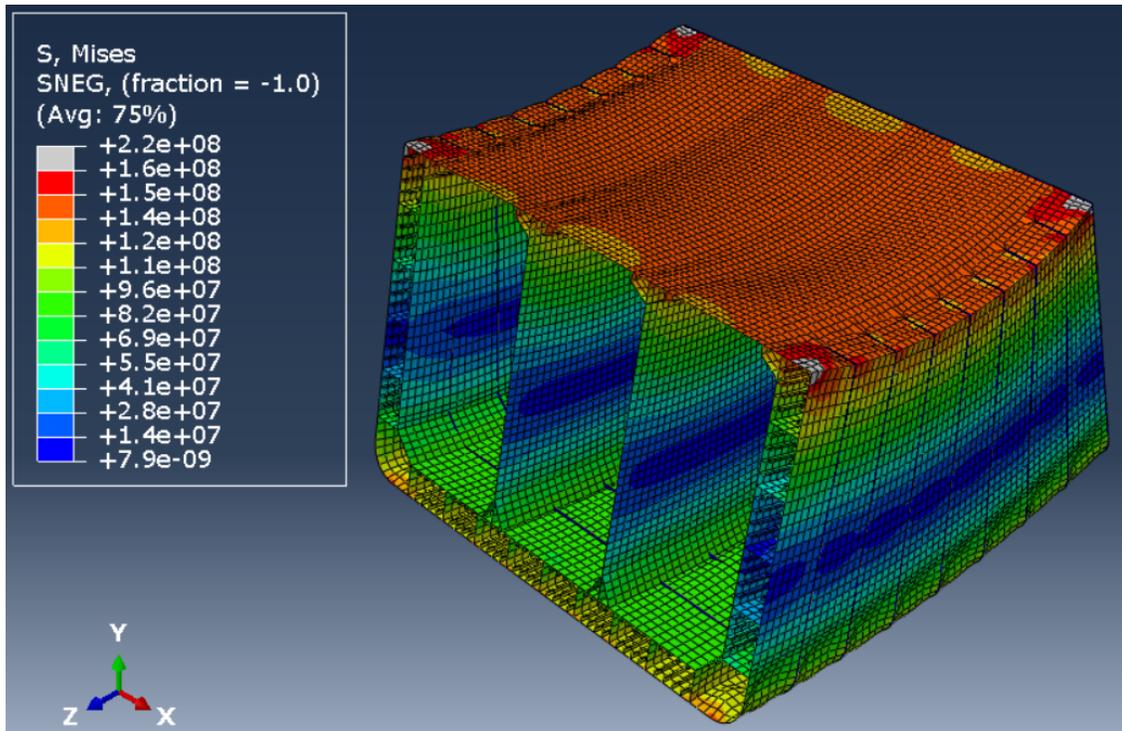


Figura 18: Tensões de von Mises quarta iteração na condição de tosamento.

A figura 18 apresenta as tensões finais obtidas na condição de tosamento. A tensão no fundo caiu para 116 MPa e no convés para 149 MPa. Fatores de segurança iguais a 1.94 e 1.51, respectivamente.

## 6 Conclusão

O correto dimensionamento da seção mestra de um navio contribui para um bom desempenho operacional da embarcação, otimizando sua estabilidade, manobrabilidade e eficiência. Em adição, é essencial para garantir a segurança da embarcação, da tripulação e das cargas transportadas. O presente trabalho, desenvolvido ao longo do curso de Mecânica de Estruturas Navais e Oceânicas II, apresenta o desenvolvimento de uma seção mestra de um navio panamax, envolvendo tópicos de mecânica dos sólidos, resistência dos materiais e mecânica analítica.

O projeto de dimensionamento dos elementos transversais e longitudinais seguiu as normas estruturais internacionais fornecidas pela IACS, que assegura a compatibilidade com reconhecidos padrões de segurança e confiabilidade. Ainda pela norma, foram calculados os momentos fletores de onda para duas condições críticas de esforços: alquebramento e tosamento.

Os resultados iniciais se mostraram pouco resistentes em situações onde o momento aplicado era alto, pois o dimensionamento adotou valores mínimos permitidos pela norma. Houve iterações analíticas aumentando a espessura e o tamanho dos reforçadores leves, com o objetivo de atingir o fator de segurança requerido. As iterações consideraram a modelagem posterior e a construção do navio, unificando as espessuras do chapeamento.

A literatura e verificação de seções mestras de navios já construídos mostrou-se importante na identificação de eventuais problemas. Durante a segunda iteração, verificou-se que o comprimento da flange dos reforçadores leves estava muito abaixo de outras embarcações da mesma classe, causando concentração de tensões indesejadas. O problema foi corrigido na terceira e última iteração.

Com o auxílio do software Abaqus, foi aplicado o método de elementos finitos, modelando tridimensionalmente a seção mestra com seus elementos transversais e longitudinais com valores do dimensionamento final após as iterações. Os resultados obtidos com tensões de von Mises se apresentaram coerentes com o método analítico feito anteriormente.

Portanto, pode-se concluir que a tarefa obteve sucesso em sua execução, contemplando conceitos analíticos de Mecânica de Estruturas Navais e Oceânicas I e a implementação de métodos numéricos para análise de tensões. Trouxe, ainda, a conexão de fundamentos mostrados em aula com normas internacionais que são amplamente utilizadas pela indústria naval.

## Referências

- [1] Dassault Systemes Simulia, Inc. *ABAQUS (2014) Analysis User's Manual, Version 6.14*. Dassault Systemes, Inc., 2014. Acessado em 11 de junho de 2023.
- [2] Jeom Kee Hughes, Owen F.; Paik. *Ship Structural Analysis and Design*. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 2010.
- [3] IACS. Common structural rules for double hull oil tankers with length 150 metres and above, 2008. <https://docplayer.net/147991633-Common-structural-rules-for-double-hull-oil-tankers-with-length-150-metres-and-above.html>. Acessado em: 29.06.2023.
- [4] IACS. Common structural rules for bulk carriers and oil tankers, 2023. <https://iacs.org.uk/download/8108>. Acessado em: 29.06.2023.
- [5] Egor P Popov. *Introdução à Mecânica dos Sólidos*. Editora Blucher, 7 edition, 1978.
- [6] Marine Traffic. Hellespont pride. [https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:715923/mmsi:232012089/imo:9351414/vessel:HELLESPONT\\_PRIDE#Photos](https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:715923/mmsi:232012089/imo:9351414/vessel:HELLESPONT_PRIDE#Photos). Acessado em: 21.06.2023.

## A Explorações com Abaqus

Até o início deste trabalho, não era do conhecimento da dupla como implementar momento em modelo do Abaqus, o que é imprescindível para simulação conforme esforços prescritos por norma. Em realidade, só se sabia aplicar pressão constante em painel reforçado.

Este apêndice registra o processo de aprendizagem desta implementação, com exploração de abordagens no Abaqus, comparação com modelagens mais simples e com métodos analíticos. Justifica-se este anexo pois, tendo certa extensão, complementa como argumento a metodologia adotada.

Primeiro, respeitando as hipóteses da teoria de viga, toma-se uma seção simples de  $20mm$  por  $100mm$ , com comprimento de  $500mm$ , conforme a figura 19, submetida a momento fletor constante em suas extremidades de  $2 \cdot 10^6 Nmm$ , negativo em acordo com Popov (1978) [5].

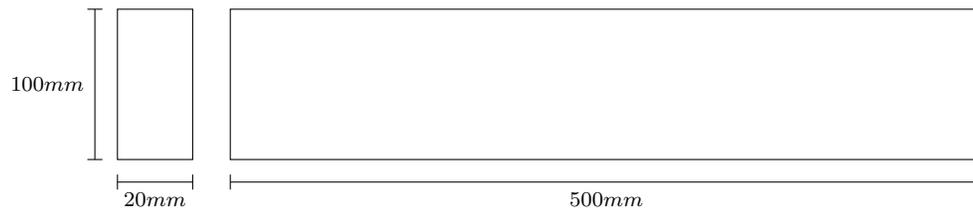


Figura 19: Viga de validação

É imediato que  $I = \frac{bh^3}{12} = 1.667 \cdot 10^6 mm^4$ . Portanto, para a extremidade vertical superior,  $y = 50mm$ , vale que  $Z = \frac{I}{y} = 3.333 \cdot 10^4 mm^3$  e  $\sigma_x = M/Z = 59.988 MPa$ . No Abaqus, a construção 3D tem como destaque os seguintes passos:

- Criação da parte sólida por extrusão;
- Definição do material, aqui utilizou-se um aço com  $\rho = 7.8t/m^3$ ,  $E = 200GPa$  e  $\nu = 0.3$ ;
- Criação de ponto de referência (RP) em cada extremo da viga;
- Constraint da viga ao RP. Conforme documentação do Abaqus [1] e realização de testes próprios, há pelo menos duas opções viáveis<sup>3</sup>:
  - Rigid Body com tipo Tie (nodes) aplicado a superfície do extremo correspondente;
  - Coupling de tipo Kinematic também aplicado entre o RP e sua superfície;
- Aplicação dos momentos, de igual módulo e com orientação e sinal apropriados, aos RPs.

<sup>3</sup>Multi-point constraints (MPCs) pode ser adequado, mas não foi possível testa-lo pois a subrotina não estava instalada. De toda sorte, as duas formas investigadas já são satisfatórias.

Conforme a figura 20, a implementação foi bem sucedida, com o erro de pouco menos de 2.5%, também concordando com a orientação esperada. Há uma pequena região na fronteira que foge a teoria, mas pode ser descartada sem prejuízo.

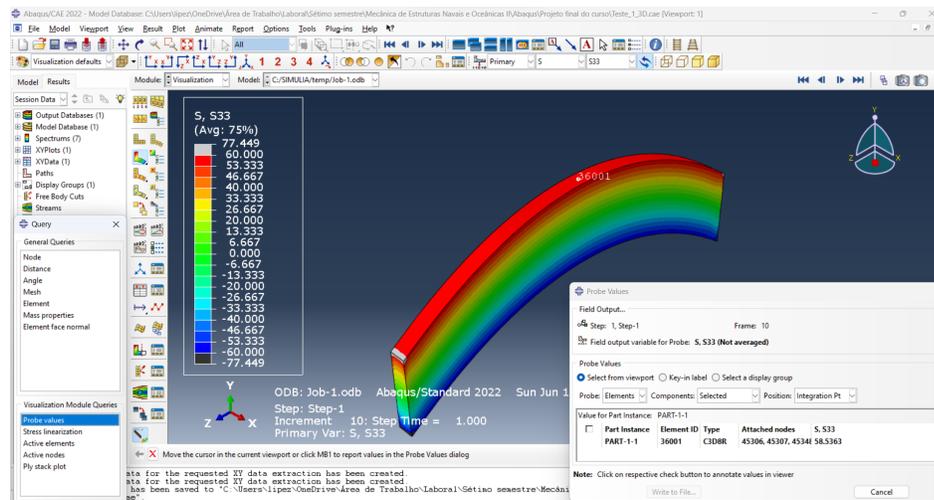


Figura 20: Tensão principal, viga de validação simulada.

Recupera-se também, fig. 21, a hipótese de que a tensão longitudinal  $\sigma_x$  é, para o problema de viga simples, única tensão relevante, como acusado por von Mises (a despeito que este é valor absoluto).

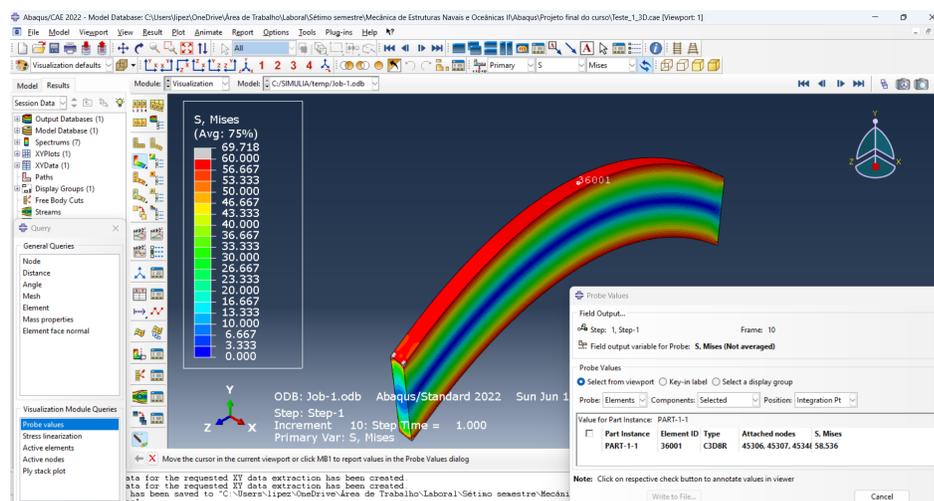


Figura 21: Tensão de von Mises, viga de validação simulada.

A implementação 3D é prioritária pois esta que será utilizada para avaliação do projeto da seção mestra resistente. De toda sorte, a primeira validação foi executada também em 1D (beam) e 2D (shell), fornecendo os resultados esperados, com erros de 0% e 5%, respectivamente.

Se aproximando do formato da seção mestre, um segundo teste foi realizado. Conforme a figura 22, toma-se um fragmento de viga navio de pontal igual a  $20m$ , boca de  $40m$  e comprimento de  $30m$ . A espessura da chapa foi proposta em  $0.1m$  e o momento em  $10 \cdot 10^9 Nm$ .

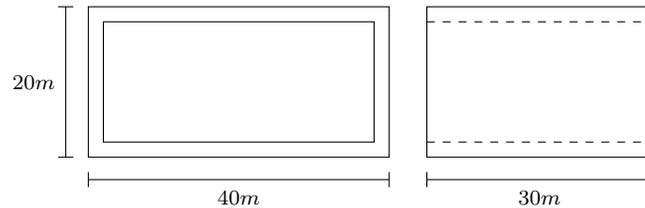


Figura 22: Teste com viga vazada

Da geometria, calcula-se  $I = 921m^4$ ,  $y_{LN} = 10m$  e  $Z = 92m^3$ . Portanto, a tensão máxima de flexão é, em módulo,  $\sigma_x = 108.5MPa$ . No Abaqus, como esperável, a construção 1D retorna o resultado praticamente exato ( $|erro| < 0.5\%$ ). A construção 2D, conforme a figura 23, também é muito bem sucedida, com erro menor que 1%.

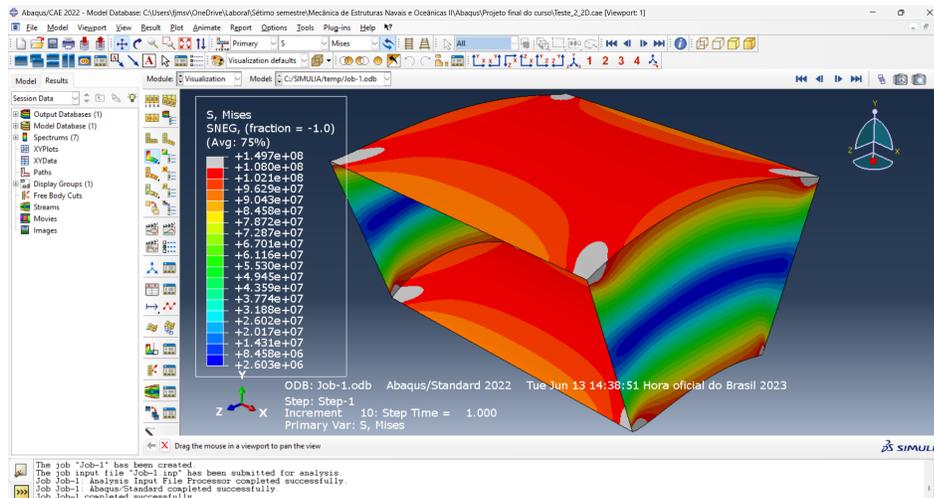


Figura 23: Tensão de von Mises, viga vazada.

A construção 3D tem tensão de von Mises com erro menor que 2%. Especula-se que, embora a viga não seja esbelta, o momento constante garante que a abordagem teórica continue válida. Todavia, conforme a figura 24, é importante destacar que a tensão de flexão, sempre descartados os picos irrealistas nos vértices, chega a 5% de aumento, que, embora nada comprometedor, se atribui a projeção dos cisalhamentos na direção longitudinal, conforme técnicas como o círculo de Mohr.

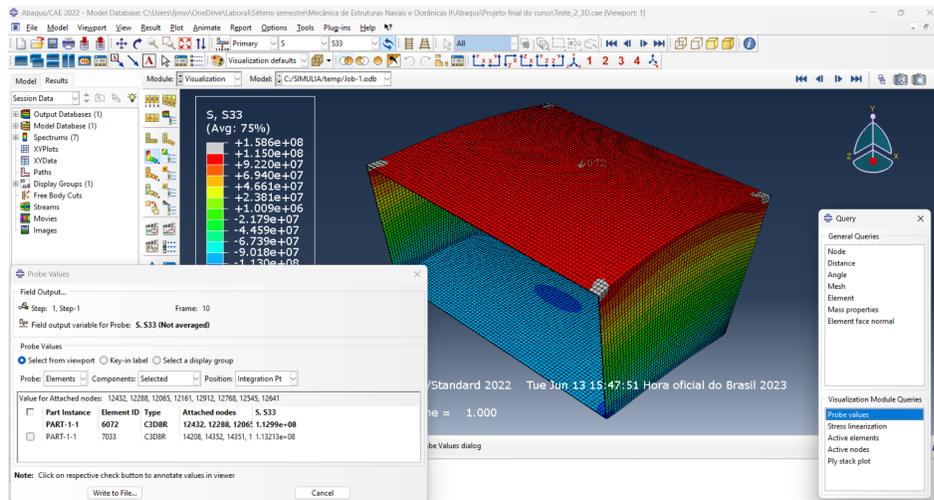


Figura 24: Tensão principal, viga vazada.

## B Comentário sobre deslocamento vertical

A aplicação direta da equação (24) é muito significativa, pois a curva do momento fletor da embarcação depende do formato do casco – presença de trim e balizas não idênticas implicam existência de curva de empuxo variável – e da distribuição das cargas da embarcação. Ou seja, precisaria-se ter, em algum nível, o formato do costado e a tabela de pesos e centros. Assim, empregando normas de sociedades classificadoras no design, vê-se que também é possível, em primeiras análises, fazer estimativas estruturais mais autônomas e imediatas no projeto. De fato, a partir da equação da linha elástica (25):

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (25)$$

Com  $E$  o módulo de elasticidade do material, pode-se recuperar o deslocamento vertical  $v(x)$  esperado em cada ponto de  $\Delta x$  por (26):

$$v(x) = \frac{M(x)}{EI} \left( \frac{x^2}{2} + bx + c \right) \quad (26)$$

Com  $b$  e  $c$  determináveis a partir das condições de contorno locais  $v(x_1) = v_1$  e  $v(x_2) = v_2$ ,  $x_1$  e  $x_2$  extremos de  $\Delta x$ , porém  $v_1$  e  $v_2$  obteníveis apenas a partir das condições de contorno globais, o que impescinde do conhecimento de  $M(x)$  em todo o domínio.

## C Planilha para cálculo dos escantilhões

Para o cálculo teórico do módulo de resistência de seção transversal, convém construir uma tabela conforme destacado na seção 4.2. O software utilizado foi o Excel, da estadunidense Microsoft. Segue registro de sua estrutura:

Figura 25: Planilha desenvolvida.

Com vistas a necessidade de incluir dezenas de itens, e alterá-los frequentemente nas iterações, a calculadora autoral foi escrita de forma bastante responsiva. Destacam-se suas principais capacidades:

- Inputs (itens em amarelo):
  - A célula “Representação” admite as entradas “Seção inteira” e “Simetria” (meia-boca), e as fórmulas se ajustam em conformidade;
  - O pontal é utilizado na avaliação do módulo de resistência no convés;
  - Informar, ou não, as medidas de um item permite identificar qual a sua natureza. Por exemplo, no bilge, ao informar apenas braço, espessura e raio, o programa entende tratar-se de um bojo e utiliza as fórmulas apropriadas:

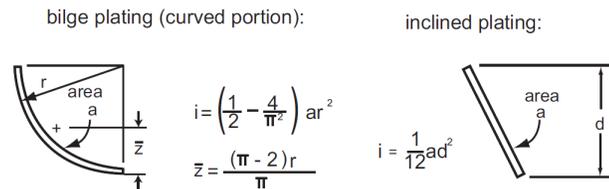


Figura 26: Exemplos longitudinais. Reproduzido de Hughes (2010) [1].

- A tensão de escoamento do material deve ser informada na célula **N14** (supõe-se igual para todos os itens);
- Os momentos fletores de aquebramento e tosamento, obtidos por norma, devem ser inseridos, respectivamente, nas células **Q2** e **Q9**;
- Outputs:
  - Os cálculos e somatórias são realizados conforme explicitado em 4.2;
  - Obtêm-se, primeiro, os resultados que só dependem da geometria da seção mestra, como a altura da linha neutra;
  - Com os momentos, recuperam-se as tensões no fundo e no convés;
  - Por fim, com a tensão de escoamento, tem-se uma estimativa do fator de segurança.

## D Representação do dimensionamento preliminar

A despeito dos reforçadores leves, a figura 27 ilustra a estrutura do navio a meia-nau avaliada na seção 5.1.

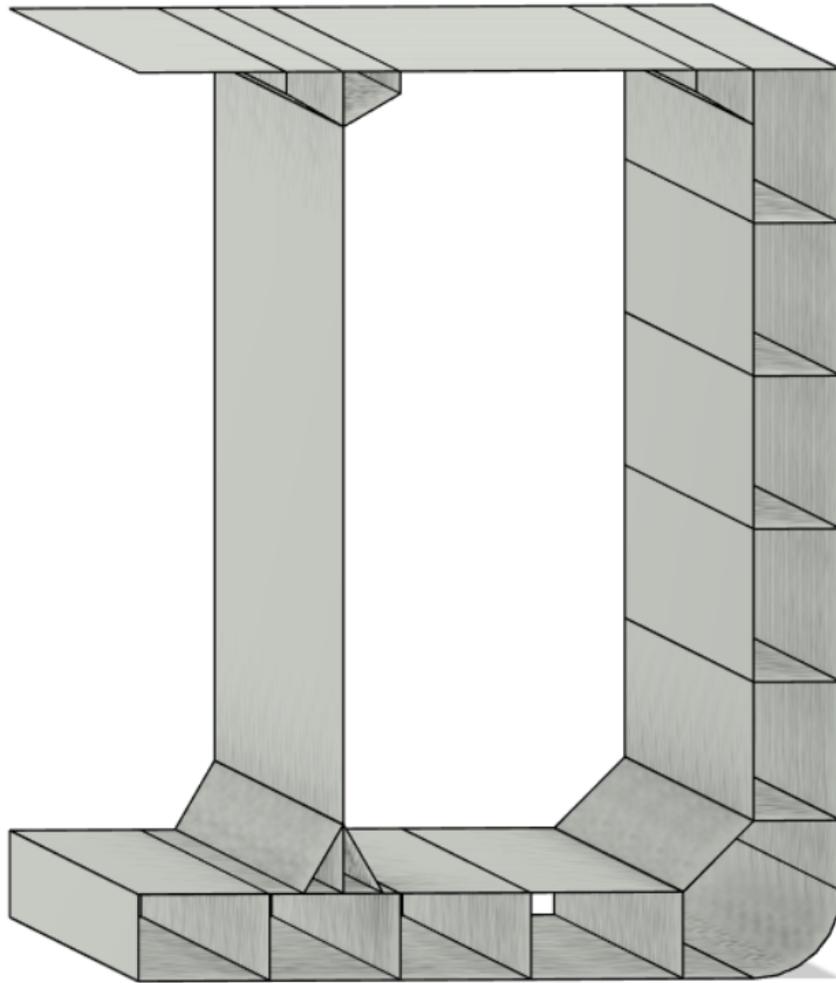


Figura 27: Representação tridimensional, longitudinais pesados.

Na página seguinte, mesma representação em desenho 2D.

